

УДК 621.391

Б.М. Ланецький, В.В. Лук'янчук, А.А. Артеменко

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ Й КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ БАГАТОРАЗОВОГО ЦИКЛІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ, І РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ЇХНЬОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Наводяться результати порівняльного аналізу методів контролю показників безвідмовності складних технічних систем багаторазового циклічного застосування: послідовного методу, методів одностороннього і двостороннього довірчих інтервалів, методу порівняння за точковими оцінками й середньоквадратичними відхиленнями, методів точкового оцінювання й рекомендації з їхнього застосування.

Ключові слова: імовірність безвідмовного увімкнення, імовірність безвідмовної роботи, експлуатація за технічним станом, метод оцінювання, складна технічна система багаторазового циклічного застосування.

Вступ

Постановка проблеми. При експлуатації за технічним станом (ЕТС) складних технічних систем (СТС) багаторазового циклічного застосування (БРЦЗ) необхідно експериментальне підтвердження вимог до показників безвідмовності “імовірність безвідмовного увімкнення” (ІБУ) і “імовірність безвідмовної роботи” (ІБР) СТС і визначення їхніх величин [4, 5].

Методи визначення необхідної кількості циклів випробувань (або необхідної тривалості випробувань) на безвідмовність СТС БРЦЗ за показниками ІБР, середнього наробітку на відмову та ін. стосовно до стадій розробки й виробництва достатньо повно викладені в нормативних документах [1, 6] і науково-технічній літературі [2, 3, 7, 8, 9]. Їхнє проведення пов'язане з достатньо великою кількістю циклів випробувань на безвідмовність, які, як правило, однотипні за своїм змістом в частині видів і рівнів діючих навантажень.

Для контролю й оцінки цих показників безвідмовності (ПБ) при ЕТС необхідно враховувати специфіку вихідних даних, які одержані при експлуатаційних спостереженнях (е.с.), планувати експлуатаційні випробування (е.в.) з урахуванням можливостей з витрати ресурсів СТС на ці цілі [4, 5]. У зв'язку із цим актуальним є завдання аналізу методів оцінювання й контролю ПБ СТС БРЦЗ, що експлуатуються за технічним станом, і розробка рекомендацій щодо їхнього застосування для вирішення завдань ЕТС за критерієм мінімуму часових і економічних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Докладний аналіз методів оцінювання, які наведено в науково-технічній літературі, викладений в статті [5], з якою доцільно попередньо ознайомитись.

Питання експлуатаційних випробувань викладені в науково-технічній літературі і нормативній документації, особливо при ЕТС, недостатньо повно. Основними видами е.в. вважаються дослідна експлуатація й підконтрольна експлуатація [1]. Дослідна експлуатація проводиться кваліфікованим персоналом при регулярному контролі фахівцями, точному обліку наробітку виробу, обсягу виконаної їм роботи, реєстрації й аналізу відмов і несправностей за час випробувань.

При підконтрольній експлуатації процес і результати експлуатації спостерігаються персоналом, спеціально призначеним і підготовленим з цією метою.

При експлуатації СТС за технічним станом е.в. проводяться періодично в процесі контролів граничного стану підготовленими фахівцями, а експлуатаційні спостереження – регулярно штатним експлуатаційним персоналом. При цих видах е.в. та е.с. пред'являються підвищені вимоги до достовірності обліку наробітку та реєстрації відмов СТС.

Експлуатаційні випробування необхідно проводити при типових умовах і режимах застосування, які характерні для використання СТС даного виду. При цьому повинні забезпечуватися задані методикою випробувань чергування режимів використання СТС, тривалості випробувань. З метою скорочення обсягів е.в. необхідно обґрунтовано використовувати апріорну інформацію про результати експлуатаційних спостережень попередніх е.в. СТС, їхніх складових частин при дотриманні вимог до точності й достовірності кінцевих результатів.

Мета статті: провести порівняльний аналіз методів оцінювання й контролю показників безвідмовності складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, а саме: імовірність безвідмовного увімкнення й імовірність безвідмовної роботи, і розробити рекомендації з їхнього застосування.

Основна частина

При експлуатації конкретної СТС за технічним станом проводяться експлуатаційні спостереження за технічним станом і періодичні контролю ІБР, ІБУ за результатами е.с. і е.в.

Найбільш часто в практиці випробувань на безвідмовність застосовуються наступні методи контролю [1, 3, 6]: послідовний метод; метод двостороннього довірчого інтервалу (д.д.і.), метод одностороннього довірчого інтервалу (о.д.і.), метод порівняння точкових оцінок і середньоквадратичного відхилення (с.к.в.). Вибір методу контролю повинен здійснюватися розробником системи експлуатації СТС і встановлюватися в експлуатаційній документації.

Проведемо порівняння цих методів контролю за необхідною кількістю циклів випробувань, очікуваному значенню точкової оцінки ІБУ (ІБР) і очікуваному значенню с.к.в. їхньої точкової оцінки.

Зауважимо, що при вирішенні завдання контролю показників безвідмовності послідовним методом, методом (о.д.і.) і методом (д.д.і.) визначення точкової оцінки ІБ і с.к.в. для ухвалення рішення про відповідність виробу заданим вимогам не потрібно. За результатами випробувань, проведених за цими методами, приймається рішення про відповідність виробу заданим вимогам за заздалегідь установленим (погодженим) правилом [6]. Для контролю показників безвідмовності ІБУ і ІБР можна застосовувати різні критерії, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Критерії для контролю показника безвідмовності ІБУ (ІБР) виробів БРЦЗ

Метод контролю	Результат контролю позитивного показника безвідмовності виробу		Потрібна додаткова інформація
	позитивний	негативний	
Послідовний метод	$d \leq M_{np}(n)$	$d \geq M_{bp}(n)$	$M_{np}(n) < d < M_{bp}(n)$
Метод двостороннього довірчого інтервалу	$\underline{P}_{1-\beta}(d, n) \geq P_1$ $\bar{P}_{1-\alpha}(d, n) > P_0$	$\bar{P}_{1-\alpha}(d, n) \leq P_0$ $\underline{P}_{1-\beta}(d, n) < P_1$	
Метод одностороннього довірчого інтервалу	$\underline{P}_{1-\beta}(d, n) \geq P_1$	$\underline{P}_{1-\beta}(d, n) < P_1$	
Метод порівняння за точковою оцінкою й с.к.в.	$P^*(d, n) \geq P_{пор}$, $\sigma(d, n) \leq \sigma_{пор}$	$P^*(d, n) < P_{пор}$, $\sigma(d, n) \leq \sigma_{пор}$	$P^*(d, n) > P_{пор}$, $\sigma(d, n) \geq \sigma_{пор}$

У табл. 1 прийняті наступні позначення: $P_{пор}$ – задане значення позитивного ПБ – ІБУ або ІБР; $\underline{P}_\gamma(d, n), \bar{P}_\gamma(d, n)$ – нижні й верхня довірчі межі показника безвідмовності рівня γ відповідно; d – отримане при n випробуваннях число відмов; $M_{np}(n), M_{bp}(n)$ – приймальне й бракувальне число відмов відповідно; $\sigma_{пор}$ – задане с.к.в. точкової оцінки P^* ПБ; $\sigma(d, n)$ – отримане с.к.в. точкової оцінки P^* ПБ; $P^*(d, n)$ – отримане значення точкової оцінки ПБ; P_0, P_1 – приймальний і бракувальний рівні ПБ відповідно.

Для проведення порівняння різних методів знайдемо значення точкових оцінок показника ІБУ (ІБР) і їх с.к.в., які могли б бути отримані за результатами виконаних обсягів випробувань.

Порівняння методів проведемо на наступному прикладі. Нехай для деякої СТС задано, що ІБУ (ІБР) повинна бути не менше $P_{пор} = 0,9$. У випадку застосування методу послідовного аналізу контроль показника ІБУ (ІБР) проводиться при ризику замовника $\beta = 0,1$, ризику постачальника $\alpha = 0,1$ й від-

ношенні $(1 - P_1)/(1 - P_0) = 2$, $P_0 = 0,95$.

У випадку застосування методу д.д.і. контроль ІБУ (ІБР) проводиться за умови $\alpha = \beta = 0,1$, $P_1 = 0,85$; $P_0 = 0,95$; довірча ймовірність 0,9. У випадку застосування методу о.д.і. контроль проводиться за умови, що $P_1 = 0,85$; довірча ймовірність 0,9.

Результати проведених розрахунків зведені в табл. 2. Вони показують, що при безвідмовних випробуваннях ($d = 0$) і при числі відмов $d = 1$, $d = 3$ і позитивних результатах контролю значення точкових оцінок ІБУ (ІБР), які одержані за результатами випробувань, спланованих за послідовним методом, методом д.д.і. і методом о.д.і. значно вище необхідного значення 0,9.

При методі порівняння точкових оцінок і с.к.в. очікувані величини точкової оцінки й с.к.в. дорівнюють необхідним значенням.

Необхідна кількість циклів випробувань для контролю показників ІБУ (ІБР) послідовним методом, методами о.д.і. і д.д.і. у порівнянні з необхідною кількістю циклів випробувань за методом порівняння точкових оцінок більша у (4,7 – 7,3) рази при безвідмовних випробуваннях, у (2,4 – 2,9) рази при

$d = 1$, у (1,4 – 1,6) рази при $d = 3$. При цьому слід зазначити, що с.к.в. цих оцінок у (2,5 – 4) рази менші ніж с.к.в., які отримані за методом порівняння точкових оцінок при $d = 0$, у (2,3 – 2,8) рази менші при $d = 1$, у (1,4 – 1,6) разів менші при $d = 3$. Це обумовлено, в основному, необхідними обсягами випробувань за кожним методом.

Для проведення порівняння методів були прийняті вихідні дані, близькі або однакові для всіх методів, з метою можливості порівняння результатів розрахунків.

У практиці планування випробувань, для стадій розробки й освоєння виробництва, для зменшення їхньої кількості циклів випробувань вибирають більш низькі значення достовірності.

Для методу д.д.і. вибираються більш високі значення ризиків α і β , більш низькі значення бракувального рівня, і більш високі для приймального рівня. Для послідовного методу вибираються більш високі значення ризиків α і β , більш низькі значення бракувального рівня, ніж це прийнято в розглянутому прикладі.

Таблиця 2

Результати розрахунків необхідної кількості циклів випробувань, величин точкових оцінок і їх с.к.в. для різних методів контролю показників безвідмовності ІБУ (ІБР) виробів БРЦЗ при $P_{np} = 0,9$, $\alpha = \beta = 0,1$

Метод контролю	d=0			d=1			d=3		
	n	P*	σ_p	n	P*	σ_p	n	P*	σ_p
Послідовний метод	22	0,9792	0,0451	29	0,9655	0,0339	43	0,9302	0,0389
Метод двостороннього довірчого інтервалу	18	0,9750	0,0537	29	0,9655	0,0339	49	0,9388	0,0342
Метод одностороннього довірчого інтервалу	14	0,9688	0,0665	24	0,9583	0,0408	43	0,9302	0,0389
Метод порівняння за точковою оцінкою й с.к.в.	3	0,9000	0,1915	10	0,9000	0,0949	30	0,9000	0,0548

Ці прийоми дозволяють зменшити обсяги випробувань. При цьому, як наслідок, збільшуються с.к.в. одержуваних оцінок, розширюються межі довірчих інтервалів, тобто знижуються точності оцінок, або при збереженні значень довірчих меж знижуються достовірність оцінок, що неприпустимо для ЕТС.

За результатами порівняльного аналізу методів контролю показників безвідмовності ІБУ (ІБР) СТС БРЦЗ, які експлуатуються за технічним станом, можна сформулювати наступне:

за економічними й часовими витратами на проведення випробувань перевагу слід надати методу порівняння точкових оцінок і с.к.в.

Далі проведемо порівняння методів точкового оцінювання показників безвідмовності ІБУ (ІБР) СТС, що експлуатуються за технічним станом, з

$$P_{MM}^* < P_{FM}^* < P_{MB}^* < P_{IM}^* < P_{LK}^* < P_{MH}^* < P_{MB1}^* < P_{MI}^* = 1; \quad (1)$$

$$0 = \sigma_{MI} < \sigma_{MB1} < \sigma_{LK} < \sigma_{IM} < \sigma_{FM} < \sigma_{MH} < \sigma_{MB} < \sigma_{MM}. \quad (2)$$

При цьому для контролю ІБ ІБУ (ІБР) за економічними і часовими витратами і критеріями (табл. 1) доцільно використовувати МБ1, ІМ, метод лінійного об'єднання оцінок.

використанням співвідношень [5] для точкових оцінок і їх с.к.в. для наступних методів точкового оцінювання: методу максимальної правдоподібності (МП), байесовського методу (МБ), модифікованого байесовського методу (МБ1), мінімаксного методу (ММ), методу фідуційних імовірностей (ФМ), методу лінійного об'єднання (комбінації) оцінок (ЛК), методу статистичної невизначеності (МН), інтерполяційного методу (ІМ).

Для цього проведемо розрахунки залежностей величин точкових оцінок ІБУ (ІБР) P^* і їх с.к.в. σ від кількості циклів випробувань n при різних методах оцінювання й кількості відмов $d=0,1,3$.

Результати розрахунків представлені у вигляді графіків цих залежностей.

Як видно з рис. 1, 2, при $d=0$ точкові оцінки ІБУ (ІБР) і їх с.к.в. упорядковані таким чином:

З рис. 1, 2 при $d=1$ видно, що точкові оцінки ІБУ (ІБР) і їх с.к.в. упорядковані наступним чином:

$$P_{MM}^* < P_{MB}^* < P_{IM}^* < P_{MH}^* < P_{MI}^* < P_{MB1}^*; \quad (3)$$

$$\sigma_{MB1} < \sigma_{MI} < \sigma_{IM} < \sigma_{MH} < \sigma_{MB} < \sigma_{MM}. \quad (4)$$

Слід зазначити, що при $d = 1$ для методів ММ і МБ при $n > 19$, $P_{MM}^* < P_{MB}^*$, а при $n < 19$ $P_{MB}^* < P_{MM}^*$.

З рис. 1, 2 при $d=3$ відповідні нерівності мають такий вигляд:

$$P_{MB}^* < P_{IM}^* < P_{MH}^* < P_{MP}^* < P_{MM}^* < P_{MB1}^* ; \quad (5)$$

$$\sigma_{MP} < \sigma_{MB1} < \sigma_{IM} < \sigma_{MH} < \sigma_{MB} < \sigma_{MM} . \quad (6)$$

Слід також зазначити, що при $d = 3$ для методів ІМ і ММ, МН, МБ:

при $n < 15$,

$$\sigma_{IM} > \sigma_{MH} < \sigma_{MB} < \sigma_{MM} ,$$

при $n > 15$

$$\sigma_{IM} < \sigma_{MH} < \sigma_{MB} < \sigma_{MM} ,$$

для методів ММ, ІМ, МП, МН, МБ при $n < 50$

$$P_{MB}^* < P_{IM}^* < P_{MH}^* < P_{MP}^* < P_{MM}^* ,$$

при $n > 50$

$$P_{MM}^* < P_{MB}^* < P_{IM}^* < P_{MH}^* < P_{MP}^* .$$

З аналізу нерівностей (1) – (6) слідує, що для контролю ПБ ІБУ (ІБР) із числом відмов $d=1..3$, відповідно до критерію (табл. 1) та за економічними і часовими витратами, перевагу слід віддати методам МП, МБ1, ІМ.

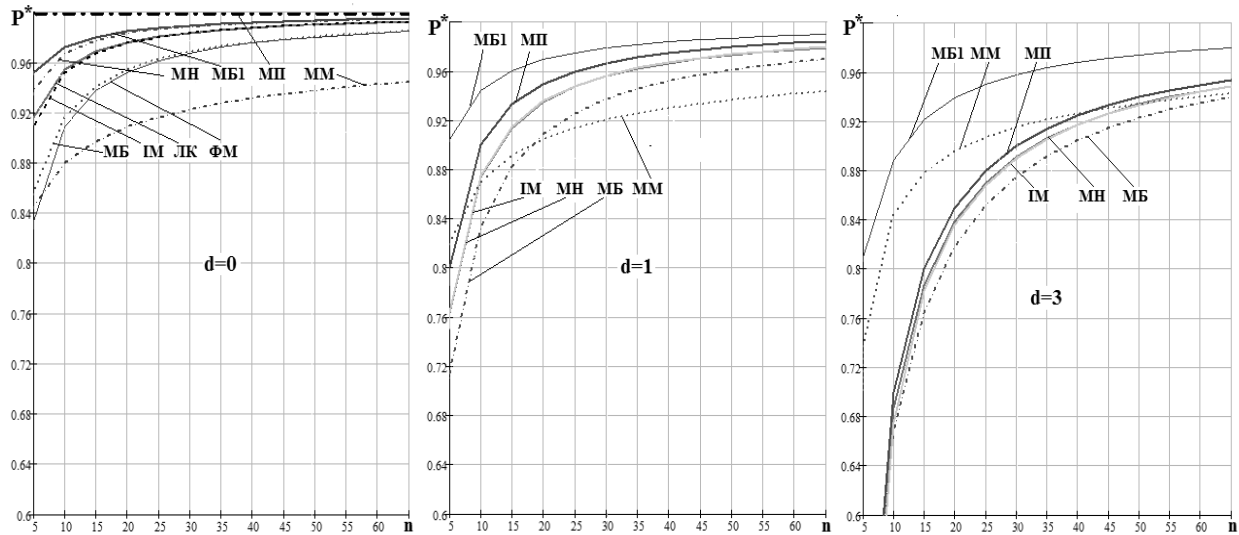


Рис. 1. Графіки залежностей величини точкових оцінок ІБУ (ІБР) P^* від кількості циклів випробувань n при різних методах оцінювання й кількості відмов d

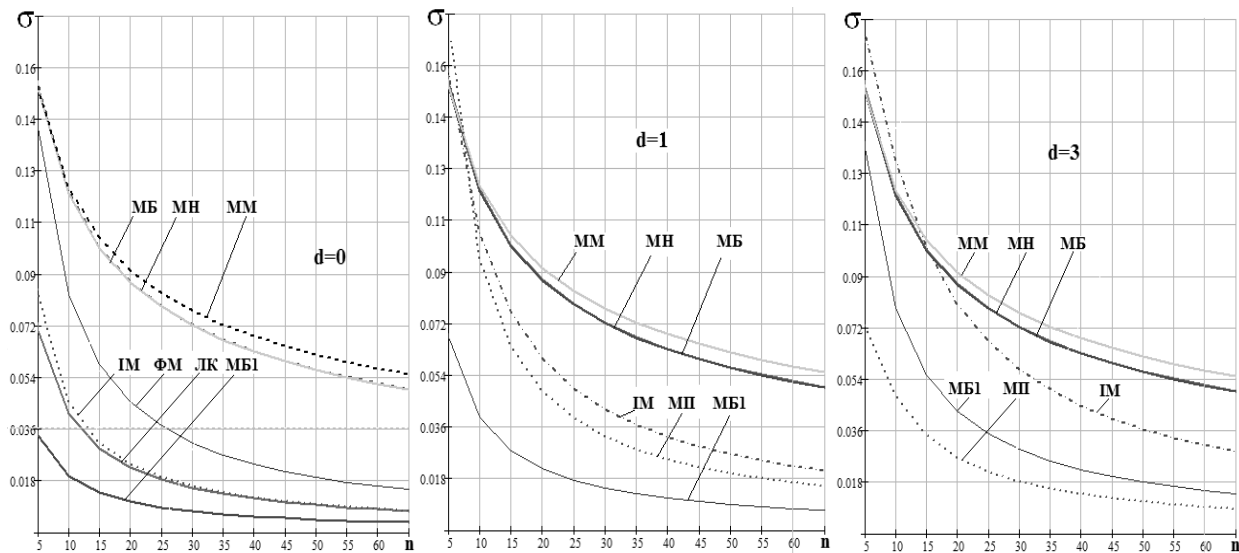


Рис. 2. Графіки залежностей величини с.к.в. оцінок ІБУ (ІБР) σ від кількості циклів випробувань n при різних методах оцінювання й кількості відмов d .

Слід зазначити, що в розглянутих методах байєвського методу, його модифікації МБ1, інтерполяційного методу і методу статистичної невизначеності використовується різна апіорна інформація [5].

У загальному випадку для вибору методу точкового оцінювання доцільно використовувати графіки залежностей величин точкових оцінок ІБУ (ІБР) і їх с.к.в. від кількості циклів випробувань.

Висновки

Проведено порівняльний аналіз методів контролю показників безвідмовності складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, які експлуатуються за технічним станом, за результатами якого сформульований висновок про те, що за економічними і часовими витратами на проведення експлуатаційних випробувань перевагу варто віддати методу порівняння точкових оцінок і с.к.в.

Проведено порівняльний аналіз методів точкового оцінювання показників безвідмовності ІБУ (ІБР), за результатами якого сформульовано висновок про те, що за економічними і часовими витратами та критеріями контролю для проведення експлуатаційних випробувань складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, які експлуатуються за технічним станом, при безвідмовних випробуваннях слід використовувати модифікований байєсівський метод, метод лінійного об'єднання (комбінації) оцінок, інтерполяційний метод, при наявності відмов – методи максимальної правдоподібності, модифікований байєсівський метод і інтерполяційний метод.

У загальному випадку при обраному методі контролю за точковою оцінкою й с.к.в. і очікуваних обсягах випробувань для вибору методу точкового оцінювання показника безвідмовності ІБУ (ІБР) доцільно використовувати графіки залежностей величини точкових оцінок ІБУ (ІБР) і їх с.к.в. від кількості циклів випробувань n при різних методах оцінювання й кількості відмов d і критерію контролю відповідного методу.

Ці рекомендації нададуть змогу зменшити економічні та часові витрати на проведення експлуатаційних випробувань складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, які експлуатуються за технічним станом.

Список літератури

1. Надежность машиностроительной продукции: Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – М.: Издательство стандартов, 1990 – 328 с.
2. Волков Е.Б. Основы теории надежности ракетных двигателей / Е.Б. Волков, Р.С. Судаков, Т.А. Сырицин. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
3. Шор Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1968. – 288 с.
4. Ланецкий Б.Н. Комплексное оценивание показателей безотказности и остаточной долговечности сложных технических систем, эксплуатируемых по техническому состоянию. Основные положения / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук, А.А. Артеменко // Системы обработки информации. – Х., 2016. – Вып. 2(139). – С. 40-43.
5. Ланецкий Б.М. Точковое оценивание показателей безвідмовності складних технічних систем багаторазового циклічного застосування що експлуатуються за технічним станом. Основні розрахункові співвідношення / Б.М. Ланецкий, В.В. Лук'янчук, А.А. Артеменко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2016. – № 1(22). – С. 58-63.
6. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 109 с.
7. Надежность технических систем / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, Б.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
8. Надежность и эффективность в технике: справочн. в 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1989. – Т.6: Экспериментальная обработка и испытания. – 376 с.
9. Статистические задачи обработки систем и таблицы для числовых расчетов показателей надежности / Р.С. Судаков, Н.А. Северцев, В.Н. Титулов и др.; под ред. Р.С. Судакова. – М.: Высш. школа, 1975. – 604 с.

Надійшла до редколегії 19.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.А. Демидов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНОГОРАЗОВОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ, И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук, А.А. Артеменко

Приводятся результаты сравнительного анализа методов контроля показателей безотказности сложных технических систем многоразового циклического применения: последовательного метода, методов одностороннего и двустороннего доверительных интервалов, метода сравнения по точечным оценкам и среднеквадратическим отклонениям, методов точечного оценивания и рекомендации по их применению.

Ключевые слова: вероятность безотказного включения, вероятность безотказной работы, эксплуатация по техническому состоянию, метод оценивания, сложная техническая система многоразового циклического применения.

ANALYSIS OF METHODS OF EVALUATION AND CONTROL OF INDEXES OF FAULTLESSNESS DIFFICULT TECHNICAL SYSTEMS OF MULTIPLE CYCLIC APPLICATION, THAT EXPLOITED BY TECHNICAL STATE, AND DEVELOPMENT RECOMMENDATIONS FROM THEIR APPLICATION

B.M. Lanetskiy, V.V. Lukjanchuk, A.A. Artemenko

Results of comparative analysis of methods of control of indexes of faultlessness of the difficult technical systems of multiple cyclic application are brought: successive method, methods one-sided and bilateral confidence intervals, method of comparison on point estimations and mean square deviations, methods of point evaluation and recommendation for their applications.

Keywords: probability of the faultless including, probability of faultless work, exploitation on the technical state, evaluation method, difficult technical system of multiple cyclic application.