

Аналіз моделей відмов гідросистеми універсальної пересувної гідроустановки

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»
Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба*

На основі аналізу моделей відмов для прогнозування надійності обґрунтовано, за яких умов, які моделі необхідно використовувати для оцінювання надійності елементів гідросистеми універсальних пересувних гідроустановок

Ключові слова: гідросистема, модель, відмова

Гідросистема (ГС) універсальної пересувної гідроустановки (УПГ) є складною сукупністю взаємозв'язаних вузлів, агрегатів і елементів – тобто упорядкованою сукупністю взаємозв'язаних та взаємодіючих елементів, які утворюють єдине ціле [1].

Але надійність системи з множини незалежних елементів визначається надійністю роботи окремих її елементів, тобто інтенсивністю їх відмов. Фактичні зовнішні діяння можуть перевищувати задані при проектуванні значення і матимуть найбільший вплив на агрегати з найгіршим сполученням допусків. Випадковість відмов полягає в тому, що вони виникають лише на агрегатах з найгіршим випадковим сполученням допусків або при випадковому сполученні зовнішніх діянь, що перевищують призначенні за технічним завданням рівні. Втрата працездатності ГС чи її окремих підсистем може також відбутися як внаслідок виходу її вихідних параметрів за межі технічних умов, так і внаслідок порушення функціонування її агрегатів і елементів. Тому виникає проблема вибору моделі відмов для прогнозування надійності гідросистеми [2].

Таким чином, метою статті є проведення порівняльного аналізу моделей відмов для прогнозування надійності елементів ГС УПГ.

Основний матеріал

Стосовно до ГС УПГ в якості моделей відмов найчастіше використовують аналітичні моделі, структурно-функціональні схеми (моделі), логічні моделі та параметричні моделі (модель "слабкої ланки") [1, 3-4].

Розглянемо аналітичну модель, яку можна представлено у вигляді векторної функції:

$$\vec{Z} = \psi(\vec{X}, \vec{Y}_{\text{поч}}, t), \quad (1)$$

де $\vec{X}$ - вектор діяння;

$\vec{Y}_{\text{поч}}$ - вектор початкових значень внутрішніх параметрів агрегату.

Згідно з такою моделлю гідроагрегат в несправному стані відрізняється від правного гідроагрегата тільки значеннями векторів:

$$\vec{Z}^k = \psi^k(\vec{X}, \vec{Y}_{\text{поч}}^k, t), \quad (2)$$

де індекс k відповідає k -му несправному стану гідроагрегата. Вважається, що вектор початкових значень структурних внутрішніх параметрів несправного агрегату $\vec{Y}_{поч}^k$ відрізняється від такого для справного агрегату ($\vec{Y}_{поч}$).

Фактична передатна функція за j -м параметром:

$$Z_j^* = \psi(X_j^*, Y_{поч}^*, t). \quad (3)$$

Передатні функції гідроагрегата отримують шляхом аналізу системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують його роботу. В еквівалентному лінеаризованому вигляді:

$$\vec{Z}(t) = L\vec{X}(t), \quad (4)$$

де L – лінійний оператор.

Для оцінки стану агрегату виміряти значення вихідних параметрів Z_j^* порівнюються зі значеннями векторів $\vec{Z}$ і $\vec{Z}_k$. В результаті можна визначити, в якому (справному чи несправному) стані перебуває агрегат і які можливі причини виниклої несправності. Слід зазначити, що така модель використовується переважно для таких категорій відмов, де вектор структурних внутрішніх параметрів $\vec{Y}$ чітко і однозначно пов'язаний з вектором вихідних параметрів $\vec{Z}$. Це стосується зношування спряжених пар, зміни фізичних властивостей ущільнень, забруднення гідровлічної рідини, тощо. Власне, головним призначенням її є діагностування відмов ГС за зміною вектора вихідних параметрів.

Але існує інша група відмов, де протягом певного періоду часу $t < t_{крит}$, внутрішніх параметрів агрегатів жодним чином не відбивається на векторі вихідних параметрів ГС. Це стосується перш за все утоми і корозії елементів ГС. Дефект розвивається приховано:

$$\begin{aligned} \psi^k(\vec{X}, \vec{Y}_{поч}^k, t) &= \psi(\vec{X}, \vec{Y}_{поч}, t) = Z; \\ t &\leq t_{крит}; \\ \vec{Y}_{поч}^k &\neq \vec{Y}_{крит}^k; \end{aligned} \quad (5)$$

Вихідні параметри ГС з дефектом не відрізняються від вихідних параметрів справної ГС.

$$\vec{Y}^k = \vec{Y}^k(\vec{X}, t). \quad (6)$$

Через певний проміжок часу $t_{крит}$, критичний для заданого вектора діяння $\vec{X}$, вектор внутрішніх параметрів катастрофічно, стрибкоподібно змінюється (наприклад, при руйнуванні елементами ГС). Тобто:

$$\vec{Y}^k(\vec{X}, t) = \vec{Y}_{крит}^k. \quad (7)$$

Катастрофічна зміна вектора внутрішніх параметрів елемента ГС призводить до миттєвої зміни вектора вихідних параметрів ГС:

$$\vec{Y}_{\text{крит}}^k \rightarrow Z_{\text{крит}}^k.$$

$$Z = \left| \begin{array}{l} z; Y_{\text{поч}}^k \neq Y_{\text{крит}}^k; t < t_{\text{крит}}; Y_{\text{поч}}^k = Y(\vec{X}, t) \\ z^k; Y_{\text{поч}}^k = Y_{\text{крит}}^k; t \geq t_{\text{крит}}; Y_{\text{поч}}^k = Y(\vec{X}, t_{\text{крит}}) \end{array} \right|. \quad (8)$$

Слід зазначити, що перебіг зміни стану елемента ГС залежить не лише від часу, але й від значення вектора діяння $\vec{X}$. Незважаючи на постійний розвиток дефекту (утоми, корозії), пошкоджений елемент і ГС в цілому може необмежено довго перебувати в функціональному стані – відносно до певної множини значень вектора діяння $\vec{X}$. Але якщо $\vec{X}$ набуде несприятливої сукупності значень, відбудеться катастрофічна зміна стану елемента ГС і системи в цілому. З подібною несприятливою сукупністю значень вектора діяння $\vec{X}$ можна не зіткнутися протягом усього терміну експлуатації ГС. Але з розвитком дефекту в часі, несуча здатність елемента безперервно зменшується. Відповідно, зменшується область сприятливих значень вектора діяння $\vec{X}$, при яких катастрофічна зміна стану не відбувається. В результаті, якщо умові експлуатації залишаються незмінними, катастрофічний, неприпустимий рівень вектора діяння $\vec{X}_{\text{крит}}$ стає все нижчим, а отже безперервно зростає імовірність появи вектора такого рівня. З вищесказаного випливає, що для утомного руйнування і корозії за вихідними параметрами ГС можна розпізнати катастрофічну зміну стану елемента ГС, але неможливо діагностувати повільну, приховану фазу зміни внутрішнього стану елемента.

В реальності раптова, катастрофічна зміна внутрішнього стану елемента ГС, як правило, є незворотною, а катастрофічна зміна вектора вихідних параметрів фактично означає втрату відповідної функції ГС. Для уникнення катастрофічних ситуацій необхідне діагностування відмов в їх прихованій, повільній фазі.

Оскільки ГС УПГ та їх окремі функціональні ділянки є складними розгалуженими гідромеханічними системами з розподіленими параметрами, їх аналітичний опис стає утрудненим. І доцільним є використання структурно-функціональних схем (моделей) з використанням для їх аналізу методів алгебри логіки і теорії графів.

Принципова схема ГС розбивається на блоки структурних схем, зберігаючи фізичні взаємозв'язки робочих процесів, що протікають в них. Виходом блоку S_i є вектор $\vec{Z}_i$ параметр Z_i^f , що характеризують стан потоку робочої рідини на виході гідроагрегата або стан вихідного елемента гідродвигуна. Складовими $\vec{Z}_i$ є параметри для джерел витрати рідини та агрегатів гідророзподільчої апаратури, а також параметри гідродвигуна. Входами блоку S_i є вектор $\vec{X}_i$ керуючих діянь і вектор $\vec{Y}_i$ параметрів, що характеризують стан потоку робочої рідини на вході в гідроагрегат.

Для насосів та насосних станцій складовими вектор, $\vec{Y}_i$ є параметри механічного або електричного привода (потужність, частота обертання, тощо), для електрогідролічних агрегатів – параметри електроживлення. Перехід від структурної схеми ГС до функціональної здійснюється шляхом розщеплення входів та виходів блоків структурної схеми на складові, розщеплення самих блоків на бло-

ки нижчого ієрархічного рівня S_i^j та їх поєднання у функціональні ланцюжки за параметрами розщеплення, де вихідний параметр Z_i^j блоку S_i^j є вихідним параметром y_{i+1}^j блока S_{i+1}^j . За умови збереження структури побудови ГС, отримана схема називається структурно-функціональною схемою (моделлю) ГС з розщепленими параметрами.

Якщо сукупність номінальних значень вихідних параметрів кожного гідроагрегата, обумовлених технічними умовами, складає область їх припустимих значень, а аналогічна область припустимих значень функціональних параметрів визначається для функціональних ділянок і ГС в цілому, то діагностування здійснюється, використовуючи оцінки типу "в нормі – не в нормі". В таких умовах застосовуються математичні моделі логічного типу "так – ні", а для їх аналізу методи алгебри логіки.

Логічна модель ГС УПГ може бути представлена, видозмінена структурно-функціональна схема, де логічні блоки S_i замінені на блоки логічної схеми W_i , а відповідні значення фізичних параметрів замінено логічними константами "істинно-хибно". Всі входи і виходи блоків вважаються бінарними логічними змінними, що приймають значення "істинно" (1), якщо значення відповідної фізичної величини перебуває в припустимих межах, і "хибно" (0), в протилежному випадку. Але логічні моделі є менш "гнучкими" і мають обмежену область застосування, оскільки вимагають виконання ряду умов так, необхідною є "істинність" всіх блоків $Y = \{y_i^j\}$, кожен i -й блок повинен мати тільки один вихід Z_i , блока W_i є припустимим тільки, якщо всі виходи його є припустимі ($y_i^{j=1}$), і сам блок W_i є справним. Вихідною функцією блока є кон'юнкція змінних Y_i і W_i :

$$Z_i = Y_i W_i. \quad (9)$$

Логічна модель вважається "вірною" якщо для будь-якої пари блоків, в яких вихід одного блока є входом іншого, підмножини припустимих значень входу і виходу та підмножини їх неприпустимих значень співпадають. Для кожного випадку несправності визначається сукупність вихідних параметрів логічних блоків системи $\{Z_i\}$, що приймають значення 1 або 0, в залежності від відповідності значення Z_i технічним умовам (ТУ). У випадку справності системи виході всіх логічних блоків мають прийняти значення 1. Але слід зазначити, що в реальних ГС може мати місце порушення умов алгебри логіки при збереженні працездатного стану системи. Це відбувається у випадках, коли якийсь із фізичних параметрів виходить за встановлені межі на незначний відсоток, і таке відхилення може бути компенсоване за рахунок роботи внутрішньої негерметичності електрогідравлічного крана та компенсується насосом регульованої подачі. Технічні умови (ТУ) на нього можуть бути не узгоджені з ТУ на роботу всієї ГС. Окрім того, тиск і витрата рідини в ГС змінюється в широких межах, тому вихід на певне значення окремого параметра одного з агрегатів за межі ТУ, може не призвести до виходу за межі ТУ функціональних параметрів ГС в цілому. В ряді випадків, на деяких режимах, порогові значення ряду параметрів ГС в загальному відсутні.

Перелічені особливості роботи складної розгалуженої ГС перешкоджають використанню логічних моделей в чистому вигляді. Недоліки логічних моделей долаються використанням графів причинно-наслідкових зв'язків. Вони використовуються, коли об'єкт діагностування не має явно виражених блоків, а також, коли то-

чні аналітичні або експериментальні залежності між параметрами об'єкта невідомі, і відомо лише, що один параметр якимось чином залежить від іншого.

Також можна використати модель "слабкої ланки". Суть такого підходу полягає в наступному: відомо що деформація і руйнування елемента ГС викликані несприятливим сполученням навантаження і міцності. В цьому випадку може бути застосована параметрична модель, де, як узагальнений параметр стану приймають навантаження Q , а за параметр граничного стану – несучу здатність R_n . Руйнування (відмова) відбувається за умови.

$$R_n - Q > 0. \quad (10)$$

Оскільки ГС є складною системою з значною кількістю елементів, підведена до системи енергія розподіляється нерівномірна. Навантаження на окремі елементи є різним. Окремі елементи мають різні властивості та початкові умови розвитку тріщин.

Швидкість поширення утомної тріщини:

$$a = a_0 e^{-\alpha \sigma}, \quad (11)$$

де a_0 , α - константи, що визначаються властивостями матеріалу;
 σ - прикладене напруження.

Відповідно в різних елементах, швидкість поширення тріщин буде різною, а тому різним буде і час відмови цих елементів.

В деяких елементах відмова відбудеться при нижчих рівнях накопиченої енергії. Такі елементи називаються "слабкими", бо спричиняють відмову всієї системи. При відмові n "слабких" ланок в системі N елементів, навантаження на позосталі елементи буде

$$R_n = R_0 N / (N - n), \quad (12)$$

де R_0 – початкове навантаження. Зріст навантаження призведе до відмови чергового "слабкого" елемента – і так до відмови системи в цілому.

Висновок

Проведений аналіз моделей відмов гідравлічної системи універсальної пересувної гідроустановки показав, що особливості роботи складної ГС перешкоджають використанню моделей в чистому вигляді.

Так аналітичну модель необхідно використовувати при діагностуванні відмов ГС за зміною вектора вихідних параметрів.

А якщо сукупність номінальних значень вихідних параметрів кожного гідроагрегата, обумовлених технічними умовами, складає область їх припустимих значень, а аналогічна область припустимих значень функціональних параметрів визначається для функціональних ділянок і ГС в цілому, то діагностування здійснюється, використовуючи оцінки типу "в нормі – не в нормі". В таких умовах застосовуються математичні моделі логічного типу "так – ні", а для їх аналізу методи алгебри логіки. Але логічні моделі є менш "гнучкими" і мають обмежену область застосування. Існуючі недоліки логічних моделей долаються використанням графів причинно-наслідкових зв'язків. Вони використовуються, коли об'єкт діагностування

не має явно виражених блоків, а також, коли точні аналітичні або експериментальні залежності між параметрами об'єкта невідомі, і відомо лише, що один параметр якимось чином залежить від іншого.

Також можна використати модель "слабкої ланки" при умові, що деформація і руйнування елемента ГС викликані несприятливим сполученням навантаження і міцності.

Список літератури

1. Комаров А.А. Надежность гидравлических устройств. М.: Машиностроение. 1976 – 224 с.
2. Залужний Р.М. Порівняльний аналіз властивостей надійності та живучості складних систем військового призначення / О.В. Лаврінчук, І.І. Сєряков // Системи озброєння і військова техніка. -2009.- Вип..4(20). – С. 101-104
3. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94. – К.: Держстандарт України, 1994.
4. Бронштейн И.Н. Семендяев К.А. Справочник по математике М.Наука Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986 -544 с..

Рецензент: д-р техн. наук, професор Є. М. Лисіков,
Державна академія залізничного транспорту, Харків.

Поступила в редакцію 03.09.12

Анализ моделей отказов гидросистемы универсальной передвижной гидроустановки

На основе анализа моделей отказов для прогнозирования надёжности обосновано, при каких условиях и какие модели возможно использовать для оценки надёжности элементов гидросистемы универсальных передвижных гидроустановок

Ключевые слова: гидросистема, модель, отказ.

Analysis of models refuses hydraulic systems of universal movable hydroelectric power plant

Basing on the model failure analysis fo prediction of reliability it has been proved what models and under what conditions are probable to use for estimation of the hydraulic system components of the multi-purpose mobile hydraulic units

Keywords: hydraulic systems, model, failure.