

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПЛАНЕРА ПОВІТРЯНОГО СУДНА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ РАНГІВ ПОШКОДЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І РЕМОНТУ

*Пропонується прогнозування змін технічного стану планерів повітряних суден здійснювати на основі результатів дослідження рангів пошкодження конструкції. Ранги пошкодження характеризують міцність силових елементів і визначаються шляхом застосування експертних оцінок до бази даних експлуатації і ремонту. Логіко-статистична обробка рангів пошкодження дозволяє виконати моделювання траєкторій прогнозованих змін технічного стану і передбачає комплексне поєднання детермінованої та ймовірностної складових значень рангів. Наведено приклад обробки інформаційних образів прогнозованого технічного стану повітряних суден.*

*Ключові слова:* ранг пошкодження; прогнозування; планер повітряного судна.

### Вступ

При експлуатації парку старіючих повітряних суден (ПС) виникає науково-технічна проблема підтримання справності та забезпечення експлуатаційної міцності силових елементів (СЕ) планерів ПС. Для вирішення цієї проблеми необхідно визначити оптимальний перелік заходів щодо відновлення технічного стану СЕ на основі використання результатів оцінки ступеню пошкодження конструкції ПС.

Математичні моделі оцінки ступеню пошкодження та прогнозування змін технічного стану повинні використовувати особливості даних, які не могли бути передбачені розробником ПС і виникають під час експлуатації та ремонту ПС.

Наявність різноманітних умов експлуатації ПС та обмеженого обсягу даних приводить до необхідності використання методів їх інтелектуального аналізу в процесі обробки, що дозволяє більш обґрунтовано визначати поточний стан та тенденції прогнозованих змін надійності СЕ. Подібний підхід до вирішення проблем побудови складних виробничих систем досліджено в [1].

### Постановка завдання

Прийняття рішень прогнозування експлуатаційної міцності СЕ конструкції планера ПС відбувається в системі управління процесом експлуатації ПС, яка відноситься до адаптивних ергатичних складних систем управління [2].

Для прийняття обґрунтованих рішень математична модель обробки інформаційних потоків

в системі управління процесом експлуатації ПС передбачає в якості показника технічного стану, що опосередковано характеризує надійність СЕ, застосування рангів пошкодження  $R_{CE}$ , які вказують на можливу ймовірність часткового або повного руйнування СЕ. Ранг пошкодження  $R_{CE}$  дозволяє провести порівняльний аналіз однотипних СЕ за критерієм ступеню втрати несучої здатності СЕ за час  $t_k$  експлуатації або нальоту  $t_p$ .

Розрахунки рангу пошкодження  $R_{CE}$  необхідно виконувати на основі вектора  $\vec{SE}$ , координати якого створено за допомогою вектора параметрів діагностики  $\vec{P}_D = \{pd_k\}$ ,  $k = \overline{1, q}$ , де  $q$  – кількість параметрів діагностики. Координати вектора  $\vec{SE}$  зважено оцінками  $E_k$  експертів [3]:

$$\vec{SE} = (E_1 pd_1, E_2 pd_2, \dots, E_q pd_q). \quad (1)$$

Коефіцієнти  $E_k$  ( $k = \overline{1, q}$ ) характеризують ступінь впливу окремих часткових складових виразу (1) при обчисленні загального накопичення пошкоджень в СЕ. В якості експертів залучають фахівців наукових установ, авіаційних підприємств та організацій, інженерно-авіаційної служби.

Процес змін технічного стану СЕ при прогнозуванні доцільно представити в вигляді стохастичного процесу, що управляється в дискретному режимі [4]. При цьому зміни технічного стану СЕ описуються випадковою послідовністю рангів  $R_{CE}(t_i)$ , де  $t_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  – дискретні моменти прийняття рішень управління;  $U = \{u_j\}$ ,  $j = \overline{1, r}$  – простір управлінь,  $u_j(t_n) \in U$  – управління, яке реалізується в момент  $t_n$ .

Послідовність впорядкованих правил визначає стратегію управління  $W = (u_l), l = \overline{1, m}$  протягом послідовності  $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$  дискретних моментів прийняття рішень. Для пошуку оптимальної стратегії управління  $W_{opt}$  необхідно визначити математичну модель СЕ як об'єкта експлуатації, характеристики зовнішнього середовища (умов експлуатації), задати критерії оптимізації процесу управління та виконати логіко-статистичну обробку бази даних.

### Загальні положення оцінки технічного стану планера повітряних суден

На рисунку 1 показано структуру моделі управління при прогнозуванні.

Динаміка стохастичного процесу описується на основі отримання множини параметрів вектора  $\vec{SE}$ , який описує технічний стан СЕ, і правилом вибору управління  $u_j$  із деякої сукупності правил  $U = \{u_j\}$ .

При цьому рівняння змін технічного стану має вигляд

$$SE(t_{n+1}) = f(SE(t_n), u_j(t_n)). \quad (2)$$

Перелік параметрів діагностики  $pd_k$  визначається конструктивними особливостями СЕ, що дозволяють отримати наявність пошкодження на поверхні СЕ відносно конструктивних концентраторів напруги, розмірами  $S$  і розташуванням  $L_s$  пошкодження.

Крім цього, до складових вектора  $\vec{SE}$  входять формулярні значення ресурсних показників нальоту  $t_p$  та строку служби  $t_k$ .

Можливо використання інших додаткових параметрів в якості складових вектора  $\vec{SE}$ . Наприклад, інтенсивність появи тріщин  $\lambda_{TP}$  і точок корозії  $\lambda_{KP}$  на внутрішніх та зовнішніх поверхнях СЕ; відносна кількість  $\phi_\infty$  відхилень точок нівеліровок від заданих значень та інше.

Логіко-статистична обробка бази даних експлуатації та ремонту ПС передбачає створення мат-

риці  $PE$  пошкоджених СЕ. Кількість строк матриці  $PE$  дорівнює кількості типів  $L$  пошкоджених СЕ. Кількість стовпчиків  $N$  відповідає кількості ПС.

$$PE = \begin{pmatrix} SE_{11} & SE_{12} & \dots & SE_{1N} \\ SE_{21} & SE_{22} & \dots & SE_{2N} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ SE_{L1} & SE_{L2} & \dots & SE_{LN} \end{pmatrix}$$

Моделювання змін рангів технічного стану СЕ згідно залежності (1) дозволяє визначити перелік стратегій змін рангів пошкодження та провести розпізнавання – до якого образу технічного стану необхідно віднести СЕ. Мінімальну кількість образів встановлюють в свою чергу наступні образи [5]:

$\omega_1$  – коли не слід очікувати відмови СЕ протягом інтервалу прогнозу;

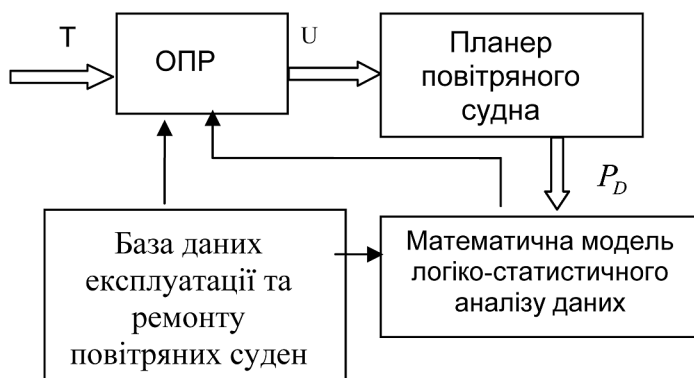
$\omega_2$  – кінцева точка інтервалу прогнозу ранга практично співпадає з обмеженнями, які визначено для рангів пошкодження з умов безпеки польотів;

$\omega_3$  – ранг пошкодження перевищує дозволене значення на інтервалі прогнозу.

### Особливості прогнозування змін технічного стану планера повітряних суден

Визначення оптимальної стратегії управління  $W_{opt}$  потребує встановлення ймовірнісного розподілу траєкторій змін рангів  $R_{CE}$  поміж образами  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ . Для цього передбачено проведення статистичного моделювання згідно залежностей (1), (2). Початкові дані для моделювання отримуються на основі логіко-статистичного аналізу бази даних експлуатації та ремонту, в результаті якого здійснюється комплексне поєднання детермінованого та ймовірнісного підходів при побудові математичних моделей.

Детермінований підхід реалізується шляхом використання даних діагностики поточного і попереднього технічного стану СЕ для визначення рангів  $R_{CE}$  пошкодження СЕ. Досвід експертів щодо



ОПР – особа, що приймає рішення та реалізує вибір варіанта управління  $U = \{u_1, \dots, u_r\}$

$T = \{t_1, \dots, t_n\}$  - множина часу контролю технічного стану ПС

$P_D = \{pd_1, \dots, pd_q\}$  - множина параметрів технічного стану планера ПС

Рис. 1. Структура моделі управління динамічною системою процесу експлуатації планера повітряного судна

експлуатації СЕ безпосередньо впливає на координати початкової точки траєкторії прогнозу технічного стану при реалізації співвідношення (2).

Ймовірнісний підхід в математичній моделі прогнозних оцінок змін рангів  $R_{CE}$  передбачає використання методів кластерного аналізу параметрів напрацювання по ресурсу та строку служби, а також регресійного аналізу змін цих параметрів для парку ПС [5].

Прогноз рангу  $R_{CE}$  пошкодження СЕ, як випадкового процесу  $r(t)$ , складається з двох частин  $r(t) = r_1(t) + r_2(t)$ , кожна з яких є випадковою величиною. Першу складову  $r_1(t)$  створюють результати кластерного та регресійного аналізу, друга складова  $r_2(t)$  описує невизначеність обмеженого обсягу бази даних і отримується як результат статистичного моделювання при умові рівномірного ймовірнісного розподілу траєкторій змін рангів  $R_{CE}$ .

На рисунку 2, а показано для парку умовних ПС розподіл на кластери та визначення рангів на лінії прогнозу. Як приклад впливу на ранг пошкодження особливостей умов експлуатації ПС показано, що для одного з ПС кластеру К1, який має менший наліт в порівнянні з ПС кластеру К2, може мати місце випадок наявності більшого рангу пошкоджень  $R_{CE}$ .

На рисунку 2, б показано результати моделювання лінії прогнозу, яка складається з двох окремих ліній. Перша лінія визначається як сума  $r_1(t)$  та  $r_2(t)$ , друга лінія – тільки зміною  $r_2(t)$ . Вказана особливість відсутності  $r_1(t)$  для другої лінії пояснюється належністю лінії до кластеру КТ, де відсутні ПС і, відповідно, відсутні результати кластерного і регресійного аналізу бази даних.

Дослідження експлуатаційної міцності конкретного СЕ передбачає порівняльний аналіз ступеню

пошкодження цього СЕ з іншими СЕ, які перебували в різних умовах експлуатації ПС. При цьому визначається СЕ з максимальним ступенем пошкоженості, що і є підставою для прийняття рішень стосовно залишкової експлуатаційної міцності СЕ.

Проведення порівняльного аналізу технічного стану СЕ потребує розробки математичної моделі визначення лінійного порядку ступеню пошкоженості поміж СЕ парку ПС. В формалізованому вигляді модель встановлює наявність лінійного порядку, якщо виконується співвідношення [6]:

$$\forall a_i, a_j : (a_i B a_j \vee a_j B a_i), \quad (3)$$

де  $a_i \in A, i = \overline{1, l}, l$  – кількість СЕ, які необхідно порівняти поміж собою;  $B$  – бінарне відношення переваги рангів пошкодження поміж СЕ («менше», «приблизно однакове», «більше»).

Експерти при оцінці і прогнозуванні ступеню пошкодження СЕ формують узагальнену оцінку технічного стану в значеннях шкали рангів, а не в значеннях ймовірностей руйнування СЕ, як прийнято для моделей розробника ПС.

Так як ранговий порядок СЕ не змінюється при перетворенні від багатовимірної шкали значень параметрів векторів (2) до одновимірної шкали рангів, якою користуються експерти, то можливо використання значення максимального рангу  $R_{CE}^{MAX}$ .

При прогнозуванні змін технічного стану СЕ необхідно передбачати дотримання умов безпеки польотів:

$$R_{CE}(t) \leq R_{ЗАД} = R_{CE}^{MAX}. \quad (5)$$

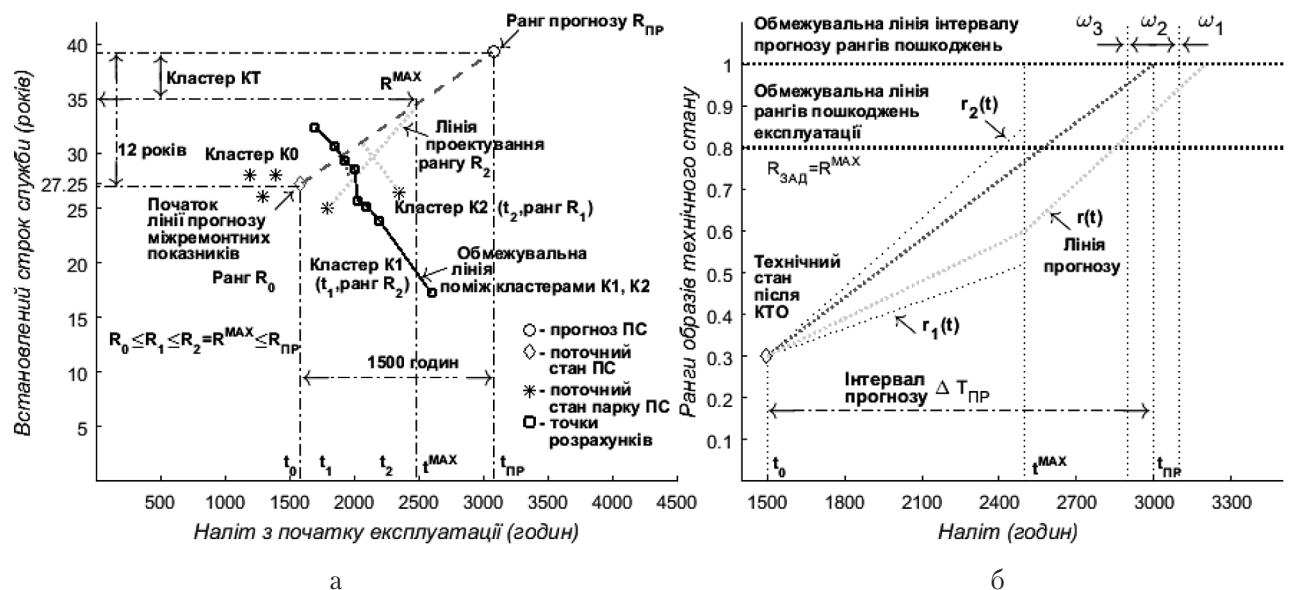


Рис. 2. а) результати кластерного аналізу парку умовних ПС; б) моделювання траєкторій змін рангів пошкодження

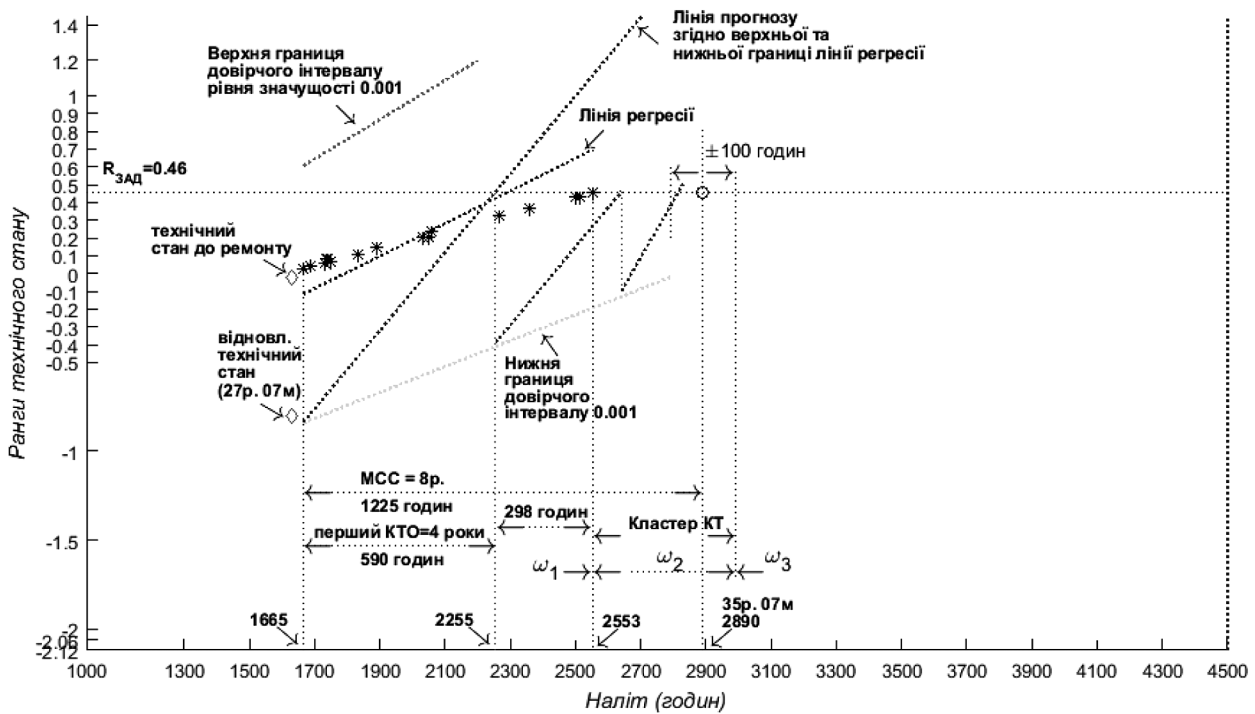


Рис. 3. Прогноз траєкторії змін рангів технічного стану літака Л-39С

На рисунку 2, б показано обмежувальну лінію, яка встановлюється за результатами обробки даних діагностики і яку при прогнозі перетинати недоцільно за умови (5) забезпечення безпеки польотів.

Перевірку дотримання умов безпеки польотів (5) можливо здійснювати шляхом застосування беєсівського критерія теорії статистичних рішень при розпізнаванні до якого образу з множини  $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  відноситься поточний технічний стан СЕ.

Для обчислення рангу  $R_{CE}$  в матриці  $PE$  вибирається строка, що містить дані пошкоджень СЕ необхідного типу, та створюється матриця  $ME$  розміром  $(N+1) \times (N+1)$  елементів. Значення  $N$  дорівнює кількості парку ПС, до якого додано ще одне ПС, яке досліджується при прогнозі.

Кожний елемент матриці  $ME$  характеризує відстань  $d_{ij}$  між СЕ вибраного типу ( $ij = 1, \dots, N+1$ ). Відстань  $d_{ij}$  обчислюється в багатовимірному евклідовому просторі, координати точок в якому зважено коефіцієнтами  $E_k$  згідно співвідношення (2):

$$d_{ij} = \sqrt{E_1(pd_i - pd_j)^2 + \dots + E_q(pd_i - pd_j)^2}. \quad (6)$$

Застосування до елементів матриці  $ME$  методів багатовимірному шкалювання дозволяє перейти до одновимірному простору та отримати значення рангу  $R_{CE}$  яке використовується при кластерному аналізі для визначення ПС-лідерів відносно досліджуемого ПС.

### Результати моделювання

Для перевірки математичної моделі на прикладі літака типу Л-39С, який надійшов до ремонту з умовним нальотом 1665 годин і строком експлуатації 27 років 07 місяців, здійснено прогнозування можливості встановлення міжремонтних показників: міжремонтного нальоту  $1225 \pm 100$  годин та строку 8 років.

Використання функцій `pdist`, `midscale`, `regress` програмного пакету MATLAB дозволило виконати розрахунки рангів методом багатовимірному шкалювання і отримати відповідні регресійні залежності відносно умовного парку ПС типу Л-39С в кількості п'ятнадцять одиниць.

Лінію прогнозу рангів технічного стану складають окремі відрізки ліній, як лінії з максимальним кутовим коефіцієнтом в межах ліній верхньої та нижньої границь довірчого інтервалу (рівень значущості 0.001 коефіцієнтів лінії регресії). Відрізок лінії прогнозу впродовж інтервалу кластера КТ отримано статистичним моделюванням.

Точки перетину лінії прогнозу з обмежувальною лінією, що встановлює забезпечення умов безпеки польотів (5), визначають прогнозовану раціональну стратегію технічної експлуатації літака, якою передбачається комплексне поєднання процесу виконання робіт згідно діючої нормативної документації з переліком додаткових робіт під час контрольних оглядів.

Результати моделювання дозволяють вибрати і рекомендувати строк та кількість проведення

контрольних оглядів протягом встановленого між-ремонтного строку та ресурсу.

Траєкторію прогнозованих змін рангів  $R_{CE}(t)$  для літака типу Л-39С показано на рисунку 3.

Аналіз даних моделювання вказує, що після ремонту доцільно планувати перший контрольний огляд літака Л-39С по завершенні чотирьох років експлуатації.

Другий контрольний огляд доцільно планувати по завершенні 2-х років 06 місяців після проведення 1-го огляду.

### Висновок

Запропонована математична модель обробки даних експлуатації та ремонту дозволяє визначити раціональну стратегію технічної експлуатації повітряних суден та спрогнозувати необхідну кількість контрольно-технічних оглядів, які доцільно провести в експлуатації до досягнення межі ресурсних показників для підтримання міцності конструкції планера повітряного судна.

### Література

- [1] Снитюк В. Е. Эволюционные технологии принятия решений в условиях неопределенности.– К.: «МП Леся», 2015.– 347 с.
- [2] Большие технические системы: проектирование и управление/Л. М. Артюшин, Ю. К. Зиятдинов, И. А. Попов, А. В. Харченко. Под ред. И. А. Попова.– Харьков: Факт, 1997.– 400 с.
- [3] Карпінос Б. С., Горохов Г. Т. Прогнозування залишкової довговічності елементів планера повітряних суден з урахуванням експертних оцінок умов експлуатації / Зб. наук. праць ДНДІА.– К., 2016.– Вип. 12(19).
- [4] Буравлев А. И., Доценко Б. И., Казаков И. Е. Управление техническим состоянием динамических систем.– М.: Машиностроение, 1995.– 375 с.
- [5] Бологін А. С., Горохов Г. Т. Особливості прогнозування змін встановлених показників планерів повітряних суден / Технологические системы.– К., 2016.– 1(74). С. 13–18. [http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts74\\_2.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts74_2.pdf)
- [6] Волошин О. Ф., Гнатієнко Г. М., Кудін В. І. Послідовний аналіз варіантів: Технології застосування: Монографія.– К.: Стилос, 2013.– 304 с.

*Bologin A. S., Gorokhov G. T.*

The State Scientific Research Institute of Aviation. Ukraine, Kiev

### FORECASTING CHANGES IN TECHNICAL STATE OF THE AIRFRAME AIRCRAFT ON THE BASIS OF THE ANALYSIS GRADES DAMAGE ACCORDING TO OPERATION AND REPAIR

*It is proposed to predict the changes of the technical condition of the airframe to determine on the basis studies of the ranks structural damage. The grades of damage to characterize the strength and power elements are determined by use of expert estimates to a database of maintenance and repair. Logical-statistical processing of the grades damage allows to perform simulations trajectories predicted changes of the technical condition and provides for the integration of deterministic and probabilistic components of the values ranks. An example of processing information images predicted technical state aircraft.*

*Keywords:* rank damage; forecasting; airframe aircraft.

### References

- [1] Snituk W. E. Evolutionary technology decision-making in conditions of uncertainty.– К.: «MP Lesja», 2015.– 347 с.
- [2] The large technical systems: design and management / L. M. Artjushin, U. K. Ziatdinov, I. A. Popov, A. W. Kharchenko.– Kharkov: Fakt, 1997.– 400 p.
- [3] Karpinos B. S., Gorokhov G. T. Forecasting of residual durability elements airframe aircraft taking into account expert estimations of conditions operation // Collection scientific works of State Research Institute of aviation.– К., 2016.– 12(19).
- [4] Buravlev A. I., Docenko B. I., Kazakov I. E. Management of a technical condition of dynamic systems.– М.: Mashinostroenie, 1995.– 375 p.
- [5] Bologin A. S., Gorokhov G. T. Forecasting of changes the installed performance of airframe / Technological systems.– К., 2016.– 1(74). P. 13–18. [http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts74\\_2.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts74_2.pdf)
- [6] Woloshin O. F., Gnatienco G. M., Kudin W. I. The consecutive analysis of variants: Technologies of application. The Monography.– К.: Stilos, 2013.– 304 p.