Трефилов М. А.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Исследование технических систем на надежность и выявление возможных ошибок функционирования является важной частью оценки работоспособности сложных мехатронных приводов (МП), узлов и модулей. Во многих случаях отказ системы зависит не только от всех ошибочных состояний отдельных компонентов, но и от последовательности возникновений этих ошибок. В настоящее время анализ такого рода базируется на нереальных предположениях, которые невозможно реализовать в производственных условиях. Для исследования надежности МП предлагается осуществлять моделирование с использованием аппарата сетей Петри и принципа счетчиков для учета времени.

Рассмотрим модель динамики МП поступательного перемещения. В приводе исполнительный механизм (ИМ) размещен в полом роторе электрической машины. Динамика данного привода исследуется на основе двухмассовой математической модели:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \Omega_1, \\ \mu J_{pot}\dot{\Omega}_1 = k_M\left(U - k_X x_2 - k_V v_2 - k_a \dot{v}_2\right) - \dfrac{S_X}{\eta_{PBM}} F_{12} - \dfrac{1}{k_\omega}\Omega_1 \\ \dot{x}_2 = v_2, \\ m_2\dot{v}_2 = F_{12} - k_p x_2 - k_S v_2 - f_T(v_2, F_{12} - k_p x_2 - k_S v_2) \end{cases}.$$

На динамику МП в наибольшей степени влияют следующие возмущения: $\Delta U(t)$ – на входе, вызванные помехами датчиков обратной связи, электрическими потерями в обмотках двигателя, пульсациями его момента и т.п.; $\Delta_K(t)$ – по кинематической погрешности, вызванные технологическими погрешностями изготовления, деформациями звеньев в процессе эксплуатации привода и т.п.; $F(t)$ – по нагрузке, вызванные колебаниями нагрузки и действием внешней среды на выходное звено.

Включая в систему слагаемые возмущений и выражая коэффициенты через постоянные времени и безразмерные параметры, получаем систему уравнений динамики МП:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1, \\ \dot{y}_1 = \dfrac{v_0(t) - y_1 - \dfrac{1}{T_X}x_2 - \delta_V y_2 - \dfrac{F_{12}(\Delta x, t)}{T_{12}}}{T_\mu}, \\ \dot{x}_2 = y_2, \\ \dot{y}_2 = \dfrac{F_{12}(\Delta x, t) - \delta_p x_2 - T_s y_2 - f_T(y_2, F_2) - F(t)}{T_2^2} \end{cases},$$

где x_1 - перемещение, эквивалентное повороту ведущего звена на определенный угол ϕ_1, x_2 – положение звена, $v_0(t) = S_X k_\omega k_M\left[U_{упр}(t) - u(t)\right]$ - управляющая скорость, $T_X = 1\big/S_X k_\omega k_M\left(k_X - k_a k_p/m_2\right)$ - постоянная времени обратной связи, $\delta_V = S_X k_\omega k_M\left(k_V - k_a k_S/m_2\right)$ - коэффициент, зависящий от обратной связи по скорости, $\delta_p = k_p/c$ безразмерный коэффициент позиционной нагрузки, $T_2 = \sqrt{m_2/c}$ - период собственных колебаний нагрузки, $T_{12} = 1\big/S_X k_\omega c\left(S_\eta - k_a k_M/m_2\right)$ - постоянная времени упругой связи звеньев 1 и 2, $T_b = b/c$ - постоянная времени демпфирования передачи, $T_S = k_S/c$ - постоянная времени демпфирования нагрузки, $F_{12}(\Delta x, t) = f_Л(\Delta x - \Delta_K(t)) + T_b\dot{f}_Л(\Delta x - \Delta_K(t))$ - сила упругости, $F_2 = f_Л(\Delta x - \Delta_K(t)) + T_b\dot{f}_Л(\Delta x - \Delta_K(t)) - \delta_p x_2 - F(t)$ - активные силы, приложенные к выходному звену привода при $y_2 = 0$.

В модели отслеживается выходное перемещение датчиками обратной связи, преобразующими отклонение выходной координаты x_2 в управляющее напряжение. Датчик характеризуется коэффициентом усиления k_X и обеспечивает жесткую обратную связь по положению. Дополнительно в системе могут присутствовать обратная связь по скорости k_V или обратная связь по ускорению k_a. Включение данных параметров необходимо, так как плавность выходного перемещения зависит не только от величины выходного перемещения, но и от его производных.

Для составления модели надежности МП воспользуемся аппаратом сетей Петри, которые можно применять как средство визуальной связи компонентов, подобное блок-схеме, блочной диаграмме, дереву неисправностей или сетям. Сети Петри считаются лучшей альтернативой отказоустойчивого анализа, так как они не только графически отображают причинные и следственные связи между событиями, но и описывают динамическое поведение всей системы. Моделирование с помощью данного математического аппарата дает возможность оценки качества и надежности при отказах, вызванных комбинацией незапланированных ошибок и их последовательностях. На рис. 1 приведена сеть Петри для модели динамики моноблочного МП поступательного перемещения, описанного выше. Структура методологии анализа МП на надежность состоит из пяти основных этапов. Данная структура объединяет анализ дерева отказов, анализ состояния и последствий отказа и моделирование динамической сети Петри для определения возможных ошибок и последовательности их возникновения. Для расчета вероятности возникновения ошибки применяется принцип счетчиков сети Петри [2]. Анализ на ошибки начинается с определения потенциально возможных отказов системы, которые могут вызвать серьезные ошибки в процессе работы или в продукте. Серьезная ошибка – это неудовлетворительное выполнение действий, возникающее в процессе работы или тестирования. Данный анализ можно провести с помощью дерева отказов, анализа состояния и последствий отказа или другими доступными методами.

Определение последовательности ошибок начинается после построения модели в виде сети Петри системы с учетом возможных отказов. Если ошибки стохастически и взаимно независимы с постоянными ошибками и оценкой ремонта, то можно использовать стохастическую сеть Петри. Ошибки необходимо интегрировать в сеть Петри следующим образом: ошибка должна быть обозначена как переход, причина ошибки должна быть обозначена как входное состояние перехода, последствия ошибки – выходные состояния.

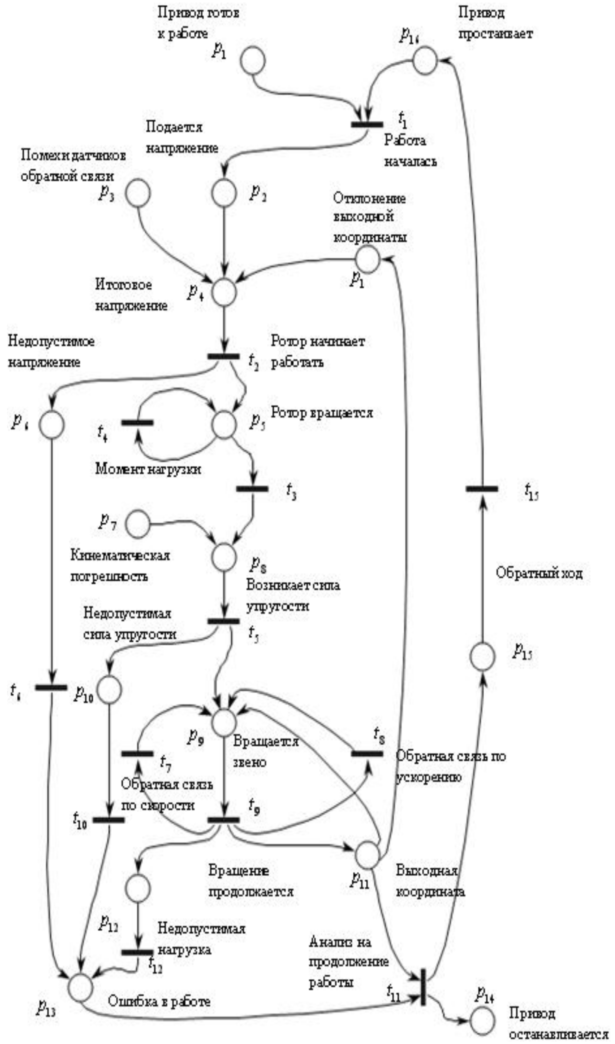

Рис. 1. Сеть Петри для МП

Далее строим дерево достижимости, путем прохода всеми доступными метками по всем доступным переходам начиная с начальной метки. Эта процедура выполняется до тех пор, пока не будут пройдены все состояния. В результате данное представление всей системы включает в себя процесс нормального ее функционирования и все возможные ошибки. С использованием меток можно определить последовательности ошибок путем прослеживания состояний от начальной метки до метки, которая находится в состоянии отказа системы. Таким образом, удается определить маршруты сети, которые приводят к ее отказу.

После того, как определилась последовательность ошибок, можно рассчитать вероятность их возникновения. Так как последний переход в последовательности определяет ошибку системы, количество раз, которое этот переход отработал за определенное количество времени, дает нам определенную приблизительную оценку. Принцип определения вероятности ошибки в работе системы основан на использовании счетчиков в сети Петри [2]. Вычислим вероятность того, что система выдаст ошибку через 4000 часов, причем блокировка откажет до того, как оператор войдет в опасную зону. Расчетные значения времени работы переходов приведены в таблице.

Таблица 1 *Время работы и среднее время ошибки переходов*

Время работы	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{15}
	1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.03	0.5	0.5	1	0.02	1	0.03	1
Среднее время до ошибки	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	φ_{10}	φ_{11}	φ_{12}	φ_{15}
	1	2	2	10	2	2000	2	1	10	3000	10	3333	1

В сети Петри, изображенной на рис. 1, у перехода t_{11} два входных состояния p_{11} и p_{13}. Состояние p_{13} не последовательное, поэтому, для вычисления ошибки на основе приведенного ранее метода, необходимо выполнить каноническое преобразование, как на рис. 2. Вводятся фиктивный переход t_u и фиктивное состояние p_u.

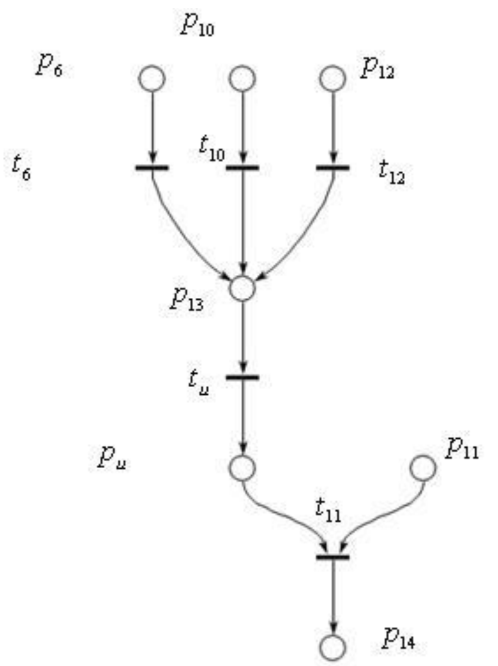

Рис. 2. Каноническое преобразование сети Петри на рис. 1

Вероятность, того что переход t_u отработает к моменту времени k, рассчитывается как $f_9(k) = X_9(k)/k$, где $X_9(k) = [k/X_9(k-\varphi_9-\varphi_6)]$. Вероятность, того что переход t_u отработает через переход t_6 (недопустимое напряжение) к моменту времени k, вычисляется как $f_u^6(k) = \dfrac{X_6(k-\varphi_6)}{X_6(k-\varphi_6)+X_{10}(k-\varphi_{10})+X_{12}(k-\varphi_{12})}$.

Вероятность ошибки системы через 4000 часов получаем равную

$$F^{11}(k) = f_9(k)\, f_u^6(k) = \left(\left|\frac{k/X_9(k-\varphi_9-\varphi_6)}{k}\right|\right)\left(\left|\frac{X_6(k-\varphi_6)}{X_6(k-\varphi_6)+X_{10}(k-\varphi_{10})+X_{12}(k-\varphi_{12})}\right|\right) =$$

$$= \left(\left|\frac{1}{\dfrac{k-\varphi_9-\varphi_6}{\varphi_9}}\right|\right)\left(\left|\frac{k-\varphi_6/\varphi_6}{\dfrac{k-\varphi_6}{\varphi_6}+\dfrac{k-\varphi_{10}}{\varphi_{10}}+\dfrac{k-\varphi_{12}}{\varphi_{12}}}\right|\right) = \left(\left|\frac{1}{190}\right|\right)\left(\left|\frac{1}{1+\dfrac{1}{3}+\dfrac{667}{3333}}\right|\right) = 0{,}003432$$

Функция $F^{11}(k)$ имеет точку разрыва в момент времени 2010 часов. Остальные значения имеют порядок 10^{-2} – 10^{-3}. График функции после 2100 часов непрерывной работы приведен на рис. 3.

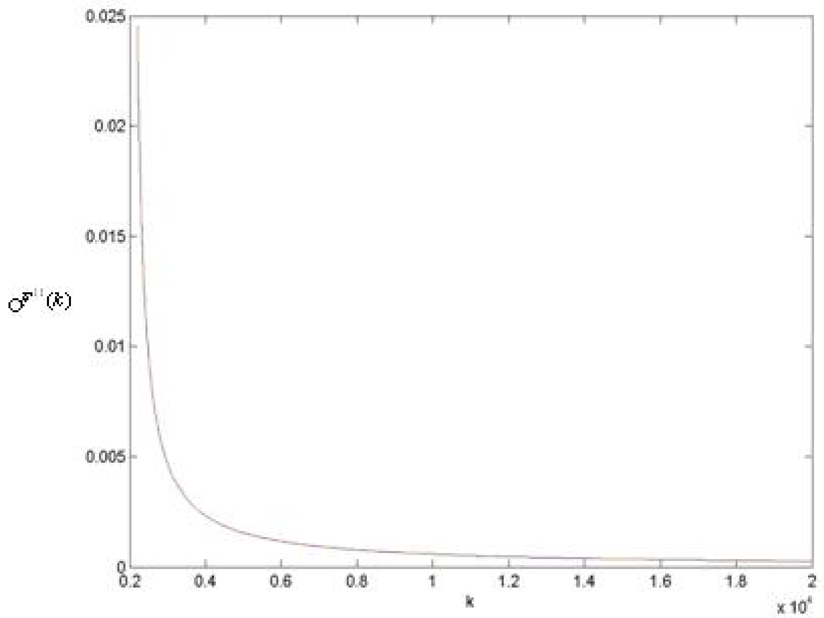

Рис. 3. График вероятности ошибки системы после 2100 часов

К преимуществам рассмотренного метода вычисления вероятности ошибки в системе, а, следовательно, и надежности МП, можно отнести: использование меньшего числа переменных; менее сложные расчеты; возможность лучшего понимания динамики системы; возможность исследования больших систем с избеганием резкого увеличения пространства состояний; время ошибки не лимитированы экспоненциальным распределением. Построенная сеть Петри для рассматриваемой системы позволяет наглядно представить процессы системы и возможные нежелательные ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Isermann, R. Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. / R. Isermann // Annual Reviews in Control. – 2005 – №29 – С. 71-85

2. Adamyan, A., He, D. Sequential failure analysis using counters of Petri net models. / A. Adamyan, D. He // Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans. – 2003 – №33 – С. 1-11

3. Морозов, В.В., Костерин, А.Б., Новикова, Е.А. Плавность динамических звеньев электромеханических приводов. / Морозов В.В. – Владимир: ВлГУ, 1999.