УДК 621.875.322-82

В.І. Лесько, асистент КНУБА

ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ТА МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ГІДРОПРИВОДУ ЯК ФУНКЦІЇ ВІД РОЗПОДІЛУ ДОБУТКУ ВИПАДКОВИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

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 по параметру "внутрішня герметичність", умови роботоздатності характеризуються невиходом об'ємного ККД η_j за певний встановлений граничний рівень $\eta_{j\,\text{гран.}}$

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

$$P\{\varphi_j = \eta_j - \eta_{j_{\text{ГРАН}}.} < 0\} = \int_0^{\eta_{j\text{ГРАН}}} f(\eta_j) d\eta, \qquad (1)$$

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

Специфічними в плані задання умов роботоздатності та формування параметричних відмов гідроприводів виступають такі послідовно з'єднані між собою з точки зору конструкції та компонування гідроелементи, як робочі секції гідророзподільників 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, приведених на рис.1.

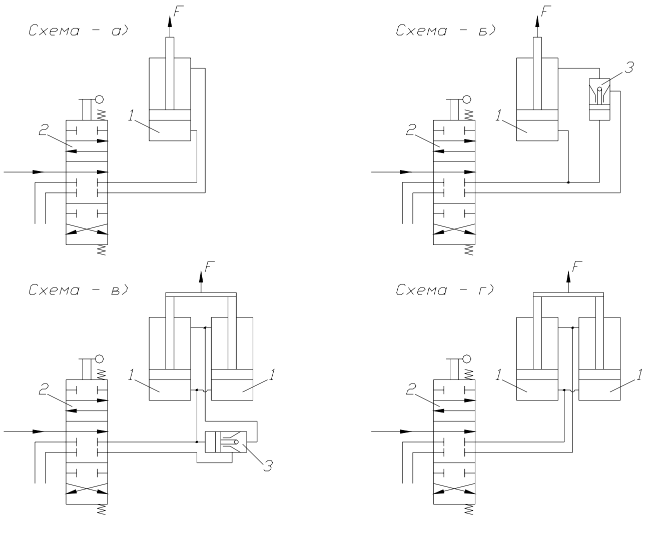

Рис. 1. Гідравлічні схеми під'єднання гідроциліндрів в функціональних дільницях: 1-гідроциліндр; 2–гідророзподільник, 3–гідрозамок або клапан керований зворотній

Розглянемо можливість отримання моделей роботоздатності ФД, яка зкомпонована за схемою *а* (рис. 1).

Так як вказані гідроелементи в гідросхемі ФД з'єднані послідовно, то можна припустити, що збільшення внутрішніх витоків в кожному із них в однаковій мірі впливає на просідання штока та формування вказаної відмови. Таким чином, досягнення граничного стану функціональної дільниці є загальним результатом об'єднаного стохастичного процесу зміни технічного стану обох елементів, граничний стан яких виражається через загальний граничний об'ємний ККД $\eta_{ФД_{\text{ГРАН}}}$. Технічний стан ФД при цьому буде оцінюватися узагальненим ОККД

$$\eta_{ФД} = \eta_{гр} \cdot \eta_{гц}, \qquad (2)$$

де $\eta_{гр}$ - ОККД секції гідро розподільника; $\eta_{гц}$ - ОККД гідроциліндра.

В такому випадку умовою роботоздатності функціональної дільниці буде невихід значення добутку ОККД секції розподільника та гідроциліндра за граничну область

$$\varphi_{ФД} = \eta_{гр} \cdot \eta_{гц} - \eta_{ФД_{гран}} > 0, \tag{3}$$

а імовірність збереження роботоздатності ФД запишеться так

$$P = P\{\varphi(\eta_{гр} \cdot \eta_{гц}) - \eta_{ФДгран} > 0\}. \tag{4}$$

Для визначення показників безвідмовності функціональної дільниці представимо її як систему двох безперервних випадкових величин ($\eta_{гр}, \eta_{гц}$) із сумісною щільністю розподілу $f(\eta_{гр}, \eta_{гц})$. Загальний технічний стан ФД запишемо як функцію двох випадкових аргументів $\eta_{ФД} = \varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц})$. (5)

Функція розподілу випадкової величини $\eta_{ФД}$ запишеться так

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = P\{\eta_{ФД} = \varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) < y\}, \tag{6}$$

де y - деяка задана величина ОККД.

Застосовуючи інтегральну формулу повної імовірності, одержимо

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{[\varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) < y]} f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) d\eta_{гр} \right\} d\eta_{гц}, \tag{7}$$

або

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{[\varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) < y]} f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) d\eta_{гц} \right\} d\eta_{гр}. \tag{8}$$

Об’єднуючи обидві формули (7) та (8) запишемо

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = \iint_{[\varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) < y]} f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) d\eta_{гр} d\eta_{гц}, \tag{9}$$

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

Диференціюючи (9) за величиною $\eta_{ФД}$ знайдемо щільність розподілу випадкової величини $\eta_{ФД}$

$$f_{\eta_{ФД}}(y) = \frac{dF(y)}{d(y)}. \tag{10}$$

Оскільки об’ємні ККД гідророзподільників та гідроциліндрів є незалежними, то їх сумісна щільність розподілу рівна

$$f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) = f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр}) \cdot f_{гц}(\eta_{гц}). \tag{11}$$

При цьому формули (7 – 9) мають вигляд

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{[\varphi(\eta_{гр}, \eta\ ) < y]} f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр}) d\eta_{гр} \right\} f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц}) d\eta_{гц} = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{[\varphi(\eta_{гр}, \eta_{гц}) < y]} f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц}) d\eta_{гц} \right\} f_{\eta_{гр}}(\eta_{гр}) d\eta_{гр}. \tag{12}$$

Загальний об’ємний ККД функціональної дільниці $\eta_{ФД}$ визначається як добуток двох випадкових аргументів $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$. Тоді за формулою (9) знаходимо функцію розподілу випадкової величини $\eta_{ФД} = \eta_{гр} \cdot \eta_{гц}$

$$F_{\eta_{ФД}}(y) = P(\eta_{гр} \cdot \eta_{гц} < y) = \iint_{(\eta_{гр} \cdot \eta_{гц} < y)} f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) d\eta_{гр} \cdot d\eta_{гц} = \int_{-\infty}^{0} \left\{ \int_{y/\eta_{гр}}^{\infty} f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) d\eta_{гц} \right\} d\eta_{гр} +$$

$$+ \int_{0}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{y/\eta_{гр}} f(\eta_{гр}, \eta_{гц}) d\eta_{гц} \right\} d\eta_{гр}. \tag{13}$$

Або в іншому вигляді

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

$$=\int_{-\infty}^{0}\left[1-F_{\eta_{гр}}\left(\frac{y}{\eta_{гц}}\right)\right]dF_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})+\int_{0}^{\infty}F_{\eta_{гр}}\left(\frac{y}{\eta_{гц}}\right)dF_{\eta_{гц}}(\eta_{гц}). \tag{14}$$

Диференціюючи вирази (13) або (14) по y одержимо щільність розподілу випадкової величини $\eta_{ФД}$

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=-\int_{-\infty}^{0}\frac{1}{\eta_{гр}}f\left(\eta_{гр},\frac{y}{\eta_{гр}}\right)d\eta_{гр}+\int_{0}^{\infty}\frac{1}{\eta_{гр}}f\left(\eta_{гр},\frac{y}{\eta_{гр}}\right)d\eta_{гр}. \tag{15}$$

Оскільки випадкові величини $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ є незалежними, то вираз (15) можна записати в такому вигляді

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{|\eta_{гц}|}f_{\eta_{гр}}\left(\frac{y}{\eta_{гц}}\right)\cdot f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})d\eta_{гц}. \tag{16}$$

Випадкові величини об’ємних ККД $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ можуть бути розподілені за різними законами. Обробка статистичних матеріалів підтверджує, що частіше всього ці діагностичні параметри можуть бути розподілені за нормальним законом, логарифмічно-нормальним, законом Вейбула, Релея, гамма-розподілом, бета-розподілом, показниковим, рівномірним та дифузійними законами розподілу.

Розглянемо можливість визначення функцій та щільність розподілу узагальненого об’ємного ККД функціональної дільниці $\eta_{ФД}$, як функцію добутку випадкових аргументів $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ розподілених за деякими із згаданих законів.

Розглянемо випадок, коли діагностичні параметри секції гідророзподільника та гідроциліндра мають *гамма-розподіл* із щільностями

$$f_{\eta_{гр}}(y)=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}y^{\alpha_1-1}e^{-\beta_1 y}\qquad (y>0) \tag{17}$$

та

$$f_{гц}(y)=\frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_2-1}e^{-\beta_2 y}\qquad (y>0) \tag{18}$$

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

За формулою (16) визначимо щільність розподілу загального об’ємного ККД функціональної дільниці як системи двох безперервних випадкових величин

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=\int_{0}^{\infty}\frac{1}{\eta_{гц}}f_{\eta_{гр}}\left(\frac{y}{\eta_{гц}}\right)f_{\eta_{гц}}(\eta_{гц})d\eta_{гц}=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}\int_{0}^{+\infty}\frac{1}{\eta_{гц}}\left(\frac{y}{\eta_{гц}}\right)\exp\left\{-\frac{\beta_1 y}{\eta_{гц}}\right\}\eta_{гц}^{\alpha_2-1}e^{-\beta_2\cdot\eta_{гц}}d\eta_{ц}=$$

$$=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_1-1}\cdot\int_{0}^{+\infty}\frac{1}{y}\frac{1}{y^{\alpha_1-1}}\cdot y^{\alpha_2-1}\exp\left\{-\frac{\beta_1 y}{\eta_{гц}}-\beta_2\eta_{ц}\right\}d\eta_{гц}=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_1-1}\int_{0}^{+\infty}\eta^{\alpha_2-\alpha_1-1}\times$$

$$\times\exp\left\{-\frac{\beta_1 y}{\eta_{гц}}-\beta_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гц}=\frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}\frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}y^{\alpha_1-1}\cdot 2\cdot\left(\frac{\beta_1 y}{\beta_2}\right)^{\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}}K_{\alpha_2-\alpha_1}\left(2\sqrt{\beta_1\beta_2 y}\right)=2\times$$

$$\times\frac{(\beta_1\beta_2)^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}}y^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}-1}}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\alpha_2)}K_{\alpha_2-\alpha_1}(2\sqrt{\beta_1\beta_2 y}), \tag{19}$$

де $K_{\alpha_2-\alpha_1}(\cdot)$ - модифікована функція Бесселя 2-го роду порядку (α2-α1).

Інтегруючи вираз (19), одержимо імовірність збереження роботоздатності функціональної дільниці при заданому граничному значенні $y=\eta_{ФДгран}$

$$P_{\eta_{ФД}}(y)=P\left(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y=\eta_{ФДгран}\right)=\int\limits_{y=\eta_{ФДгран}}^{1} 2\frac{\left(\beta_1\beta_2\right)^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}} y^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}-1}}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\alpha_2)} K_{\alpha_2-\alpha_1}\left(2\sqrt{\beta_1\beta_2 y}\right)dy, \tag{20}$$

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

При запровадженні в формулу (20) параметрів зміщення $\eta_{гр_{зм}}$ та $\eta_{гц_{зм}}$ ($\eta_{гр}>\eta_{гр_{зм}}$, $\eta_{гц}>\eta_{гц_{зм}}$) одержимо

$$P_{\eta_{ФД}}(y)=\frac{2(\beta_1\cdot\beta_2)^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}}}{\Gamma(\alpha_1)\cdot\Gamma(\alpha_2)}\int\limits_{\eta_{ФДгран}}^{1}(y-\eta_{гр_{зм}}\cdot\eta_{гц_{зм}})^{\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}-1}\times K_{\alpha_2-\alpha_1}(2\sqrt{\beta_1\beta_2(y-\eta_{гр_{зм}}\cdot\eta_{гц_{зм}})}dy \tag{21}$$

Нехай діагностичні параметри $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ мають *показниковий* розподіл з параметрами λ_1 та λ_2 відповідно.

Знайдемо щільність розподілу $f_{\eta_{ФД}}(y)$ за формулою (16)

$$f_{\eta_{ФД}}(y)=\int\limits_0^{\infty}\frac{1}{\eta_{гц}}f_{\eta_{гр}}\left(\frac{y}{\eta_{гц}}\right)f_{\eta_{гц}}\left(\eta_{гц}\right)d\eta_{гц}=\int\limits_0^{\infty}\frac{1}{\eta_{гц}}\lambda_1 e^{-\lambda_1\frac{y}{\eta_{гц}}}\cdot\lambda_2 e^{-\lambda_2\eta_{гц}}d\eta_{гц}=$$

$$=\lambda_1\lambda_2\times\int\limits_0^{\infty}\frac{1}{\eta_{гц}}\exp\left\{\frac{-\lambda_1 y}{\eta_{гц}}-\lambda_2\eta_{гц}\right\}d\eta_{гц}=2\lambda_1\lambda_2\cdot K_0\left(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\cdot y}\right), \tag{22}$$

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

Знайдемо функцію розподілу величини $\eta_{ФД}=\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}$. На основі (14) маємо

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. (23)

Виходячи з виразу (23), імовірність роботоздатності ФД гідроприводу при заданому граничному значенні ОККД $y=\eta_{ФДгран}$ визначаємо за формулою

$$P_{\eta_{ФД}}(y)=P_{\eta_{ФД}}\left\{\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y=\eta_{ФДгран}\right\}=2\sqrt{\lambda_1\cdot\lambda_2\cdot y}\cdot K_1\left(2\sqrt{\lambda_1\lambda_2\cdot y}\right). \tag{24}$$

З урахуванням параметрів зміщення, отримаємо

$$P_{\eta_{ФД}}(y)=2\sqrt{\lambda_1\cdot\lambda_2\cdot(y-\eta_{гр_{зм}}\cdot\eta_{гц_{зм}})}\cdot K_1\left(2\sqrt{\lambda_1\cdot\lambda_2\cdot(y-\eta_{гр_{зм}}\cdot\eta_{гц_{зм}})}\right). \tag{25}$$

Розглянемо випадок, коли випадкові значення об'ємних ККД секції гідророзподільника та гідроциліндра підпорядковуються *логарифмічно нормальному закону* розподілу із щільностями

$$f(\eta)=\frac{1}{\eta\sigma_\eta\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{\left(\ln\eta-\mu_\eta\right)^2}{2\sigma_\eta}\right], \tag{26}$$

де μ_η та σ_η - параметри логнормального закону.

Отримані результати показують, що закон розподілу при цьому не міняється і запишеться так

$$f_{ФД}(y)=\frac{1}{y\sqrt{2\pi\left(\sigma_{гр}^2+\sigma_{гц}^2\right)}}\exp\left\{-\frac{1}{2\left(\sigma_{гр}^2+\sigma_{гц}^2\right)}\left(\ln\frac{y}{\mu_{гр}\cdot\mu_{гц}}\right)^2\right\}. \tag{27}$$

Звідси

$$P_{ФД}\left(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y\right)=1-\Phi\left(\frac{\ln\dfrac{y}{\mu_{гр}\cdot\mu_{гц}}}{\sqrt{\left(\sigma_{гр}^2+\sigma_{гц}^2\right)}}\right). \qquad (28)$$

Запишемо вирази функції та щільності розподілу ОККД ФД для випадку, коли випадкові величини $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ розподіляються за *нормальними законами з* параметрами $m_{\eta_{гр}}$, $m_{\eta_{гц}}$ та $\sigma_{\eta_{гр}}$, $\sigma_{\eta_{гц}}$

$$F_{ФД}(y)=\int_{-\infty}^{0}\left(\int_{\frac{y}{\eta_{гр}}}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{гц}}e^{-\frac{\left(\eta_{гц}-m_{\eta_{гц}}\right)^2}{2\sigma_{гц}^2}}d\eta_{гц}\right)\cdot\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{гр}}\cdot\exp\left[-\frac{\left(\eta_{гр}-m_{\eta_{гр}}\right)^2}{2\sigma_{гр}^2}\right]d\eta_{гр}+$$

$$+\int_{0}^{\infty}\left(\int_{\infty}^{\frac{y}{\eta_{гр}}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{гц}}\exp\left[-\frac{\left(\eta_{гц}-m_{\eta_{гц}}\right)^2}{2\sigma_{гц}^2}\right]d\eta_{гц}\right)\cdot\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{гр}}\cdot\exp\left[-\frac{\left(\eta_{гр}-m_{\eta_{гр}}\right)^2}{2\sigma_{гр}^2}\right]d\eta_{гр}; \qquad (29)$$

$$f_{ФД}(y)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\left|\eta_{гр}\right|}\cdot\frac{1}{2\pi\sigma_{гр}\sigma_{гц}}\exp\left[-\frac{\left(y/\eta_{гр}-m_{гц}\right)^2}{2\sigma_{гц}^2}-\frac{\left(\eta_{гр}-m_{гр}\right)^2}{2\sigma_{гр}^2}\right]d\eta_{гр}. \qquad (30)$$

При *нормальному законі* розподілу випадкових величин $\eta_{гр}$, $\eta_{гц}$ одержати в аналітичному вигляді закон розподілу $F(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}<y)$ доволі складно і ця задача вирішена автором методами статистичного моделювання. Але для отримання аналітичного виразу використаємо спрощений варіант розрахунку функції двох випадкових аргументів в припущенні, що при цьому зберігається нормальний закон розподілу результуючої величини $\eta_{ФД}$. Параметри шуканого закону розподілу ОККД ФД одержуємо, використовуючи теореми про властивості числових характеристик добутку випадкових величин.

$$M\left[\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}\right]=m_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}=m_{\eta_{ФД}}; \qquad (31)$$

$$D\left[\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}\right]=D_{\eta_{гр}}\cdot D_{\eta_{гц}}+D_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}^2+D_{\eta_{гц}}\cdot m_{\eta_{гр}}^2=\sigma_{\eta_{ФД}}^2, \qquad (32)$$

де $M[\cdot]$ та $D[\cdot]$ - відповідно математичне сподівання та дисперсія добутку випадкових величин.

Звідси щільність розподілу $f(\eta_{гр},\eta_{гц})$

$$f(y)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\left(D_{\eta_{гр}}\cdot D_{\eta_{гц}}+D_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}^2+D_{\eta_{гц}}\cdot m_{\eta_{гр}}^2\right)}}\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{y-m_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}}{2\left(D_{\eta_{гр}}\cdot D_{\eta_{гц}}+D_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}^2+D_{\eta_{гц}}\cdot m_{\eta_{гр}}^2\right)}\right]. \qquad (33)$$

Імовірність збереження роботоздатності при заданому граничному значенні ОККД ФД запишемо так

$$P\left\{\varphi\left(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}\right)>\eta_{ФД_{гран}}\right\}=0,5-\Phi\left[\frac{\eta_{ФД_{гран}}-m_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}}{\sqrt{D_{\eta_{гр}}\cdot D_{\eta_{гц}}+D_{\eta_{гр}}\cdot m_{\eta_{гц}}^2+D_{\eta_{гц}}\cdot m_{\eta_{гр}}^2}}\right]. \qquad (34)$$

При *зрізаному нормальному законові* розподілу ОККД секцій гідророзподільника та гідроциліндрів імовірність невиходу ОККД функціональної дільниці за граничне значення за умови раніше прийнятих допущень буде такою

$$P\left\{\varphi\left(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}\right)>\eta_{ФД_{гран}}\right\}=\left[\Phi\left(\frac{1-m_{гр}\cdot m_{гц}}{\sqrt{\sigma^2_{\eta_{гр}}+\sigma^2_{\eta_{гц}}}}\right)+\Phi\left(\frac{m_{гр}\cdot m_{гц}}{\sqrt{\sigma^2_{\eta_{гр}}+\sigma^2_{\eta_{гц}}}}\right)\right]^{-1}\times$$

$$\times\left\{0{,}5-\Phi\left[\frac{\eta_{ФД_{гран}}-m_{гр}\cdot m_{гц}}{\sqrt{D_{\eta_{гр}}\cdot D_{\eta_{гц}}+D_{\eta_{гр}}\cdot m^2_{\eta_{гц}}+D_{\eta_{гц}}\cdot m^2_{\eta_{гр}}}}\right]\right\}. \tag{35}$$

При розподілі ОККД гідро розподільника та гідроциліндра за *законом Вейбула* з параметрами відповідно a_1, a_2 та b_1, b_2 щільність розподілу та імовірність збереження роботоздатності ФД визначаються за виразами

$$f_{ФД}(y)=\frac{b_1\cdot y^{b_1-1}}{\left(a_1\cdot a_2\right)^{b_1}}\int_0^\infty t^{-\frac{b_1}{b_2}}\exp\left\{-\left(\frac{y}{a_1\cdot a_2}\right)^{b_1}\cdot t^{-\frac{b_1}{b_2}}-t\right\}dt; \tag{36}$$

$$P_{ФД}\left\{\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y\right\}=\int_0^\infty\exp\left\{-\left[\left(\frac{y}{a_1\cdot a_2}\right)^{b_1}\cdot t^{-\frac{b_1}{b_2}}+t\right]\right\}dt. \tag{37}$$

Так як в області високих значень ОККД параметри b_1 та b_2 можна прийняти як однакові ($b_1=b_2$), то запишемо для цього випадку

$$f_{ФД}(y)=2\frac{b\cdot y^{b-1}}{\left(a_1\cdot a_2\right)^b}K_0\left[2\left(\frac{y}{a_1\cdot a_2}\right)^{\frac{b}{2}}\right]; \tag{38}$$

$$P_{ФД}\left\{\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y\right\}=2\left(\frac{y}{a_1\cdot a_2}\right)^{\frac{b}{2}}K_1\left[2\left(\frac{z}{a_1\cdot a_2}\right)^{\frac{b}{2}}\right]. \tag{39}$$

Якщо має місце розподіл Релея, то отримаємо

$$f_{ФД}(y)=\frac{y}{\sigma^2_{гр}\cdot\sigma^2_{гц}}K_0\left(\frac{y}{\sigma_{гр}\cdot\sigma_{гц}}\right); \tag{40}$$

$$P_{ФД}\left\{\eta_{гр}\cdot\eta_{гц}>y\right\}=\frac{y}{\sigma_{гр}\cdot\sigma_{гц}}K_1\left(\frac{y}{\sigma_{гр}\cdot\sigma_{гц}}\right). \tag{41}$$

Для рівномірного закону розподілу ОККД $\eta_{гр}$ та $\eta_{гц}$ з відповідними параметрами $a, b \quad (0\le a<b<1)$ та $c, d \quad (0\le c<d<1)$

$$f_{ФД}(y)=\frac{1}{(b-a)(d-c)}\left[\ln\min\left\{\frac{y}{c},b\right\}-\ln\max\left\{\frac{y}{d},a\right\}\right],\ \text{для}\ ac<y<bd. \tag{42}$$

$$P_{ФД}\left\{\eta_{гр}\cdot\eta_{гц} > y\right\} = \begin{cases} 0 & y \le a\cdot c \\ \dfrac{\ln\dfrac{b}{a}(y-a\cdot c)}{(b-a)(d-c)}, & b\cdot c < y < a\cdot d \\ \dfrac{\ln\dfrac{d}{c}(y-a\cdot c)}{(b-a)(d-c)}, & a\cdot d < y < b\cdot c \\ \left[(b-a)(d-c)\right]^{-1}\left[y\cdot\ln\dfrac{y}{a\cdot c} - y + a\cdot c\right], & y \le \min\left[a\cdot d, b\cdot c\right] \\ \left[(b-a)(d-c)\right]^{-1}\left[y\cdot\ln\dfrac{b\cdot d}{y} + y - a\cdot c\left(1+\ln\dfrac{b\cdot d}{a\cdot c}\right)\right], & y \ge \max\left[d\cdot a, b\cdot c\right] \\ 1 & y \ge b\cdot d. \end{cases} \quad (43)$$

Розглянемо можливі випадки, коли процеси деградації технічного стану гідроциліндра та гідророзподільника відносяться до дифузійних процесів із постійною середньою швидкістю a_η та постійним коефіцієнтом варіації швидкості зміни ОККД - ν_η, які описуються *DN- та DM-розподілами*.

Запишемо формулу для визначення імовірності збереження роботоздатності (або імовірності безвідмовної роботи) функціональної дільниці для DN-розподілу

$$P(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц} > \eta_{ФД_{гран}};t) = \Phi\left[\frac{\left[\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}} - (a_{гр}+a_{гц})t\right](a_{гр}+a_{гц})}{\sqrt{(\nu_{гр}^2\cdot a_{гр}^2 + \nu_{гц}^2\cdot a_{гц}^2)(a_{гр}+a_{гц})(\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}})t}}\right] -$$

$$-\exp\left[\frac{2(a_{гр}+a_{гц})^2}{\nu_{гр}^2\cdot a_{гр}^2 + \nu_{гц}^2\cdot a_{гц}^2}\right]\times\Phi\left[-\frac{\left[\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}} + (a_{гр}+a_{гц})t\right](a_{гр}+a_{гц})}{\sqrt{(\nu_{гр}^2\cdot a_{гр}^2 + \nu_{гц}^2\cdot a_{гц}^2)(a_{гр}+a_{гц})(\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}})t}}\right]. \quad (44)$$

Для DM-розподілу параметрів отримаємо

$$P(\eta_{гр}\cdot\eta_{гц} > \eta_{ФД_{гран}};t) = P(t) = \Phi\left[\frac{\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}} - (a_{гр}+a_{гц})t}{\dfrac{\sqrt{\nu_{гр}^2\cdot a_{гр}^2 + \nu_{гц}^2\cdot a_{гц}^2}}{a_{гр}+a_{гц}}\sqrt{(a_{гр}+a_{гц})(\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}})t}}\right] =$$

$$= \Phi\left[\frac{\left[\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}} - (a_{гр}+a_{гц})\right](a_{гр}+a_{гц})}{\sqrt{(\nu_{гр}^2\cdot a_{гр}^2 + \nu_{гц}^2\cdot a_{гц}^2)(a_{гр}+a_{гц})(\eta_{огц}\cdot\eta_{огр} - \eta_{ФД_{гран}})t}}\right]. \quad (45)$$

Для решти схем під'єднання гідроелементів приведених на рис.1 (*б, в, г*) моделі надійності одержуємо аналогічно, виходячи із умов збереження роботоздатності функціональної дільниці підсистеми.

Одержані моделі надійності не вичерпують всіх можливих варіантів моделей, які можуть мати місце при аналізі функціонування гідроприводів БДМ, але вони розширюють та уточнюють моделі надійності гідроприводів, які не входять в коло класичних визначень системи з'єднаних елементів, що може благодійно впливати на результати оцінки їх показників надійності з метою підвищення ефективності використання будівельних машин в будівництві.