

УДК 621.391

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

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків*

**РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКА БЕЗВІДМОВНОСТІ  
“ІМОВІРНІСТЬ БЕЗВІДМОВНОГО ВВІМКНЕННЯ” СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ  
СИСТЕМ БАГАТОРАЗОВОГО ЦИКЛІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ,  
ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ,  
ЗА ДОПОМОГОЮ ДОВІРЧИХ МЕЖ**

*Аналізуються вирішальні правила методу контролю показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення” за допомогою довірчих меж стосовно до складних технічних систем багаторазового циклічного застосування. Результати аналізу використані при розробці відповідного алгоритму контролю, блок-схема якого наводиться.*

**Ключові слова:** показник безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення”, складна технічна система багаторазового циклічного застосування, метод оцінювання, контроль показника за допомогою довірчих меж.

### **Вступ**

**Постановка проблеми.** Необхідність оцінки й контролю показника безвідмовності (ПБ) “імовірність безвідмовного ввімкнення” (ІБВ) складних технічних систем (СТС) багаторазового циклічного застосування

(БРЦЗ), що експлуатуються за технічним станом, була показана в [1, 2], де проведений аналіз методів оцінки й контролю ПБ таких систем, і викладені основні положення комбінованого методу оцінювання ПБ ІБВ, що розробляється. В основі цього методу покладений спосіб контролю ІБВ за допомогою довірчих меж і

байєсівські методи оцінювання при різній апіорній інформації про величину ІБВ.

Для реалізації методу оцінювання показника безвідмовності ІБВ що розробляється, за допомогою довірчих меж, необхідна розробка відповідних алгоритмів контролю, які враховують особливості експлуатації СТС БРЦЗ за технічним станом.

У зв'язку із цим розробка алгоритму контролю показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення” СТС БРЦЗ, що експлуатуються за технічним станом, є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Докладний аналіз методів оцінки й контролю показників надійності типу імовірність, які наведені в нормативній і науково-технічній літературі, викладений в [1, 2], з яким доцільно попередньо ознайомитися. У доповненні до викладеного матеріалу в рамках створення комбінованого методу [2], що розробляється, доцільно відзначити роботи [3 – 5], де викладений метод контролю показника надійності за допомогою довірчих меж.

У цих роботах фактично розглянуті основні положення цього методу контролю, однак не проведений достатньо повний аналіз його вирішальних правил стосовно до СТС БРЦЗ, що експлуатуються за технічним станом, з метою розробки відповідного алгоритму контролю.

**Мета статті.** Розробка алгоритму контролю показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення” складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, що експлуатуються за технічним станом, за допомогою довірчих меж за результатами аналізу відомих вирішальних правил контролю.

## Основна частина

Будемо вважати, що обсяг експлуатаційних спостережень (е.с.) СТС БРЦЗ, що експлуатуються за технічним станом, зафіксований [6]. Спосіб обчислення довірчих меж (ДМ)  $\bar{P}_{\text{ввімк}}$  і  $\underline{P}_{\text{ввімк}}$  для показника  $P_{\text{ввімк}}$  з будь-якими довірчими ймовірностями  $\gamma_1$  й  $\gamma_2$  ( $\gamma_1 \geq 0,5$ ,  $\gamma_2 \geq 0,5$ ) відомий. Потрібно провести аналіз вирішальних правил, що дозволять зробити висновок про відповідність або невідповідність СТС БРЦЗ вимогам за показником  $P_{\text{вкл}}$  на основі ДМ і що забезпечують задані ризики  $\alpha$  й  $\beta$  при рівнях  $P_{\text{ввімк}0}$  і  $P_{\text{ввімк}1}$ , і розробити відповідний алгоритм контролю. Далі для спрощення записів ІБВ та інші позитивні показники надійності типу “імовірність” будемо позначати через  $P$ .

Нехай умови приймання й бракування сформульовані у виді нерівностей

$$\underline{P}(\hat{P}, n) \geq P_1; \bar{P}(\hat{P}, n) > P_0 \text{ – умова приймання; } (1)$$

$$\bar{P}(\hat{P}, n) \leq P_0; \underline{P}(\hat{P}, n) < P_1 \text{ – умова бракування, } (2)$$

де  $\hat{P}$  – отримана точкова оцінка показника  $P$  за результатами е.с.;  $\bar{P}(\hat{P}, n)$  і  $\underline{P}(\hat{P}, n)$  – однібічні верхня й нижня довірчі межі (ОВДМ і ОНДМ), визначені з довірчими ймовірностями  $\gamma_1$  й  $\gamma_2$  відповідно, які розглядаються як функції  $\hat{P}$ , обсягу е.с.  $n$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ .

Відповідно до умови приймання (1) довірчий інтервал  $[\underline{P}, \bar{P}]$  зміщений праворуч відносно інтервалу невизначеності  $[P_1, P_0]$ , а відповідно до умови бракування (2) – зміщений ліворуч.

Установимо, чи існують значення  $\gamma_1$  й  $\gamma_2$ , що забезпечують задані ризики  $\alpha$  й  $\beta$ , при критеріях приймання (1) і бракування (2).

Ризик постачальника  $\alpha$  за визначенням є імовірність виконання умови бракування при рівні надійності виробу  $P_0$ . У розглянутому випадку це визначення можна записати у виді

$$\alpha = P\{\bar{P}(\hat{P}, n) \leq P_0 \mid P=P_0; \underline{P}(\hat{P}, n) < P_1 \mid P=P_0\}. (3)$$

Через те, що імовірність сумісного настання двох подій не може бути більше імовірності настання одного з них, то з (3) витікає нерівність

$$\alpha \leq P\{\bar{P}(\hat{P}, n) \leq P_0 \mid P=P_0\}. (4)$$

Нерівність (4) еквівалентна

$$\alpha \leq P\{\bar{P}(\hat{P}, n) \leq P_0\}. (5)$$

Відповідно до визначення ОВДМ  $\bar{P}$  рівня  $\gamma_1$

$$P\{P \leq \bar{P}(\hat{P}, n)\} = \gamma_1. (6)$$

Підставляючи (6) в (5) одержимо

$$\alpha \leq 1 - P\{P \leq \bar{P}(\hat{P}, n)\} = 1 - \gamma_1. (7)$$

Аналогічно вищевикладеному, одержимо відповідне співвідношення для ризику споживача  $\beta$  й однібічної довірчої імовірності  $\gamma_2$ :

$$\beta = P\{\underline{P}(\hat{P}, n) \geq P_1 \mid P=P_1; \bar{P}(\hat{P}, n) > P_0 \mid P=P_1\} \leq P\{\underline{P}(\hat{P}, n) \geq P_1 \mid P=P_1\} = P\{\underline{P}(\hat{P}, n) \geq P_1\}. (8)$$

Відповідно до визначення ОНДМ  $\underline{P}$  рівня  $\gamma_2$

$$P\{P \geq \underline{P}(\hat{P}, n)\} = \gamma_2. (9)$$

Підставляючи (9) в (8), одержимо

$$\beta = 1 - P\{P \geq \underline{P}(\hat{P}, n)\} = 1 - \gamma_2. (10)$$

Тоді, для того щоб забезпечити задані ризики  $\alpha$  й  $\beta$  за умови приймання (1) і бракування (2), досить визначити межі довірчого інтервалу з наступними довірчими ймовірностями:  $\underline{P}$  з імовірністю  $1 - \beta$ ;  $\bar{P}$  – з імовірністю  $1 - \alpha$ .

Вище розглянуті два з чотирьох можливих варіантів рішення за результатами е.с. (е.в.). Два інших можливих варіанти полягають у тому, що один інтервал повністю перебивається іншим, тобто це

можливі результати, коли інтервал  $[\bar{P}, \underline{P}]$  може “потрапити цілком усередину інтервалу”  $[P_1, P_0]$  або накрити його. При цьому немає можливості ухвалити рішення щодо приймання або бракування, тому такі варіанти повинні бути виключені. Забезпечити виконання цих вимог можна двома способами: плануванням (корегуванням) обсягу е.в.; корегуванням вимог до достовірності (точності) оцінки наприкінці е.с. (е.в. без попереднього планування). При експлуатації СТС БРЦЗ за технічним станом забезпечення вищесформульованої вимоги при контролі ПБ за результатами е.с. можливо через корегування вимог до достовірності оцінювання.

Процедура контрольних випробувань за ПБ ІБВ за допомогою довірчих меж полягає в наступному. По закінченню е.с. з результатом (накопиченою статис-

тикою)  $\tilde{P}$  визначають довірчий інтервал  $[\underline{P}_{\gamma_2}(\tilde{P}, n); \bar{P}_{\gamma_1}(\tilde{P}, n)]$ . При цьому значення  $\gamma_1$  й  $\gamma_2$  підбирають так, щоб виконувалась одна з умов:

$$\underline{P}_{\gamma_2}(\tilde{P}, n) = P_1; \bar{P}_{\gamma_1}(\tilde{P}, n) > P_0 \quad (11)$$

або

$$\bar{P}_{\gamma_1}(\tilde{P}, n) = P_0; \underline{P}_{\gamma_2}(\tilde{P}, n) < P_1. \quad (12)$$

При зміні величин  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  варто дотримувати заздалегідь обраного співвідношення між ними (рекомендується  $\gamma_1 = \gamma_2$ ). При збільшенні величин  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  довірчий інтервал розширюється, а при зменшенні – звужується (за обидва боки). Якщо при деяких  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  виконується умова (11), то виносять рішення про відповідність виробу заданим вимогам (рис. 1).

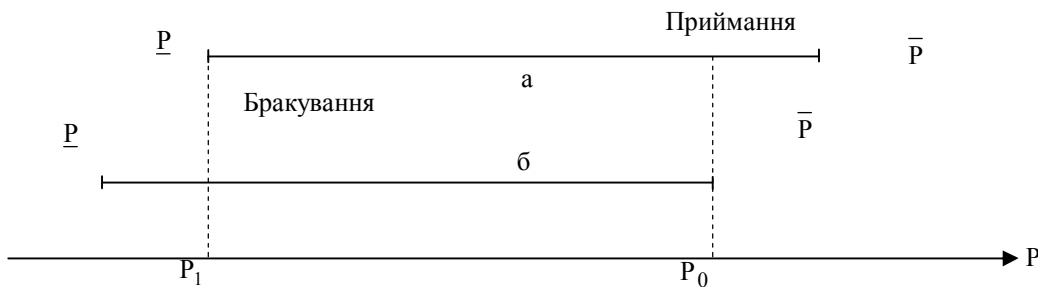


Рис. 1. Положення довірчих інтервалів і інтервалу невизначеності  $[P_1, P_0]$  за позитивним показником надійності типу імовірність  $P$  при прийнятті рішень про відповідність СТС БРЦЗ вимогам – а або невідповідності виробу вимогам – б

Потім визначають ризик споживача, що спостерігається  $\hat{\beta}$ , тобто умовну імовірність результату  $\hat{P}$ , що не гірше реально отриманого  $\tilde{P}$ , за умови, що дійсний показник надійності виробу відповідає рівню  $P_1$

$$\hat{\beta} = P\{\hat{P} \geq \tilde{P} | P=P_1\} = 1 - \gamma_2. \quad (13)$$

Якщо виконується умова (12), то виносять рішення про невідповідність і визначають ризик постачальника, що спостерігається, тобто умовну імовірність результату спостережень  $\hat{P}$ , що не краще реально отриманого  $\tilde{P}$ , за умови, що дійсний показник надійності виробу відповідає рівню  $P_0$

$$\hat{\alpha} = P\{\hat{P} \leq \tilde{P} | P=P_0\} = 1 - \gamma_1. \quad (14)$$

У кожному конкретному випадку при погодженій зміні  $\gamma_1$  й  $\gamma_2$  виконується одна й тільки одна з умов (11), (12).

При підборі значень  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  допускається нестроге суміщення меж заданого й довірчого інтервалів. Необхідно лише їхній зсув. При цьому формули (11) – (14) переходять у нерівності:

$$\text{при } \underline{P}_{\gamma_2}(\tilde{P}, n) \geq P_1 \text{ й } \bar{P}_{\gamma_1}(\tilde{P}, n) > P_0 \quad \hat{\beta} \leq 1 - \gamma_2;$$

$$\text{при } \bar{P}_{\gamma_1}(\tilde{P}, n) \leq P_0 \text{ й } \underline{P}_{\gamma_2}(\tilde{P}, n) < P_1 \quad \hat{\alpha} \leq 1 - \gamma_1.$$

Важливою перевагою контролю показників безвідмовності за ДМ, є можливість застосування критеріїв приймання й бракування при будь-яких обсягах е.с. (е.в.), а не тільки при зафіксованому (запланованому) обсязі  $n$ . Так, якщо при завершенні е.с. (е.в.) була виконана одна з умов (1), (2), то можна ухвалювати рішення щодо приймання або бракування з ризиком помилкового рішення не більше  $1 - \gamma_1$  або  $1 - \gamma_2$  при виконаному обсязі е.с. (е.в.)  $n$ . У зв'язку із цим контроль показників безвідмовності можна виконувати без попереднього планування обсягу е.в. або за результатами зафіксованих при ЕТС обсягу е.с. Для порівняння, при “класичному” одноступінчатому контролі, при завищеному обсязі випробувань, рішення з ризиком не більше заданого прийняти неможливо, а при недостатньому обсязі – можливе ухвалення рішення про бракування тільки в окремих випадках.

Роль планування при експлуатаційних випробуваннях зводиться до забезпечення при завершенні випробувань виконання однієї з умов (1) або (2). Якщо ж обсяги експлуатаційних випробувань не планувати, то до кінця випробувань може не виконатися жодна з них. У цьому випадку можна здійс-

нити корегування необхідної достовірності рішення  $(\alpha, \beta)$  або точності рішення  $(P_0, P_1)$ . При організації проведення е.в. СТС БРЦЗ зручніше змінювати величину ризиків  $\alpha$  і  $\beta$ . Якщо при завершенні експлуатаційних випробувань  $\underline{P} > P_1$  і  $\bar{P} < P_0$  (обсяг випробувань більше необхідного, інтервал  $[\underline{P}, \bar{P}]$  усередині інтервалу  $[P_1, P_0]$ ) ризики варто зменшити. Тоді довірчі імовірності  $\gamma_1$  й  $\gamma_2$  зростуть і ДМ “розсунуться”. Якщо  $\underline{P} < P_1$  й  $\bar{P} > P_0$  (обсяг випробувань недостатній, інтервал  $[\underline{P}, \bar{P}]$  “накриває” інтервал  $[P_1, P_0]$ ) ризики варто збільшити. При цьому завжди можна підібрати такі значення ризиків, щоб виконувалося одна з умов (1), (2). Тому що імовірність точного збігу  $\underline{P} = P_1$  й  $\bar{P} = P_0$  дорівнює нулю, то інтервал  $[\underline{P}, \bar{P}]$  зміщений відносно інтервалу  $[P_1, P_0]$ . Деяка зміна  $\alpha$  й  $\beta$  припустима за умови погодженого урахування зміни інтересів сторін.

Результати аналізу вирішальних правил використані при розробці алгоритму контролю ПБ ІБВ, наведеного на рис. 2.

Розроблений алгоритм використовує для приймання й бракування замість оціночного нормативу [4] межі довірчого інтервалу  $\underline{P}$ ,  $\bar{P}$ . Як міра помилковості рішень, прийнятих при контролі показника безвідмовності, запропоновано використовувати “ризики що спостерігаються” постачальника й споживача.

Тобто, ризик, постачальника (споживача), що спостерігається – це імовірність одержати на е.с. (е.в.) для виробів, що мають приймальний (бракувальний) рівень показника надійності, результат не краще (не гірше) того, котрий був зафіксований при е.с. (на проведених е.в.).

У теоретичному плані ці ризики відповідають відомому в математичній статистиці поняттю “рівня значимості, що спостерігається” [7, 8]. Використання ризиків, що спостерігаються, передбачено в стандарті [3]. Їх можна рекомендувати для використання при експлуатації СТС БРЦЗ за технічним станом.

На відміну від традиційних (запланованих) ризиків, які вибираються при плануванні випробувань, ризики, що спостерігаються, обчислюються по завершенню е.с. або е.в. за їхніми результатами.

Використання цих показників у розробленому комбінованому методі [2] і наведеному алгоритмі контролю (рис. 2) призводить до істотних змін у представленні про достатній обсяг експлуатаційних спостережень і (або) експлуатаційних випробувань.

## Висновки

Розроблений алгоритм контролю показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімк-

нення” використовує для приймання й бракування замість оціночного нормативу межі довірчого інтервалу  $\underline{P}_{\text{вкл}}$  й  $\bar{P}_{\text{вкл}}$ . Алгоритм рекомендується застосовувати при використанні даних експлуатаційних спостережень для уточнення достовірності ухваленого рішення після одноступінчатого контролю.

Метод, який реалізується в алгоритмі контролю, дозволяє обходитися без попереднього планування обсягу спостережень (експлуатаційних випробувань) шляхом адаптації методики оцінювання до фіксованого обсягу експлуатаційних спостережень. Його можна використовувати при суміщенні контрольних випробувань з визначальними випробуваннями, при яких оцінка довірчих меж є самостійним завданням.

Перераховані переваги цього методу контролю безвідмовності обумовлюють доцільність його використання при впровадженні в практику експлуатації СТС БРЦЗ за технічним станом.

## Список літератури

1. Ланецький Б.М. Аналіз методів оцінювання й контролю показників безвідмовності складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, що експлуатуються за технічним станом, і розробка рекомендацій з їхнього застосування / Б.М. Ланецький, В.В. Лук'яничук, А.А. Артеменко // Системи озброєння і військова техніка. – Х., 2016. – № 1 (45). – С. 163-167.
2. Ланецький Б.М. Розробка методу оцінювання показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення” складних технічних систем багаторазового циклічного застосування, що експлуатуються за технічним станом / Б.М. Ланецький, А.А. Артеменко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: наук. конф., 13 – 14 квітня 2016 р.: тези допов. – Х., 2016. – С. 114.
3. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 109 с.
4. 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.
5. Дзиркал Э.В. Статистический контроль с помощью доверительных границ при фиксированном объеме наблюдений / Э.В. Дзиркал // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. – 1982. – № 2. – С. 48-52.
6. Ланецкий Б.Н. Комплексное оценивание показателей безотказности и остаточной долговечности сложных технических систем, эксплуатируемых по техническому состоянию. Основные положения / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьяничук, А.А. Артеменко // Системи обробки інформації. – Х., 2016. – Вип. 2(139). – С. 40-43.
7. Коке Д. Теоретическая статистика / Д. Коке, Д. Хинкли, пер.с англ. под ред. Ю.К. Беляева. – М.: Мир, 1978. – 560 с.
8. Беляев Ю.К. Основы математической статистики / Ю.К. Беляев, Е.В. Чепурин. – М.: МГУ, 1982. – 362 с.

Надійшла до редколегії 3.03.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.О. Демідов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

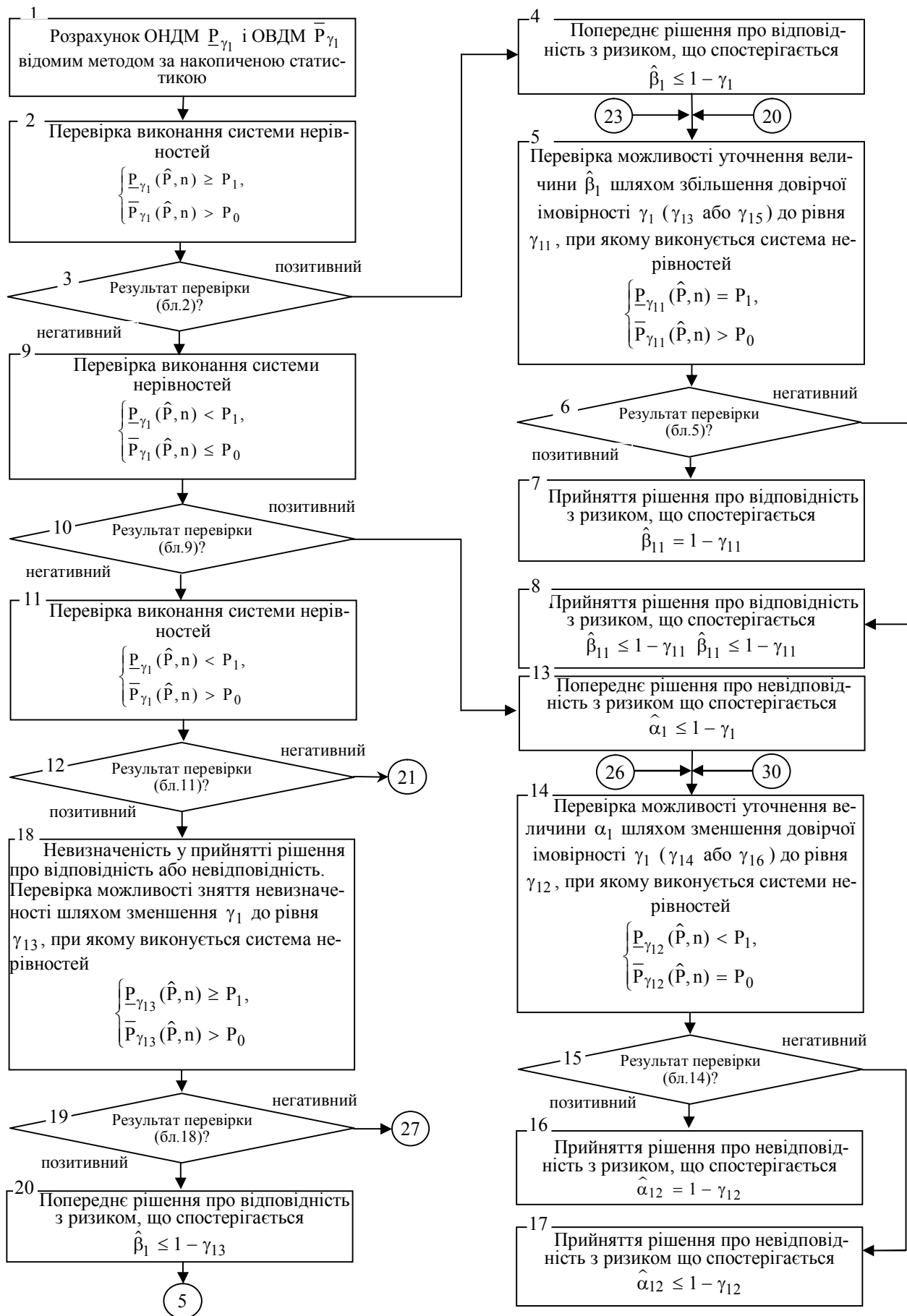


Рис. 2. Блок-схема алгоритму контролю показника безвідмовності "імовірність безвідмовного ввімкнення" СТС БРЦЗ

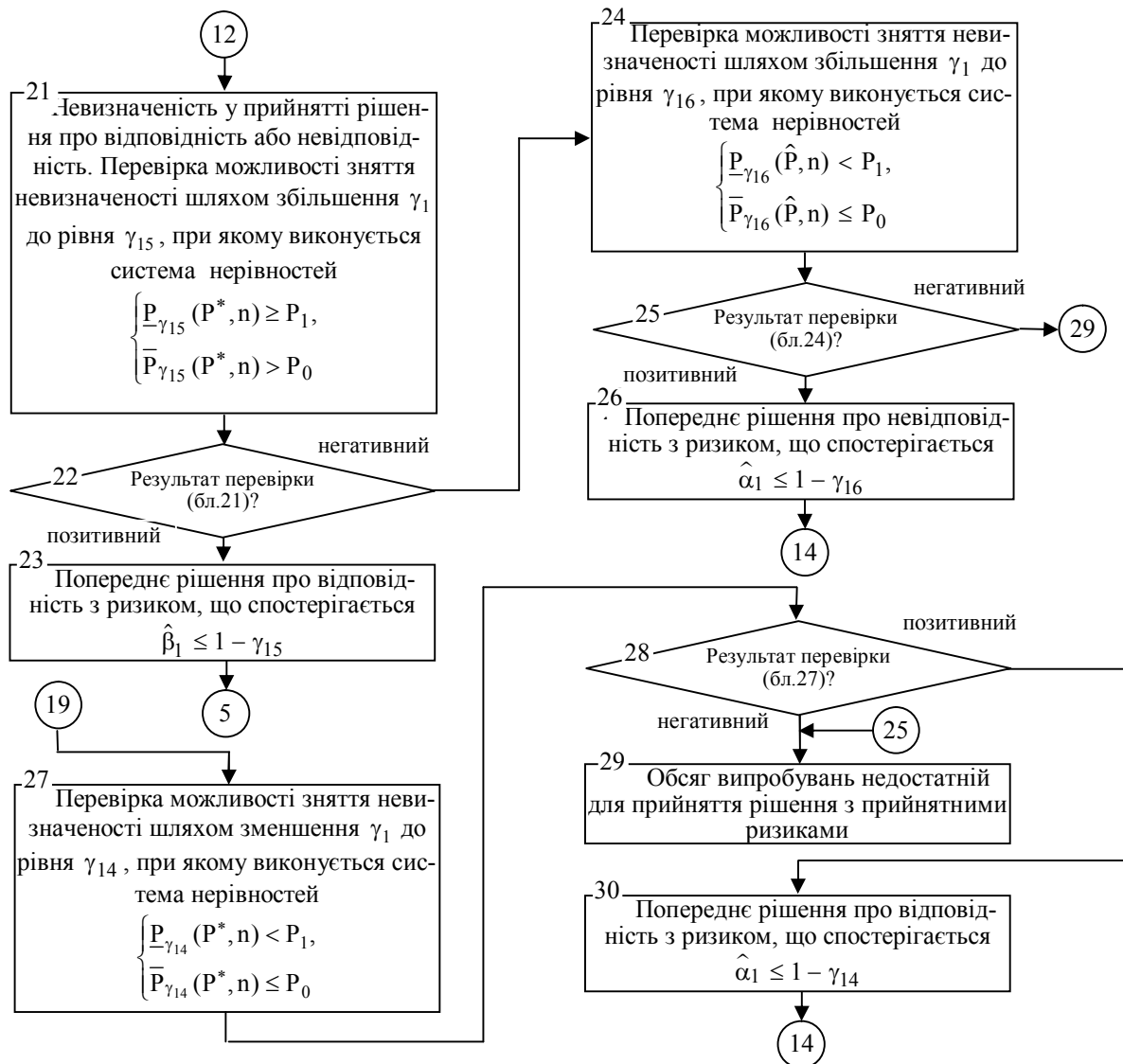


Рис. 2. Блок-схема алгоритму контролю показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення” СТС БРЦЗ (закінчення)

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ “ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ” СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНОГОКРАТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ, С ПОМОЩЬЮ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ**

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

Анализируются решающие правила метода контроля показателя безотказности “вероятность безотказного включения” при помощи доверительных границ применительно к сложным техническим системам многократного циклического применения. Результаты анализа использованы при разработке соответствующего алгоритма контроля, блок-схема которого приводится.

**Ключевые слова:** показатель безотказности “вероятность безотказного включения”, сложная техническая система многократного циклического применения, метод оценивания, контроль показателя при помощи доверительных границ.

**DEVELOPMENT CONTROL ALGORITHM OF RELIABILITY INDEX OF “PROBABILITY OF FAULTLES SWITCHING ON” OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF MULTIPLE CYCLIC APPLICATION THAT ARE OPERATED ON A TECHNICAL STATE, USING THE CONFIDENCE LIMITS**

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

The decision rules of method of control reliability index, “probability of faultles switching on” using the confidence limits that applied to complex technical systems of multiple cyclic applications is analyzes. The results are used to develop respective control algorithm, a block diagram of this algorithm is provided.

**Keywords:** reliability index, “the probability of faultles switching on”, complex technical systems of multiple cyclic applications, method of evaluation, control of index using the confidence limits.