

УДК 621.355.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОМПЛЕКСА ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ

А. И. Важинский

Публичное акционерное общество «Металлургический комбинат «АЗОВСТАЛЬ»
ул. Олимпийская, 185, г. Мариуполь, 87557, Украина. E-mail: vazhinsky-ai@azovstal.com.ua

Проведено исследование элементов электрического оборудования комплекса весового дозирования, обеспечивающего подготовку материалов металлургического процесса. Выполнено математическое моделирование, проведен анализ передаточных функций системы, установлены критерии работоспособности и определены диагностические параметры объекта. Выполнено построение и расчет диагностической модели для оценки технического состояния комплекса весоизмерения. Данный метод расчета и моделирования системы управления комплексом дозирования продемонстрировал, что в условиях неявности связей между параметрами элементов необходимо оценивать те параметры, влияние которых на работу системы является наибольшим. Выполненные расчеты и проведенное моделирование поведения системы при различных тестовых воздействиях подтвердили необходимость проведения оценки технического состояния объектов, подобных рассматриваемому, предложенным способом. Предложенный способ оценки технического состояния может рекомендоваться как второй этап диагностирования после проведения оценки работоспособности с использованием дискретного метода на основе использования таблицы функций неисправностей. Результаты исследования позволили реализовать функции диагностики в системе управления комплексом весового дозирования.

Ключевые слова: диагностика, математическая модель, передаточная функция, весовое дозирование.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ТЕХНІЧНИЙ СТАН ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПЛЕКСУ ВАГОВОГО ДОЗУВАННЯ

А. І. Важинський

Публічне акціонерне товариство «Металургійний комбінат «АЗОВСТАЛЬ»
вул. Олімпійська, 185, г. Маріуполь, 87557, Україна. E-mail: vazhinsky-ai@azovstal.com.ua

Проведено дослідження електротехнічних елементів комплексу вагового дозування, що забезпечує підготовку матеріалів металургійного процесу. Виконано математичне моделювання, проведено аналіз передавальних функцій елементів системи, встановлено критерії працездатності та визначено діагностичні параметри об'єкта. Виконано побудову й розрахунок діагностичної моделі для оцінки технічного стану комплексу ваговимірювання. Даний метод розрахунку й моделювання системи управління комплексом дозування продемонстрував, що в умовах неявності зв'язків між параметрами елементів необхідно оцінювати ті параметри, вплив яких на роботу системи є найбільшим. Виконані розрахунки й проведене моделювання поведінки системи за різними тестовими впливами підтвердили необхідність проведення оцінки технічного стану об'єктів, подібних даному, запропонованим способом. Запропонований спосіб оцінки технічного стану може рекомендуватися як другий етап діагностування після проведення оцінки працездатності з використанням дискретного методу на основі використання таблиці функцій несправностей. Результати дослідження дозволили реалізувати функції діагностики в системі управління комплексом вагового дозування.

Ключові слова: діагностика, математична модель, передатна функція, вагове дозування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Основная задача технической диагностики – получение информации о техническом состоянии объекта диагностирования (ОД). Для этого проводят измерение и анализ диагностических параметров. Элементом, ограничивающим в случае выхода из строя ресурс и работоспособность комплекса весового дозирования в целом, является асинхронный двигатель (АД). Получение достоверной информации о состоянии АД позволит предотвратить нарушение функционирования комплекса. Для решения поставленной задачи необходимо определить параметры АД, обеспечивающие получение достоверной информации о техническом состоянии объекта при минимальных затратах.

Целью работы является исследование элементов электрического оборудования комплекса весового дозирования и определение оптимального набора

параметров, номинальных значений и полей допусков для диагностирования объекта.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Математическое описание АД используется для исследования влияния изменения основных параметров АД на его техническое состояние.

АД описывается уравнениями Парка–Горева, которые в ортогональной системе координат 1, 2, вращающейся относительно неподвижной α, β с произвольной угловой скоростью ω_c , имеют вид [1]:

уравнения баланса напряжений цепей статора и ротора

$$\begin{aligned} \vec{U}_S &= \vec{I}_S R_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + j\omega \vec{\Psi}_S; \\ \vec{U}_R &= \vec{I}_R R_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_c - \omega_R) \vec{\Psi}_R, \end{aligned} \tag{1}$$

где R_S, R_R – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора; $\omega_R = z_p \omega$ – электрическая угловая скорость ротора, пропорциональная частоте вращения вала ω ; z_p – число пар полюсов АМ.

Уравнения связи между токами и потокоцеплениями:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_S &= \bar{I}_S L_S + \bar{I}_R L_m + \bar{I}_S L_{S\sigma}; \\ \bar{\Psi}_R &= \bar{I}_S L_m + \bar{I}_R L_R = \bar{\Psi}_m + L_{R\sigma} \bar{I}_R, \end{aligned} \quad (2)$$

где L_m – главная взаимная индуктивность (индуктивность намагничивания); $L_{S\sigma}, L_{R\sigma}$ – индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора (каждая из них обычно составляет 2–5 % от L_m); $L_S = L_m + L_{S\sigma}, L_R = L_m + L_{R\sigma}$ – полные индуктивности статора и ротора.

Во второй части уравнений (2) введен вектор главного магнитного потокоцепления:

$$\bar{\Psi}_m = \bar{I}_m L_m = L_m (\bar{I}_S + \bar{I}_R), \quad (3)$$

который при постоянной индуктивности L_m пропорционален вектору тока намагничивания $\bar{I}_m = \bar{I}_S + \bar{I}_R$.

Для отображения смысла параметров, входящих в уравнения (1)–(3), рассмотрим эквивалентную схему замещения АД (рис. 1). На схеме также обозначены фазные ЭДС обмоток двигателя – статора \bar{E}_S , намагничивания \bar{E}_m и ротора \bar{E}_R .

Электромагнитный момент может быть вычислен:

$$M = \frac{3}{2} z_p \operatorname{Im} [\bar{\Psi}_S^* \bar{I}_S] = \frac{3}{2} z_p \operatorname{Im} [\bar{\Psi}_R \bar{I}_R^*]. \quad (4)$$

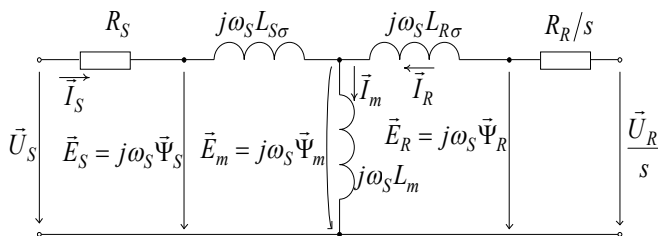


Рисунок 1 – Схема замещения АД

Уравнения Парка–Горева (1)–(4), дополняемые уравнением движения

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

представляют собой обобщенное математическое описание АД в произвольной ортогональной системе координат.

Полеориентированная структура АД может быть описана следующим образом.

1. Из уравнений Парка–Горева (1) с использованием уравнений (2), (3) исключается пара векторов, не участвующих в структуре:

$$\begin{aligned} \bar{I}_R &= \frac{1}{L_R} \bar{\Psi}_R - k_R \bar{I}_S; \\ \bar{\Psi}_S &= \sigma L_S \bar{I}_S + k_R \bar{\Psi}_R. \end{aligned} \quad (6)$$

2. Полученные векторные уравнения приводятся к нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} \sigma L_S p \bar{I}_S &= U_S - R_I \bar{I}_S - j\omega_C \sigma L_S \bar{I}_S + \\ &+ \frac{k_R}{T_R} \bar{\Psi}_R - j\omega_R \bar{I}_S k_R \bar{\Psi}_R; \\ p \bar{\Psi}_R &= -\frac{1}{T_R} \bar{\Psi}_R - j(\omega_C - \omega_R) \bar{\Psi}_R + \\ &+ k_R R_R \bar{I}_S, \end{aligned} \quad (7)$$

где $R_I = R_S + k_R^2 R_R$ – эквивалентное активное сопротивление АД; $T_R = L_R / R_R$ – постоянная времени роторной цепи АД.

3. Выполняется разложение уравнений на составляющие с учетом условия вращения системы координат вида $\psi_d = |\bar{\Psi}|$; $\psi_R = 0$:

$$\sigma L_S p i_{sd} = u_{sd} - R_I i_{sd} + \omega_C \sigma L_S i_{sq} + \frac{k_R}{T_R} \psi_R; \quad (8)$$

$$\sigma L_S p i_{sq} = u_{sq} - R_I i_{sq} + \omega_C \sigma L_S i_{sd} + \omega_R k_R \psi_R;$$

$$p \psi_R = -\frac{1}{T_R} \psi_R + k_R R_R i_{sd}; \quad (9)$$

$$\omega_C = \omega_R + k_R R_R \frac{i_{sd}}{\psi_R}.$$

На основе представленного математического описания АД, с учетом уравнения движения (5), была построена структурная схема (рис. 2).

Для определения набора параметров, характеризующих состояние АД, проведено моделирование в среде MATLAB. Структурная схема математической модели АД в MATLAB SIMULINK представлена на рис. 3.

В качестве объекта исследования принят АД с короткозамкнутым ротором со следующими параметрами: $P_n = 28000$ Вт; $n_n = 695$ об/мин; $I_{xx} = 35,9$ А; $f_{sn} = 50$ Гц; $R_s = 0,14$ Ом; $X_{ssigma} = 0,23$ Ом; $I_{sH} = 64,6$ А; $R_r = 0,30$ Ом; $X_{rsigma} = 0,30$ Ом; $I_{rH} = 49$ А; $J_{dv} = 10,38$ кгм²; $J = 2,5 \cdot J_{dv}$; $U_{sle} = 380$ В; $Z_p = 4$.

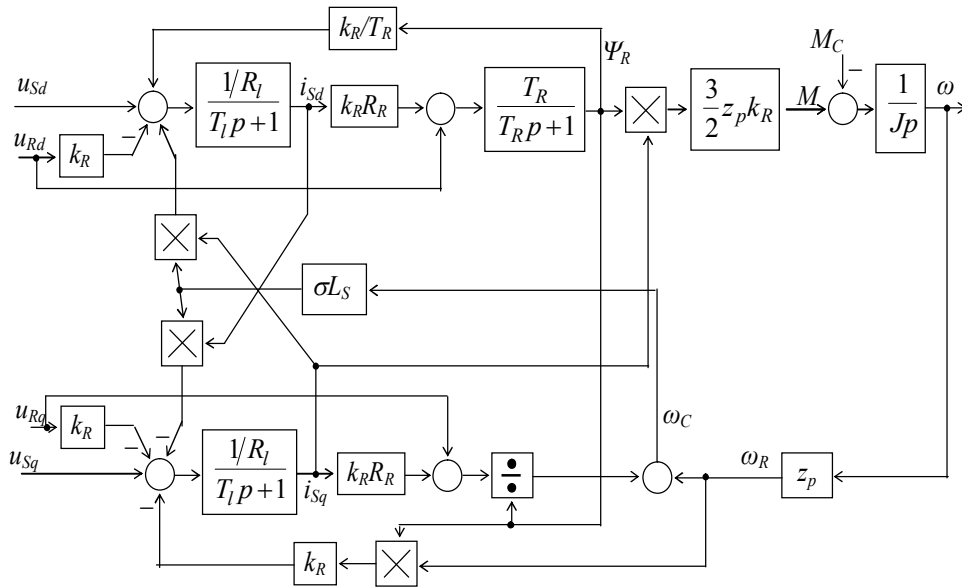


Рисунок 2 – Структурная схема математической модели АД

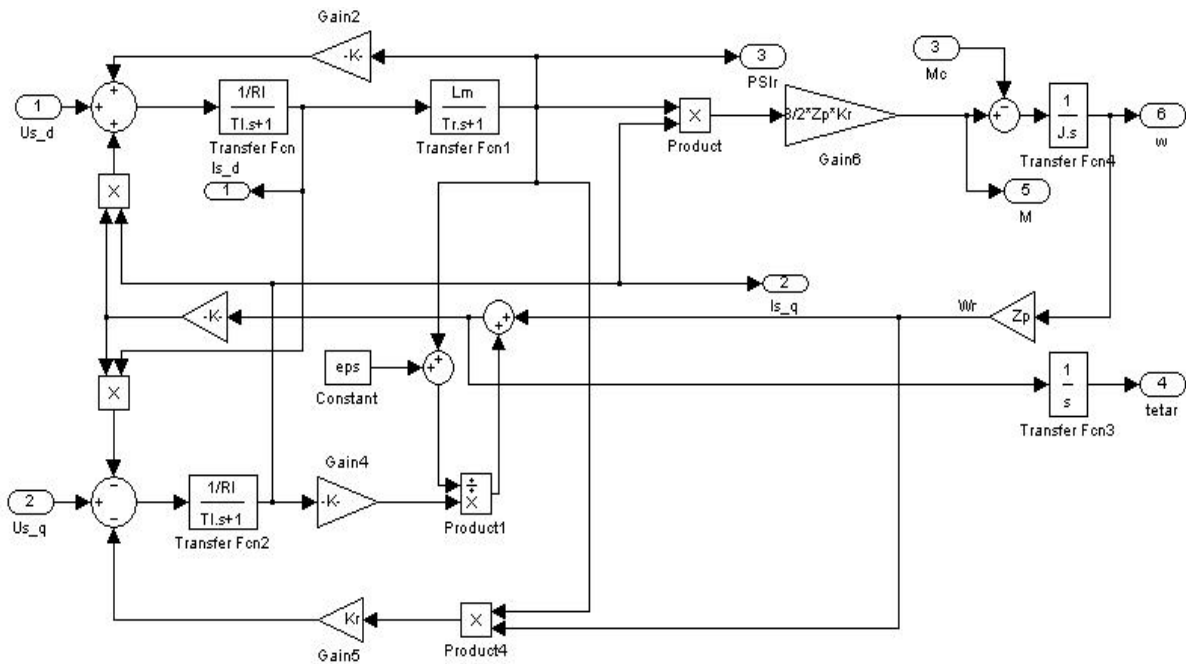


Рисунок 3 – Модель объекта исследования

Критерий работоспособности объекта как динамической системы представляет собой совокупность функционалов входных и выходных сигналов объекта с наложенными на эти функционалы ограничениями. С целью определения критериев работоспособности выбраны параметры, косвенно характеризующие состояние асинхронного двигателя. Номинальные значения и уровни допустимых отклонений определялись путем моделирования состояния системы при изменении параметров АД. Так, при оценке работоспособности объекта по частотным характеристикам его разомкнутой системы ограничимся измерением коэффициентов передачи системы в области частот гармонических воздействий, близких

к нулю, и в диапазоне $0,1-10\omega$ ожидаемой частоты среза. Оценка частотных характеристик ОД при изменении его параметров позволила на конечном этапе анализа судить о степени работоспособности системы управления дозированием [2].

Математическое моделирование АД выявило набор диагностических параметров: эквивалентное сопротивление двигателя R_l , активное сопротивление статора R_s , момент инерции двигателя J , потокосцепление ротора ψ_R . На рис. 4 представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) разомкнутого контура $U_{sd} - I_{sd}$ при

изменении эквивалентного активного сопротивления АД (0,1; 0,2; 0,5; 2; 10) R_l (верхний рисунок) эквивалентного сопротивления двигателя R_l и (0,1; 0,5; 2) активного сопротивления статора R_s (верхний рисунок).

Анализ ЛАЧХ передаточных функций разомкнутой системы позволил оценить влияние изменения параметров двигателя на его работоспособность. Так, по изменению ЛАЧХ разомкнутого контура $U_{sd} - I_{sd}$ можно судить о техническом состоянии АД. В области $\omega \gg \omega_{cp}$ система неустойчива при значениях эквивалентного сопротивления двигателя

$R > 2R_H$. При изменении активного сопротивления статора в пределах $0,5 - 2R_H$ работоспособность системы не нарушается.

В состав электрического оборудования комплекса весового дозирования входит преобразователь частоты, оснащенный интерфейсом промышленной сети, программируемый логический контроллер (ПЛК), асинхронный двигатель. Параметры двигателя, определенные в ходе исследования как диагностические, контролируются системой управления с помощью сетевого интерфейса, оцениваются на основе определенных выше критериев, результат оценки отображается на операторской панели.

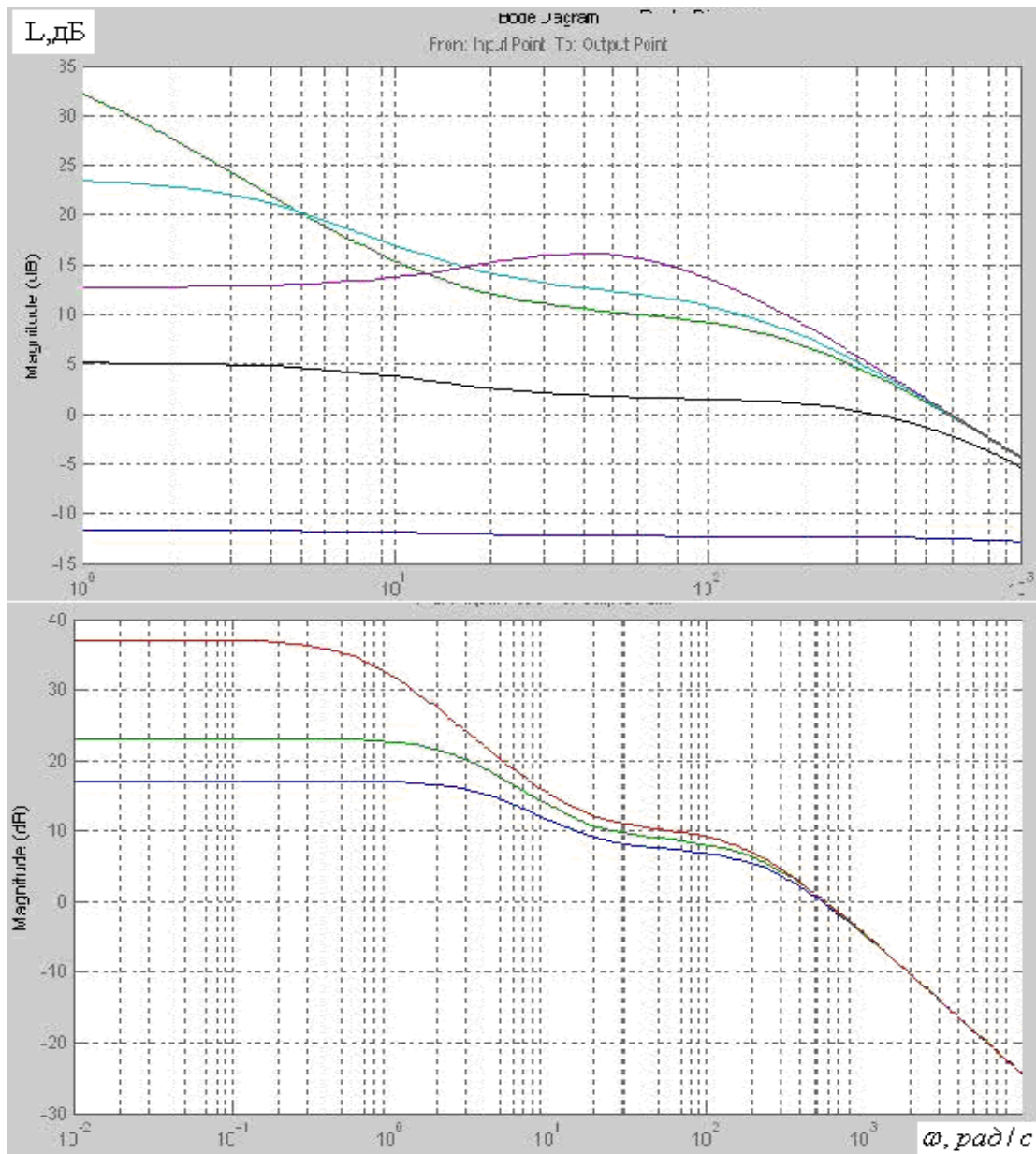


Рисунок 4 – Результаты моделирования

Электротехнический комплекс как объект диагностирования может быть также описан с использованием диаграммы прохождения сигналов на основе структурной схемы [2, 3]. По функциональной схеме составим логическую модель, представленную на рис. 5.

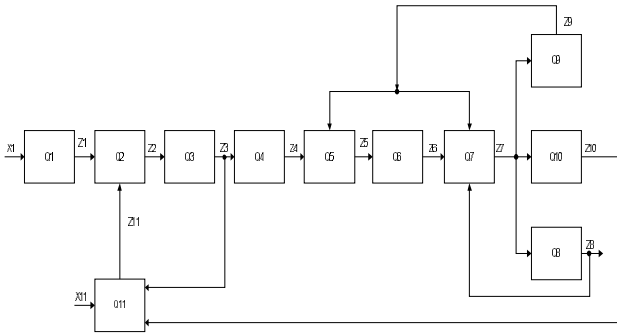


Рисунок 5 – Логическая модель ОД

На рис. 5 Q_1 – выпрямитель; Q_2 – инвертор; Q_3 – кабель питания; Q_4 – обмотка статора; Q_5 – воздушный зазор; Q_6 – обмотка ротора; Q_7 – ротор; Q_8 – датчик скорости; Q_9 – подшипники; Q_{10} – рабочий орган; Q_{11} – устройство управления.

Логическая модель является правильной, если любой блок системы имеет только один выход. Тогда модель рассматриваемого комплекса может быть представлена в виде совокупности блоков Q_i с входами Z_j .

Рассмотрим теперь характер возможных неисправностей объекта диагностирования.

Предположим, что минимальные формы функций условий работы $F_i, i = 1, 2, \dots, h$ всех блоков модели состоят из одного члена, являющегося конъюнкцией внешних и внутренних переменных.

Все возможные неисправности блока $Q_i, i = 1, \dots, h$ модели можно разбить на два класса. К первому классу относятся все те неисправности, которые приводят к появлению неправильного значения выхода $z_i = 0$ вместо ожидаемого правильного значения выхода (соответствующего исправному блоку) $z_i = 1$. Обозначим такие неисправности записью $1 \rightarrow 0$). Второй класс содержит неисправности, переводящие правильное значение $z_i = 0$ в неправильное значение $z_i = 1$. Эти неисправности обозначим записью $0 \rightarrow 1$.

Условия проявления любых неисправностей одного и того же блока Q_i модели одинаковы, что позволяет все такие неисправности считать одной одиночной неисправностью объекта. Тем самым мощность множества (число) возможных одиночных неисправностей непрерывного объекта Q_i не превышает числа h блоков его модели. На основании вышеизложенного построим таблицу функций неисправностей (ТФН) логической модели.

Существенную часть производственных издержек современного предприятия составляют расходы, связанные с внеплановым простоем из-за отказов оборудования. Нередко краткосрочная оста-

новка производства ведёт к значительному материальному ущербу, а зачастую просто недопустима. При решении задачи минимизации времени и количества простоев важно не только прогнозировать возможные отказы, но и своевременно проводить профилактический ремонт оборудования для сокращения числа отказов. Минимизировать число отказов оборудования за счет стабилизации процесса дозирования может такой режим, в котором система устойчива. Устойчивость системы предлагается определять по характеру переходного процесса и степени удаления системы от границы устойчивости.

Расчет оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора, который используется в исследуемой системе управления комплексом весового дозирования, обеспечивающей заданный запас устойчивости и качество переходных процессов, проведем по методу расширенных частотных характеристик [4].

Передающая функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W_{pez}(\lambda) = c_1 + \frac{c_0}{\lambda}$$

Рассчитаем оптимальные настроечные параметры методом расширенных частотных характеристик для $M=1,62$. Для этого в выражение передаточной функции подставим $\lambda = (j - m)\omega$:

$$W_o((j - m)\omega) = \frac{0,0522e^{-8\omega(j-m)}}{18,19((j - m)\omega)^2 + 8,84(j - m)\omega + 1} \quad (10)$$

Разложим знаменатель на множители:

$$W_o((j - m)\omega) = \frac{0,0522e^{-8\omega j}e^{8m\omega}}{(j\omega - m\omega + 0,1792)(j\omega - m\omega + 0,3068)} \quad (11)$$

Расширенная амплитудно-частотная характеристика:

$$A(m, \omega) = \frac{0,0522e^{8,1,62\omega}}{\sqrt{(0,1792 - 0,35\omega)^2 + \omega^2} \times \sqrt{(0,3068 - 0,35\omega)^2 + \omega^2}} \quad (12)$$

Расширенная фазо-частотная характеристика:

$$\phi(m, \omega) = -8\omega - \arctg\left(\frac{\omega}{0,1792 - 0,35\omega}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{0,3068 - 0,35\omega}\right) \quad (13)$$

Для определения параметров, обеспечивающих устойчивость системы управления, воспользуемся критерием Найквиста:

$$W_o((j - m)\omega)W_{pez}((j - m)\omega) = -1; \quad (14)$$

$$A(m, \omega) e^{j\phi(m, \omega)} \left(c_1 + \frac{c_0}{(j - m)\omega} \right) = -1;$$

$$c_1 - \frac{c_0(j + m)}{(1 + m^2)\omega} = -A^{-1}(m, \omega) e^{-j\phi(m, \omega)};$$

$$\left(-\frac{c_0 m}{(1 + m^2)\omega} + c_1 \right) + j \left(-\frac{c_0}{(1 + m^2)\omega} \right) = -A^{-1}(m, \omega) \cos \phi(m, \omega) + j A^{-1}(m, \omega) \sin \phi(m, \omega);$$

$$\begin{cases} -\frac{c_0 m}{(1 + m^2)\omega} + c_1 = -A^{-1}(m, \omega) \cos \phi(m, \omega); \\ -\frac{c_0}{(1 + m^2)\omega} = A^{-1}(m, \omega) \sin \phi(m, \omega). \end{cases}$$

Параметры c_1 и c_2 определяются согласно выражениям (15), (16):

$$c_0 = A^{-1}(m, \omega) \sin \phi(m, \omega) \left(-\frac{1}{(1 + m^2)\omega} \right)^{-1}; \quad (15)$$

$$c_1 = -A^{-1}(m, \omega) \cos \phi(m, \omega) + c_0 \left(\frac{m}{(1 + m^2)\omega} \right). \quad (16)$$

Расчет и построение комплексной частотной характеристики (КЧХ) замкнутой системы относительно возмущающего воздействия проводится по выражениям (17), (18).

$$W(p) = \frac{k_{an} k e^{(-\tau p)} e^{(-p\tau_{an})} p}{(T_{an} p + 1) \left[\begin{matrix} (T_2 p^2 + T_1 p + 1) p + \\ + k_o e^{(-p\tau_o)} (c_1 p + c_0) \end{matrix} \right]}. \quad (17)$$

Произведем замену $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{k_{an} k e^{-j\omega\tau} e^{-j\omega\tau_{an}} j\omega}{(T_{an} j\omega + 1) \left[\begin{matrix} (T_2 (j\omega)^2 + T_1 j\omega + 1) j\omega + \\ + k e^{-j\omega\tau} (c_1 j\omega + c_0) \end{matrix} \right]}. \quad (18)$$

Рассмотрим вторую скобку знаменателя: ее реальная часть:

$Re_1(\omega) = T_1 \omega^2 + k c_0 \cos(\tau\omega) + k \omega c_1 \sin(\tau\omega)$, а мнимая часть:

$$Im_1(\omega) = \omega - T_2 \omega^3 - k c_0 \sin(\tau\omega) + k \omega c_1 \cos(\tau\omega).$$

Запишем это комплексное число в показательной форме в виде (19)

$$A_1(\omega) e^{j\phi_1(\omega)}, \quad (19)$$

где $A_1(\omega) = \sqrt{(Re_1(\omega))^2 + (Im_1(\omega))^2}$ и

$$\phi_1(\omega) = \arctg \left(\frac{Im_1(\omega)}{Re_1(\omega)} \right).$$

Аналогично запишем первую скобку знаменателя в виде (20)

$$A_2(\omega) e^{j\phi_2(\omega)}, \quad (20)$$

где $A_2(\omega) = \sqrt{1 + (T_{an}\omega)^2}$ и

$$\phi_2(\omega) = \arctg(T_{an}\omega).$$

Числитель запишем в виде (21)

$$\begin{aligned} k_{an} k e^{-j\omega\tau} e^{-j\omega\tau_{an}} j\omega &= \\ &= (k_{an} k \omega) e^{-j(\omega\tau + \omega\tau_{an} - \pi/2)}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{(k_{an} k \omega) e^{-j(\omega\tau + \omega\tau_{an} - \pi/2)}}{A_1(\omega) e^{j\phi_1(\omega)} A_2(\omega) e^{j\phi_2(\omega)}} = \\ &= \frac{k_{an} k \omega}{A_1(\omega) A_2(\omega)} \cos(\omega\tau + \omega\tau_{an} - \pi/2 + \phi_1(\omega) + \phi_2(\omega)) - \\ &- \frac{k_{an} k \omega}{A_1(\omega) A_2(\omega)} j \sin(\omega\tau + \omega\tau_{an} - \pi/2 + \phi_1(\omega) + \phi_2(\omega)). \end{aligned}$$

По полученной аналитически комплексной частотной характеристике строим годограф (рис. 6).

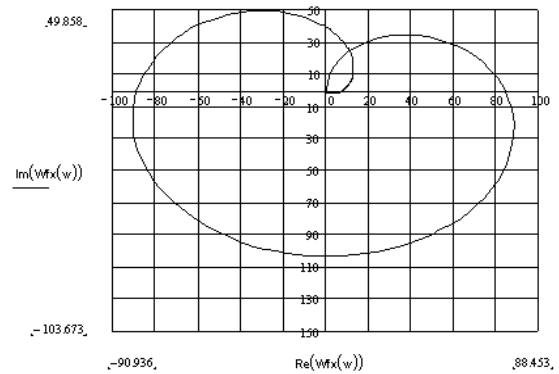


Рисунок 6 – КЧХ объекта диагностирования

ВЫВОДЫ. Исследование элемента электрического оборудования комплекса весового дозирования – АД с короткозамкнутым ротором – позволило определить набор диагностических параметров для оценки технического состояния объекта диагностирования. Путем моделирования в среде MATLAB SIMULINK определены номинальные значения и допустимые отклонения диагностических параметров. Функции диагностирования электрического оборудования интегрированы в систему управления комплексом весового дозирования. Исследование частотных характеристик объекта исследования позволяет сделать вывод, что система обладает запасом устойчивости по фазе и модулю.

Предложенный способ оценки технического состояния объекта позволил увеличить глубину поиска неисправностей и является развитием методики, описанной в [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: монография. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.
2. Осипов О.И., Усынин О.И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
3. Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согомян Е.С. Техническая диагностика объектов контроля. – М.: Энергия, 1967. – 80 с.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
5. Жуков С.Ф., Важинский А.И. Автоматизация процессов управления и диагностирования электротехнических комплексов металлургического производства // Технічна електродинаміка. – 2010. – Част. 1. – С. 181–184.
6. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.
7. Жуков С.Ф., Важинский А.И. Алгоритм управления комплексом весового дозирования с компенсацией транспортного запаздывания // Технічна електродинаміка. – 2014. – Вып. 5. – С. 134–136.
8. Астахов А.Г., Федоровский Н.В. Автоматизация процессов окучивания железных руд и концентратов. – К.: Техника, 1965. – 248 с.
9. Мозгалевский А.В. Техническая диагностика устройств и систем управления. – Л., 1972. – 29 с.
10. Баширов М.Г., Сайфутдинов Д.М., Филимошкин В.А. Диагностика насосного оборудования по параметрам электромагнитной цепи электропривода // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – Вып. 2. – С. 142–144.

DETERMINING PARAMETERS TO CHARACTERIZE THE TECHNICAL STATUS OF ELECTRIC DRIVE OF WEIGHT BATCHING COMPLEX

A. Vazhinsky

Public Joint Stock Company "Iron & Steel Works "AZOVSTAL"

ul. Olimpiyskaya, 185, Mariupol, 87557, Ukraine. E-mail: vazhinsky-ai@azovstal.com.ua

Investigation of elements of the electric equipment complex weighted metering, which provides training materials for metallurgical process was carried out. Mathematical modeling is carried out, the analysis of the transfer functions of the system is made, the criteria established performance and diagnostic parameters of the object are defined. Results of the study allowed to implement diagnostic functions in the management of dosing complex. In paper was made construction and calculation of diagnostic model are in-process executed for the estimation of the technical state of complex of dosage. This method of calculation and design of complex of dosage's control system showed that in the conditions of non-obviousness of connections between the parameters of elements, it is necessary to estimate those parameters influence of that on work of the system is most. The executed calculations and conducted design of behavior of the system at different test influences confirmed the necessity of realization of estimation of the technical state similar to the examined object by the offered method. The offered method of estimation of the technical state can be recommended as the second stage of diagnosing, after realization of estimation of capacity with the use of discrete method on the basis of the use of function table.

Key words: diagnostics, mathematical model, the transfer function, weighted metering.

REFERENCES

1. Pivnyak, G.G. and Volkov, A.V. (2006), *Sovremennye chastotno-reguliruemye asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey* [Modern variable-frequency asynchronous electric drives with pulse width modulation], Natsionalnyi gorniy universitet, Dnepropetrovsk. (in Russian)
2. Osipov, O.I. and Usynin, O.I. (1991), *Tekhnicheskaya diagnostika avtomatizirovannykh elektroprivodov* [Technical diagnostics of automated electric drives], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
3. Karibsky, V.V. and Parchomenko, P.P. (1967), *Tekhnicheskaya diagnostika obyektov kontrolya* [Technical diagnostics of control objects], Energiya, Moscow. (in Russian)
4. Besekerskiy, V.A. and Popov, Ye.P. (2003), *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control systems], Professiya, Saint Petersburg. (in Russian)
5. Zhukov, S.F. and Vazhinskiy, A.I. (2010), "Automation of management and diagnosis of electrical steel production complexes", *Tekhnicheskaya elektrodinamika: "Problemy sovremennoy elektrotekhniki"*, part 1, pp. 181–184. (in Russian)
6. Miroshnik, I.V. (2005), *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Lineynye sistemy* [Automatic control theory], Piter, Saint Petersburg. (in Russian)
7. Zhukov, S.F. and Vazhinskiy, A.I. (2014), "Weighted metering complex control algorithm with transport delay compensation", *Tekhnicheskaya elektrodinamika. Tem. Vypusk "Problemy sovremennoy elektrotekhniki"*, no. 5, pp. 134–136. (in Russian)
8. Astakhov, A.G. and Fedorovskiy, N.V. (1965), *Avtomatizatsiya protsessov okuchivaniya zheleznykh rud i kontsentratov* [Automation of agglomeration of iron ores and concentrates], Tekhnika, Kiev. (in Russian)
9. Mozgalevsky, A.V. (1972), *Tekhnicheskaya diagnostika ustroystv i sistem upravleniya* [Technical diagnostics of devices and control systems], Znanie, Leningrad. (in Russian)
10. Bashirov, M.G., Sayfutdinov, D.M. and Filimoshkin, V.A. (2004), "Diagnostic of pumping equipment in the parameters of the electromagnetic actuator circuit", *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, no. 2, pp. 142–144. (in Russian)

Стаття надійшла 18.02.2015.