

УДК 623.611

*Прібилєв Ю. Б., Пашков Д. П.*

## **ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

*Розглянуто екологічні наслідки експлуатації, технічного обслуговування та ремонту складних технічних систем військового призначення. Побудовано математичну модель функціонування складної технічної системи на прикладі комплексу зенітного ракетного озброєння, наведено показники ефективності.*

***Ключові слова:** складна технічна система, комплекс зенітного ракетного озброєння, система технічного обслуговування, показники ефективності.*

### **Вступ**

Проведення антитерористичної операції (АТО) в окремих районах Луганської та Донецької областей має негативні наслідки практично для всіх компонентів природного середовища в цьому регіоні. Внаслідок застосування великої кількості озброєння та військової техніки (ОВТ) на території проведення антитерористичної операції відбулося масштабне забруднення земель, поверхневих і підземних вод, порушення ландшафтів та знищення рослинності. Під час планування та ведення бойових дій турбота про довкілля перебуває, напевно, на останньому місці, але проведення ремонту й технічного обслуговування величезних скупчень техніки в зоні АТО також має небезпечні екологічні наслідки. Обладнання збірних пунктів пошкоджених машин, польових майстерень для ремонту ОВТ майже завжди збільшує ризики виникнення екологічних проблем. Побудова раціональної системи технічного обслуговування (СТО) ОВТ дає можливість зменшити витрати коштів, матеріально-технічних засобів, кількість задіяних у роботі СТО технічних засобів, що значно зменшить забруднення природного середовища в зоні проведення АТО.

Як засвідчує перебіг проведення АТО, загроза застосування Російською Федерацією авіаційних засобів ураження залишається високою. Вирішення завдань протиповітряної оборони (ППО) щодо прикриття військ та об'єктів від ударів повітряного противника забезпечується сучасними комплексами зенітного ракетного озброєння (КЗРО), які є прикладом складних технічних систем. КЗРО як складні технічні системи складаються з функціонально-незалежних систем з елементами різної природи (механічної, гідравлічної, електротехнічної, радіоелектронної), які разом зі СТО для їх обслуговування й будемо розглядати у статті.

Підтримка ОВТ на заданому рівні бойової готовності за скорочення економічних витрат на експлуатацію є найважливішим завданням, яке не вимагає додаткового обґрунтування. Вирішити це завдання можливо тільки побудувавши раціональну СТО, найбільше пристосовану до конструктивних особливостей апаратури та умов експлуатації КО. Побудова та дослідження математичних моделей функціонування КЗРО, розробка комбінованих стратегій ТО КЗРО дасть можливість точніше враховувати всю специфіку як конструктивного, так і експлуатаційного характеру та забезпечити відповідність між реальним технічним станом КЗРО й обсягом робіт з ТО, що також дасть можливість зменшити екологічне навантаження на природне середовище в зоні проведення АТО.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання екологічної небезпеки в зоні проведення АТО в окремих районах Луганської та Донецької областей розглянуто в [1]. Моделюванням процесу функціонування зразків ОВТ як складних технічних систем займалися багато авторів [2, 3]. Оптимальні за різними критеріями моделі СТО КЗРО побудовано здебільшого з використанням теорії масового обслуговування [4, 5].

**Мета статті** полягає в розробці математичної моделі функціонування КЗРО та комплексного показника ефективності функціонування КЗРО в процесі військової експлуатації.

### Викладення основного матеріалу

КЗРО, як і будь-яка складна технічна система, складається з багатьох взаємопов'язаних частин і характеризується різноманітними показниками. Як комплексний показник (критерій оцінки) ефективності функціонування КЗРО в процесі військової експлуатації, за величиною якого можна обґрунтувати необхідні параметри системи його ТО (період проведення, обсяг проведених профілактичних робіт, достовірність системи контролю технічного стану тощо), пропонується використовувати комплексний показник ефективності функціонування ( $k_{E\Phi}$ ), який визначають як добуток умовної ймовірності виконання бойового завдання ( $P_{BBZ}(P_{E\Phi})$ ) КЗРО і його апаратурної надійності ( $P_A$ ):

$$k_{E\Phi} = P_{BBZ}(P_{E\Phi}) \cdot P_A. \quad (1)$$

Для точнішого врахування складності структури КЗРО, у якому відмова окремих елементів і підсистем зазвичай не призводить до втрати працездатності всього комплексу, пропонується простір станів об'єкта розбити на підпростори, які відповідають різним рівням ефективності його функціонування  $P_{E\Phi_j}$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ . Так, наприклад, у [5] показано можливість детальнішого, ніж встановлена у даний час класифікація технічного стану об'єктів (справний (несправний), працездатний (непрацездатний), правильного (неправильного) функціонування), поділу станів КЗРО з виділенням проміжних станів зі зниженими рівнями якості функціонування за рахунок структурної, часової або інформаційної надмірності. При цьому коефіцієнт технічної ефективності КЗРО можна оцінити за співвідношенням:

$$k_{E\Phi} = \sum_{j=0}^{n-1} P_{BBZj}(P_{E\Phi_j}) \cdot P_{Aj}, \quad (2)$$

де  $P_{BBZj}(P_{E\Phi_j})$  – ймовірність виконання бойового завдання за умови, що ефективність бойового застосування КЗРО відповідає певному рівню;

$P_{Aj}$  – апаратурна надійність КЗРО за  $j$ -го рівня функціонування.

Складник запропонованого вище комплексного показника для оцінки ефективності функціонування КЗРО, а саме апаратурну надійність можна визначити за виразом:

$$P_{Aj} = \sum_{S=1}^m P_S \cdot P_{ASj}(t, t_{\sigma_s}), \quad j = \overline{0, 1-n}, \quad S = \overline{1, m}, \quad (3)$$

де  $P_S$  – стаціонарна ймовірність перебування об'єкта в  $S$ -му стані в момент оголошення готовності;

$P_{ASj}(t_{\sigma_s})$  – апаратурна надійність КЗРО за умови його перебування в  $S$ -му стані в момент оголошення готовності й переходу на  $j$ -й рівень функціонування до початку бойових стрільб у момент часу  $t$ .

Стационарний розподіл ймовірності перебування об'єкта в різних станах  $P_S$  залежить від параметрів прийнятої СТО та характеризує ефективність її функціонування. Під апаратурною надійністю  $P_{ASj}(t_{\bar{0}_3})$  розуміють імовірність того, що КЗРО в довільний момент часу, що перебуває в  $S$ -му стані, буде приведено в готовність до застосування з  $j$ -м рівнем функціонування за наявний час, і в разі виникнення відмови після приведення в готовність до моменту початку виконання бойового завдання  $t$  буде відновлений до  $j$ -го рівня функціонування і безвідмовно функціонуватиме протягом часу виконання завдання  $t_{\bar{0}_3}$ . Ймовірність  $P_{ASj}(t, t_{\bar{0}_3})$  може бути визначено за виразом [2]:

$$P_{ASj}(t, t_{\bar{0}_3}) = P_{PPSj}(t_H) \left[ P_j(t_{Oч} + t_{БЗ}) + \int_0^{t_{Oч}} P_j(t_{Oч} - t_{БЗ} - t_B) \omega_j t_B dt_B \right] + \sum_{i=1}^l \prod_{v=0}^{i-1} [1 - P_{PPSj}(t_H + v_{\Delta} t_{Oч})] \times P_{PPSj}(t_H + i\Delta t_{Oч}) \left[ P_j(t_{Oч} - i\Delta t_{Oч} + t_{БЗ}) + \int_0^{t_{Oч} - i\Delta t_{Oч}} P_j(t_{Oч} - i\Delta t_{Oч} + t_{БЗ} - t_B) \omega_j(t_B) dt_B \right], \quad (4)$$

де  $P_{PPSj}(t_H)$  – ймовірність приведення КЗРО в готовність до бойового застосування з  $j$ -м рівнем функціонування за нормативний час приведення  $t_H$  за умови його перебування у  $S$ -му стані в момент надходження заявки на бойове застосування;

$P_j(t_{Oч} + t_{БЗ})$  – ймовірність безвідмовного функціонування КЗРО за час очікування ( $t_{Oч}$ ) і час виконання бойового завдання ( $t_{БЗ}$ );

$P_j(t_{Oч} - t_{БЗ} - t_B) \omega_j t_B dt_B$  – ймовірність відновлення КЗРО до моменту  $t_B$  до  $j$ -го рівня функціонування та подальшого функціонування без відмов протягом часу  $t_{Oч} - t_{БЗ} - t_B$ ;

$$\sum_{i=1}^l \prod_{v=1}^i [1 - P_{PPSj}(t_H + v_{\Delta} t_{Oч})] \times P_{PPSj}(t_H + i\Delta t_{Oч}) \left[ P_j(t_{Oч} - i\Delta t_{Oч} + t_{БЗ}) + \int_0^{t_{Oч} - i\Delta t_{Oч}} P_j(t_{Oч} - i\Delta t_{Oч} + t_{БЗ} - t_B) \omega_j(t_B) dt_B \right] -$$

ймовірність того, що КЗРО не приведено в готовність до бойового застосування за час ( $t_H + v_{\Delta} t_{Oч}$ ), але буде приведено за час ( $t_H + i\Delta t_{Oч}$ ) та за час очікування, що залишився, відмовить і буде відновлений, далі з моменту останнього відновлення  $t_B$  до моменту ( $t_{Oч} - i\Delta t_{Oч} + t_{БЗ}$ ) функціонуватиме без відмов;

$\omega_j(t_B)$  – параметр потоку відновлень до  $j$ -го рівня функціонування;

$l$  – кількість інтервалів дискретизації  $t_{Oч}$ .

Оскільки КЗРО в момент ведення бойової роботи може перебувати тільки на одному з можливих рівнів  $j = 0, \overline{n-1}$ , що характеризують ефективність його функціонування з урахуванням надійності апаратури та обладнання, то при розрахунках коефіцієнта технічної ефективності функціонування використовують нормоване значення апаратурної надійності:

$$\tilde{P}_{AHj} = \frac{\sum_{S=1}^{mj} P_S P_{ASj}}{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{S=1}^{mj} P_S P_{ASj}}, \quad (5)$$

---

---

де  $\sum_{j=0}^{n-1} m_j$  – кількість можливих експлуатаційних станів КЗРО з урахуванням рівнів ефективності його функціонування;

$n$  – кількість виділених рівнів ефективності функціонування КЗРО;

$m_j$  – кількість виділених експлуатаційних станів КЗРО на  $j$ -му рівні ефективності функціонування.

При цьому вираз для розрахунку  $k_{E\Phi}$  набуває вигляду

$$k_{E\Phi} = \sum_{j=0}^{n-1} W_j \tilde{P}_{Aj}, \quad (6)$$

де  $W_j$  – коефіцієнт зниження ефективності функціонування КЗРО на  $j$ -му рівні.

Для кількісної оцінки стаціонарного розподілу ймовірностей КЗРО у  $S$ -х станах  $P_S$  потрібно розробити математичну модель функціонування КЗРО з урахуванням різних станів, в яких він може перебувати в процесі експлуатації, оцінити ймовірності приведення КЗРО в готовність до бойового застосування  $P_{\text{ГП}}(t_H)$  з довільного стану процесу експлуатації й параметр потоку відновлень  $\omega_j$ . Функціонування КЗРО, розгорнутого на бойовій позиції, характеризується наявністю об'єктивного процесу зміни технічного стану й суб'єктивного процесу технічної експлуатації, що являє собою послідовну за часом зміну різних станів. Аналіз процесу технічної експлуатації дає можливість виділити безліч можливих станів і переходів, необхідних для списання та побудови моделі функціонування КЗРО.

У цей час для оцінки готовності КЗРО до бойового застосування проводиться контроль функціонування (КФ), за результатами якого з помилками першого й другого роду приймають рішення. З метою підтримки необхідної ефективності функціонування з детермінованими періодичністю та об'ємом контрольно-регулювальних робіт проводять різного виду ТО. Для навчання особового складу й досягнення злагодженості роботи осіб бойового розрахунку КЗРО регулярно вмикається для проведення одноступеневих і багатоступеневих тренувань. Оскільки КЗРО має обмежену безвідмовність, у його апаратурі й обладнанні виникають дефекти, що є причиною несправностей і відмов, для усунення яких проводять поточний ремонт.

Тривалість відновлення працездатного стану є одним з головних параметрів СТО. Особливістю цільового призначення КЗРО є його постійна готовність до виконання бойових і навчально-бойових завдань. Знаходження ймовірності приведення КЗРО в готовність до бойового застосування  $P_{\text{ГП}}(t_H)$  багато в чому залежить від характеристик СТО.

СТО КЗРО складається з великої кількості різних елементів. Це й різноманітність об'єктів ТО: радіоелектронних, механічних, гідравлічних, електромеханічних тощо; і різноманітність засобів ТО (вбудовані та зовнішні вимірювальні прилади, інструменти, приладдя, засоби технологічного оснащення тощо), оператори різних професій і кваліфікації, які використовують різноманітну за формою і змістом технічну документацію (інструкції, описи, електричні схеми, операційні технологічні карти тощо), яка має єдину функціональну мету – підтримку працездатності або справності КЗРО у разі застосування їх за призначенням, очікування, зберігання й транспортування. Усі ці складові частини СТО КЗРО перебувають у складному функціональному взаємозв'язку. Тому можна визначити СТО КЗРО як складну систему, яка характеризується різноманітними показниками, обґрунтування вимог до яких дає можливість здійснити проектування такої СТО КЗРО, що допомагає забезпечити необхідний рівень ефективності функціонування КЗРО під час його експлуатації.

Враховуючи знання процесу функціонування КЗРО під час його експлуатації, виділимо стани, за перебування в яких передбачено переведення КЗРО в готовність до бойового

застосування, причому час переведення в готовність до бойового застосування для різних станів процесу технічної експлуатації істотно відрізняється. Для точнішого обліку складності структури КЗРО, в яких відмова окремих елементів і підсистем зазвичай не призводить до вилучення бойового застосування КЗРО, безліч усіх станів розіб'ємо на підмножини, які відповідають різним рівням ефективності його функціонування.

Граф переходів КЗРО зі стану в стан зображено на рисунку 1. Стани, в яких може перебувати КЗРО, представлено парою індексів  $(i, j)$ .

- Стан  $(1, j)$  означає, що КЗРО вимкнений;
- стан  $(2, j)$  – на КЗРО проводять плановий КФ;
- стан  $(3, j)$  – на КЗРО виконують поточний ремонт;
- стан  $(4, j)$  – КЗРО веде бойову роботу;
- стан  $(5, j)$  – на КЗРО проводять щотижневе ТО;
- стан  $(6, j)$  – на КЗРО проводять п'ятитижневе ТО;
- стан  $(i, 0)$  – КЗРО працездатний;
- стан  $(i, 1)$  – КЗРО частково працездатний;
- стан  $(i, 2)$  – комплекс непрацездатний.

Переходи з усіх станів, для яких  $j = 0$ , стани, відповідні  $j = 1$  і  $j = 2$ , обумовлюються виникненням проблеми та перешкоди (дефектів), які не виключають бойове застосування і відмов (дефектів), які виключають бойового застосування КЗРО відповідно. Зворотні переходи визначаються відновленням працездатного стану КЗРО в процесі поточного ремонту.

Передбачено, що під час приведення ТО проводять контроль працездатності, що дозволяє з помилками першого (ймовірність «помилкової відмови») й другого (ймовірність «незнайдені відмови») роду оцінити технічний стан КЗРО. Достовірність системи пошуку й локалізації дефекту в процесі проведення поточного ремонту характеризується помилками  $\alpha_q$  та  $\beta_q$ . Відновлення працездатного стану КЗРО може проводитися як у стані «поточного ремонту», так і в стані ТО.

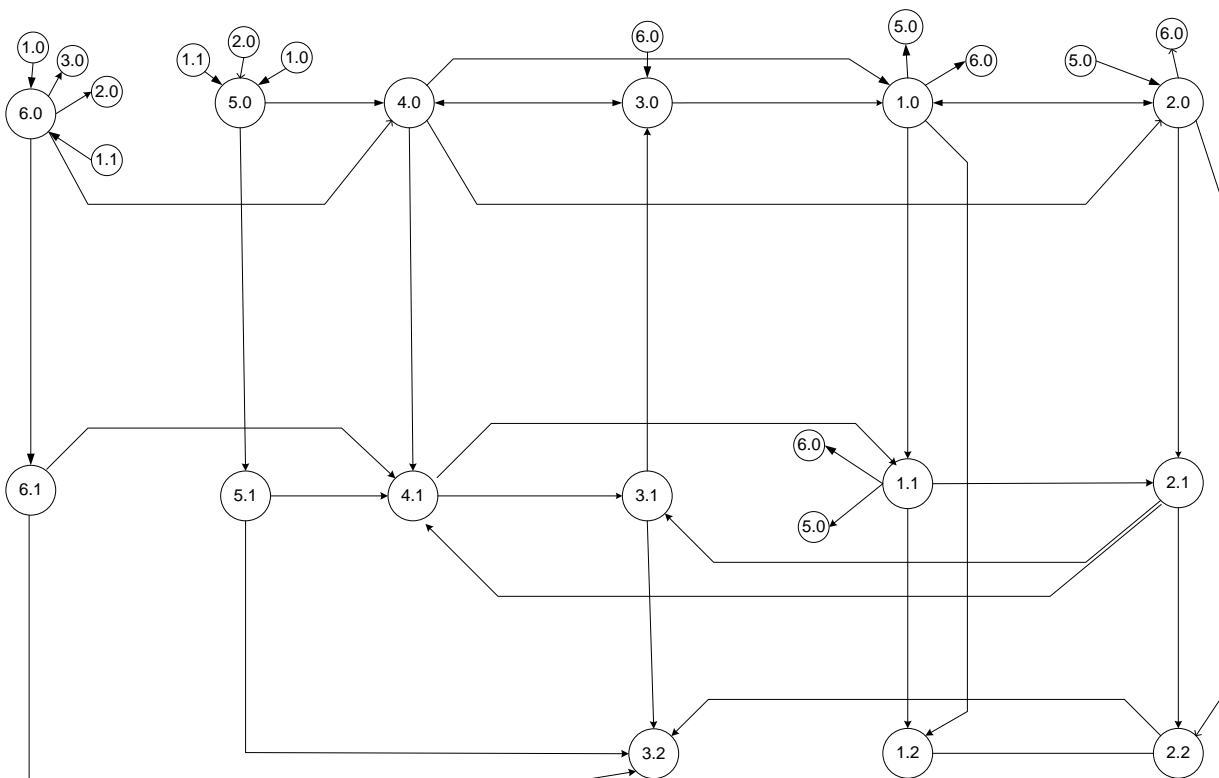


Рис. 1. Граф переходу станів комплексу зенітного ракетного озброєння

Під час розроблення математичної моделі функціонування КЗРО в процесі експлуатації, що розгорнутий на бойовій позиції, прийнято наступні допущення, що не суперечать практиці.

1. Безвідмовність засобів ТО значно вище безвідмовності апаратури КЗРО, тому її впливом на ефективність ТО можна знехтувати.

2. Вхідний потік заявок на бойове застосування КЗРО найпростіший.

3. У зв'язку з тим що час переведення КЗРО з чергового режиму в готовність до бойового застосування порівняно з часом бойового застосування незначний, під станом «бойова робота» розумітимемо як бойовий, так черговий режим.

4. Випадковий час між відмовами апаратури й відновленням КЗРО розподілено за експонентним законом. Правомочність такого припущення обґрунтовано в роботах [2, 3].

5. Зазвичай коефіцієнт навантаження апаратури обладнання КЗРО практично не залежить від режимів його функціонування, тому будемо враховувати лише відмінності в інтенсивності відмов тільки між вимкненим і ввімкненим станом. Як показано у [6, 7], досить повний облік характерних особливостей переходів КЗРО по можливих станах у процесі його технічної експлуатації забезпечується застосуванням напівмарковської апроксимації досліджуваного процесу.

Зробимо оцінку стаціонарної ймовірності перебування КЗРО в  $i$ -му стані. Для знаходження цих ймовірностей зазвичай як вихідну інформацію використовують інформацію про перехідні ймовірності вкладеного марковського ланцюга (елементи матриці  $W = \{\omega_{ij}(t)\}$ ) і умовних функціях розподілу часу перебування в  $i$ -му стані до переходу в  $j$ -й (елементи матриці  $F = \{F_{ij}(t)\}$ ). Однак досить точними даними у вигляді всіх законів розподілу часу перебування КЗРО в різних станах, за винятком деяких, ми не володіємо. Водночас за отриманими в процесі експлуатації даними можна дати досить точну оцінку умовних математичних сподівань часу перебування КЗРО в  $i$ -му стані до переходу в  $j$ -й ( $m_{ij}$ ).

У цьому разі процедура обчислення стаціонарних ймовірностей зводиться до наступних нескладних обчислень. Спочатку, розв'язуючи системи лінійних рівнянь  $P = FW$ , визначають ймовірності перебування КЗРО в  $i$ -му стані для вкладеного марковського ланцюга  $P_i$ . Далі за співвідношенням

$$m_i = \sum_j \omega_{ij} m_{ij} \quad (7)$$

розраховують значення безумовних математичних очікувань часу перебування напівмарковських процесів в  $i$ -му стані. Шукані ймовірності  $P_i$  оцінюють за виразом:

$$P_i = P_{K\Phi} m_i \left[ \sum P_{K\Phi} m_i \right]^{-1}. \quad (8)$$

### Висновок

Отже, у статті розроблено математичну модель функціонування складної технічної системи на прикладі КЗРО та запропоновано показник ефективності функціонування КЗРО, що дає можливість обґрунтувати вимоги до СТО КЗРО та визначити структуру, параметри й організацію реальної СТО КЗРО. Знайдені співвідношення дають можливість оцінити ймовірність станів, у яких може перебувати КЗРО під час експлуатації й ТО.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Бондар О. І. Системний аналіз екологічної небезпеки у зоні проведення антитерористичної операції на сході України: біосферні конфлікти та транскордонне забруднення / О. І. Бондар, О. А. Машков, С. Т. Абідов // Екологічні науки: Науково-практичний журнал. – К.: ДЕА, 2015.– №9. – С. 5–27.

- 
- 
2. Байхальт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхальт, П. Франкен. Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392с.
  3. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. – М.: Высш. шк., 1982. – 230 с.
  4. Пермяков О. Ю. Моделирование системы диагностирования та ремонту зенітних ракетних комплексів за допомогою замкнутої системи масового обслуговування [Текст] / О. Ю. Пермяков, Ю. Б. Прибілев, П. В. Опенько, І. В. Новікова // Науково-практичний журнал «Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони». – К.: Національний університет оборони України ім. І. Черняховського. – Вип. №3(24), 2015. – С. 88 – 93.
  5. Прибілев Ю. Б. Модель системи ремонту та відновлення озброєння та військової техніки із застосуванням апарату систем масового обслуговування з нечіткими правилами обслуговування черги [Текст] / Ю. Б. Прибілев // Збірник наукових праць «Праці університету». – К.: Національний університет оборони України ім. І. Черняховського. – Вип. №5(132), 2015. – С. 144– 152.
  6. Риордан Д. Ж. Вероятностные системы обслуживания / Пер. с англ. – М.: Связь, 1966. – 184 с.
  7. Петухов С. А. Прикладные вопросы теории массового обслуживания / С. А. Петухов, О. А. Новиков. – М.: Сов. радио, 1969. – 399 с.

## ENVIRONMENTAL ASPECTS OF OPERATION, MAINTENANCE AND REPAIR OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

**Pribylev Y., Pashkov D.**

*The environmental impact of the operation, maintenance and repair of complex technical systems for military use are considered. A mathematical model of complex technical systems on the example of anti-aircraft missile is described.*

**Keywords:** *complex technical system, anti-aircraft missile system, maintenance performance.*

УДК 354.5

**Барабаш О. В., Пашков Д. П., Горський О. М.**

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ КРИТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ

*Розглянуто питання методології забезпечення функціональної стійкості складних систем. Показано, що в умовах застосування систем з різним рівнем складності структурної організації функціональна стійкість визначатиметься з обов'язковою стратифікацією вимог за рівнями ієрархії системи. Показано визначення критерію оцінки функціональної стійкості критичної інформаційної системи, заснованого на регламентації логіки взаємодії функціональних елементів і підсистем.*

**Ключові слова:** *інформаційна система, функціональна стійкість, рівень ієрархії.*

**Постановка проблеми.** У результаті повсюдної інформатизації критичні функції управління передаються під контроль автоматизованих систем (АС). Цей процес породжує проблему забезпечення функціональної стійкості (ФС) складних ергатичних систем, що використовують гібридні людино-машинні технології обробки інформації. Особливо актуальною проблема ФС є для автоматизованих інформаційних систем, що забезпечують функціонування критичних систем управління (КСУ), таких як системи управління