

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯГОВОГО ПРИВОДА КАК ОДНОМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Розглядається одномірна електромеханічна система з тяговим електричним приводом послідовного збудження. Наведено диференціальні 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.

Експлуатирювані на залізних дорогах електровози ВЛ-8, ДЕ-1 і інші мають індивідуальний тяговий привод з двигачами послідовного збудження. Такий привод можна розглядати як одномерну електромеханічну систему, в якій управляємою величиною є касательна сила тяги на ободі колесної пари. Управляючим впливом на привод буде напруга живлення двигача. Режим управління приводом залежить від швидкості руху електровоза і струму двигача.

Для оцінки динамічних властивостей привода необхідно мати диференціальні рівняння, по яким складається структурна схема і передаточна функція.

Методика отримання рівнянь динаміки тягового привода з певними допущеннями приведена в [1].

При складанні рівнянь передбачалося, що магнітний потік, струм, проти-ЕДС, момент на валу і підводиме до двигача напруга мають малі відхилення від установившихся значень. При таких змінах відхилення сили тяги і швидкості також приймаються малими. Крім цього, при складанні рівнянь передбачалося, що задані статичні характеристики $\Phi(i)$, $L(i)$, $V(i)$, $F(i)$, представляючі собою залежності магнітного потоку, індуктивності, швидкості і сили тяги від струму.

Для конкретних типів двигачів вказані залежності можуть бути отримані аналітично або експериментально.

Отримані рівняння в зображеннях по Лапласу мають вигляд:

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

В рівняннях (1) $\Delta I(s)$, $\Delta \Phi(s)$, $\Delta M(s)$, $\Delta E(s)$, $\Delta U(s)$ – зображення відхилень струму, магнітного потоку, моменту, проти-ЕДС і підведеного напруга, відповідно. $\Delta F(s)$ і $\Delta V(s)$ – зображення відхилень сили тяги F і швидкості V .

Крім зображень відхилень змінних в рівняннях (1) входять передаточні функції $W_1(s), \dots, W_5(s)$. Передаточна функція $W_1(s)$ відповідає аперіодическому зв'язу першого порядку, а передаточні функції $W_2(s), W_3'(s), W_3''(s), W_4(s), W_5'(s), W_5''(s)$ – пропорційними зв'язками.

Передаточна функція $W_1(s)$ містить постійну величину, яка визначена індуктивністю і омическим опором двигача. Решта передаточні функції мають коефіцієнти передачі, залежні від параметрів двигача, тягової передачі, а також від статичних характеристик, розглянутих вище.

Рівнянням (1) відповідає структурна схема, приведена на рис. 1.

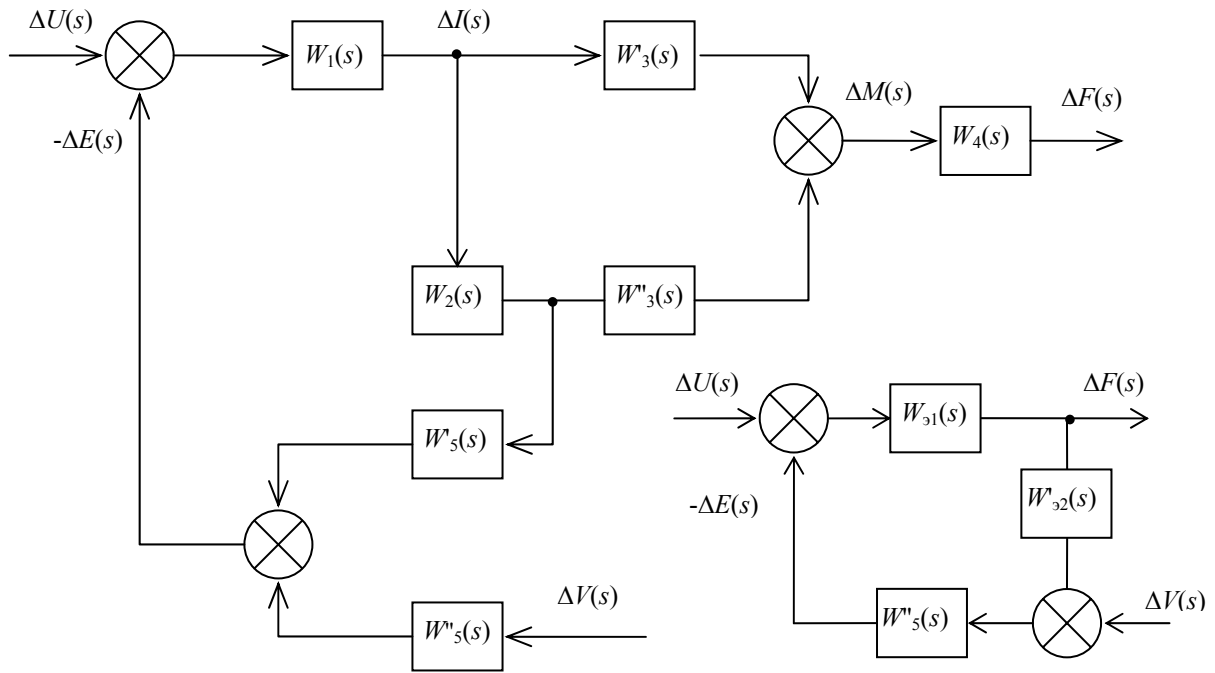


Рис. 1. Структурная схема одномерной электромеханической системы привода

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

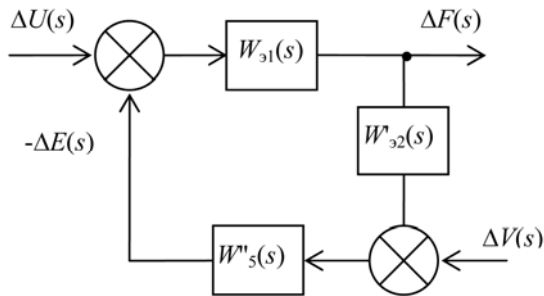


Рис. 2. Преобразованная структурная схема одномерной электромеханической системы привода
Структурная схема рис. 2 содержит три зве-

на с передаточными функциями $W_{31}(s)$, $W'_{32}(s)$, $W''_5(s)$, где

$$W_{31}(s) = W_1(s) W_4(s) [W'_3(s) + W_2(s) W''_3(s)]; \quad (2)$$

$$W'_{32}(s) = W_2(s) W'_5(s) W''_5(s)^{-1}. \quad (3)$$

Передаточная функция $W''_5(s)$, как было отмечено ранее, представляет собой передаточную функцию пропорционального звена. Передаточные функции $W_{31}(s)$, $W'_{32}(s)$ 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

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta U(s)} = \frac{W_{31}(s)}{1 + W_{31}(s) W'_{32}(s) W''_5(s)} = \frac{W_1(s) W_4(s) [W'_3(s) + W_2(s) W''_3(s)]}{1 + W_1(s) W_2(s) W_4(s) W'_5(s) [W'_3(s) + W_2(s) W''_3(s)]}. \quad (4)$$

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).

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{\frac{k_1}{1 + T_1 s} k_4 [k'_3 + k_2 k''_3]}{1 + \frac{k_1}{1 + T_1 s} k_2 k_4 k'_5 [k'_3 + k_2 k''_3]} = \frac{k_{31}}{1 + T_{31} s}, \quad (5)$$

где $k_{31} = \frac{k_1 k_4 [k'_3 + k_2 k''_3]}{1 + k_1 k_2 k_4 k'_5 [k'_3 + k_2 k''_3]}$;

$$T_{31} = \frac{T_1}{1 + k_1 k_2 k_4 [k'_3 + k_2 k''_3]}.$$

Согласно выражению (5), передаточная функция $W_{\Delta F \Delta U}(s)$ соответствует аperiodическому 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

$$W_{\Delta F \Delta U}(0) = k_{31}, \quad (6)$$

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

$$D_{\Delta F} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A_{\text{зам}}(\omega) V_{\Delta U^0}(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{k_{31}}{1 + jT_{31}\omega} \right| V_{\Delta U}(\omega) d\omega = \frac{k_{31}^2 V_{\Delta U}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1 + \omega^2 T_{31}^2} = \frac{k_{31}^2}{2T_{31}} V_{\Delta U}. \quad (9)$$

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_{31} , 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:

$$D_{\Delta F} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_{\Delta F}(\omega) d\omega \leq D_{\Delta F \text{ доп}}, \quad (10)$$

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

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

между ними определяется по уравнению статистики системы:

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

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

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

На выходе системы получаем спектральную плотность [3]:

$$V_{\Delta F}(\omega) = \left| \frac{k_{31}}{1 + jT_{31}\omega} \right|^2 V_{\Delta U} = \frac{k_{31}^2 V_{\Delta U}}{1 + T_{31}^2 \omega^2}. \quad (8)$$

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]:

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

$$T_{31}\lambda + k_{31} = 0,$$

отсюда следует, что корень уравнения λ располагается в левой части комплексной плоскости, т.к. $T_{31} > 0$, $k_{31} > 0$.

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.