
Doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.05.120>
УДК 621.391-192(075.8)

С.С. Гнатюк, канд. техн. наук

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,

Л.М. Сакович, канд. техн. наук, **Ю.В. Мирошніченко**

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Україна, 03113, Київ, пр-т Перемоги, 37

Моделювання порядку перевірки параметрів при технічному обслуговуванні за станом радіоелектронних комплексів

Розглянуто особливості технічного обслуговування радіоелектронних комплексів (РЕК) великої розмірності (десятки і сотні тисяч елементів), що складаються з окремих підсистем, перевірку працездатності яких, технічне обслуговування та відновлення працездатності під час поточного ремонту можна виконувати автономно. Запропоновано для підвищення ефективності технічного обслуговування за станом РЕК великої розмірності встановлювати послідовність перевірки підсистем, враховуючи їх надійність, метрологічну надійність засобів вимірювання, тривалість виконання перевірок і усунення несправностей, ймовірність правильної оцінки фахівцем результату вимірювання значення параметру. Обґрунтовано необхідну кількість перевірок параметрів найбільш важливих і найменш надійних підсистем для забезпечення заданого значення ймовірності оцінки технічного стану комплексу за мінімальний час. Наведено приклад використання результатів і формалізовано порядок їх реалізації.

К л ю ч о в і с л о в а: радіоелектронні комплекси, технічне обслуговування за станом, ймовірність переважного вибору.

Постановка задачі та аналіз деяких публікацій. Технічне обслуговування (ТО) виробів — комплекс операцій чи операція підтримання справності або працездатності впродовж технічної експлуатації, що передбачає перевірку на відповідність значень параметрів технічним умовам [1].

Розрізняють наступні принципи реалізації ТО [2]:

1) календарний — проводиться у встановлений термін незалежно від напрацювання (легко планувати, але необґрунтована витрата сил та засобів);

© Гнатюк С.С., Сакович Л.М., Мирошніченко Ю.В., 2020

2) за напрацюванням — проводиться після відпрацювання виробом в заданих умовах визначеної кількості годин (економія сил і засобів, але важко планувати);

3) комбінований або за станом — перелік операцій та періодичність виконання визначають заздалегідь, а обсяг робіт залежить від результатів контролю параметрів (легко планувати, економія сил і засобів).

Третя стратегія реалізації ТО є пріоритетною на даний час. При її реалізації виникає проблема: в якій послідовності виконувати перевірку параметрів комплексу для визначення його реального технічного стану за мінімальний час [3].

Сучасні публікації в галузі технічної експлуатації складних систем свідчать про те, що є необхідність наукового аналізу і обґрунтування конкретних рекомендацій для практичного впровадження ТО за станом [4—6].

В [7] запропоновано визначати послідовність перевірок параметрів залежно від часу і вартості їх виконання, важливості впливу параметру на працездатність виробу та ймовірності помилки виконавця в оцінці значення параметру.

За останні роки проведено дослідження в галузі метрології та показано вплив метрологічної надійності на час виконання ТО [8, 9]. Зазначену обставину враховано в [10], але там відсутня реальна оцінка технічного стану виробу після виконання встановленої послідовності перевірок. Крім того, під час ТО використовують фіксовані кількість і склад засобів вимірювань, тому врахування вартості перевірок в [8—10] є надлишковим.

Таким чином, є актуальною проблема обґрунтування порядку перевірки параметрів при ТО за станом радіоелектронних комплексів (РЕК) великої розмірності [8—11].

Комплексний коефіцієнт необхідності виконання перевірки параметру. Ймовірність відмов окремих підсистем РЕК має вигляд [11]

$$p_i = \frac{Z_i}{\sum_{j=1}^M Z_j} = Z_i T, \quad \sum_{i=1}^M p_i = 1,$$

де Z_i — параметр потоку відмов підсистеми i ; M — кількість підсистем РЕК; T — напрацювання РЕК на відмову. Значимість впливу підсистеми i на працездатність РЕК v^i (можливе функціонування з частковою втраченою якістю) оцінюють за результатами обробки статистичних даних експертного опитування провідних фахівців галузі відомими методами [12—14], при цьому

$$\sum_{i=1}^M v_i = 1.$$

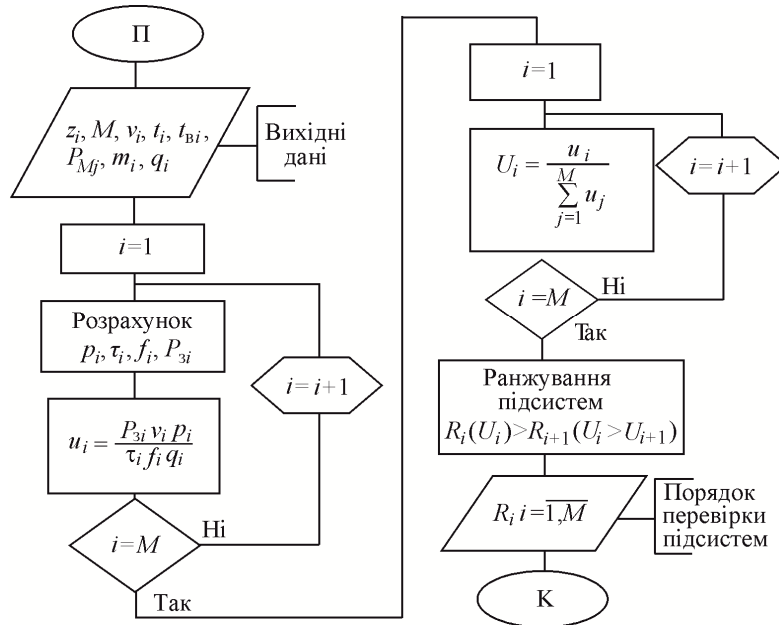


Рис. 1. Блок-схема алгоритму визначення послідовності перевірки підсистем РЕК під час технічного обслуговування за станом: R_i — ранг (порядковий номер) перевірки підсистеми i

Відносні працевитрати τ_i та час відновлення підсистем f_i також розраховують з використанням вихідних даних про ТО і поточний ремонт РЕК:

$$\tau_i = \frac{t_i}{\sum_{j=1}^M t_j}, \quad \sum_{i=1}^M \tau_i = 1, \quad f_i = \frac{t_{vi}}{\sum_{j=1}^M t_{vj}}, \quad \sum_{i=1}^M f_i = 1,$$

де t_i — час виконання перевірки підсистеми i ; t_{vi} — середній час відновлення підсистеми i .

Метрологічну надійність засобів вимірювань для перевірки параметрів підсистеми i оцінюють так:

$$P_{zi} = \prod_{j=1}^{m_i} P_{Mj},$$

де m_i — кількість засобів вимірювань для перевірки підсистеми i ; P_{Mj} — метрологічна надійність засобу вимірювання для перевірки параметра j [8, 9].

Значення ймовірності помилки фахівця q_i при оцінці параметрів системи i визначають залежно від засобів вимірювання, які при цьому вико-

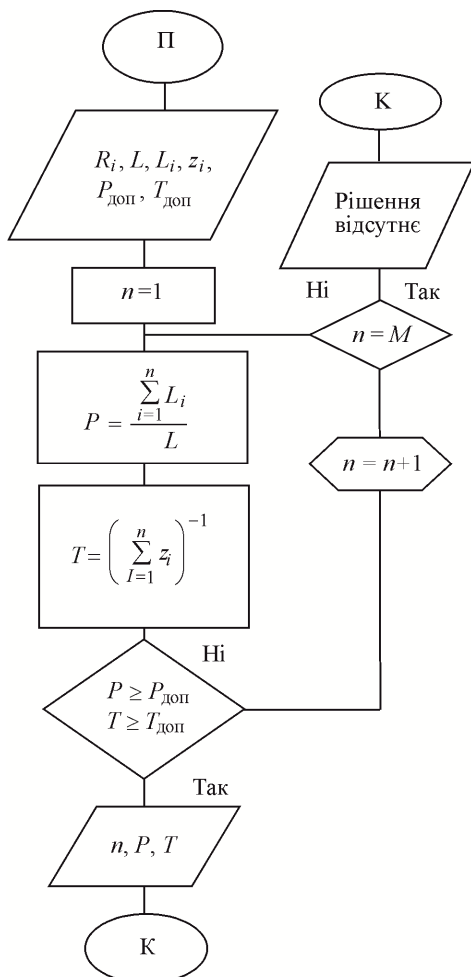


Рис. 2. Блок-схема алгоритму визначення мінімально необхідної кількості перевірених підсистем РЕК під час ТО за станом

ристовують [15]. У такому випадку комплексний показник, який впливає на вибір підсистеми для перевірки, має вигляд $u_i = \frac{P_{zi} v_i p_i}{\tau_i f_i q_i}$. Це

безрозмірна величина, що дозволяє виявити найменш надійні підсистеми РЕК, які потребують мінімального часу на перевірку та відновлення, але здійснюють найбільший вплив на якість функціонування РЕК в цілому. Значення u_i змінюється в досить широких межах, тому для ранжування порядку перевірки підсистеми РЕК доцільно використовувати нормовану ймовірність переважного вибору [11]:

$$U_i = \frac{u_i}{M}, \quad \sum_{i=1}^M U_i = 1.$$

В подальшому підсистеми ранжують в порядку зменшення значення U_i . Після перевірки $1 \leq n \leq M$ підсистем ймовірність справного стану РЕК (при справності усіх перевірених підсистем) має вигляд

$$P(n) = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{L}, \quad L = \sum_{i=1}^M L_i,$$

де — кількість елементів підсистеми i ; L — загальна кількість елементів РЕК.

Блок-схему алгоритму реалізації отриманих результатів для визначення раціональної послідовності перевірки підсистем РЕК наведено на рис. 1. При обмеженому часі ТО в екстремальній ситуації процес перевірки підсистем завершується після виконання умови $P(n) \geq P_{\text{доп}}$,

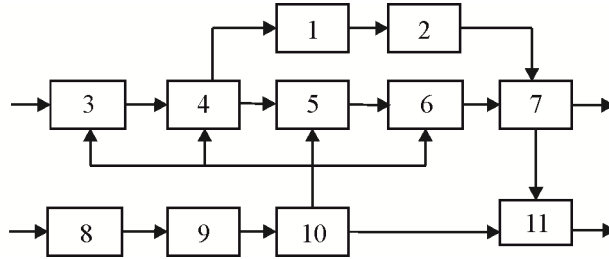


Рис. 3. Схема з'єднання підсистем РЕК

Таблиця 1. Вихідні дані підсистем РЕК

i	$z_i \cdot 10^{-6},$ год ⁻¹	t, XB	$t_{\text{вi}}, \text{XB}$	δ_i	P_{zi}	v_i	L_i	q_i
1	4	15	10	0,942	0,85	0,025	80	0,058
2	4	15	12	0,931	0,88	0,025	120	0,069
3	10	20	15	0,910	0,81	0,050	370	0,090
4	10	20	20	0,988	0,79	0,050	410	0,012
5	6	10	11	0,945	0,91	0,050	350	0,055
6	7	10	8	0,956	0,88	0,050	430	0,044
7	6	10	16	0,912	0,93	0,050	330	0,088
8	25	30	25	0,980	0,95	0,200	110	0,020
9	4	15	22	0,982	0,89	0,200	70	0,018
10	4	15	18	0,901	0,87	0,200	510	0,099
11	20	25	24	0,985	0,88	0,100	360	0,015

Таблиця 2. Результати моделювання послідовності виконання перевірок підсистем РЕК

i	τ_i	f_i	p_i	u_i	U_i	R_i
1	0,054	0,055	0,04	4,934	0,0158	9
2	0,065	0,066	0,04	2,973	0,0095	11
3	0,082	0,083	0,10	6,612	0,0212	8
4	0,108	0,110	0,10	27,707	0,0888	4
5	0,059	0,061	0,06	13,792	0,0442	6
6	0,043	0,044	0,07	36,998	0,1186	3
7	0,086	0,088	0,06	4,189	0,0134	10
8	0,145	0,138	0,25	118,691	0,3805	1
9	0,119	0,121	0,04	27,471	0,0881	5
10	0,097	0,099	0,04	7,321	0,0235	7
11	0,142	0,135	0,20	61,207	0,1964	2

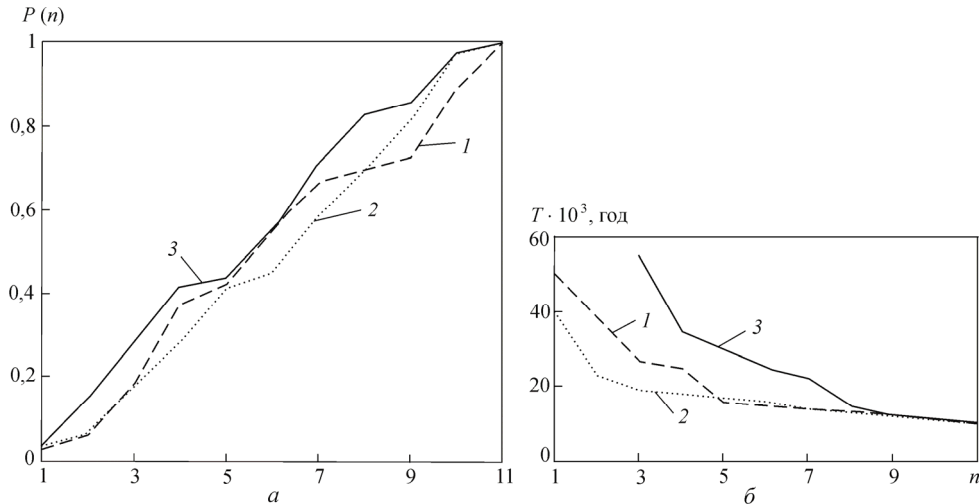


Рис. 4. Графіки залежності ймовірності правильної оцінки технічного стану РЕК (а) і напрацювання на відмову перевірених підсистем РЕК (б) від їх кількості: 1— перевірка підсистем згідно з порядковими номерами; 2 — перевірка підсистем згідно з їх ранжуванням за рекомендаціями, наведеними у роботі [11]; 3 — перевірка підсистем після їх ранжування за даними табл. 2

$n = \overline{M}$, де $P_{\text{доп}}$ — мінімальне допустиме значення оцінки технічного стану основних підсистем РЕК, які забезпечують його працездатність. Залежно від умов експлуатації РЕК в якості критерію завершення перевірки можна використовувати заздалегідь задане значення напрацювання на відмову перевірених найменш надійних підсистем $T(n) \geq T_{\text{доп}}$ або критерію сумісності (рис. 2) $P(n) \geq P_{\text{доп}}$, $T(n) \geq T_{\text{доп}}$.

Моделювання порядку перевірки параметрів при ТО за станом РЕК. Розглянемо використання отриманих результатів на прикладі РЕК [11], схему якого наведено на рис. 3. Об'єкт складається із $M = 11$ підсистем, перевірку яких можна виконувати автономно з використанням штатного комплексу засобів вимірювань. Вихідні дані для моделювання послідовності перевірки систем [11] наведено в табл. 1, де δ_i — ймовірність правильної оцінки результату виконання перевірки ($q_i = 1 - \delta_i$). Результати моделювання наведено в табл. 2.

Графіки залежності ймовірності правильної оцінки технічного стану РЕК від послідовності перевірки підсистем РЕК наведено на рис. 4, а. На рис. 4, б наведено графіки залежності напрацювання на відмову перевірених n підсистем. За результатами порівняльного аналізу при $P_{\text{доп}} \geq 0,85$ отримуємо $n_1 = n_2 = 10$, $n_3 = 9$, тобто скорочення кількості перевірених підсистем складає $\eta = 10\%$ (див. рис. 4, а). При $T_{\text{доп}} \geq 15000$ год достатньо

перевірити $n_3 = n_2 = 5$ підсистем, у порівнянні з $n_1 = 8$ отримуємо вигреш у 37%. Тобто використання отриманих результатів для ранжування підсистем РЕК під час ТО за станом в усіх випадках забезпечує вигреш внаслідок того, що в першу чергу перевіряють найменш надійні підсистеми, які найбільш важливі для функціонування виробу.

Висновки

Практична реалізація отриманих результатів дозволяє підвищити ефективність технічного обслуговування в реальних умовах експлуатації РЕК за допомогою впорядкування технології виконання робіт.

Розроблений алгоритм дозволяє визначати послідовність виконання перевірок і їх завершення залежно від вимог щодо ймовірності правильної оцінки технічного стану перевірених підсистем.

Запропонований новий комплексний коефіцієнт для розрахунку ймовірності переважного вибору підсистем РЕК великої розмірності, на відміну від відомих, враховує надійнісні часові показники підсистем, а також їх важливість для виконання необхідних функцій i та метрологічні характеристики засобів вимірювань.

Отримані результати доцільно використовувати під час розробки технологічної документації щодо технічного обслуговування РЕК великої розмірності за станом.

Подальші дослідження слід направити на розробку методики визначення послідовності і кількості перевірок при обслуговуванні існуючих і перспективних РЕК великої розмірності за станом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ В 3576-97. Експлуатація та ремонт військової техніки. Терміни та визначення. Держстандарт України, Київ, 1998, 59 с.
2. ДСТУ В 3577-97. Види технічного обслуговування. Заміна комплектуючих виробів. Загальні положення. Держстандарт України, Київ, 1998, 9 с.
3. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высш. шк., 1982, 231 с.
4. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высш. шк., 2003, 463 с.
5. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006, 704 с.
6. Василюшин В.І., Женжера С.В., Чечуй С.В., Глушко А.Л. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018, 268 с.
7. Сакович Л.М., Бобро Р.А. Выбор параметров и последовательности их измерения при техническом обслуживании средств связи по состоянию // Зв'язок, 2006, № 3, с. 54—56.
8. Kononov V.B., Ryzhov Ye.V., Sakovych L.M. Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support// Advanced Information System, 2018, Vol. 2, № 1, p. 91—95. DOI.org/10.20998/2522-9052/2018/1/17.

9. Сакович Л.М., Криховецький Г.Я., Небесна Я.Е. Оцінка впливу метрологічної надійності засобів вимірювань на час виконання технічного обслуговування засобів спеціального зв'язку // Системи управління, навігації та зв'язку, 2018, вип. 2 (48), с. 164—166. DOI: org.10.26906/SUNZ.2018.2.164.
10. Рижов Є.В., Сакович Л.М. Метод визначення послідовності перевірки параметрів під час технічного обслуговування військової техніки зв'язку за станом//Науково-технічний журнал ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2017, №4(16), с.70—72. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4\(16\).70-72](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4(16).70-72).
11. Сакович Л.М., Рижов Є.В., Настішин Ю.А. та ін. Методика визначення послідовності перевірки радіоелектронних комплексів при технічному обслуговуванні за станом// Військово-технічний зб., вип. № 22. Львів: НАСВ, 2020, с. 73—82.
12. Шмерлин Д.С., Дубровський С.А. Экспертные оценки: методы и применения. М.: ЭКСПО, 2001, 228 с.
13. Орлов А.И. Экспертные оценки. М.: Наука, 2002, 150 с.
14. Коваленко А.И., Драган С.В., Рыхальский М.А. Экспертные оценки в управлении информационными проектами. Николаев: НУК, 2007, 168 с.
15. Ксенз С.П., Абрамов С.А., Волынский А.А. и др. Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации. Л.: ВАС, 1990, 336 с.

Отримано 04.05.2020

REFERENCES

1. State Standard of Ukraine. (1998), DSTU V 3576-97, “Operation and repair of military equipment. Terms and definitions”, p. 59, Kiev, Ukraine.
2. State Standard of Ukraine. (1998), DSTU V 3577-97, “Types of maintenance. Replacement of components. Terms”, p. 9, Kiev, Ukraine.
3. Barzilovich, Ye.Yu. (1982), *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh sistem* [Maintenance Models for Complex Systems], Vyssh. shk.
4. Ostreykovsky, V.A. (2003), *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory], Vyssh. shk, Moscow, Russia.
5. Polovko, A.M. (2006), *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory], BHV.
6. Vasilishin, V.I. (2018), *Osnovy teorii nadiynosti ta ekspluatatsiyi radioelektronnykh sistem* [Fundamentals of the theory of reliability and operation of electronic systems], KhNUPS.
7. Sakovich L.M. and Beaver R.A. (2006), “Selection of parameters and sequence of their measurement at maintenance of means of communication on a condition”, *Zv'yazok*, no. 3, pp. 54-56.
8. Kononov, V.B., Ryzhov, Ye.V. and Sakovych, L.M. (2018), “Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support”, *Advanced Information System*, Vol. 2, no. 1, pp. 91-95. DOI: <http://doi.org/10.20998/2522-9052/2018/1/17>.
9. Sakovich, L.M., Krykhovetsky, G.Ya. and Nebesna, Ya.E. (2018), “Assessment of the impact of metrological reliability of measuring instruments on the time of maintenance of special communications equipment”, *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*, Vol. 2, no. 48, pp. 164-166. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.164>. ISSN 2073-7394.
10. Ryzhov, Ye.V. and Sakovich, L.M. (2017), “Method of determining the sequence of checking the parameters during the maintenance of military communication equipment by condition”, *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal TSNDI OVT ZS Ukrayiny*, Vol. 4, no. 16, pp. 70-72. DOI: <https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017>.

11. Sakovich, L.M., Ryzhov, Ye.V., Nastishin, Y.A., Bobro, R.A. and Korotchenko, L.A. (2020), "Methods for determining the sequence of inspection of electronic systems during maintenance", *Viyis'kovo-tekhnichnyy zb*, no. 22, pp. 73-82.
12. Shmerlin, D.S. and Dubrovsky, S.A. (2001), *Ekspertnyye otsenki: metody i primeneniya* [Expert assessments: methods and applications], EXPO, Moscow, Russia.
13. Orlov, A.I. (2002), *Ekspertnyye otsenki* [Expert assessments], Nauka, Moscow, Russia.
14. Kovalenko, A.I., Dragan, S.V. and Ryhalsky, M.A. (2007), *Ekspertnyye otsenki v upravlenii informatsionnyimi proyektami* [Expert assessments in information project management], NUK, Nikolaev, Ukraine.
15. Ksenz, S.P. (1990), *Teoreticheskiye i prikladnyye zadachi diagnostirovaniya sredstv svyazi i avtomatizatsii* [Theoretical and applied problems of diagnostics of means of communication and automation], VAS, Leningrad, USSR.

Received 04.05.2020

S. Gnatiuk, L. Sakovych, U. Miroshnychenko

MODELING OF THE ORDER OF CHECKING OF PARAMETERS IN TECHNICAL MAINTENANCE OF THE STATE OF RADIO ELECTRONIC MEANS

The features of maintenance of large-scale radio-electronic complexes (tens and hundreds of thousands of elements) consisting of separate subsystems are examined. It is proposed to increase the efficiency of maintenance of the state of large-scale radio-electronic complexes to establish the sequence of verification of subsystems taking into account their reliability, metrological reliability of the measuring instruments, the time of performing checks and troubleshooting, the probability of correct estimation of the result of measuring the parameter value by a specialist. To ensure the set value of the probability of estimation of the technical condition of the complex in the minimum time, the required number of checks of the parameters of the most important and least reliable subsystems is substantiated. An example of using the results is given and the procedure for their implementation is formalized. The practical implementation of the results allows to increase the efficiency of maintenance in real conditions of operation of radio-electronic complexes by streamlining the technology of work execution.

К е у в о р д s: radio-electronic complexes, maintenance according to the condition, probability of preferred choice.

ГНАТЮК Сергій Євгенович, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1974 р. закінчив Львівський державний університет ім. І. Франка. Область наукових досліджень — надійність програмно керованих засобів спеціального зв'язку.

САКОВИЧ Лев Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичних основ експлуатації та ремонту засобів спеціальних телекомунікаційних систем Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». У 1981 р. закінчив військову Ордену Леніна Краснознаменну академію ім. Будьонного. Область наукових досліджень — технічна діагностика, метрологія, технічна експлуатація.

МИРОШНИЧЕНКО Юрій Володимирович, аспірант Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», який закінчив у 2009 р. Область наукових досліджень — технічна експлуатація засобів зв'язку.