

УДК 621.396.96

А.А. Шоколовський, І.В. Коваль, О.А. Наконечний, В.П. Попов

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВИРОБІВ ЗЕНІТНОГО РАКЕТНОГО ОЗБРОЄННЯ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ В СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЗА СТАНОМ**

*У зв'язку з переходом до стратегії технічного обслуговування та ремонту за станом розглянута можливість використання методу факторного аналізу для прогнозування технічного стану виробів зенітного ракетного озброєння та радіоелектронної техніки (ЗРО та РЕТ). Використання факторного аналізу дозволяє прогнозувати настання непрацездатного стану виробів за рахунок аналізу зміни факторних навантажень.*

**Ключові слова:** стратегія технічного обслуговування та ремонту за станом, метод факторного аналізу, кореляційні зв'язки, факторні навантаження, прогнозування технічного стану.

### **Вступ**

**Постановка завдання.** На даний час на озброєнні зенітних ракетних та радіотехнічних військ знаходяться вироби за якими не здійснюється авторський нагляд. У більшості з цих виробів закінчилися гарантійні терміни служби, зберігання, ресурси, але запаси працездатності кожного конкретного виробу ЗРО та РЕТ, його складових частин та комплектуючих виробів не використані в повній мірі.

Для цих виробів передбачена стратегія експлуатації до виробітку ресурсу (терміну служби), якій відповідає стратегія технічного обслуговування та ремонту за наробітком.

Виходячи з максимального використання запасів працездатності кожного конкретного зразка ЗРО та РЕТ, його складових частин, комплектуючих виробів, забезпечення заданих рівнів ефективності їх використання за призначенням та надійності з мінімальними затратами часових, трудових, матеріальних ресурсів на даний час прийнятним є перехід до стратегії технічного обслуговування та ремонту за технічним станом. Використання такої стратегії

дозволяє експлуатувати вироби до досягнення ними граничного стану.

При переході на стратегію технічного обслуговування та ремонту за станом однією з задач є прогнозування працездатності виробів та їх систем [2].

**Мета статті:** обґрунтування підходу до прогнозування непрацездатного стану виробів ЗРО та РЕТ за допомогою використання методу факторного аналізу при переході до стратегії технічного обслуговування та ремонту за станом.

### **Основна частина**

Для виробів ЗРО та РЕТ працездатним станом є стан при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виробу виконати покладені на нього функції відповідають вимогам експлуатаційної документації. При цьому в процесі функціонування значення параметрів можуть відхилятися від номінальних в той чи інший бік. Відхилення параметрів від своїх номінальних значень, як правило носить випадковий характер, а причинами цих відхилень можуть бути різні фактори.

Як відомо, факторний аналіз це методика формування гіпотез [1], яка спирається на те, що декілька змінних величин (параметрів) сильно корелюють між собою. Це означає, що або вони взаємно визначають одна одну, або зв'язок між ними обумовлюється іншою третьою величиною, яку безпосередньо вимірити неможливо. Виникає задача, чи можливо за статистичними даними про зміни величин параметрів виділити гіпотетичну величину, так званий фактор, який би пояснив зв'язки між цими величинами. Основною метою факторного аналізу і є виявлення таких гіпотетичних величин, або факторів, за великою кількістю експериментальних даних. При цьому, задачею факторного аналізу не є знаходження фізичного пояснення причини (фактору), який лежить в основі явищ, що розглядаються. Передбачається, що якісний аналіз таких факторів повинен здійснюватися дослідником. Але важливим вихідним посиленням факторного аналізу є наявність взаємозв'язку між декількома змінними величинами, які спостерігаються одночасно. В якості кількісної міри зв'язку між двома змінними величинами використовується коефіцієнт кореляції. Метод факторного аналізу передбачає складання кореляційної матриці в якій всі попарні коефіцієнти кореляції розташовуються відповідним чином. В цій матриці міститься важлива інформація про взаємовідносини змінних величин (параметрів) з урахуванням причин зміни цих величин. При аналізі такої кореляційної матриці отримують гіпотетичні величини (фактори), які знаходяться у певних співвідношеннях з цими параметрами.

Стосовно виробів ЗРО та РЕТ процедуру використання методу факторного аналізу можна описати наступним чином (рис. 1):

– здійснюється вибір параметрів, що характеризують працездатний стан виробу ЗРО та РЕТ або

систем, що входять до складу цих виробів;

– здійснюється статистичне накопичення кількості результатів вимірювання параметрів;

– складається матриця вхідних даних –  $Y$  де стовпчиками є вимірюванні параметри, рядками значення цих параметрів;

– обчислюються парні коефіцієнти кореляції, в результаті чого отримаємо кореляційну матрицю –  $R$ , яка є симетричною;

– по головній діагоналі кореляційної матриці проставляються оцінки спільностей і отримують редуцировану кореляційну матрицю  $R_h$ ;

– з отриманої матриці  $R_h$  вилучають фактори, в результаті чого отримують матрицю відображення –  $A$ , елементами якої є факторні навантаження;

– за допомогою спеціальних процедур обернення отримують в результаті факторну матрицю –  $V$ . В цій факторній матриці кожному параметру відповідає певне факторне навантаження, Далі на заключному етапі здійснюється оцінка значень факторів по кожному параметру.

Під час експлуатації статистичне накопичення результатів розрахунку матриць  $V$  з факторними навантаженнями дозволить за даними спостережень за зміною факторних навантажень у часі здійснити прогнозування моменту переходу виробу у непрацездатний стан або визначити момент початку виникнення негативних процесів у виробі або системі, які можуть привести до непрацездатного стану того чи іншого блоку або вузла.

Для вирішення цієї задачі вихідним посиленням є те, що спочатку процедура виявлення факторів та факторних навантажень повинна здійснюватися за умови використання набору статистичних даних, які отримані при експлуатації виробів ЗРО та РЕТ з відновленим ресурсом. Ці факторні навантаження можна буде вважати еталонними.

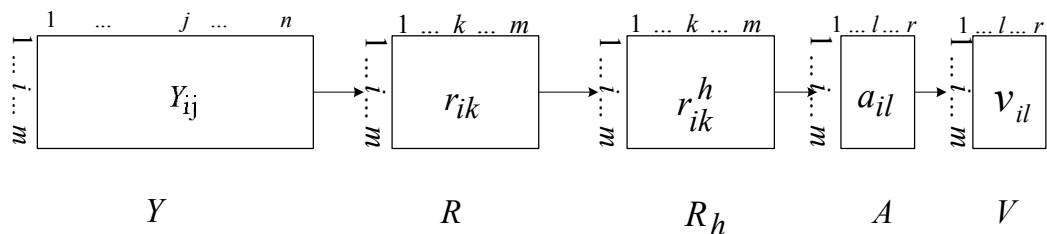


Рис. 1. Загальна процедура факторного аналізу

На рис. 1:  $Y=(y_{ij})$  – матриця вхідних даних:  $i=1, \dots, m$  – змінні (параметри),  $j=1, \dots, n$  – кількість спостережень;  $R=(r_{ik})$  – кореляційна матриця:  $i, k=1, \dots, m$ ;  $R_h=(r_{ik}^h)$  – редуцирована кореляційна матриця:  $i, k=1, \dots, m$ ;  $A=(a_{il})$  – матриця відображення, елементами якої є факторні навантаження:  $i=1, \dots, m$  – фактори,  $i=1, \dots, m$  – змінні (параметри);  $V=(v_{il})$  – факторна матриця після повороту:  $i=1, \dots, m$  – фактори:  $i=1, \dots, m$  – змінні (параметри).

При подальшому здійсненні контролю технічного стану виробів ЗРО та РЕТ під час їх експлуатації за технічним станом при порівнянні поточних значень величин факторних навантажень з еталонними можна визначити відхилення цих навантажень у часі. В якості міри відхилення факторних навантажень від еталонних можна вважати середню відстань між факторними навантаженнями –  $r_a$ , що обчислюються як відстань між точками  $m$ -мірного

простору. Для розрахунку можна використовувати наступний вираз:

$$r_a = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i; \quad (1)$$

де  $d_i = ((a_{1i} - a_{11})^2 + (a_{2i} - a_{21})^2)^{0,5}$  – відстань між факторними навантаженнями  $a_1$  та  $a_2$  при першому та наступному вимірюваннях параметрів;  $i = \overline{1, m}$ , де  $m$  – кількість параметрів, що контролюються.

Для висновку про ті чи інші процеси, що відбуваються у виробі або системі необхідним є введення  $r_{ae}$  – еталонної (допустимої) середньої відстані між факторними навантаженнями. Далі при порівнянні  $r_{ae}$  з  $r_a$  знайдемо різницю  $\Delta_a$ . Якщо  $\Delta_a$  буде перевищувати певну величину, тобто  $\Delta_a \geq \Delta_{a\bar{a}}$  ( $\Delta_{a\bar{a}}$  – встановлена допустима різниця, що є критерієм міри відхилення факторних навантажень від еталонних), то можна зробити висновок про те, що в даному виробі відбуваються негативні процеси, які в подальшому можуть привести до переходу його у непрацездатний стан. Крім того, аналізуючи інформацію про максимальне відхилення значень факторних навантажень від еталонних можна зробити припущення про можливу майбутню відмову того чи іншого блоку, пристрою, системи.

Звідси слідує важливий висновок, про те що, якщо в процесі експлуатації виробу відхилення факторних навантажень від еталонних не перевищує встановлених відстаней то виріб є працездатним і навпаки, якщо відхилення факторних навантажень від номінальних перевищують значення встановлене критерієм то є підстави для прогнозування переходу виробу у непрацездатний стан.

Для підтвердження вищевказаних висновків в

якості експерименту, для аналізу можливості прогнозування технічного стану виробу за допомогою методу факторного аналізу, та з використанням комп'ютерної програми "Micro-Cap 9" було проведено електронне моделювання процесу функціонування блоку задаючих генераторів приймального пристрою РЛС одного з ЗРК, що є на озброєнні зенітних ракетних військ. У восьми точках схеми блоку було проведено вимірювання напруги і частоти (всього 16 параметрів).

На першому етапі здійснювалося повільне змінення ємності, індуктивності та опору в межах параметричного допуску. Це не приводило до виходу параметрів, що визначають працездатний стан блоку за межі допусків, які визначаються нормативною документацією. Тобто моделювався процес функціонування блоку без впливу негативних процесів, які можуть привести до непрацездатного стану. Далі за допомогою програми "Statistica", що реалізує метод факторного аналізу, розраховувалися факторні матриці  $V$  з факторами та факторними навантаженнями, які приведена в таблиці 1, тобто були отримані еталонні матриці  $V$ , за умов працездатного стану блоку. Розрахунки проводилися через кожні 10 замірів параметрів.

На другому етапі проводилося поетапне штучне змінювання коефіцієнту підсилення, з його відхиленням за межі допуску, лампи задаючого генератора. Далі аналогічно розраховувалися факторні матриці  $V$  з факторними навантаженнями. Після двадцяти вимірювань параметрів зміна коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератора привела до виходу робочої точки вольт-амперної характеристики лампи за межі її лінійної ділянки. Результати розрахунку величин факторних навантажень при штучному змінненні коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератора. наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Величини факторних навантажень без впливу негативних процесів

Параметр	10		20		30		40	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
U6.49gen	<b>0,99177</b>	0,07093	<b>0,97334</b>	0,09775	<b>0,95494</b>	0,09452	<b>0,97344</b>	0,01387
f6.49gen	0,58793	0,11479	0,36469	0,10911	0,40548	-0,05331	0,35381	0,76377
U6.49us	<b>0,99131</b>	0,08396	<b>0,95050</b>	0,11842	<b>0,95256</b>	0,06577	<b>0,96483</b>	0,06730
f6.49us	0,63862	0,47974	0,38624	-0,29106	0,23005	0,19771	0,34629	-0,21136
U6.16pf	<b>0,99503</b>	0,01366	<b>0,95540</b>	0,20190	<b>0,92370</b>	0,26710	<b>0,96818</b>	0,04315
f6.16pf	-0,24196	0,01533	0,04423	0,11075	0,05927	0,06984	0,07086	0,69182
U6.16us	<b>0,99455</b>	-0,06137	<b>0,93898</b>	0,08153	<b>0,89401</b>	0,06520	<b>0,90670</b>	0,21457
f6.16us	0,15669	-0,40295	-0,03500	-0,60971	0,00255	-0,74494	-0,15597	0,47665
U6.16vk	<b>0,96615</b>	0,03622	<b>0,96262</b>	0,03141	<b>0,94544</b>	0,08209	<b>0,96092</b>	0,02382
f6.16vk	-0,45379	-0,56581	-0,22159	-0,69814	-0,18026	-0,63074	-0,32993	0,24557
U6.49kv	<b>0,99292</b>	-0,00700	<b>0,96670</b>	0,05303	<b>0,95498</b>	0,07585	<b>0,96805</b>	-0,06930
f6.49kv	0,14193	0,73653	0,02364	-0,59779	0,01061	-0,70170	-0,07293	0,21433
UsL1	<b>0,99491</b>	0,03566	<b>0,97120</b>	0,04859	<b>0,96366</b>	0,06835	<b>0,96683</b>	-0,09626
fsL1	-0,08563	0,70544	0,04555	-0,85651	0,04032	-0,78923	-0,10452	0,42304
Ua6.16vk	<b>0,92773</b>	-0,09283	<b>0,89534</b>	0,22048	<b>0,88086</b>	0,25826	<b>0,94340</b>	-0,14320
fa6.16vk	-0,20564	-0,02548	-0,34059	0,19220	-0,29622	0,21970	-0,25287	-0,67829

Таблиця 2

Величини факторних навантажень з урахуванням зміни коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератору

Параметр	10		20		30		40	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
U6.49gen	<b>0,98903</b>	0,10255	<b>0,27723</b>	0,92292	<b>0,94733</b>	0,20018	<b>0,90403</b>	0,39306
f6.49gen	0,54549	-0,23908	0,40158	0,37360	0,82116	0,51657	0,58769	0,80186
U6.49us	<b>0,98834</b>	0,12029	<b>0,43686</b>	0,87453	<b>0,93169</b>	0,29637	<b>0,90133</b>	0,41369
f6.49us	0,53673	0,72711	0,86974	0,11482	0,75988	0,59239	0,52348	0,77350
U6.16pf	<b>0,95965</b>	0,24431	<b>0,84410</b>	0,27244	<b>0,29685</b>	0,95163	<b>0,85690</b>	0,47804
f6.16pf	-0,24016	0,51483	0,17667	-0,31002	0,85824	0,44152	0,40308	0,88534
U6.16us	<b>0,96535</b>	0,21862	<b>0,83904</b>	0,36188	<b>0,31836</b>	0,94347	<b>0,85534</b>	0,48679
f6.16us	-0,11183	-0,51237	-0,69478	0,21343	0,91274	0,29454	0,40548	0,88497
U6.16vk	<b>0,92011</b>	0,28429	<b>0,84146</b>	0,37205	<b>0,28146</b>	0,95075	<b>0,85308</b>	0,48868
f6.16vk	-0,53688	0,00595	0,18373	-0,62554	0,88839	0,35741	0,30686	0,90623
U6.49kv	<b>0,99577</b>	0,06108	<b>0,37891</b>	0,89770	<b>0,92914</b>	0,27856	<b>0,90567</b>	0,40021
f6.49kv	0,24147	0,73153	0,31515	0,17780	0,89250	0,42460	0,55145	0,82887
UsL1	<b>0,99071</b>	0,09291	<b>0,28251</b>	0,92569	<b>0,94549</b>	0,20267	<b>0,90422</b>	0,39284
fsL1	-0,11636	0,49733	0,47846	-0,26884	0,82995	0,48940	0,58515	0,80358
Ua6.16vk	<b>0,92568</b>	0,11761	<b>0,73256</b>	0,38229	<b>0,35631</b>	0,92441	<b>0,85734</b>	0,48773
fa6.16vk	-0,34098	-0,80497	-0,78165	0,04158	0,89865	0,37156	0,40553	0,88642

На рис. 2 наведено геометричне представлення факторного простору загальних факторів (двох факторів) з факторними навантаженнями на кожний фактор при відсутності зміни коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератору, а на рис. 3 з урахуванням його зміни. З представлених рисунків видно, що групування змінних величин параметрів відбувається навколо двох загальних факторів з певним ступенем розсіювання. На рис. 3 помітна суттєва відмінність представлених групувань факторних навантажень від навантажень представлених на

рис. 2. Згідно з [1] кут між двома будь-якими векторами-змінними на точки, що характеризують факторні навантаження є мірою кореляції цих двох змінних величин. Наприклад, згідно рис. 2 – це кут  $\phi$  між векторами на точки факторних навантажень f6.49gen та U6.16us, а коефіцієнт кореляції між цими змінними дорівнює косинусу кута між ними в просторі двох загальних факторів. Аналізуючи рис. 2 та 3 можна зробити висновок, що цей кут змінюється, тобто змінюється коефіцієнт кореляції в сторону збільшення.

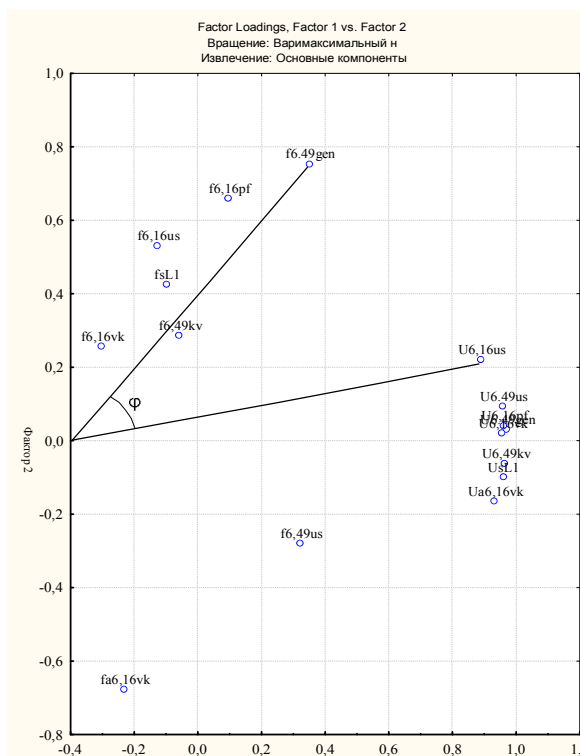


Рис. 2. Факторні навантаження в просторі загальних факторів при відсутності зміни коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератору

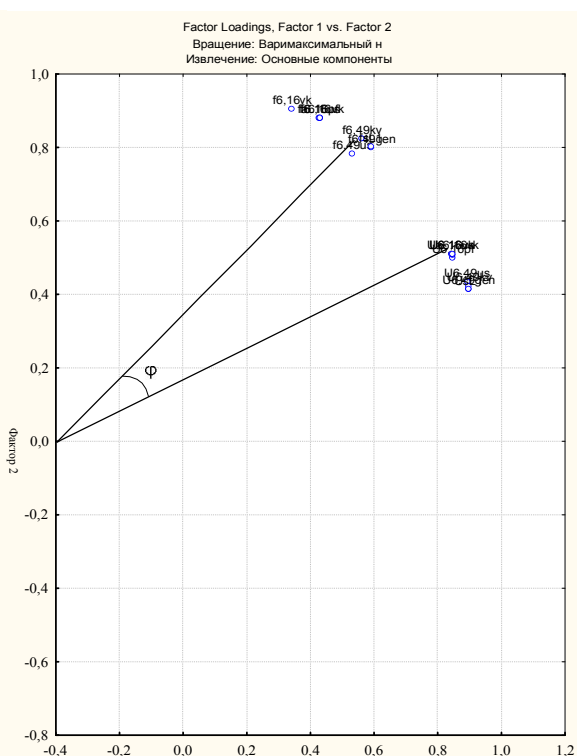


Рис. 3. Факторні навантаження в просторі загальних факторів з урахуванням зміни коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератору

Розрахунок середньої відстані між факторними навантаженнями  $r_a$ , за формулою (1), показав таке:

– при умові функціонування блоку задаючих генераторів у працездатному стані без зміни коефіцієнта підсилення лампи задаючого генератора  $r_a = 0,42$ ;

– при умові штучної зміни коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератора з порушенням працездатного стану  $r_a = 0,71$ . Звідси різниця  $\Delta_a$  складає 0,29.

З цього можна зробити висновок, що зміна величин факторних навантажень та їх положень у просторі загальних факторів говорить про вихід параметрів блоку за межі допусків, встановлених нормативною документацією.

Аналіз моделювання функціонування блоку задаючих генераторів та розрахунку факторних навантажень дозволяє зробити наступні висновки:

– є два загальні фактори, які суттєво пов'язані з контрольованими параметрами;

– з 16 параметрів, що підлягали контролю 8 (відповідні напруги в точках контролю) мають максимальні факторні навантаження;

– зміна коефіцієнту підсилення лампи задаючого генератора приводить до зміни величин факторних навантажень, їх групувань у просторі загальних факторів та зміни середньої відстані між факторними навантаженнями з появою різниці між середніми факторними навантаженнями  $\Delta_a$ .

## Висновки

Таким чином, з проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

– в роботі обґрунтований підхід до визначення непрацездатного стану виробів ЗРО та РЕТ за допомогою використання процедури факторного аналізу при переході до стратегії технічного обслуговування та ремонту за станом;

– при переході до стратегії технічного обслуговування за станом необхідно здійснювати статистичне накопичення результатів контролю параметрів виробів ЗРО та РЕТ та їх обробляти у відповідних комп'ютерних програмах;

– результати обробки накопичених даних про зміну параметрів виробів ЗРО та РЕТ за допомогою методу факторного аналізу (програми "Statistica") за умови працездатного стану виробів є важливою (еталонною) інформацією, яка може використовуватися для аналізу в подальшому для порівняння з результатами обробки поточних вимірювань параметрів;

– прогнозування непрацездатного стану виробів ЗРО та РЕТ може здійснюватися шляхом порівняння зміни середніх відстаней між факторними навантаженнями (змінюю  $r_a$ ) та положень факторних навантажень у просторі загальних факторів.

Розглянута процедура прогнозування непрацездатного стану виробів ЗРО та РЕТ з використанням методу факторного аналізу потребує оперативного отримання інформації про зміну параметрів виробів ЗРО та РЕТ у часі та обробки результатів вимірювань параметрів для своєчасного виявлення передвідмовного стану виробів у довільний момент часу. Тому, для оперативного отримання інформації про зміну факторних навантажень у часі необхідним і важливим є введення автоматичних систем контролю параметрів та діагностики технічного стану виробів ЗРО та РЕТ.

## Список літератури

1. К. Иберла. Факторный анализ. – М.: Статистика, 1980г. – 397с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: учебн. пособ. / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.

Надійшла до редколегії 12.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО ВООРУЖЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА В СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПО СОСТОЯНИЮ

А.А. Шоколовский, И.В. Коваль, А.А. Наконечный, В.П. Попов

*В статье в связи с переходом к стратегии технического обслуживания и ремонта по состоянию рассмотренная возможность использования метода факторного анализа для прогнозирования технического состояния изделий зенитного ракетного вооружения и радиоэлектронной техники (ЗРВ и РЭТ). Использование метода факторного анализа позволяет прогнозировать наступление неработоспособного состояния изделий за счет анализа изменения факторных нагрузок.*

**Ключевые слова:** стратегия технического обслуживания и ремонта за станом, контроль технического состояния, корреляционные связи, факторные нагрузки, прогнозирование технического состояния.

## FORECASTING OF ANTI-AIRCRAFT ARMAMENT AND ELECTRONICS WARE TECHNICAL STATE USING FACTOR ANALYSIS METHOD IN STRATEGY OF MAINTENANCE AND REPAIR UNDER THE CONDITION

A.A. Shokolovsky, I.V. Koval, A.A. Nakonechny, V.P. Popov

*In the paper in connection with transfer to strategy of maintenance and repair under the condition possibility of using the factor analysis for the forecasting of anti-aircraft armament and electronics ware technical state was considered. Using of factor analysis method permits to predict ware disabled state approach at the expense of analysis of the factor load modification.*

**Keywords:** strategy of maintenance and repair under the condition, technical state control, correlations, factor loads, technical state forecasting.