

Л.І. Мещеряков, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Національний гірничий університет)

СТАТИСТИЧНІ ЕКСЦЕСІЙНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ОЦІНКИ ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ГІРНИЧИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Вирішення завдання діагностики гірничих установок обумовлює визначення деякої сукупності (множини) параметрів, які несуть інформацію про їх стан. Такими параметрами, котрі прийнято називати діагностичними, можуть бути величини різних фізичних процесів, які супроводжують роботу гірничих електромеханічних установок (ГЕМУ).

Діагностичні параметри і відповідні їм сигнали, які підлягають вимірюванню, мають ряд атрибутивних особливостей. Одна з них полягає в тому, що більшість їх за своєю природою – неелектричні величини. Наприклад, це віброприскорення, температура, шум, кутові переміщення елементів конструкцій, витрати та тиски в магістралях подачі мастила і технічної води, крутні моменти, кутові швидкості і прискорення елементів ГЕМУ. Меншу частину діагностичних параметрів складають електричні величини: споживані активна і реактивна, миттєва і середня потужності, струм, напруга, $\cos(\varphi)$ та інші сигнали, що характеризують стан електроустаткування.

Іншою особливістю діагностичних параметрів ГЕМС є їхній розподіл на дві групи: приватні та узагальнені. Перші відображають стан окремих елементів і вузлів гірничих машин, другі – загальний стан більш великих вузлів, блок механізмів, гірничого агрегату або всієї гірничої установки.

Найважливішою особливістю діагностичних параметрів є характер їхньої зміни у процесі діагностування, що дозволяє поділити їх за цією ознакою на статичні і динамічні. До статичних параметрів гірничих установок можна віднести значення ваги робочого інструмента, зусилля в конструкціях, тиски і витрати в системах гідروпідпору та змашування, тиски і витрати промивальної рідини, лінійні і кутові переміщення елементів конструкцій. Динамічні параметри є випадковими процесами які включаються до енергетичних, вібраційних та акустичних сигналів.

Узагальнені діагностичні сигнали мають, в основному, випадковий, полігармонічний характер зміни і містять в окремих своїх діагностичних ознаках інформацію про технічний стан різних елементів і вузлів ГЕМУ, їх енергетичні, технічні та технологічні режими [1,2,3]. Вони більш перспективні і цінні для вирішення завдань діагностики, оскільки несуть значний обсяг інформації і при використанні ефективних методів обробки дають більш повну картину оперативного технічного, енергетичного та технологічного стану ГЕМУ при малому часі виміру. Однак, для їхньої обробки потрібні більш складні засоби вимірювальної і обчислювальної техніки, та насамперед потрібні більш інформаційні методи обробки і відповідні оцінки. У цьому плані цікавими виступають ексцесивні оцінки інформаційних процесів діагностування ГЕМУ.

Невипадкова функція двох аргументів $\chi_{uu}(t, v)$, яка для кожної пари значень t і v дорівнює ексцесу умовного математичного сподівання відповідних перетинів інформаційного випадкового сигналу, визначається як одномірна ексцесивна функція (функція ексцесу) випадкового сигналу $U(t)$ (автоексцесивна функція)

$$\chi_{uu}(t, v) = M \left\{ \frac{1}{\sigma_u} [M(U_t | U_v) - MU_t]^4 - 3 \right\}.$$

Нормоване значення одномірної ексцесивної функції знаходиться як

$$\vartheta_{uu}(t, v) = \frac{\chi_{uu}(t, v)}{(EU_t)}.$$

Одномірна автоексцесивна функція випадкового сигналу входу $U(t)$ через відповідні щільності імовірності описується формулою

$$\chi_{uu}(t, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sigma_u} \left[\int_{-\infty}^{\infty} u_t f(u_t; t | u_v; v) du_t - \int_{-\infty}^{\infty} u_t f_u(u_t; t) du_t \right]^4 - 3 \right\} f_u(u_v; v) du_v,$$

де $f_u(u_t; t)$ – одномірна щільність ймовірності випадкового сигналу $U(t)$; $f_u(u_t; t | u_v; v)$ – умовна щільність імовірності випадкового сигналу $U(t)$.

Невипадкова функція двох аргументів $\chi_{yu}(t, v)$, яка для кожної пари значень t і v дорівнює ексцесу умовного математичного сподівання перетину одного випадкового сигналу щодо перетину іншого сигналу визначається як одномірна взаємна ексцесивна функція. Для сигналів виходу $Y(t)$ та входу $U(v)$ вона відобразиться так

$$\chi_{yu}(t, v) = M \left\{ \frac{1}{\sigma_y} [M(Y_t | U_v) - MY_t]^4 - 3 \right\}. \quad (1)$$

З урахуванням виразу щільності ймовірності функцію (1) набуває вигляду:

$$\chi_{yu}(t, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sigma_{yu}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} y_t f_y(y_t; t | u_v; v) dy_t - \int_{-\infty}^{\infty} y_t f_y(y_t; t) dy_t \right]^4 - 3 \right\} f_y(y_t; t) dy_t,$$

де $f(y_i; t | u_v; v)$ – умовна щільність імовірності $Y(t)$ відносно $U(v)$; $f_y(y_i; t)$, $f_u(u_v; v)$ – одномірні щільності ймовірності випадкових сигналів $Y(t)$, $U(v)$.

У системах діагностики ГЕМУ раціональніше використовувати одномірну нормовану ексцесивну функцію. Вона визначається як ексцесивне відношення випадкових значень сигналів $Y(t)$ та $U(v)$ при довільних значеннях їхніх аргументів t і v , тобто

$$\vartheta_{yu}(t, v) = \frac{\chi_{yu}(t, v)}{E_y(t)}.$$

Діагностична оцінка одномірної взаємної ексцесивної функції $\gamma_{yu}(t, v)$ відображає ступінь розсіювання розподілу умовного математичного сподівання $M(Y_t | u_v) = \varphi(u_v)$ при всій множині можливих значень перетинів t та v .

Одномірні множинні ексцесивні функції поширюють оцінку множинного ексцесивного відношення на випадок декількох випадкових сигналів:

$$\chi_{u|u}(t; v_1, v_2, \dots, v_n) = M \left\{ \frac{1}{\sigma_{uu}^4} M \left[M(U_t | U_{v_1}, \dots, U_{v_n}) - MU_t \right]^4 - 3 \right\}.$$

Тоді одномірна множинна взаємна ексцесивна функція визначиться як

$$\chi_{y|u}(t; v_1, v_2, \dots, v_n) = M \left\{ \frac{1}{\sigma_{yu}^4} M \left[M(Y_t | U_{v_1}, \dots, U_{v_n}) - MY_t \right]^4 - 3 \right\}.$$

Одномірні нормовані оцінки множинних взаємних ексцесивних функцій мають вигляд

$$\vartheta_{u|U}^2(t; v_1, v_2, \dots, v_n) = \frac{\chi_{u|U}(t; v_1, v_2, \dots, v_n)}{EU(t)},$$

$$\vartheta_{y|U}^2(t; v_1, v_2, \dots, v_n) = \frac{\chi_{y|U}(t; v_1, v_2, \dots, v_n)}{EY(t)}.$$

Діагностичні оцінки одномірних нормованих множинних ексцесивних функцій відображають множинні ексцесивні відношення випадкового сигналу в момент часу t і випадкових величин $U_{v_1}, U_{v_2}, \dots, U_{v_n}$ у кожній точці t, v_1, v_2, \dots, v_n області виміру. Цим визначається ступінь сукупного впливу множини значень випадкового сигналу на задане значення того ж самого випадкового сигналу

для одномірної автоексцесивної функції або іншого випадкового сигналу для одномірної взаємоексцесивної функції. В автоексцесивному випадку функція умовного математичного сподівання $M(U_t | u_{v_1}, \dots, u_{v_n}) = \varphi(u_{v_1}, \dots, u_{v_n})$ є ймовірнісною моделлю внутрішньої структури випадкового енергоінформаційного сигналу $U(t)$ і сила зв'язку за цією моделлю визначається множинною ексцесивною функцією $\chi_{u|U}(t; v_1, \dots, v_n)$. Модель же сукупного впливу $U(v)$ для аргументів v_1, v_2, \dots, v_n на значення випадкового сигналу $Y(t)$ для кожного t задається функцією множинного умовного математичного сподівання $M(Y_t | u_{v_1}, \dots, u_{v_n}) = \varphi(u_{v_1}, \dots, u_{v_n})$, а тіснота зв'язку – $\chi_{y|U}(t; v_1, \dots, v_n)$.

Для розв'язання задач ексцесивної ідентифікації з метою оперативного діагностування ГЕМУ можуть бути використані в різних технологічних ситуаціях узагальнені взаємні ексцесивні функції, які забезпечують одержання умовної характеристики щодо процесу $U(t)$ статистичного зв'язку ексцесу двох випадкових сигналів $X(t)$ і $Y(t)$. При цьому взаємодія двох випадкових сигналів стану $X(t)$ і виходу $Y(t)$ виміряється при фіксованих у різні моменти часу значеннях сигналу входу $U(t)$. Ця оцінка умовного статистичного зв'язку ексцесу визначається функцією трьох аргументів, тобто

$$\chi_{yx|U}(t, v; w) = M \left\{ \left[M(Y_t | U_w - MU_t) \right]^2 \left[M(X_v | U_w - MX_v) \right]^2 \right\}.$$

Характерним прикладом можуть служити і взаємодії випадкових сигналів виходу $Y(t)$ і входу $U(t)$ динамічної ГЕМУ, яка діагностується при фіксованому значенні випадкового сигналу стану $X(t)$. Внутрішній фізичний зміст узагальненої взаємної ексцесивної функції $\chi_{yu|x}(t, v; w)$ полягає в оцінці сили зв'язку між сигналами $Y(t)$ і $U(t)$ при заданому сигналі стану $X(t)$, коли тіснота їхнього зв'язку з випадковим сигналом стану $X(t)$ визначається відповідними одномірними взаємними ексцесивними функціями $\chi_{yx}(t, \varepsilon)$ та $\chi_{ux}(v; q)$. Запишемо $\chi_{yu|x}(t, v; w)$ через щільності ймовірності:

$$\begin{aligned} \chi_{yu|x}(t, v; w) = & \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left[\int_{-\infty}^{\infty} y_t f_y(y_t; t | x_w, w) dy_t - \int_{-\infty}^{\infty} y_t f_y(y_t; t) dy_t \right]^2 \right. \\ & \left. \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} u_v f_u(u_v; v | x_w, w) du_v - \int_{-\infty}^{\infty} u_v f_u(u_v; v) du_v \right]^2 \right\} f_x(x_w; w) dx_w \end{aligned} \quad (2)$$

Вираз (2) визначає узагальнену взаємну ексцесивну функцію $\chi_{yu|x}(t, v; w)$ як коваріацію умовних математичних сподівань, будучи таким чином характеристикою ексцесу лінійного зв'язку між двома нелінійними функціями регресії. Структу-

рне розкладання коефіцієнта кореляції свідчить, що функція $\chi_{yu|x}(t, v; w)$ відображає ту частину парної кореляції $K_{yu}(t, v)$, сигналів, яка обумовлена впливом випадкового сигналу $X(t)$ у відповідний момент часу $t = w$. Тому нормована узагальнена взаємна ексцесивна функція випадкових сигналів $Y(t)$, $U(t)$ щодо сигналу $X(t)$ знаходиться як

$$\vartheta_{yu|x}(t, v; w) = \frac{\chi_{yu|x}(t, v; w)}{E_y(t)E_u(v)}. \quad (3)$$

У виразі (2) випадковий сигнал стану $X(t)$ з позицій завдання діагностики можна використовувати як фіксуючу умову стану, при різних поточних значеннях якого розглядається взаємодія сигналів виходу $Y(t)$ і входу $U(t)$.

Узагальнені автоексцесивні функції аналогічні функціям (2) і (3) вимірюючи ексцес лінійного зв'язку між функціями авторегресії за траєкторіями випадкових сигналів, при цьому характеризують автокореляційну залежність, обумовлену одномірним перетином процесу в різні моменти часу. Самі функції авторегресії $M(U_t | u_w) = \psi_{u1}(u_w)$ і $M(U_v | u_w) = \psi_{u2}(u_w)$ звичайно є нелінійними.

Аналіз формалізованих виразів ексцесивних функцій (2) і (3) виявив, що узагальнено вони являють коваріації умовних моментних функцій випадкових сигналів. Це дозволяє розширити їхній клас за рахунок введення оцінки умовного зв'язку двох випадкових сигналів $Y(t)$ і $U(t)$ при фіксованих у різні моменти часу w, q значеннях випадкових сигналів різних станів $X1(t)$ і $X2(t)$ та визначити функцію виду

$$\chi_{yu|x1x2}(t, v; w, q) = \text{cov} \left[M(Y_t | X1_w)^2, M(U_v | X2_q)^2 \right]. \quad (4)$$

Така функціональна оцінка (4) дозволяє знайти опосередкований зв'язок пари випадкових сигналів $Y(t)$ і $U(t)$ через взаємозв'язок двох інших випадкових сигналів штатних та передаварійних станів $X1(t)$ і $X2(t)$, а при наявності додаткової інформації про вигляд регресивних залежностей оцінити тісноту статистичного зв'язку і формульованих умов самих сигналів $X1(t)$ і $X2(t)$.

У випадку, коли кожній вимірюваній парі значень випадкових сигналів $Y(t)$ і $U(v)$ відповідає деякий вектор тимчасових перетинів фонового, випадкового сигналу стану $X(t)$, то можна використовувати ексцесивну оцінку умовного зв'язку, що визначається як узагальнена множинна ексцесивна функція за формулою:

$$\chi_{yu|x}(t, v; w_1, \dots, w_n) = \text{cov} \left[M(Y_t | X_{w_1}, \dots, X_{w_n})^2, M(U_v | X_{w_1}, \dots, X_{w_n})^2 \right]. \quad (5)$$

У виразі (5) умовні математичні сподівання випадкових значень сигналів $Y(t)$ і $U(v)$ визначаються щодо фонового вектора значень випадкового сигналу $X(t)$ в кінцевій множині точок w_1, \dots, w_n з діапазону визначеного виміру. Відповідні нормовані значення функцій знаходяться діленням $\chi_{yu,xu}(t, v; w, q)$ і $\chi_{yux}(t, v; w_1, \dots, w_n)$ на значення $E_y(t)$ і $E_x(v)$.

Структура системи діагностування, в якій реалізуються методи ексцесивних інформаційних оцінок, є найважливішою визначальною частиною в практичній реалізації методу енергетичного діагностування. Функцією мети обробки сигналів енергоспоживання є формування діагностичних ознак, чуттєвих до досить малих змін параметрів технічного стану гірничих машин і механізмів на фоні існування високого рівня перешкод від їхньої роботи. Тому для виділення технічно інформативної тонкої структури сигналу необхідне застосування різних аналітичних методів витягу інформації, таких як: гребінчаста фільтрація у вузьких смугах в сполученні з амплітудним та фазовим детектуванням сигналу в зонах змушених і власних частот механізму; частотна і часова селекція; виділення когерентних складових; аналіз поводження статистичних моментів одно- і двомірних законів розподілу миттєвих значень; кепстральний та біспектральний аналізи для розмежування станів ГЕМУ за класами від ступеня працездатності на сучасний момент, а для виявлення змін векторів станів необхідне використання методів розпізнавання образів і прогнозування. Це вимагає розробки і реалізації в структурах систем діагностування алгоритмів класифікації і прогнозування станів. Таким чином, значний обсяг обчислень, пов'язаний з виділенням і обробкою поточної інформації, встановленням еталонних діагностичних ознак та їх граничних значень, класифікацією функцій і вирішальних правил для розпізнавання технічного стану, прогнозування його змін, обумовлює побудову вихідної структури автоматичної системи діагностування на базі мікроЕОМ.

Структурно процедура діагностування складається з двох взаємообумовлених етапів: навчання системи діагностування і розпізнавання [1,2]. На першому етапі навчання розробляється алгоритм діагностування, для чого аналізуються властивості енергетичних процесів та сигналів при нормальному стані ГЕМУ і з появою дефектів складається словник інформативних ознак множини несправностей, які підлягають виявленню. Надалі вибирають функції, які класифікують, і встановлюють вирішальні правила для розпізнавання необхідних станів. Для цього в просторі ознак формуються зони, які відповідають декільком градаціям діагностичного параметра граничної можливості технічного стану ГЕМУ (норма, гранично припустиме значення, перед аварійний стан, аварія). І нарешті, на базі розроблених алгоритмів поточним інформативними характеристикам енергетичного сигналу ставиться у відповідність поточний технічний стан, тобто здійснюється процес діагностування.

Головна складність такого підходу полягає у визначенні і формуванні інваріантних діагностичних ознак при вкрай обмеженому обсязі апріорної інформації про довірчі границі зон нормального та дефектного станів. Вирішення цієї

проблеми можливо за допомогою апостеріорної інформації, для чого потрібна організація безперервного або періодичного контролю представницьких діагностичних ознак, які характеризують поточний технічний стан ГЕМУ, та статистична оцінка градієнта їхньої зміни за часом, яка і може бути визначена за допомогою ексцесивних інформаційних оцінок.

Інформаційні можливості енергетичної діагностики визначаються тим, що сигнал, сприйнятий датчиком, встановленим у системі енергозабезпечення ГЕМУ, містить як потрібну інформацію про стан даного елемента гірничої машини або механізму, так і масу фрикативної, тому проблема формування діагностичних ознак нерозривно пов'язана з проблемою виділення корисного сигналу на фоні перешкод. Для реалізації цієї мети застосовуються процедури фільтрації, стробіювання, детектування, синхронного нагромадження і ряду інших, котрі збільшують значення відношення сигнал/перешкода. Для виділення корисного сигналу використовується також підвищення чутливості діагностичної ознаки за рахунок виділення інформативних сигналів у кінематичних, значимих зонах і зонах резонансів як всієї механічної системи ГЕМУ, так і окремих її елементів.

Якщо не вдасться виявити характерні діагностичні ознаки, можна застосувати узагальнений енергетичний портрет стану ГЕМУ при його нормальному та дефектному функціонуванні і розпізнавання станів здійснити шляхом порівняння енергетичного портрета поточного стану з еталонним у n -мірному просторі ознак.

Розглянуті прийоми можна використовувати для визначення технічного стану ГЕМУ на всіх етапах їхнього життєвого циклу: на стадії виготовлення, експлуатації та ремонту, хоча, для кожного з цих етапів є свої специфічні особливості. Так, на етапі виготовлення характерний і природний підхід, пов'язаний з набором статистичних даних, з формуванням еталонів по групі агрегатів, враховуючи їх структурну кінематику і розкид параметрів за кожним з них. На стадії експлуатації в залежності від числа і вартості складових елементів можливі кілька підходів. При діагностуванні працездатності однотипних ГЕМУ, наприклад бурових установок (ЗИФ-650М, УКБ-50/100, УКБ-200/300 та ін.) правила розробляються з урахуванням статистики. Для унікальних бурових установок (УКБ-1200/2000, УКБ-2000/3000 та ін.) правила діагностування розробляються на базі індивідуального спостереження за характеристиками бурових машин і механізмів з метою визначення тренда та індивідуального прогнозування істотних відхилень діагностичних параметрів, які можуть привести до передаварійних станів. Звичайно аварійно небезпечними є вузли з важконавантаженими або високошвидкісними елементами (породоруйнівні інструменти, підшипникові опори, зубчасті колеса, муфти і т.п.). Специфіка діагностування ГЕМУ полягає в тому, що заздалегідь в стендових умовах украй важко моделювати найбільш імовірні несправності та оцінити характер їхнього прояву в енергетичному сигналі через значні масово-габаритні параметри агрегатів.

Основні технологічні ГЕМУ як правило мають велику продуктивність та потужність одиниці устаткування, що визначає складність і відповідальність прийняття по ним керуючих рішень. Вони являються дорогими агрегатами, від надійності безаварійного функціонування яких залежить життя обслуговуючого персоналу, що вимагає особливої уваги до їх керування. Тут вкрай важливо яко-

мога раніше знайти та не допустити розвитку дефектів, які приводять до необоротних передаварійних станів. Тому раннє діагностування дефектів ГЕМУ що обумовлюється використанням ексцесивних інформаційних оцінок, є вкрай актуальною проблемою.

Список літератури

1. Мещеряков Л.И. Основы энергоинформационного диагностирования горных электромеханических систем //Сб. науч. тр. НГАУ. – 2000.– №10. – С. 179-185.
2. Мещеряков Л.И. Дисперсионные алгоритмы идентификации в информационно-аналитических системах техногенной безопасности //Сб. науч. тр. НГАУ. – 2001.– №12, т.1. – С. 233-239.
3. Мещеряков Л.И. Математические основы построения дисперсионных диагностических моделей горных электромеханических систем. //Вибрации в технике и технологиях: Всеукр. науч.-техн. журн.– 2002. – №1(22). – С.41-44.