УДК 629.423.1.001.57

М. М. КЕДРЯ, М. Л. КУМПАН (ДИИТ)

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯГОВОГО ПРИВОДА КАК ОДНОМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Розглядається одномірна електромеханічна система з тяговим електричним приводом послідовного збудження. Наведено диференційні рівняння, структурну схему та передатну функцію по вхідному впливу. Розглянуто режими роботи системи при детермінованих та випадкових впливах.

Рассматривается одномерная электромеханическая система с тяговым электрическим приводом последовательного возбуждения. Приведены дифференциальные уравнения, структурная схема и передаточная функция по входному воздействию. Рассмотрены режимы работы системы при детерминированных и случайных воздействиях.

The one-dimensional electromechanical system with the hauling electric drive of successive excitation is examined. Differential equations, flow diagram and transmission function on entrance influence are given. The system operational modes under the determined and casual influences are considered.

Эксплуатируемые на железных дорогах электровозы ВЛ-8, ДЕ-1 и другие имеют индивидуальный тяговый привод с двигателями последовательного возбуждения. Такой привод можно рассматривать как одномерную электромеханическую систему, в которой управляемой величиной является касательная сила тяги на ободе колесной пары. Управляющим воздействием на привод будет напряжение питания двигателя. Режим управления приводом зависит от скорости движения электровоза и тока двигателя.

Для оценки динамических свойств привода необходимо иметь дифференциальные уравнения, по которым составляется структурная схема и передаточная функция.

Методика получения уравнений динамики тягового привода с определенными допущениями приведена в [1].

При составлении уравнений предполагалось, что магнитный поток, ток, противо-эдс, момент на валу и подводимое к двигателю напряжение имеют малые отклонения от установившихся значений. При таких изменениях отклонение силы тяги и скорости также принимаются малыми. Кроме этого, при составлении уравнений предполагалось, что заданы статические характеристики $\Phi(i)$, $L(i)$, $V(i)$, $F(i)$, представляющие собой зависимости магнитного потока, индуктивности, скорости и силы тяги от тока.

Для конкретных типов двигателей указанные зависимости могут быть получены аналитически или экспериментально.

Полученные уравнения в изображениях по Лапласу имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\Delta I(s)=W_1(s)\left[\Delta U(s)-\Delta E(s)\right];\\
&\Delta\Phi(s)=W_2(s)\,\Delta I(s);\\
&\Delta M(s)=W_3'(s)\,\Delta I(s)+W_3''(s)\,\Delta\Phi(s);\\
&\Delta F(s)=W_4(s)\,\Delta M(s);\\
&\Delta E(s)=W_5'(s)\,\Delta V(s)+W_5''(s)\,\Delta\Phi(s).
\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

В уравнениях (1) $\Delta I(s)$, $\Delta\Phi(s)$, $\Delta M(s)$, $\Delta E(s)$, $\Delta U(s)$ – изображение отклонений тока, магнитного потока, момента, противо-эдс и подводимого напряжения, соответственно. $\Delta F(s)$ и $\Delta V(s)$ – изображения отклонений силы тяги F и скорости V.

Кроме изображений отклонений переменных в уравнения (1) входят передаточные функции $W_1(s),...,W_5(s)$. Передаточная функция $W_1(s)$ соответствует апериодическому звену первого порядка, а передаточные функции $W_2(s), W_3'(s), W_3''(s), W_4(s), W_5'(s), W_5''(s)$ – пропорциональным звеньям.

Передаточная функция $W_1(s)$ содержит постоянную времени, которая определена индуктивностью и омическим сопротивлением двигателя. Остальные передаточные функции имеют коэффициенты передачи, зависящие от параметров двигателя, тяговой передачи, а также от статических характеристик, рассмотренных выше.

Уравнениям (1) соответствует структурная схема, приведенная на рис. 1.

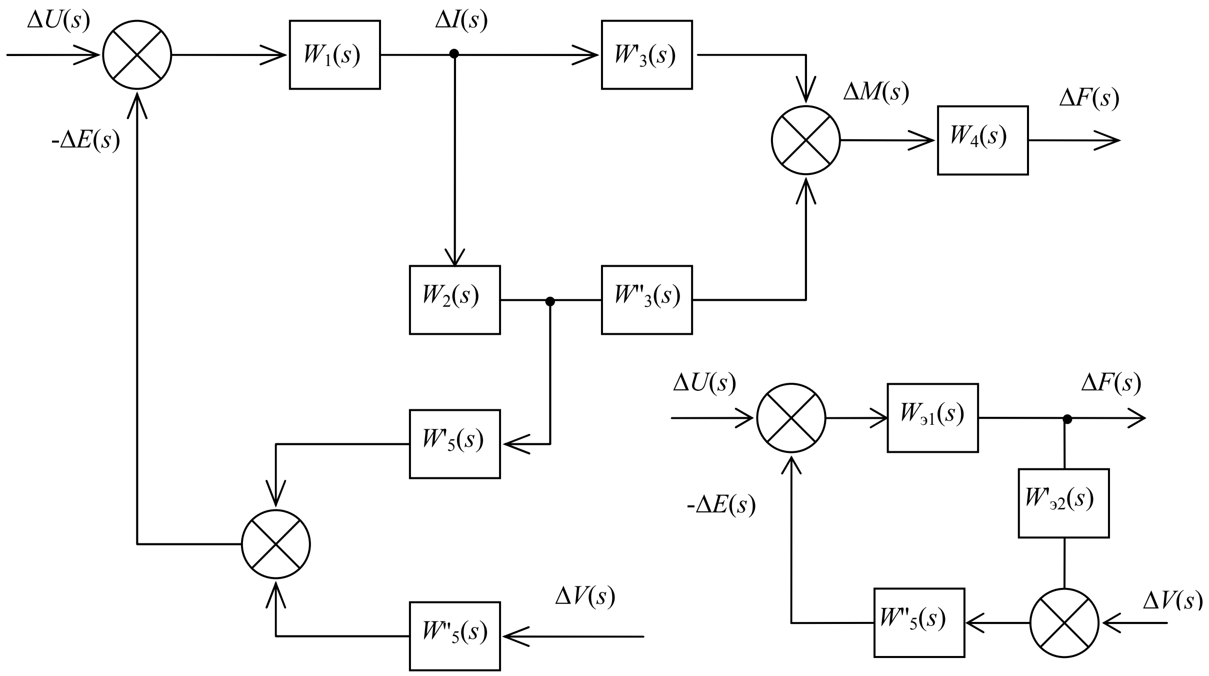

Рис. 1. Структурная схема одномерной электромеханической системы привода

С целью упрощения преобразуем структурную схему к виду, приведенному на рис. 2. Все преобразования выполнены на основании правил, применяемых для линейных систем [2].

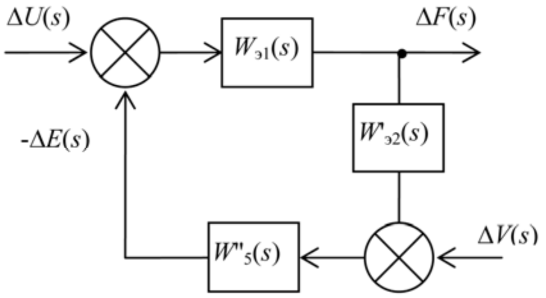

Рис. 2. Преобразованная структурная схема одномерной электромеханической системы привода

Структурная схема рис. 2 содержит три звена с передаточными функциями $W_{э1}(s)$, $W'_{э2}(s)$, $W''_5(s)$, где

$$W_{э1}(s) = W_1(s)\, W_4(s)\big[W'_3(s) + W_2(s)\, W''_3(s)\big]; \quad (2)$$

$$W'_{э2}(s) = W_2(s)\, W'_5(s)\, W''_5(s)^{-1}. \quad (3)$$

Передаточная функция $W''_5(s)$, как было отмечено ранее, представляет собой передаточную функцию пропорционального звена. Передаточные функции $W_{э1}(s)$, $W'_{э2}(s)$ относятся к комбинированным звеньям. Их динамические свойства, как отдельных звеньев, пока не будем принимать во внимание.

Определим передаточную функцию системы по входному напряжению $\Delta U(s)$. Примем, что $\Delta V(s) = 0$, тогда

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta U(s)} = \frac{W_{э1}(s)}{1 + W_{э1}(s) W'_{э2}(s) W''_5(s)} = \frac{W_1(s) W_4(s)\big[W'_3(s) + W_2(s) W''_3(s)\big]}{1 + W_1(s) W_2(s) W_4(s) W'_5(s)\big[W'_3(s) + W_2(s) W''_3(s)(s)\big]}. \quad (4)$$

Как было отмечено выше, передаточные функции $W_1(s), ..., W_5(s)$ относятся к типовым звеньям, определенным в работе [1]. Эти звенья имеют следующие передаточные функции:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{1 + T_1 s}; \quad W_2(s) = k_2; \quad W'_3(s) = k'_3;$$

$$W''_3(s) = k''_3; \quad W_4(s) = k_4; \quad W'_5(s) = k'_5;$$

$$W''_5(s) = k''_5.$$

Подставим выражения этих передаточных функций в (4).

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{\dfrac{k_1}{1 + T_1 s} k_4 \left[k'_3 + k_2 k''_3\right]}{1 + \dfrac{k_1}{1 + T_1 s} k_2 k_4 k'_5 \left[k'_3 + k_2 k''_3\right]} = \frac{k_{э1}}{1 + T_{э1} s}, \quad (5)$$

где $k_{э1} = \dfrac{k_1 k_4 \left[k_3' + k_2 k_3''\right]}{1 + k_1 k_2 k_4 k_5' \left[k_3' + k_2 k_3''\right]}$;

$$T_{э1} = \frac{T_1}{1 + k_1 k_2 k_4 \left[k_3' + k_2 k_3''\right]}.$$

Согласно выражению (5), передаточная функция $W_{\Delta F \Delta U}(s)$ соответствует апериодическому звену первого порядка с известными частотными и переходными характеристиками [2].

Рассмотрим поведение системы в зависимости от режимов работы. В статическом стационарном режиме работы, когда $s = 0$, передаточная функция

$$W_{\Delta F \Delta U}(0) = k_{э1}, \qquad (6)$$

что соответствует пропорциональному звену.

Для стационарного случайного процесса среднее значение приложенного напряжения $m_{\Delta U}(t)$ и реализуемой силы тяги $m_{\Delta F}(t)$ представляют собой постоянные величины. Связь между ними определяется по уравнению статики системы:

$$m_{\Delta F} = W_{\Delta F \Delta U}(0) m_{\Delta U}. \qquad (7)$$

Определим спектральную плотность на выходе системы. Пусть входное воздействие – белый шум со спектральной плотностью:

$$V_{\Delta U}(\omega) = V_{\Delta U} = \mathrm{const}.$$

На выходе системы получаем спектральную плотность [3]:

$$V_{\Delta F}(\omega) = \left| \frac{k_{э1}}{1 + jT_{э1}\omega} \right|^2 V_{\Delta U} = \frac{{k_{э1}}^2 V_{\Delta U}}{1 + {T_{э1}}^2 \omega^2}. \qquad (8)$$

Таким образом, в результате прохождения через систему бесконечный спектр входного воздействия ограничивается в соответствии с амплитудной частотной характеристикой системы.

Оценим дисперсию на выходе системы [3]:

$$Д_{\Delta F} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A_{зам}(\omega) V_{\Delta U^0}(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{k_{э1}}{1 + jT_{э1}\omega} \right| V_{\Delta U}(\omega) d\omega = \frac{k_{э1}^2 V_{\Delta U}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1 + \omega^2 T_{э1}^2} = \frac{k_{э1}^2}{2T_{э1}} V_{\Delta U}. \qquad (9)$$

Согласно полученному выражению (9), после прохождения случайного процесса через систему его дисперсия становится конечной и тем меньше по величине, чем больше инерционность системы. Последнее обстоятельство связано с постоянной времени $T_{э1}$, которая, в свою очередь, зависит от индуктивности двигателя.

По условию обеспечение требуемой точности работы системы в стационарном случайном режиме сводится к определению передаточной функции системы, при которой выполняется неравенство:

$$Д_{\Delta F} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_{\Delta F}(\omega) d\omega \le Д_{\Delta F доп}, \qquad (10)$$

где $Д_{\Delta F доп}$ – предельно допустимое значение дисперсии выходной величины системы.

Спектральная плотность $V_{\Delta F}(\omega)$ определяется амплитудной частотной характеристикой системы и спектральной плотностью воздействия.

Как показано в работе [1], система является устойчивой. Оценка проводилась по критерию Гурвица. Характеристическое уравнение системы имеет первый порядок:

$$T_{э1}\lambda + k_{э1} = 0,$$

отсюда следует, что корень уравнения λ располагается в левой части комплексной плоскости, т.к. $T_{э1} \succ 0$, $k_{э1} \succ 0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кедря, М. М. Передаточная функция электропривода транспортного средства [Текст] / М. М. Кедря, Д. В. Устименко // Транспорт: зб. наук. пр. – Д.: Наука і освіта, 1999.
2. Теория автоматического управления [Текст]. – Ч. 1 / Л. С. Гольдфарб и др.; под ред. проф. А. В. Нетушила. – М.: Высш. шк., 1968.
3. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления [Текст] / Е. И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007.

Поступила в редколлегию 19.03.2009.
Принята к печати 23.03.2009.