

УДК 681.3(07)

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-15

Назаренко О. А., Банзак О. В., Грабовський О. В., Банзак Г. В.

Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку, м. Одеса, Україна

## РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Складні технічні об'єкти військової техніки у суспільстві мають виключно важливе значення. Йдеться насамперед про різні радіоелектронні комплекси військового та спеціального призначення, радіолокаційні станції, автоматизовані системи управління (повітряним рухом, об'єктами енергетики тощо). Від рівня безвідмовності таких об'єктів залежить обороноздатність держави, економічна безпека, життя сотень та тисяч людей.

Такі об'єкти належать до класу об'єктів, що відновлюються тривалого багаторазового застосування. Вони, як правило, є дорогими та потребують значних витрат на їх експлуатацію. Для забезпечення необхідного рівня безвідмовності в процесі їх експлуатації зазвичай проводиться технічне обслуговування (ТО), суть якого полягає у своєчасній запобіжній заміні елементів, що знаходяться в стані перед відмовою. У цієї праці розроблено імітаційну статичну модель (ІСМ), призначену для прогнозування показників надійності та вартості експлуатації складного технічного об'єкта військової техніки, що залежать від параметрів обраної стратегії ТО. В ІСМ реалізовано алгоритми імітації процесів ТО для трьох варіантів стратегій ТО. Режим моделювання регламентованого ТО запроваджено з метою забезпечення повноти аналізу можливих стратегій ТО об'єкта, що проектується та прогнозування можливого виграшу у надійності та вартості експлуатації об'єкта за рахунок застосування стратегій технічного обслуговування «по стану» (ТОС).

**Ключові слова:** складні технічні об'єкти військової техніки, імітаційна статична модель, технічне обслуговування, режим моделювання.

**Постановка проблеми.** Характерною особливістю складних технічних об'єктів спеціального призначення є наявність у їхньому складі великої кількості (десятки, сотні тисяч) різнотипних комплектуючих елементів, що мають різний рівень надійності, різні закономірності процесів їхнього зносу та старіння. Ця особливість вимагає більш тонкого підходу до організації та планування ТО у процесі їх експлуатації.

Проблема полягає в тому, що при розробці таких об'єктів усі питання, пов'язані з ремонтпридатністю та технічним обслуговуванням, повинні вирішуватися вже на ранніх етапах проектування об'єкта. Якщо не передбачити заздалегідь необхідні апаратні та програмні засоби вбудованого контролю технічного стану (ТС) об'єкта, не розробити і не вбудувати в об'єкт технологію проведення ТО, то реалізувати в майбутньому можливий виграш у безвідмовності об'єкта за рахунок проведення ТО не вдасться.

Оскільки всі ці питання повинні вирішуватися на етапі створення об'єкта (коли об'єкта ще немає), необхідні математичні моделі процесу ТО, за допомогою яких можна було б прорахувати можливий виграш у рівні безвідмовності об'єкта за рахунок проведення ТО, оцінити необхідні вартісні витрати. Потім на підставі таких розрахунків прийняти рішення про необхідність проведення ТО для цього типу об'єктів і, якщо таке рішення прийнято, розробити структуру системи ТО, вибрати найбільш прийнятну стратегію ТО, визначити її оптимальні параметри.

**Мета роботи.** Метою дослідження у цій роботі є наукове обґрунтування методик визначення оптимальних параметрів стратегії ТО “за станом” складних технічних об'єктів на етапі їх розробки.

**Викладення основного матеріалу.** Розроблена ІСМ призначена для отримання оцінок показників надійності та вартості експлуатації об'єкта з урахуванням його складу, структури та надійних характеристик та з урахуванням проведення ТО. У моделі має відтворюватися (імітуватися) процес технічної експлуатації, який формально описується графом станів та переходів.

Для верифікації моделі скористаємося стандартним прийомом, суть якого полягає у наступному. Здійснюється моделювання для умов, за яких можна розрахувати точне значення вихідних показників моделі. Потім шляхом порівняння одержаних результатів моделювання з точними розрахунковими показниками оцінюється правильність реалізації алгоритмів моделювання.

Будемо використовувати відоме теоретичне положення, що полягає в тому, що значення параметра потоку відмов елемента, що відновлюється, що встановилося, дорівнює середньому напрацюванню до відмови цього елемента [1-5]:

$$\omega^{уст} = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 1/T_{cp},$$

де  $\omega(t)$  - функція параметра потоку відмов;

$\omega^{уст}$  - значення параметра потоку відмов, що встановилося;

$T_{cp}$  - середнє напрацювання повністю відновлюваного елемента.

З огляду на це для відновлюваного елемента має виконуватися така умова:

$$\omega^{уст} = 1/T_{cp}. \quad (1)$$

Для верифікації моделі створимо БД об'єкта, що складається з єдиного елемента (назвемо цей об'єкт Test-0).

Для елемента цього об'єкта БД введемо такі значення параметрів:  $\mu=10000$  год;  $\nu=1$ .

У ICM обчислюється оцінка функції параметра потоку відмов в такий спосіб. Заданий інтервал експлуатації  $[0, T_3]$  розбивається на  $m$  однакових інтервалів часу (напрацювання)

$$\Delta t = \Delta t_i = (t_i - t_{i-1}), \text{ де } t_i = i \cdot \Delta t \text{ (} i = \overline{1, m}\text{)}.$$

У процесі моделювання накопичується статистика визначення величини  $\tilde{n}_i$  середнього числа відмов, які у інтервалі  $\Delta t_i$ .

За отриманими статистичними даними обчислюється оцінка параметра потоку відмов згідно з виразом [6, 7]:

$$\tilde{\omega}(t_i) = \tilde{n}_i / \Delta t_i. \quad (2)$$

На рисунку 1 наведено графік функції  $\tilde{\omega}(t_i)$  для об'єкта Test-0, отриманий для випадку  $T_3 = 20$  років та  $\Delta t = 3$  міс.

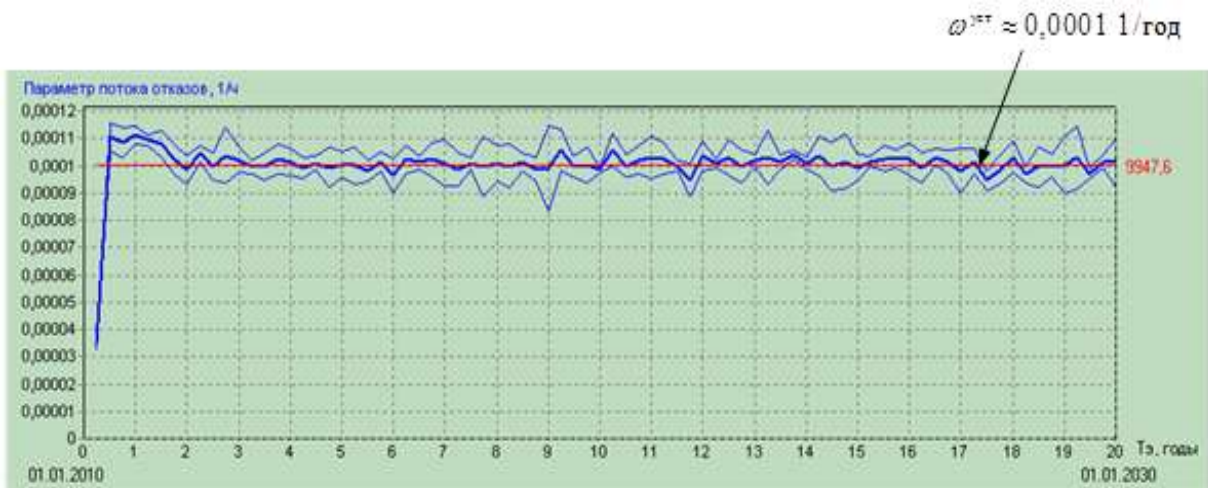
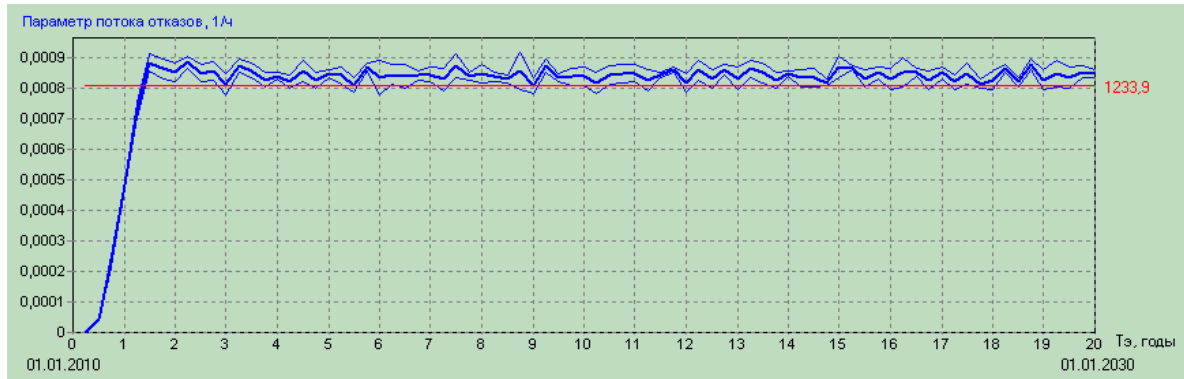


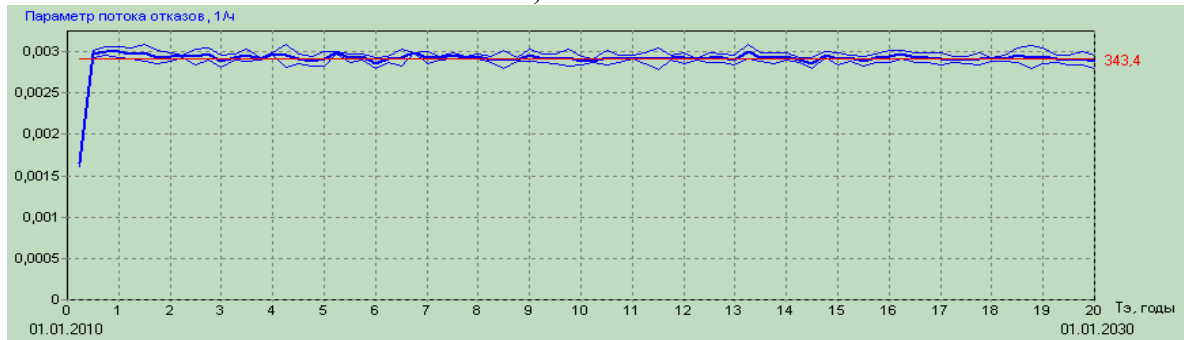
Рисунок 1 – Графік функції для об'єкта Test-0

За графіком добре видно, що значення параметра потоку відмов  $\omega^{уст} \approx 1/T_{cp} = 0,0001$  1/год. Це може бути доказом правильності алгоритмів ICM та її програмної реалізації у частині, що стосується моделювання процесу відмов-відновлень.

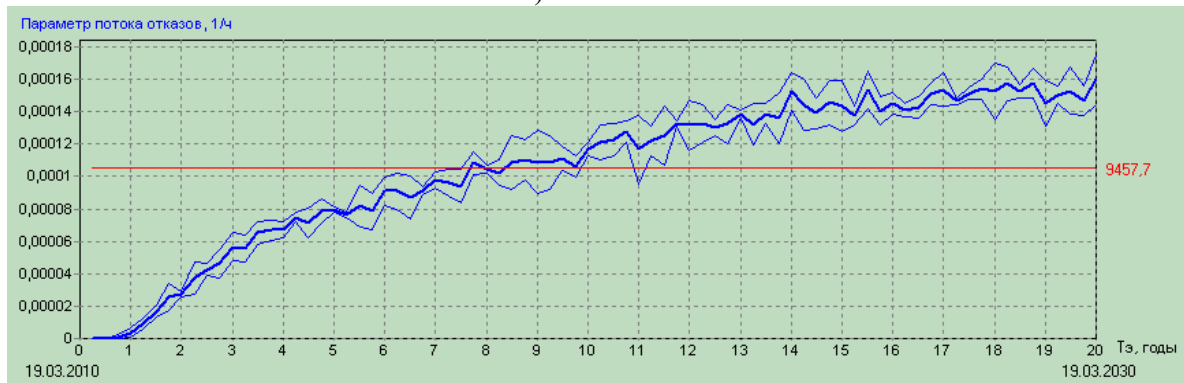
На рисунку 2 наведено аналогічні графіки, одержані для тестових об'єктів Test-1 ... Test-4.



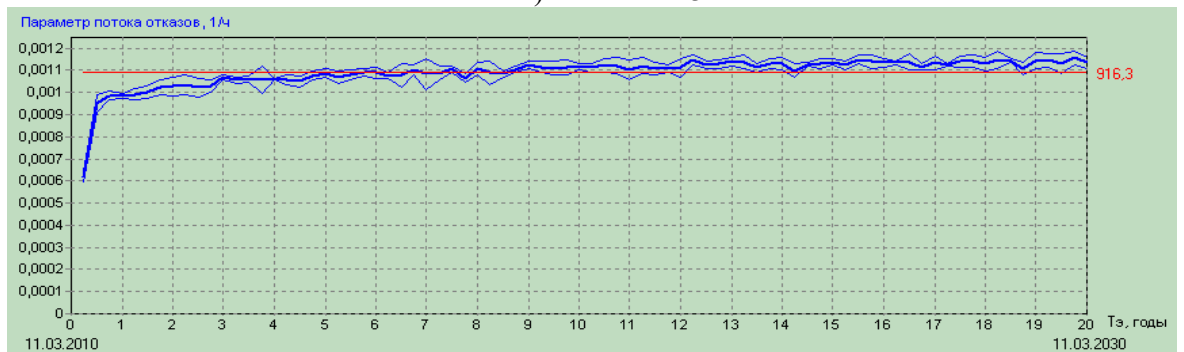
а) об'єкт Test-1



б) об'єкт Test-2



в) об'єкт Test-3



г) об'єкт Test-4

Рисунок 2 – Графіки функції  $\tilde{\omega}(t_i)$  об'єктів Test-1 ... Test-4

Оскільки при відмові цих об'єктів проводиться заміна тільки елементів, що відмовилися, встановилося значення  $\omega^{уст}$  в цьому випадку значно менше величини  $1/T_{cp}$  (тут  $T_{cp}$  - це середнє напрацювання до відмови об'єкта). Ці графіки є прямим доказом правильності алгоритмів моделі, проте є додатковим якісним підтвердженням адекватності ІСМ.

У таблиці 1 наведено числові значення показників  $T_0$ ,  $c_{уд}$  і  $K_{ти}$ , отримані в результаті моделювання, а також деякі важливі характеристики об'єктів (середнє напрацювання до відмови  $T_{cp}$  та кількість елементів, що відновлюються  $|E_B|$ ).

Таблиця 1 – Результати моделювання для тестових об'єктів без ТО

Об'єкт	Характеристики об'єкту		Результати моделювання			
	$ E_v $	$T_{cp}$ , год	$T_0$ , год	$c_{уд}$ , у.о./год	$K_{ти}$	$\varepsilon$
Test-1	15	4472	1179	0,02695	0,99919	0,085
Test-2	16	745	341	0,05638	0,99660	0,071
Test-3	50	29930	9390	0,00232	0,99978	0,367
Test-4	50	1783	914	0,02296	0,99890	0,108
Test-0	1	10000	9967	0,00211	0,99990	0,357

Усі графіки на рисунку 2 та дані таблиці 1 отримані за наступних вихідних даних (однакових для всіх об'єктів):

- показники ремонтпридатності та вартості елементів:

$$T_{vi} = 1 \text{ год}; C_i = 10 \text{ у.о.}; C_{tpi} = 1 \text{ у.о.};$$

- параметри зовнішнього середовища (параметри користувача):

$$c_n^0 = 10 \text{ у.о./год}; T_3 = 20 \text{ років};$$

- параметри моделювання:

$$N_i^{\max} = 1000.$$

За даними інструментальну точність моделі можна оцінити тільки за результатами, отриманими для об'єкта Test-0. Отримана точність дорівнює:

$$\delta = \frac{|T_{cp} - T_0|}{T_0} = \frac{10000 - 9967}{9967} \approx 0,0033.$$

Така мала інструментальна помилка свідчить про правильність програмної реалізації основного алгоритму ІСМ.

Методична помилка результатів ІСМ істотно залежить від наступних факторів:

- від вихідної надійності об'єкта;
- від числа реалізацій моделювання;
- від заданої тривалості експлуатації об'єкта  $T_3$ .

Найбільш значущим фактором серед зазначених є вихідний рівень надійності об'єкта. Так, об'єкт Test-3 є прикладом об'єкта з високим рівнем надійності, йому відносна помилка результатів моделювання  $\varepsilon=0,367$ .

У більшості цікавих випадків відносна помилка результатів моделювання вбирається у 10-20%.

Для перевірки всіх алгоритмів моделювання ТО зробимо розрахунки для трьох стратегій ТО, що розглядаються: ТОС з постійною періодичністю контролю, ТОС з адаптивною зміною періодичності ТО і регламентованої стратегії ТО.

Для ТГС з постійною періодичністю контролю зробимо моделювання для трьох значень  $T_k$ : 500 год, 1000 год і 1500 год. Отримані результати моделювання представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання для ТОС із постійною періодичністю контролю

Результуючі показники	Без ТО	Періодичність контролю $T_k$		
		500 год	1000	1500 год
$T_0$ , год	912	9044	3468	2222
$c_{уд}$ , у.о./год	0,02303	0,00599	0,00839	0,01119
$K_{ти}$	0,99890	0,99723	0,99787	0,99813
$\bar{\varepsilon}$	0,110	0,415	0,280	0,220
$\bar{n}_{отк}$	198,5	19,1	49,8	77,7

У таблиці 2  $\bar{n}_{отк}$  - це середня кількість відмов об'єкта, що виникають протягом часу експлуатації  $T_0=20$  років.

Отримані результати не суперечать фізичному змісту процесів, що моделюються. У разі зростання періодичності контролю рівень безвідмовності знижується, зростає середнє відмов. У разі зростання кількості відмов збільшується точність оцінки показників (зменшується відносна помилка  $\mathcal{E}$ ).

Для ГОС з адаптивним зміною періодичності ТО параметрами стратегії ТО (крім рівня ТО  $u_{то}$ ) є коефіцієнт згладжування  $\beta$  та коефіцієнт попередження  $\gamma$ . Розрахунки зробимо при фіксованому значенні  $\beta=0,5$  для трьох різних значень  $\gamma$ . Отримані результати розрахунків представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати моделювання для ГОС з адаптивно змінюваною періодичністю ТО

Результуючі показники	Без ТО	Коефіцієнт попередження $\gamma$		
		0,5	0,8	1,0
$T_0$ , год	912	18013	2936	1976
$c_{уд}$ , у.о./год	0,02303	0,00421	0,00938	0,01246
$K_{ти}$	0,99890	0,99744	0,99779	0,99794
$\bar{\mathcal{E}}$	0,110	0,549	0,187	0,155
$\bar{n}_{отк}$	198,5	9,6	58,8	87,4

За отриманими даними видно, що з меншому значенні коефіцієнта  $\gamma$  (за більшого попередження) показник безвідмовності  $T_0$  зростає, що цілком відповідає фізичному змісту процесів.

Для тестування алгоритмів стратегії регламентованого ТО поставимо два види ТО з такими значеннями періодичності:  $T_{то1}=600$  год;  $T_{то2}=6000$  год. Розрахунки зробимо для трьох варіантів множин елементів, що обслуговуються:

- $E_{то1} = \{1, 2, 3\}$ ;  $E_{то2} = \{4, \dots, 10\}$ ;
- $E_{то1} = \{1, 2\}$ ;  $E_{то2} = \{3, \dots, 10\}$ ;
- $E_{то1} = \{1\}$ ;  $E_{то2} = \{2, \dots, 10\}$ .

Результати розрахунків представлені у таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати моделювання для стратегії регламентованого ТО

Результуючі показники	Без ТО	Число елементів в підмножинах елементів, що обслуговуються		
		$ E_{то1}  = 3,$ $ E_{то2}  = 7.$	$ E_{то1}  = 2,$ $ E_{то2}  = 8.$	$ E_{то1}  = 1,$ $ E_{то2}  = 9.$
$T_0$ , ч	912	5290	3095	1682
$c_{уд}$ , у.е./ч	0,02303	0,01191	0,01322	0,01743
$K_{ти}$	0,99890	0,99278	0,99414	0,99537
$\bar{\mathcal{E}}$	0,110	0,321	0,230	0,161
$\bar{n}_{отк}$	198,5	32,7	55,8	102,7

Отримані результати так само відповідають фізичному змісту процесів, що моделюються. Перерозподіл елементів з виду ТО, що часто проводиться, у вигляд ТО, що проводиться з більшою періодичністю, призводить до погіршення показника безвідмовності.

Загалом можна констатувати, що отримані у наведених прикладах результати не суперечать фізичному змісту, що можна сприйняти як якісне підтвердження правильності алгоритмів моделювання ТО.

**Висновки.** 1. У цій праці розроблено ІСМ, призначену для прогнозування показників надійності та вартості експлуатації складного технічного об'єкта, що залежать від параметрів обраної стратегії ТО. В ІСМ реалізовано алгоритми імітації процесів ТО для трьох варіантів стратегій ТО:

- ТОС з постійною періодичністю контролю;
- ТОС з адаптивно-змінною періодичністю контролю;
- регламентованого ТО.

Режим моделювання регламентованого ТО запроваджено з метою забезпечення повноти аналізу можливих стратегій ТО проєктованого об'єкта та прогнозування можливого виграшу у надійності та вартості експлуатації об'єкта за рахунок застосування стратегій ТОС.

2. В алгоритми ІСМ «вбудована» МБ складного технічного об'єкта, за рахунок чого в моделі реалізована залежність процесу, що моделюється ТО від параметрів конструктивної та надійності структури об'єкта. Перед початком моделювання користувач повинен задати підмножину елементів, що відновлюються і потенційно обслуговуються шляхом їх вибору (маркування) в дереві конструктивної структури об'єкта. Генерування випадкових значень напрацювання повністю окремих елементів, підпорядкованих *DN*-розподілу, здійснюється за допомогою датчика випадкових чисел, що розроблюється в [8-11].

3. Верифікація ІСМ здійснювалася в такий спосіб. Правильність алгоритмів імітації процесу відмов-відновлень перевірялася шляхом порівняння результатів моделювання з точними розрахунковими значеннями середнього напрацювання на відмову, отриманими окремо взятого елемента. Отримана у такий спосіб інструментальна точність моделі, що оцінюється величиною відносної помилки, становила менше 1%. Правильність алгоритмів імітації процесів ТО перевірялася якісно (через несуперечність результатів, що одержуються під час моделювання).

Методична точність ІСМ визначається такими факторами:

- вихідною надійністю об'єкта (заданими показниками надійності елементів);
- числом реалізацій (тривалістю) моделювання;
- заданою тривалістю експлуатації об'єкта.

Із зазначених факторів найбільш суттєвим є перший. У більшості цікавих випадків відносна помилка результатів моделювання складає 10-20%.

#### Інформаційні джерела

1. Serhii Lienkov, Yuriy Husak, Oksana Banzak, Ihor Muliar, Viktor Cheshun, Evgeny Lenkov The Development of an Intelligent Complex of Radiation-Technological Control of a Safety Barrier // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research Available Online at Volume 8. No. 7, July 2020. P. 3483-3486.

2. Nataliya Lytvynenko, Serhii Lienkov, Olexander Lytvynenko, Oksana Banzak, Hennadii Banzak Development of Geoinformation Technology for Monitoring Events on the Basis of Data from Unstructured Web Resource Text. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-9 Issue-5, March 2020. P. 1160-1165.

3. Serhii Lienkov, Alexander Myasishev, Yurii Husak, Ivan Starynski, Oksana Banzak Use of rescue mode for UAV on the basis of STM32 microcontrollers. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering Available Online at Volume 9, No. 3, May-june 2020. P. 3506-3513.

4. Serhii Lienkov, Alexander Myasishev, Oksana Banzak, Larysa Komarova, Nataliia Lytvynenko, Oleg Miroschnichenko Construction of an Aircraft-Type UAV for Flight Along a Given Trajectory in the Automatic Mode. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research Available Online at <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter200892020.pdf> Volume 8. No. 9, September 2020 P. 6145-6150.

5. Banzak O., Maslov O., Mokritsky V., Leschenko O. Detector simulation for radiation monitoring systems. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2020. № 68. С. 5-14.

6. Banzak O., Sieliykov O., Olenev M., Dobrovolskaya S., Konovalenko O. Research processes of gamma radiation detector for developing a portable digital spectrometer. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2020. № 69. С. 5-13.

7. Banzak O., Sieliykov O., Dobrovolskaya S., Konovalenko O. Model of physical processes in primary and secondary converters of the detector. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2021. № 70. С. 5-16.

8. Banzak O., Sieliykov O., Yefimenko N., Konovalenko O. Development of a complex for individual dosimetric control. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2021. № 71. С. 5-11.

9. Banzak O., Sieliykov O., Gaber A., Konovalenko O., Vozikova L. Research of physical processes and development of methods for radiation modification parameters of semiconductor optoelectronics devices. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2022. № 74. С. 5-14.

10. Lienkov S., Banzak O., Sieliykov O., Zhrebtsova L. Model of physical processes in the primary and secondary converters of the detector for radiation monitoring systems. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2023. № 81. С. 16-26.

11. Banzak O., Lienkov S., Sieliykov O., Gaber A. Methods and means of control of nuclear materials and status of protective barriers at npp in wartime conditions. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2024. № 83. С. 7-17.

**Nazarenko A., Banzak O., Grabovsky O., Banzak G.**

State University of Intellectual Technologies and Communications, Odessa, Ukraine

### DEVELOPMENT OF SIMULATION STATISTICAL MODEL OF MILITARY EQUIPMENT MAINTENANCE PROCESSES

*Complex technical objects of military equipment in society are of exceptional importance. These include, first of all, various radio-electronic complexes of military and special purpose, radar stations, automated control systems (of air traffic, energy facilities, etc.). The state's defense capability, economic security, and the lives of hundreds and thousands of people depend on the level of reliability of such objects.*

*Such objects belong to the class of objects that are subject to long-term repeated use. They are usually expensive and require significant costs for their operation. To ensure the required level of reliability during their operation, maintenance (MTO) is usually performed, the essence of which is the timely preventive replacement of elements that are in a state before failure. In this work, a simulation static model has been developed, designed to predict the reliability indicators and operating costs of a complex technical object of military equipment, which depend on the parameters of the selected MTO strategy. MTO has implemented algorithms for simulating MTO processes for three variants of MTO strategies. The regulated MTO modeling mode was introduced to ensure the completeness of the analysis of possible MTO strategies for the designed object and to predict the possible gain in reliability and operating costs of the object due to the use of "condition-based" maintenance strategies.*

**Keywords:** *complex technical objects of military equipment, simulation static model, maintenance, modeling mode*