

УДК 519.673:62-83

А. С. Коваль, канд. техн. наук, доц., А. В. Шваяков

К ВОПРОСУ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭП ЛИФТА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В статье рассматриваются вопросы синтеза системы управления для безредукторного электропривода лифта. Представлено математическое описание электромеханической системы лифта с безредукторным регулируемым электроприводом. Дан подход к синтезу системы управления исходя из электромеханического взаимодействия в электромеханической системе лифта.

Введение

Современный лифт представляет собой электромеханическую систему, состоящую из электрической и механической подсистем (рис. 1) [1].

Электрическая подсистема лифтов

может быть представлена синхронным или асинхронным регулируемым электроприводом [2]. Система управления регулируемым электроприводом содержит преобразователь частоты, электродвигатель и датчик скорости (ДС).

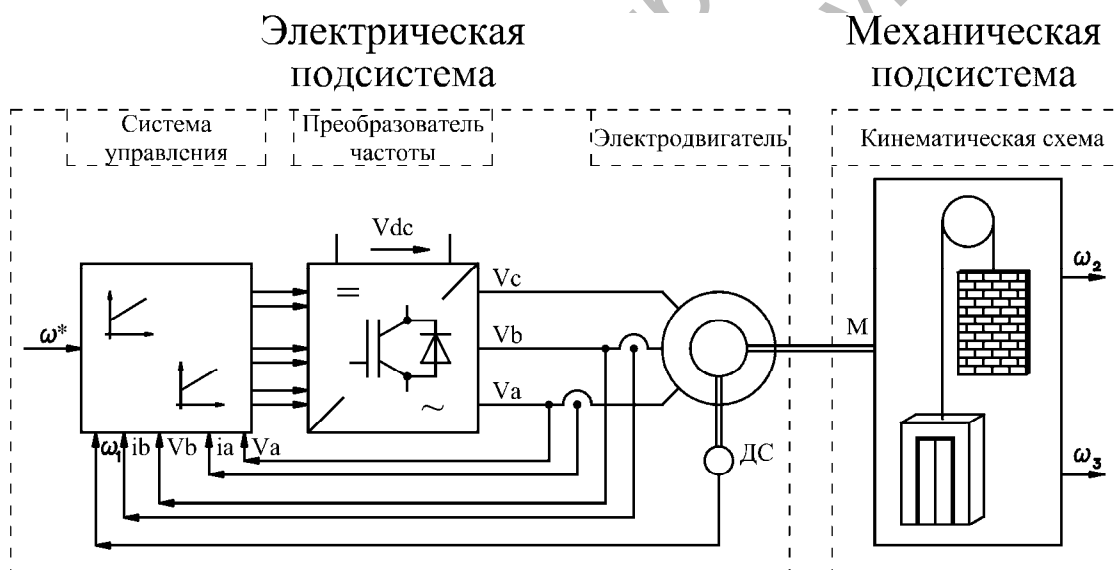


Рис. 1. Состав электромеханической установки лифта

Механическая подсистема безредукторных лифтов представлена различными кинематическими схемами [3–6], причем, как правило, в них можно выделить сосредоточенные элементы, соединенные упругим элементом (рис. 2). К сосредоточенным элементам относятся массы кабины, противовеса, канатоведущего шкива, моменты инерции муфты, валов и электродвигателя. К

распределенным элементам – канаты, которые представляют собой сложную динамическую систему.

При настройке системы управления с регулируемым электроприводом лифта возникает вопрос обоснованного выбора коэффициентов регулятора скорости. Существует множество способов настройки регуляторов систем управления [7–10], в которых качество настрой-

ки оценивается по переходному процессу либо количественным значением заданного функционала качества. Настройка регуляторов систем управления электроприводом лифта известными способами [7–10] не позволяет учиты-

вать на этапе синтеза системы возможностей регулируемого электропривода демпфировать энергию колебаний механической подсистемы, что требует поиска новых подходов к синтезу регулятора скорости электропривода лифта.

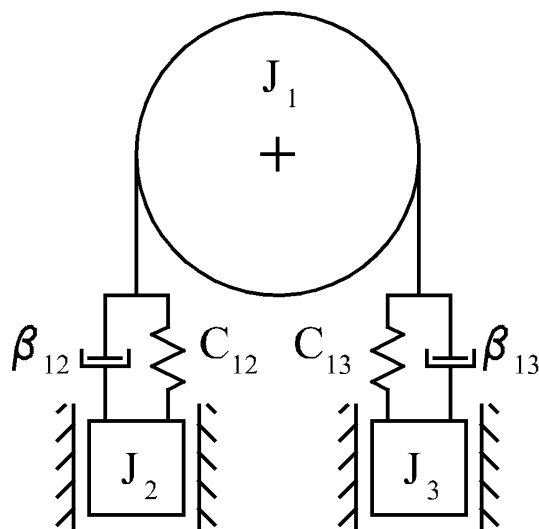


Рис. 2. Структурная схема механической подсистемы: J_1 – приведенный момент инерции двигателя и канатопроводящего шкива; J_2 – приведенный момент инерции кабины; J_3 – приведенный момент инерции противовеса

Математическое описание

Современные системы управления электроприводом лифтов, например системы векторного управления при прямом

управлении моментом [11–13], могут быть сведены к двухконтурным системам управления, с контурами управления моментом и скоростью (рис. 3).

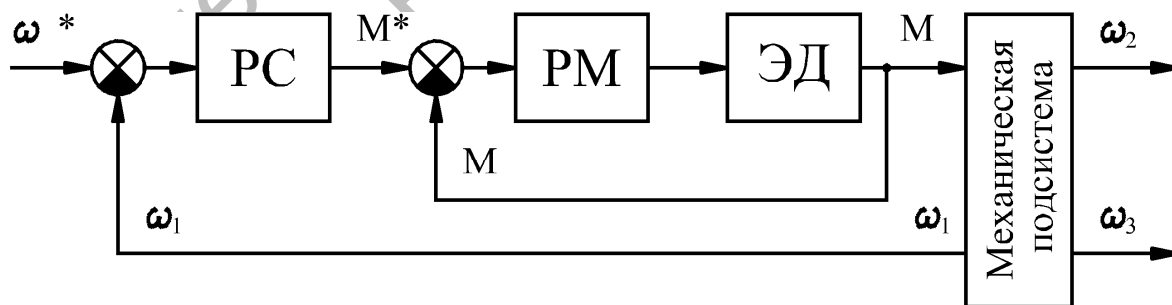


Рис. 3. Функциональная схема системы управления электроприводом: PC – регулятор скорости; PM – регулятор момента; ЭД – электродвигатель

Контур управления моментом является быстродействующим [14], поэтому передаточная функция замкнутого контура управления может быть оп-

ределена как

$$W_M(p) = \frac{M(p)}{M^*(p)} = 1, \quad (1)$$

где $W_M(p)$ – передаточная функция замкнутого контура управления моментом; p – оператор Лапласа; $M(p)$ – изображение электромагнитного момента электродвигателя, Н·м; $M^*(p)$ – изображение сигнала задания электромагнитного момента, Н·м.

В контуре управления скоростью наиболее часто применяется пропорционально-интегральный регулятор с передаточной функцией

$$W_{PC}(p) = K_p + \frac{K_I}{p}, \quad (2)$$

где $W_{PC}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости; K_p – коэффициент усиления пропорциональной части; K_I – коэффициент усиления интегральной части.

Используя передаточные функции (1) и (2), можно получить передаточную функцию замкнутого контура управления скоростью

$$W(p) = \frac{K_p \cdot p + K_I}{J_\Sigma \cdot p^2 + K_p \cdot p + K_I}, \quad (3)$$

где $W(p)$ – передаточная функция замкнутого контура скорости; J_Σ – суммарный момент инерции системы, кг·м².

Механические подсистемы массовых лифтов с регулируемым электроприводом и высотой подъема до 75 м достаточно точно могут быть описаны

трехмассовой консервативной расчетной схемой (рис. 4) [15, 17].

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_2 - M_{C2}; \\ J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13} - M_{C3}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13} \cdot (\omega_3 - \omega_1), \end{cases} \quad (4)$$

где J_1, J_2, J_3 – приведенные к общему валу моменты инерции электродвигателя с канатоведущим шкивом, кабины и противовеса соответственно, кг·м²; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – приведенные к общему валу угловые скорости вращения электродвигателя, кабины и противовеса соответственно, рад/с; M – электромагнитный момент двигателя, Н·м; M_{12}, M_{13} – приведенные моменты взаимодействия, Н·м; M_2, M_3 – приведенные к общему валу моменты, обусловленные силой тяжести, Н·м; M_{C2}, M_{C3} – приведенные к общему валу моменты сопротивления, Н·м; C_{12}, C_{13} – коэффициенты жесткости при кручении связей, Н·м/рад.

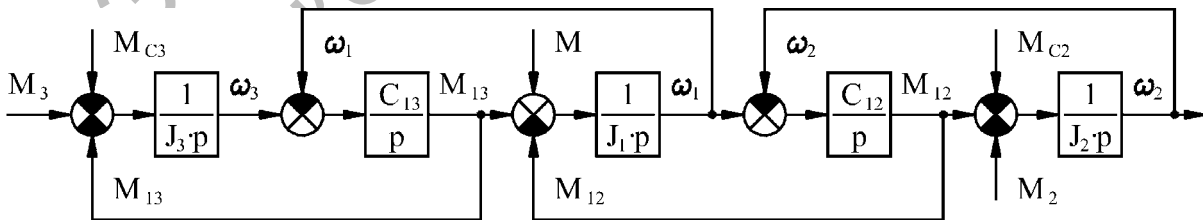


Рис. 4. Структурная схема трехмассовой консервативной системы

Значения коэффициентов жесткости при растяжении определяются по формуле

$$C_{ij} = \frac{n \cdot S \cdot E}{L_{ij}}, \quad (5)$$

где C_{ij} – коэффициенты жесткости при растяжении соответствующей ветви, Н/м; n – число канатов в ветви; S – поперечное сечение каната, см^2 ; E – модуль упругости стального каната, $E = 1,25 \cdot 10^6$ кг·с/см²; L_{ij} – длина соответствующей ветви каната, м.

Приведенные к общему валу моменты инерции определяются по формуле

$$J_i = \frac{m_i \cdot R^2}{i^2}, \quad (6)$$

где J_i – приведенный к общему валу момент инерции, кг·м²; m_i – масса тела, кг; R – радиус канатопроводящего шкива, м; i – передаточное число полиспаста.

Электромеханическое взаимодействие в лифтах с регулируемым ЭП

В [18, 19] показано, что в электромеханических системах может существовать взаимосвязь между процессами, протекающими в электрической и механической подсистемах. Причем электропривод, при определенных условиях, может оказывать демпфирующее действие на слабо демпфированную механическую подсистему, каковой и является механическая подсистема лифта. Количественной оценкой взаимосвязи электрической и механической подсистем может выступать коэффициент электромеханической связи [18, 19], который определяется как отношение амплитуды колебаний движущего усилия, развиваемого в данном случае электродвигателем, к амплитуде колебаний усилий в упругой связи механической подсистемы электромеханической системы лифта, возникающей под воздействием возмущения, действующего на вал двигателя, на частоте собственных колебаний. То есть коэффициенты электромеханической связи для электромеханической системы лифта в операторной форме определяются по следующим формулам:

$$k_{12}(p) = \frac{M(p)}{M_{12}(p)} = \frac{(J_2 \cdot p^2 + C_{12}) \cdot (K_p \cdot p + K_I)}{J_2 \cdot C_{12} \cdot p^2}, \quad (7)$$

$$k_{13}(p) = \frac{M(p)}{M_{13}(p)} = \frac{(J_3 \cdot p^2 + C_{13}) \cdot (K_p \cdot p + K_I)}{J_3 \cdot C_{13} \cdot p^2}, \quad (8)$$

где $k_{12}(p)$ – изображение коэффициента электромеханической связи канатопроводящий шкив–кабина; $k_{13}(p)$ – изображение коэффициента электромеханической связи канатопроводящий шкив–противовес; $M(p)$ – изображение электромагнитного момента, Н·м; $M_{12}(p)$ – изображение момента взаимодействия канатопроводящий шкив–кабина, Н·м; $M_{13}(p)$ – изображение момента взаимодействия канатопроводящий шкив–противовес, Н·м.

Из передаточных функций (7) и (8) видно, что коэффициент электромеханической связи $k_{12}(p)$, $k_{13}(p)$ электромеханической системы лифта зависит от параметров регулятора скорости системы управления K_p , K_I , эквивалентной жесткости упругой связи C_{12} , C_{13} и приведенного момента инерции J_2 , J_3 .

Синтез регулятора скорости

Одним из способов настройки регуляторов систем управления является модульный оптимум [20, 21], который для отыскания неизвестных коэффициентов регулятора требует решения:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d^m A(\omega)}{d\omega^m} \rightarrow 0, \quad m = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где $A(\omega)$ – модуль амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы управления (3); m – порядок производной; ω – частота входного сигнала, рад/с; n – порядок системы управления.

Решение уравнения (9) позволяет определить соотношение между коэффициентами пропорционально-интегрального регулятора скорости:

$$K_I = \frac{2}{3} \cdot \frac{K_p^2}{J_\Sigma}. \quad (10)$$

Выбор значений коэффициентов K_p и K_i необходимо выполнять с учетом возможных резонансных явлений в механической подсистеме (рис. 5) [22], что учитывается выбором частоты среза

контура управления скоростью ω_c . Значение частоты среза ω_c не должно превосходить значения частоты первого резонанса ω_{r1} .

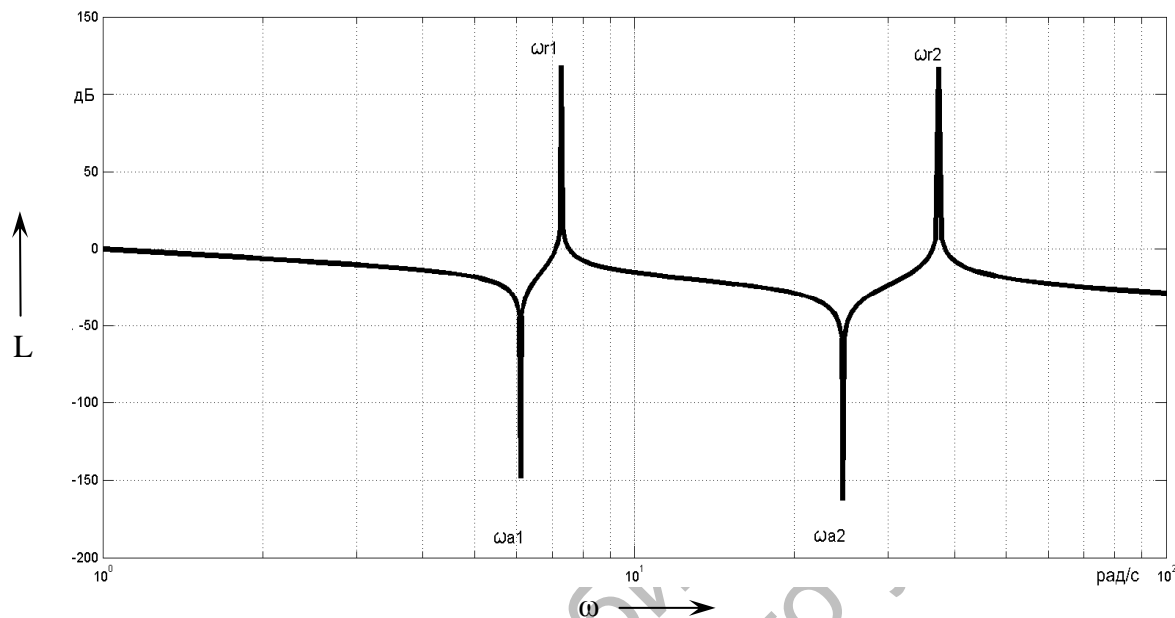


Рис. 5. ЛАЧХ объекта управления

Принимая во внимание (10), коэффициент электромеханической связи

может быть определен по формуле

$$k_{12} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{J_2 \cdot J_3^2 \cdot \omega_c^2 \cdot (3 \cdot C_{12} \cdot (J_1 + J_2) + \omega_c^2 \cdot J_1 \cdot J_2)}{C_{12}^2 \cdot J_1 \cdot (J_1 + J_2)^2}}, \quad (11)$$

где k_{12} – модуль коэффициента электромеханической связи канатоведущий шкив–кабина.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_2}}; \quad (12)$$

Видно, что коэффициент электромеханической связи (11) зависит от частоты среза контура управления скоростью ω_c и параметров механической подсистемы (J_1, J_2, J_3, C_{12}). Причем при выборе ω_c , в соответствии с (12), значение коэффициента электромеханической связи будет определяться только соотношениями приведенных моментов инерции J_1, J_2, J_3 :

$$k_{12} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_1 + J_2}\right)^2 \cdot \frac{4 \cdot J_1 + 3 \cdot J_2}{J_1}}. \quad (13)$$

Приведенный момент инерции J_2 изменяется с изменением загрузки кабины, что приводит к изменению значения коэффициента электромеханической связи.

Таким образом, для фиксации значения коэффициента электромеханической связи в систему управления необходимо введение поправочного коэффициента (рис. 6), учитывающего изменение загрузки кабины. В этом случае коэффициент электромеханической связи будет определяться по формуле

$$k_{12} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \sqrt{\left(\frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_1 + J_2}\right)^2 \cdot \frac{4 \cdot J_1 + 3 \cdot J_2}{J_1}}, \quad (14)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий изменения загрузки кабины.

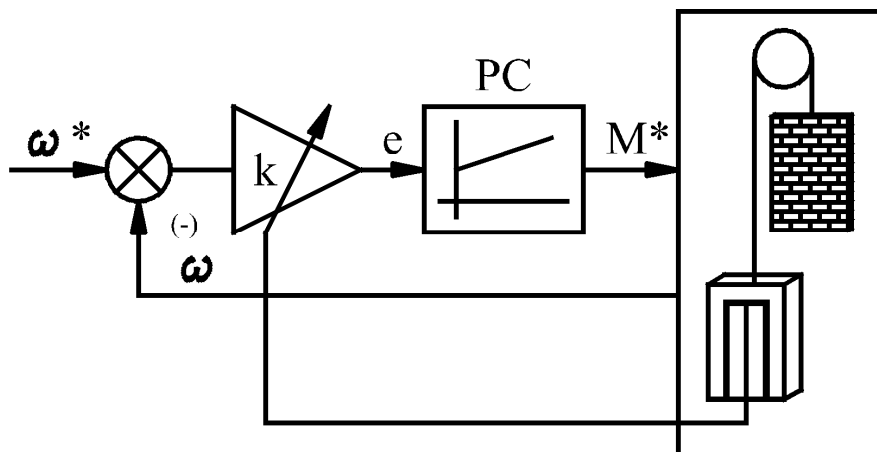


Рис. 6. Структурная схема системы управления электроприводом

Исходя из (14) значение корректирующего коэффициента может быть определено по формуле

$$k = \frac{k_{12}^*}{\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_1 + J_2}\right)^2 \cdot \frac{4 \cdot J_1 + 3 \cdot J_2}{J_1}}}, \quad (15)$$

где k_{12}^* – желаемое значение коэффициента электромеханической связи.

Таким образом, для поддержания значения коэффициента электромеханической связи постоянным необходимо:

- изменять значения коэффициентов K_p и K_i , что видно из (10) и (12), в зависимости от положения кабины лифта в шахте и её загрузки (рис. 7);
- изменять значение поправочного коэффициента k в зависимости от загрузки кабины (15) (рис. 8).

$$L^* = \frac{L_i}{L_{\max}}, \quad (16)$$

где L^* – безразмерный коэффициент; L_i – текущая длина ветви каната канатопроводящий шкив–кабина, м; L_{\max} – максимальная длина ветви каната канатопроводящий шкив–кабина, м.

$$m^* = \frac{m_i}{m_{\max}}, \quad (17)$$

где m^* – безразмерный коэффициент; m_i – текущая масса груза в кабине, кг; m_{\max} – максимальная масса груза, кг.

Выводы

1. Получено аналитическое выражение для определения коэффициента электромеханической связи, позволяющее выполнить анализ влияния параметров электромеханической системы с регулируемым безредукторным электроприводом на коэффициент электромеханической связи.

2. Представлена структура системы управления безредукторным элект-

троприводом лифта, позволяющая фиксировать значение коэффициента электромеханической связи.

3. Показано, что коэффициент электромеханической связи в электромеханической системе лифта с регулируемым безредукторным электроприво-

дом может быть зафиксирован посредством изменения поправочного коэффициента k в функции загрузки кабины и изменения коэффициентов регулятора скорости K_p и K_i в функции загрузки кабины и положения кабины лифта в шахте.

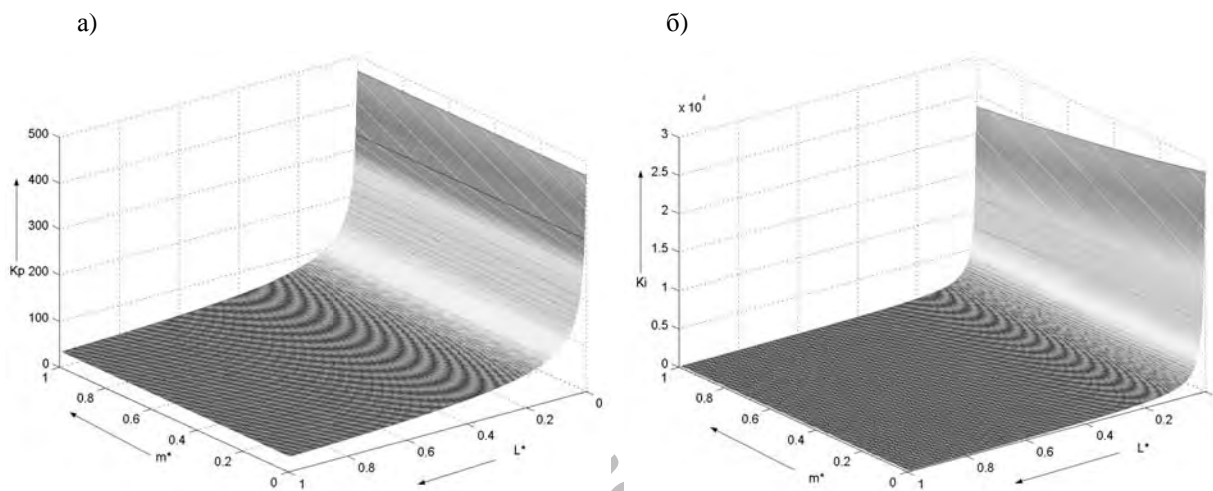


Рис. 7. Зависимость коэффициентов K_p и K_i от загрузки кабины и положения кабины в шахте

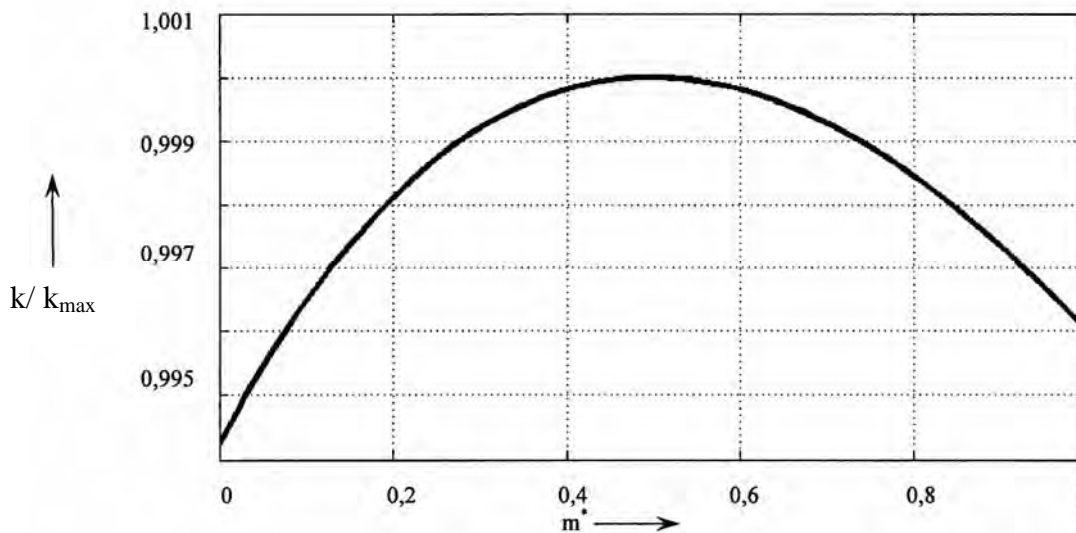


Рис. 8. Зависимость поправочного коэффициента k от загрузки кабины: k_{\max} – максимальное значение поправочного коэффициента

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. **Афонин, В. И.** Основные направления повышения технического уровня двигателей для привода лифтов / В. И. Афонин, А. В. Шорохов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : // www.vemp.ru / science.html](http://www.vemp.ru/science.html). – Дата доступа : 10.02.2008.

3. **Яновский, Л.** Проектирование механического оборудования лифтов : монография / Л. Яновский. – 3-е изд. – М. : АСВ, 2005. – 336 с.
4. **Беляев, В. П.** Типовой электропривод : учеб. пособие для студентов специальности 10.04 «Энергоснабжение» : в 3 ч. – Минск : БГПА, 1992. – Ч. 2. – 60 с.
5. Лифты : учебник для вузов / Под общ. ред. Д. П. Волкова. – М. : АСВ, 1999. – 480 с. : ил.
6. **Чутчиков, П. И.** Электрооборудование лифтов массового применения / П. И. Чутчиков, Н. И. Алексеев, А. К. Прокофьев – М. : Машиностроение, 1983. – 168 с. : ил.
7. **Гудвин, Г. К.** Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Э. Сальгадо. – М. : БИНОМ, 2004. – 911 с. : ил.
8. **Петров, Ю. П.** Новые главы теории управления и компьютерных вычислений / Ю. П. Петров. – СПб. : БХВ–Петербург, 2004. – 192 с. : ил.
9. **Чернорудский, И. Г.** Методы оптимизации в теории управления : учеб. пособие / И. Г. Чернорудский. – СПб. : Питер, 2004. – 256 с. : ил.
10. **Анхимюк, В. Л.** Проектирование систем автоматического управления электроприводами : учеб. пособие для вузов по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок» / В. Л. Анхимюк. – Минск : Выш. шк., 1986. – 143 с. : ил.
11. **Zelechowski, M.** Industrial Application of Sensorless Direct Torque Control – Space Vector Modulated (DTC-SVM) for Inverter Fed Induction Motor Drives / M. Zelechowski, W. Kolomyjski, M. Twerd // IV Summer Seminar on Nordick Network for Multi Disciplinary Optimised Electric Drives : Material of Proceeding. – Tallinn : Estonia, 2004. – P. 81–83.
12. **Kazmierkowski, M. P.** Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors - A Review / M. P. Kazmierkowski // III Summer Seminar on Nordick Network for Multi Disciplinary Optimised Electric Drives : Material of Proceeding. – Zegrze : Poland, 2003. – P. 1–19.
13. **Vas, P.** Sensorless vector and direct torque control / P. Vas. – Oxford : Oxford science publications, 1998. – 730 p.
14. **Коваль, А. С.** К вопросу исследования частотных свойств электропривода при прямом управлении моментом с широтно-импульсной модуляцией в лифтовых установках / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. – 2008. – № 1. – С. 24–33.
15. **Чупрасов, В. В.** Исследование динамики электроприводов лифтов : автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1976. – 32 с.
16. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с. : ил.
17. **Шваяков, А. В.** К вопросу исследования переходных процессов в лифтах / А. В. Шваяков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. – Могилев, 2008. – С. 143.
18. **Ключев, В. И.** Ограничение динамических нагрузок электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергия, 1971. – 320 с. : ил.
19. **Пятибратов, Г. Я.** Ресурсосберегающее управление усилиями в упругих передачах и исполнительных устройствах электромеханических систем и комплексов / Г. Я. Пятибратов // V междунар. (XVI всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, 18–21 сент. 2007 г. / С.-Петерб. гос. политехн. ун-т, Москов. энергет. ин-т ОАО «Электропривод» ; редкол. : М. Г. Юньков [и др.]. – СПб., 2007. – С. 58–60.
20. **Киселев, Н. В.** Электропривод с распределенными параметрами / Н. В. Киселев, В. Н. Мяздель, Л. Н. Рассудов. – Л. : Судостроение, 1985. – 220 с. : ил.
21. **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
22. **Рассудов, Л. Н.** Электропривод с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мяздель. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 144 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.03.2010

A. S. Koval, A. V. Shvayakov
On the problem of the synthesis of the speed controller of gearless electric drive in elevators with regard to electromechanical interaction

The paper deals with problems of the synthesis of the control system for the elevator gearless electric drive. It presents the mathematical description of the electromechanical system of the elevator with the gearless controllable electric drive. The approach to the synthesis of the control system regarding the electromechanical interaction in the electromechanical system of the elevator is described.