ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ В АПК

Скрипник М.М.[1]

[1] доктор технічних наук, ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна

Наведені результати діагностування сучасного енергообладнання в АПК.

Аналіз існуючих методів і технічних засобів експлуатації та діагностування енергообладнання в АПК вказує на доцільність використання перехідних характеристик як одного із основних напрямків теоретичного діагностування. При спрощеному аналізу (експрес-аналізі) можливо обмежитися рівнянням першого порядку з додатковим запізнюванням. При значній кількості елементів діагностування перехідні характеристики доцільно апроксимувати диференційним рівнянням другого порядку.

Відповідно, шукана функція має вигляд:

$$W(P)=\frac{K\cdot e^{-pQ}}{(T_1P+1)(T_2P+1)}, \tag{1}$$

при спрощеному аналізі:

$$W(P)=\frac{K\cdot e^{-pQ}}{TP+1}. \tag{2}$$

Безпосередньо за структурою систем експлуатації і діагностування можливо отримати вихідну систему рівнянь і розв’язати її відносно будь-якої змінної. Для цього необхідно скласти математичне описання кожного елемента системи.

Для таких елементів як датчики, блоки вимірювань, підсилювачі характерні пропорційні залежності між вхідними і вихідними величинами. Слід відзначити, що у вузькому робочому діапазоні діагностування базових параметрів і режимів роботи обладнання експоненціальні залежності датчиків з достатньою точністю апроксимуються лінійними залежностями. Оскільки зміни опору датчиків невеликі, підсилювачі працюють при малих відхиленнях вхідної напруги, тому шукана функція системи визначається за формулою (2).

Вибір режимів експлуатації та діагностування енергообладнання в АПК здійснюється у відповідності з енергетичними характеристиками “система-об’єкт”. На їх основі визначаються тривалості режимів діагностування (безперервні, квазістаціонарні, чергуючі), а також межі їх регулювання та критичні значення.

Один із напрямків теоретичного діагностування – аналіз характеристик пристроїв як нелінійних елементів з статичними характеристиками, симетричними відносно значень середньої тривалості того чи іншого режиму (аналогічно режимам роботи релейних елементів).

Спрощені характеристики "система-об'єкт", як і характеристики регулюючих пристроїв систем,мають вигляд:

$$z = \begin{cases} +b, \text{при} -\alpha < x < \infty \\ -b, \text{при} -\infty < x < \alpha \end{cases} \quad (3)$$

де x, z - відповідно вхідний і вихідний параметри;
a, b — параметри регулюючих пристроїв.

Якщо на вхід нелінійного елемента надходять коливання однієї частоти (першої гармоніки) $x = A \cdot \sin\omega t$, то його вихідна величина z являтиме собою сукупність прямокутних імпульсів, частота яких ω. Вихідну величину будь-якого нелінійного елемента системи можливо розкласти в ряд Фур'є і навести у вигляді синусоїдальних коливань з частотою ω (першої гармоніки) і гармонік вищого порядку з частотами 3ω, 5ω і т. д. Оскільки вищі гармоніки мають більш високу частоту, то при їх проходженні через лінійні елементи з властивостями фільтрів, амплітуди цих гармонік значною мірою послабнуть. Тому можливо вважати, що на вхід нелінійного елемента надходить тільки перша гармоніка. В зв'язку з тим, що вищі гармоніки значно послаблюються, то в першому наближенні їх можливо не враховувати і вважати, що при надходженні на вхід нелінійного елемента синусоїдального сигналу з амплітудою A і частотою ω на його виході будуть коливання тільки першої гармоніки з амплітудою $B(z = B\sin\omega t)$, яка залежить від амплітуди вхідного сигналу, тобто $B = B(A)$. Наявність однієї гармоніки на виході при надходженні на вхід сигналу однієї частоти властиво тільки лінійним елементам. Тому залежності "система-об'єкт" можливо замінити еквівалентним лінійним елементом, тобто здійснити гармонічну лінеаризацію нелінійності. Гармонічна лінеаризація нелінійної функції $z = F(x)$ зводиться до заміни її співвідношенням:

$$z = \left[q(A) + \frac{q'(A)}{\omega} P \right] x \quad (4)$$

де $q(A)$ і $q'(A)$ - коефіцієнти гармонічної лінеаризації.

Нелінійна функція не залежить від швидкості зміни вхідної величини. При цьому коефіцієнти гармонічної лінеаризації визначаються так:

$$q(A)=\frac{1}{\pi A}\int_0^{2\pi}F(A\cdot\sin\psi)\sin\psi d\psi \tag{5}$$

$$q'(A)=\frac{1}{\pi A}\int_0^{2\pi}F(A\cdot\sin\psi)\cos\psi d\psi \tag{6}$$

Таким чином, отримаємо функцію $F(A\cdot\sin\psi)$ з аргументом $\psi=\omega t$, причому точкам перемикання режимів експлуатації (діагностики) $x=a$ та $x=-a$ будуть відповідати значення аргументу: $\psi_1=\arcsin\frac{a}{A}$ і $\psi_2=\pi-\arcsin\left(-\frac{a}{A}\right)$.

Коефіцієнти q і q' визначаються при умові $A\geq a$. Інтеграли в формулах (5 і 6) матимуть значення:

$$q(A)=\frac{2}{\pi A}\int_{\Psi_1}^{\psi_2}F(A\sin\psi)\sin\psi d\psi=\frac{2}{\pi A}\int_{\psi_1}^{\psi_2}b\sin\psi d\psi=-\frac{2b}{\pi A}\cos\psi\Big|_{\psi_1}^{\psi_2}=\frac{2b}{\pi A}(\cos\psi_1-\cos\psi_2) \tag{7}$$

Враховуючи значення ψ_1 і ψ_2, перепишемо формулу для визначення $q(A)$:

$$q(A)=\frac{4b}{\pi A}\sqrt{1-\frac{a^2}{A^2}} \tag{8}$$

Визначимо коефіцієнт $q'(A)$:

$$q'(A)=\frac{2}{\pi A}\int_{\Psi_1}^{\psi_2}F(A\sin\psi)\cos\psi d\psi=\frac{2}{\pi A}\int_{\psi_1}^{\psi_2}b\cos\psi d\psi=\frac{2b}{\pi A}\sin\psi\Big|_{\psi_1}^{\psi_2}=-\frac{2b}{\pi A}(\sin\psi_1-\sin\psi_2) \tag{9}$$

З урахуванням значень ψ_1 і ψ_2 отримаємо:

$$q'(A)=-\frac{4ab}{\pi A^2} \tag{10}$$

Таким чином, шукана функція при аналізі режимів експлуатації і діагностування набуває вигляду:

$$Z=\frac{4b}{\pi A^2}(\sqrt{A^2-a^2}-\frac{a}{\omega}P)x \tag{11}$$

Вихідна система рівнянь при діагностуванні має вигляд:

$$\Delta x=x_{вх}\text{-}x_{Д};$$
$$x=K_1\cdot\Delta x;$$
$$Z=\left[q(A)+\frac{q'(A)}{\omega}P\right]x; \tag{12}$$

$$x_{\text{вих}} = \frac{\text{К}_2 \text{e}^{-pQ}}{\text{ТР}+1};$$
$$x_1 = K_3 \cdot x_{\text{вих}};$$
$$x_2 = K_4 \cdot x_1;$$

Оскільки рішення знаходимо в формі $x = A\sin\omega t$ то $q = const$ і (12) є система лінійних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Але особливість цієї системи полягає в тому, що величина постійного коефіцієнта q при цьому невідома. Вона визначиться, коли буде знайдене значення A. Зведемо (12) до системи 2-х рівнянь, вважаючи $x_{вх}=0$;

$$Z = \frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right)x$$
$$x = -K\frac{e^{-pQ}}{TP+1}\cdot Z \qquad (13)$$

де K – коефіцієнт режиму діагностування.

За системою рівнянь (13) отримуємо лінеаризоване рівняння:

$$(TP+1)x + Ke^{-pQ}\cdot\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right)x = 0 \qquad (14)$$

Із урахуванням вихідних залежностей (12) маємо:

$$W(P)\cdot Z(x) = \frac{K\cdot e^{-pQ}}{TP+1}\left[q(A) + \frac{q'(A)}{\omega}P\right] = \frac{K\cdot e^{-pQ}}{TP+1}\cdot\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right) \qquad (15)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо головний оператор системи експлуатації і діагностування енергообладнання:

$$\Phi(P) = \frac{Ke^{-pQ}\left[q(A) + \frac{q'(A)}{\omega}P\right]}{TP+1+Ke^{-pQ}\cdot\left[q(A) + \frac{q'(A)}{\omega}P\right]} = \frac{Ke^{-pQ}\cdot\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right)}{TP+1+Ke^{-pQ}\cdot\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right)} \qquad (16)$$

Прирівнюючи до нуля знаменник головного оператора, отримаємо характеристичне рівняння системи

$$TP+1+Ke^{-PQ}\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right) = 0 \qquad (17)$$

$$(T_1P+1)(T_2P+1) + Ke^{-PQ}\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2 - a^2} - \frac{a}{\omega}P\right) = 0 \qquad (18)$$

В цих рівняннях:

a і $в$ – параметри характеристик “система об’єкт”;

A, ω, K, T - експлуатаційно-діагностичні параметри енергообладнyяння.

Наступний етап аналізу передбачає використання характеристичного рівняння (17). Замість оператора підставляємо значення $J\omega$:

$$J\omega T+1+Ke^{-J\omega Q}\frac{4b}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2-a^2}-\frac{a}{\omega}J\omega\right)=0 \tag{19}$$

Використовуючи формулу Ейлера, отримаємо два трансцендентних рівняння:

$$1+\frac{4Kb}{\pi A^2}\left(\sqrt{A^2-a^2}\cos\omega Q-a\sin\omega Q\right)=0 \tag{20}$$

$$T\omega-\frac{4Kb}{\pi A^2}\left(a\cdot\cos\omega Q+\sqrt{A^2-a^2}\cdot\sin\omega Q\right)=0 \tag{21}$$

Переписавши і розділивши рівняння, маємо:

$$\frac{a\cos\omega Q+\sqrt{A^2-a^2}\sin\omega Q}{a\sin\omega Q-\sqrt{A^2-a^2}\cdot\cos\omega Q}=T\omega \tag{22}$$

Після відповідних перетворень отримуємо наступні формули для визначення параметрів експлуатації і діагностування енергообладнання:

$$A=\frac{a\sqrt{1+T^2\omega^2}}{\sin\omega Q+T\omega\cdot\cos\omega Q} \tag{23}$$

$$K=\frac{\pi\cdot a\left(1+T^2\omega^2\right)}{4b\left(\sin\omega Q+T\omega\cdot\cos\omega Q\right)} \tag{24}$$

$$A=\frac{4Kb}{\pi\sqrt{1+T^2\omega^2}} \tag{25}$$

$$\omega=\frac{1}{T}\sqrt{\left(\frac{4Kb}{\pi A}\right)^2-1} \tag{26}$$

Аналогічно отримуємо формулу для визначення основних параметрів при значній кількості об’єктів діагностування. В характеристичне рівняння (18) замість оператора P підставимо $J\omega$ і виділяємо дійсну і уявну частини, які потім прирівнюємо нулю. В результаті отримуємо два трансцендентних рівняння:

$$1-T_1T_2\omega^2+\frac{4Kb}{\pi A^2}\left(\cos\omega Q\sqrt{A^2-a^2}-a\sin\omega Q\right)=0 \tag{27}$$

$$(T_1+T_2)\omega-\frac{4Kb}{\pi A^2}\left(\sin\omega Q\sqrt{A^2-a^2}+a\cos\omega Q\right)=0 \tag{28}$$

Почергово виключаючи параметри A і K, отримуємо:

$$A=\frac{a\cdot\sqrt{\left(1-T_1T_2\omega^2\right)^2+\omega^2(T_1+T_2)^2}}{\left(1-T_1T_2\omega^2\right)\cdot\sin\omega Q+\omega\left(T_1+T_2\right)\cos\omega Q} \quad (29)$$

$$K=\frac{\pi\cdot a\left[\left(1-T_1T_2\omega^2\right)^2+\omega^2\left(T_1+T_2\right)^2\right]}{4b\left[\left(1-T_1T_2\omega^2\right)\sin\omega Q+\omega\left(T_1+T_2\right)\cos\omega Q\right]} \quad (30)$$

де T_1 і T_2 - постійні часу, отримані при апроксимації експериментальних характеристик, с;
ω - частота перемикань режимів діагностування, 1/с;
Q - тривалість діагностування, с.

Розрахунковий коефіцієнт "система-об'єкт" визначається так:

$$K=\frac{\pi A^2\left(T_1+T_2\right)\omega}{4b\left(\sin\omega Q\sqrt{A^2-a^2}\right)+a\sin\omega Q} \quad (31)$$

Зв'язок між експлуатаційними і діагностичними параметрами отримаємо, об'єднавши рівняння (29) і (30):

$$T_1^2T_2^2\omega^4+\left(T_1^2+T_2^2\right)\omega^2+1-\left(\frac{4Kb}{\pi A}\right)^2=0 \quad (32)$$

$$A=\frac{4Kb}{\pi\sqrt{T_1^2T_2^2\omega^4+\left(T_1^2+T_2^2\right)\omega^2+1}} \quad (33)$$

$$\omega^2=\frac{-\left(T_1^2+T_2^2\right)\pm\sqrt{\left(T_1^2+T_2^2\right)-4T_1^2T_2^2\left[1-\left(\frac{4Kb}{\pi A}\right)^2\right]}}{2T_1^2T_2^2} \quad (34)$$

Для аналізу показників надійності енергообладнання перетворимо рівняння (17), підставляючи $P=J\omega_i$:

$$L\left(J\omega_i\right)=TJ\omega_i+1+Ke^{-J\omega_iQ}\left(\frac{4b}{\pi A_i^2}\right)\left(\sqrt{A_i^2-a^2}-\frac{a}{\omega}J\omega_i\right) \quad (35)$$

Виділимо дійсну і уявну частини:

$$L\left(J\omega_i\right)=x\left(A_i;\omega_i\right)+Jy(A_i;\omega_i) \quad (36)$$

де

$$x\left(A_i,\omega_i\right)=1+\frac{4Kb}{\pi A_i^2}\left(\sqrt{A_i^2-a^2}\cdot\cos\omega_iQ-a\frac{\omega_i}{\omega}\sin\omega_iQ\right) \quad (37)$$

$$y(A_i,\omega_i)=T\omega_i-\frac{4Kb}{\pi A_i^2}\left(\sqrt{A_i^2-a^2}\cdot\sin\omega_iQ+a\frac{\omega_i}{\omega}\cos\omega_iQ\right) \quad (38)$$

Для забезпечення ефективної експлуатації та діагностування досліджуваних систем необхідно виконання вимог:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial A_i}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial \omega_i}\right) \geq \left(\frac{\partial x}{\partial \omega_i}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial A_i}\right) \tag{39}$$

Похідні мають наступні значення:

$$\frac{\partial x}{\partial A_i} = \frac{4Kb}{\pi}\left[\frac{\cos\omega Q}{A\sqrt{A^2-a^2}} - \frac{2}{A^3}\left(\sqrt{A^2-a^2}\cos\omega Q - a\sin\omega Q\right)\right] \tag{40}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega_i} = T - \frac{4Kb}{\pi A^2}\left[Q\left(\sqrt{A^2-a^2}\cdot\cos\omega Q - a\sin\omega Q\right) + \frac{a}{\omega}\cos\omega Q\right] \tag{41}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega_i} = -\frac{4Kb}{\pi A^2}\left[Q\left(\sqrt{A^2-a^2}\cdot\sin\omega Q + a\cos\omega Q\right) + \frac{a}{\omega}\sin\omega Q\right] \tag{42}$$

$$\frac{\partial y}{\partial A_i} = -\frac{4Kb}{\pi}\left[\frac{\sin\omega Q}{A\sqrt{A^2-a^2}} - \frac{2}{A^3}\left(\sqrt{A^2-a^2}\sin\omega Q + a\cos\omega Q\right)\right] \tag{43}$$

Із отриманої системи рівнянь витікає:

$$\sqrt{A^2-a^2}\cos\omega Q - a\sin\omega Q = -\frac{\pi A^2}{4Kb} \tag{44}$$

$$\sqrt{A^2-a^2}\sin\omega Q + a\cos\omega Q = \frac{\pi A^2}{4Kb}T\omega \tag{45}$$

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$\frac{\partial x}{\partial A_M} = \frac{2}{A}\left(1 + \frac{2Kb\cos\omega Q}{\pi\sqrt{A^2-a^2}}\right) \tag{46}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega_M} = Q + \frac{4Kb\sqrt{A^2-a^2}\cdot\sin\omega Q}{\pi A^2\cdot\omega} \tag{47}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega_M} = -\left(T\omega Q + \frac{4Kab\cdot\sin\omega Q}{\pi A^2\cdot\omega}\right) \tag{48}$$

$$\frac{\partial y}{\partial A_M} = \frac{2}{A}\left(T\omega + \frac{2Kb\cos\omega Q}{\pi\sqrt{A^2-a^2}}\right) \tag{49}$$

В робочих зонах експлуатації і діагностування енергообладнання значення $\sin\omega Q$ і $\cos\omega Q$ завжди позитивні. Підстановка в отримані похідні відповідних значень параметрів для досліджуваних режимів дає результати, які свідчать про наступне: при всіх значеннях $K \geq K_{кр}$ буде ефективна експлуатація систем, оскільки приведені вище залежності безперервні і однозначні.