

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, Н. С. Лагун, В. В. Кабушева*

## ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛИФТА НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, N. C. Lagun, V. V. Kabusheva*

## TRANSFER FUNCTIONS OF THE ELEVATOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM ON THE BASIS OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

### **Аннотация**

Для электромеханической системы безредукторного электропривода лифтов получены передаточные функции по основным регулируемым координатам. Показано, что при синтезе систем управления безредукторным электроприводом лифтов на базе синхронного двигателя на постоянных магнитах возможно использование одномассовой расчетной схемы без учета влияния упругих свойств канатов.

### **Ключевые слова:**

лифт, упругие свойства канатов, переходные процессы в электромеханической подсистеме лифта, передаточные функции, трехмассовая расчетная схема, постоянная времени, безредукторный электропривод, синхронный двигатель на постоянных магнитах, частота резонанса, колебательное звено.

### **Abstract**

Transfer functions for the basic regulated conditions have been obtained for the electromechanical system of gearless electric drive of elevators. It is shown that in the synthesis of control systems of the gearless electric drive on the basis of a permanent magnet synchronous motor, a one-mass design model can be used without taking into account the effect of elastic properties of cables.

### **Key words:**

elevator, elastic properties of cables, transient processes in the elevator electromechanical subsystem, transfer functions, three-mass design model, time constant, gearless electric drive, permanent magnet synchronous motor, resonance frequency, oscillatory element.

В настоящее время основным типом применяемого электропривода в массовых лифтах остается редукторный электропривод на базе двухскоростного асинхронного двигателя. Растет и применение частотно-регулируемого редукторного электропривода в лифтах в связи с постоянным увеличением требований по экономической эффективности электрооборудования, используемого в жилищно-коммунальных хозяйствах городов. Дальнейшим раз-

витием этой тенденции является внедрение безредукторного привода лифтов в зданиях жилого и коммерческого назначения.

Безредукторные электроприводы пассажирских и грузовых лифтов строятся на базе тихоходных асинхронных двигателей и синхронных двигателей с постоянными магнитами, причем последние получают наибольшее распространение.

Безредукторный электропривод с

синхронным двигателем с постоянными магнитами можно представить в виде электрической и механической подсистем [1]. Электрическая подсистема образована собственно двигателем и системой управления с силовым преобразователем. Механическая подсистема в зависимости от кинематической схемы крепления кабины лифта может иметь различное исполнение, но с достаточной точностью описывается консервативной трехмассовой расчетной схемой, уравнения движения которой имеют вид [2, 3]:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} + M_2; \\ J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13} \cdot (\omega_3 - \omega_2), \end{cases} \quad (1)$$

где  $J_1, J_2, J_3$  – приведенные к общему валу моменты инерции двигателя, кабины лифта, противовеса соответственно, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – приведенные к общему валу угловые скорости двигателя, кабины лифта, противовеса соответственно, рад/с;  $M$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;  $M_{12}, M_{13}$  – приведенные к общему валу моменты взаимодействия, Н·м;  $C_{12}, C_{13}$  – коэффициенты жесткости при кручении связей, Н·м/рад.

Значения коэффициентов жесткости при растяжении определяются по формуле

$$C_j = \frac{n \cdot S \cdot E \cdot R^2}{L_j \cdot i^2}, \quad (2)$$

где  $C_j$  – коэффициенты жесткости при растяжении соответствующей ветви, Н/м;  $n$  – число канатов в ветви;  $S$  – поперечное сечение каната, м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль

упругости стального каната, МПа;  $R$  – радиус канатоведущего шкива, м;  $i$  – передаточное число редуктора;  $L_j$  – длина соответствующей ветви каната.

Электрическая подсистема безредукторного электропривода лифта (без учета силового преобразователя) образована трехфазным синхронным двигателем с постоянными магнитами, который в осях d–q описывается системой уравнений (для поверхностного расположения магнитов) [3]

$$\begin{cases} U = i_1 \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + c \cdot \omega; \\ M = c \cdot i_1; \\ \psi_{1q} = L_1 \cdot i_{1q}; \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \end{cases}$$

где  $L_1$  – индуктивность фазы статора;  $c$  – конструктивная постоянная двигателя;  $J$  – момент инерции двигателя.

Электромеханической системе безредукторного электропривода лифта, описываемой уравнениями (1), соответствует нормированная структурная схема (рис. 1) [4].

Здесь

$$W_1(p) = \frac{1}{T_3 \cdot p}; \quad W_2(p) = \frac{1}{T_{np} \cdot p};$$

$$W_3(p) = \frac{1}{T_M \cdot p}; \quad W_4(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p};$$

$$W_5(p) = \frac{1}{T_K \cdot p}; \quad W_6(p) = 1;$$

$$W_0(p) = \frac{k}{T_\Omega \cdot p + 1};$$

$$T_1 = \frac{B}{C_{12}}; \quad T_3 = \frac{B}{C_{13}}; \quad T_M = \frac{J}{B};$$

$$T_K = \frac{J_2}{B}; \quad T_{np} = \frac{J_3}{B}; \quad T_\Omega = \frac{L_1}{R_1}.$$

Особенности многомассовых электромеханических систем удобно

исследовать при использовании разветвленной структурной схемы, позволяющей наглядно оценить поведение

каждой координаты [5]. Для трехмассовой расчетной схемы разветвленная структурная схема имеет вид (рис. 2).

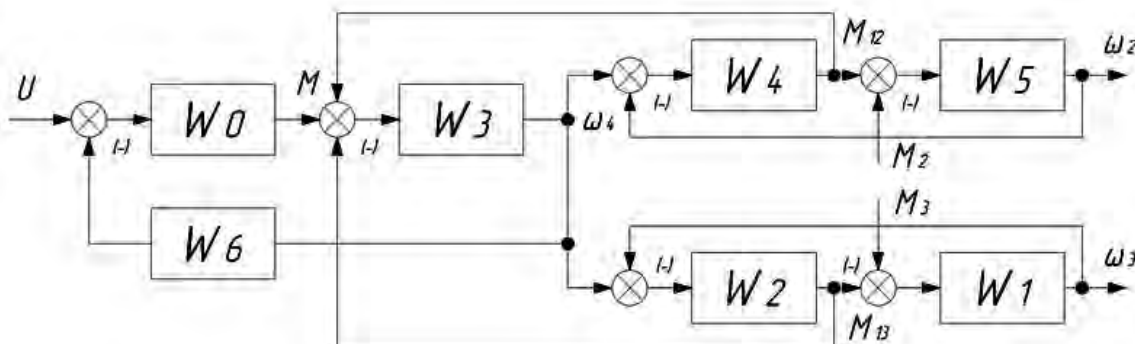


Рис. 1. Структурная схема нормированной трехмассовой консервативной системы

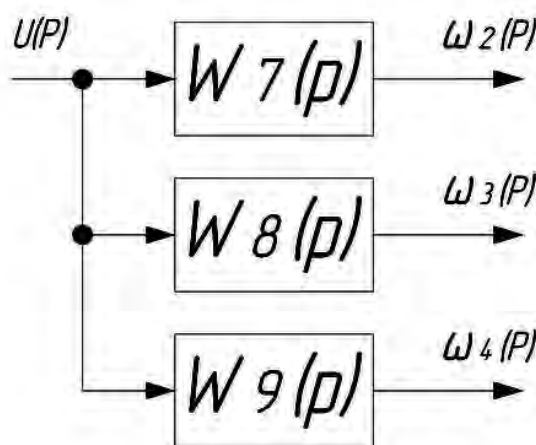


Рис. 2. Разветвленная структурная схема электромеханической системы безредукторного ЭП лифтов ( $M_2 = M_3 = 0$ )

Передаточные функции  $W_7(p)$ ,  $W_8(p)$ ,  $W_9(p)$  на разветвленной структурной схеме по каждой координате исходной схемы могут быть получены с помощью правила преобразования

структурных схем Мейсена [4].

Передаточная функция  $W_7(p)$  с учетом обозначений  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_0$  преобразуется следующим образом:

$$W_7(p) = \frac{B_2 \cdot p^2 + B_0}{p^6 + A_5 \cdot p^5 + A_4 \cdot p^4 + A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0},$$

где

$$B_2 = \frac{k}{T_1 \cdot T_K \cdot T_\Theta \cdot T_M}; \quad B_0 = \frac{k}{T_1 \cdot T_K \cdot T_\Theta \cdot T_M \cdot T_3 \cdot T_{пр}}$$

$$A_0 = \frac{k}{T_1 \cdot T_K \cdot T_{\text{Э}} \cdot T_M \cdot T_3 \cdot T_{\text{пр}}}; \quad A_1 = \frac{1}{T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_1} \cdot \left( \frac{1}{T_K \cdot T_M} + \frac{1}{T_3 \cdot T_M} + \frac{1}{T_K \cdot T_3} \right);$$

$$A_2 = \frac{1}{T_1 \cdot T_{\text{пр}}} \cdot \left( \frac{1}{T_K \cdot T_M} + \frac{1}{T_3 \cdot T_M} + \frac{1}{T_K \cdot T_3} \right) + \frac{k}{T_M \cdot T_{\text{Э}}} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{пр}} \cdot T_3} + \frac{1}{T_K \cdot T_1} \right); \quad A_5 = \frac{1}{T_{\text{Э}}};$$

$$A_3 = \frac{1}{T_3 \cdot T_1} \cdot \left( \frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_K} \right) + \frac{1}{T_3 \cdot T_{\text{пр}}} \cdot \left( \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_M} \right);$$

$$A_4 = \frac{1}{T_1} \cdot \left( \frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_K} \right) + \frac{1}{T_{\text{пр}}} \cdot \left( \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_M} \right) + \frac{k}{T_{\text{Э}} \cdot T_M}.$$

Передаточная функция по скорости перемещения противовеса  $W_8(p)$  имеет вид:

$$W_8(p) = \frac{\Pi_2 \cdot p^2 + \Pi_0}{p^6 + A_5 \cdot p^5 + A_4 \cdot p^4 + A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0},$$

где

$$\Pi_2 = \frac{k}{T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_{\text{Э}} \cdot T_M}; \quad \Pi_0 = B_0.$$

Передаточная функция по частоте вращения двигателя  $W_9(p)$  определяется как

$$W_9(p) = \frac{D_4 \cdot p^4 + D_2 \cdot p^2 + D_0}{p^6 + A_5 \cdot p^5 + A_4 \cdot p^4 + A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0},$$

где

$$D_4 = \frac{1}{T_{\text{Э}} \cdot T_M}; \quad D_2 = \frac{1}{T_M \cdot T_{\text{Э}}} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{пр}} \cdot T_3} + \frac{1}{T_K \cdot T_1} \right); \quad D_0 = B_0.$$

Постоянные времени, используемые в этих передаточных функциях для безредукторного пассажирского лифта

грузоподъемностью 400 кг и скоростью движения 1 м/с, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения постоянных времени и коэффициентов

k	$T_{\text{Э}}, \text{с}$	$T_1, \text{с}$	$T_3, \text{с}$	$T_K, \text{с}$	$T_{\text{пр}}, \text{с}$	$T_M, \text{с}$
0,56	0,014	0,00003	0,00077	0,072	0,058	0,006

При этих постоянных времени, например, передаточная функция по

скорости кабины  $W_7(p)$  может быть записана следующим образом:

$$W_7(p) = \frac{5,43 \cdot 10^9 \cdot p^2 + 1,339 \cdot 10^{14}}{p^6 + 71,4 \cdot p^5 + 6,28 \cdot 10^6 \cdot p^4 + 4,48 \cdot 10^8 \cdot p^3 + 2,62 \cdot 10^{11} \cdot p^2 + 1,83 \cdot 10^{13} \cdot p + 1,3 \cdot 10^{14}}.$$

На рис. 3 для нее показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ.

ны ЛАЧХ и ЛФЧХ для передаточных функций  $W_8(p)$ ,  $W_9(p)$ .

Аналогично могут быть построены

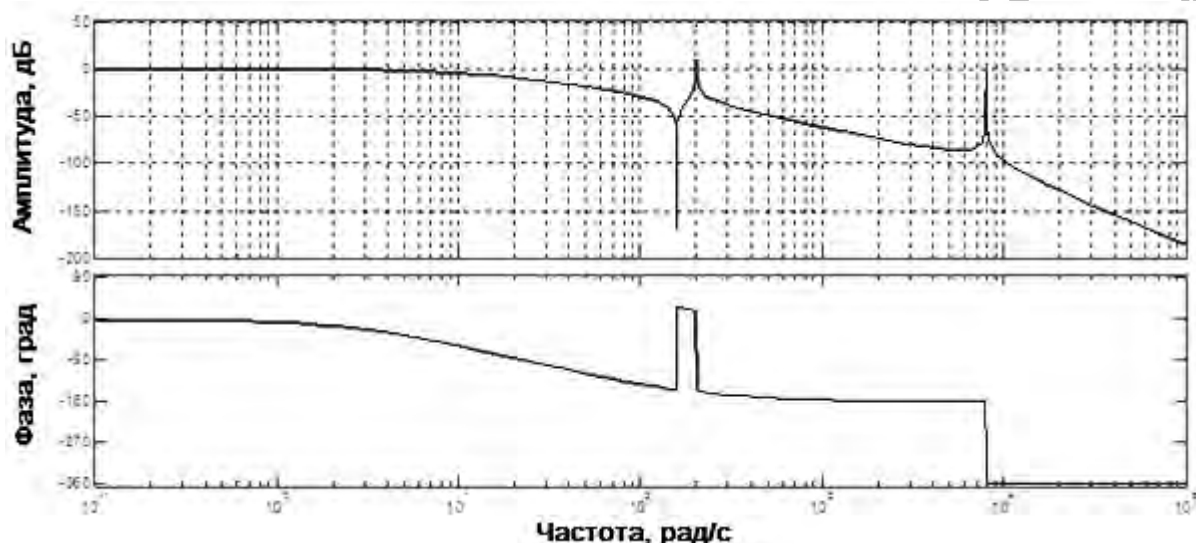


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции  $W_7(p)$

Упругие свойства канатов определяют частоту свободной составляющей переходных процессов, а также частоты резонансов и антирезонансов. Эти частоты резонансов и антирезонансов могут быть рассчитаны аналитически по соответствующим нулям и полюсам  $W_7(p)$ ,  $W_8(p)$ ,  $W_9(p)$ .

Старшие коэффициенты в полиномах числителя и знаменателя передаточных функций  $W_7(p)$ ,  $W_8(p)$ ,  $W_9(p)$ , определяемые произведениями соответствующих постоянных времени, имеют достаточно маленькие значения. При их пренебрежении (без учета упругих свойств канатов) передаточная функция, например  $W_7(p)$ , приводится к виду

$$W'_7(p) = \frac{1}{T_{\text{Э}} \cdot T_0 \cdot p + T_0 \cdot p + 1},$$

где

$$T_0 = \frac{T_{\text{К}} + T_{\text{М}}}{k}.$$

Для безредукторного электропривода лифтов (см. табл. 1) выполняется условие  $T_0 \geq 4T_{\text{Э}}$ . Соответственно  $W'_7(p)$  может быть представлена в виде двух аperiodических звеньев:

$$W'_7(p) = \frac{1}{(T_1^* \cdot p + 1) \cdot (T_2^* \cdot p + 1)}.$$

$T_1^*$ ,  $T_2^*$  определяются корнями характеристического полинома знамена-

теля  $W_7'(p)$ .

Для постоянных времени (см. табл. 1) получим

$$W_7'(p) = \frac{1}{(0,12p+1) \cdot (0,02p+1)}.$$

Переходные процессы в безредукторном приводе лифта с учётом упругих свойств канатов и без их учета показаны на рис. 4.

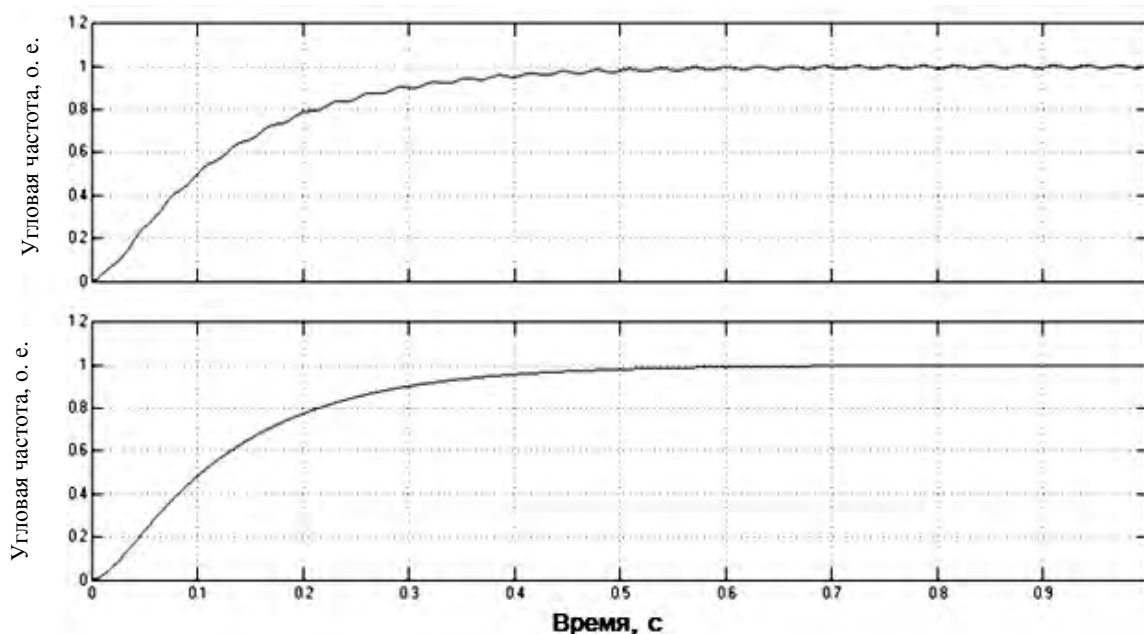


Рис. 4. Переходные процессы (угловая частота кабины лифта, приведенная к валу двигателя) в электромеханической системе безредукторного электропривода лифта

Подобные преобразования без учета упругих свойств канатов могут быть сделаны для передаточных функций  $W_8(p)$ ,  $W_9(p)$ .

Искусственное обнуление старших коэффициентов характеристического полинома в замкнутых системах (использование полинома второго порядка при синтезе системы привода лифта) может приводить к нарушению устойчивости системы при малых изменениях ее параметров (нарушение грубости второго рода). В передаточных функциях  $W_7(p)$ ,  $W_8(p)$ ,  $W_9(p)$  все коэффициенты определяются в том числе постоянными времени  $T_1$ ,  $T_3$ ,  $T_k$ , которые изменяются при изменении высоты подъема кабины и загрузки в ней. Поэтому использование представления безредукторного электропривода лифта с син-

хронным двигателем с постоянными магнитами в виде двух апериодических звеньев или полинома второго порядка (при невыполнении условия  $T_0 \geq 4T_3$ ) при синтезе регуляторов системы привода требует проверки получаемого характеристического полинома замкнутой системы на робастную устойчивость [6].

### Выводы

1. На основе трехмассовой расчетной схемы, описывающей механическую подсистему привода лифтов, получены передаточные функции по скорости кабины лифта, скорости противовеса, частоте вращения двигателя. Эти передаточные функции определяют вынужденную и свободную составляющие скорости перемещения кабины лифта и могут быть использованы при синтезе системы

регулирования привода лифта, например, полиномиальными методами.

2. При анализе параметров системы электропривода лифтов, а также при синтезе регуляторов привода возможно использование одномассовой модели

механической подсистемы привода лифта с последующей проверкой синтезированной замкнутой системы на устойчивость (нарушение грубости второго порядка).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 113–120.
2. **Чупрасов, В. В.** Исследование динамики электроприводов лифтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / В. В. Чупрасов ; Моск. энергет. ин-т. – М., 1976. – 19 с.
3. **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
4. **Борцов, Ю. А.** Тиристорные системы ЭП с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Т. Соколовский. – Л. : Энергия, 1979. – 159 с.
5. **Переслегин, Н. Г.** Синтез систем управления электроприводами многомассовых механизмов с упругими связями. Автоматизированный электропривод / Н. Г. Переслегин ; под ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
6. Использование метода полиномиальных управлений для синтеза систем управления асинхронными электроприводами / З. Ш. Ишматов [и др.] // Электротехника. – 2004. – № 9. – С. 29–33.

*Статья сдана в редакцию 20 мая 2015 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: etf@bru.by.

**Никита Станиславович Лагун**, магистрант, Белорусско-Российский университет.

**Виктория Викторовна Кабушева**, магистрант, Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyeovich Koval**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: etf@bru.by.

**Nikita Stanislavovich Lagun**, MSc student, Belarusian-Russian University.

**Viktoriya Viktorovna Kabusheva**, MSc student, Belarusian-Russian University.