

Андренко П. М.,
Клітної В. В.,
Погорелов Д. С.

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ УНІВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ГІДРОАПАРАТІВ

З використанням метода структурних схем отримана аналітична залежність для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи стенда для випробувань гідроапаратів. Розрахунковим шляхом встановлені значення ймовірності та середній час його безвідмовної роботи для різних значень інтенсивності відмов. Показано, що запропонований універсальний стенд для випробування гідроапаратів відноситься до систем з високим рівнем надійності.

Ключові слова: стенд, гідроапарат, надійність, ймовірність безвідмовної роботи, час безвідмовної роботи.

1. Вступ

Технічний рівень гідрофікованого обладнання, в тому числі і стендів для випробувань гідроапаратів в значній мірі залежать від показників технічного рівня гідравлічних пристроїв та апаратів, що входять до їх складу. Одним з основних показників технічного рівня машин та обладнання є їх надійність. До основних показників надійності гідрофікованого обладнання відносяться ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, час безвідмовної роботи, 90 % ресурс. Фактори, що визначають надійність гідроагрегатів, достатньо докладно розглянуті у науково-технічній літературі, зокрема в роботах [1, 2]. Їх можна поділити на три групи:

- до першої групи відносяться фактори, які не залежать від споживача — конструкція і якість виготовлення. Вони повністю обумовлені процесами розробки конструкції та виготовлення виробу;
- до другої групи відносяться фактори, які частково залежать від споживача — режим експлуатації та якість експлуатаційних матеріалів;
- до третьої групи відносяться фактори, які цілком залежать від споживача — організація і якість обслуговування, а також якість ремонту. Ці фактори разом з кваліфікацією обслуговуючого персоналу характеризують культуру обслуговування.

Слід зазначити, що особливо важливе визначення надійності на стадії проектування машин та обладнання. Тенденція останніх десятиліть — підвищення робочого тиску гідросистем, розширення номенклатури гідроапаратів, в основному в бік мініатюризації, розробка оригінальних гідроапаратів для виконання унікальних функцій, викликана прагненням споживачів до підвищення їх технічного рівня [3]. Для випробувань таких гідроапаратів авторами статті був розроблений універсальний енергоощадний стенд зі зміною робочих параметрів у широкому діапазоні [4]. Визначення його надійності на стадії проектування, на сьогодні, є актуальним завданням.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження — універсальний, енергоефективний стенд для випробувань гідроапаратів різних типів

у широкому діапазоні зміни їх конструкції та робочих параметрів, важливою особливістю якого є застосування регульованого аксіально-поршневого насоса і поршневого гідропневматичного акумулятора [4].

Перспективним напрямком подальшого удосконалення стенда є підвищення його енергоефективності та зменшення собівартості.

3. Мета та задачі дослідження

Метою статті є визначення надійності універсального стенда для випробувань гідроапаратів на стадії його проектування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Скласти структурну схему універсального стенда випробування гідроапаратів.
2. Визначити ймовірність та час безвідмовної роботи стенду.
3. Перевірити точність розрахунків ймовірності безвідмовної роботи стенда.

4. Аналіз літературних даних

Питанням розрахунку надійності гідравлічних елементів та систем присвячена достатньо велика кількість наукових робіт, наприклад [1, 2, 5–7]. Наведені в них методики розрахунку цілком правомірно можуть бути використані при розрахунках надійності універсального стенда для випробувань гідроапаратів. Як відмічено в роботі [2], на сьогодні, найбільше розповсюдження отримали два методи, а саме методи неперевіщень та структурних схем.

Стаття [8], де розглядається стенд для випробувань гідроапаратів, в більшій мірі присвячена визначенню пульсацій тиску в ньому при наявності пасивного гасителя пульсацій тиску та без нього. А стаття [9] — визначенню надійності гідравлічного гасителя пульсацій тиску з автоматичним підстроюванням параметрів. В доступних літературних джерелах відсутні відомості, щодо надійності стенда для випробувань гідроапаратів. Таким чином, визначення надійності такого стенда на стадії його проектування дозволить більш обґрунтовано провести вибір гідравлічних пристроїв та апаратів для

його реалізації, які задовольняють заданим технічним умовам.

5. Матеріали та методи досліджень

При виконанні поставленої мети використовувалась принципова гідравлічна схема універсального стенда для випробування гідроапаратів. Розрахунок надійності проводився за допомогою методу структурних схем.

6. Результати досліджень

Розрахунок надійності універсального стенда для випробувань гідроапаратів робили за допомогою методу структурних схем [1]. Приймали, що всі складові елементи стенда є одиницями та відмови елементів незалежні. Відомі, також, зв'язки між окремими елементами та час їх функціонування. Вважали, що однотипні елементи є рівнонадійними, режими їх роботи відповідають номінальним, а параметри оточуючого середовища — технічним вимогам. Вважали, що термін роботи окремих елементів стенда визначається за експоненціальним законом розподілення, а їх надійність визначали за залежністю:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де $P(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи елемента (пристрою); λ — інтенсивність відмов.

Зауважимо, що розрахунок ймовірності безвідмовної роботи згідно залежності (1) правомірний для невідновлюваних елементів, пристроїв та систем. Для відновлюваних елементів, пристроїв та систем залежність (1) дає занижені результати, однак, маючи на увазі незначеність часу відновлення, в подальших розрахунках використовували формулу (1). При послідовному з'єднанні елементів, з 1 по n , ймовірності безвідмовної роботи розраховували за формулою:

$$P(t) = \prod_1^n P_i(t), \quad (2)$$

де $P_i(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи i -того елемента.

При паралельному з'єднанні n елементів чи ланцюгів, ймовірність безвідмовної роботи визначали за залежністю:

$$P(t) = 1 - \prod_1^k \left[1 - \prod_1^n P_i(t) \right], \quad (3)$$

де k — кількість паралельних ланцюгів.

Розглядали універсальний стенд для випробування гідроапаратів [5] (рис. 1).

Для розрахунку надійності універсального стенда випробування гідроапаратів склали його структурну схему (рис. 2).

Приймали, що вся витрата на виході з насоса надходить до гідроапарату (запобіжний клапан закритий), а гідророзподільник P_3 знаходиться у положенні,

коли витрата до баку надходить через витратомір РА. За структурною схемою стенда, враховуючи формули (2) і (3), отримали розрахункову залежність ймовірності його безвідмовної роботи:

$$P_{\Sigma} = P_1 \left\{ \begin{aligned} & P_2 \left[\begin{aligned} & (P_8 + P_9 - P_8 P_9) + P_{10} - \\ & - P_{10} (P_8 + P_9 - P_8 P_9) \end{aligned} \right] + \\ & + P_3 P_6 \left(\prod_{i=4,1}^{4,6} P_i + \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j - \prod_{i=4,1}^{4,6} P_i \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j \right) - \\ & - P_2 P_3 P_6 \left[\begin{aligned} & (P_8 + P_9 - P_8 P_9) + P_{10} - \\ & - P_{10} (P_8 + P_9 - P_8 P_9) \end{aligned} \right] \times \\ & \times \left(\prod_{i=4,1}^{4,6} P_i + \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j - \prod_{i=4,1}^{4,6} P_i \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j \right) \end{aligned} \right\} P_7 P_{11} P_{12} \times \\ \times (P_{13} + P_{14} - P_{13} P_{14}) + \prod_{k=15}^{21} P_k - \\ - P_1 \left\{ \begin{aligned} & P_2 \left[\begin{aligned} & (P_8 + P_9 - P_8 P_9) + P_{10} - \\ & - P_{10} (P_8 + P_9 - P_8 P_9) \end{aligned} \right] + \\ & + P_3 P_6 \left(\prod_{i=4,1}^{4,6} P_i + \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j - \prod_{i=4,1}^{4,6} P_i \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j \right) - \\ & - P_2 P_3 P_6 \left[\begin{aligned} & (P_8 + P_9 - P_8 P_9) + P_{10} - \\ & - P_{10} (P_8 + P_9 - P_8 P_9) \end{aligned} \right] \times \\ & \times \left(\prod_{i=4,1}^{4,6} P_i + \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j - \prod_{i=4,1}^{4,6} P_i \prod_{j=5,1}^{5,6} P_j \right) \end{aligned} \right\} P_7 P_{11} P_{12} \times \\ \times (P_{13} + P_{14} - P_{13} P_{14}) \prod_{k=15}^{21} P_k. \quad (4)$$

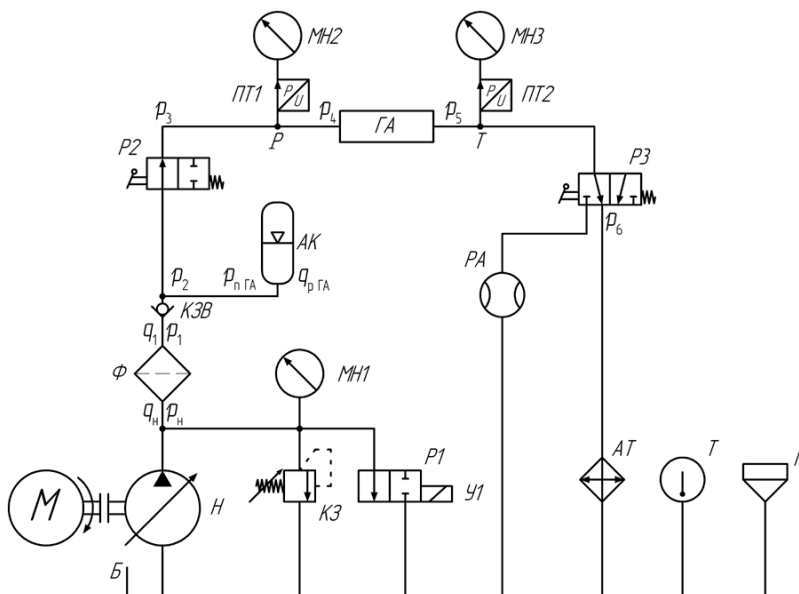


Рис. 1. Принципова гідравлічна схема універсального стенда для випробування гідроапаратів: Б — бак; Н — аксіально-поршневий насос, що регулюється (НАР-224/32); Ф — фільтр (10/35/500 фірми Eaton Vickers); КЗВ — зворотний клапан (МКО 32/32); КЗ — запобіжний клапан (МКПВ32/3С46); Р1, Р2, Р3 — гідро розподільники (1Р323, 1Рн323ФВ, 1Рн323ФВ); У1 — електромагніт; МН1, МН2, МН3 — манометри; АК — поршневий гідропневматичний акумулятор (АР 300 Р 350 С 350); ПТ1, ПТ2 — датчики тиску; ГА — гідроапарат, що досліджується; РА — витратомір; АТ — теплообмінник; Т — термометр; Г — горловина для заливу

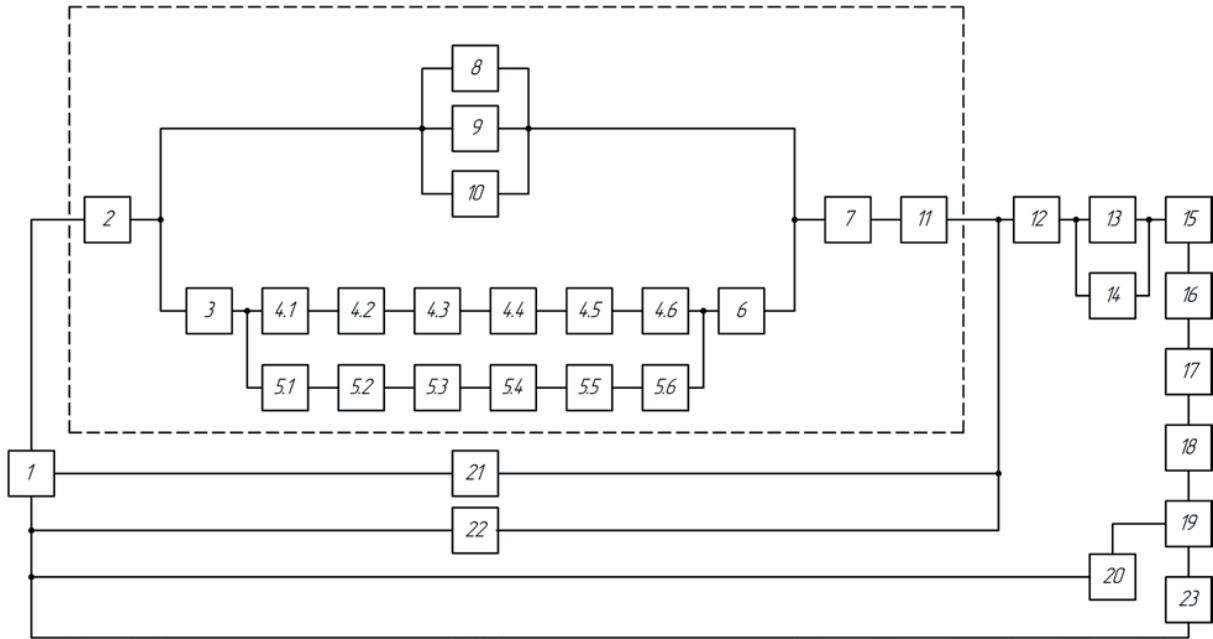


Рис. 2. Структурна схема універсального стенда для випробування гідроапаратів: 1 — бак; 2 — вал; 3 — притискна пружина; 4, 5 — шатун з поршнем; 6 — центральний шип; 7 — блок циліндрів; 8–10 — радіальні підшипники; 11 — розподільник (2–11 — аксіально-поршневий насос що регулюється); 12 — фільтр; 13 — зворотний клапан; 14 — гідропневмоакумулятор; 15, 19, 22 — гідророзподільники; 16, 18 — датчики тиску; 17 — гідроапарат; 20 — витратомір; 21 — запобіжний клапан; 23 — теплообмінник

За допомогою даних з джерел [2, 10] знаходили інтенсивність відмов окремих елементів стенда (табл. 1).

Таблиця 1

Інтенсивність відмов елементів стенда

Елемент стенда	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$		
	λ_{\min}	$\lambda_{\text{ср}}$	λ_{\max}
Бак, P_1	0,48	1,5	2,52
Пружина, P_2	0,004	0,1125	0,221
Поршень, P_4, P_5	0,08	0,2	0,35
Підшипник ковзання, P_8, P_9, P_{10}	0,008	0,21	0,42
Блок циліндрів, P_7	0,12	0,808	1,87
Розподільник, P_{11}, P_{15}, P_{19}	—	1	—
Фільтр гідравлічний, P_{12}	—	0,4	—
Клапан зворотній, P_{13}	3,27	5,7	14,1
Акумулятор гідропневматичний, P_{14}	—	0,2	—
Перетворювач тиску, P_{16}, P_{18}	—	2,5	—
Запобіжний клапан, P_{21}	7,9	10,3	14,8

За залежністю (4), попередньо задавши часом роботи стенда, знаходили ймовірність його безвідмовної роботи (табл. 2). Знаючи ймовірність його безвідмовної роботи, знаходили час безвідмовної роботи за залежністю:

$$T = \frac{1}{\Lambda}, \tag{5}$$

де Λ — сумарна інтенсивність відмов стенда, яку визначали з (1), розраховували середній час безвідмовної його роботи (табл. 2).

Таблиця 2

Ймовірність і час безвідмовної роботи стенда

λ	$P(1000)$		$T, \text{ годин}$	
	$P(1000)$	%	$T, \text{ годин}$	%
мінімальна	0,9992	100	1249531	100
середня	0,9991	99,98	1110617	88,88
максимальна	0,998	99,87	499500	40
мінімальна	0,996	100	249500	100
середня	0,993	99,7	142356	57
максимальна	0,988	99,2	82832	33,2

Точність розрахунків ймовірності безвідмовної роботи стенда характеризується дисперсією G_p , розрахунок якої, відповідно до структурної семи, проводили за формулою [11]:

$$G_p^2 = t^2 \left(\sum_{i=1}^S k_i^2 n_i^2 \lambda_i^2 + 2 \sum_{i=1}^S k_i n_i \lambda_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^S k_j n_j \lambda_j \right) e^{-2t \sum_{i=1}^S n_i \lambda_i}, \tag{6}$$

де $k_i = \frac{\lambda_{i\max} - \lambda_{i\min}}{6\lambda_i}$; $\lambda_{i\max}$, $\lambda_{i\min}$ і λ_i — відповідно максимальна, мінімальна і середня інтенсивності відмов i -го елемента; t — час роботи; S — кількість груп елементів в стенді; n_i — кількість елементів в i -й групі; j — кількість елементів в j -й групі.

Мінімальне, середнє і максимальне значення $G_p^2 \cdot 10^2$ відповідно становило: 0,053, 0,034 і 0,015.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Аналіз вивчаємої проблематики показав, що визначення надійності універсального стенда для випробувань

гідроапаратів на стадії його проектування дозволить більш обґрунтовано провести вибір гідравлічних пристроїв та апаратів для його реалізації, при цьому є можливість досягти підвищення його енергоефективності та зменшення собівартості.

Розроблена методика розрахунку надійності стенда для випробування гідроапаратів може бути використана на стадії проектування. Треба враховувати, що розрахунки проводилися для конкретного стенда і не перевірялися на інших моделях.

В подальшому планується удосконалення універсального стенда, що може бути вирішено шляхом проведення комплексних аналітично-розрахункових досліджень гідравлічних систем стенда, побудованих за різними концепціями з урахуванням їх надійності.

При цьому особливу увагу треба приділяти розвитку гідравлічних пристроїв та апаратів, аналізувати можливість використання сучасного зарубіжного устаткування.

8. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Побудована структурна схема універсального стенда для випробування гідроапаратів.

2. Проведений розрахунок ймовірності безвідмовної роботи універсального стенда для випробування гідроапаратів показав, що він відноситься до гідравлічних систем з високим рівнем надійності. Причому його ймовірність безвідмовної роботи для 10 000 годин, визначена за середніми значеннями інтенсивності відмов, становить 0,993, а час безвідмовної роботи — 142 356 годин.

3. За дисперсією проведених розрахунків встановлено, що їх точність є цілком задовільною.

Література

1. Сырицын, Т. А. Надежность гидро- и пневмопривода [Текст] / Т. А. Сырицын. — М.: Машиностроение, 1981. — 216 с.
2. Фінкельштейн, З. Л. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів [Текст]: навч. посіб. / З. Л. Фінкельштейн, П. М. Андrenко, О. В. Дмитрієнко; під ред. проф. П. М. Андrenка. — Х.: НТУ «ХП», 2014. — 308 с.
3. Андrenко, П. Н. Тенденции развития объемных гидроприводов [Текст] / П. Н. Андrenко, З. Я. Лурье // Промислова гідравліка і пневматика. — 2013. — № 3(41). — С. 3–12.
4. Андrenко, П. М. Математична модель універсального стенда для випробувань гідроапаратів [Текст] / П. М. Андrenко, Д. С. Погорелов, М. С. Свиначенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. — 2016. — № 41(1150). — С. 5–13.
5. Jovanović, M. Increased Efficiency of Hydraulic Systems Through Reliability Theory and Monitoring of System Operating Parameters [Text] / M. Jovanović, D. Šević, V. Karanović, I. Beker, S. Dudić // Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering. — 2012. — Vol. 58, № 4. — P. 281–288. doi:10.5545/sv-jme.2011.084
6. Knezevic, J. Reliability modelling of repairable systems using Petri nets and fuzzy Lambda-Tau methodology [Text] / J. Knezevic, E. R. Odooom // Reliability Engineering & System Safety. — 2001. — Vol. 73, № 1. — P. 1–17. doi:10.1016/S0951-8320(01)00017-5

7. Blischke, W. R. Reliability: modeling, prediction, and optimization [Text] / W. R. Blischke, D. N. P. Murthy. — New York: John Wiley & Sons, 2000. — 820 p. doi:10.1002/9781118150481
8. Андrenко, П. М. Розрахункові дослідження пульсацій тиску в стенді для випробувань гідроапаратів [Текст] / П. М. Андrenко, М. С. Свиначенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2010. — № 6/9(48). — С. 7–9.
9. Андrenко, П. М. Надежность гидравлических гасителей пульсаций и их экономическая оценка [Текст] / П. М. Андrenко, М. С. Свиначенко // MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. — 2010. — Vol. 12. — P. 43–53.
10. Хохлов, В. А. Электрогидравлические следящие системы [Текст] / В. А. Хохлов, В. Н. Прокофьев, Н. А. Борисова и др.; под ред. В. А. Хохлова. — М.: Машиностроение, 1971. — 431 с.
11. Бычков, А. А. Основы теории и организации технической эксплуатации средств связи [Текст]: сб. задач / А. А. Бычков, В. А. Кальченко. — К.: КВВИУС, 1975. — 105 с.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОАППАРАТОВ

С использованием метода структурных схем получена аналитическая зависимость для расчета вероятности безотказной работы стенда для испытания гидроаппаратов. Расчетным путем установлены значения вероятности и среднее время его безотказной работы для разных значений интенсивности отказов. Показано, что предложенный универсальный стенд для испытания гидроаппаратов относится к системам с высоким уровнем надежности.

Ключевые слова: стенд, гидроаппарат, надежность, вероятность безотказной работы, время безотказной работы.

Андrenко Павло Миколайович, доктор технічних наук, професор, кафедра гідропневмоавтоматики та гідропривода, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Клітний Володимир Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра деталей машин та прикладної механіки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: vlad_klitnoy@ukr.net.

Погорелов Денис Сергійович, кафедра гідропневмоавтоматики та гідропривода, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Андrenко Павел Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра гидропневмоавтоматики и гидропривода, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Клітний Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, кафедра деталей машин и прикладной механики, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Погорелов Денис Сергеевич, кафедра гидропневмоавтоматики и гидропривода, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Andrenko Pavel, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Klitnoi Vladimir, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: vlad_klitnoy@ukr.net.

Pogorelov Denis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine