

УДК 004.021

DOI: 10.18372/2073-4751.75.18015

Зуєв О.В., к.т.н.,  
orcid.org/0000-0002-4520-3288,Соломенцев О.В., д.т.н.,  
orcid.org/0000-0002-3214-6384,Заліський М.Ю., д.т.н.,  
orcid.org/0000-0002-1535-4384,Осіпчук А.О., к.т.н.,  
orcid.org/0000-0002-9053-2072

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ ПРОГНОЗУЮЧОГО КОНТРОЛЮ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ, НАВІГАЦІЇ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Національний авіаційний університет

0801zuiev@gmail.com,  
avsolomentsev@ukr.net,  
maximus2812@ukr.net,  
alina.osipchuk2012@gmail.com

### Вступ

Засоби зв'язку, навігації та спостереження (ЗНС) відіграють значну роль у забезпеченні безпеки польотів в цивільній авіації [1, 2]. Для підтримки надійності та ефективності функціонування засобів ЗНС застосовують системи експлуатації [3 – 7]. Система експлуатації (СЕ) включає сукупність виробів [8, 9], засобів експлуатації, виконавців і документації, що встановлює правила їх взаємодії для виконання завдань експлуатації. Основними функціями СЕ засобів ЗНС є: організація, координація й контроль технічної експлуатації об'єктів і засобів ЗНС; проведення організаційно-технічних заходів щодо модернізації, підтримки експлуатаційної готовності й продовженню терміну служби засобів ЗНС; планування, організація, координація й контроль робіт із сертифікації служб і об'єктів ЗНС і авіаційного електрозв'язку; планування, координація й контроль за проведенням льотних перевірок ЗНС; організація й контроль робіт з підвищення кваліфікації фахівців служб ЗНС; удосконалення й впровадження нових методів організації роботи, у тому числі на основі використання сучасних інформаційних технологій.

Однією із складових СЕ є система технічного обслуговування (ТО). Процес ТО засобів ЗНС відноситься до класу

складних систем. Аналіз показує, що для процесів технічного обслуговування характерна наявність всіх ознак складної системи. Дійсно, у ній взаємодіє велика кількість різнорідних елементів, що мають єдину функціональну мету – радіотехнічне забезпечення виробничої діяльності авіапідприємства [10]. Одним з напрямів оптимізації процесів технічного обслуговування (ТО) засобів ЗНС є оптимізація окремих складових ТО.

Основними технологічними операціями ТО є:

- контроль технічного стану (ТС) засобів ЗНС;
- регулювання визначальних параметрів засобів ЗНС шляхом реалізації керуючих впливів;
- попереджувальна заміна блоків, вузлів, елементів у засобів ЗНС.

У результаті контролю ТС виявляються такі елементи засобів ЗНС, стан яких може привести до відмови засобу в цілому. Здійснюється регулювання, налаштування або заміна таких елементів, таким чином вдається своєчасно запобігти відмовам. Регулювання полягає у реалізації керуючих впливів (КВ) на визначальні параметри (ВП) засобів ЗНС на підставі отриманої у результаті реалізації операцій контролю інформації про їх ТС. Керуючі впливи доцільно здійснювати у разі

досягнення ВП меж запобіжних допусків. Метою реалізації КВ є зведення значень регульованих ВП, які контролюються, до номінальних значень [11, 12].

Відомо, що багаторічна статистика, дані характеру подій (планові і раптові відключення, проведення заходів по ТО і Р устаткування, тощо), так і дані діагностичної спрямованості (результати вимірювань на працюючому обладнанні), містять певний корисний обсяг інформації. Аналіз зазначеної статистики дозволяє вирішувати комплекс завдань від оцінки поточного стану обладнання, до прогнозування надійності обладнання в цілому з виділенням і ранжуванням негативних факторів, усунення яких призведе до її підвищення на заданому інтервалі експлуатації.

Розробка моделей, алгоритмів, методик та обчислювальних процедур, що використовують статистику аварійних відключень і результати діагностичного контролю обладнання, дозволяють виконувати розрахунки і прогнозування імовірнісних характеристик потоків випадкових подій, оцінку рангу критичності обладнання до відмов, визначення пріоритетної черговості проведення його профілактик і оптимізацію параметрів ТО і Р на розглянутому інтервалі експлуатації.

В цілому, під терміном прогноз розуміємо висловлювання, яке містить вказівку на просторовий або часовий інтервал кінцевої величини, в межах якого відбудеться прогнозована подія. В результаті реалізації певних алгоритмів обробки інформації про об'єкт дослідження в процесі прогнозування, здійснюється оцінка певних характеристик об'єкта на упереджений момент часу. Аналіз даних у випадку прогнозування станів чи подій є більш складним, ніж аналіз даних попереднього досвіду.

В результаті прогнозування технічного стану засобів ЗНС здійснюється оцінка значення сукупності визначальних параметрів. При цьому, якщо кожен з параметрів визначає якісно різні властивості об'єкта, тоді здійснюється незалежний прогноз окремих параметрів, підсумкове

рішення про стан об'єкта приймається за сукупністю рішень про стан кожного з параметрів [14, 15]. Якщо всі параметри якісно визначають одну властивість об'єкта, тоді векторна характеристика придатності засобів ЗНС певним чином перетворюється у узагальнений параметр, за результатами контролю якого оцінюють технічний стан засобів ЗНС [16].

Практичне застосування алгоритмів прогнозуючого контролю передбачає зменшення похибок прийняття рішень про стан об'єкта за наявності апріорної невизначеності [17]. Кількісною мірою об'єктивності прийнятих у результаті прогнозування рішень є достовірність прогнозуючого контролю. Достовірність в цілому характеризує ступінь довіри до прийнятих у результаті прогнозування рішень. Від достовірності контролю залежить не тільки об'єктивність власне прогнозування, але й ефективність функціонування систем експлуатації засобів ЗНС в цілому [18, 19].

### **Мета**

Метою статті є отримання аналітичних співвідношень щодо оцінки ефективності операцій прогнозуючого контролю засобів зв'язку, навігації та спостереження.

### **Основна частина**

Розглянемо показники достовірності прогнозуючого контролю працездатності обладнання  $\tau_n$ . При здійсненні прогнозуючого контролю працездатності засобів аеронавігації прийняття рішення про його технічний стан здійсниться на інтервалі прогнозування  $\tau_n$ .

Прогнозуючий контроль (ПрК) працездатності виробу усуває суттєвий недолік поточного контролю (ПтК), який полягає у розбіжності часу прийняття рішення про працездатність виробу  $\tau_k$  та часу його використання за призначенням  $\tau_k + \tau$ , збільшуючи тим самим ефективність контролю, та, відповідно, і ефективність використання виробів. Вихідною інформацією для прийняття рішення при ПрК слугують результати ПтК. В технічній документації на виріб оговорюють межі допустимих значень ВП у вигляді гарантійних допусків.

При цьому подію  $E(\tau_n)$ , яка визначає умову працездатності виробу у інтервалі прогнозування представимо у вигляді:

$$E(\tau_n) : \{ \overline{X}^n(\tau_n) \in [\Delta\Omega_{Hi}; \Delta\Omega_{Bi}]_N \}, \quad (1)$$

З огляду на недосконалість систем ПрК, при прийнятті рішення про працездатність виробу можуть бути помилки, тобто, працездатний виріб може бути забракований, а непрацездатний визнано придатним. При цьому, подію  $F(\tau_n)$ , яка визначає умови прийняття рішення про працездатність виробу у інтервалі прогнозування, представимо у наступному вигляді:

$$F(\tau) : \{ \overline{Y}^n \in [\Delta\Omega_{Hi}; \Delta\Omega_{Bi}]_n \}, \quad (2)$$

Графічно операція формування рішень при ПрК у відповідності з [5,6] та з урахуванням вищевикладеного наведена на рис. 1, де прийняті наступні позначення. Тут та у подальшому складові достовірності ПрК, обумовлені похибками ПрК та операцією прогнозування, будемо позначати індексом “П” для розглянутого показника.

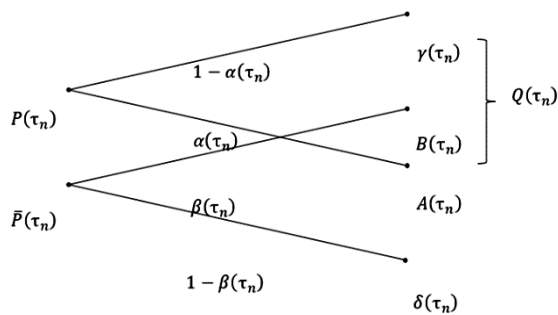


Рис. 1. Граф формування рішень при ПрК.

На рис. 1 позначені:  $P(\tau_n) = P(E(\tau_n))$  – ймовірність працездатного стану виробу в інтервалі прогнозування  $\tau_n$ ;  $A(\tau_n) = P(E(\tau_n)\overline{F}(\tau_n))$  – безумовна ймовірність визнання непридатним за результатами ПрК придатного виробу – ризик виробника при ПрК;  $B(\tau_n) = P(\overline{E}(\tau_n)F(\tau_n))$  – ймовірність визнання придатним за результатами ПрК непридатного виробу – ризик замовника при ПрК;  $\gamma(\tau_n) = P(E(\tau_n)F(\tau_n))$  – ймовірність визнання придатним за

результатами ПрК придатного виробу;  $Q(\tau_n) = P(F(\tau_n))$  – ймовірність визнання за результатами ПрК виробу придатним;  $\alpha(\tau_n) = P(\overline{F}(\tau_n)/E(\tau_n))$  – умовна ймовірність визнання непридатним за результатами ПрК придатного виробу – ймовірність помилки першого роду при ПрК;  $\beta(\tau_n) = P(F(\tau_n)/\overline{E}(\tau_n))$  – умовна ймовірність визнання придатним за результатами ПрК непридатного виробу – ймовірність помилки другого роду при ПрК.

Ймовірності результатів контролю виробів при ПрК з урахуванням прийнятих позначень та у відповідності з рис. 1, знаходяться у наступному взаємозв'язку.

$$A(\tau_n) = P(\tau_n)\alpha(\tau_n) = P(\tau_n) - \gamma(\tau_n) \quad (3)$$

$$B(\tau_n) = P(\tau_n)\beta(\tau_n) = Q(\tau_n) - \gamma(\tau_n) \quad (4)$$

$$Q(\tau_n) = P(\tau_n) - A(\tau_n) + B(\tau_n) \quad (5)$$

$$\delta(\tau_n) = \overline{P}(\tau_n) - B(\tau_n) \quad (6)$$

$$\gamma(\tau_n) = P(\tau_n) - A(\tau_n) \quad (7)$$

Розглянемо можливі кількісні оцінки достовірності рішень при ПрК. Так як завданням ПрК є прийняття рішення про придатність чи не придатність виробів до виконання поставлених задач, при прогнозуючому контролі працездатних виробів таких рішень може бути два: або за його результатами виріб признається придатним (працездатним), або фіксується відмова.

Отже, для кількісної оцінки достовірності прийнятих рішень, які приймають при ПрК, необхідно вибрати наступні характеристики, які у загальному випадку мають різні чисельні значення. Будемо кількісно оцінювати:

– достовірність рішення “придатний” – апостеріорною ймовірністю працездатності у інтервалі прогнозування виробу, визначеного “придатним” за результатами ПрК, тобто:

$$D^r(\tau_n) = \frac{P(\tau_n) - A(\tau_n)}{P(\tau_n) - A(\tau_n) + B(\tau_n)}; \quad (8)$$

– достовірність рішень “непридатний” – апостеріорною ймовірністю непрацездатності у інтервалі прогнозування виробу, визначеного “непридатним” за результатами ПрК, тобто:

$$D^B(\tau_n) = \frac{1 - P(\tau_n) - B(\tau_n)}{1 - P(\tau_n) - A(\tau_n) + B(\tau_n)}; \quad (9)$$

– абсолютна достовірність – апостеріорна ймовірність прийняття безпомилкових рішень на інтервалі прогнозування по результатам ПрК, тобто:

$$D^P(\tau_n) = 1 - A(\tau_n) - B(\tau_n) \quad (10)$$

Аналіз виразів (8) – (10) показує, що показники достовірності рішень при ПрК визначаються значеннями ризику виробника  $A(\tau_k)$  та ризику замовника  $B(\tau_k)$ .

Розглянемо математичну модель формування рішень при прогнозуючому контролі визначального параметра.

Як показано вище, результатом ПрК є рішення про працездатність виробу в інтервалі прогнозування. Вихідною інформацією для прийняття такого рішення слугують кількісні результати ПтК працездатності виробу. Для опису процесу формування рішення при ПрК використаємо математичну модель ПрК [7], яка визначає ПрК як послідовність виконання окремих операцій з випадковими наслідками.

Припустимо, що зміна у часі визначального параметру (ВП) сукупності виробів одного типу описується апіорним випадковим процесом  $\xi(\tau_k)$ , статистично визначеним на часовому інтервалі  $[0, \tau_k]$ . Одна з реалізацій цього процесу, яка відповідає зміні ВП конкретного виробу, спостерігається засобами ПтК у дискретні моменти часу, які  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m, \tau_k: 0 \leq \tau_1 < \tau_2, \dots, \tau_m < \tau_k$  передують інтервалу прогнозування  $\tau_n$ .

З огляду дискретності характеру моментів і результатів спостережень ВП, сукупність ординат його істинних значень у моменти змін  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$  представимо у виді деякої траєкторії  $T$  – зміни істинних значень ВП [8].

$$T_l = \{\xi(\tau_1) \in Q_a, \xi(\tau_2) \in Q_b, \dots, \xi(\tau_k) \in Q_w\} \quad (11)$$

$$T_l \in L,$$

де  $L$  – множина траєкторій зміни істинних значень ВП в інтервалах спостережень;  $Q_a, Q_b, \dots, Q_w$  – номери, у яких знаходились істинні значення ВП у моменти його вимірювань;  $a \in m, b \in m, \dots, w \in m$  – дискретні значення ВП у моменти вимірювань, де  $m$  – множина значень параметра, що розрізняється засобом ПтК. Кожна траєкторія  $T_L$  характеризується ймовірністю існування  $P_L = P(T_L)$ .

Множина  $L$  характеризується матрицею – рядком ймовірностей існування істинних траєкторій ВП, визначених випадковим процесом  $\xi(\tau)$ , який є вхідним для операції ПтК:

$$|P_{ex}^T| = \|P_1 P_2 \dots P_l \dots P_L\|, \sum_{l \in L} P_l = 1 \quad (12)$$

У подальшому складові достовірності ПрК, обумовлені похибками ПтК, будемо позначати індексом “т” для розглядаемого показника.

Множина  $m$  при ПрК складається з підмножини  $\rho$  працездатних та підмножини  $\mu$  непрацездатних станів,  $\rho \in m, \mu \in m, (\rho \cap \mu = \emptyset)$ .

Кількісні результати вимірів ВП –  $y(\tau_1), y(\tau_2), \dots, y(\tau_k)$  перетворюються засобами ПтК в номери різних його станів  $g_a, g_b, \dots, g_w, a \in m, b \in m, \dots, w \in m$ . На основі сукупності  $g_a, g_b, \dots, g_w$ , отриманої в інтервалі спостережень  $[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k]$  Система контролю (СК) за допомогою свого прогнозуючого засобу, формує результат прогнозування  $g(\tau_n) = \Psi(g_a, g_b, \dots, g_w)$ , який належить багатьом  $V$  можливим станам та представляючи собою деяку характеристику апостеріорного випадкового процесу  $\xi(\tau)/g_a, g_b, \dots, g_w$ , який описує можливі зміни значень ВП у інтервалі прогнозування при даних початкових його значеннях. Потім СК визначає приналежність результату прогнозування множини  $v, (v \subset V)$ , яка відповідає результатам “Придатний”. ПрК, на основі цього визначення з відповідно обраним

вирішальним правилом, дає заключення про працездатність об'єкта по вимірюваному параметру у інтервалі прогнозування.

Будемо розрізнити траєкторії  $I\{T_s\}; s = \overline{I, S}$ , сформовані за результатами спостережень засобами ПтК за зміною ВП у інтервалі спостережень:

$$T_s = \{y(\tau_1) \in q_a, y(\tau_2) \in q_b, \dots, y(\tau_k) \in q_w\} \quad (13)$$

$$T_s \in S$$

Кожна траєкторія  $T_s$  характеризується імовірністю існування  $P_d = P(T_s)$ .

Внаслідок похибки обраних засобів ПтК, отримані у момент спостереження номери станів ВП  $g_a, g_b, \dots, g_n$ , у загальному випадку, відрізняються від номерів  $Q_a, Q_b, \dots, Q_n$ ,  $T_s \in S$  розрізняємих істинних значень ВП у вказані моменти часу. У зв'язку з цим, будь-яка  $l$ -а траєкторія зміни істинних значень ВП –  $T_l$  з імовірністю  $W_{ls} = \{T_s/T_l\}$  може сприйматися як будь-яка  $S$ -а з траєкторій, сформованих за результатами спостережень засобами ПтК за зміною ВП.

Умовні імовірності переходів за результатами ПтК істинних траєкторій у спостережувані формують матрицю перехідних імовірностей операцій ПтК, яку представлено у наступному вигляді:

$$|W_{nep}^T| = \begin{vmatrix} \omega_{11} & \dots & \omega_{1S} \\ \dots & \dots & \dots \\ \omega_{L1} & \dots & \omega_{LS} \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$\sum \omega_{ls} = 1, l = \overline{I, L}$$

Матриця-рядок на виході укрупненої операції ПтК, є результатом перемноження матриць (12) та (14) та містить у якості своїх елементів імовірності існування траєкторій спостережень множини  $S$ :

$$|P_s^T| = |P_L^T| |W_{nep}^T| = |P_1 P_2 \dots P_s \dots P_S| \quad (15)$$

$$\sum_{s \in S} P_s = 1 \quad ; \quad P_s = \sum_{l \in L} P_l P_{ls}$$

Прогнозуючий контроль за складом операцій відрізняється від ПтК наявністю елементарних операцій прогнозування, результуючу сумісну дію яких, як і для ПтК, можна замінити однією укрупненою операцією прогнозування. Розглянемо імовірнісні характеристики цієї операції, відмінністю якої від укрупненої операції ПтК є те що, вхідною інформацією для неї є не імовірності цих операцій, а імовірності сполучень цих імовірностей у дискретні моменти спостережень. Оскільки використані сполучення характеризуються ймовірностями наявності траєкторій множини  $L$ , які є вхідними для укрупненої операції прогнозування, тоді імовірнісні характеристики цієї операції утворюють матрицю перехідних ймовірностей:

$$|W_{nep}^T| = \begin{vmatrix} \omega_{11}(\tau_n) & \dots & \omega_{1V}(\tau_n) \\ \dots & \dots & \dots \\ \omega_{S1}(\tau_n) & \dots & \omega_{SV}(\tau_n) \end{vmatrix}, \quad (16)$$

де  $\omega_{sj}(\tau_n) = P\{g(\tau_n) \in j/T_s\}$ ,  $s \in S$ ;  $\sum_{j \in V} \omega_{sj}(\tau_n) = 1$  – перехідна імовірність переходу  $S$ -ої траєкторії в  $j$ -й стан у інтервалі прогнозування.

Перемножуючи матриці (15) та (16), отримаємо матрицю-рядок ймовірностей  $|Q(j, \tau_n)|, j = 1, 2$  на виході укрупненої операції прогнозування:

$$|Q(j, \tau_n)| = |P_{aux}^T| |W_{nep}^n| = |Q(1, \tau_n), Q(2, \tau_n)| \quad (17)$$

Розглянемо імовірнісні характеристики ПрК. Наприклад, ймовірність отримання результату “придатний” знаходиться за формулою:

$$Q(\tau_n) = Q(1, \tau_n) = \sum_{l \in L} \sum_{s \in R} P_l P_{ls} P_{Si}(\tau_n) \quad (18)$$

де  $R = \{g_a \in \rho, g_a \in \rho, \dots, g_w \in \rho\}$ .

Розглянута математична модель ПрК, приведена у вигляді системи матриць, що описують імовірнісні характеристики послідовно виконуваних операцій контролю, по суті представляє марковську модель. У цій моделі “немарковість” залежностей майбутніх значень параметру (прогнозоване значення параметру загалом залежить не тільки від його технічного

стану (ТС) у теперішній момент, але і від ряду станів у минулі моменти часу) штучно усунена шляхом введення до моделі імовірнісних характеристик траєкторії зміни значень контрольованого параметру. Це введення дозволило спростити обчислення показників достовірності ПрК, та використовуючи узагальнену математичну модель класифікації об'єктів [10], зв'язати характеристики ПтК і ПрК.

Розглянемо характеристики достовірності рішень при прогнозуючому контролю працездатності виробів за контрольованим параметром.

При контролі працездатності засіб ПтК розрізняє множину станів контрольованого параметра, що складається з підмножини  $\rho$  працездатних і підмножини  $\mu$

непрацездатних його станів, ( $\rho \cap \mu = \emptyset$ ),  $\rho + \mu = M$ . Існують підмножини траєкторій  $M, R \in S$ , такі що проходять тільки через підмножині станів  $\rho$  ВП. Траєкторії характеризуються власними ймовірностями існування:  $P_M = P(T_M), P_R = P(T_R)$ . Зміна ВП сукупності однотипних об'єктів у розглянутому інтервалі часу  $[\tau_1, \tau_k + \tau]$  описується випадковим процесом  $\xi(\tau)$ , який визначає, зокрема, імовірність придатного  $P[F(\tau_n)]$  та непридатного  $P[\bar{F}(\tau_n)]$  станів об'єкта у інтервалі прогнозування  $\tau_n$ .

Визначимо характеристики достовірності прийняття рішень для наступного вирішального правила ПрК, ідентичного правилу, найбільш розповсюджене у практиці контролю працездатності виробу [10]:

$$\begin{aligned} \xi(\tau_n) \in \rho, \text{ якщо } g(\tau_n) \in \Omega(\tau_n), j=1 - \text{рішення "Придатний"}, \\ \xi(\tau_n) \notin \rho, \text{ якщо } g(\tau_n) \notin \Omega(\tau_n), j=2 - \text{рішення "Не придатний"} \end{aligned} \quad (19)$$

Найбільш розповсюдженим є алгоритм ПрК, при якому виріб, визнаний непридатним за результатами ПтК, не підлягає прогнозуванню, виключається з процесу ПрК. Критерієм виключення є виконання умови  $T_s \notin \rho$ .

У відповідності з формулою повної імовірності [12], замінимо імовірність  $P(\tau_n)$  сумою імовірностей  $P_l^\rho \rho(\tau_n)$ , кожна з яких представляє імовірність сумісного існування траєкторій і проходження її продовження у інтервалі прогнозування  $\tau_n$  через підмножину станів  $\rho$ :

$$P(\tau_n) = \sum_{l \in L} P_L^\rho(\tau_n), \quad (20)$$

де:  $P_L^\rho(\tau_n) = P\{T_l; \xi(\tau_n) \in \rho\}$ .

$$\left| P_L^\rho(\tau_n) \right| = \left\| P_1^\rho(\tau_n) P_2^\rho(\tau_n) \dots P_l^\rho(\tau_n) \dots P_L^\rho(\tau_n) \right\|; \quad (22)$$

$$\left| P_L^\mu(\tau_n) \right| = \left\| P_1^\mu(\tau_n) P_2^\mu(\tau_n) \dots P_l^\mu(\tau_n) \dots P_L^\mu(\tau_n) \right\|. \quad (23)$$

Деяка  $l$ -а траєкторія,  $T_l \in \rho$ , якій відповідають імовірності  $P_L^\rho(\tau_n)$ , через похибки операції ПтК може бути помилково прийнята виробом ПтК, як  $S$ -та траєкторія

Аналогічно замінимо:

$$\bar{P}(\tau_n) = \sum_{l \in L} P_L^\mu(\tau_n), \quad (21)$$

де:  $P_L^\mu(\tau_n) = P\{T_l; \xi(\tau_n) \in \mu\}$ .

Таким чином,  $P_L^\rho(\tau_n) + P_L^\mu(\tau_n) = P_L$ .

Цією заміною імовірність існування кожної істинної траєкторії розбита на 2 частини. Одна частина характеризує потенційну можливість для продовження траєкторії  $T_l, l = \overline{1, M}$  опинитися у працездатному, друга – у непрацездатному станах у інтервалі прогнозування.

У результаті можна утворилися дві нові матриці, елементи яких є функціями аргументу  $\tau_n$ :

результатів спостереження, та буде включена з ПрК. Це призводить до ризику виробника  $A(\tau_n)$  при ПрК, обумовленого похибками ПтК

$$A^{(T)}(\tau_n) = P\{T_s \notin R; \xi(\tau_n) \in \rho\} = \sum_{s \in S/R} P_L^\rho(\tau_n) P_s; \quad (24)$$

$$\alpha^{(T)}(\tau_n) = P\{T_s \notin R / \xi(\tau_n) \in \rho\} = A^{(T)}(\tau_n) / P(\tau_n) = A^{(T)}(\tau_n) / \sum_{l \in L/R} P_l^{\rho}(\tau_n) \quad (25)$$

З іншого боку  $l$ -а траєкторія,  $T_l$ , якій відповідає імовірність  $P_L^{\mu}(\tau_n)$ , може бути помилково прийнята виробом ПтК, як  $S$ -та

траєкторія ( $T_S$ ), що приводить до ризику замовника  $B(\tau_n)$  при ПрК через похибки ПтК.

$$B^{(T)}(\tau_n) = P\{T_s \in R; \xi(\tau_n) \in \mu\} = \sum_{l \in L} \sum_{s \in R} P_l^{\rho}(\tau_n) P_{ls} \quad (26)$$

$$\beta^{(T)}(\tau_n) = P\{T_s \in R / \xi(\tau_n) \in \mu\} = B^{(T)}(\tau_n) / \bar{P}(\tau_n) = B^{(T)}(\tau_n) / \sum_{l \in L} P_l^{\mu}(\tau_n) \quad (27)$$

Аналогічно знаходяться складові імовірностей  $\gamma^{(T)}(\tau_n)$ ,  $\delta^{(T)}(\tau_n)$ , які характеризують долю правильних рішень при ПрК

відповідно працездатних і непрацездатних за ВП виробів у інтервалі прогнозування  $\tau_n$ .

$$\gamma^{(T)}(\tau_n) = P\{T_s \in R; \xi(\tau_n) \in \rho\} = \sum_{l \in L} \sum_{s \in R} P_l^{\rho}(\tau_n) P_{ls} \quad (28)$$

$$\delta^{(T)}(\tau_n) = P\{T_s \notin R; \xi(\tau_n) \in \mu\} = \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} P_l^{\mu}(\tau_n) P_{ls} \quad (29)$$

З однієї сторони, деяка  $l$ -а траєкторія,  $T_l \in \rho$ , якій відповідає імовірність  $P_l^{\rho}(\tau_n)$ , прийнята виробом ПтК як  $S$ -а траєкторія результатів спостережень,  $T_s \in M$ , через похибки операції прогнозування може

бути помилково забракована. Це призводить до ризику виробника  $A^n(\tau_n)$ , обумовленого похибками операції прогнозування при ПрК. По аналогії з (24) маємо:

$$A^n(\tau_n) = P\left\{ \begin{array}{l} g(\tau_n) \in j = 2; \\ T_s \in R; \xi(\tau_n) \in \rho \end{array} \right\} = \sum_{l \in L} \sum_{s \in R} \sum_{j=\frac{V}{v}} P_l^{\mu}(\tau_n) P_{ls} P_{sj}(\tau_n); \quad (30)$$

З іншої сторони, деяка  $l$ -а траєкторія,  $T_l \in M$ , якій відповідає імовірність  $P_l^{\mu}(\tau_n)$ , прийнята виробом ПтК як  $S$ -а траєкторія результатів спостереження,  $T_s \in R$ , через

похибки операції прогнозування може бути забракована з вірогідністю  $\delta(\tau_n)$ . По аналогії з (29), маємо:

$$\sigma_n(\tau_n) = P\left\{ \begin{array}{l} g(\tau_n) \in j = 1; \\ T_s \in R; \xi(\tau_n) \in \mu \end{array} \right\} = \sum_{l \in L} \sum_{s \in R} \sum_{j=\frac{V}{v}} P_l^{\mu}(\tau_n) P_{ls} P_{sj}(\tau_n); \quad (31)$$

Графічно операція формування рішення при ПрК у відповідності з [10], рис. 1 та з врахуванням вищевикладеного, представлена у вигляді ймовірнісного графа на рис. 2.

На графі прийняті наступні позначення:

- $\alpha^{(n)}(\tau_n) = P(g(\tau_n) \notin \rho / T_s \in R)$  – умовна імовірність визнання непридатним за результатами ПрК придатного виробу, обумовлена похибками операції прогнозування – імовірність помилки першого роду, обумовлена похибками операції прогнозування.

- $\beta^{(n)}(\tau_n) = P(g(\tau_n) \in \rho / T_s \notin R)$  – умовна імовірність визнання придатним по результатам ПрК непридатного виробу, обумовлена похибками операції прогнозування – імовірність помилки другого роду, обумовлена похибками операції прогнозування.

Характеристики достовірності рішень при ПрК працездатності виробів з врахуванням прийнятих позначень та у співвідношенні з рис. 2. знаходяться у наступному взаємозв'язку:

$$\begin{aligned}
A(\tau_n) &= A^T(\tau_k) + A^n(\tau_n); \\
B(\tau_n) &= B^T(\tau_k) - \delta^n(\tau_n); \\
\gamma(\tau_n) &= \gamma^T(\tau_k) - A^n(\tau_n); \\
\delta(\tau_n) &= \delta^T(\tau_k) + \delta^n(\tau_n).
\end{aligned}
\tag{32}$$

Підставляючи (20), (21), (24), (26), (28), (29) у вираз (32) отримуємо:

$$A(\tau_n) = \sum_{l=1}^L \sum_{s \in \delta} P_l^p(\tau_k) P_{ls} + \sum_{l=L} \sum_{s \in R} \sum_{j=V/v} P_l^p(\tau_n) P_{ls} P_{sj}(\tau_n); \tag{33}$$

$$B(\tau_n) = \sum_{l=L} \sum_{s \in R} \sum_{j=v} P_l^m(\tau_n) P_{ls} P_{sj}(\tau_n); \tag{34}$$

$$\alpha(\tau_n) = \sum_{l=1}^L \sum_{s \in R} \sum_{j=9v} P_l^p(\tau_n) P_{ls} P_{sj}(\tau_n); \tag{35}$$

$$\delta(\tau_n) = \sum_{l=1}^L \sum_{s \in S/R} P_l^m(\tau_n) P_{ls} + \sum_{l=L} \sum_{s \in R} \sum_{j=V/v} P_l^m(\tau_n) P_{ls} P_{sj}(\tau_n) \tag{36}$$

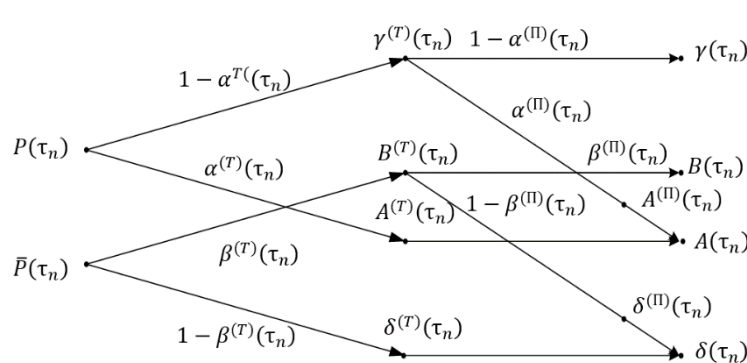


Рис. 2. Граф формування рішень при ПрК з урахуванням можливих ймовірностей прийняття помилкових рішень

З рис. 2. і формули (32) слідує, що ефект операцій ПрК при даному алгоритмі ПрК впливає на віднімання з складової ризику  $B^T(\tau_n)$  деякої його частини, рівної  $\delta(\tau_n)$ , додавання до складової ризику виробника  $A^T(\tau_n)$  частини, рівної  $A^n(\tau_n)$ . У результаті сумарний ризик виробника  $A(\tau_n)$  збільшується, а ризик замовника  $B(\tau_n)$  зменшується у порівнянні з аналогічними складовими, обумовленими похибками операцій ПтК.

### Висновки

Характерною рисою СЕ є наявність можливості одержання додаткових

відомостей про умови функціонування системи за поточною інформацією з її використанням у процесі керування. За допомогою вдосконаленої СЕ можна досягнути наступні переваги: мати високу гнучкість, що дозволяє швидко змінювати свої параметри; мати високу мобільність у прийнятті управлінських та корегувальних рішень; бути адекватною до поточної ситуації; враховувати вимоги до рівня кваліфікації персоналу; враховувати ризики, пов'язані з можливими переналаштуваннями; брати до уваги фактори, пов'язані з характеристиками зовнішнього середовища тощо.



Стаття присвячена дослідженню питань щодо особливостей застосування прогнозуючого контролю та оцінки достовірності прийняття рішень у результаті прогнозування. При цьому наведені математичні співвідношення, що характеризують процес класифікації технічного стану під час прогнозування та подальшої оцінки достовірності прийняття рішень.

Результати дослідження можуть бути використані під час розробки та модернізації систем експлуатації засобів ЗНС.

### Література

1. Зуєв О.В. Ситуативний аналіз прийняття рішень та реалізації керуючих впливів в процесах технічного обслуговування радіотехнічних систем. *Вісник Державного ун-ту інформаційно-комунікаційних технологій*. 2009. Т. 7. № 2. С. 183–187.
2. Zuiev O.V. Questions of Communication, Navigation and Surveillance Modern Means Exploitation Systems Improvement. *Proceedings of the IEEE First International Scientific-Practical Conference on Infocommunications Science and Technology*. P.99–101.
3. Zuiev O.V. Questions of Communication, Navigation and Surveillance Systems Adaptive Operation. *Proceedings of the IEEE Second International Scientific-Practical Conference on Infocommunications Science and Technology*. P.99–103.
4. Zuiev O.V., Demydko V.G., Gerasymenko T.S. Analysis of Control Processes Influence on UAV Equipment Classification Veracity. *Proceedings of the IEEE International Conference on Actual Problems of UAV Development*. P.102–105.
5. Solomentsev O., Zaliskyi M., Zuiev O. Estimation of quality parameters in the radio flight support operational system. *Aviation*. 2016. Vol. 20, Iss. 3. P. 123–128.
6. Zuiev O.V. Problems of Radio Navigation Systems Adaptive Operation. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control*. P.193–198.
7. Zuiev O.V. Ground Radio Navigation Systems Maintenance Processes Improvement. *Electronics and Control Systems*. № 4(50). 2016. P.78–83.
8. Zuiev O.V. Instrument Landing Systems' Control Processes Investigation. *Proceedings of Signal Processing Symposium 2017 (SPS 2017)*. P.1–4.
9. Zuiev O, Solomentsev O., Zaliskyi M. Intelligence-Based Operation of Aviation Radioelectronic Equipment. Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries: Chapter in the book, IGI Global, Pennsylvania, USA, 2020. P. 148–179.
10. Zuiev O., Solomentsev O., Petrova, Y. Multiple-choice Classification of Radio Navigation Systems Technical State. *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advanced Computer Information Technologies*. P. 246–249.
11. Rausand M. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications. New York: Wiley, Inc., 2004. 458 p.
12. Nakagawa T. Maintenance theory of reliability. London: Springer-Verlag, 2005. 270 p.
13. Tartakovsky A., Nikiforov I., Basseville M. Sequential analysis. Hypothesis testing and changepoint detection. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015. 580 p.
14. Ulansky V., Terentyeva I. Availability assessment of a telecommunications system with permanent and intermittent faults. *Proceedings of 2017 IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. P. 908–911.
15. Dhillon B.S. Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers. New York, Taylor & Francis Group, 2006, 214 p.
16. Smith D.J. Reliability, Maintainability and Risk. Practical Methods for Engineers. 10th edition, London, Elsevier, 2021, 516 p.
17. Stark J. Product Lifecycle Management, Volume 1: 21st Century Paradigm for Product Realisation. Third Edition. London, Springer, 2019, 1032 p.

18. Jardine A. K. S., Tsang A. H. C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2017, 364 p.

19. Ren H., Chen X., Chen Y. Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization and Applications. Academic Press, 2017, 260 p.

**Зуєв О.В., Соломенцев О.В., Заліський М.Ю., Осіпчук А.О.**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ ПРОГНОЗУЮЧОГО КОНТРОЛЮ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ, НАВІГАЦІЇ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

*Засоби зв'язку, навігації та спостереження відіграють значну роль у процесі забезпечення безпеки польотів цивільної авіації. Для підтримки надійності та ефективності використання цих засобів за призначенням застосовують системи експлуатації. Система експлуатації містить у своєму складі власне засоби зв'язку, навігації та спостереження, виконавців, документації, ресурсне забезпечення. Основними функціями системи експлуатації є: організація, координація, контроль технічної експлуатації об'єктів і засобів зв'язку, навігації та спостереження; проведення організаційно-технічних заходів щодо модернізації, підтримки експлуатаційної готовності й продовженню терміну служби цих засобів; планування, організація, координація й контроль робіт із сертифікації служб і об'єктів авіаційних засобів; планування, координація й контроль за проведенням льотних перевірок засобів; удосконалення й впровадження нових методів організації роботи, у тому числі на основі використання сучасних інформаційних технологій. Важливим процесом експлуатації є прогнозування технічного стану. У результаті прогнозування технічного стану засобів зв'язку, навігації та спостереження здійснюється оцінка значення сукупності визначальних параметрів. Практичне застосування алгоритмів прогнозуючого контролю передбачає зменшення похибок прийняття рішень про стан об'єкта за наявності апріорної невизначеності. Кількісною мірою об'єктивності прийнятих у результаті прогнозування рішень є достовірність прогнозуючого контролю. Достовірність загалом характеризує ступінь довіри до прийнятих у результаті прогнозування рішень. Від достовірності контролю залежить не тільки об'єктивність власне прогнозування, але й ефективність функціонування систем експлуатації засобів зв'язку, навігації та спостереження. Ця стаття присвячена дослідженню питань щодо особливостей застосування прогнозуючого контролю та оцінки достовірності прийняття рішень у результаті прогнозування. При цьому наведені математичні співвідношення, що характеризують процес класифікації технічного стану під час прогнозування та подальшої оцінки достовірності прийняття рішень. Результати дослідження можуть бути використані під час розробки та модернізації систем експлуатації засобів зв'язку, навігації та спостереження.*

**Ключові слова:** система експлуатації, прогнозуючий контроль, достовірність, засоби зв'язку, навігації та спостереження.

**Zuiev O.V., Solomentsev O.V., Zaliskyi M.Yu., Osipchuk A.O.**

### **RESEARCH OF PREDICTIVE CONTROL PROCEDURES FOR COMMUNICATION, NAVIGATION AND SURVEILLANCE EQUIPMENT**

*Communication, navigation and surveillance devices play a significant role in the process of ensuring the safety of civil aviation flights. Operation systems are used to maintain the reliability and efficiency of the intended use of this equipment. The operation system includes the devices of communication, navigation and surveillance, personnel, documentation, and resource support. The main functions of the operation system are: organization, coordination, control of the technical operation of objects and devices of communication, navigation and*

*surveillance; carrying out organizational and technical measures regarding modernization, support of operational readiness and extension of the service life of these equipment; planning, organization, coordination and control of operation on the certification of aviation devices and services; planning, coordination and control of flight inspections of vehicles; improvement and implementation of new methods of operation organization, including based on the use of modern information technologies. Forecasting the technical condition is an important operation process. As a result of forecasting the technical condition of communication, navigation and surveillance equipment, the value of a set of determining parameters is assessed. The practical application of predictive control algorithms involves the reduction of errors in decision-making about the state of the object in the presence of a priori uncertainty. The quantitative measure of the objectivity of decisions made as a result of forecasting is the veracity of forecasting control. The veracity generally characterizes the degree of confidence in decisions made as a result of forecasting. The veracity of the control depends not only on the objectivity of the actual forecasting, but also on the efficiency of the operation of communication, navigation and surveillance systems. This article is devoted to the study of issues related to the features of the application of predictive control and assessment of the veracity of decision-making as a result of forecasting. At the same time, mathematical equations characterizing the process of classifying the technical condition during forecasting and subsequent assessment of the veracity of decision-making are given. The results of the research can be used during the development and modernization of the operation systems for communication, navigation and surveillance equipment.*

**Keywords:** *operation system, predictive control, veracity, communication, navigation and surveillance equipment.*