

УДК 692.66:62-83

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УПРУГОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ ДИАГРАММЫ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ЛИФТОВ

А. А. Бойко, Н. А. Бойко, А. А. Бесараб

Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина. E-mail: dart77@ukr.net

Влияние упругих свойств лифтовых механических передач приводит к отличию фактической диаграммы движения кабины от требуемой оптимальной диаграммы. Это отрицательно сказывается на качестве управления пассажирскими лифтами, нарушает условия комфортного перемещения пассажиров, увеличивает динамические нагрузки на подъемные механизмы. Выполнен поиск аналитических соотношений и графических зависимостей, которые характеризуют влияние упругих связей на параметры движения лифтовых подъемных механизмов. При проведении исследований свойств и возможностей лифтовых электромеханических систем их реальные кинематические схемы заменялись соответствующими расчетными. Найденные универсальные зависимости и соотношения могут быть использованы для количественной оценки влияния упругостей на диаграммы движения произвольных пассажирских лифтов, а также при синтезе их параметров и законов управления электроприводов.

Ключевые слова: электропривод, пассажирский лифт, диаграммы движения, механические передачи, многомассовые системы.

ОБЛІК ВПЛИВУ ПРУЖНОСТЕЙ МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ НА ОПТИМАЛЬНІ ДІАГРАМИ РУХУ ПАСАЖИРСЬКИХ ЛІФТІВ

А. О. Бойко, Н. А. Бойко, А. О. Бесараб

Одеський національний політехнічний університет
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна. E-mail: dart77@ukr.net

Вплив пружних властивостей ліфтових механічних передач призводить до відмінності фактичної діаграми руху кабіни від необхідної оптимальної діаграми. Це негативно позначається на якості керування пасажирськими ліфтами, порушує умови комфортного переміщення пасажирів, збільшує динамічні навантаження на підйомні механізми. У роботі виконано пошук аналітичних співвідношень і графічних залежностей, які характеризують вплив пружних зв'язків на параметри руху ліфтових підйомних механізмів. При проведенні досліджень властивостей і можливостей ліфтових електромеханічних систем їх реальні кінематичні схеми замінялися відповідними розрахунковими. Знайдені універсальні залежності й співвідношення можуть бути використані для кількісної оцінки впливу пружності на діаграми руху довільних пасажирських ліфтів, а також при синтезі їх параметрів і законів керування електроприводів.

Ключові слова: електропривод, пасажирський ліфт, діаграми руху, механічні передачі, пружності, багатомасові системи.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Влияние упругих свойств механических передач, которое проявляется при работе электроприводов лифтовых подъемных механизмов, приводит к отличию фактической диаграммы движения кабины, формируемой электроприводом, от требуемой – оптимальной диаграммы (рис. 1) [1, 2]. Отличие параметров движения от заданных отрицательно сказывается на качестве управления пассажирскими лифтами, нарушает условия комфортного перемещения пассажиров, увеличивает динамические нагрузки на подъемные механизмы, способствует накоплению усталостных напряжений в кинематических цепях, приводит к преждевременным отказам и незапланированным простоям лифтового оборудования, возрастанию стоимости ремонтов и эксплуатации [3, 4].

Целью работы является поиск универсальных аналитических и графических зависимостей, характеризующих влияние различных параметров электропривода лифта на параметры движения подъемного механизма, для дальнейшего формирования, оптимальных диаграмм движения кабины, учитывающих нелинейности механических передач.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для проведения исследований свойств и возможностей лифтовых электромеханических систем (ЭМС) их реальные кинематические схемы заменяются соответствующими расчетными. В зависимости от кинематической схемы, типа решаемых задач и требуемой части решения, могут применяться расчетные схемы, основанные на представлении ЭМС в виде упругой n-массовой системы [5]. Для решения поставленных в настоящей работе

задач предлагается использовать трехмассовую расчетную схему (рис. 2).

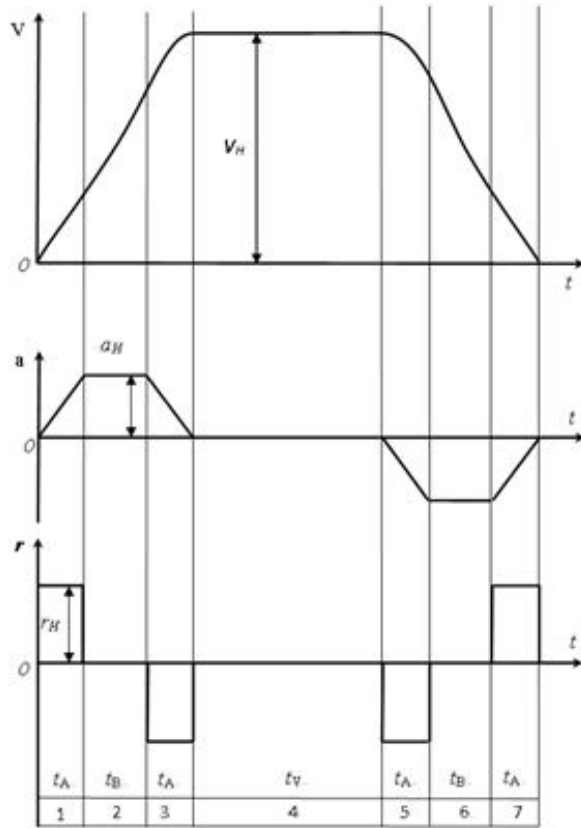


Рисунок 1 – Оптимальная диаграмма движения кабины лифта

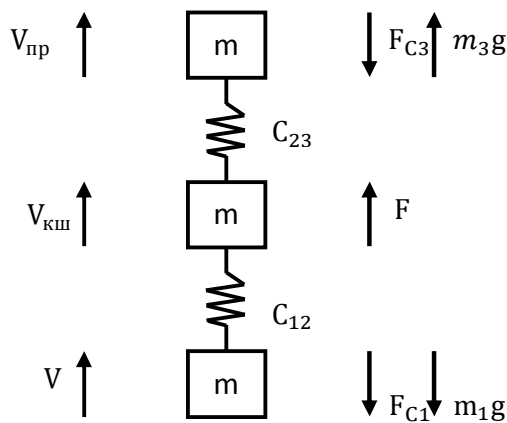


Рисунок 2 – Расчетная схема упругой трехмассовой системы

Движение трехмассовой системы описывается уравнениями [5]

$$\left. \begin{aligned} m_1 \frac{dV}{dt} &= F_{12} - m_1 g - F_{C1}; \\ m_2 \frac{dV_{ку}}{dt} &= F - F_{12} + F_{23}; \\ m_3 \frac{dV_{np}}{dt} &= m_3 g - F_{23} - F_{C3}; \\ \frac{dF_{12}}{dt} &= C_{12}(V_{ку} - V) + C_{12}T_{12} \frac{d(V_{ку} - V)}{dt}; \\ \frac{dF_{23}}{dt} &= C_{23}(V_{np} - V_{ку}) + C_{23}T_{23} \frac{d(V_{np} - V_{ку})}{dt}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где V_{np} – скорость движения противовеса; F_{23} – усилие в упругом элементе ветви каната, соединяющем канатоведущий шкив и противовес; $C_{23} = E_k S_k / l_{23}$ – жесткость этой ветви каната; l_{23} – длина ветви каната; T_{23} – постоянная времени, учитывающая действие диссипативных сил в этой ветви каната.

Учет действия диссипативных сил может производиться различными способами [6], однако ни один из предлагаемых способов не учитывает в полной мере сложные процессы демпфирования колебаний каната. Наибольшее распространение при исследовании электроприводов с упругими связями получил способ учета диссипативных сил, основанный на введении коэффициента демпфирования колебаний, а введение постоянной времени T_{12} эквивалентно введению коэффициента демпфирования. Аналитическое решение уравнений (1) возможно лишь для частного случая $T_{12} = T_{23} = 0$, т.е. при отсутствии диссипативных сил [6]. В общем случае решение необходимо искать методом численного интегрирования.

В работе выполняется исследование влияния параметров трехмассовой упругой схемы ЭМС на величины максимальной скорости, ускорения и рывка кабины лифта. При этом предполагается, что развиваемое двигателем лебедки усилие изменяется по следующему закону, причем длительность движения с установившейся скоростью равна нулю [7]:

$$F = k_1(m_1 + m_2 + m_3)r_n t + k_2(m_1 + m_2 + m_3)a_n + (m_1 - m_3)g, \quad (2)$$

где r_n , a_n – номинальные линейные значения рывка и ускорения кабины, $м/с^3$, $м/с^2$; k_1 , k_2 – переключающие функции для каждого из участков оптимальной диаграммы движения кабины (рис. 1), приведены в табл. 1.

Таблиця 1 – Значения переключающих функций

№ участка	Длительность участка опт. диаграммы	Величины функций			
		k ₁	k ₂	k ₃	k ₄
1	t _A	1	0	0	0
2	t _B	0	1	1	0
3	t _A	-1	1	-1	0
4	t _V	0	0	0	1
5	t _A	-1	0	0	1
6	t _B	0	-1	-1	1
7	t _A	1	-1	1	0

Подобное упрощение задачи вызвано тем, что упругие связи оказывают наиболее существенное влияние на диаграмму движения кабины в динамических режимах, а при движении с установившейся скоростью их влияние невелико. Величины максимального ускорения и рывка в начале движения не зависят от протяженности участка установившегося движения, т.е. полученные результаты справедливы при различных длинах перемещения кабины. Также предполагается, что $F_{C1} = F_{C3} = 0$. Допустимость такого упрощения определяется тем, что величины сил трения в направляющих значительно меньше, чем силы веса кабины (m_1g) и противовеса (m_3g) [8]. Для повышения наглядности решения и облегчения обработки результатов расчета целесообразно использовать относительные единицы, определяемые соотношениями

$$\bar{V} = V / V; \quad (3)$$

$$\bar{a} = a / a; \quad (4)$$

$$\bar{r} = r / r_i; \quad (5)$$

$$\bar{F} = \frac{F}{(m_1 + m_2 + m_3)a_n}. \quad (6)$$

Относительное время

$$\tau = \frac{ta_i}{V_i} = \frac{t}{t_A + t_B}, \quad (7)$$

где t_A и t_B – длительности участков оптимальной диаграммы [1] (рис. 1).

Заданный закон изменения момента двигателя в упомянутых относительных единицах может быть записан в виде [6]

$$\bar{F} = k_1 \frac{t}{t_a} + k_2 + \bar{F}_{g1} - \bar{F}_{g3}, \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \tau_a &= \frac{t_A}{t_A + t_B} = \frac{a_n^2}{r_n V_n}; \\ \bar{F}_{gi} &= \frac{m_i g}{(m_1 + m_2 + m_3)a_n}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Расчет диаграммы движения проводится при различных сочетаниях параметров механической части лифта. Для получения универсальных зависимостей при варьировании параметров следует задавать не абсолютные, а относительные величины: частоты собственных колебаний ветви «кабина–канатоведущий шкив»

$$\Omega_{12} = \sqrt{C_{12} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)};$$

коэффициентов соотношения масс $\gamma_{12} = \frac{m_1 + m_2}{m_2}$,

$$\gamma_{23} = \frac{m_2 + m_3}{m_2};$$

отношений длин ветвей каната $\lambda = l_{12} / l_{23}$; коэффициентов демпфирования колебаний $\xi_{12} = \frac{\Omega_{12} T_{12}}{2}$ и $\xi_{23} = \frac{\Omega_{23} T_{23}}{2}$.

Здесь Ω_{23} – частота собственных колебаний ветви «канатоведущий шкив–противовес», рассчитываемая по соотношению

$$\Omega_{23} = \sqrt{\Omega_{12}^2 \frac{\gamma_{23}(\gamma_{12} - 1)^2}{(\gamma_{23} - 1)\gamma_{12}}}, \quad (10)$$

полученному при допущении, что модуль упругости E_k и сечение S_k одинаковы для обеих ветвей каната [8]. Следует отметить, что коэффициенты демпфирования не являются совершенно независимыми параметрами, поскольку зависят от длины ветви каната и, следовательно, коррелируют с величинами Ω_{12} и λ . Однако эта зависимость не поддается аналитическому описанию, в связи с чем эти параметры рассматривались как независимые. Их влияние на величины максимальных ускорения и рывка невелико [8].

С учетом введенных допущений система уравнений, описывающая динамику трехмассовой ЭМС лифта, может быть представлена в виде [5, 6]

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\bar{V}}{d\tau} &= \frac{z_1}{\gamma_{12}-1} \bar{F}_{12} - \frac{g}{a_H}; \\
 \frac{d\bar{V}_{ку}}{d\tau} &= \frac{z_1}{1} (\bar{F} - \bar{F}_{12} + \bar{F}_{23}); \\
 \frac{d\bar{V}_{np}}{d\tau} &= \frac{g}{a_H} - \frac{z_1}{\gamma_{23}-1} \bar{F}_{23}; \\
 \frac{d\bar{F}_{12}}{d\tau} &= \frac{z_{12}}{z_1} \frac{2\gamma_{12}-1}{\gamma_{12}} (\bar{V}_{ку} - \bar{V}) + \\
 &+ 2\xi_{12} z_{12} \left[(\gamma_{12}-1) \frac{1}{\gamma_{12}} \left(\bar{F} + \bar{F}_{23} + \frac{1}{z_1} \frac{g}{a_H} \right) - \bar{F}_{12} \right]; \\
 \frac{d\bar{F}_{23}}{d\tau} &= \frac{z_{23}}{z_1} \frac{2\gamma_{23}-1}{\gamma_{23}} (\bar{V}_{np} - \bar{V}_{ку}) + \\
 &+ 2\xi_{23} z_{23} \left[\frac{\gamma_{23}-1}{\gamma_{23}} \left(\bar{F}_{23} - \bar{F} + \frac{1}{z_1} \frac{g}{a_H} \right) - \bar{F}_{23} \right],
 \end{aligned} \right\} (11)$$

где

$$z_1 = \gamma_{12} + \gamma_{23} - 1; \quad (12)$$

$$z_{12} = \Omega_{12}(t_A + t_B); \quad (13)$$

$$z_{23} = \Omega_{23}(t_A + t_B). \quad (14)$$

Решение уравнений (11) может осуществляться одним из известных численных методов интегрирования, величины коэффициентов демпфирования ξ_{12} и ξ_{23} при этом рекомендуется принимать

равными 0,05 [4, 9]. На рис. 3–5 представлены расчетные зависимости максимального ускорения кабины лифта от параметров трехмассовой системы. Поскольку расчет приведен в относительных единицах и варьируемые параметры также выражены в обобщенных относительных величинах, то полученные зависимости имеют универсальный характер. Они могут быть использованы для оценки влияния упругих связей на величину максимального ускорения в электроприводах лифтов, характеризующихся весьма широкими сочетаниями фактических параметров. При наличии идеального регулятора, реализующего заданный закон изменения скорости канатоведущего шкива [7]

$$v_{ку} = k_1 \frac{r_H}{2} t^2 + k^2 a_H t + k_3 \frac{a_H^2}{2r_H} + k_4 V_H, \quad (15)$$

при расчете фактической диаграммы движения уравнения (1) могут быть разделены на две независимые группы [10]:

$$\left. \begin{aligned}
 m_1 \frac{dV}{dt} &= F_{12} - m_1 g - F_{C1}; \\
 \frac{dF_{12}}{dt} &= C_{12}(V_{ку} - V) + C_{12} T_{12} \frac{d(V_{ку} - V)}{dt};
 \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\left. \begin{aligned}
 m_3 \frac{dV_{np}}{dt} &= m_3 g - F_{23} - F_{C3}; \\
 \frac{dF_{23}}{dt} &= C_{23}(V_{np} - V_{ку}) + C_{23} T_{23} \frac{d(V_{np} - V_{ку})}{dt}.
 \end{aligned} \right\} (17)$$

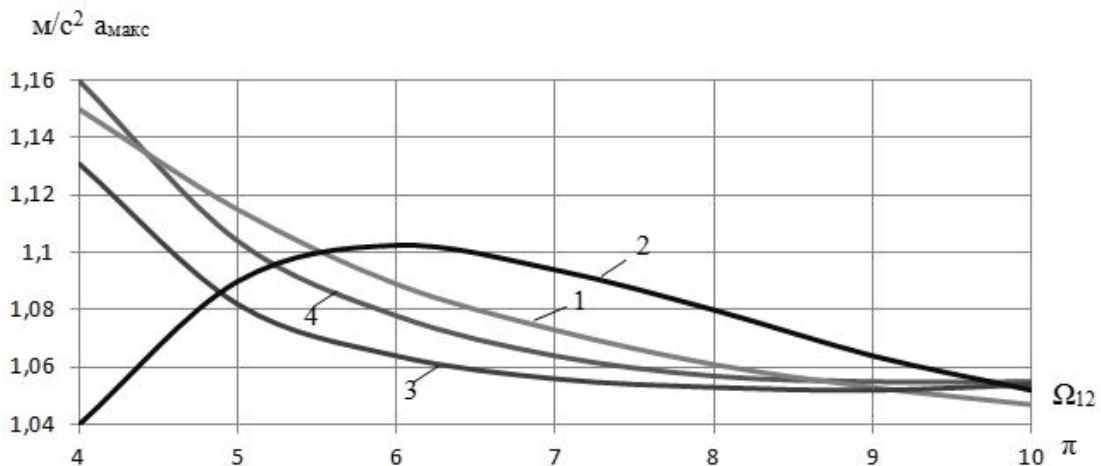


Рисунок 3 – Зависимость максимального ускорения кабины от частоты Ω_{12} при отработке заданного перемещения: 1 – $\gamma_{12} = 2,0$; $\gamma_{23}/\gamma_{12} = 1,25$; $\lambda = 1,0$; 2 – $\gamma_{12} = 2,0$; $\gamma_{23}/\gamma_{12} = 0,85$; $\lambda = 2,0$; 3 – $\gamma_{12} = 2,0$; $\gamma_{23}/\gamma_{12} = 0,85$; $\lambda = 0,5$; 4 – $\gamma_{12} = 3,0$; $\gamma_{23}/\gamma_{12} = 0,85$; $\lambda = 0,5$

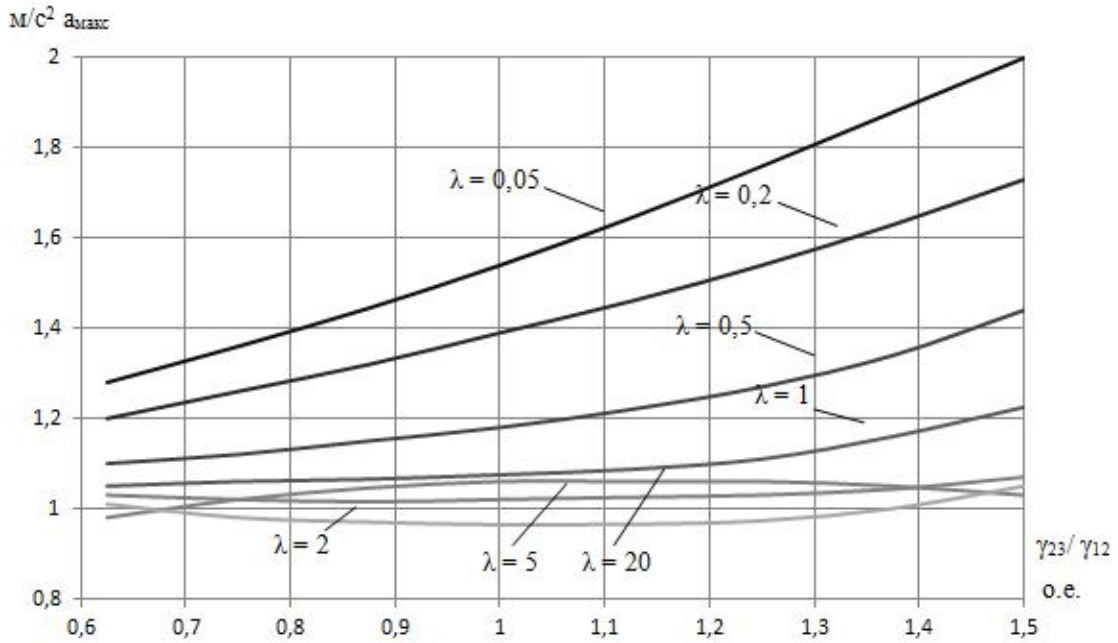


Рисунок 4 – Зависимость максимального ускорения от параметров подъемного механизма пассажирского лифта $\Omega_{12} = 4\pi$; $\gamma_{13} = 3$

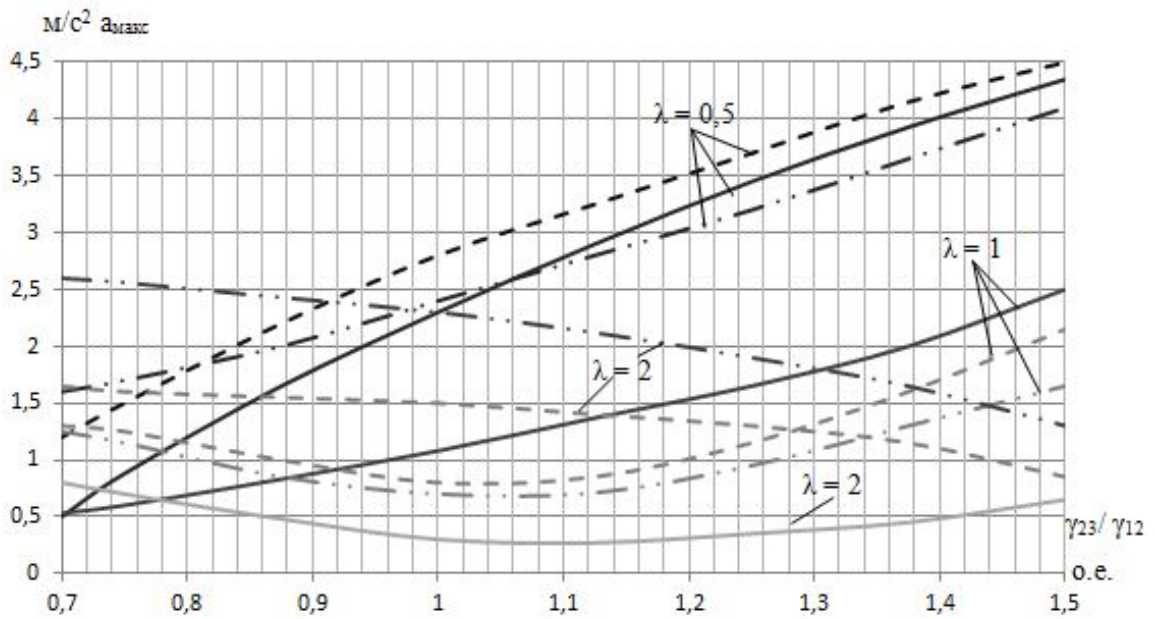


Рисунок 5 – Зависимость максимального ускорения от параметров подъемного механизма пассажирского лифта $\Omega_{12} = 4\pi$

— $\gamma_{12} = 2$; - - - $\gamma_{12} = 5$; — · · $\gamma_{13} = 10$

Учитывая выражения (3)–(6), соотношение

$$g = \Omega_d t = \tau \frac{V_n}{T_\delta a_n} = \tau \frac{t_A + t_B}{T_\delta}, \quad (18)$$

а также то, что в рассматриваемом случае $\Omega_\delta = \Omega_{01}$, решение уравнений (17) может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \bar{F}_{12} = & \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \left[k_2 + k_1 \frac{t}{t_A} \right] + \bar{F}_{C1} + \bar{F}_{g1} + \\ & + \bar{F}_m \left[\sin \left(\sqrt{1 - \xi^2} \Omega_{01} t + \bar{\Psi}' \right) \exp(-\xi \Omega_{01} t) \right]; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\bar{V} = \bar{V}_0 + k_2 + k_1 \frac{t}{t_A + t_B} + k_1 \frac{t^2}{2t_A(t_A + t_B)} - \frac{T_{01}}{t_A + t_B} \times$$

$$\times \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \bar{F}_m \times \left[\sin \left(\sqrt{1 - \xi^2} \Omega_{01} t + \bar{\Psi}' + \delta \right) \times \right. \quad (20)$$

$$\left. \times \exp(-\Omega_{01} t \xi) - \sin(\bar{\Psi}' + \delta) \right],$$

где

$$\bar{F}_m = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \sqrt{\frac{q_1^2 + q_2^2 - 2 \cos \delta q_1 q_2}{1 - \xi^2}}; \quad (21)$$

$$q_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \left[\bar{F}_{12_0} - \bar{F}_{g1} - \bar{F}_{C1} \right] - k_2; \quad (22)$$

$$q_2 = -\bar{V}_0 \frac{t_A + t_B}{T_{01}} - k_1 \frac{T_{01}}{t_A} + k_1 \frac{t_A + t_B}{T_{01}} + k_2 \frac{t_A}{T_{01}}; \quad (23)$$

$$\bar{\Psi}' = \arcsin \left(\frac{q_1}{\bar{F}_m} \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1} \right). \quad (24)$$

Таким образом, относительные искомые выражения, определяющие изменение ускорения и рывка кабины, имеют вид

$$\bar{a} = k_2 + k_1 \frac{t}{t_A} + \bar{F}_m \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1} +$$

$$+ \left[\sin(\sqrt{1 - \xi^2} \Omega_{01} t + \bar{\Psi}') \exp(-\xi \Omega_{01} t) \right]; \quad (25)$$

$$\bar{r} = k_1 - \bar{F}_m \left(\frac{t_A}{T_{01}} \right) \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1} \times$$

$$\times \left[-\sin(\bar{\Psi}' - \delta) + \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \Omega_{01} t + \bar{\Psi}' - \delta) \times \right. \quad (26)$$

$$\left. \times \exp(-\xi \Omega_{01} t) \right].$$

Построенные универсальные зависимости максимального ускорения кабины от параметров ветви «кабина–канатоведущий шкив» приведены на рис. 6.

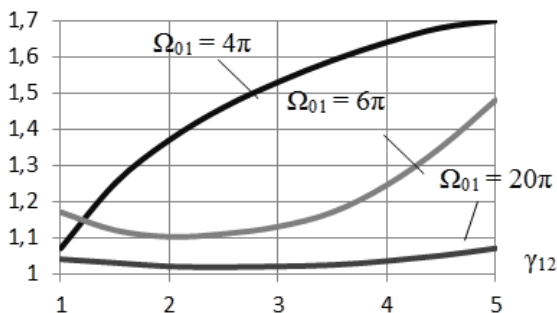


Рисунок 6 – Зависимости максимального ускорения от параметров коэффициента распределения масс «канатоведущий шкив–кабина» при отработке заданной скорости

ВЫВОДЫ. Полученные аналитические соотношения и графические зависимости, характеризующие влияние упругих свойств механических передач на движение лифтовых подъемных механизмов, универсальны. Они могут быть использованы в качестве аппарата

- для качественной и количественной оценки влияния упругих связей на любую диаграмму движения кабины произвольного пассажирского лифта;

- при синтезе нелинейных математических и физических моделей лифтовых электромеханических систем;

- при синтезе параметров и законов управления лифтовых электроприводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко А.А. Синтез и анализ диаграмм движения лифтовых подъемных механизмов // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. – Вип. 4/2013 (5). – Одеса: Бахва, 2013. – С. 83–91.
2. Janovsky L. Testing of Elevator Machines // Elevator Technology: 2: Proceedings of ELEVCON '88 by GBA Publications. – Karlsruhe, 1988. – PP. 32–38.
3. Андрющенко О.А., Бойко А.А. Повышение технического уровня пассажирских лифтов Украины, эволюция или революция? // Экономист. – 2011. – Вып. 8. – С. 75–79.
4. Борцов Ю.А., Бычков А.И. Влияние упругих звеньев и зазоров механических передач на работу промышленных установок и динамику электроприводов // Известия Ленинградского электротехнического института. – 1974. – Вып. 138. – С. 40–44.
5. Герасимьяк Р.П., Лещев В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем: учебное пособие. – Одесса: СМІЛ, 2008. – 192 с.
6. Jong J., Nakala H. The advantage of PMSM Elevator Tehnology in High Rise Building, Proccesing of Elevcon. – IAEE, 2000. – 284 p.
7. Архангельский Г.Г., Ионов А.А. Основы расчета и проектирования лифтов: учебное пособие. – М.: МИСИ, 1985. – 74 с.
8. Strakosch, G.R. Vertical transportation. – New-York: Welley, 1987. – 365 p.
9. Квартальная Б.В. Динамика электроприводов с упругими звеньями. – М.: Энергия, 1985. – 196 с.
10. Arhangelsky G.G. Current trends and prospects of lift business // Stroyprofil. – 2008. – Iss. 7. – PP. 94–96.

ACCOUNT OF INFLUENCE OF MECHANICAL TRANSFERS ELASTICITY
ON THE MOVEMENT OPTIMUM DIAGRAMS OF PASSENGER LIFTS

A. Boyko, N. Boyko, A. Besarab

Odessa National Polytechnical University

prosp. Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: dart77@ukr.net

Influence of elastic properties of lift mechanical transmissions results in difference of the actual chart of movement of a cabin from the required optimum chart. It has an adverse effect on quality of control of passenger lifts, violates conditions of comfortable moving of passengers, increase dynamic loads by lifting mechanisms. In article the search of analytical ratio and graphic dependences is executed, which characterize influence of elastic connections on movement parameters of elevating mechanisms. During the researches of properties and opportunities of lift electromechanical systems, their real kinematic diagrams were replaced with the appropriate estimated. The found universal dependences and ratios can be used for the quantitative impact assessment of elasticities on charts of movement of arbitrary passenger lifts, and also in case of synthesis of their parameters and laws of control of electric drives.

Key words: electric drive, passenger lift, diagrams of movement, mechanical transfers, multimass systems.

REFERENCES

1. Boyko, A.A. (2013), "Synthesis and analysis of the movement diagrams of lifts elevating mechanisms", *Informatsiyeni tekhnolohiyi v osviti, nauksi ta vyrobnytstvi: zbirnyk naukovykh prats*, Vol. 5, no. 4, pp. 83–91. (in Russian)
2. Janovsky, L. (1988), "Testing of Elevator Machines", *GBA Publications, Karlsruhe, Elevator Technology: Proceedings of ELEVCON '88*, pp. 32–38.
3. Andryushchenko, O.A. and Boyko, A.A. (2011), "Enhance the level of passenger elevators in Ukraine, evolution or revolution?" *The Economist*, no. 8, pp. 75–79. (in Russian)
4. Bortsov, Yu.A. and Bychkov, A.I. (1974), "Influence of elastic parts and backlashes of mechanical transfers on work of plants and dynamics of electric drive", *Izvestiya Leningradskogo elektrotekhnicheskogo instituta*, no. 138, pp. 40–44. (in Russian)
5. Gerasimyak, R.P. and Leshchev, V.A. (2008), *Analiz i syntez kranovykh elektromekhanichnykh sistem: uchebnoe posobyie* [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems: a tutorial], SMIL, Odessa. (in Russian)
6. Jong, J. and Hakala, H. (2000), "The advantage of PMSM Elevator Tehnology in High Rise Building", *Proccesing of Elevcon, IAEE*.
7. Arhangelsky, G.G. and Ionov, A.A. (1985), *Osnovy rascheta i proyektirovaniya liftov: uchebnoye posobyie* [Basis of calculation and design of elevators], MISI, Moscow. (in Russian)
8. Strakosch, G.R. (1987), *Vertical transportation*, Welley, New-York.
9. Kvartal'naya, B.V. (1985), *Dinamika elektroprivodov s uprugimi zvenyami* [Dynamics of electric drives with elastic parts], Energiya, Moscow. (in Russian)
10. Arhangelsky, G.G. (2008), "Current trends and prospects of lift business", *Stroyprofil*, no. 7, pp. 94–96.

Стаття надійшла 13.02.2015.