

УДК 330.4.001

О.В. Гуляк, Б.О. Дем'янчук, В.М. Косарєв

МАРКІВСЬКА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ І АДАПТИВНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Запропоновано модель складної системи, процес функціонування якої відповідає дискретному марківському процесу, для оцінки і стохастичного адаптивного відновлення працездатності системи за критерієм максимуму перевищення ймовірності перебування її у стадії функціонування над ймовірністю перебування її стадії відновлення через відмови або пошкодження ззовні.

Ключові слова: *дискретний марківський процес, ймовірності станів складної системи, стохастичний вибір варіанта відновлення з альтернативних, достовірність реалізації варіанта відновлення складної системи.*

Актуальність проблеми. Науково-технічний аналіз ефективності функціонування будь-якої складної системи, ступеня досягнення мети дій системи та якості виконання її завдань, наприклад, забезпечення дій ієрархічної системи більш високого рівня, є достатньо складним. Відомі наукові рекомендації для послідовного і обґрунтованого вирішення подібного завдання, на жаль, зустрічаються нечасто. Винятком є публікації [1–3].

Однак безліч факторів, що впливають на результати функціонування складної системи, які не тільки погано пов'язані, але і супроводжуються невизначеністю випадкового, природного і антагоністичного характеру, не враховувати на практиці неможливо.

Тому існуючі потреби кількісно обґрунтованого вирішення окресленого завдання та відсутність прийнятних теоретичних рекомендацій для його вирішення підкреслюють актуальність теми цього дослідження.

Аналіз досліджень і публікацій. Праці відомих вчених, перш за все Д. Марсі, Г. Райфа, та ін., спрямовані на аналіз, визначення корисності та ризику дослідження операцій, прийняття рішень та прогнозування їх наслідків [1–4].

Визначення і порівняння ймовірностей перебування складної системи забезпечення в різних станах в процесі її функціонування розглянуто в [5]. Результати дослідження прогнозних оцінок реалізації варіантів планування інвестицій наведено в [6].

Але узгодженого спільного застосування відомих методів, яких потребує актуальне завдання визначення і порівняння ймовірностей станів складної системи та виявлення проблемного під час моделювання системи, функціонування якої відповідає дискретному марківському процесу, з метою зміни ситуації шляхом адаптивного стохастичного вибору з альтернативних варіанта відновлення функцій складної системи в умовах невизначеності, зараз не існує.

Доцільний вихід з цієї ситуації – це зменшення розмірності завдання аналізу станів системи шляхом порівняння за деяким загальним показником, наприклад, за ймовірностями перебування цієї системи забезпечення у кожному із сукупності станів і виявлення проблемного стану системи за допомогою графа станів і переходів системи в різні стани.

Для відновлення працездатності складної системи доцільним є обґрунтування і вибір варіанта параметрів відновлення (із сукупності альтернативних) за допомогою метода перевірки статистичних гіпотез.

Метою цієї роботи є вирішення наукового завдання цілеспрямованого управління складною системою, процес функціонування якої відповідає марківському дискретному процесу, шляхом поточного контролю її станів, визначення слабкої ланки та коригування ситуації за допомогою заходу, обраного методом перевірки статистичних гіпотез для збільшення ефективності функціонування системи.

Постановка завдання. Відповідно до мети вирішення указанного наукового завдання може знайти багато практичних застосувань. Розглянемо його на прикладі складної системи технічного забезпечення безперервного функціонування іншої системи більш високого ієрархічного рівня.

Подамо процес функціонування досліджуваної складної системи за допомогою дискретного марківського процесу у вигляді графа типових станів і переходів системи із стану в стан. Ці стани пов'язані між собою чисельною кількістю переходів із стану у стан. Цей варіант моделі функціонування системи технічного забезпечення є типовим, так званим графом станів і переходів системи під час вирішення конкретних основних її завдань в процесі функціонування.

Адекватність цієї моделі для марківських процесів без післядії пояснюється тим, що вона найбільш точно відображає систему у випадку, коли будь-який поточний її стан не залежить від того, в якому стані система перебувала до цього моменту. Саме такою є складна система технічного забезпечення. Варіант графа станів і переходів системи в різні стани показано на рис. 1.

Повний перелік інтенсивностей переходів і деяких ймовірностей переходів виникнення цих переходів є такий:

i – інтенсивність переходів техніки і обладнання системи забезпечення від стану S_{Π} їх підготовки до стану S_3 їх застосування за призначенням;

μ, F – інтенсивність і ймовірність переходів системи від стану S_3 застосування техніки і обладнання до стану S_{Π} підготовки до застосування;

$\mu, (1-F)$ – інтенсивність і ймовірність переходів системи від стану S_3 застосування до стану S_B відновлення техніки і обладнання після їх відмов або пошкодження;

λ – інтенсивність переходів системи від стану S_B відновлення техніки і обладнання після відмов або пошкодження до стану S_{Π} їх підготовки до застосування.

Важливо підкреслити, що цей граф містить саме *циклічні* (не одноразові) переходи і відображає реальні переходи складної системи до того чи іншого стану. Так, перехід до стану її підготовки можливий і після її застосування, і після відновлення пошкодженої техніки, а перехід із стану застосу-

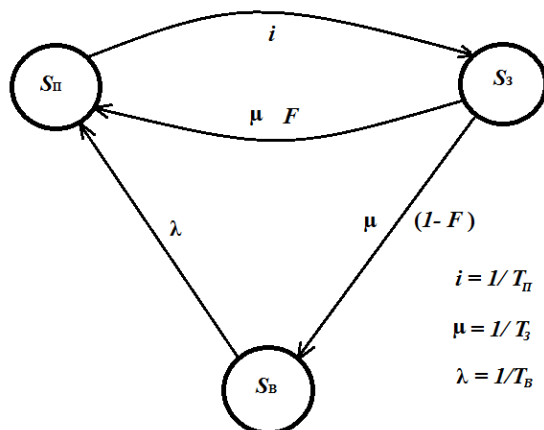


Рис. 1. Граф переходів системи технічного забезпечення в стани:
 S_{Π} – підготовки техніки і обладнання до застосування; S_3 – застосування техніки і обладнання за призначенням; S_B – відновлення техніки і обладнання після їх відмов або пошкодження

вання системи можливий і до стану відновлення пошкодженої техніки, і до стану її додаткового підготування (наприклад, для технічного обслуговування перед подальшим застосуванням за призначенням).

У процесі функціонування системи технічного забезпечення у часі вона перебуває у будь-якому стані з ймовірностями:

$P_n(t)$ – ймовірність перебування системи у стані підготовки техніки і обладнання до їх застосування;

$P_3(t)$ – ймовірність перебування системи у стані застосування за призначенням;

$P_6(t)$ – ймовірність перебування системи у стані відновлення техніки і обладнання після їх відмов або пошкодження.

Завдання *першого етапу* цього дослідження – визначити ймовірності перебування системи у різних станах: $P_n(t)$; $P_3(t)$; $P_6(t)$ і показник *ефективності функціонування системи* у вигляді відношення ймовірностей $P_3(t) / P_6(t)$ за умов різних витрат часу на відновлення техніки і обладнання у стані S_B , у разі їх відмов або пошкоджень. Саме цей показник дозволить протягом *другого етапу дослідження* вирішити завдання визначення і вибору оптимального варіанта відновлення ефективності системи з альтернативних шляхом призначення необхідних сил і засобів з метою значного зменшення витрат часу на відновлення техніки і обладнання у разі їх відмов або пошкоджень (наприклад, методом перевірки статистичних гіпотез) для суттєвого збільшення *показника ефективності функціонування складної системи*.

Виклад основного матеріалу. Сукупність диференціальних рівнянь, що описують процес перебування системи (див. рис. 1) в кожному з 3 її станів, доцільно записати згідно з *правилом контурів для графа переходів* системи технічного забезпечення в оточенні кожного із станів цієї системи у вигляді:

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \mu F P_3 + \lambda P_6 + i P_n;$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = iP_n - \mu FP_3 - \mu(1 - F)P_3;$$

$$\frac{dP_6(t)}{dt} = \mu(1 - F)P_3 - \lambda P_6, \quad (1)$$

Розв'язання диференціальних рівнянь (1) приводить до такої системи алгебраїчних рівнянь:

$$P_{II}(t) = [\mu FP_3 + \lambda P_B] \frac{\{1 - \exp[-(i)t]\}}{i}; \quad (2)$$

$$P_3(t) = iP_{II} \frac{\{1 - \exp[-(\mu)t]\}}{\mu}; \quad (3)$$

$$P_B(t) = [\mu(1 - F)P_3] \frac{\{1 - \exp[-(\lambda)t]\}}{\lambda}; \quad (4)$$

Ця система містить лише два лінійно незалежних рівняння, тому доцільно використати, наприклад, рівняння (3) і (4) та рівняння для умов нормування сукупної ймовірності станів системи (вона характеризує повну групу явищ) для часу $t > 0$. Умова нормування має вигляд:

$$P_n(t) + P_3(t) + P_6(t) = 1. \quad (5)$$

Після перетворень (3...5) отримаємо ймовірності перебування системи технічного забезпечення у відповідних станах: «підготовки техніки і обладнання до їх застосування»; «застосування техніки і обладнання за призначенням»; «відновлення техніки і обладнання після їх відмов або пошкодження» у вигляді:

$$P_{II}(t) = \frac{\mu\lambda}{\mu\lambda + i\lambda\beta + i\gamma\mu\beta(1 - F)}; \quad (6)$$

$$P_3(t) = \frac{i\lambda\beta}{\mu\lambda + i\lambda\beta + i\gamma\mu\beta(1 - F)}; \quad (7)$$

$$P_B(t) = \frac{i\gamma\mu\beta(1 - F)}{\mu\lambda + i\lambda\beta + i\gamma\mu\beta(1 - F)}, \quad (8)$$

де позначено:

$$\beta = \{1 - \exp[-\mu t]\}; \quad (9)$$

$$\gamma = \{1 - \exp[-\lambda t]\}. \quad (10)$$

Нескладно переконатися у правильності результатів розв'язків шляхом підстановки ймовірностей (6), (7), (8) у формулу (5) для умов нормування ймовірностей.

Важливо підкреслити, що у формулах (6...10) кожна інтенсивність переходів, а саме i , μ , λ , є відомою величиною, яка є обернено пропорційною

величині часу перебування системі у стані, з якої здійснюється перехід до іншого стану. Тому доцільними є такі позначення:

$$i = 1/T_{\Pi}; \mu = 1/T_3; \lambda = 1/T_B. \quad (11)$$

З формул (6...10) для ймовірностей 3 основних типових станів системи технічного забезпечення, які введені на самому початку обговорення моделі, що пропонується, видно таке.

Для збільшення ймовірності перебування системи у стані застосування зразків техніки і обладнання за призначенням необхідно, по-перше, зменшити інтенсивність та ймовірність переходу системи до стану (S_{Π}) підготовки техніки до застосування, а також збільшити інтенсивність переходу системи до стану (S_3) застосування техніки за призначенням. Це потребує зберігання техніки на високому рівні її коефіцієнта технічної готовності, прискореного і достатньо надійного рівня безпосередньої підготовки техніки до початку застосування за призначенням.

По-друге, інтенсивність і ймовірність переходу системи технічного забезпечення до стану (S_B) відновлення техніки після пошкоджень частіше залежить від зовнішніх негативних факторів. Тому показник ефективності функціонування складної системи, тобто показник її працездатності у вигляді P_3/P_B , безпосередньо залежить від заходів, що спрямовані на збільшення інтенсивності $\lambda = 1/T_B$ переходу системи із стану (S_B) відновлення техніки після пошкоджень до стану (S_{Π}) підготовки системи до застосування її за призначенням з подальшим переходом до застосування з інтенсивністю $i = 1/T_{\Pi}$.

Усе це можливе за умов значного збільшення інтенсивності відновлення λ , тобто зменшення витрати часу на відновлення техніки T_B шляхом якісної попередньої розробки плану і раціональної організації заходів, перш за все концентрації достатньої сукупності сил, технічних заходів і засобів для швидкого відновлення техніки після її відмов і пошкодження.

Дійсно, у цьому неважко переконатися на конкретному прикладі для випадку, коли ці заходи відсутні.

Приклад 1. Маємо час для спостереження працездатності системи $t = 1...16$ годин. Переходи системи технічного забезпечення з будь-якого стану до будь-якого її стану, а саме (див. рис. 1): $i = 1/T_{\Pi} = 1/(0,5 \text{ години})$; $\mu = 1/T_3 = 1/(1 \text{ годину})$; $\lambda = 1/T_B = 1/(4 \text{ години})$; $F = 0,1$; тому, згідно з (10; 11), маємо $\beta[t = (1...16) \text{ годин}] = 0,39...1,0$; $\gamma = 0,22...1,0$.

Необхідно визначити загальні ймовірності, які необхідно кількісно з'ясувати, та показник працездатності системи E , а саме:

$$P_n(t = 1...16); P_3(t = 1...16); P_B(t = 1...16); \quad (12)$$

$$E(t = 1...16) = \frac{P_3(t = 1...16)}{P_B(t = 1...16)}. \quad (13)$$

де $P_n(t)$ – ймовірність перебування системи у стані підготовки техніки до застосування;

$P_3(t)$ – ймовірність перебування системи у стані застосування техніки за призначенням;

$P_e(t)$ – ймовірність перебування системи у стані відновлення техніки у разі пошкодження;

Розв'язання. Згідно з формулами (6...11) отримаємо:

$$P_n(t = 1...16) = 0,50...0,10; P_3(t = 1...16) = 0,20...0,20; = 0,30...0,70;$$

$$E(t = 1...16) = 0,67...0,29.$$

Результати розрахунків ймовірностей за формулами (6...11) наведено на рис. 2.

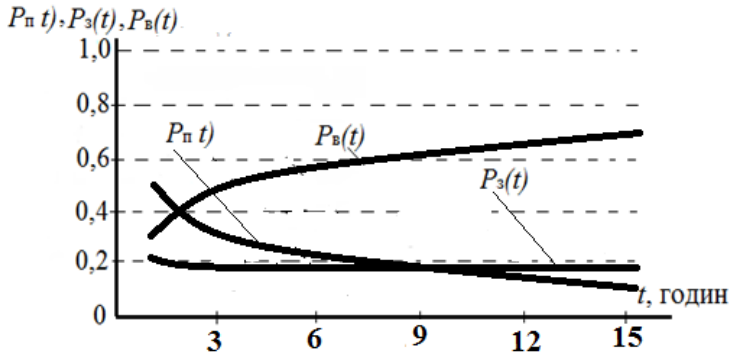


Рис. 2. Ймовірності перебування системи технічного забезпечення у станях: підготовки техніки і обладнання до застосування, (P_n); застосування техніки і обладнання за призначенням, (P_3); відновлення техніки і обладнання після пошкодження, (P_B)

Цей результат показує, що без вживання обґрунтованих заходів до значного зменшення часу T_B відновлення техніки і обладнання у разі їх відмов або пошкоджень ця складна система є практично непрацездатною за показником відношення ймовірності її застосування до ймовірності її відновлення у разі відмов або пошкодження. Цей показник дорівнює $E(t = 2...15) = 0,5...0,3$.

Таким чином, у складній системі технічного забезпечення існують закономірності, а саме:

– за умов реальних переходів системи із стану до стану, вона перебуває у стані застосування за призначенням з ймовірністю приблизно у 4 рази меншою, ніж у стані її підготовки до застосування або відновлення у разі відмов або пошкоджень.

– за час спостереження системи протягом 16 годин показник ефективності функціонування системи забезпечення зменшується більш ніж у 2 рази.

Зрозуміло, що цей результат, не є новим відкриттям. Він лише підтверджує особливість структури і сутність функціонування складної системи технічного забезпечення. Саме це необхідно завжди враховувати.

Тому доцільно перейти до *другого етапу дослідження*, а саме до визначення варіантів зміни неприйнятної ситуації з недостатньою працездатністю

системи шляхом порівняння варіантів обсягів сил і засобів в умовах їх стохастичного перетинання та вибору кращого із сукупності альтернативних і визначення ймовірності реалізації обраного варіанта заходів, що потрібні для відновлення працездатності системи.

Моделювання процесу вибору варіанта сил і засобів потрібного обсягу заходів, наприклад обсягів витрат для цього, доцільно здійснювати за допомогою критерію ідеального спостерігача з урахуванням варіантів витрат на реалізацію кожного з альтернативних варіантів, що мають максимальні рівні ймовірностей в умовах гіпотез, які перетинаються.

Нижче запропоновано методику визначення прогнозних оцінок ймовірностей реалізації варіантів потреби системи технічного забезпечення, що досліджується, за умов відомої кількості визначених варіантів виконання вимог щодо показників витрат на додаткові сили та на додаткові засоби обладнання для інтенсифікації процесу відновлення техніки в цій системі з урахуванням різних варіантів поєднань цих витрат.

Завдання вирішується за умов перетинання гіпотез про ці рівні показників очікуваних потреб. Методику визначення необхідних витрат і прогнозування достовірності їх реалізації методом перевірки статистичних гіпотез доцільно застосовувати під час перспективного планування більш ефективної системи забезпечення.

Управління важливим ресурсом забезпечення включає, як відомо, завдання: організації планування; розподілу ресурсів на основі науково обґрунтованого прогнозування обсягів потреб; виконання плану реалізації вкладених ресурсів з деякою корекцією згідно з обставинами, що можуть складатися в перспективі. Але цей рівень корекції не повинен перевищувати наявний ресурс для підвищення ефективності забезпечення з урахуванням всіх його складових, перш за все сил і засобів для виконання завдань системи щодо відновлення техніки і обладнання у разі їх відмов або пошкоджень.

Сучасний стан і перспективний розвиток засобів і способів забезпечення відрізняється тим, що набуває актуальності питання науково обґрунтованого планування систем забезпечення, а саме їх матеріально-технічного оснащення, як правило, в умовах обмежених ресурсів для покращання показників ефективності функціонування цих систем.

Зокрема зараз набувають актуальності завдання прогнозування реалізації планів шляхом визначення оцінок достовірності прогнозування найбільш ймовірного варіанта потреби в ресурсах за обмеженим числом ознак в умовах гіпотез, що перетинаються, про обсяги потреб для реалізації цих планів.

У той же час за умов, коли під час поєднання ресурсів ознаки збігаються не повністю, це дозволяє досягати прийнятної для практики достовірності вирішення зазначеного науково-управлінського завдання збільшення ефективності системи забезпечення з потрібною якістю її функціонування.

Метою зараз є вирішення науково-управлінського завдання прогнозування ймовірностей реалізації варіантів потреби системи забезпечення за допомогою методики на основі стохастичної моделі для оцінки ймовірностей реалізації альтернативних рішень, що досліджуються на етапі планування.

Оцінки достовірності реалізації варіантів потреби системи у різних за рівнем поєднання обсягів витрат необхідно здійснювати в умовах неточних даних про фактично доцільний розподіл цих обсягів витрат. Це нерідко зустрічається в реальних умовах. Саме ці оцінки виявляються особливо актуальними в умовах перетинання гіпотез, яке завжди існує через невизначеності випадкового, природного та антагоністичного характеру.

Відоме висловлення німецького теоретика Карла Клаузевиця (1780–1831) про те, що практичні дії є сукупністю дій, які здійснюються у темряві або, у всякому випадку, сутінках. Але теоретику заперечував французький імператор Наполеон Бонапарт (1769–1821), який висловлював інше: «Передбачення – це швидко зроблений розрахунок». Саме тому сформулюємо завдання другого етапу на кількісній основі.

Побудову моделі для прогнозування реалізації варіантів, що є альтернативними в умовах конкуруючих гіпотез про розрізнення, почнемо на основі двох ознак кожного варіанта (*ознака перша* – обсяг фінансування додаткових потреб у спеціалістах – силах для вирішення завдань відновлення техніки і обладнання в системі забезпечення, що досліджується; *ознака друга* – обсяг фінансування додаткових потреб в засобах для вирішення завдань відновлення техніки і обладнання в цій системі).

Побудову моделі доцільно починати з ретельного визначення ознак, наприклад, коли маємо для порівняння чотири заплановані (можливі) варіанти потреб у витратах для цих потреб у додаткових силах і засобах системи забезпечення.

Нехай ознаки є обсягами фінансування, що перетинаються попарно. Визначимо ознаки кількісно, залежно від варіантів їх можливої реалізації, у вигляді:

- P_1 – ознака обсягу фінансування *додаткових сил відновлення техніки* в системі забезпечення;
- P_2 – ознака обсягу фінансування *додаткових засобів відновлення техніки* в системі забезпечення.

Варіанти можливої реалізації потрібних обсягів фінансування з урахуванням відповідного розподілу ознак P_1, P_2 подамо у вигляді такого переліку:

1. Малий рівень обсягів витрат і на *додаткові сили відновлення техніки*, і на *додаткові засоби відновлення техніки*.
2. Малий рівень обсягів витрат на *додаткові сили відновлення техніки* і великий – на *додаткові засоби відновлення техніки*.
3. Великий рівень обсягів витрат і на *додаткові сили відновлення техніки*, і на *додаткові засоби відновлення техніки*.
4. Великий рівень обсягів витрат на *додаткові сили відновлення техніки* і малий – на *додаткові засоби відновлення техніки*.

Із зазначеного переліку видно, що характеристики кожного з варіантів мають хоча б одну відмінність від характеристик будь-якого з варіантів. Кількісні відмінності 4 варіантів є такими.

1. Малому рівню обсягу витрат на *додаткові сили відновлення техніки* та малому рівню обсягу витрат на *додаткові засоби відновлення техніки* відповідає малий рівень ознак P_1 і P_2 .

2. Малому рівню обсягу витрат на *додаткові сили відновлення техніки* та великому рівню обсягу витрат на *додаткові засоби відновлення техніки* відповідає малий рівень ознаки P_1 і великий рівень ознаки P_2 .

3. Великому рівню обсягу витрат на *додаткові сили відновлення техніки* та великому рівню обсягу витрат на *додаткові засоби відновлення техніки* відповідає великий рівень ознаки P_1 і великий рівень ознаки P_2 .

4. Великому рівню обсягу витрат на *додаткові сили відновлення техніки* і малому рівню обсягу витрат на *додаткові засоби відновлення техніки* відповідає великий рівень ознаки P_1 і малий рівень ознаки P_2 .

Задача зводиться до визначення значень ймовірності реалізації та умовних ймовірностей помилок прогнозу реалізації кожного з 4 варіантів витрат (за результатами реальної неминучої розмитості ознак, тобто за результатами зазвичай неточних даних (через невизначеність випадкового, природного і антагоністичного характеру) про обсяг очікуваної дійсної витрати і на підвищення ефективності функціонування системи забезпечення.

Через недостатню розрізненість варіантів за кожною з ознак спостережуване значення ознаки P_1 дозволяє висунути лише дві гіпотези:

– A_1 (P_1 – малого рівня): реалізується варіант-1 (випадок 1.1) або варіант-2 (випадок 1.2);

– A_2 (P_1 – великого рівня): реалізується варіант-3 (випадок 2.2) або варіант-4 (випадок 2.1).

Аналогічно спостережуване значення ознаки P_2 дозволяє судити про справедливість однієї з двох таких гіпотез:

– B_1 (P_2 – малого рівня): реалізується варіант-1 (випадок 1.1) або варіант-4 (випадок 2.1);

– B_2 (P_2 – великого рівня): реалізується варіант-2 (випадок 1.2) або варіант-3 (випадок 2.2).

Умовні густини ймовірностей значень ознак через велику кількість випадкових факторів, які впливають на їх величину, за умов справедливості введених гіпотез, будемо вважати відомими функціями.

Для гіпотез A_1, A_2 та B_1, B_2 позначимо їх у вигляді:

$$f_1(P_1/A_1), f_2(P_1/A_2); \varphi_1(P_2/B_1), \varphi_2(P_2/B_2).$$

Неважко переконатися, що ці густини ймовірностей мають вигляд розподілу Релея. Дійсно, з досвіду відомо зниження ймовірності прийняття неправильного рішення про реалізацію варіанта зі зростанням абсолютного значення ознаки реалізації в умовах факторів, що заважають прийняттю рішень. Кожна така залежність має характер експоненти такого вигляду:

$$F_i(P_1) = \exp\left[-\frac{P_1^2}{2\alpha_i^2}\right], i=1,2; \Phi_j(P_2) = \exp\left[-\frac{P_2^2}{2\beta_j^2}\right], j=1,2, \quad (14)$$

де $1/(2\alpha^2), 1/(2\beta^2)$ – швидкості зниження ймовірностей прийняття неправильного рішення про реалізацію варіантів витрат із заданими рівнями характеристик сил і засобів для вирішення завдань відновлення, які можуть бути досягнуті через відповідні обсяги фінансування.

Отже, ймовірності прийняття правильних рішень (як протилежних явищ) мають вигляд:

$$1 - F_i(P_1) = 1 - \exp\left[-\frac{P_1^2}{2a_i^2}\right], \quad i = 1, 2;$$

$$1 - \Phi_j(P_2) = 1 - \exp\left[-\frac{P_2^2}{2\beta_j^2}\right], \quad j = 1, 2,$$

Звідси, в результаті диференціювання цих ймовірностей отримаємо густини ймовірностей у вигляді розподілу Релея, а саме (рис. 3, 4):

$$f_i\left(\frac{P_1}{A_i}\right) = \frac{p_1}{a_i^2} \exp\left[-\frac{p_1^2}{2a_i^2}\right], \quad i = 1, 2; \quad \phi_j\left(\frac{P_2}{B_j}\right) = \frac{p_2}{\beta_j^2} \exp\left[-\frac{p_2^2}{2\beta_j^2}\right], \quad j = 1, 2. \quad (15)$$

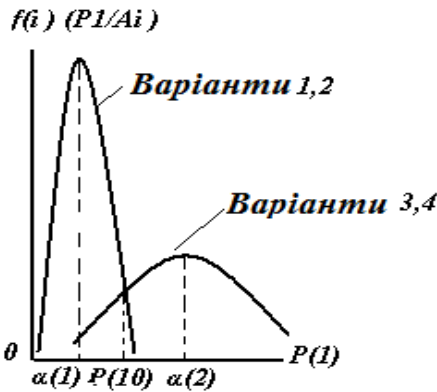


Рис. 3. Густини ймовірностей обсягів витрат згідно з 1-м, 2-м та 3-м, 4-м варіантами

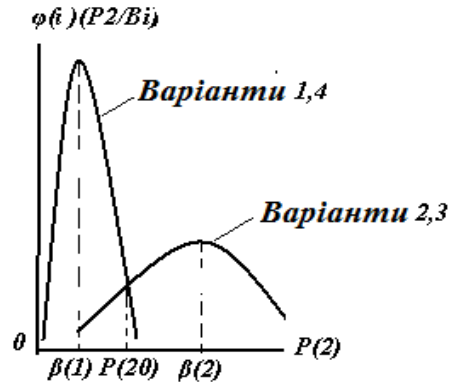


Рис. 4. Густини ймовірностей обсягів витрат згідно з 1-м, 4-м та 2-м, 3-м варіантами

Кожна з гіпотез $A_i, B_j, i = 1, 2; j = 1, 2$ є об'єднанням двох гіпотез, що обрані з такої сукупності гіпотез (випадків):

- C_{11} – випадок 1.1 (рішення про реалізацію варіанта-1);
- C_{12} – випадок 1.2 (рішення про реалізацію варіанта-2);
- C_{21} – випадок 2.1 (рішення про реалізацію варіанта-4);
- C_{22} – випадок 2.2 (рішення про реалізацію варіанта-3).

При цьому мають місце такі об'єднання гіпотез у вигляді:

$$A_1 = C_{11} \cup C_{12}; \quad A_2 = C_{21} \cup C_{22};$$

$$B_1 = C_{11} \cup C_{21}; \quad B_2 = C_{12} \cup C_{22}.$$

Звичайно, спостережувані значення ознак P_1, P_2 вважаються статистично незалежними, що справедливо при слабкому впливі загальних випадкових факторів на спотворення результатів спостереження ознак.

З введених чотирьох об'єднань гіпотез $A_i, B_j (i = 1, 2; j = 1, 2)$ можна отримати гіпотези C_{ij} як перетин відповідних об'єднань гіпотез A_i, B_j , а саме:

$$C_{ij} = A_i \cap B_j, i = 1, 2; j = 1, 2 \quad (16)$$

з двовимірними умовними густинами ймовірностей ознак P_1 та P_2 у вигляді:

$$\psi_{ij} \left(\frac{P_1}{A_i}, \frac{P_2}{B_j} \right) = f_i \left(\frac{P_1}{A_i} \right) \cdot \phi_j \left(\frac{P_2}{B_j} \right), i = 1, 2; j = 1, 2. \quad (17)$$

Достовірність прогнозування реалізації кожного з варіантів, що спостерегаються, неважко оцінити, обчислюючи ймовірності прийняття правильних рішень і помилок прийняття рішень при розгляді розподілу обсягів витрати, що окреслюються за кожним з варіантів їх використання. Для цього необхідно порівняти спостережувані значення ознак P_1 і P_2 з відповідними порогоми P_{10} і P_{20} , що обрані, наприклад, за критерієм «ідеального спостерігача».

Умовні густини ймовірностей правильних і помилкових рішень про можливість реалізації кожного з відповідних варіантів утворюють матрицю:

$$F = \begin{pmatrix} F_{11}^{11} & F_{12}^{11} & F_{21}^{11} & F_{22}^{11} \\ F_{11}^{12} & F_{12}^{12} & F_{21}^{12} & F_{22}^{12} \\ F_{11}^{21} & F_{12}^{21} & F_{21}^{21} & F_{22}^{21} \\ F_{11}^{22} & F_{12}^{22} & F_{21}^{22} & F_{22}^{22} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Елементи цієї матриці є кількісною оцінкою умовних ймовірностей у вигляді:

F_{11}^{11} – ймовірність правильного прогнозування реалізації варіанта-1, яка кількісно дорівнює ймовірності спільної справедливості гіпотез A_1 і B_1 ;

F_{12}^{11} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-1 через спільність гіпотези A_1 як для варіанта-1, так і для варіанта-2, ця ймовірність дорівнює ймовірності справедливості гіпотези A_1 і несправедливості гіпотези B_1 ;

F_{21}^{11} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-1, через спільність гіпотези B_1 як для варіанта-1, так і для варіанта-4, яка дорівнює ймовірності справедливості гіпотези B_1 і несправедливості гіпотези A_1 ;

F_{22}^{11} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-1, що дорівнює ймовірності спільної несправедливості і гіпотези A_1 , і гіпотези B_1 ; ця подія спільної несправедливості доповнює події, що наведені вище, до повної групи подій з гіпотезами A_1 і B_1 ;

F_{11}^{12} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-2, яка дорівнює ймовірності спільної справедливості гіпотези A_1 і несправедливості гіпотези B_2 ;

F_{12}^{12} – ймовірність правильного прогнозування реалізації варіанта-2, вона кількісно дорівнює ймовірності спільної справедливості і гіпотези A_1 , і гіпотези B_2 ;

F_{21}^{12} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-2, що дорівнює ймовірності несправедливості і гіпотези A_1 , і гіпотези B_2 ;

F_{22}^{12} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-2, яка дорівнює ймовірності несправедливості гіпотези A_1 і справедливості гіпотези B_2 ;

F_{11}^{21} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-4, яка дорівнює ймовірності справедливості гіпотези B_1 і несправедливості гіпотези A_2 ;

F_{12}^{21} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-4, яка дорівнює ймовірності спільної несправедливості як гіпотези A_2 , так і гіпотези B_1 ;

F_{21}^{21} – ймовірність правильного прогнозування реалізації варіанта-4, яка дорівнює ймовірності спільної справедливості як гіпотези A_2 , так і гіпотези B_1 ;

F_{22}^{21} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-4, яка дорівнює ймовірності справедливості гіпотези A_2 і несправедливості гіпотези B_1 ;

F_{11}^{22} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-3, яка дорівнює ймовірності несправедливості як гіпотези A_2 , так і гіпотези B_2 ;

F_{12}^{22} – ймовірність помилкового рішення про реалізацію варіанта-3, яка дорівнює ймовірності несправедливості гіпотези A_2 і справедливості гіпотези B_2 ;

F_{21}^{22} – ймовірність помилковості рішення про реалізацію варіанта-3, яка дорівнює ймовірності справедливості гіпотези A_2 і несправедливості гіпотези B_2 ;

F_{22}^{22} – ймовірність правильного прогнозування реалізації варіанта-3, яка дорівнює ймовірності спільної справедливості як гіпотези A_2 , так і гіпотези B_2 .

При цьому через незалежність реалізацій ознак P_1 і P_2 кожний елемент матриці F має вигляд:

$$F_{kl}^{ij} = R_k^i \cdot N_l^j, i, j, k, l \in \{1, 2\}, \quad (19)$$

де R_1^1 – ймовірність справедливості гіпотези A_1 , яка дорівнює

$$R_1^1 = \int_0^{P_{10}} f_1 \left(\frac{x}{A_1} \right) dx;$$

N_1^1 – ймовірність справедливості гіпотези B_1 , яка дорівнює

$$N_1^1 = \int_0^{P_{20}} \Phi_1 \left(\frac{y}{B_1} \right) dy;$$

R_2^1 – ймовірність несправедливості гіпотези A_1 , що дорівнює

$$R_2^1 = 1 - R_1^1;$$

N_2^1 – ймовірність несправедливості гіпотези B_1 , що дорівнює

$$N_2^1 = 1 - N_1^1;$$

R_1^2 – ймовірність несправедливості гіпотези A_2 , яка дорівнює

$$R_1^2 = \int_0^{P_{10}} f_2 \left(\frac{x}{A_2} \right) dx;$$

R_2^2 – ймовірність справедливості гіпотези A_2 , яка дорівнює

$$R_2^2 = 1 - R_1^2;$$

N_1^2 – ймовірність несправедливості гіпотези B_2 , що дорівнює

$$N_1^2 = \int_0^{P_{20}} \varphi_2 \left(\frac{y}{B_2} \right) dy;$$

N_2^2 – ймовірність справедливості гіпотези B_2 , що дорівнює

$$N_2^2 = 1 - N_1^2.$$

Отже, з урахуванням цих залежностей матрицю F доцільно подати в остаточному вигляді:

$$F = \begin{pmatrix} R_1^1 N_1^1 & R_1^1 (1 - N_1^1) & (1 - R_1^1) N_1^1 & (1 - R_1^1)(1 - N_1^1) \\ R_1^1 N_1^2 & R_1^1 (1 - N_1^2) & (1 - R_1^1) N_1^2 & (1 - R_1^1)(1 - N_1^2) \\ R_1^2 N_1^1 & R_1^2 (1 - N_1^1) & (1 - R_1^2) N_1^1 & (1 - R_1^2)(1 - N_1^1) \\ R_1^2 N_1^2 & R_1^2 (1 - N_1^2) & (1 - R_1^2) N_1^2 & (1 - R_1^2)(1 - N_1^2) \end{pmatrix}. \quad (20)$$

З (20) видно, що матриця (18) (назвемо її *матрицею достовірності прогнозування варіантів витрат з метою підвищення показника ефективності функціонування системи забезпечення*) є стохастичною: сума елементів кожного її рядка дорівнює одиниці; тобто вона відображає сукупність ймовірностей подій, що становлять повну групу подій під час прогнозування очікуваних варіантів витрати на підвищення характеристик досліджуваної системи.

Враховуючи конкретний вигляд (15) функцій f_i та φ_j , отримаємо умовні ймовірності у вигляді:

$$\begin{aligned} R_1^1 &= \int_0^{P_{10}} \frac{P_1}{a_1^2} \exp \left[-\frac{P_1^2}{2a_1^2} \right] dP_1 = 1 - \exp \left[-\frac{P_{10}^2}{2a_1^2} \right]; & R_2^1 &= \exp \left[-\frac{P_{10}^2}{2a_1^2} \right]; \\ N_1^1 &= \int_0^{P_{20}} \frac{P_2}{\beta_1^2} \exp \left[-\frac{P_2^2}{2\beta_1^2} \right] dP_2 = 1 - \exp \left[-\frac{P_{20}^2}{2\beta_1^2} \right]; & N_2^1 &= \exp \left[-\frac{P_{20}^2}{2\beta_1^2} \right]; \\ R_1^2 &= \int_0^{P_{10}} \frac{P_1}{a_2^2} \exp \left[-\frac{P_1^2}{2a_2^2} \right] dP_1 = 1 - \exp \left[-\frac{P_{10}^2}{2a_2^2} \right]; & R_2^2 &= \exp \left[-\frac{P_{10}^2}{2a_2^2} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

За умов застосування критерію «ідеального спостерігача» значення порогів P_{10} і P_{20} (див. рис. 3, 4) можуть бути знайдені шляхом розв'язання рівнянь:

$$f_1\left(\frac{P_{10}}{A_1}\right) = f_2\left(\frac{P_{10}}{A_2}\right); \quad \varphi_1\left(\frac{P_{20}}{B_1}\right) = \varphi_2\left(\frac{P_{20}}{B_2}\right).$$

Ці розв'язки мають вигляд:

$$P_{10} = 2a_1a_2 \left[\frac{\ln a_1 - \ln a_2}{a_1^2 - a_2^2} \right]^{0,5};$$

$$P_{20} = 2\beta_1\beta_2 \left[\frac{\ln \beta_1 - \ln \beta_2}{\beta_1^2 - \beta_2^2} \right]^{0,5}. \quad (22)$$

Таким чином, якщо параметри розподілів f_i і φ_j , $i = 1, 2$; $j = 1, 2$ відомі, то елементи матриці достовірності теж відомі. Це дозволяє отримати з матриці F повну інформацію про ймовірності правильного прогнозування варіантів витрат з метою збільшення показника ефективності функціонування системи забезпечення, а також про помилки прогнозування реалізації витрат для кожного з чотирьох варіантів.

Обчислимо їх рівні за допомогою простих співвідношень.

Для варіанта-1 отримуємо ймовірність правильного прогнозування його реалізації у вигляді $R_1^1 N_1^1$.

Для варіанта-2 маємо ймовірність правильного прогнозування його реалізації у вигляді $R_1^1 (1 - N_1^2)$.

Для варіанта-3 отримаємо ймовірність правильного прогнозування його реалізації у вигляді $(1 - R_1^2) (1 - N_1^2)$.

Для варіанта-4 знаходимо ймовірність правильного прогнозування його реалізації у вигляді $(1 - R_1^2) N_1^1$.

Безумовна ймовірність правильного прогнозування реалізації обсягів витрат для всіх 4 варіантів дорівнює сумі діагональних елементів матриці (20) достовірності реалізації варіантів, та (за умов рівних апіорних ймовірностей розгляду цих варіантів) безумовна ймовірність правильного прогнозування обсягів витрати дорівнює:

$$D = \frac{1}{4} \left[R_1^1 N_1^1 + R_1^1 (1 - N_1^2) + (1 - R_1^2) N_1^1 + (1 - R_1^2) (1 - N_1^2) \right], \quad (23)$$

А безумовна ймовірність загальної помилки прогнозування дорівнює:

$$Q = 1 - D. \quad (24)$$

Неважко переконатися, що достовірність прогнозування реалізації заходів визначається лише двома факторами: ступенем перекривання густин ймовірностей (див. рис. 3, 4), тобто дисперсією ознак (розмитістю інформа-

ції про очікувані обсяги витрат згідно з кожним з варіантів) та рівнем розрізнення гіпотез, які перетинаються хоча б за однією ознакою, що, у свою чергу, залежить від кількісного співвідношення між числом варіантів, що підлягають реалізації, та числом n ознак, що забезпечують вирішення завдання достовірного прогнозування. У всякому разі, вимога розрізненості гіпотез, що перетинаються, хоча б за однією ознакою з n використовуваних, як можна в цьому переконатися, зазвичай виконується в тому випадку, якщо кількість K варіантів, що повинні бути розглянуті, не перевищує число 2^n , тобто умова нормальної розрізненості варіантів при прогнозуванні їх реалізації в умовах гіпотез, що перетинаються, і розрізненості хоча б за однією ознакою, має вигляд:

$$K_{\max} \leq 2^n. \quad (25)$$

Далі доцільно визначити компромісний обсяг витрат на забезпечення оптимального показника ефективності функціонування системи.

За критерієм «ідеального спостерігача» доцільним є компромісний обсяг витрат на забезпечення оптимального показника ефективності функціонування складної системи з урахуванням густин ймовірностей 1-го і 3-го варіантів та 2-го і 4-го варіантів реалізації обсягів витрат на збільшення цього показника ефективності, тому що густини ймовірностей саме цих варіантів перетинаються і в просторі ознаки P_1 , і в просторі ознаки P_2 . Напівсума порогових рівнів критерія ідеального спостерігача, що обчислені згідно з формулою (22), які відповідають вказаним розподілам, є доцільним компромісним обсягом витрати P^* на забезпечення необхідного показника ефективності системи, який дорівнює:

$$P^* = (P_{10} + P_{20}) / 2 = \left\{ a_1 a_2 \left[\frac{\ln a_1 - \ln a_2}{a_1^2 - a_2^2} \right]^{0,5} + \beta_1 \beta_2 \left[\frac{\ln \beta_1 - \ln \beta_2}{\beta_1^2 - \beta_2^2} \right]^{0,5} \right\}. \quad (26)$$

Приклад 2. Нехай встановлено, що найбільш ймовірні значення ознак, тобто очікуваних обсягів витрат за кожним з варіантів їх реалізації, *відомі і дорівнюють*:

- для варіанта-1 і варіанта-2 деякий середній відносний очікуваний обсяг витрат близький до нульового і дорівнює $\alpha_1 = 0,041$;
- для варіанта-3 і варіанта-4 середній відносний очікуваний обсяг витрат істотно вищий і дорівнює $\alpha_2 = 0,653$;
- для варіанта-1 і варіанта-4 середній відносний очікуваний обсяг витрат є задовільним і дорівнює $\beta_1 = 0,301$;
- для варіанта-2 і варіанта-3 середній відносний очікуваний обсяг витрат помітно вищий і дорівнює $\beta_2 = 0,778$.

За результатами очікуваних розподілів обсягів витрат для кожного з варіантів в умовах, коли фактичне значення кожного очікуваного обсягу витрат зазвичай має відхилення від очікуваного і розподілене за законом Релея, *потрібно визначити*:

- а) значення ймовірностей правильного прогнозування реалізації варіантів обсягів витрат та умовні ймовірності помилкових рішень про реалізацію кожного з варіантів;

б) елементи матриці достовірності, маючи на увазі реально можливий попарний збіг розподілів обсягів витрат;

в) значення умовних ймовірностей помилок прогнозування можливостей реалізації кожного варіанта;

г) значення безумовної ймовірності правильного прогнозування реалізації варіантів обсягів витрат за умов, що апіорні ймовірності розгляду варіантів сумірні;

д) значення безумовної ймовірності помилкового прогнозування можливостей реалізації варіантів реалізації обсягів витрат;

е) доцільний компромісний обсяг витрат P^* на забезпечення потрібного показника функціонування складної системи.

Розв'язання. Відповідно до (22) порогові значення розподілів ознак дорівнюють:

$$P_{10} = 2\sigma_1\sigma_2 \left[\frac{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right]^{0,5} = 0,14;$$

$$P_{20} = 2\sigma_1\sigma_2 \left[\frac{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right]^{0,5} = 0,7;$$

а) відповідно до (18) і (21) ймовірності правильного прогнозування реалізації кожного з варіантів обсягів витрат на збільшення ефективності функціонування складної системи дорівнюють:

$$1. R_1^1 N_1^1 = 0,889;$$

$$2. R_1^1 (1 - N_1^2) = 0,870;$$

$$3. (1 - R_1^2) (1 - N_1^2) = 0,855;$$

$$4. (1 - R_1^2) N_1^1 = 0,873;$$

б) згідно з розрахунком/обчисленням (20) матриця F достовірності прогнозування реалізації варіантів обсягів витрат має вигляд

$$F = \begin{pmatrix} 0,889 & 0,107 & 0,003 & 0,001 \\ 0,126 & 0,870 & 0,001 & 0,003 \\ 0,019 & 0,003 & 0,873 & 0,105 \\ 0,002 & 0,019 & 0,123 & 0,855 \end{pmatrix};$$

в) відповідно до (23), враховуючи (21), знаходимо безумовну ймовірність правильного прогнозування реалізації всієї сукупності варіантів:

$$D = \frac{1}{4} [R_1^1 N_1^1 + R_1^1 (1 - N_1^2) + (1 - R_1^2) N_1^1 + (1 - R_1^2) (1 - N_1^2)] = 0,87;$$

г) ймовірність помилкового прогнозування сукупності варіантів реалізації напрямів модернізації функціонування складної системи згідно з (24) дорівнює:

$$Q = 1 - D = 0,13;$$

д) ймовірність помилкового прогнозування варіантів кожного конкретного номера варіанта з чотирьох визначається підсумовуванням ймовірностей помилок відповідного рядка *матриці достовірності* (20), а саме недіагональних елементів рядка. Отримаємо безумовну ймовірність помилок у вигляді:

$$1) \text{ для варіанта 1} - Q_1 = F_{12}^{11} + F_{21}^{11} + F_{22}^{11} = 0,112;$$

$$2) \text{ для варіанта 2} - Q_2 = F_{11}^{12} + F_{21}^{12} + F_{22}^{12} = 0,130;$$

$$3) \text{ для варіанта 4} - Q_3 = F_{11}^{22} + F_{12}^{22} + F_{21}^{22} = 0,127;$$

$$4) \text{ для варіанта 3} - Q_4 = F_{11}^{21} + F_{12}^{21} + F_{22}^{21} = 0,145;$$

е) доцільний компромісний обсяг витрат P^* на забезпечення оптимального показника функціонування складної системи дорівнює:

$$P^* = (0,14 + 0,70) / 2 = 0,42,$$

що треба було визначити згідно з гіпотетичним прикладом.

Приклад 3. Нехай отриманий обсяг витрат P^* на додаткові сили і засоби дозволяє скоротити час на відновлення техніки і обладнання, у разі їх відмов або пошкоджень в типових умовах функціонування системи технічного забезпечення) більш ніж у 4 рази.

Доцільно визначити (для умов, що подібні даним *прикладу 1*) залежності від часу технічного забезпечення кожної з ймовірностей, а саме: $P_n(t)$ – ймовірність перебування системи у стані підготовки техніки до її застосування; $P_3(t)$ – ймовірність перебування системи у стані застосування техніки за призначенням; $P_6(t)$ – ймовірність перебування системи у стані відновлення техніки після її пошкодження за умов вжиття заходів для суттєвого (наприклад, у декілька разів) зменшення часу відновлення працездатності системи забезпечення, шляхом значного збільшення сил і засобів для суттєвого прискореного відновлення пошкодженої техніки і ремонтного обладнання у складі системи.

Таким чином, маємо, як і раніше, незмінні час спостереження, інтенсивності та ймовірності переходів системи технічного забезпечення за одним винятком: прийняті заходи дозволяють зменшити час на відновлення техніки і обладнання з 4 до 1 години.

Треба визначити і побудувати графіки ймовірностей: $P_n(t)$; $P_3(t)$; $P_6(t)$, а також показник ефективності функціонування системи, що дорівнює $P_3(t) / P_6(t)$, для інтервалу часу $t = (1 \dots 16)$ годин.

Результати розрахунків згідно з формулами (6...11) з урахуванням заходів, що кількісно обґрунтовані за формулами (12...26), тобто згідно з умовами *прикладу 3*, наведені на рис. 5 і 6.

Висновки. Одержані результати моделювання (для визначення і порівняння ймовірностей перебування системи технічного забезпечення в кожному з основних станів), що ілюструються гіпотетичними прикладами, є достатньо типовими для забезпечення дій системи більш високого ієрархічного рівня. Ці результати характеризують повну групу явищ за умов заданих інтенсивності та ймовірності переходів цієї системи в різні стани.

Дослідження показують таке.

По-перше, запропоновано моделі аналізу працездатності складної технічної системи та обґрунтування потрібних заходів, кількісного порівняння альтернативних варіантів і вибору оптимального для більш гарантованої реальної реалізації, – ці моделі в сукупності дозволяють суттєво збільшити ефективність функціонування складної системи.

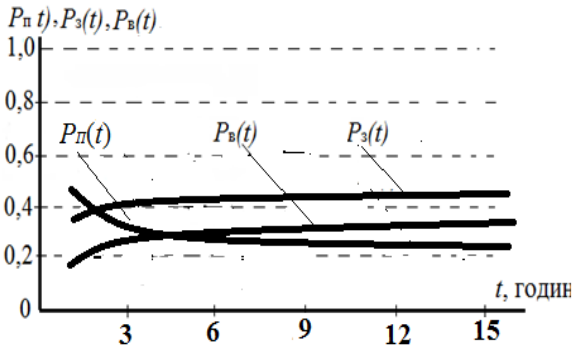


Рис. 5. Ймовірності перебування системи у станах: підготовки техніки, ($P_{п}$); застосування техніки за призначенням, ($P_{з}$); відновлення техніки після пошкодження, ($P_{в}$)

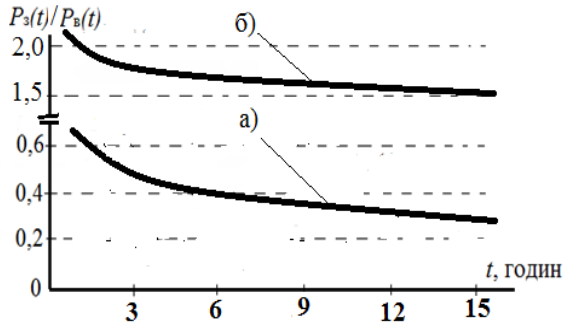


Рис. 6. Показники ефективності системи технічного забезпечення $P_{з(t)}/P_{в(t)}$: а) до її модернізації; б) після її модернізації

По-друге, найбільш слабким місцем типової системи технічного забезпечення є її можливості відновлення техніки і обладнання, що часто відмовляють або пошкоджуються. У деяких реальних умовах протягом 16 годин роботи ефективність складної системи технічного забезпечення є практично незадовільною, більш того, вона погіршується за цей час більш ніж у 2 рази, з рівня 0,67 до рівня 0,28, тобто система перебуває у стані її відновлення порівняно з перебуванням її у стані працездатності з ймовірністю у 3 рази більшою.

По-третє, видаються доцільними заходи, що спрямовані на збільшення *живучості* техніки і обладнання. Відповідно до класичного визначення, *живучість техніки* є її здатністю зберігати свої функції під час дії різних негативних факторів та здатністю швидко відновлюватися після її пошкодження і здатністю повертатись у стрій.

По-чверте, моделювання показує, що за умов застосування сукупності додаткових ремонтних сил і засобів, тобто за умов додаткових витрат на відбір та підготовку досвідчених спеціалістів, додаткових витрат на ремонтне обладнання для здійснення умов переважного застосування підмінних вузлів, блоків, приладів і матеріалів з метою швидкого відновлення зразків техніки, що отримали пошкодження, ефективність функціонування системи технічного забезпечення *суттєво покращується*, а саме:

- показник ефективності функціонування системи технічного забезпечення збільшується у 3–5 разів;

- навіть і після 16 годин функціонування цей показник може перевищувати той, що спостерігається до вжиття потрібних заходів, більш ніж у 5 разів.

По-п'яте, вихідні дані, що використані у прикладах, а саме результати аналізу якості функціонування і напрямів збільшення ефективності функціонування складної системи – усе це призначено, перш за все, для наочної ілюстрації об'єктивних закономірностей в моделях досліджуваної системи. Але порівняння отриманих таким чином результатів з реальними проблемними результатами, що часто спостерігаються в практиці експлуатації складних систем забезпечення, показує безумовну корисність використання моделей для більш обґрунтованого вирішення проблем практики.

По-шосте, наукові завдання аналізу і синтезу будь-якої складної системи, до яких відносять і досліджувану систему, належать до класу погано визначених завдань. Результати їх вирішення не претендують на визначення категоричних рекомендації для їх застосування під час управління функціонуванням указаних систем. Але ці результати однозначно сприяють об'єктивному визначенню найбільш доцільних напрямів дій особами, що приймають рішення, під час корекції можливостей цих систем. Вже це є часто життєво важливим досягненням практики, тому що помилкове рішення в умовах системи великої розмірності може мати для суспільства катастрофічні наслідки.

По-сьоме, створення і практичне застосування відповідного програмного продукту сприяє успішному застосуванню запропонованої моделі управління не тільки для наукових досліджень складних систем, але також і для його оперативного застосування в реальному масштабі часу для застосування та експлуатації широкого кола складних систем технічного забезпечення і не тільки технічних систем.

Список використаних джерел

1. Марси Д. Стохастическая модель для прогнозирования технологических изменений / Д. Марси // Экономика промышленности. – 1980. – № 1. – С. 22–27.

2. Гафт М.Г. Принятие решений при многих критериях / М.Г. Гафт. – М.: Знание. Серия «Математика, кибернетика». – 1979. – № 7. – 67 с.
3. Райфа Г. Анализ решений / Г. Райфа. – М.: Изд-во Московского университета, 1977. – 186 с.
4. Дем'янчук Б.О. Модель определения прогнозных оценок реализуемости вариантов вложения инвестиций в сферу производства / Б.О. Дем'янчук, В.М. Косарев // *Європейський вектор економічного розвитку*. – 2014. – 2 (17). – С. 60–69.
5. Дем'янчук Б.О. Узагальнена модель системи технічного забезпечення бойових дій / Б.О. Дем'янчук, О.В. Малишкін // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. – Харків: ХУПС, 2014. – Вип. № 2 (39). – С. 3–8.
6. Дем'янчук Б.О. Методичні основи оцінки ймовірності інвестування в безпеку країни в умовах невизначеності / Б.О. Дем'янчук, В.М. Косарев // *Європейський вектор економічного розвитку*. – 2015. – Вип. 2(19). – С. 44–54.

References

1. Marsi D. (1980) *Stokhasticheskaya model dlya prognozirovaniya tehnologicheskikh izmenenii* [Stochastic model for predicting technological change]. Ref. sbornic. *Ekonomika promyshlennosti* [Industrial Economics], 1980, no. 1, pp. 22-27.
2. Gaft M.G. Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh [Decision-making in many criteria]. Moscow, Znanie. Matematika, kibernetika, 1979, no. 1, 67 p.
3. Raifa G. *Analiz reshenii* [Decision Analysis], Moscow, MGU, 1977, 186 p.
4. Dem'janchuk B.A., Kosarev V.M. *Model prognozuvannya realizuemosti variantiv investuvannya v sferu vyrobnyctva* [Model prediction realizuyemosti investment options in manufacturing]. *Evropeiskii vector ekonomichnogo rozvytku* [European vector of economic development], 2014, no. 2 (17), pp. 60-69.
5. Dem'janchuk B.A. (2014) *Uzagalnena model systemy tehničnogo zabezpechennya boiovyh dii* [Generalized model of logistics fighting], *Zbirnyk naukovykh prac Kharkivskogo universitetu Povitryanyh sil* [Proceedings of Kharkiv Air Force University], Kharkiv: KHUPS, 2014, no. 2(39), pp. 3-8.
6. Dem'janchuk B.A. (2015) *Metodichni osnovy osinky imovirnosti investuvannya v bezpeku krainy v umovah nevyznachennosti* [Methodological basis for evaluating the probability of investing in the country's security in the face of uncertainty]. *Evropeiskii vector ekonomichnogo rozvytku* [European vector of economic development], 2015, no. 2(19), pp. 44-54.

Предложена модель сложной системы, процесс функционирования которой соответствует дискретному марковскому процессу, для оценки и стохастического адаптивного восстановления работоспособности системы по критерию максимума превышения

вероятности пребывания её на стадии функционирования над вероятностью пребывания её в стадии восстановления через отказы или повреждения извне.

Ключові слова: *дискретний марковський процес, ймовірності станів складної системи, стохастичний вибір варіанта відновлення з альтернативних, достовірність реалізації варіанта відновлення складної системи.*

The model of a complex system, a process operation which corresponds to a discrete Markov process for assessment and adaptive stochastic recovery system on the criterion of maximum probability of exceeding her stay in the stage of operation likely to stage its recovery through failure or damage from outside.

Key words: *discrete Markov process, probabilities states of complex systems, stochastic choice of alternative recovery option, authenticity implementing recovery option complex system.*

Одержано 21.11.2016