

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОНОВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Г.Ф. КОНАХОВИЧ, І.О. КОЗЛЮК, Ю.Б. КОВАЛЕНКО

Анотація. Присвячено вирішенню завдання виявлення та уточнення оптимізаційних показників ефективності експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден, що є актуальним метрологічним завданням. Виконано аналіз можливих варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден. Сформульовано поняття базового варіанта побудови системи технічної експлуатації та оновлення. За допомогою визначальних класифікаційних ознак виділено базові варіанти побудови системи технічної експлуатації та оновлення. Визначено поняття вторинних і конкуруючих різновидів базового варіанта побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах. Для цього введено класифікаційні ознаки, що характеризують властивості виробів радіоелектронних систем: місце відновлення виробу, місце фіксації відмови виробу та наявність засобів експлуатаційного контролю в організації технічного обслуговування.

Ключові слова: обслуговування (оновлення) радіоелектронних систем, авіаційні радіоелектронні системи, оцінювання ефективності базових варіантів.

ВСТУП

Ефективна експлуатація нових повітряних суден можлива лише в разі дотримання правил сертифікації виробництва (обладнання) авіаційної техніки. Гостро постає питання науково-обґрунтованого вибору стратегії технічного оновлення радіоелектронної системи, оскільки остання одна з найдорожчих. Крім того, вибір стратегії технічного оновлення радіоелектронної системи значною мірою впливає на безпеку та регулярність польотів повітряних суден. Це можливо тільки за умови мінімізації витрат на їх технічне обслуговування.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питанню оптимізації процесу технічної експлуатації транспортних систем присвячено праці вітчизняних і зарубіжних авторів [1–7]. У деяких працях оптимізація здійснюється за імовірнісними показниками, зокрема за критерієм максимуму коефіцієнта готовності систем, в інших [3, 4, 6] використовуються техніко-економічні показники. Проте ще не визначено комплексного показника, що дозволяє в аналітичному вигляді взаємопов'язано розглядати експлуатаційні витрати, вартість обмінного фонду і показники достовірності контролю, від яких значною мірою залежить правильність прийняття рішення про демонтаж блоків з борта.

У системах реального часу життєво важливим є, по-перше, щоб у кожен момент часу оброблювана інформація була якомога більш актуальною, а по-друге, щоб система вчасно реагувала на вхідні дані, які надходять, причому порушення цих вимог призводить до катастрофічних наслідків. У подібних системах потрібне точне регулювання взаємодії датчиків (sensors), приводів (actuators) і функцій керування зворотним зв'язком (тобто функцій оброблення інформації та видачі керувальних впливів). Для цього такі завдання запускаються строго періодично, тобто кожне з них повинно періодично стартувати через однакові проміжки часу.

Отже, для підвищення надійності кожному процесу відповідає свій пристрій. Однак натеper розміри систем настільки збільшились, що подібна організація архітектури призвела б до непомірної ваги і енергоспоживання системи. Вирішенням є поділ ресурсів, тобто виконання декількох завдань на одному процесорі. У зв'язку з цим актуальності набуває завдання перерозподілу для декількох процесів, які виконуються на одному або декількох пристроях.

Планування завдань може бути динамічним (тобто здійснюваним у реальному масштабі часу в ході роботи системи) або статичним (коли розклад складається до запуску системи). Виконання завдань планування є двох видів: з перериваннями (preemptive), коли виконання завдання дозволяється на деякий час відкласти для запуску іншого завдання, і без переривань (non-preemptive), коли цього робити не дозволяється.

У цій роботі розглянемо питання статичного планування строго періодичних завдань з перериваннями.

Строго періодичне завдання задається двома параметрами: періодом (часом між двома послідовними стартами завдання) і тривалістю (часом, необхідним для виконання завдання в межах одного періоду).

На відміну від класичного випадку, коли періодичність не є строгою [8], перерозподіл для набору чітко періодичних завдань з перериваннями розбивається на два етапи:

- перерозподіл для початкових точок даної системи періодичних процесів;
- розподіл решти точок у межах заданих періодів.

За визначенням строго періодичного завдання усі точки старту утворюють арифметичну прогресію. Оскільки два завдання не можуть стартувати одночасно, арифметичні прогресії для різних завдань не повинні конфліктувати, тобто не повинні мати спільних точок. Відома достатня умова безконфліктності: початкові точки повинні мати різні залишки за модулем найбільшого загального подільника відповідних періодів, зокрема, взаємна простота періодів негайно призводить до неможливості побудови перерозподілу.

У разі, коли завдань усього два, ця умова є критерієм, що дозволяє ефективно побудувати перерозподіл. Однак для випадку довільної кількості завдань подібного критерію поки не знайдено.

Наявні підходи до проблеми планування строго періодичних завдань не використовують повною мірою взаємозв'язки між періодами (див., наприклад, [9], [10]–[12]), що призводить до істотного збільшення часу пошуку. Існуючі алгоритми вирішують проблему пошуку стартових точок або

із застосуванням грубих евристик [12], або перебиранням з різними оптимізаціями [9], [10]. Однак перебирання має такий недолік: якщо перерозподіл побудувати неможливо, потрібно аналізувати всі можливі варіанти.

У цій роботі вирішуємо проблему першого етапу — пошуку системи початкових точок перерозподілу. У такій постановці нехтуємо тривалістю завдань. Використовуючи результати теорії графів [13] і теорії чисел, пропонуємо новий підхід до аналізу побудови перерозподілу для строго періодичних завдань, заснований на вивченні структури груп їх періодів.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи — розроблення організаційної системи експлуатації бортових радіоелектронних систем перспективних повітряних суден.

Для розроблення організаційної системи експлуатації бортових радіоелектронних систем перспективних повітряних суден необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати можливі варіанти побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем;
- вибрати показники ефективності побудови системи технічної експлуатації та оновлення і обґрунтувати узагальнений показник ефективності системи технічної експлуатації.

Під базовим варіантом побудови системи технічного обслуговування і ремонту будемо розуміти таку організацію експлуатації радіоелектронної системи, за якої виконується певний перелік операцій технічного обслуговування за місцем виникнення відмови.

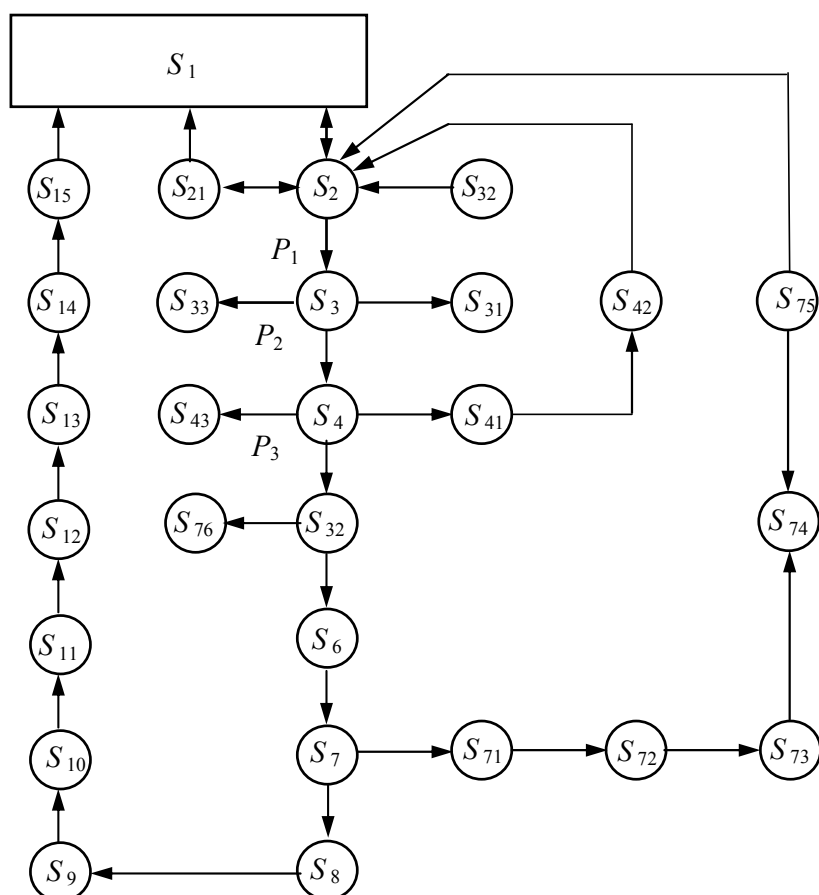
Тобто кількість операцій технічного обслуговування, що характеризуються станами, графом, зображеним на рисунку [3], є постійною для кожного різновиду обраного базового варіанта.

Похідним різновидом базового варіанта будемо називати такий варіант побудови системи технічного обслуговування і ремонту, у якому місце відновлення елемента радіоелектронної системи визначається його ознаками.

Наприклад, варіант $A_i B_3 C_1 D_1 E_2 F_1$ визначає відновлення блока на заводі-виробнику / виготівнику (ЗВ) (D_1), тому як блок має гарантію ЗВ (ознака C_1).

Оцінювати ефективність базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем будемо за допомогою техніко-економічних показників ефективності [4]. До технічних належать комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання, а до техніко-економічних: питомий середній прибуток, питомі середні витрати.

З огляду на те, що один з базових варіантів може бути застосований для радіоелектронних систем, відмова якого призводить до невиконання його функцій (значення класифікаційної ознаки), необхідно, вибираючи показник ефективності, враховувати ймовірність, з якою виконуватиметься нормальне функціонування цієї системи (імовірність перебування системи в працездатному стані).



Граф можливих станів блока радіоелектронної системи

Оскільки для радіоелектронних систем з класифікаційною ознакою (A_1) до безвідмовності в процесі використання за призначенням (S_1) ставляться підвищені вимоги, то як показник безвідмовності слід використовувати: для систем з класифікаційною ознакою (B_1) (невідновлювана система) — апостеріорну ймовірність безвідмовної роботи (P_A), для систем з ознакою \bar{B}_1 (відновлювані з різною глибиною системи) — експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи P_E .

Апостеріорною ймовірністю безвідмовної роботи (P_A) називатимемо умовну ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі (t_k, t) за умови, що за результатами експлуатаційного контролю в моменти $\overline{t_k}, t$ у процесі система визнавалася працездатною.

Під експлуатаційною ймовірністю безвідмовної роботи розумітимемо ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі напрацювання (t_k, t) з урахуванням того, що в моменти $\overline{t_k}, t$ проводилася технічна експлуатація — експлуатаційний контроль і відновлення забракованих систем.

Отже, ефективність базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах доцільно оцінювати за

критерієм «надійність–витрати», який містить два показники ефективності. Один з них характеризує надійність радіоелектронних систем, а другий — витрати на технічну експлуатацію і втрати внаслідок незапланованого простою повітряних суден через заміну легкознімного блока, що відмовив.

Витрати на технічну експлуатацію будемо характеризувати питомими середніми витратами, тобто середніми витратами, що припадають на одиницю часу використання системи. Крім того, для систем з ознакою B_1 питомі середні витрати включатимуть в себе витрати на контроль, заміну легкознімного блока і втрати через вимушені простой повітряного судна. Питомі середні витрати для таких систем позначатимемо через C_n . Для відновлюваних систем, крім зазначених вище витрат, необхідно враховувати також додаткові витрати на відновлення. Ці витрати позначатимемо через C_b .

Крім того, коли наслідки відмови системи можна оцінити економічно як показник ефективності, необхідно використовувати економічний показник у вигляді питомих середніх витрат. Показник питомих середніх витрат, який позначатимемо через V , може бути застосований під час оцінювання ефективності стратегії для виробів, що мають класифікаційну ознаку A_2 .

Цей показник містить витрати на технічну експлуатацію, втрати через перебування системи в стані прихованої відмови під час польоту повітряного судна та втрати внаслідок перевищення часу заміни блока, що відмовив, радіоелектронної системи, тривалості стояння.

Наведені показники ефективності можуть бути використані тільки в тих випадках, коли задана наперед ознака, яка характеризує наявність певного виду наземного засобу експлуатаційного контролю, та відповідно сформований обмінний фонд і варіювати ними не можна.

Проте під час порівняльного аналізу базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах і їх різновидів необхідно мати показники, що враховують не тільки характеристики операцій контролю та відновлення, але і склад наземного засобу експлуатаційного контролю та обмінного фонду (логістика). Тому як економічний показник ефективності системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах будемо використовувати наведені витрати, що являють собою суму собівартості системи технічної експлуатації та оновлення і нормативного прибутку:

$$B = C_{ек} + E_n K,$$

де $C_{ек}$ — собівартість експлуатації системи протягом року; E_n — питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю і обмінний фонд; K — нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Собівартість експлуатації радіоелектронної системи протягом року має включати в себе річні витрати на експлуатацію системи, амортизаційні відрахування на наземні засоби експлуатаційного контролю і обмінний фонд, а також для варіанта витрати на оновлення комплектів, зокрема електрорадіоматеріали та друковані плати.

Наведені витрати для варіанта такі. Оскільки варіант не передбачає використання в організації технічного обслуговування наземних засобів експлуатаційного контролю, то інвестиційні вкладення будуть пов'язані

тільки з обмінним фондом блоків радіоелектронної системи в організації технічного обслуговування.

Інвестиційні вкладення в обмінний фонд (ОФ) визначаються за формулою

$$K_{\text{ОФ}}^{(0)} = \sum_{i=1}^m Z_i F_i / q_i, \quad (1)$$

де m — кількість блоків радіоелектронної системи; Z_i — закупівельна ціна i -го блока; F_i — кількість блоків i -го типу в обмінному фонді організації технічного обслуговування; q_i — кількість посадкових місць для блоків i -го типу у всьому приписному парку повітряного судна.

Якщо система складається з однотипних блоків, то формула (1) набуде вигляду

$$K_{\text{ОФ}} = mZ / q,$$

де Z — ціна.

Собівартість експлуатації системи легко визначити, знаючи питомі середні витрати, що припадають на годину польоту для однієї системи (блока радіоелектронної системи).

Питомі середні витрати визначаються з урахуванням графу, зображеного на рисунку, в такий спосіб:

$$C_e^{W_1}(t_n) = \frac{1}{t_n} [C_{S_2} t_{S_2} + P_1 (C_{S_3} t_{S_3} + a C_{S_{31}} \Delta t_{S_{31}} + C_{S_{32}} t_{S_{32}}) + P_2 C_{S_{33}}],$$

де t_n — тривалість польоту повітряного судна; C_{S_2} — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою вбудованих систем контролю; C_{S_3} — середні витрати за одиницю часу на демонтаж блока з борта повітряного судна; $C_{S_{32}}$ — середні витрати за одиницю часу на установлення блока на борт повітряного судна; $C_{S_{31}}$ — середні витрати за одиницю часу через простій повітряного судна через заміну блока, що відмовив; $C_{S_{33}}$ — середня вартість відновлення блока, що відмовив; P_1 — імовірність демонтажу блока вбудованих систем контролю; P_2 — імовірність відправлення блока за його відсутності в обмінному фонді організації технічного обслуговування;

$$a = \begin{cases} 0, & \text{at } \Delta t_{S_{31}} > t_C, \\ 1, & \text{at } \Delta t_{S_{31}} \leq t_C, \end{cases} \text{ where } t_C \text{ — parking time in the } AP.$$

Примітка: для варіанта W_1 імовірності P_1 і P_2 рівні між собою.

Таким чином, собівартість експлуатації блока радіоелектронної системи протягом року визначається з виразу

$$C_e^{W_1} = C_e^{W_1}(t_n)(T) + E_{\text{ОФ}} K_{\text{ОФ}}^{W_1}.$$

Наведені витрати на експлуатацію блока радіоелектронної системи протягом року в процесі організації системи технічної експлуатації та оновлення відповідно до варіанта визначаються з виразу:

$$B^{W_1} = C_e^{W_1} + (E_{\text{ОФ}} + E_{\text{н}})K_{\text{ОФ}}^{W_1}.$$

Визначимо витрати для варіанта. Для цього варіанта характерна наявність в організації технічного обслуговування наземних засобів експлуатаційного контролю першого рівня, що дозволяє здійснювати контроль демонтованих з повітряного судна блоків радіоелектронної системи.

Інвестиційні вкладення в систему технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах, побудовану згідно з варіантом, включатимуть вартість обмінного фонду та інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня. Основне призначення наземних засобів експлуатаційного контролю — недопустити відправлення на ЗВ або аваріаремонтний завод помилково знятих (тобто робочих) блоків.

Позначимо інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня, необхідні для контролю даного типу системи. Тоді величина

$$K_1^{(1)} = mK_1 / \sum_{i=1}^m q_i$$

визначить питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня в розрахунку на один блок системи на борту повітряного судна, а величина

$$K_1^{(m)} = m^2 K_1 / \sum_{i=1}^m q_i$$

дорівнюватиме питомим капітальним вкладенням у наземні засоби експлуатаційного контролю в розрахунку на одну систему, що складається з блоків. Якщо $q_i = q$ ($i = \overline{1, m}$), то цілком очевидно, що питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня становитимуть

$$K_1^{(m)} = mK / q.$$

Питомі інвестиційні вкладення в обмінний фонд і наземні засоби експлуатаційного контролю-1 визначаються за формулою

$$K = K_{\text{ОФ}}^{W_2} + K_1^{(m)}.$$

Звертаючись до графу, зображеному на рисунку, визначимо питомі середні витрати під час організації системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах відповідно до варіанта :

$$C_E^{W_2}(t_n) = \frac{1}{t_n} [C_{S_2} t_{S_2} + P_1 (C_{S_3} t_{S_3} + C_{S_4} t_{S_4} + C_{S_{42}} t_{S_{42}} + a C_{S_{41}} t_{41}) + P_3 C_{S_{43}}],$$

де C_{S_4} — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-1 демонтованого блока; $C_{S_{42}} = C_{S_{42}} = C_{S_{32}}$; $C_{S_{41}} = C_{S_{31}}$; P_3 — імовірність відправлення блока на оновлення після контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-1; $C_{S_{43}} = C_{S_{33}}$; $t_{S_{41}}$ — середній час екстреної доставки блока у випадку його відсутності в обмінному фонді організації технічного обслуговування.

Наведені витрати на експлуатацію блока радіоелектронної системи протягом року під час організації системи технічної експлуатації та оновлення відповідно до варіанта визначаються з виразу:

$$B^{W_2} = C_e^{W_2}(t_n)(T_n) + (E_n + E_{\text{ОФ}})K_{\text{ОФ}}^{(0)} + (E_n + E_A)K_1^{(m)}.$$

Перейдемо до визначення витрат у системі технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах, побудованій відповідно до базового варіанта. Для цього варіанта характерна наявність в організації технічного обслуговування наземних засобів експлуатаційного контролю першого і другого рівнів. Блоки радіоелектронної системи відновлюються в організації технічного обслуговування заміною структурно-замінних одиниць, що відмовили, а структурно-замінні одиниці відновлюються на ЗВ або авіаремонтному заводі.

Позначимо через K_2 інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю другого рівня. Тоді

$$K_2 = K_2^A / N_1,$$

де K_2^A — сумарні інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю другого рівня (купівельна ціна плюс вартість площ для розміщення наземних засобів експлуатаційного контролю); N_1 — кількість типів систем, контрольованих за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю.

Величина $K_2^{(m)}$ визначає питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю в розрахунку на одну систему, що складається з m блоків:

$$K_2^{(m)} = m^2 K_2 / \sum_{i=1}^m q_i.$$

Якщо в системі блоки однотипні, тобто $q_i = q$ ($i = \overline{1, m}$), то питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю визначаються за формулою

$$K_2^{(m)} = m^2 K_2 / \sum_{i=1}^m q_i.$$

Для варіанта W_3 характерне комплектування обмінного фонду на рівні блоків і структурно-замінних одиниць. Тому питомі інвестиційні вкладення в обмінний фонд становитимуть

$$K_{\text{ОФ}}^{(1)} = \sum_{i=1}^m Z_i F_i / q_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} Z_{i,j} / q_{i,j}, \quad (2)$$

де n_i — кількість типів структурно-замінних одиниць в i -му блоці системи; $Z_{i,j}$ — закупівельна ціна структурно-замінних одиниць j -го типу в i -му блоці; $F_{i,j}$ — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу i -го блока в обмінному фонді авіаційно-технічної бази; $q_{i,j}$ — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу у всій сукупності блоків i -го типу в організації технічного обслуговування.

Якщо система складається з однотипних блоків, то формула (2) набуде вигляду

$$K_{\text{ОФ}}^{(1)} = m \left(Z F / q + \sum_{j=1}^{n_0} Z_j F_j / q_j \right),$$

де n_0 — кількість типів структурно-замінних одиниць у будь-якому з однотипних блоків системи; Z_j — купівельна ціна структурно-замінних одиниць j -го типу; F_j — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу в обмінному фонді організації технічного обслуговування; q_j — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу у всій сукупності однотипних блоків.

Скориставшись графом, зображеним на рисунку, визначимо питомі середні витрати під час організації системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах відповідно до варіанта:

$$C_e^{W3}(t_n) = \frac{1}{t_n} \left[C_{S_2} t_{S_2} + P_1 + (C_{S_3} t_{S_3} + C_{S_4} t_{S_4} + C_{S_{75}} t_{S_{75}} + a C_{S_{41}} \Delta t_{S_{41}}) + \right. \\ \left. + P_3 \sum_{i=5}^7 C_{S_i} t_{S_i} + \sum_{j=1}^4 C_{S_{7j}} t_{S_{7j}} + P_4 C_{S_{76}} \right], \quad (3)$$

де C_{S_5} — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-2; C_{S_6} — середні витрати за одиницю часу на часткове розбирання блока; C_{S_7} — середні витрати за одиницю часу на пошук структурно-замінних одиниць, що відмовили; $C_{S_{71}}$ — середні витрати за одиницю часу на заміну структурно-замінних одиниць, що відмовили; $C_{S_{72}}$ — середні витрати за одиницю часу на складання блока; $C_{S_{73}}$ — середні витрати за одиницю часу на налаштування і регулювання блока; $C_{S_{74}}$ — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-1; P_4 — імовірність відправлення на оновлення структурно-замінних одиниць, що відмовили, після контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-2; $\Delta t_{S_{41}}$ — середній час екстреної доставки структурно-знімної одиниці в разі її відсутності в обмінному фонді організації технічного обслуговування.

Зміст узагальненого показника оцінювання ефективності системи технічної експлуатації розкривається за допомогою таких категорій. Найбільш об'єктивним показником, який характеризує ефективність експлуатації радіоелектронних систем, слід вважати показник, що враховує співвідношення доходу, який дає повітряне судно з установленими на ньому радіоелектронними системами, до витрат на його утримання:

$$F = D / C_0,$$

де D — середній річний дохід повітряних суден; C_0 — середні річні витрати на експлуатацію повітряних суден протягом року.

Розглянемо детально складові, що входять у вираз $F = D/V_0$, з урахуванням специфіки функціонування радіоелектронних систем і втрат авіаційного підприємства від затримання рейсу. Як відомо, радіоелектронні системи безпосередньо беруть участь у керуванні польотом повітряних суден. Тому відмова або втрата якості функціонування деяких систем може призвести до помилок літаководіння або відходу на друге коло під час посадки. Усе це зумовлено додатковою витратою палива. Визначивши через ΔS додаткові години нальоту повітряних суден, непов'язані з доставкою пасажирів у пункт призначення, а через $V_{\text{сер}}$ — середню швидкість польоту повітряних суден, отримуємо:

$$D = d \left(T - \frac{\Delta S}{V_{\text{сер}}} \right); \quad (4)$$

$$D = d \left(T - \frac{\Delta S}{V_{\text{сер}}} \right) - (Z_1 + Z_2) - B_e, \quad (5)$$

де d — прибуток з повітряних суден за час польоту; T — години нальоту повітряних суден, що плануються за рік з урахуванням особливостей розкладу та витрат палива.

Додаткові (невиробничі) години нальоту повітряних суден визначаються двома факторами. Перший фактор зумовлений втратою якості i -ї системи, яка бере участь у формуванні оптимального маршруту польоту повітряних суден, другий — вимушеною посадкою повітряних суден через відмову радіоелектронних систем, які не входять у перелік дозволених несправностей (може дефектів) щодо продовження польоту.

Таким чином, вираз для ΔS (4) можна записати у вигляді

$$\Delta S = \sum_{i=0}^N \beta_i W[S_n(t_n) \Delta \varphi_i] t_n + \sum_{j=0}^n [(I + \alpha_j) - P_j(t)] S_b(t_n),$$

де N — кількість типів радіоелектронних систем, які беруть участь у керуванні траєкторією польоту повітряних суден; β_i — безумовна ймовірність невиявлення відмови (втрати якості) i -ї радіоелектронної системи; $W[S_n(t_n) \Delta \varphi_i]$ — масштабний коефіцієнт, який характеризує степінь відхилення від оптимальної траєкторії польоту внаслідок утрати якості i -ї системи на величину $\Delta \varphi_i$; t_n — час польоту; α — безумовна ймовірність помилкової відмови j -ї системи радіоелектронних систем; n — кількість радіоелектронних систем, які входять до класу недопустимих відмов щодо продовження польоту; $S_b = (t_n)$ — відстань повітряних суден до найближчого місця вимушеної посадки. Можемо розрахувати ймовірність переходів та станів; останні мають такий сенс:

$$Z_1 = h \left\{ \sum_{j=0}^m [1 - P_j(t)] (1 - P_{\text{ОФ}}^j) [P_{\text{П}} t_{\text{в},j} + (1 - P_{\text{ОП}}) t_{\text{д}}] \right\},$$

де $P_0(t)$ — ймовірність перебування всіх радіоелектронних систем у працездатному стані; $P_i(t)$ — ймовірність працездатності i -ї радіоелект-

ронної системи з класу переліку дозволених несправностей; $P_j(t)$ — імовірність працездатності j -ї радіоелектронної системи з класу переліку дозволених несправностей; $P_{\text{ОФ}}^j$ — імовірність наявності у комплектуванні транзитного аеропорту j -ї системи, що вимагається; $t_{B,j}$ — час відновлення j -ї системи у транзитному аеропорту; $t_{д,j}$ — час доставки радіоелектронних систем з базового аеропорту в транзитний аеропорт; t_B — час відновлення радіоелектронних систем базового аеропорту; $P_{\text{ОФ}}$ — імовірність наявності у комплектуванні базового аеропорту типу радіоелектронних систем, що вимагається; $P_{\text{ОП}}$ — імовірність наявності в транзитному аеропорту обслуговувального персоналу (ОП), потрібного для відновлення j -ї радіоелектронної системи.

Утрати через затримання рейсу в базовому аеропорту визначаються з такого виразу:

$$Z_2 = h \left\{ \sum_{i=1}^N [1 - P_0(t)] (1 - P_{\text{ОФ}}) t_B \right\}.$$

Тому середні річні витрати авіаційного підприємства згідно із формулою (5) становлять

$$B_0 = d \frac{\Delta S}{V} + Z_1 + Z_2 + B_e. \quad (6)$$

У виразі (6) складова B_e характеризує витрати авіаційного підприємства на придбання. Ці витрати визначаються так:

$$B_e = K_0 \sum_{i=1}^N C_i + \sum_{i=1}^N B_i^{\text{ТОіР}} + \sum_{i=1}^N B_i^{\text{ОФ}} + \sum_{i=1}^N B_i^{\text{РК}} + C_{\text{ГСМ}} + C_{\text{ОП}}, \quad (7)$$

де C_i — вартість i -ї радіоелектронної системи, установлені на повітряних суднах; K_0 — нормативний коефіцієнт окупності повітряних суден; $B_i^{\text{ТОіР}}$ — наведені середні витрати на технічне обслуговування і ремонт i -ї системи; $B_i^{\text{ОФ}}$ — середні річні витрати на придбання ОФ i -ї системи; $B_i^{\text{РК}}$ — середні річні витрати на придбання ремонтних комплектів (РК) підприємством, яке здійснює ремонт, на рік; $C_{\text{ОП}}$ — заробітна плата обслуговувального персоналу.

Середній річний прибуток повітряних суден становить

$$D = dT - B_0.$$

Підставляючи формулу (7) у вираз (3), дістаємо

$$F = \frac{dT}{B_0} - 1. \quad (8)$$

Аналіз виразу (8) дозволяє зробити висновок: показник ефективності зростає від -1 до $+\infty$ зі зміною нальоту повітряних суден (T) від 0 до $+\infty$. Якщо $T = B_0 / d$, показник $F = 0$. Тому має виконуватися нерівність

$$T > B_0 / d.$$

Якщо нерівність не виконується і години польоту $T < B_0 / d$, то експлуатація повітряних суден зі встановленими на ньому радіоелектронними системами збиткова.

Отримані вирази дозволяють виділити основні напрями підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних систем. Перший напрям досліджень стосується розроблення науково обґрунтованого переліку допустимих несправностей, з якими дозволено виліт поза базового аеропорту. Для цього необхідно: згрупувати за функціональною ознакою всі вироби радіоелектронної системи повітряних суден; проаналізувати характерні особливості функціонування виробів та ступеня впливу зовнішніх умов на їх працездатність; виконати розрахунки показників надійності виробів; визначити цільові функції виробів, що розглядаються, та перелік відмов, які спричиняють їх невиконання; побудувати за допомогою марковських ланцюгів математичні моделі, які описують процес виникнення для кожної події на всіх етапах польоту з урахуванням пори року та доби, складності траси та метеорологічного стану на трасі; аналогічним чином оцінити умовні ймовірності потрапляння в особливі ситуації як наслідки кожної функціональної відмови; оцінити ймовірність потрапляння в особливу ситуацію під час реалізації кожного прорахованого випадку щодо всіх функціональних відмов виробів радіоелектронних систем.

За результатами досліджень даного напрямку формується науково обґрунтований перелік допустимих несправностей, який дозволяє забезпечити безпеку польотів та виключити обґрунтоване збільшення Z_1 у виразі (6).

Другий напрям досліджень пов'язаний з вибором та обґрунтуванням засобів експлуатаційного контролю. Практика показує, що від правильного вибору засобів експлуатаційного контролю здебільшого залежать витрати на технічне обслуговування і ремонт та інші не виробничі складові (складова ΔS у виразі (6)).

Засоби експлуатаційного контролю включають у себе бортові вбудовані системи контролю та наземні засоби експлуатаційного контролю. Бортові вбудовані системи контролю та наземні засоби експлуатаційного контролю мають становити єдиний комплекс, що забезпечує виконання типових робіт у процесі експлуатації виробів радіоелектронних систем. У цьому комплексі повинна бути передбачена можливість автоматизованого введення-виведення та обмін інформацією про результати контролю між вбудованими системами контролю та наземними засобами експлуатаційного контролю.

Загальне конструктивне виконання комплексу засобів експлуатаційного контролю виробів радіоелектронних систем має забезпечити конструктивну сумісність засобів контролю в комплексі та їх елементів один з одним, уніфікацію габаритних, настановних, приєднувальних розмірів пристроїв та їх рознімних з'єднань, а також реалізацію інформаційної, метрологічної та експлуатаційної сумісності.

У комплексі засобів експлуатаційного контролю передбачається захист від пошкоджень, спричинених впливом перезавантажень та неправильним з'єднанням. Помилки обслуговуючого персоналу з органами керування не повинні призводити до виходу з ладу як виробів радіоелектронних систем, так і засобів контролю.

Під час проведення ремонтно-відновлювальних робіт та контролю працездатності демонтованих вбудованих систем контролю виробів застосовуються наземні автоматизовані засоби експлуатаційного контролю:

- першого рівня, які дозволяють з високим ступенем достовірності визначати технічний стан виробу та виконувати пошук дефектів з глибиною до легкознімного блока;
- другого рівня, які дозволяють з високим ступенем достовірності визначати технічний стан блока та виконувати пошук дефектів з глибиною до структурно-знімної одиниці;
- третього рівня, які дозволяють реалізувати в структурно-знімній одиниці оптимальні алгоритми пошуку дефектів з глибиною до невідновлюваного елемента.

Розглянемо основні елементи оптимізаційних показників ефективності експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден у руслі стратегії ремонту радіоелектронних систем повітряних суден. Так, основним недоліком дійсної стратегії ремонту є визначення обсягу ремонтних робіт незалежно від індивідуального напрацювання виробу та його технічного стану. Як наслідок вартість ремонту не залежить від напрацювання та технічного стану виробу.

На практиці на авіаремонтні заводи надходять вироби з різним напрацюванням та в різному технічному стані і потребують різного обсягу робіт для відновлення якості. Основною метою дослідження напряму вдосконалення стратегії ремонту радіоелектронних систем є вироблення рекомендацій щодо вдосконалення стратегій ремонту виробів, які дозволили б призначати обсяги робіт залежно від ресурсу виробу і його технічного стану. Основними умовами впровадження такої стратегії є застосування вхідного контролю за допомогою автоматизованих наземних засобів експлуатаційного контролю першого рівня для призначення глибини розбирання та аналізу статистики відмов з метою виявлення додаткових ресурсних елементів у виробі.

Підвищити якість та знизити витрати на ремонт можна шляхом упровадження гнучких технологій ремонту з урахуванням напрацювання, технічного стану та доробок виробів за бюлетенями. Прогресивна стратегія ремонту передбачає таку сукупність правил призначення переліку й обсягу ремонтно-відновлювальних робіт (технологій ремонту), що враховують вплив виробів, які ремонтуються, на рівень безпеки та регулярність польотів повітряних суден, ремонтно- і контролепридатність, характер зміни показників надійності виробів у процесі експлуатації, витрати на виконання ремонтно-відновлювальних операцій або заміни блока на першу категорію.

Однією з основних умов впровадження прогресивної стратегії ремонту є створення на авіаремонтних заводах інформаційного підтримання. Залежно від рівня контролепридатності виробу можуть бути реалізовані два види прогресивної стратегії ремонту. Перший вид прогресивної стратегії ремонту застосовують для виробів з високим рівнем контролепридатності. Відмітною особливістю цього виду стратегії є проведення попередньої дефектації та визначення варіанта технології ремонту за результатами вхідного контролю без розбирання. Другий вид прогресивної стратегії застосовують для виробів з низьким рівнем контролепридатності.

Тут попередня дефектація та вибір варіанта технології запроваджуються після повного або часткового розбирання блока за допомогою внутрішнього контролю. Залежно від наявності інформаційного підтримання на авіаремонтних заводах може бути реалізовано декілька варіантів технології в межах обраного виду прогресивної стратегії.

Так, за наявності інформаційної служби надійності на авіаремонтних заводах можуть бути реалізовані три варіанти технології T_1 щодо першого виду прогресивної стратегії і три варіанти технології T_2 щодо другого виду прогресивної стратегії. За відсутності інформаційного підтримання на авіаремонтних заводах застосовуються відповідно два варіанти технології T_1 і два варіанти технології T_2 .

Визначимо основні напрями та необхідні умови щодо вдосконалення стратегії ремонту виробів радіоелектронних елементів повітряних суден. Першою умовою переходу на прогресивну стратегію ремонту є створення інформаційного підтримання на авіаремонтних заводах та їх взаємодія з інформаційною службою авіаційної технічної бази, другою умовою — проведення вхідного контролю виробів, що надходять у ремонт.

На початковому етапі вдосконалення стратегій щодо операцій контролю та діагностування можуть бути застосовані існуючі наземні засоби експлуатаційного контролю. Наступним етапом вдосконалення стратегії ремонту є впровадження в технологічні процеси гнучких автоматизованих наземних засобів експлуатаційного контролю щодо контролю та діагностування виробів. Заключний етап — створення локальних інформаційних мереж на базі гнучких автоматизованих засобів експлуатаційного контролю для збирання та оброблення інформації, необхідної для виявлення додаткових ресурсних елементів і формування оптимальних ремонтних комплектів.

Прогресивні стратегії ремонту дозволяють істотно знизити витрати авіаційного підприємства, що використовують для організації технічної експлуатації стратегію.

ВИСНОВКИ

Відсутність комплексного показника, який в аналітичному руслі дає змогу поєднати такі категорії, як експлуатаційні витрати, вартість обмінного фонду та показники достовірності контролю, не дозволяє позитивно впливати на ефективність технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден. Тому в роботі були запропоновані математичні розв'язки для опису різних варіантів стратегій технічного обслуговування сучасної авіоники. Оптимізовано показники ефективності технічної експлуатації та оновлення, які включають в себе, окрім основних технічних, економічні показники, що містять оптимальну кількість запасних легкознімних блоків, які розраховуються за умови забезпечення заданої регулярності польотів.

Шляхом проведення аналізу можливих варіантів побудови системи технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних систем уведено шість класифікаційних ознак, що характеризують властивості виробів радіоелектронних систем, місце відновлення виробів, місце фіксації відмови виробу та наявність наземних засобів експлуатаційного контролю в авіаційній технічній базі.

Сформульовано поняття базового варіанта побудови системи технічного обслуговування і ремонту та виділено за допомогою визначальних кла-

сифікаційних ознак чотири базові варіанти побудови системи технічного обслуговування і ремонту. Визначено поняття похідних і конкуруючих різновидів базового варіанта побудови системи технічного обслуговування і ремонту.

Вироблено обґрунтування узагальненого показника для оцінювання ефективності системи технічної експлуатації радіоелектронних систем і визначено основні напрями підвищення ефективності системи технічної експлуатації

Обрано показники ефективності базових варіантів побудови системи технічного обслуговування і ремонту. Отримано математичні вирази, що дають змогу визначити наведені витрати в системі технічного обслуговування і ремонту, побудованій відповідно до базових варіантів. Аналіз отриманих виразів дозволяє зробити висновок, що основна складова наведених витрат $C_{ек}$ — собівартість експлуатації системи протягом року, не може бути визначена безпосередньо за формулами через її ймовірний характер.

Виконано аналіз можливих варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронної системи повітряних суден. Знайдено обґрунтування узагальненого показника для оцінювання ефективності системи технічної експлуатації радіоелектронного об'єкта та визначено основні напрями підвищення.

Обрано показники ефективності базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах. Отримано математичні вирази, що дозволяють визначити наведені витрати в системі технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах, побудованій відповідно до базових варіантів.

Визначено поняття похідних і конкуруючих різновидів базового варіанта побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах. Так, похідним різновидом базового варіанта будемо називати варіант побудови системи технічної експлуатації та оновлення, у якому місце відновлення радіоелектронних систем визначається його ознаками. Наприклад, варіант $A_i B_3 C_1 D_1 E_2 F_1$ визначає відновлення блока на ЗВ (D_1), оскільки блок має гарантію ЗВ (ознака C_1).

Отримані результати дають змогу на практиці розраховувати оптимальні запаси не тільки для експлуатованого парку повітряних суден, а й з урахуванням планованих поставок повітряних суден для авіакомпаній. Усе це дозволить обрати найбільш оптимальну стратегію технічного обслуговування повітряних суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. I. Gertsbakh, *Reliability theory with applications to preventive maintenance*. N.Y.: Springer Verlag, 2000, 219 p.
2. T. Nakagawa, "Two-unit redundant models, Stochastic Models in Reliability and Maintenance", *Springer*, Issue 1, pp. 165–185, 2002.
3. G. Konakhovych, "Research of variants of construction of a system of technical maintenance and repair in aircraft engineering", *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, Issue 1, pp. 52–56, 2012.
4. G. Konakhovych and I. Kozlyuk, "Optimization of Operation of Advanced Aircraft by Technical and Economic Criteria", *Problems of Informatization and Control*, pp. 79–85, 2005.

5. Yu. Kovalenko, L. Rybalka, and M. Burlaka, "Analysis of the efficient functioning of the software in information control systems", *Measuring and Computing Engineering in Technical Processes*, Issue 1, pp. 95–100, 2016.
6. O. Kucher and P. Vlasenko, "Comparative Analysis of Reliability and Efficiency Indicators in Foreign and National Aviation", *Knowledge-based Technology*, Issue 2, pp. 11–19, 2009.
7. O. Kucher and P. Vlasenko, "Management of reliability of airline aircraft fleet", *Aerospace Technology and Technology*, Issue 4, pp. 88–94, 2009.
8. J.W.S.W. Liu, *Real-Time Systems*, 1st edn. NJ, USA: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2000.
9. С. Зеленев, "Планирование строго периодических задач в системах реального времени", *Труды ИСП РАН*, вып. 20, с. 113–122, 2011.
10. А. Третьяков, "Автоматизация построения расписаний для периодических систем реального времени", *Труды ИСП РАН*, вып. 22, с. 375–400, 2012. doi: 10.15514/ISPRAS-2012-22-20.
11. O. Kermia and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for Non-Preemptive Tasks under Strict Periodicity Constraints", *Proceedings of the 2008 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 5–32, 2008.
12. P. Yomsi and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for non-Necessarily Harmonic Real-Time Systems with Precedence and Strict Periodicity Constraints using the Exact Number of Preemptions and no Idle Time", *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference, MISTA '09*, Dublin, Ireland, August, 2009.
13. А. Жуков, *Основы теории графов*. Москва: Вузовская книга, 2004.

Надійшла 28.09.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Georgiy F. Konakhovych, ORCID: 0000-0002-6636-542X, National Aviation University, Ukraine, e-mail: gfk44@gmail.com

Iryna O. Kozlyuk, ORCID: 0000-0001-8239-8937, National Aviation University, Ukraine, e-mail: avia_ira@ukr.net

Yuliia B. Kovalenko, ORCID: 0000-0002-6714-4258, National Aviation University, Ukraine, e-mail: yleejulee22@gmail.com

OPTIMIZATION OF EFFICIENCY INDICATORS OF ORGANIZATION SYSTEMS OF TECHNICAL OPERATION AND UPDATING OF AIRCRAFT RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS / G.F. Konakhovych, I.O. Kozlyuk, Y.B. Kovalenko

Abstract. This paper is dedicated to solving the problem of identifying and refining optimization indicators of operational efficiency and updating of electronic systems of aircraft, which is a pertinent metrological task. An analysis of possible options for building a system of technical operation and updating of electronic systems of aircraft was conducted. The concept of the basic variant of construction of such a system is formulated. By means of defining classification features the basic variants of construction of a system of the technical operation and updating are selected. The notion of secondary and competing types of the basic variant of construction of such a system is defined. For this purpose, classification features have been introduced that characterize the properties of products of electronic systems: the place of updating the product, the place of fixing the product failure and the availability of means of operational control in the organization of maintenance.

Keywords: maintenance (update) of electronic systems, aviation electronic systems, evaluation of the effectiveness of basic options.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБНОВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДЕН / Г.Ф. Коначович, І.А. Козлюк, Ю.Б. Коваленко

Аннотация. Посвящено решению задания выявления оптимизированных показателей эффективности эксплуатации и обновления радиоэлектронных систем воздушных суден, что является актуальным метрологическим заданием. Выполнен анализ возможных вариантов построения системы технической эксплуатации и обновления радиоэлектронных систем воздушных суден. Сформировано понятие базового варианта построения системы технической эксплуатации и обновления. При помощи определяющих классификационных признаков выделены базовые варианты построения системы технической эксплуатации и обновления. Определено понятие вторичных и конкурирующих видов базового варианта построения системы технической эксплуатации и обновления в радиоэлектронных системах. Для этого введены классификационные признаки, характеризующие свойства изделий радиоэлектронных систем: место обновления изделия, место фиксации отказа изделия и наличие способов эксплуатационного контроля в организации технического обслуживания.

Ключевые слова: обслуживание (обновление) радиоэлектронных систем, авиационные радиоэлектронные системы, оценка эффективности базовых вариантов.

REFERENCES

1. Gertsbakh, Reliability theory with applications to preventive maintenance. N.Y.: Springer Verlag, 2000, 219 p.
2. T. Nakagawa, "Two-unit redundant models, Stochastic Models in Reliability and Maintenance", *Springer*, Issue 1, pp. 165–185, 2002.
3. G. Konakhovych, "Research of variants of construction of a system of technical maintenance and repair in aircraft engineering", *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, Issue 1, pp. 52–56, 2012.
4. G. Konakhovych and I. Kozlyuk, "Optimization of Operation of Advanced Aircraft by Technical and Economic Criteria", *Problems of Informatization and Control*, pp. 79–85, 2005.
5. Yu. Kovalenko, L. Rybalka, and M. Burlaka, "Analysis of the efficient functioning of the software in information control systems", *Measuring and Computing Engineering in Technical Processes*, Issue 1, pp. 95–100, 2016.
6. O. Kucher and P. Vlasenko, "Comparative Analysis of Reliability and Efficiency Indicators in Foreign and National Aviation", *Knowledge-based Technology*, Issue 2, pp. 11–19, 2009.
7. O. Kucher and P. Vlasenko, "Management of reliability of airline aircraft fleet", *Aerospace Technology and Technology*, Issue 4, pp. 88–94, 2009.
8. J.W.S.W. Liu, *Real-Time Systems*, 1st edn. NJ, USA: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2000.
9. S. Zelenov, "Scheduling strictly periodic tasks in real time systems", *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*, vol. 20, pp. 113–122, 2011.
10. A. Tretyakov, "Automation of scheduling for periodic real-time systems", *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*, vol. 22, pp. 375–400, 2012. doi: 10.15514/ISPRAS-2012-22-20.
11. O. Kermia and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for Non-Preemptive Tasks under Strict Periodicity Constraints", *Proceedings of the 2008 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 5–32, 2008.
12. P. Yomsi and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for non-Necessarily Harmonic Real-Time Systems with Precedence and Strict Periodicity Constraints using the Exact Number of Preemptions and no Idle Time", *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference, MISTA '09*, Dublin, Ireland, August, 2009.
13. A. Zykov, *Fundamentals of graph theory*. Moscow: University book, 2004.