



УДК 625.7.08-192:629.113.004.5

## МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДМОВ ГІДРОПРИВОДІВ ЕКСКАВАТОРІВ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЇХ БЕЗВІДМОВНОСТІ

В.І. Лесько

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03680, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, vitles@i.ua

**АНОТАЦІЯ.** Пропонується метод оцінки показників безвідмовності гідроприводу одноківшового екскаватора з використанням імітаційного моделювання, що дозволяє враховувати параметричні відмови основних елементів гідроприводу з урахуванням ефективності функціонування екскаватора в цілому та стохастичної залежності між параметричними відмовами окремих елементів та його функціональними можливостями. Представлено прогнозні ймовірно-фізичні моделі надійності на основі діагностичної інформації та методика розрахунку показників надійності для деяких варіантів гідравлічних схем. Гранічний стан елементів гідроприводу може бути заданий як детермінованими значеннями, так і законом розподілу. При цьому враховуються конструктивні особливості та специфіка формування параметричних відмов функціональних ділянок гідроприводу.

**Ключові слова:** одноківшевий екскаватор, гідропривод, безвідмовність, умови роботоздатності, моделі надійності, ефективність функціонування

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ГИДРОПРИВОДОВ ЭКСКАВАТОРОВ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИХ БЕЗОТКАЗНОСТИ

В.И. Лесько

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,  
03680, Воздухофлотский просп., 31, Киев, Украина, vitles@i.ua

**АННОТАЦИЯ.** Предлагается метод оценки показателей безотказности гидропривода экскаватора с использованием имитационного моделирования, который позволяет учитывать параметрические отказы основных элементов гидропривода с учетом эффективности функционирования экскаватора в целом и стохастической зависимости между параметрическими отказами отдельных элементов и его функциональными возможностями. Представлены прогнозные вероятностно-физические модели надежности на основе диагностической информации и методика расчета показателей надежности для некоторых вариантов гидравлических схем. Граничное состояние элементов гидропривода может быть задано как детерминированными значениями так и законом распределения. При этом учитываются конструктивные особенности и специфика формирования параметрических отказов функциональных участков гидропривода.

**Ключевые слова:** одноківшовий екскаватор, гідропривод, безотказність, умовия работоспособности, модели надежности, эффективности функционирования

## MODELING OF PARAMETRIC DISCHARGES OF EXCAVATOR HYDROPRODUCTIONS, FORECASTING AND EVALUATION OF THEIR INDIVIDUAL INDICATORS

V.I. Lesko

Kyiv National University of Construction and Architecture  
03680, Povitroflotsky ave., 31, Kiev, Ukraine, vitles@i.ua

**ANNOTATION.** A method of measuring the reliability of hydraulic excavator using simulation tests, which allows to consider parametric failures of basic elements, taking into account the effective functioning of the hydraulic excavator overall and stochastic dependencies between parametric failures of individual elements and its functionality. Presented forecasts the probabilistic-physical reliability model based on diagnostic information and methodology of calculating reliability for some options of hydraulic circuits. The

boundary condition of the hydraulic drive elements can be specified as deterministic values and distribution law. This includes design features and peculiarities of formation of parametric functional failures of sites hydro sources.

**Keywords:** single-digger excavator, hydraulic drive, fault-tolerance, conditions of workability, reliability model, efficiency of functioning

**Актуальність проблеми.** Оцінка експлуатаційної надійності будівельних машин – один із важливих факторів визначення їх якості та ефективності функціонування, а забезпечення необхідного рівня надійності машин є гарантією їх конкурентоспроможності як на внутрішньому так і на зовнішньому ринку. Але реальна ситуація при експлуатації особливо нових гідрофікованих екскаваторів (а також кранів, навантажувачів) склалася така, що практично майже відсутні необхідні дані про показники їх надійності (ПН) в умовах експлуатації, а існуючі методи оцінки ПН не зовсім прийнятні, а тому не завжди ефективні при оцінці ПН гідроприводів і вимагають вдосконалення.

Аналізи відмов гідроприводів (ГП) одноківшових екскаваторів (ОЕ) та особливостей його функціонування показують, що найбільш характерними видами відмов ГП, наряду з іншими, є параметричні відмови, формування яких в часі приводить до поступової втрати рівня роботоздатності його елементів та зниження, внаслідок цього, ефективності функціонування всього ГП, що при певних умовах розцінюється також як параметрична відмова. Це дає підстави вважати функціональні можливості ГП, його ефективність, одним із аспектів надійності і вказує на необхідність врахування їх при оцінці показників надійності. Звідси постає питання про доцільність знаходження інших підходів при оцінці надійності гідроприводів та розробку методів оцінки ПН на основі моделей параметричних відмов, з урахуванням ефективності функціонування ГП та стохастичної залежності між ними.

**Мета і постановка задачі.** В даній роботі автором пропонується метод оцінки ПН із застосуванням імітаційного моделювання, суть якого полягає в наступному. На основі інформації, одержаної в результаті діагностування гідроприводів в умовах експлуатації на протязі часу  $t_0 - t_r$ , описуються закономірності зміни об'ємного ККД -  $\eta_j (j = 1, 2, \dots, N)$  кожного із  $N$  основних гідроелементів (гідронасоси, гідроциліндри, секції гідророзподільників, гідродвигуни), які лімітують надійність ГП. Реалізації об'ємного ККД (ОККД) елементів описуються нестационарним випадковим процесом  $\eta_j(t)$ , який протікає під впливом широкого спектру експлуатаційних факторів ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ). За характеристику випадкових функцій в перерізах часу  $t_i$  прийняті одномірні густини імовірного розподілу ОККД  $f_j(\eta; t_i)$ , які, як встановлено дослідженнями, добре узгоджуються із нормальним законом розподілу

$$f_j(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta_j}} e^{-\frac{(\eta_{\eta_j} - m_{\eta_{\eta_j}})^2}{2\sigma_{\eta_j}^2}}$$

Апроксимація параметрів законів розподілу на відрізьку  $t_0 - t_r$  дозволяє отримати прогнозні моделі  $f_j(\eta; t_i)$  для перерізів часу  $t_i > t_r$ . При нормальному законі розподілу ОККД апроксимації підлягають початкові та центральні моменти  $m_{\eta_j}(t)$  та  $\sigma_{\eta_j}^2(t)$ . В якості екстраполяційної функції параметрів прийнята степенева функція:

$$m_{\eta_j}(t_i) = m_{\eta_{oj}} - V_j t_i^{\alpha_j}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\eta_j}^2(t_i) = \sigma_{\eta_{oj}}^2 + \sigma_{v_j}^2 t_i^{2\alpha_j} \quad (2)$$



де значення  $m_{\eta_{oj}}; \sigma_{\eta_{oj}}; V_j; \sigma_{v_j}$  та  $\alpha_j$  визначаються експериментальним шляхом.

При розподілі ОККД за іншими законами - законом Вейбулла, гамма-розподілом або логарифмічно-нормальним, які також можуть мати місце, - апроксимації підлягають параметри цих законів: параметри масштабів  $a_{\eta}(t), \lambda_{\eta}(t), \mu_{\eta}(t)$  та форми  $b_{\eta}(t), a_{\eta}(t), \sigma_{\eta}(t)$  відповідно. На основі кореляційного та регресійного аналізу за результатами дослідницьких експериментів визначається вплив експлуатаційних факторів на закономірності тренду параметрів.

Використовуючи для параметрів нормального закону розподілу прогнози залежності (1) та (2), встановлюється функція множинної регресії та її характеристики для коефіцієнта  $V_j = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ , який представляє собою умовну швидкість зміни параметра з урахуванням дії факторів.

Виникнення параметричних відмов гідроелементів гідроприводу одноківшового екскаватора (ОЕ) та інших БДМ при їх експлуатації є наслідком порушення певних умов, які характеризують здатність гідроприводу зберігати роботоздатність у відповідності до заданих вимог. Для основних елементів, які лімітують надійність гідроприводу ОЕ, умови роботоздатності  $\varphi_j$  характеризуються невиходом об'ємного ККД  $\eta_j$  за певний встановлений граничний рівень  $\eta_{j \text{ гран.}}$ , тобто  $\varphi_j = \eta_j - \eta_{\text{гран}j} > 0$ .

В загальноприйнятих випадках при розгляді процесів формування відмов елементів ГП факт порушення умови  $\{\varphi_j = \eta_j - \eta_{j \text{ ГРАН}} > 0\}$  трактується як параметрична відмова окремо взятого  $j$ -го елемента, імовірність виникнення якої при заданому граничному

значенні об'ємного ККД  $\eta_{j \text{ гран.}}$  визначається за виразом:  $P\{\varphi_j = \eta_j - \eta_{j \text{ ГРАН}} < 0\} = \int_0^{\eta_{j \text{ ГРАН}}} f(\eta_j) d\eta$ ,

Певний інтерес з точки зору задання умов роботоздатності представляють собою так звані функціональні дільниці (ФД), що складаються із послідовно з'єднаних гідроциліндрів та гідророзподільників (рис.1), що відносяться до підсистем рукояті, стріли та ковша. При наявності в гідравлічних лініях ФД гідрозамків або зворотних клапанів керованих (ЗКК), які встановлено між гідророзподільниками та гідроциліндрами (рис.1, схема б), роботоздатність ФД в такому випадку виражається через умови збереження роботоздатності її окремих елементів:

$$\varphi_j = \eta_{\text{ц}j} - \eta_{\text{ц}j \text{ гран}} > 0, \quad (3)$$

$$\varphi_j = \eta_{\text{р}j} - \eta_{\text{р}j \text{ гран}} > 0. \quad (4)$$

Специфічними в плані задання умов роботоздатності та формування параметричних відмов гідроприводів є функціональні дільниці (рис.1, схема а), граничний стан яких виражається через узагальнений граничний об'ємний ККД  $\eta_{\text{ФД}j \text{ гран}}$ , коли умовою роботоздатності ФД прийнято співвідношення [1]:

$$\varphi_j = \eta_{\text{ц}j} \cdot \eta_{\text{р}j} - \eta_{\text{ФД}j \text{ гран}} > 0 \quad (5)$$

При розрахунку надійності ГП граничні значення ОККД гідроелементів можуть бути задані як детермінованими значеннями  $\eta_{\text{гран}j}$ , так і законами розподілу. Якщо граничні значення ОККД гідроелементів та ФД задані законом розподілу, то замість детермінованих значень розглядають його випадкові значення, які для всіх елементів ГП та ФД у всіх перерізах часу можна з достатньою точністю описувати нормальним законом розподілу.

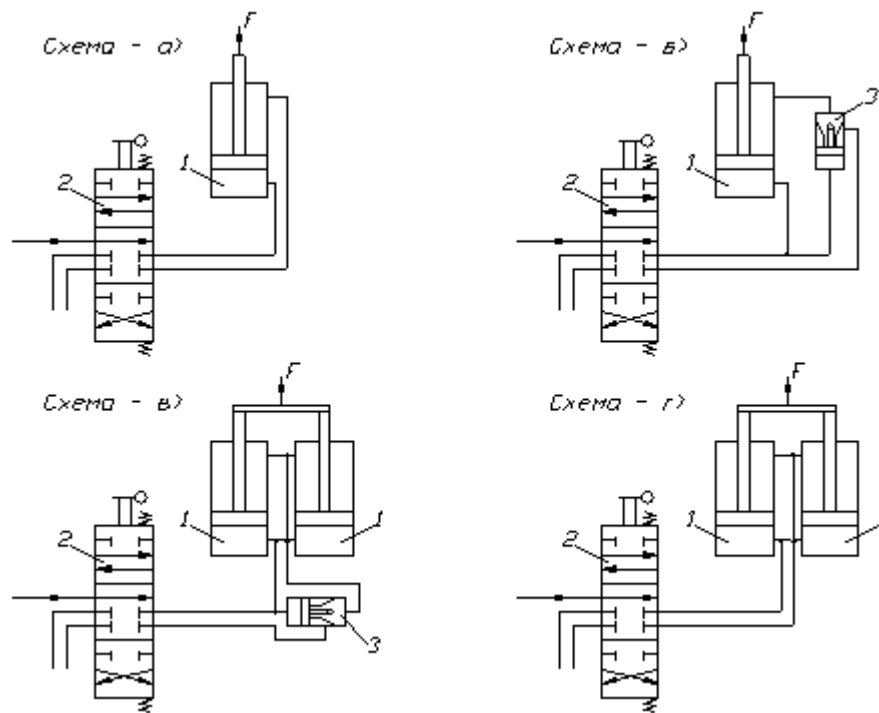


Рис. 1. Гідравлічні схеми під'єднання гідроциліндрів в функціональних дільницях:  
 1–гідроциліндр; 2–гідророзподільник, 3–гідрозамок або клапан керований зворотній.

Прогнозування функцій розподілу імовірностей випадкового процесу  $\eta(t_i)$  для будь-якого перерізу часу  $t_i$  при заданих умовах експлуатації дає можливість формування параметричних імовірнісно-фізичних моделей відмов, за якими визначаються імовірності збереження роботоздатності (ІЗР) елементів за умовами  $\varphi_j > 0$  :

$$P(\varphi_j > 0; t_i) = P\{\eta_j(t_i) > \eta_{гранj}; t_i\} = \int_{\eta_{гран}} f(\eta_j, t_i) d\eta \quad (6)$$

$$P(\varphi_j > 0; t_i) = P\{\eta_{гцj} \cdot \eta_{грj} > \eta_{фДгранj}; t_i\} = \iint_{\eta_{гц} \cdot \eta_{гр} > y} f(\eta_{гц}, \eta_{гц}) d\eta_{гц} d\eta_{гц} \quad (7)$$

Графічна інтерпретація процесу формування ймовірнісно-фізичної моделі відмови елементів ГП приведена на рис. 2.

Вважаючи функціональні можливості одним із аспектів надійності гідроприводу, будемо розглядати відповідність рівня ефективності функціонування ГП певному заданому граничному рівню як одну із умов  $W$  збереження роботоздатності ГП. Тобто, приймаємо, що збільшення тривалості робочого циклу екскавації  $t_{ц}$  відносно заданого граничного значення  $t_{ц.зад}$  в момент часу  $t_i$  також трактується як параметрична відмова ( $W = t_{ци} - t_{ц.зад} > 0$ ). Знаючи залежність значення тривалості робочого циклу екскавації  $t_{ц}$  від об'ємних ККД основних гідроелементів  $\eta_j$ , та функціональні залежності ОККД від часу  $\eta_j(t_i)$ , можна прогнозувати значення  $t_{ц}(t_i)$  для моменту часу  $t_i$  :

$$t_{ц}(t_i) = Y\{\eta_1(t_i), \dots, \eta_j(t_i), \dots, \eta_N(t_i)\} \quad (8)$$

Функціональна залежність  $t_{ц} = Y\{\cdot\}$  встановлюється експериментальним шляхом або за допомогою математичного моделювання.

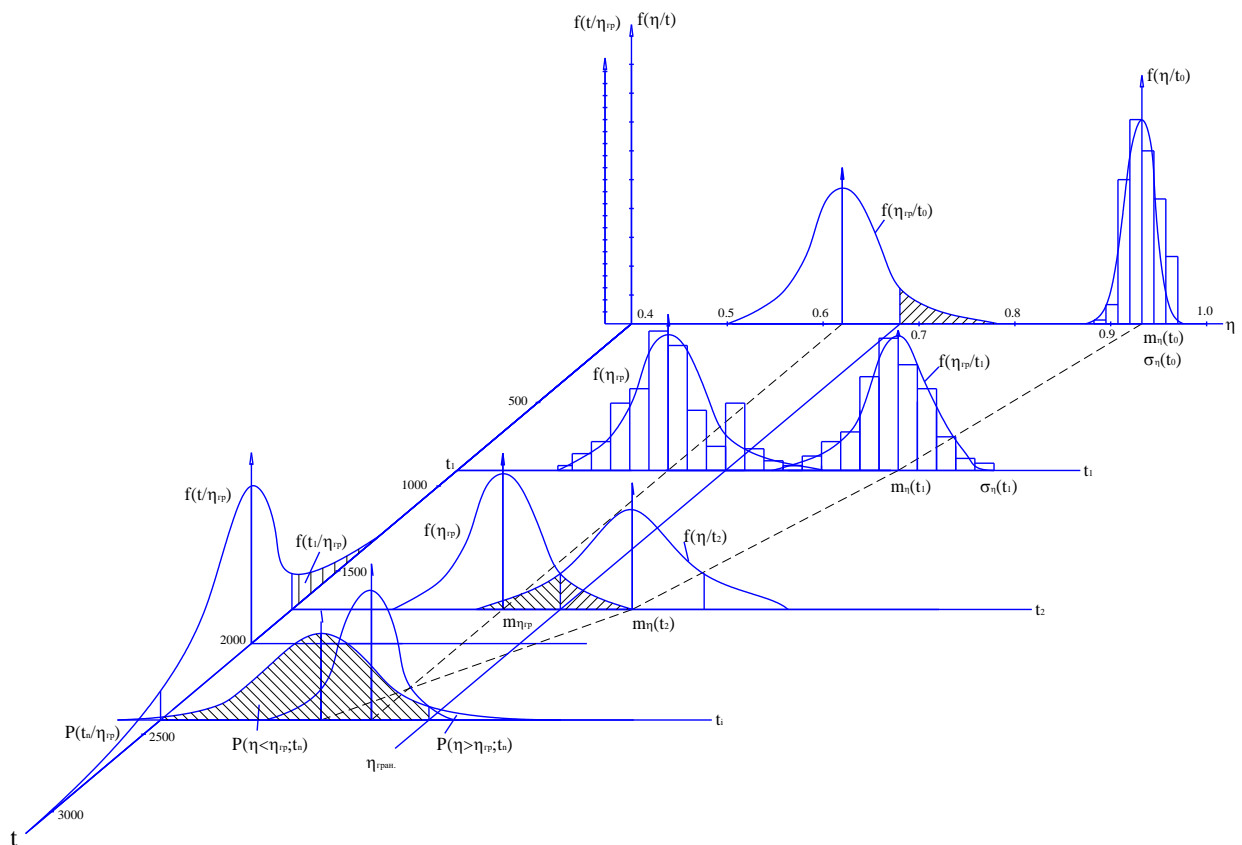


Рис.2. Графічна інтерпретація процесу формування ймовірнісно-фізичної моделі відмови елементів гідроприводу екскаватора

Імовірність збереження заданого граничного рівня ефективності ГП за параметром  $t_{ц}$  в момент часу  $t_i$  знаходиться по формулі:

$$P(W < 0, t) = P \left\{ t_{ц}(t_i) < t_{ц}, t_i \right\} = \int_0^t f \{ Y(\cdot); t_i \} dt, \quad (9)$$

де:  $f \{ Y(\cdot); t_i \}$  - густина розподілу імовірності тривалості робочого циклу в момент  $t_i$ .

Так як між умовами роботоздатності  $\varphi_j$  та ефективністю функціонування існує стохастичний зв'язок, то формула для визначення ІЗР при параметричних відмовах для моменту  $t_i$  в загальному вигляді запишеться так:

$$P(t_i) = P_1 \{ W < 0; t_i / (\varphi_1 > 0) \cap \dots \cap (\varphi_j > 0) \cap \dots \cap (\varphi_N > 0); t_i \} \times \\ \times P_2 \{ (\varphi_1 > 0) \cap \dots \cap (\varphi_j > 0) \cap \dots \cap (\varphi_N > 0); t_i \} \quad (10)$$

де  $P_1 \{ \cdot \}$  - умовна імовірність збереження ефективності функціонування ГП при заданому граничному значенні  $t_{ц,зад}$ , яка визначена при умові безвідмовного функціонування всіх елементів та функціональних ділянок ( $\varphi_j > 0$ );  $P_2 \{ \cdot \}$  - імовірність збереження умов роботоздатності всіх елементів та ФД ( $\varphi_j > 0$ ).

Наявність корельованих зв'язків між параметричними відмовами елементів та ефективністю ГП, складність визначення коефіцієнтів кореляції і відсутність в класичній теорії надійності методів визначення умовних імовірностей, наявність функцій випадкових аргументів та випадкових граничних значень

ОККД елементів ГП унеможливають використання аналітичних форм для визначення  $P(t_i)$ .

Окреслені задачі вирішуються за допомогою методів [2] статистичного моделювання (метод Монте-Карло) процесів формування зазначених параметричних відмов ГП та

стохастичної залежності між ними. Узагальнена блок-схема алгоритму визначення показників надійності ГП на прикладі одноківшового екскаватора представлена на рис. 3.

Імітаційним моделюванням для кожного моменту часу  $t_i$ , починаючи з  $t_{\min}=0$ , із шагом  $\Delta t$  формуються прогнози значення параметрів відомого за експериментальними даними закону розподілу ОККД  $j$ -го гідроелементу ( $j = \overline{1, N}$ ). Для нормального закону розподілу такими параметрами будуть  $m_{\eta_j}(t_i)$  та  $\sigma_{\eta_j}(t_i)$ .

В перерізі часу  $t_i$  для всіх елементів ГП за допомогою генератора випадкових чисел формується заданий масив послідовних реалізацій ( $q_{ji} = \overline{1, M}$ ) рівномірно розподілених в інтервалі  $(0, 1)$  випадкових величин  $\xi_{mji}$ . Після формування чергового  $q_i$ -го номера реалізації згенеровані числа запам'ятовуються і за прогнозними параметрами закону розподілу (в даному випадку нормального) і відповідною математичною моделлю одержуємо масив випадкових значень ОККД елементів ГП -  $\eta_{jq_i}$  (де  $q = 1, \dots, M_{ji}$ ):

$$\eta_{jq_i}(t_i) = m_{\eta_j}(t_i) + \sigma_{\eta_j}(t_i) \cdot \left( \sum_{m=1}^{12} \xi_{mji} - 6 \right). \quad (11)$$

Розрахунок показників надійності може проводитися за двома варіантами надання граничних значень ОККД гідроелементів: з детермінованими та випадковими значеннями та за двома різновидами гідравлічних схем (рис. 1, схема б та схема а). Якщо граничні значення ОККД окремих елементів та ФД є випадковими (варіант 1) і задаються нормальним законом розподілу з параметрами  $m_{\eta_{гранj}}$  та  $\sigma_{\eta_{гранj}}$ , то аналогічним чином за формулою (11) розраховуються випадкові граничні значення ОККД цих елементів, які запам'ятовуються. При детермінованих граничних значеннях ОККД (варіант 2) приймаємо, що  $\sigma_{\eta_{гранj}} = 0$ .

В залежності від конструктивного виконання гідроприводу екскаватора, тобто наявності в лінії „гідророзподільник – гідроциліндр” гідрозамків або зворотніх клапанів керованих (ЗКК) (рис. 1, схема б) чи їх відсутності (рис. 1, схема а), а також від можливого варіанту (1 чи 2) надання граничних значень ОККД програма реалізовує чотири способи розрахунку показників надійності.

В першому випадку (рис. 1, схема б + варіант 2) для кожної реалізації  $q_{ji} \leq M_{ji}$  спочатку здійснюються перевірки умов збереження роботоздатності ( $\varphi_{jq_i} = \eta_{jq_i} - \eta_{jГРАН} > 0$ ) всіх елементів.

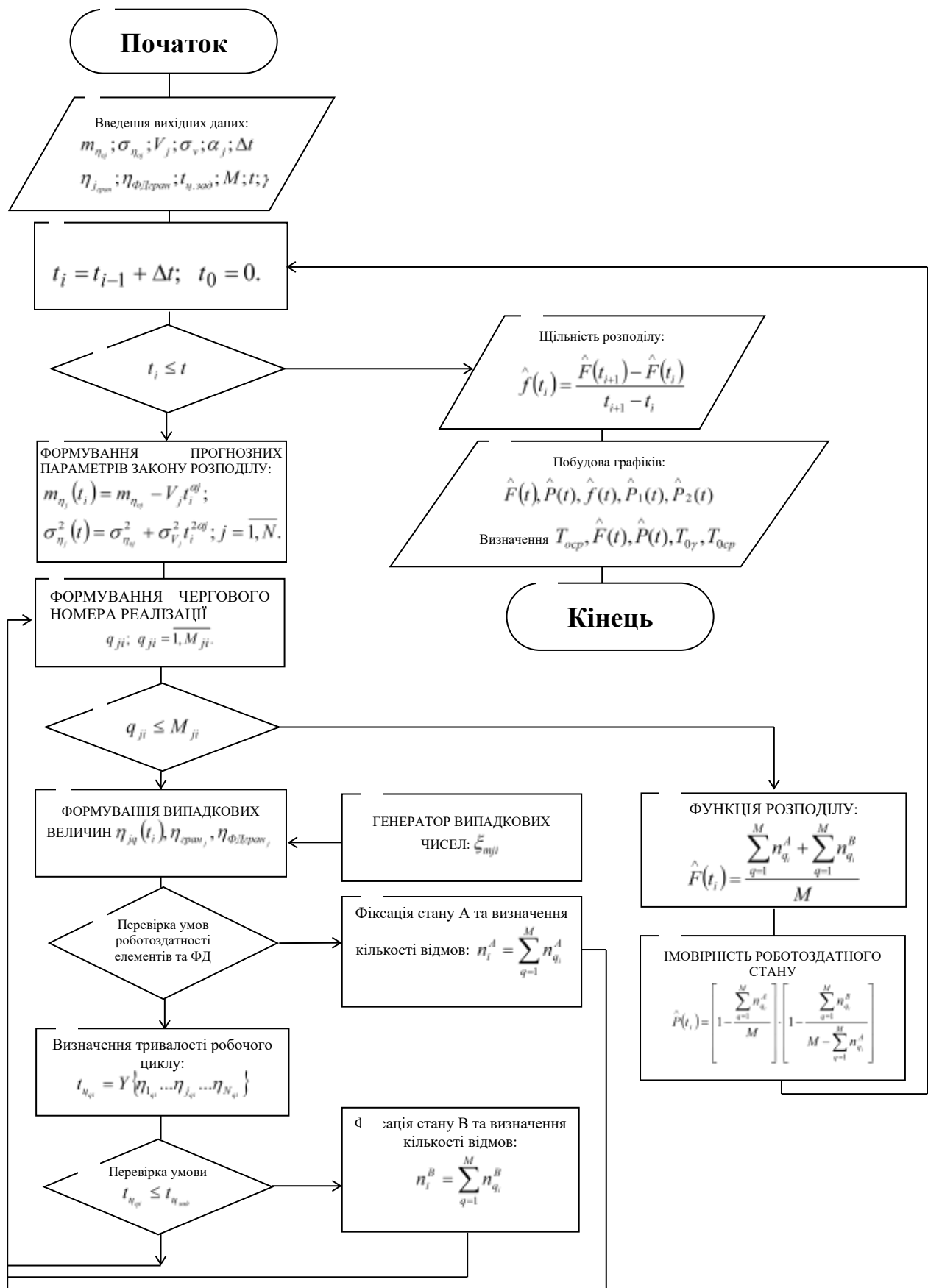


Рис. 3. Узагальнена блок-схема алгоритму визначення показників надійності гідроприводу

Якщо при  $q$ -ій реалізації змодельовані значення  $\eta_{jq_i}$  хоча б одного елемента виходять за межі області роботоздатного стану ( $\eta_{jq_i} < \eta_{jГРАН}$ ), то фіксується порушення умови роботоздатності  $j$ -го елемента. Тобто настає стан параметричної відмови всього гідроприводу при даній  $q$ -ій реалізації (стан А) як системи із послідовно з'єднаними елементами. Після запам'ятовування стану А цикл перевірки умов роботоздатності всіх елементів повторюється для наступних реалізацій (при  $q+1$ )  $\eta_{j(q+1)i}$  і т.д.

В другому випадку (рис. 1, схема б + варіант 1) перевірка умов роботоздатності елементів ГП здійснюється аналогічно, але замість детермінованого значення граничного ОККД відповідного елемента підставляється його випадкове значення  $\eta_{гранji}$ .

При реалізації третього способу розрахунку (рис. 1, схема а + варіант 2) для змодельованих випадкових значень ОККД окрім перевірки умов роботоздатності елементів проводиться перевірка умов роботоздатності функціональних дільниць:

$$\begin{cases} \forall j \eta_{Грjq_i} > \eta_{Гранj} \\ \forall j \eta_{Гцjq_i} \cdot \eta_{Грjq_i} > \eta_{ФДгранj} \end{cases} \quad (12)$$

Четвертий варіант програми (схема а + варіант 1) дозволяє задавати випадкові граничні значення ФД та елементів, а порівняння (12) здійснюється із їх генерованими випадковими граничними значеннями  $\eta_{ФДгранj}$  та  $\eta_{Гранj}$ .

Незалежно від варіанту, при порушенні хоча б однієї умови роботоздатності фіксується параметрична відмова гідроприводу при  $q$ -ій реалізації в момент часу  $t_i$  (стан А).

Після фіксації відмови цикл перевірки заданих умов роботоздатності повторюється для наступних реалізацій.

В разі одночасного збереження всіх умов роботоздатності елементів та ФД вважається, що гідропривід ОЕ відповідає роботоздатному стану (стану  $\bar{A}$ ) при заданих граничних значеннях діагностичних параметрів елементів та ФД. {тобто при стані  $\bar{A}$  ( $\varphi_{1q_i} > 0$ )  $\cap$  ...  $\cap$  ( $\varphi_{jq_i} > 0$ )  $\cap$  ...  $\cap$  ( $\varphi_{Nq_i} > 0$ )}. І тільки при цій умові (при стані  $\bar{A}$ ) визначається рівень ефективності функціонування всього ГП за інтегральним показником – тривалістю робочого циклу  $t_{ц}$  екскавації. Для цього значення параметрів  $\eta_{jq_i}$  підставляються у формулу моделі залежності  $t_{цq_i}$  від значень ОККД кожного із гідравлічних елементів:

$$t_{цq}(t_i) = Y \{ \eta_{1q}(t_i), \dots, \eta_{jq}(t_i), \dots, \eta_{Nq}(t_i) \} \quad (13)$$

Далі здійснюється порівняння одержаної випадкової величини тривалості циклу  $t_{цq_i}$  із заданим або нормативним граничним значенням  $t_{цзад}$ . В разі невідповідності умови збереження заданого рівня ефективності функціонування ( $W_{qi} = t_{цq_i} - t_{цзад} < 0$ ) фіксується параметрична відмова гідроприводу в цілому (стан В). Якщо  $W_{qi} > 0$ , то ГП вважається роботоздатним (стан В). Після цього цикл перевірки умов роботоздатності повторюється для наступних реалізацій  $\eta_{jq_i}$ .

Процес моделюється для всієї на початку заданої множини реалізацій  $q_i = \overline{1, M}$ . При  $q_i \geq M$  цикл моделювання для моменту часу  $t_i$  завершується і підраховується загальна кількість відмов (станів А та В) в інтервалі  $\Delta t_i$ :

$$n_i^A = \sum_{q=1}^M n_{qi}^A; \quad n_i^B = \sum_{q=1}^M n_{qi}^B \quad (14)$$





Для перерізу часу  $t_i$  в інтервалі  $(\Delta t = t_i - t_{i-1})$  визначаються значення функцій розподілу  $\hat{F}(t_i)$ , яка дорівнює імовірності відмови  $Q(t_i)$ , та імовірності збереження роботоздатного стану  $\hat{P}(t_i)$  гідроприводу:

$$\hat{F}(t_i) = \frac{\sum_{q=1}^M n_{qi}^A + \sum_{q=1}^M n_{qi}^B}{M} = Q(t_i) \quad (15)$$

$$\hat{P}(t_i) = \left[ 1 - \frac{\sum_{q=1}^M n_{qi}^A}{M} \right] \left[ 1 - \frac{\sum_{q=1}^M n_{qi}^B}{M - \sum_{q=1}^M n_{qi}^A} \right] \quad (16)$$

В даному випадку складові формули (16) оцінки імовірності збереження роботоздатності ГП відповідають складовим виразу (10)  $P_1(\cdot)$  та  $P_2(\cdot)$ . Тобто:

$$P_1\{W < 0; t_i / (\varphi_1 > 0) \cap \dots \cap (\varphi_j > 0) \cap \dots \cap (\varphi_N > 0); t_i\} = 1 - \frac{\sum_{q=1}^M n_{qi}^B}{M - \sum_{q=1}^M n_{qi}^A}, \quad (17)$$

$$P_2\{(\varphi_1 > 0) \cap \dots \cap (\varphi_j > 0) \cap \dots \cap (\varphi_N > 0); t_i\} = 1 - \frac{\sum_{q=1}^M n_{qi}^A}{M}. \quad (18)$$

Середнє квадратичне відхилення оцінки значень  $\hat{P}(t_i)$  розраховується за формулою:

$$\sigma_{\hat{P}} = \sqrt{\frac{\hat{P}(1 - \hat{P})}{M}}. \quad (19)$$

Після отримання результату розрахунку  $\hat{P}(t_i)$  перевіряється умова:

$$\xi \leq \xi_{\text{зад}}, \quad (20)$$

де  $\xi$  та  $\xi_{\text{зад}}$  - відповідно розрахункове та задане значення відносної (або абсолютної) точності результату. При виконанні умови (20) процес моделювання припиняється, в іншому випадку – відбувається перехід до чергового циклу генерування реалізацій.

Поточне значення відносної похибки  $\xi$  розраховується за формулою:

$$\xi = t_{\beta} \sqrt{\frac{1 - \hat{P}}{M \cdot \hat{P}}}, \quad (21)$$

де  $t_{\beta} = \sqrt{2}\Phi^{-1}(\beta)$  - функція, зворотна функції Лапласа (квантіль нормального розподілу, який відповідає довірчій імовірності  $\beta$ ).

При отриманні позитивного результату за умовою (20) визначається довірчий інтервал для розрахованого значення імовірності  $\hat{P}$  при відносній похибці  $\xi$  та заданій довірчій імовірності  $\beta$ . Розрахунок нижньої  $\underline{P}_H$  та верхньої  $\overline{P}_e$  довірчих меж проводиться за формулами:

$$\underline{P}_H = \hat{P} - t_\beta \sqrt{\frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{M}}, \quad (22)$$

$$\overline{P}_e = \hat{P} + t_\beta \sqrt{\frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{M}}. \quad (23)$$

Після цього імітаційний процес і розрахунки  $P_1(\cdot)$ ,  $P_2(\cdot)$ ,  $\hat{P}(t_i)$  та  $\hat{F}(t_i)$  для моменту часу  $t_i$  завершуються і моделювання розпочинається спочатку в кожному із наступних періодів часу  $t_{i+1}$ ,  $t_{i+2}$  і т.д. через шаг  $\Delta t$ .

Для кожного моменту часу  $t_i$  визначаються значення щільності імовірності розподілу  $\hat{f}(t_i)$  наробітку до відмови:

$$\hat{f}(t_i) = \frac{\hat{F}(t_{i+1}) - \hat{F}(t_i)}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\hat{P}(t_i) - \hat{P}(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i}. \quad (24)$$

Визначена за формулою (24) щільність розподілу характеризує щільність умовного розподілу  $f(t/\forall \varphi_j > 0, W > 0)$  величини наробітку  $t$  до відмови гідроприводу при заданих умовах роботоздатності для заданих граничних значень ОККД  $\eta_{гран.j}$ ,  $\eta_{ФДгран.j}$  та граничного рівня ефективності його функціонування  $t_{ц.зад}$ .

Середній наробіток до відмови та його довірчий інтервал розраховується за формулами:

$$T_{o\text{ ср}} = \int_0^\infty t \cdot f(t/\forall \varphi_i > 0, W > 0) dt = \int_0^\infty P(t) dt, \quad (25)$$

$$\int_0^\infty \underline{P}(t) dt \leq T_{o\text{ ср}} \leq \int_0^\infty \overline{P}(t) dt. \quad (26)$$

Гамма-процентний наробіток  $T_{0\gamma}$  до відмови ГП можна визначити із співвідношень:

$$P = P_r \{ \forall \varphi_j(t_\gamma) > 0; W(t_\gamma) > 0 \} \geq 0,01\gamma, \quad (27)$$

$$\text{або } P(t_\gamma) = \int_{t_\gamma}^\infty f(t/\forall \varphi_i > 0, W > 0) dt = 0,01\gamma. \quad (28)$$

Оцінка гамма-процентного наробітку знаходиться імітаційним моделюванням і приймається як те значення  $t_\gamma$ , для якого виконується рівність (28)  $P(t_\gamma) = 0,01\gamma$ .



За отриманими результатами будуються графіки функцій  $\hat{F}(t) = \hat{Q}(t), \hat{P}(t), \hat{P}_1(t), \hat{P}_2(t), \hat{f}(t)$ .

**Висновок.** Розроблений та запропонований метод оцінки та прогнозування показників надійності гідроприводу одноківшового екскаватора дає можливість максимально або в більш повній мірі враховувати специфічні механізми формування параметричних відмов ГП, його функціональні та конструктивні особливості, стохастичну залежність між параметричними відмовами елементів ГП та його ефективністю функціонування в цілому.

Модельовання параметричних відмов за допомогою методу Монте-Карло дозволить отримувати більш реальні оцінки показників надійності, дасть можливість прогнозувати та керувати ними в залежності від умов експлуатації та заданих умов роботоздатності ГП одноківшових екскаваторів і інших гідрофікованих будівельних машин (кранів, навантажувачів і т.п.).

### Література

1. Лесько В.І. Імовірнісні моделі роботоздатності функціональних дільниць гідроприводів одноківшових екскаваторів / Техніка будівництва. Науково-технічний збірник. – 1999. – №5. – С.14–19.
2. Лесько В.І. Метод оцінки показників надійності гідроприводів одноківшових екскаваторів із застосуванням методу Монте-Карло / Гірничі, будівельні, дорожні, та меліоративні машини. – 1998. – № 52.
3. Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах. – М.: Физматгиз, 1961. – 226 с.

### REFERENCE

1. Les'ko, V.I. (1999). Imovirnisni modeli robotozdatnosti funktsional'nykh dil'nyts' hidropriyvodiv odnokivshovykh ekskavatoriv [Probabilistic performance models of functional units of hydraulic drives of single-excavator excavators]. *Tekhnika budivnytstva [Construction Engineering]*, 5, 14-19. – (in Ukrainian).
2. Les'ko, V.I. (1998). Metod otsinky pokaznykiv nadiynosti hidropriyvodiv odnokivshovykh ekskavatoriv iz zastosuvannyam metodu Monte-Karlo [Method of estimation of safety indexes of hydraulic drives of single-excavator excavators using the Monte-Carlo method]. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and reclamation machines]*, 52. – (in Ukrainian).
3. Buslenko, N.P., Shreyder, U.A. (1961). *Metod statystycheskykh yspytanyy (Monte-Karlo) i ego realizatsyya na tsyfrovyykh vychyslytel'nykh mashynakh [Method of statistical tests (Monte Carlo) and its implementation on digital computers]*. Moscow: Fyzmathyz. – (in Russian)

Надійшло до редакції 12.04.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кузьминець М.П.