

Методика за изследване на надеждността на задвижващи системи с последователно включени хидравлични машини и елементи

Илчо Ангелов

Methodology for the study the reliability of hydraulic drive systems sequential equipped with hydraulic machines and elements: *In this paper is developed a methodology for the study the reliability and service life of hydraulic drive systems. Considered a mathematical model to calculate the reliability characteristics. An algorithm is developed for a software product for the exploration of a service life of the hydraulic drive system for a period of 1, 3, 5 and 10 years.*

Key Words: Reliability, Service Life, Performance, Hydraulic Drive Systems;

ВЪВЕДЕНИЕ

Хидравличните машини и елементи представляват една съществена част от системите за задвижване и управление при различните видове машини и съоръжения намиращи приложение в много и различни технически области – транспортна, пътно-строителна, селско-стопанска, корабна, самолетна и ракетна техники [1, 9, 10]. Повишените изисквания за повишаване на срока на експлоатация както и за намаляване на разходите от престой по време на ремонт, налагат да се правят все по-разширени и задълбочени изследвания за тяхната функционалност, надеждност, дълговечност и своевременно да се предвижда време за провеждане на малки и средни ремонти. Внимателният анализ на структурата на съвременните хидравлични задвижващи системи (ХЗС) показва, че за да се постигне по-висока функционална и енергийна ефективност се използват все по-сложни схемни решения с използването на хидравлични устройства свързани в специфично определена конструктивна форма като модулен монтаж с вертикално или хоризонтално разположени елементи. В някои решения на ХЗС се получава доста сложно разклоняване на системата, което е концентрирано в минимален обем с вътрешни връзки и с максимални възможности за интегриране на различни функции – така нареченият блоков монтаж или в комбинация като блоков - модулен монтаж. Това обаче води до намаляване на възможностите за бърза и качествена диагностика при евентуална повреда на един или няколко хидравлични елемента или машини още повече, че все-повече и различни конструктивни решения се представят в практиката на ХЗС. Ето защо се налага необходимостта от разработването на методики за бързо и качествено анализиране на такива ХЗС с цел определяне на тяхната дълговечност, надеждност и прогнозиране на време за провеждане на профилактични прегледи както и за извършване на лек и среден ремонт с оглед на удължаване на периода им на експлоатация. По този начин ще се даде възможност да се предвиждат и съответните разходи за резервни части, време за провеждане на съответен ремонт, както и на разходи за извършване на този ремонт в специализирани сервиси.

1. Цел и задачи

Основна цел на настоящата работа е да се разработи принципна методика за изследване на надеждността и дълговечността на ХЗС, структурирани по специфичен начин при последователно свързване на хидравличните машини и елементи в дадена хидравлична задвижваща система или в определен участък от нея. На базата на разработен математичен модел съобразен в максимална степен с реалните физически условия на експлоатация на хидравличните машини и елементи в системи за задвижване и управление да се изработи алгоритъм и съответен програмен продукт за изследване на надеждността и дълговечността на цялата ХЗС.

С това да се даде възможност за оценка не само на съществуващите конструктивни изпълнения, но и да се даде предварителна оценка за новоразработени машини, елементи и системи в областта на ХЗС.

За изпълнение на горепосочената цел са дефинирани следните основни задачи:

- на базата на строго дефиниран принцип на действие на ХЗС и преглед на основните хидравлични машини и елементи като структура и определена последователност на включване да се разработи методика за анализ на параметрите на хидравличните устройства определени посредством математическо описание и изследване на надеждността на хидравличните елементи и системи;
- да се разработи алгоритъм за оценка на състоянието на изследваните устройства с възможност за определяне на вероятността за отказ на ХЗС;
- основни изводи за предварителната оценка на параметрите на устройствата и ХЗС и възможността за прогнозиране на определени експлоатационни периоди.

2. Надеждност на хидравлична задвижваща система.

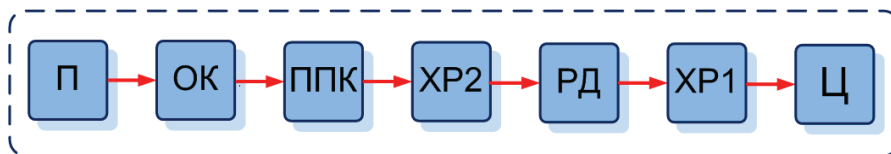
Всяка ХЗС е изградена от три основни групи [1,9,10]:

- Хидравличен помпен агрегат, който преобразува механичната енергия в хидравлична.

- Различни видове хидравлични устройства – разпределителни,регулиращи налягането, регулиращи дебита, спомагателни.

- Изпълнителни хидравлични устройства – цилиндри и хидромотори.

От надеждността и дълговечността на всеки един елемент на горепосочените групи зависи нормалният експлоатационен период на ХЗС.



Фиг.1 Условно последователно свързване на хидравлични машини и регулиращи елементи в ХЗС.

Хидравличните елементи могат да се разделят на няколко групи [1]. На Фиг.1 е показан един вариант на последователно свързване на хидравлични машини и регулиращи елементи според тяхната позиция в ХЗС. Този ред е условен и може да бъде променян в зависимост от условията и целта на работата, която трябва да извърши конкретната ХЗС или обособена част от нея.

По аналогия от надеждност на хидравличен елемент [1,6,7,8,12], може да се дефинира функцията за вероятността ХЗС да работи безотказно до момент (t):

$$F(t) = P(\tau < t) \quad (1)$$

Както и функцията на надеждност за вероятността ХЗС да работи нормално в момента (t):

$$\mathbb{P}(t) = P(\tau^3 \geq t) = 1 - P(\tau < t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

Също така се дефинират и величините за ХЗС разгледани като надеждността на елемент без възстановяване, а именно:

- плътност на разпределението $f(t)$:

$$f(t) = F'(t) = [1 - P(t)]' = -P'(t) \quad (3)$$

- вероятност за безотказна работа на ХЗС в интервала $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$P(t, t + \Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} \quad (4)$$

- вероятност за отказ на ХЗС $Q(t, \Delta t)$ - в интервал $(t + \Delta t)$, ако е работила безотказно до момента t .

$$Q(t, t + \Delta t) = 1 - P(t + \Delta t) = 1 - \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)} \quad (5)$$

- опасност за отказ на ХЗС $\lambda(t)$:

$$Q(t, t + \Delta t) = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t} = - \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{P(t)} \quad (6)$$

$$\frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = P'(t) \Rightarrow Q(t, t + \Delta t)_{\Delta t \rightarrow 0} = - \frac{P'(t)}{P(t)} \quad (7)$$

$$\lambda(t) = - \frac{P'(t)}{P(t)} \quad (8)$$

- **Числови характеристики на надеждност на ХЗС.**

T_0 – средно време на безотказна работа на ХЗС (дълговечност). Равно е на математическото очакване за τ .

$$T_0 = E(\tau) = \int_0^{\infty} t f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} t F'(t) \cdot dt \quad (9)$$

$$\int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} t d[1 - P(t)] = - \int_0^{\infty} t dP(t) = - \left[tP(t) /_0^{\infty} - \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt \right] = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

$D(t)$ – Дисперсия:

$$D(t) = E(\tau - T_0)^2 = E(\tau^2) - T_0^2 \Rightarrow D(t) = 2 \int_0^{\infty} t \cdot P(t) dt - T_0^2 \quad (10)$$

- **Характеристики на ХЗС като експоненциално разпределен елемент.**

Може да се направи извода, че колкото по дълго време работи една ХЗС, толкова по-малка става нейната надеждност т.е. вероятността да работи безотказно намалява. От тук може да се заключи, че **времето на безотказна работа на ХЗС е експоненциално разпределена случайна величина** [1,2,3,4,5].

Нека τ е случайната величина определяща времето на безотказна работа на ХЗС и е с експоненциално разпределение:

$$\tau \in \text{Exp}(\lambda) \quad (11)$$

т.е. функцията на експоненциално разпределената величина ще има вида :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad , \text{където } \lambda > 0, t \geq 0 \quad (12)$$

$$f(t) = F'(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad , \text{където } \lambda > 0, t \geq 0 \quad (13)$$

където функцията **P(t)** на надеждност на експоненциално разпределена случайна величина т.е. дълговечността на ХЗС е:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - 1 + e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t} \quad (14)$$

Съответно опасността за отказ на ХЗС е:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = const \quad (15)$$

Средното време за безотказна работа (дълговечността) на ХЗС е:

$$T_0 = E(\tau) = \int_0^{\infty} \mathbb{P}(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = -\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \Big|_0^{\infty} = \quad (16)$$

$$-\frac{1}{\lambda} [\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\lambda t} - e^0] = -\frac{1}{\lambda} \cdot 0 + \frac{1}{\lambda} \cdot 1 = \frac{1}{\lambda}$$

И дисперсията за ХЗС е:

$$D(t) = 2 \int_0^{\infty} t \cdot \mathbb{P}(t) dt - T_0^2 \quad (17)$$

$$D(t) = 2 \cdot \frac{1}{\lambda^2} - T_0^2 = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \quad (18)$$

От гледна точка на математическия модел под система ще разбираме произволно устройство, състоящо се от части, надеждността на които е предварително зададена. Тези части се наричат елементи. Структурата на системата трябва да е добре известна, за да се определи, дали отказа на един елемент предизвиква отказ на цялата система, дали системата отказва само ако откажат всички нейни елементи или само някои нейни части. Предполага се, че елементите отказват независимо един от друг т.е. отказът на един елемент не променя надеждността на останалите.

Системата винаги се състои от n елемента, като:

$$p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t), \text{ където } p_i(t) = P(\tau_i > t), \text{ за } i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

- $p_i(t)$ - надеждност на i -ти елемент;
- τ_i - време на безотказна работа на i -ти елемент;
- τ - време на безотказна работа на цялата система;
- $\mathbb{P}(t)$ - надеждност на системата.

В надеждностен смисъл ХЗС представлява система от последователно свързани, независими елементи без възстановяване, защото **отказът на който и да е елемент от системата, води до отказ на цялата система, а отказът на един не води до промяна в надеждността на друг**. В този смисъл надеждността на ХЗС е събитието **едновременна безотказна работа на всички елементи** до момент t :

$$\mathbb{P}(t) = P(\tau \geq t) = P[(\tau_1 \geq t) \cap (\tau_2 \geq t) \cap \dots \cap (\tau_n \geq t)] = \quad (20)$$

$$= P(\tau_1 \geq t) \cdot P(\tau_2 \geq t) \dots P(\tau_n \geq t)$$

$$P(\tau_i \geq t) = p_i(t) \quad (21)$$

$$\Rightarrow \mathbb{P}(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (22)$$

- **Надеждността на система от последователно свързани елементи е произведение от надеждностите на елементите в системата.**

Като се знае функцията на надеждност, може да се изчисли опасността за отказ на ХЗС, показана на Фиг. 1.

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{\mathbb{P}'(t)}{\mathbb{P}(t)} = \frac{[p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)]'}{p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)} = \\ &= \frac{p_1'(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t) + p_1(t) \cdot p_2'(t) \dots p_n(t) + \dots + p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n'(t)}{p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)} = \\ &= \frac{p_1'(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)}{p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)} + \frac{p_1(t) \cdot p_2'(t) \dots p_n(t)}{p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)} + \dots + \frac{p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n'(t)}{p_1(t) \cdot p_2(t) \dots p_n(t)} = \\ &= \frac{p_1'(t)}{p_1(t)} + \frac{p_2'(t)}{p_2(t)} + \dots + \frac{p_n'(t)}{p_n(t)} = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) \end{aligned} \quad (23)$$

където:

λ_i - опасност за отказ на цялата система в момент t ;

$\lambda_{i(t)}$ - опасност за отказ на i -ти елемент в момент t ($i = 1 \dots n$)

Опасността за отказ на системата представлява сбор от опасностите за отказ на всички последователно включени машини и елементи.

- Изчисляване на надеждност и дълговечност на ХЗС.

Тъй като ХЗС има елементи, чиито времена на безотказна работа са експоненциално разпределени, т.е. времето T_0 на безотказна работа на ХЗС също е експоненциално разпределено и се дава във вида:

$$\tau_i \sim \text{Exp}(\lambda_i) \Rightarrow \tau \sim \text{Exp}(\lambda) \quad (24)$$

$$p_i = e^{-\lambda_i \cdot t}, \text{ където } i = 1, 2 \dots n; t > 0; \lambda_i > 0; \lambda_i = \text{const} \quad (25)$$

$$\Rightarrow \mathbb{P}(t) = e^{-\lambda_1 \cdot t} e^{-\lambda_2 \cdot t} \dots e^{-\lambda_n \cdot t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \cdot t} = e^{-\lambda t} \quad (26)$$

$$E(\tau) = T_0, E(\tau_i) = T_i \quad (27)$$

$$T_i = \frac{1}{\lambda_i} \Rightarrow \lambda_i = \frac{1}{T_i} \quad (28)$$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_n}} \quad (29)$$

3. Изчисляване на надеждност и дълговечност на ХЗС.

В Таблица 1 са показани стойностите на дълговечността за съответните хидравлични елементи дадени от производителя [11,12].

Таблица 1

| Хидравлична машина / Хидравличен елемент | | Дълговечност в години T_i | Дълговечност в работни часове |
|---|-----|--------------------------------|----------------------------------|
| Помпа | П | $T_1 = 30$ | $T_1 = 216\ 000$ |
| Обратен клапан | ОК | $T_2 = 30$ | $T_2 = 216\ 000$ |
| Предпазно разтоварващ клапан | ППК | $T_2 = 20$ | $T_3 = 144\ 000$ |
| Хидравличен разпределител | Р2 | $T_4 = 100$ | $T_4 = 720\ 000$ |
| Хидравлично реле за налягане | РД | $T_5 = 20$ | $T_5 = 144\ 000$ |
| Хидравличен разпределител | Р1 | $T_6 = 100$ | $T_6 = 720\ 000$ |
| Хидравличен Цилиндър | Ц | $T_7 = 20$ | $T_7 = 144\ 000$ |

Средното време на безотказна работа е:

$$T_0 = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} + \frac{1}{T_5} + \frac{1}{T_6} + \frac{1}{T_7}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{30} + \frac{1}{20} + \frac{1}{100} + \frac{1}{20} + \frac{1}{100} + \frac{1}{20}} = \frac{1}{\frac{71}{300}} = 4,2 \text{ години} \quad (30)$$

След като е изчислено средното време T_0 , се изчислява опасността за отказ λ .

$$\lambda = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{4,2} = 0,238 \quad (31)$$

Функцията на разпределение и функцията на надеждност съответно са:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,238t} \quad (32)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,238t} \quad (33)$$

Като се знаят тези характеристики се изчислява надеждността на системата за произволен период от време, предварително дефиниран за 1, 3, 5 и 10 години.

За 1 година: $P(1) = e^{-0,238 \cdot 1} = e^{-0,238} \approx 0,816 \quad (34)$

За 5 години: $P(5) = e^{-0,238 \cdot 5} = e^{-1,19} \approx 0,362 \quad (35)$

4. Програмен продукт за изчисляване на надеждност и дълговечност на хидравлични системи за задвижване.

На базата на така показания метод е разработен специален програмен продукт за изчисляване на надеждност и дълговечност показан като Таблица 2, в която се въвеждат стойностите за дълговечността, посочени от производителя на съответния елемент. Представени са резултати за средното време на безотказна работа на системата както и няколко оценки на риска за вероятността за отказ на системата през различни експлоатационни периоди от време - съответно 1, 3, 5 и 10 години на работа.

Таблица 2

| Хидравличен елемент | Дълговечност в работни часове | Дълговечност в години | Средно квадратично отклонение от дълговечността в години | Вероятност за отказ при 1 година безотказна работа | Вероятност за отказ при 3 години безотказна работа | Вероятност за отказ при 5 години безотказна работа | Вероятност за отказ при 10 години безотказна работа |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------|--|--|--|--|---|
| П | 216000 | 30 | 0,0011 | 0,033 | 0,095 | 0,154 | 0,283 |
| ОК | 216000 | 30 | 0,0011 | 0,033 | 0,095 | 0,154 | 0,283 |
| ППК | 144000 | 20 | 0,0025 | 0,049 | 0,139 | 0,221 | 0,393 |
| ХР2 | 720000 | 100 | 0,0001 | 0,010 | 0,030 | 0,049 | 0,095 |
| РД | 144000 | 20 | 0,0025 | 0,049 | 0,139 | 0,221 | 0,393 |
| ХР1 | 720000 | 100 | 0,0001 | 0,010 | 0,030 | 0,049 | 0,095 |
| Ц | 144000 | 20 | 0,0025 | 0,049 | 0,139 | 0,221 | 0,393 |
| ХЗСистема | 35409 | 4,92 | 0,0413 | 0,184 | 0,457 | 0,638 | 0,869 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от направените изследвания дават основание да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. Разработена е методика за изследване на дълговечността и надеждността

на хидравлични задвижващи системи.

2. С така разработената методика и представеният алгоритъм може да се направи една предварителна оценка за надеждността и дълговечността на хидравлична система за задвижване, но тази оценка важи само ако се спазват експлоатационните условия, при които са определени предварителните данни предоставени от производителя. За да се достигнат оптималните стойности за надеждността и дълговечността трябва да бъдат спазени редица мерки свързани с експлоатационните условия на дадена хидравлична система за задвижване. Това означава да се направи **предварителен функционален анализ на ХЗС който да включва:**

- Анализ на механичната част – включва всички механични детайли и възли (неподвижни и подвижни) и тяхното функционално предназначение и поведение;
- Анализ на хидравличната част – строго функционално предназначение на отделните клонове на хидравличната система. Клоновете на системата са паралелно свързани, като всеки клон отговаря за различна функция на системата. По този начин се минимизира броят на управляващите елементи. Във всеки клон трябва да е налице последователно свързване на хидравличните машини и елементи;
 - Анализ на вида, качествата и състоянието на хидравличната течност;
 - Анализ на електрическата част (управляваща част) – получава се най – точно от функционална диаграма на ХЗС, т.е. какви устройства работят в момент t.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ангелов, И., Методика за изследване на надеждността на хидравлични машини и хидравлични елементи, МНК, ЕМФ'2014, Созопол, 2014.
- [2] Гиндев, Е., Основи на приложната надеждност, София, 2000.
- [3] Маринов, М., К.Проданова, Теория на вероятностите, ТУ-София, 2011.
- [4] Обретенов, А., Математическа теория на надеждността, Техника, С., 1973.
- [5] Ушаков, К., Курс по инженерна теория на надеждността, ВМЕИ, С., 1983
- [6] DIN.EN.61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/-programmierbarer elektronischer Systeme, Teile 1 bis 7, Berlin, Beuth 2002 und 2003.
- [7] DIN EN ISO 12100-1, Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie (04/04). Berlin, Beuth 2004.
- [8] DIN EN ISO 12100-2: Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 2: Technische Leitsätze (04/04). Berlin, Beuth 2004.
- [9] Findeisen, D., F. Findeisen, Ölhdraulik, Handbuch für die hydraulische Leistungsübertragung in der Fluidtechnik. 4. Aufl. Springer, Berlin, 1994.
- [10] Krist, T.: Hydraulik Fluidtechnik. 7. Aufl, Vogel, Würzburg, 1991.
- [11] Richtlinie 98/37/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 22. Juni 1998 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Maschinen. ABI. EG (1998) Nr. L 207, S. 1-46.
- [12] Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Teil 2. 3.Aufl. Hrsg., Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) 2000.

За контакти:

Доц. д-р инж. Илчо Иванов Ангелов, Технически Университет – София, Катедра Хидроаеродинамика и Хидравлични машини, 0887 857820, ilangel@tu-sofia.bg.

Докладът е рецензиран.