УДК 621.875.322-82

ВИКОРИСТАННЯ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

Г.В. Гетун[1],
канд. техн. наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій

В.І. Лесько[1],
доцент, доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів

І.С. Безклубенко[1],
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

О.І. Баліна[1],
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

Ю.П. Буценко[2],
канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри математичного аналізу та теорії ймовірності

[1]*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

[2]*НТТУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.262-273

Вирішення технічних задач по забезпеченню роботоздатності машин в значній мірі визначається ефективністю теоретичних і прикладних розробок в області оцінок і прогнозування показників їх надійності. Мета роботи полягає в розробці моделей роботоздатності та параметричної надійності, які змогли би враховувати специфіку устрою елементів гідроприводів машин. Використання запропонованого в роботі загального методологічного підходу до аналізу відмов та побудови моделей роботоздатності і безвідмовності надає можливість отримання більш адекватних моделей надійності гідроприводів машин, так як вони в більш повній мірі враховують специфіку устрою та функціонування елементів гідроприводу, їх взаємозв'язок та особливості формування параметричних відмов. А це дасть змогу отримувати більш реальні і точніші результати оцінки показників надійності гідроприводів як будівельних, так і інших гідрофікованих машин. Вони не вичерпують всіх можливих варіантів моделей, які можуть мати місце при аналізі надійності гідроприводів машин, але в той же час вони в певній мірі розширюють та уточнюють коло вже відомих моделей надійності.

Специфічними в плані формування параметричних відмов є такі послідовно з'єднані між собою з точки зору компонування гідроелементи, як робочі секції гідророзподільників та гідроциліндри, які входять до підсистем ГП і утворюють так звані функціональні дільниці (ФД). Досягнення граничного стану ФД $\eta_{ФД\,гр}$ є сумісним результатом об'єднаного випадкового процесу зміни об'ємних ККД $(\eta_{гр},\eta_{гц})$ цих елементів, а технічний стан ФД оцінюється узагальненим ОККД, що дорівнює добутку ОККД послідовно з'єднаних елементів: $\varphi_{ФД}=\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}-\eta_{ФДгр}>0$.

В такому разі імовірність збереження роботоздатності ФД буде: $P=P\left\{\varphi(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц})-\eta_{ФДгр}>0\right\}$.

Обробка діагностичної інформації та дослідження надійності ГП в реальних умовах їх експлуатації показали, що розподіл ОККД гідроелементів із достатньою мірою узгодженості може бути описаний за декількома теоретичними законами. Розглянуто випадкі, коли ОККД секції гідророзподільника та гідроциліндра розподілені за гамма-розподілом та експоненціальним розподілом.

У роботі запропонована методика моделювання та розробки моделей працездатності та параметричної надійності гідроприводів будівельних машин, які змогли би враховувати специфіку структурного устрою і функціонування гідроприводу та механізми втрати їх працездатності і формування відмов. Побудовано дві стохастичні моделі для випадків експоненціального та гамма- розподілу діагностичних параметрів секції гідроприводів, які можна використовувати для більш реальних і точніших оцінок показників безвідмовності гідроприводів та будуть корисними дослідникам і експлуатаційникам сучасних будівельних машин.

Ключові слова: надійність, імітаційне моделювання, будівельні машини, прогнозування, надійність машин, гідропривід, функція розподілу, щільність, статистичне дослідження.

Вступ. Успішність вирішення практичних задач по забезпеченню високих показників працездатності та надійності будівельних машин в значній мірі визначається ефективністю теоретичних і прикладних розробок в області оцінок і прогнозування показників надійності машин. Поява на сучасному ринку складних гідрофікованих будівельних машин породжує необхідність пошуку нових нетрадиційних шляхів і методів оцінки та прогнозування надійності гідроприводів таких машин. Гідроприводи сучасних будівельних машин, зокрема одноківшових екскаваторів, автокранів, навантажувачів та інших машин, є складними технічними системами з мінливими під час роботи структурами, складними тісними взаємозв'язками та специфічними механізмами формування відмов. А тому проблеми забезпечення надійності таких машин на всіх етапах (проектування, виробництва та експлуатації) є актуальними і досить складними. Важливе значення при цьому надається адекватності моделей надійності, на основі яких проводиться оцінка показників надійності гідроприводів.

Мета роботи полягає в розробці таких моделей працездатності та параметричної надійності гідроприводів будівельних машин, які змогли би враховувати специфіку структурного устрою та функціонування гідроприводу і механізми втрати їх працездатності та формування відмов.

Виникнення параметричних відмов гідравлічних елементів гідроприводу будівельних машин при їх експлуатації є наслідком порушення певних умов працездатності, які характеризують здатність гідроприводу зберігати працездатність у відповідності до заданих параметрів протягом певного часу. Для основних елементів, які лімітують надійність гідроприводу, умови збереження працездатності задаються і характеризуються невиходом об'ємного коефіцієнта корисної дії (ОККД) η_j за певний встановлений граничний рівень $\eta_{jгр}$.

Порушення умови $\varphi_j = \eta_j - \eta_{jгр} > 0$ розглядається як параметрична відмова окремо взятого j-го елементу, імовірність виникнення якої при заданому граничному значенні об'ємного ККД $\eta_{j гр}$ визначається за виразом:

$$P\left\{\varphi_j = \eta_j - \eta_{j\ гр} < 0\right\} = \int_0^{\eta_{jгр}} f(\eta_j) d\eta,$$

де $f(\eta_j)$ – щільність імовірності розподілу об'ємного ККД (ОККД) елементу.

В гідроприводах машин, наприклад, одноківшових екскаваторів, специфічними в плані забезпечення умов працездатності та формування параметричних відмов є такі важливі складові, що послідовно з'єднані між собою з точки зору конструкції та компонування гідравлічних елементи, а саме робочі секції гідравлічних розподільників та гідроциліндри, які входять до підсистем приводу стріли, приводу рукояті та приводу ковша і утворюють так звані функціональні дільниці (ФД) за схемами під'єднання елементів (рис. 1).

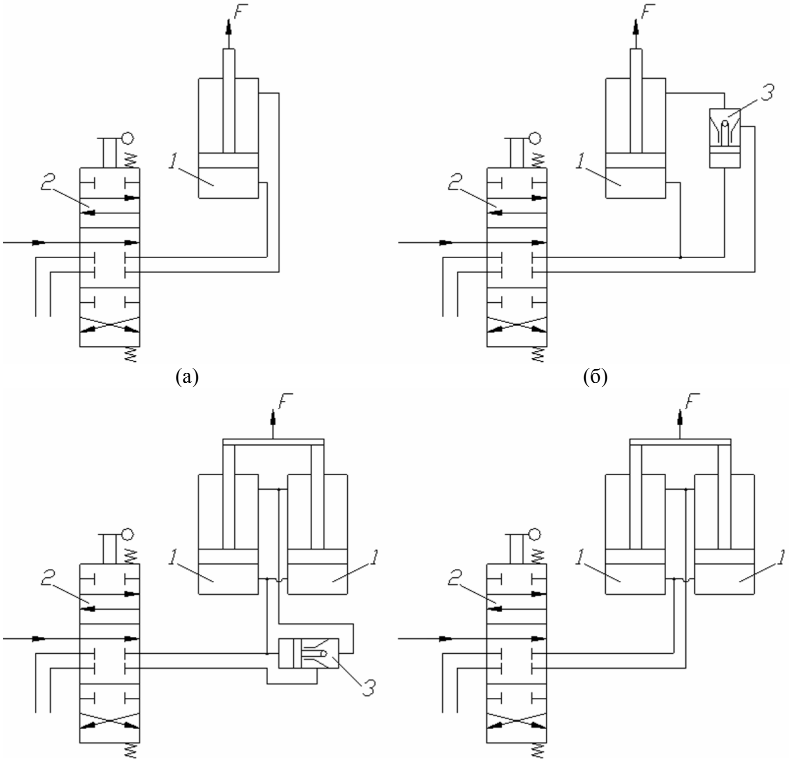

Рис. 1. Гідравлічні схеми з'єднання гідроциліндрів на функціональних ділянках: (а) – послідовна; (б) – послідовна із зворотнім клапаном; (в) – паралельна із зворотнім клапаном; (г) – паралельна; *1* – гідроциліндр; *2* – гідравлічний розподільник; *3* – гідравлічний замок або клапан керований зворотній; *F* – сила

В гідроприводах автокранів, навантажувачів, бульдозерів та інших машин подібні схеми з’єднань мають місце в підсистемах підйому та висунення стріли, виносних опорах навісного обладнання тощо. З точки зору конструктивного улаштування та компонування, з’єднання гідравлічних елементів між собою на ділянках гідроприводу прийнято вважати послідовним, але з точки зору оцінювання надійності та структурно-логічних схем їх не завжди можна віднести до загальноприйнятих в теорії надійності послідовних з’єднань елементів з причини специфічних механізмів формування параметричних відмов. Саме тому з’єднання гідравлічних елементів між собою викликають певний інтерес для дослідження і розробки відповідних методів оцінки показників їх надійності.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо можливість отримання моделей працездатності функціональної дільниці, яка скомпонована за схемою (рис. 1 (а)). Так як гідравлічні елементи функціональної ділянки за цією гідравлічною схемою з’єднані послідовно, то досягнення граничного стану функціональною дільницею і втрата працездатності гідроприводу є сумісним результатом об’єднаного випадкового процесу зміни технічного стану обох елементів, граничний стан яких виражається через загальний граничний об’ємний ККД $\eta_{ФДгр}$. Технічний стан функціональної ділянки оцінюється узагальненим ОККД, який дорівнює добутку ОККД послідовно з’єднаних елементів:

$$\eta_{ФД} = \eta_{гр} \cdot \eta_{гц},$$

де $\eta_{гр}$ – ОККД секції гідравлічного розподільника; $\eta_{гц}$ – ОККД гідроциліндра.

В такому разі умовою працездатності функціональної дільниці буде невихід значення добутку ОККД секції розподільника та гідроциліндра за граничну область:

$$\varphi_{ФД} = \eta_{гр} \cdot \eta_{гц} - \eta_{ФДгр} > 0 ,$$

а імовірність збереження працездатності функціональної дільниці запишеться так:

$$P = P\left\{\varphi(\eta_{гр} \cdot \eta_{гц}) - \eta_{ФДгр} > 0\right\} .$$

Представимо функціональну дільницю як систему двох безперервних випадкових величин $(\eta_{гр}, \eta_{гц})$ із сумісною щільністю розподілу $f(\eta_{гр}, \eta_{гц})$. Тоді її загальний технічний стан можна записати як функцію двох випадкових аргументів:

$$\eta_{ФД} = \varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) .$$

Тоді функція розподілу випадкової величини $\eta_{ФД}$ набуває виду:

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = P\left\{\eta_{ФД} = \varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) < y\right\} ,$$

де y - деяка задана величина ОККД.

ISSN 2410-2547
Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2021. № 106

Застосовуючи інтегральну формулу повної імовірності [1], отримаємо:

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int\limits_{\left[\varphi(\eta_{гр},\eta_{гц})<y,\right]} f(\eta_{гр},\eta_{гц})d\eta_{гр}\right\}d\eta_{гц}, \qquad (1)$$

або

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int\limits_{\left[\varphi(\eta_{гр},\eta_{гц})<y,\right]} f(\eta_{гр},\eta_{гц})d\eta_{гц}\right\}d\eta_{гр}, \qquad (2)$$

Об’єднуючи обидві формули (7) та (8) отримаємо:

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=\iint\limits_{\left[\varphi(\eta_{гр},\eta_{гц})<y,\right]} f(\eta_{гр},\eta_{гц})d\eta_{гц}d\eta_{гр}, \qquad (3)$$

де область інтегрування визначається із умови $\varphi(\eta_{гр},\eta_{гц})<\eta_{ФД}$.

Диференціюючи (3) за величиною $\eta_{ФД}$ знайдемо щільність розподілу випадкової величини $\eta_{ФД}$:

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=\frac{dF(y)}{d(y)}.$$

Оскільки об’ємні ККД гідравлічних розподільників та гідравлічних циліндрів є незалежними, то їх сумісна щільність розподілу буде рівна [6]:

$$f(\eta_{гр},\eta_{гц})=f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр})\cdot f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц}).$$

При цьому формули (1 – 3) мають вигляд:

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int\limits_{\left[\varphi(\eta_{гр},\eta)<y,\right]} f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр})d\eta_{гр}\right\}f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})d\eta_{гц}=$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int\limits_{\left[\varphi(\eta,\eta_{гц})<y,\right]} f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})d\eta_{гц}\right\}f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр})d\eta_{гр}.$$

Оскільки загальний об’ємний ККД функціональної дільниці $\eta_{ФД}$ визначається як добуток двох випадкових аргументів $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$, то за формулою (3) знайдемо функцію розподілу випадкової величини: $\eta_{ФД}=\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}$.

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=P(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}<y)=\iint\limits_{\left[\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}<y,\right]} f(\eta_{гр},\eta_{гц})d\eta_{гц}d\eta_{гр}=$$

$$=\int_{-\infty}^{0}\left\{\int_{y/\eta_{гр}}^{\infty} f(\eta_{гр},\eta_{гц})d\eta_{гр}\right\}d\eta_{гц}+\int_{0}^{\infty}\left\{\int_{-\infty}^{y/\eta_{гр}} f(\eta_{гр},\eta_{гц})d\eta_{гц}\right\}d\eta_{гр}. \qquad (4)$$

Або

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=\iint\limits_{[\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}<y]} dF_{\eta_{гр}}(\eta_{гр})dF_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})=\int\limits_{-\infty}^{0} dF_{гц}(\eta_{гц})\cdot\int\limits_{y/\eta_{гц}}^{\infty} dF_{гр}(\eta_{гр})+$$

$$+\int\limits_{0}^{\infty} dF_{гц}(\eta_{гц})\cdot\int\limits_{-\infty}^{y/\eta_{гц}} dF_{гр}(\eta_{гр})=\int\limits_{-\infty}^{0}\left[1-F_{\eta_{гр}}\left(y/\eta_{гц}\right)\right]dF_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})+$$

$$+\int\limits_{0}^{\infty} F_{\eta_{гр}}\left(y/\eta_{гц}\right)dF_{\eta_{гц}}(\eta_{гц}). \qquad (5)$$

Диференціюючи вирази (4) або (5) по y отримаємо щільність розподілу випадкової величини $\eta_{ФД}$:

$$f_{\eta_{ФВ}}(y)=-\int\limits_{-\infty}^{0}\frac{1}{\eta_{гр}}f\left(\eta_{гр},(y/\eta_{гр})\right)d\eta_{гр}+\int\limits_{0}^{\infty}\frac{1}{\eta_{гр}}f\left(\eta_{гр},(y/\eta_{гр})\right)d\eta_{гр}. \qquad (6)$$

Оскільки випадкові величини $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ є незалежними, то вираз (6) можна записати в вигляді:

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\left|\eta_{гц}\right|}f_{\eta_{гр}}\left(y/\eta_{гц}\right)\cdot f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})d\eta_{гц}. \qquad (7)$$

Практика діагностування будівельних машин, обробка діагностичної інформації та дослідження надійності гідроприводів будівельних машин в реальних умовах їх експлуатації показала, що випадкові величини об’ємних ККД гідроциліндрів і гідравлічних розподільників $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ можуть бути розподілені за декількома законами розподілу із достатньою мірою узгодженості із відомими теоретичними законами [9]. Тому розглянемо можливість визначення функції та щільності розподілу узагальненого об’ємного ККД функціональної дільниці $\eta_{ФД}$, як функцію добутку випадкових аргументів $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$, розподілених за деякими із можливих законів, наприклад: гамма-розподілом та експоненціальним, що не суперечить раніше проведеним дослідженням в умовах експлуатації машин.

Розглянемо перший випадок, коли діагностичні параметри секції гідравлічного розподільника та гідроциліндра розподілені за *гамма-розподілом* зі щільностями:

$$f_{\eta_{гр}}(y)=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}y^{\alpha_1-1}e^{-\beta_1 y}\text{, y>0}$$

та

$$f_{\eta_{гц}}(y)=\frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_2-1}e^{-\beta_2 y}\text{, y>0,}$$

де α_1,β_1 та α_2,β_2 - параметри закону розподілу об'ємного ККД гідравлічного розподільника $\eta_{гр}$ та гідроциліндра $\eta_{гц}$, відповідно.

За формулою (7) знаходимо щільність розподілу загального об'ємного ККД функціональної дільниці, як системи двох безперервних випадкових величин:

$$f\eta_{гр}=\int_0^\infty\frac{1}{\eta_{гр}}f\left(y/\eta_{гр}\right)f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр})d\eta_{гр}=$$

$$=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}\int_0^\infty\frac{1}{\eta_{гр}}\left(y/\eta_{гр}\right)\exp\left\{-\frac{\beta_1 y}{\eta_{гр}}\right\}\eta_{гр}{}^{\alpha_2-1}\exp\left\{-\beta_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гр}=$$

$$=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_1-1}\int_0^\infty\frac{1}{y}\frac{1}{y^{\alpha_1-1}}y^{\alpha_2-1}\exp\left\{-\frac{\beta_1 y}{\eta_{гр}}-\beta_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гр}=$$

$$=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_1-1}\int_0^\infty\eta^{\alpha_2-\alpha_1-1}\exp\left\{-\frac{\beta_1 y}{\eta_{гр}}-\beta_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гр}=$$

$$=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_1-1}\cdot 2\cdot\left\{\frac{\beta_1 y}{\beta_2}\right\}^{\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}}\cdot K_{\alpha_2-\alpha_1}\left(\sqrt{\beta_1\beta_2 y}\right)=$$

$$=2\cdot\frac{(\beta_1\beta_2)^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}}}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\alpha_2)}y^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}-1}\cdot\left\{\frac{\beta_1 y}{\beta_2}\right\}^{\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}}\cdot K_{\alpha_2-\alpha_1}\left(\sqrt{\beta_1\beta_2 y}\right), \quad (8)$$

де $K_{\alpha_2-\alpha_1}(\bullet)$ - модифікована функція Бесселя 2-го роду порядку (α_2-α_1) [2]:

$$\int_0^\infty x^{\nu-1}\exp\left\{-\frac{\beta}{x}-\gamma x\right\}dx=2\cdot\left\{\frac{\beta}{\gamma}\right\}^{\frac{\nu}{2}}\cdot K_\nu\left(\sqrt{\beta\nu}\right),$$

де $\mathrm{Re}\beta>0, \mathrm{Re}\gamma>0$.

Інтегруючи вираз (8), отримаємо модель надійності через імовірність збереження працездатності функціональної дільниці при заданому граничному значенні ОККД функціональної дільниці $y=\eta_{ФД\,гр}$:

$$P_{\eta_{ФД}}(y)=P\left\{(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц})>y=\eta_{ФДгр}\right\}=$$

$$=\int_{y=\eta_{ФДгр}}^{1}2\cdot\frac{(\beta_1\beta_2)^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}}}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\alpha_2)}y^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}-1}\cdot K_{\alpha_2-\alpha_1}\left(\sqrt{\beta_1\beta_2 y}\right)dy, \quad (9)$$

де $\eta_{ФДгр}$ - граничне значення узагальненого об'ємного ККД ФД.

Нехай діагностичні параметри $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ мають *експоненціальний* закон розподілу із параметрами розподілу λ_1 та λ_2, відповідно. Тоді, враховуючи формулу (7), щільність розподілу $f_{\eta_{ФД}}(y)$ буде мати вигляд:

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=\int_0^\infty \frac{1}{\eta_{гц}} f_{\eta_{гр}}\left(y/\eta_{гц}\right)\cdot f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})d\eta_{гц}=$$

$$=\int_0^\infty \frac{1}{\eta_{гц}}\lambda_1 \exp\left\{-\frac{\lambda_1 y}{\eta_{гц}}\right\}\cdot\lambda_2 \exp\left\{-\lambda_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гц}=$$

$$\lambda_1\lambda_2\int_0^\infty \frac{1}{\eta_{гц}}\exp\left\{-\frac{\lambda_1 y}{\eta_{гц}}-\lambda_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гц}=2\,\lambda_1\lambda_2\cdot K_0\left(\sqrt{\lambda_1\lambda_2 y}\right), \qquad (10)$$

де: $K_0(\cdot)$- модифікована функція Бесселя 2-го роду нульового порядку.

Якщо параметри гама-розподілу будуть прийняті такими як: $\alpha_1=\alpha_2=1$, а $\beta_1=\lambda_1, \beta_2=\lambda_2$, то формула щільності імовірності розподілу (10) є тотожною отриманій раніше формулі (7) , що підтверджує характерні особливості експоненціального і гама-розподілів та існуючий тісний взаємозв’язок між ними.

Знайдемо функцію розподілу величини $\eta_{ФД}=\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}$. Враховуючи (5), маємо:

$$F_{\eta_{ФД}}(y)=P\left(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}<y\right)=\int_0^\infty F_{\eta_{гр}}\left(y/\eta_{гц}\right)dF_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})=$$

$$=\int_0^\infty\left[1-\exp\left\{-\lambda_1\frac{y}{\eta_{гц}}\right\}\right]\cdot\lambda_2\exp\left\{-\lambda_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гц}=$$

$$=\cdot\int_0^\infty\lambda_2\exp\left\{-\lambda_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гц}-\int_0^\infty\lambda_2\exp\left\{-\left[\frac{\lambda_1 y}{\eta_{гц}}+\lambda_2\eta_{гц}\right]\right\}d\eta_{гц}=$$

$$=\cdot 1-\int_0^\infty\lambda_2\exp\left\{-\left[\frac{\lambda_1 y}{\eta_{гц}}+\lambda_2\eta_{гц}\right]\right\}d\eta_{гц}=1-2\lambda_2\sqrt{\frac{\lambda_1 y}{\lambda_2}}\cdot K_1\left(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2 y}\right)=$$

$$=1-2\sqrt{\lambda_1\lambda_2 y}\cdot K_1\left(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2 y}\right). \qquad (11)$$

В частинному випадку, якщо $\lambda_1=\lambda_2=\lambda$, то $F_{\eta_{ФД}}(y)=1-2\lambda\sqrt{y}\cdot K_1\left(2\lambda\sqrt{y}\right)$.

Враховуючи формулу (11), отримуємо імовірність працездатності ФД гідроприводу при заданому граничному значенні ОККД $y=\eta_{ФД\,гр}$, яка визначається за формулою:

$$P_{\eta_{ФД}}(y)=P_{\eta_{ФД}}\left(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y=\eta_{ФДгр}\right)=2\sqrt{\lambda_1\lambda_2 y}\cdot K_1\left(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2 y}\right)=$$

$$=2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\eta_{ФДгр}}\cdot K_1\left(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\eta_{ФДгр}}\right). \qquad (12)$$

Для решти схем під’єднання гідравлічних елементів приведених на рис.1 (б, в, г) моделі надійності функціональних дільниць гідроприводів отримуємо аналогічно, виходячи із умов збереження працездатності функціональної дільниці відповідної підсистеми. При цьому оцінку показників безвідмовності можна отримувати як за аналітичними виразами [3,4,10], так і за високоефективними в таких випадках методами статистичного (імітаційного) моделювання Монте-Карло, використаними для подібних задач та розглянутих в роботах [5,7].

Аналізуючи результати роботи - слід зазначити, що закони розподілу узагальненого об'ємного ККД означених вище функціональних дільниць гідроприводів будівельних машин істотно відрізняються від базових теоретичних законів розподілу ОККД її складових елементів – секцій гідравлічних розподільників та гідроциліндрів. Отримані імовірнісні моделі безвідмовності (9) та (12) є більш адекватними для практичного використання аніж моделі, які досі пропонувались і використовувались на практиці. Ці моделі в більш повній мірі враховують специфіку устрою та функціонування елементів гідроприводу, їх взаємозв'язок та особливості формування параметричних відмов гідроприводу і можуть використовуватися для більш реальних і точніших оцінок показників безвідмовності гідроприводів як будівельних машин (одноківшових екскаваторів, автокранів, навантажувачів, бульдозерів та ін.) так і інших гідрофікованих машин та устаткування.

Висновки. Отримані моделі мають суттєву відмінність від існуючих на даний час та відомих за літературними джерелами моделей надійності, що вказує на їх новизну, оригінальність та пріоритетність. Вони не вичерпують всіх можливих варіантів моделей, які можуть мати місце при аналізі функціонування і надійності гідроприводів будівельних машин, але в той же час вони значно розширюють та уточнюють коло вже відомих моделей надійності машин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория вероятности и ее инженерные приложения. - М.: Наука. 1988. – 480 с.
2. *Федоренко Н.Д., Баліна О.І., Безклубенко І.С.* Теорія ймовірностей та математична статистика. Навчальний посібник з грифом МОН України./№14/18-Г-607 від 24.04.2007р – К.: КНУБА. 2007.–104 с.
3. *Лесько В.І.* Імовірнісні моделі роботоздатності функціональних дільниць гідроприводів одноківшових екскаваторів // Техніка будівництва. Випуск № 5, м. Київ, КНУБА, 1999 р.
4. *Гетун Г.В.* Дифузійні процеси з накопичувальними характеристиками при експлуатації будівель / Гетун Г.В., Буценко Ю.П., Баліна О.І., Безклубенко І.С., Соломін А.В. // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2019. №102. – С. 243-252.
5. *Getun G.V.* Situation forecasting and dicision-making optimization based on using markov finite chains for areas with industrial pollutions / Getun G.V., Butsenko U.P., Balina O.I., Bezklubenko I.S., Labzhynsky V.A., Solomin A.V. // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2020. №104.-.P.164-174.
6. *Лесько В.І., Безклубенко І.С., Клименко М.О.* Специфічні моделі робото здатності та параметричної надійності гідроприводів машин//XIII Міжнародна наукова конференція «Наука і освіта», 4-13 січня 2019 р., Хайдусобосло, Венгрія.,с.7-11.
7. *Sandmann K., Zondermann D.* Interest rate options. Geld, Banken, Versiherungen. Karlsruhe, ed. W. Heilman. -1992.:P. 739-760.
8. *Oksendal, Berndt K.* Stochastic differential equations. An Introduction with application./ Berlin: Springer. 2010. - 379 p.

9. *Лесько В.І.* Закони розподілу та моделі надійності гідроприводу як функції від розподілу добутку випадкових діагностичних параметрів // Техніка будівництва. Випуск №10, Академія будівництва України, м. Київ, КНУБА, 2001р.
10. *Лесько В.І.* Моделювання параметричних відмов гідравлічних екскаваторів з урахуванням ефективності їх функціонування при прогнозуванні та оцінці показників надійності // Техніка будівництва. Випуск № 9, Академія будівництва України, м. Київ, КНУБА, 2001р.

REFERENCES

1. *Ventzel' E. S., Ovcharov L.A.* Theory of probabilities and ergineering applications. - M.: Science. 1988. – 480 p.
2. *Fedorenko N.D., Balina O.I., Bezklubenko I.S.*Theory of probabilities and mathematical statistics. -. K.: KNUBA, 2007.–.104 p.
3. *Les'ko V.I.*. Probasinous models of robotics of functional hydrodrive stations of single-wheelers excavators // Construction technique. № 5, Kyiv, KNUBA, 1999
4. *Getun G.V.*.Diffusion processes with cumulative characteristics during the operation of buildings / Getun G.V., Butsenko Yu.P., Balina O.I., Bezklbenko I.S., Solomin A.V. // Resistance of materials and theory of structures. – 2019. № 102. – P. 243-252.
5. *Getun G. V.* Situation forecasting and dicision-making optimization based on using markov finite chains for areas with industrial pollutions /Getun G. V., Butsenko U. P., Balina O.I., Bezklubenko I. S., Labzhynsky V. A., Solomin A. V. // Resistance of materials and theory of structures. – 2020. № 104.-.P.164-174.
6. *Les'ko V.I., Bezklubenko I.S., Klymenko M.O.* Specific models of robotic ability and parameters reliability of hydraulic drive machines//XIII International Scientific Conference "Science and Education", January 4-13, 2019 p., Hajdúszoboszló, Hungary.,p.7-11.
7. *Sandmann K., Zondermann D.* Interest rate options.Geld, Banken, Versiherungen. Karlsruhe, ed. W. Heilman. -1992.:P.-. 739-760.
8. *Oksendal, Berndt K.* Stochastic differential equations. An Introduction with application. / Berlin: Springer. 2010. - 379 p.
9. *Les'ko V.I.* Laws of distribution and model of reliability of hydraulic drive as a function from the distribution of random diagnostic parameters // Construction technique. № 10, Academy of Construction of Ukraine, Kyiv, KNUBA, 2001
10. *Les'ko V.I.* Modeling of parametersal failures of hydraulic excavators taking into account the effectiveness of their functioning in the forecasting and evaluation of reliability indicators // Construction technique.№ 9, Academy of Construction of Ukraine, Kyiv, KNUBA, 2001.

Стаття надійшла 4.04.2021 р.

Getun G.V., Les'ko V.I., Bezklubenko I.S., Balina O.I., Butsenko Y.P.

STOCHASTIC MODELS FOR ENSURING PARAMETRIC RELIABILITY OF THE CONSTRUCTION MACHINES

The solution of technical problems to ensure the working capacity is largely determined by the effectiveness of theoretical and applied developments in an area of estimation and prediction of their reliability indicators. An effective approach to the analysis of failures and the development of operability and parametric reliability models provides an opportunity to obtain more adequate models of reliability of hydraulic drives of machines, as they more fully take into account the specifics of the structure and functioning of the hydro drive elements of construction machines, their relationships and features of the formation of parameters failures. And this will allow to get more real and accurate results of estimation of reliability indicators of hydraulic drives of both construction and other hydraulic machines. They do not exhaust all possible variants of models that can take place when analyzing the reliability of hydraulic drives of machines, but at the same time they to a certain extent extend and refine the set of known reliability models.

Specific in terms of formation of parametrical failures are such consistently connected in terms of the layout of hydraulic elements, as working sections of hydraulic distributors and hydraulic cylinders, which are part of the subsystems of GPs and form the so-called functional areas (FA). Reaching the FA limit $\eta_{ФД\ гр}$ is a compatible result of the combined random process of evolution of the volumetric efficiency JCUA $(\eta_{гр}, \eta_{гц})$ these elements, and the technical condition of the FA is estimated to be generalized by the JCUA, which equals the product of the JCUA of consecutively connected elements: $\varphi_{ФД} = \eta_{гр} \cdot \eta_{гц} - \eta_{ФДгр} > 0$.

In this case, the probability of maintaining the capacity of the FA will be: $P = P\left\{\varphi(\eta_{гр} \cdot \eta_{гц}) - \eta_{ФДгр} > 0\right\}$.

The processing of diagnostic information and the study of the reliability of GPs in real conditions of their operation showed that the distribution of JCUD hydraulic elements with a sufficient degree of consistency can be described under several theoretical laws. It is considered when the JCUA sections of the hydraulic distributor and hydraulic cylinder are distributed by gamma distribution and exponential distribution.

The use of the general methodological approach to the analysis of failures and the construction of models of operability and parametric reliability provides an opportunity to obtain more adequate models of reliability of hydraulic drives of machines, as they more fully take into account the specifics of the structure and functioning of the hydraulic drive elements, They don't exhaust all possible models that can take place when analyzing the reliability of hydraulic drives, but at the same time they are to some extent expanding and refining the range of already known models of reliability.

Keywords: reliability, simulation modeling, construction machines, forecasting, hydraulic drive, distribution function, density, statistical research.

Гетун Г.В., Лесько В.И., Безклубенко И.С., Балина Е.И., Буценко Ю.П.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Предложена методика моделирования и разработки модели работоспособности и параметрической надежности гидроприводов строительных машин, которые могли бы учитывать специфику устройства и функционирования гидропривода, механизмы утраты их работоспособности и появления отказов. Построено две вероятностные модели, для случаев экспоненциального и гамма- распределения диагностических параметров секции гидроприводов, которые могут использоваться для более точных и реальных оценок безотказности гидроприводов и будут полезны исследователям, разработчикам и эксплуатационщикам современных строительных машин.

Ключевые слова: надежность, имитационное моделирование, строительные машины, прогнозирование, гидропривод, функция распределения, плотность, статистическое исследование.

УДК 621.875.322-82

Гетун Г., Лесько В., Безклубенко І., Баліна О., Буценко Ю. **Використання стохастичних моделей для забезпечення параметричної надійності будівельних машин** // Опір матеріалів та теорія споруд: Наук.-техн. збірник. - К.: КНУБА, 2021. – Вип. 106. - С. 262-273.

У статті пропонується методика моделювання та розробки моделей працездатності параметричної надійності гідроприводів будівельних машин, яка буде корисною дослідникам і експлуатаційникам сучасних будівельних машин.

Іл. 1. Бібліогр. 10 назв.

UDC 621.875.322-82
Getun G., Les'ko V., Bezklubenko I., Balina O., Butsenko Y. **Stochastic models for ensuring parametric reliability of the construction machines** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2021. – Issue 106. – P. 262-273.

The paper proposes a method of modeling and development of models of performance of parametric reliability of hydraulic drives of construction machines, which will be useful for researchers and operators of moder construction machines.
Fig. 1. Ref. 10.

Автор(вчена ступінь, вчене звання, посада): *кандидат технічних наук, професор кафедри архітектурних конструкцій КНУБА, Гетун Галина В'ячеславівна*
Адреса робоча: *03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ГЕТУН Галині В'ячеславівні*
Робочий телефон +38(044)245-
Мобільний телефон. *+38(067)320-11-93*
E-mail: GalinaGetun@ukr.net
ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-3317-3456

Автор(вчена ступінь, вчене звання, посада): *доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів, Лесько Віталій Іванович*
Адреса робоча: *03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури , ЛЕСЬКУ Віталію Івановичу*
Робочий телефон *+38(044)245-04-42;*
Мобільний телефон. *+38(067)136-61-13;*
E-mail: vitalles1@i.ua
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3510-1365

Автор(вчена ступінь, вчене звання, посада): *кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики. Безклубенко Ірина Сергіївна*
Адреса робоча: *03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, БЕЗКЛУБЕНКО Ірині Сергіївні*
Робочий телефон *+38(044)245-04-02;*
Мобільний телефон. *+38(066)794-01-84*
E-mail: i.bezklubenko@gmail.com
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9149-4178

Автор(вчена ступінь, вчене звання, посада): *кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики. Баліна О.І.*
Адреса робоча: *03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, Баліній Олені Іванівні*
Робочий телефон +38(044)245-04-02
Мобільний телефон. +38(066)937-83-73
E-mail: elena.i.balina@gmail.com
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6925-0794

Автор(вчена ступінь, вчене звання, посада): *кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичного аналізу та теорії ймовірності НТТУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Буценко Юрій Павлович*
Адреса робоча: *03056 Україна, м. Київ, проспект Перемоги 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», БУЦЕНКУ Юрію Павловичу*
Робочий телефон *+38(044)236-79-89*
Мобільний телефон. *+38(066)937-83-73*
E-mail: elena.i.balina@gmail.com
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4806-9587