

**Рагулін С. В.**, кандидат технічних наук, доцент  
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,  
водної та електричної інженерії  
Херсонського державного аграрно-економічного університету  
ORCID: 0000-0001-8955-0380

## ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ НАЗЕМНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДЛЯ БОРТОВОГО РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

Сучасний стан експлуатації цивільної авіації характеризується стрімким ускладненням бортового радіоелектронного обладнання та пілотажно-навігаційних комплексів (ПНК). Висока інтеграція систем призводить до того, що оперативний контроль на стоянці обмежений можливостями вбудованих систем контролю (ВСК). Проте обмежена достовірність ВСК зумовлює значну кількість помилкових демонтажів справних легкознімних блоків (ЛЗБ), що створює потік «непідтверджених дефектів». Це вимагає від авіакомпаній впровадження ефективних наземних автоматизованих систем контролю (НАСК), які здатні проводити глибоку діагностику знятого обладнання. Проблема полягає у відсутності єдиного методичного підходу до вибору архітектури НАСК (зосередженої чи розосередженої) залежно від обсягів парку повітряних суден (ПС) та економічних ризиків.

Об'єкт дослідження – процеси технічного обслуговування та відновлення працездатності ПНК літаків типу Ан-148 із використанням автоматизованих засобів наземного контролю.

Предмет дослідження – методи та показники оцінки ефективності структурної побудови НАСК за критерієм повних експлуатаційних витрат.

Методологія дослідження. У роботі застосовано комплексний підхід, що базується на методах системного аналізу, теорії масового обслуговування та інженерної економіки. Для оцінки ефективності розроблено математичну модель, яка інтегрує показники надійності ПС, достовірності ВСК та пропускну здатності НАСК. Особлива увага приділена врахуванню різночасовості капітальних вкладень (дисконтування) та вартості обмінного фонду ЛЗБ у післягарантійний період експлуатації.

Наукова новизна та отримані результати. 1. Вперше розроблено цілісну методичку вибору оптимальної структури НАСК, яка, на відміну від існуючих, враховує імовірнісні збитки від простоїв літаків через виникнення черг на контроль. 2. Проведено порівняльний аналіз зосереджених (одномісних) та розосереджених (багатостанційних) архітектур НАСК. Доведено, що універсальні одномісні системи, попри нижчу початкову вартість, мають обмежену живучість: будь-яка відмова або перевантаження системи призводить до повної зупинки процесу діагностики парку. 3. На основі розрахунків для літака Ан-148 встановлено закономірність: економічна ефективність переходу від зосередженої до розосередженої структури НАСК прямо залежить від розміру приписного парку. Визначено критичне значення – 12 одиниць ПС, при перевищенні якого розосереджена структура стає пріоритетною за рахунок мінімізації витрат на формування надлишкового обмінного фонду та запобігання експлуатаційним простоям.

Практичне значення. Отримані результати дозволяють авіакомпаніям та центрам технічного обслуговування (MRO) обґрунтовано планувати розвиток наземної бази діагностування, оптимізувати витрати на післяпродажне обслуговування літаків типу Ан-148 та підвищити коефіцієнт технічного використання парку.

Ключові слова: НАСК, авіоніка, вбудована система контролю, легкознімні блоки, непідтверджені дефекти, повні експлуатаційні витрати, обмінний фонд, оптимізація структури, дисконтування витрат.

### **Rahulin S. V. Selecting the optimal option for a ground-based automated control system for airborne electronic equipment**

The current state of civil aviation operations is characterized by a rapid increase in the complexity of on-board avionics and flight navigation systems (FNS). The high level of system integration means that operational monitoring on the apron is limited by the capabilities of the built-in monitoring systems (BMS). However, the limited reliability of the ISC results in a significant number of erroneous removals of serviceable easily removable units (ERUs), creating a stream of 'unconfirmed defects'. This requires airlines to implement effective ground-based automated inspection systems (GAIS) capable of performing in-depth diagnostics on removed equipment. The problem lies in the absence of a unified methodological approach to selecting the AGS architecture (centralized or distributed) depending on the size of the aircraft fleet and economic risks. The object of the study is the processes of maintenance and restoration of the operational capability of An-148 aircraft using automated ground control systems. The subject of the study is the methods and indicators for assessing the effectiveness of the structural design of the AGCS based on the criterion of total operating costs.

The study employs a comprehensive approach based on methods of systems analysis, queuing theory and industrial engineering. To assess efficiency, a mathematical model has been developed that integrates indicators of power plant reliability, VSK



---

reliability and NASC throughput capacity. Particular attention is paid to accounting for the time value of capital investments (discounting) and the cost of the LZB replacement fund during the post-warranty period of operation. Scientific novelty and results obtained. 1. For the first time, a comprehensive methodology has been developed for selecting the optimal NASC structure which, unlike existing approaches, accounts for the probabilistic losses from aircraft downtime due to queues at security checkpoints. 2. A comparative analysis of centralized (single-site) and distributed (multi-site) NASC architectures has been carried out. It has been demonstrated that universal single-site systems, despite their lower initial cost, have limited resilience: any system failure or overload leads to a complete halt in the fleet diagnostic process. 3. Based on calculations for the An-148 aircraft, a pattern has been established: the economic efficiency of the transition from a centralized to a distributed NASC structure directly depends on the size of the registered fleet. A critical value of 12 aircraft has been determined; once this is exceeded, a distributed structure becomes the priority due to the minimization of costs associated with forming a surplus exchange fund and the prevention of operational downtime.

The results obtained enable airlines and maintenance, repair and overhaul (MRO) centers to plan the development of their ground-based diagnostic facilities in an informed manner, optimize the costs of after-sales maintenance for An-148 aircraft, and improve the fleet's technical utilization rate.

Key words: NASC, avionics, embedded control system, easily removable units, unconfirmed defects, total operating costs, replacement fund, structural optimization, cost discounting.

Високий рівень інтеграції пілотажно-навігаційних комплексів та значна інтенсивність експлуатації повітряних суден (ПС) зумовлюють те, що оперативний контроль на стоянці здійснюється переважно за допомогою вбудованих систем контролю (ВСК). Саме на основі сигналів ВСК та зауважень екіпажу приймається рішення про демонтаж легкознімних блоків (ЛЗБ) для подальшого ремонту.

Проте, оскільки достовірність ВСК не є абсолютною, виникає проблема помилкової дефектації: справні блоки ідентифікуються як непрацездатні, демонтуються та відправляються на відновлення. Це створює потік «непідтверджених дефектів», що призводить до необґрунтованих експлуатаційних витрат.

**Постановка завдання.** Одним із ключових шляхів розв'язання цієї проблеми є впровадження наземних автоматизованих систем контролю (НАСК). Вони дозволяють авіакомпаніям проводити повторну високоточну перевірку демонтованих блоків безпосередньо в умовах авіатехнічної бази. Це запобігає відправці справних ЛЗБ до ремонтних організацій, значно скорочуючи логістичні та сервісні витрати [1].

Таким чином, перед постачальником та експлуатантом постає завдання вибору оптимальної стратегії технічного обслуговування (ТО), яка забезпечить максимальну ефективність експлуатації повітряних суден. Необхідність такого вибору зумовлена балансом економічних чинників: з одного боку, закупівля та утримання НАСК потребують значних інвестицій, а з іншого – відсутність такої системи призводить до критичних витрат через непідтверджені дефекти та потребу у формуванні дорогого обмінного фонду легкознімних блоків (ЛЗБ).

Для об'єктивного вибору оптимального варіанта необхідно розробити систему показників, що дозволяють оцінити повні експлуатаційні витрати. Ці показники мають інтегрувати в собі основні характеристики процесу ТО та ремонту, зокрема:

- рівень достовірності вбудованої системи контролю (ВСК);
- періодичність перевірок працездатності;
- тривалість циклу відновлення ЛЗБ;
- структуру та обсяг необхідного обмінного фонду.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливо, щоб запропоновані показники враховували специфіку післягарантійного періоду експлуатації літака. Крім того, вартісна оцінка повинна базуватися на принципі дисконтування (різночасовості капітальних вкладень), оскільки закупівля НАСК та формування обмінного фонду можуть здійснюватися як одночасно з придбанням ПС, так і поетапно в процесі його подальшої експлуатації.

На сьогодні низка провідних компаній пропонує власні розробки НАСК для контролю та діагностики систем авіоники. Серед найбільш розповсюджених систем варто виділити:

ATEC Series 6 (виробництва EADS Tests & Services) – визнаний світовий лідер у сегменті систем контролю авіоники [2];

ATE IRIS 2000 (1200) (фірма Aeroflex) [3];

НАСКД-200 (компанія BETA AIR) [4];

A.T.S. (компанія CSA) [5];

НАСК-2000 – спеціалізована система для контролю пілотажно-навігаційних комплексів літаків типу Іл-96 та Ту-204.

Досвід експлуатації таких систем підтверджує їхню високу економічну ефективність. Зокрема, за даними Американського центру технічного обслуговування і ремонту (The American Maintenance and Engineering Center), впровадження системи ATEC Series 6 дозволило знизити річні витрати на обслуговування та відновлення лише одного типу легкознімних блоків у середньому на 400 тис. дол. США [6]. Такі показники досягаються насамперед завдяки мінімізації кількості помилково демонтованих справних блоків.

Сучасні розробники будують НАСК за модульним принципом із варіативною конфігурацією вимірювальних засобів. З точки зору структурної побудови виділяють два основні варіанти:

1. Розосереджена (розподілена) НАСК – складається з кількох локальних станцій контролю, кожна з яких профільована за певним типом обладнання авіоніки.

2. Зосереджена НАСК (універсальна одномісна станція) – єдиний комплекс, здатний виконувати перевірку різних типів блоків послідовно.

Таблиця 1

### Порівняльний аналіз структур

Характеристика	Розосереджена НАСК	Зосереджена (одномісна) НАСК
Продуктивність	Висока (одночасний контроль кількох блоків)	Обмежена (послідовний контроль)
Надійність	Висока (відмова однієї станції не зупиняє роботу інших)	Низька (відмова призводить до повного простою)
Живучість	Можливість парирування відмов за рахунок дублювання обладнання	Відсутня
Вартість	Відносно висока (потребує більше апаратних ресурсів)	Нижча (оптимальна для невеликих парків)

Головною перевагою розосередженої структури є її висока пропускна здатність, що дорівнює кількості локальних станцій. Важливою особливістю є також технічна стійкість: вихід із ладу одного сегмента дозволяє іншим продовжувати роботу, а в деяких випадках несправність може бути компенсована використанням однотипного обладнання сусідніх станцій. Основним недоліком такої архітектури залишається її висока ринкова вартість.

Основним обмеженням універсальної НАСК є її здатність контролювати лише один легкознімний блок у будь-який момент часу. Така архітектура характеризується значно нижчою пропускною здатністю порівняно з розподіленими системами.

У ситуаціях, коли інтенсивність надходження несправних блоків перевищує технічні можливості системи, виникають наступні негативні наслідки:

- Формування черг: Накопичення ЛЗБ різних типів, що очікують на перевірку.
- Дефіцит справних агрегатів: Необхідність збільшення обсягу та вартості обмінного фонду, щоб компенсувати час очікування в черзі.
- Простої авіатехніки: У разі вичерпання запасних одиниць в обмінному фонді, затримки в контролі безпосередньо призводять до виходу повітряних суден з експлуатації.

Таким чином, при зростанні приписного парку літаків (що, як було показано далі, становить понад 12 одиниць для Ан-148), часові та фінансові втрати від простоїв одномісної НАСК починають перевищувати капітальні витрати на впровадження розосередженої системи.

**Мета статті.** Незважаючи на можливо меншу вартість одномісна НАСК може виявитися менш ефективною, ніж розосереджена. Наслідки відмови одномісної НАСК є порівняно більш важкими, ніж для розподіленої, так як на протязі часу усунення причин відмови повністю припиняється процес контролю. Тому важливим є завдання вибору оптимальної структури НАСК для конкретних умов авіакомпанії. Проте в даний час відсутнє методичне забезпечення для оцінки ефективності використання НАСК з різною структурою побудови.

Для розв'язання цієї проблеми розроблено алгоритм вибору оптимального варіанту побудови НАСК. Вибір структури здійснюється на основі комплексного аналізу, де за головний критерій оптимальності приймається повні експлуатаційні витрати.

**Виклад основного матеріалу.** Алгоритм вибору оптимального варіанту НАСК.

Вибір оптимального варіанту структурної побудови НАСК проводиться за критерієм

$$ПЕВ(V_i^*) = \min_i ПЕВ(V_i),$$

де  $V_i$  –  $i$ -й варіант побудови НАСК;  $V_i^*$  – оптимальний варіант побудови НАСК;  $ПЕВ(V_i)$  і  $ПЕВ(V_i^*)$  повні і середні експлуатаційні витрати для  $i$ -го і оптимального варіантів побудови НАСК.

Алгоритм знаходження  $V_i^*$  полягає в наступному:

**Крок 1.** Визначаємо порядковий номер варіанта НАСК  $i = 1$ . Визначаємо порядковий номер ЛБ, вважаємо  $j = 1$ . Визначаємо початкове значення повних середніх втрат для  $j$ -го ЛБ  $ПЕВ_{j,W_{221}}(V_i) = 0$ .

**Крок 2.** Інтенсивність сумарного потоку всіх типів ЛБ визначається з виразу:

$$\Lambda_W = N_{WA} \sum_{i=1}^R \frac{m_{i,j}}{СЧНП_{W,i,j}}$$

Крок 3. Інтенсивність обслуговування однієї заявки на контроль визначається з виразу:

$$\mu_{w,j} = \frac{1}{t_{об,w,j}}$$

Крок 4. Визначаємо середнє число заявок на КР, що приходять за середній час обслуговування однієї заявки за допомогою НАСК-L за формулою

$$\rho_{w,j} = \frac{\Lambda_w}{\mu_{w,j}}$$

Крок 5. Визначаємо середній час очікування заявки на контроль в черзі за формулою:

$$t_{оч,w,j} = \frac{\rho_{w,j}}{\mu_{w,j}(1-\rho_{w,j})}$$

Крок 6. Визначаємо середній час повного технічного обслуговування ЛБ допомогою НАСК-L за формулою:

$$t_{об-L,j}(V_i) = t_{кр,j}^{НАСК} + t_{оч,w,j}$$

Крок 7. Визначаємо апостеріорні ймовірності «хибного»  $P_{хз,j,w}^A$  і «правильного»  $P_{пз,j,w}^A$  зняття для кожного  $j$ -го ЛБ визначаємо за формулами:

$$P_{хз,w}^A = \left\{ [1 - \exp(-\lambda\tau)] \left[ \frac{\exp(-\lambda\tau) - \exp(-N\lambda\tau)}{1 - \exp(-\lambda\tau)} - \frac{(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau) - (1-\alpha)^N \exp(-N\lambda\tau)}{1 - (1-\alpha)\exp(-\lambda\tau)} \right] + [1 - (1-\alpha)^N] \exp(-N\lambda\tau) \right\};$$

$$P_{пз,w}^A = \left\{ [1 - \exp(-\lambda\tau)] \left[ \frac{1 - (1-\alpha)^N \exp(-N\lambda\tau)}{1 - (1-\alpha)\exp(-\lambda\tau)} - \frac{\beta^N - (1-\alpha)^N \exp(-N\lambda\tau)}{1 - \frac{(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau)}{\beta}} \right] + (1-\alpha)^N \exp(-N\lambda\tau) \right\}.$$

Крок 8. Визначаємо середній час відновлення ЛБ за формулою

$$t_{b,j,w_{221}}(V_i) = [t_{об-L,j}(V_i) + t_{взв,j}] P_{пз,j,w}^A + t_{об-L,j}(V_i) P_{хз,j,w}^A$$

Крок 9. Обчислюємо повні середні втрати  $ПЕВ_{j,w_{221}}(V_i) = 0$ , як функцію  $V_i$  за формулою:

$$ПЕВ_{w_{221}} = \frac{T_0 m}{СЧНПР_w} \left\{ \sum_{t=1}^{t_0-1} N_{wA,t} ECC_{w_{221},t}(V_i)(1+\varepsilon)^{1-t} + \sum_{t=t_0}^{T_w} N_{wA,t} ECC_{w_{221},t}(V_i)(1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \left( \frac{C_{НАСК-L}(V_i)}{M_{ЛБ}} (1+\varepsilon)^{1-t_0} \right) + C_{ЛБ} (F_1(V_i) + MF) + C_{ЛБ} \sum_{t=2}^{T_w} (\Delta F_t(V_i) + \Delta MF_t)(1+\varepsilon)^{1-t},$$

де  $ECC_{w_{221},t}(V_i) = C_{ТО,t}(t_{кр,t} + t_{вв_{221},t}(V_i) + t_{D,t} + t_{M,t}) + P_{ПН}^A C_{TR,t}$ .

Крок 10. Припускаємо  $ПЕВ_{j,w_{221}}(V_i^*) = ПЕВ_{j,w_{221}}(V_i)$ .

Крок 11. Припускаємо:  $j = j + 1$ . Перевіряємо: якщо  $j < M$ , то повертаємося до Кроку 2, в іншому випадку переходимо до наступного кроку 12.

Крок 12. Припускаємо  $i = i + 1$ . Перевіряємо: якщо  $i < M$ , то повертаємося до Кроку 2, в іншому випадку приймаємо  $ПЕВ^*(V^*) = \min ПЕВ_{w_{221}}(V_i)$ . Обчислення закінчено.

Результати оптимізації структурної побудови НАСК. У табл. 4.10–7.11 наведені показники процесу експлуатації РЕС літака Ан-148 при використанні універсальної НАСК і різній кількості експлуатованих ПС.

Тут і далі параметр  $Z$  – це значення експлуатаційних витрат без урахування питомих капітальних витрат на НАСК  $\Delta K^Y = \frac{C_{НАСК-L}}{M_{ЛБ}}$ .

Як видно з табл. 1–2 збільшення парку експлуатованих ПС тягне за собою необхідність збільшення обсягу обмінного фонду, причому, ця залежність не є лінійною. Необхідно збільшувати кількість тих ЛБ, які мають відносно не високі показники надійності і достовірності контролю.

При невеликій кількості експлуатованих ПС ( $N_A \leq 12$ ) пропускна здатність універсальної НАСК дозволяє повністю забезпечити процес контролю демонтованих блоків. Однак при  $N_A > 12$  для ряду ЛБ, параметр  $\rho$  може стати більше одиниці (у таблиці ці осередки виділені сірим кольором), тобто продуктивності НАСК буде не вистачати і утворюється черга на контроль. Це потягне за собою простій ПС, необхідність поповнення ОФ, і, як наслідок збільшення експлуатаційних витрат. Таким чином, при кількості експлуатованих ПС  $N_A > 12$ , доцільно використовувати варіант розосередженою НАСК.

У табл. 3 наведені показники процесу експлуатації РЕНС літака Ан-148 при використанні розосередженою НАСК при двох станціях контролю

$$(r = 2).$$

Таблиця 1

**Показники процесу експлуатації РЕНС при використанні універсальної НАСК і  $N_A = 6$**

№ з/п	Найменування ЛБ	Універсальна НАСК, $N_A = 6$						
		$\rho$	$t_{об}$	$t_{оч}$	$t_B$	$F^*$	$Z$	ПЕВ
1	VHF-4000	0,07	0,65	0,15	2,27	1	15 742	29 080
2	HF-9000	0,14	0,84	0,33	2,33	1	12 925	26 290
3	Опал-Б	0,08	0,67	0,17	3,05	1	6368	19 700
4	БУР-92А-05	0,07	0,65	0,15	4,68	1	27 230	40 570
5	Курс-93М	0,09	0,71	0,21	3,71	1	26 150	39 980
6	БУРАН-А-148	0,08	0,68	0,18	6,56	1	60 990	74 320
7	А-053-08.04	0,16	0,90	0,40	3,69	1	18 666	32 000
8	TCAS-2000	0,05	0,61	0,11	5,43	1	58 130	71 470
9	DME/P-85	0,22	1,08	0,58	6,17	1	25 870	39 200
10	АРК-25	0,36	1,65	1,15	7,20	2	44 500	57 840
11	XS-950	0,07	0,64	0,14	2,06	1	50 413	63 750
12	СО-96	0,16	0,90	0,40	5,26	1	24 920	38 250
13	СНС-2	0,05	0,62	0,12	5,06	1	22 210	35 540
14	БСТО-АВТО	0,05	0,61	0,11	4,97	1	115 600	128 900
15	ВСС-100	0,08	0,67	0,17	2,23	1	48 497	61 830
Сумарні затрати							558 211	758 720

Таблиця 2

**Показники процесу експлуатації РЕНС при використанні універсальної НАСК і  $N_A = 9$**

№ з/п	Найменування ЛБ	Універсальна НАСК, $N_A = 9$						
		$\rho$	$t_{об}$	$t_{оч}$	$t_B$	$F^*$	$Z$	ПЕВ
1	VHF-4000	0,15	0,87	0,37	2,49	1	18 260	31 590
2	HF-9000	0,32	1,46	0,96	2,95	1	13 390	26 730
3	Опал-Б	0,18	0,94	0,44	3,31	1	6677	20 010
4	БУР-92А-05	0,16	0,89	0,39	4,92	1	27 630	40 960
5	Курс-93М	0,21	1,05	0,55	4,05	1	26 570	39 910
6	БУРАН-А-148	0,13	0,96	0,46	6,84	1	61 580	74 910
7	А-053-08.04	0,38	1,73	1,22	4,45	1	19 370	32 700
8	TCAS-2000	0,11	0,76	0,26	5,58	1	58 450	71 780
9	DME/P-85	0,51	2,58	2,08	7,66	2	50 300	63 630
10	АРК-25	0,82	9,96	9,46	15,50	3	66 750	80 090
11	XS-950	0,15	0,87	0,37	2,28	1	58 350	71 680
12	СО-96	0,38	1,73	1,23	6,08	1	25 870	39 210
13	СНС-2	0,13	0,80	0,30	5,25	1	22 390	35 720
14	БСТО-АВТО	0,12	0,77	0,27	5,14	1	115 900	129 300
15	ВСС-100	0,18	0,94	0,44	2,49	1	59 950	69 280
Сумарні затрати							631 437	827 500

Таблиця 3

Показники процесу експлуатації РЕНС при використанні універсальної НАСК і  $N_A = 12$ 

№ з/п	Найменування ЛБ	Універсальна НАСК, $N_A = 12$						
		$\rho$	$t_{об}$	$t_{оч}$	$t_B$	$F^*$	$Z$	ПЕВ
1	VHF-4000	0,28	1,27	0,77	2,89	1	18 480	31 810
2	HF-9000	0,57	3,22	2,72	4,12	1	13 830	27 170
3	Опал-Б	0,32	1,44	0,94	3,82	1	6986	20 320
4	БУР-92А-05	0,29	1,32	0,82	5,35	1	28 020	41 350
5	Курс-93М	0,38	1,74	1,24	4,78	1	27 000	40 330
6	БУРАН-А-148	0,33	1,51	1,01	7,39	1	62 170	75 510
7	А-053-08.04	0,67	4,71	4,21	7,44	2	37 330	5060
8	TCAS-2000	0,20	1,02	0,52	5,84	1	58 770	71 100
9	DME/P-85	0,90	19,92	19,42	25,01	3	74 730	88 060
10	АРК-25	0,93	23,42	22,92	28,90	4	86 950	100 300
11	XS-950	0,27	1,27	0,77	2,68	1	58 560	71 890
12	СО-96	0,67	4,70	4,20	9,05	2	49 830	63 160
13	СНС-2	0,23	1,12	0,62	5,56	1	22 570	35 900
14	БСТО-АВТО	0,21	1,05	0,55	5,41	1	116 209	129 600
15	ВСС-100	0,32	1,44	0,94	3,01	1	56 190	69 530
Сумарні затрати							717 625	871 090

З розрахунків, наведених у табл. 3 і табл. 4 видно, що:

– для універсальної НАСК  $ПЕВ_{w_{221}} = 717625 + \Delta K^Y$ ;

– для розосередженої НАСК  $ПЕВ_{w_{221}} = 636655 + \Delta K^Y$ .

Як видно з розрахунків, витрати при використанні розосередженої НАСК на 22 % нижче, ніж при використанні універсальної НАСК. Таким чином, якщо вартість розосередженої НАСК не перевищує на 20 % вартості універсальної НАСК, то при  $N_A > 12$ , використання розосереджених НАСК більш ефективно.

Таблиця 4

Показники процесу експлуатації РЕНС літака Ан-148 при використанні розосередженої НАСК, що складається з двох станцій контролю ( $r = 2$ )

№ з/п	Найменування ЛБ	Універсальна НАСК, $N_A = 12$						
		$\rho$	$t_{об}$	$t_{оч}$	$t_B$	$F^*$	$Z$	ПЕВ
1.	VHF-4000	0,14	0,82	0,32	2,44	1	18 480	31 810
2.	HF-9000	0,57	3,22	2,72	4,72	1	13 830	27 170
3.	Опал-Б	0,32	1,44	0,94	3,82	1	6986	20 320
4.	БУР-92А-05	0,29	1,32	0,82	5,35	1	28 020	41 350
5.	Курс-93М	0,38	1,74	1,24	4,78	1	27 000	40 330
6.	БУРАН-А-148	0,33	1,51	1,01	7,39	1	62 170	75 510
7.	А-053-08.04	0,04	1,52	1,02	4,25	1	20 080	33 410
8.	TCAS-2000	0,21	1,02	0,52	5,84	1	58 770	71 100
9.	DME/P-85	0,45	2,15	1,65	7,24	2	51 730	65 060
10.	АРК-25	0,74	6,01	5,51	11,55	3	69 230	82 560
11.	XS-950	0,27	1,27	0,77	2,68	1	58 560	71 890
12.	СО-96	0,33	1,52	1,02	5,87	1	26 830	40 160
13.	СНС-2	0,23	1,12	0,62	5,56	1	22 570	35 900
14.	БСТО-АВТО	0,21	1,05	0,55	5,41	1	116 209	129 600
15.	ВСС-100	0,32	1,44	0,94	3,01	1	56 190	69 530
Сумарні затрати							636 655	835 700

**Висновки.** У ході дослідження було розв'язано важливе науково-практичне завдання щодо обґрунтування структури наземних автоматизованих систем контролю (НАСК). Основні результати роботи полягають у наступному:

---

Запропоновано нову методику вибору оптимального варіанту НАСК, яка базується на алгоритмі мінімізації повних експлуатаційних витрат. Це дозволяє врахувати не лише вартість обладнання, а й ризики, пов'язані з повним припиненням процесу контролю у разі відмови системи.

Проведено оцінку ефективності використання НАСК при експлуатації парку літаків типу Ан-148. Результати підтверджують, що вибір архітектури системи має критичне значення для економічної стабільності авіакомпанії.

Встановлено, що структурна побудова НАСК безпосередньо залежить від обсягу приписного парку. Доведено, що при кількості літаків понад 12 одиниць, використання розосереджених (розподілених) НАСК є більш ефективним, ніж одномісних, завдяки вищій живучості системи та мінімізації збитків від потенційних відмов.

#### Список використаних джерел:

1. Alarm M. A future of function of failure (CMOS gate oxide scaling) / M. Alarm, B. Weir, P. Silver // *IEEE Circuits and Devices*. – 2002. – Vol. 18. – P. 42–48.
2. Altumi A. A. Reliability optimisation of flexible manufacturing systems with spare tooling / A. A. Altumi, A. M. Philipose, S. M. Taboun // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – Vol. 34, № 5. – P. 487–499.
3. Amari Suprasad V. Imperfect coverage models: status and trends / S. V. Amari, A. Myers, A. Rauzy, K. Trivedi // *Handbook of Performability Engineering*. – London : Springer London, 2008. – P. 25–40.
4. American Airlines & Tulsa: Working Together: Vision 2025, 2006, October [Electronic Resource]. – URL: [www.vision2025.info](http://www.vision2025.info) (дата звернення: 27.03.2026).
5. An investigation of “cannot duplicate” failures / R. William, J. Banner, I. Knowles, M. Dube // *Quality and Reliability Engineering International*. – 1998. – № 4. – P. 331–337.
6. Reliability analysis in the commercial aerospace industry / J. Qin, B. Huang, J. Walter, B. Bernstein, M. Talmor // *The Journal of the Reliability Analysis Center*. – N.Y. : Department of Defense of the USA, 2005. – № 1. – P. 1–5.

#### References:

1. Alarm, M., Weir, B., & Silver, P. (2002). A future of function of failure (CMOS gate oxide scaling). *IEEE Circuits and Devices*, 18, 42–48.
2. Altumi, A. A., Philipose, A. M., & Taboun, S. M. (2007). Reliability optimisation of flexible manufacturing systems with spare tooling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5), 487–499.
3. Amari, S. V., Myers, A., Rauzy, A., & Trivedi, K. (2008). Imperfect coverage models: Status and trends. In *Handbook of Performability Engineering* (pp. 25–40). Springer London.
4. American Airlines & Tulsa. (2006, October). *Working together: Vision 2025*. <http://www.vision2025.info>
5. An investigation of “cannot duplicate” failures. (1998). *Quality and Reliability Engineering International*, (4), 331–337.
6. Reliability analysis in the commercial aerospace industry. (2005). *The Journal of the Reliability Analysis Center*, (1), 1–5.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026