

УДК 692.66:62-83

Семенюк В.Ф., д.т.н.; Бойко А.А., к.т.н.; Акчебаш Н.В.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ДИАГРАММ ДВИЖЕНИЯ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПАССАЖИРСКИХ ЛИФТОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ

Стремление к обеспечению требуемой производительности и увеличение быстродействия лифтовых подъемных механизмов привело к тому, что на их работу стало оказывать влияние упругости трансмиссий и возникающие, вследствие этого, упругие механические колебания. Упругие механические колебания отрицательно сказываются на качестве управления, увеличивают динамические нагрузки на механизмы, способствуют накоплению усталостных напряжений в кинематических цепях, что приводит к преждевременным отказам и незапланированным простоям оборудования, возрастанию стоимости ремонтов и эксплуатации [1,2]. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что фактические нагрузки в элементах механизмов подъема лифтов различных конструкций превышают расчетные в 2 - 3 раза, что вызывает их дополнительный износ [3]. Все это обуславливает необходимость детального учета упругих свойств канатной передачи, как при аналитическом описании лифтовых электромеханических систем (ЭМС), так и при их математическом моделировании.

Как известно, для реализации оптимальной диаграммы движения кабины лифта (рис. 1) в жесткой системе, усилие, развиваемое двигателем, должно изменяться по закону [4]

$$k_1(m_1 + m_2 + m_3)r_H t + k_2(m_1 + m_2 + m_3)a_H + (m_1 - m_3)g \quad (1)$$

Однако при таком управлении в системе с упругими связями, диаграммы скорости, ускорения и рывка будет отличаться от оптимальных, описываемых уравнениями

$$v = k_1 \frac{r_H}{2} t^2 + k_2 a_H t + k_3 \frac{a_H^2}{2r_H} + k_H V_H, \quad (2)$$

$$a = k_3 r_H t + k_2 a_H, \quad (3)$$

$$r = k_1 r_H, \quad (4)$$

где $k_1 \dots k_4$ – переключающие функции для каждого из участков оптимальной диаграммы движения кабины (рис. 1).

Для нахождения фактических законов изменения этих величин в процессе движения кабины лифта с учетом упругой связи необходимо решить уравнения с учетом заданного закона (1) изменения усилия, развиваемого двигателем [5]

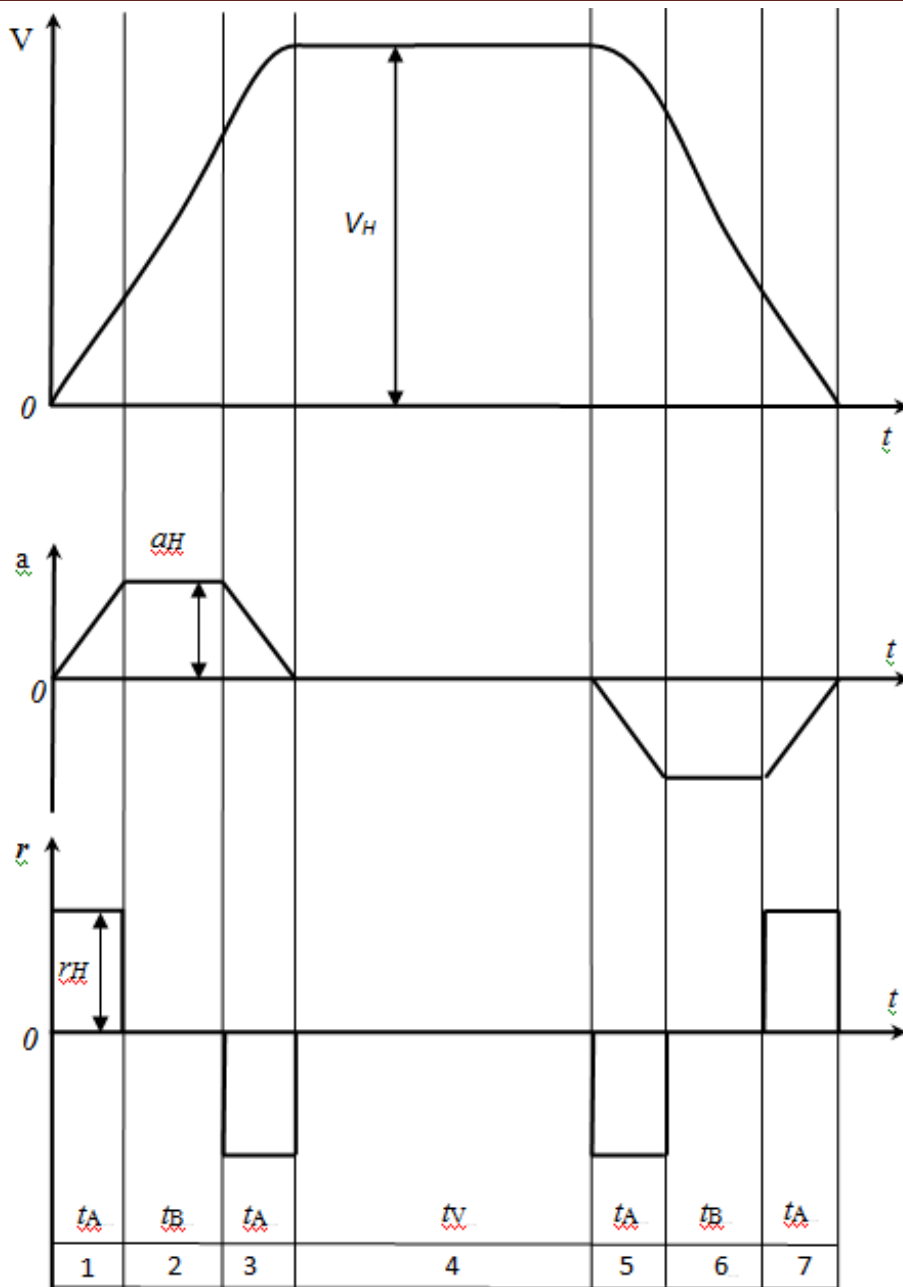


Рис.1. Оптимальная диаграмма движения кабины лифта

$$\left. \begin{aligned}
 m_1 \frac{dV}{dt} &= F_{12} - m_1 g - F_{C1}, \\
 (m_2 + m_3) \frac{dV_{кш}}{dt} &= F - F_{12} + m_3 g - F_{C3}, \\
 \frac{dF_{12}}{dt} &= c_{12}(V_{кш} - V) + c_{12} T_{12} \frac{d(V_{кш} - V)}{dt},
 \end{aligned} \right\} (5)$$

где $V_{\text{кш}} = \omega_{\text{кш}} R_{\text{кш}}$ – скорость на ободе канатоведущего шкива; $\omega_{\text{кш}}$ – угловая скорость канатоведущего шкива; F_{12} – усилие в упругом элементе ветви каната; $c_{12} = \frac{E_k S_k}{l_{12}}$ – жесткость ветви каната; l_{12} – длина ветви каната, зависящая от положения кабины лифта; E_k – модуль упругости каната; S_k – сечения каната; T_{12} – постоянная времени, учитывающая действие диссипативных сил.

Наиболее наглядное решение можно получить в относительных единицах, используя в качестве базовых максимальные величины скорости, ускорения и рывка, соответствующие оптимальной диаграмме (рис. 1)

$$\bar{V} = V/V_H, \tag{6}$$

$$\bar{a} = a/a_H, \tag{7}$$

$$\bar{r} = r/r_H, \tag{8}$$

В качестве базового усилия принимается избыточное усилие, обеспечивающее максимальное ускорение

$$\bar{F} = \frac{F}{(m_1 + m_2 + m_3) a_H}. \tag{9}$$

Однако, при аналитическом решении использование приведенных относительных единиц оказывается неудобным, поскольку сопряжено с появлением в уравнениях большого числа неединичных коэффициентов. Значительное упрощение аналитического решения может быть получено путем специального выбора базовых величин. При этом относительные величины скорости, рывка, ускорения и усилия определяются соотношениями [6]:

$$v = \frac{\bar{V}}{a_H T_\delta}, \tag{10}$$

$$\alpha = \frac{\bar{a}}{a_H}, \tag{11}$$

$$\rho = \frac{\bar{r} T_\delta}{a_H}, \tag{12}$$

$$\mu = \frac{\bar{F}}{m_1 a_H}, \tag{13}$$

где $T_\delta = 1/\Omega_\delta$ – базовая постоянная времени; Ω_δ – базовая частота, принимая равной частоте свободных колебаний упругой системы.

Связь между вышеприведенными двумя системами относительных единиц определяются соотношениями:

$$v = \bar{V} \left(\frac{V_H}{a_H T_\delta} \right) = \bar{V} \left[\frac{t_A + t_B}{T_\delta} \right], \tag{14}$$

$$\alpha = \bar{a}, \tag{15}$$

$$\rho = \bar{r} \left(\frac{T_\delta r_H}{a_H} \right) = \bar{r} \left(\frac{T_\delta}{t_A} \right), \tag{16}$$

$$\mu = \bar{F} [(m_1 + m_2 + m_3)/m_1], \tag{17}$$

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

Предлагается использование обеих вышеприведенных систем. При этом выбор тех или иных базовых величин определяется удобством и наглядностью решения конкретной задачи. Следует отметить, что определения фактических диаграмм движения кабины лифта в системах с упругими связями произведено без учета высокочастотных гармонических составляющих момента двигателя, наличия которых в реальном электроприводе обусловлено электромагнитными переходными процессами [7]. Правомерность такого допущения обусловлена тем, что полоса пропускания механизма подъема реального лифта, как правило, значительно меньше, чем частота упомянутых гармонических составляющих [7,8].

При рассмотрении лифта в виде упругой двухмассовой системы возможно найти аналитическое решение исходных уравнений (5). Однако, для облегчения математических выкладок оказывается целесообразным использовать относительные единицы.

Введя относительное время

$$v = \frac{t}{T_{\delta}} \quad (18)$$

и приняв в качестве базовой частоты частоту свободных колебаний двухмассовой упругой ЭМС [9]

$$\Omega_{\delta} = \sqrt{C_{12} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2+m_3} \right)} \quad (19)$$

уравнения (5) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{d\vartheta} &= \mu_{12} - \mu_{C1} - \mu_g, \\ \frac{dv_{\text{кш}}}{d\vartheta} &= \frac{m_2+m_3}{m_1+m_2+m_3} \left[\mu - \mu_{12} - \mu_{C3} + \frac{m_3}{m_1} \mu_g \right], \\ \frac{d\mu_{12}}{d\vartheta} &= \frac{m_2+m_3}{m_1+m_2+m_3} (v_{\text{кш}} - v) + 2\xi \frac{m_2+m_3}{m_1+m_2+m_3} \frac{d(v_{\text{кш}}-v)}{d\vartheta}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где

$$\mu_g = g/a_H, \quad (21)$$

$$\xi = \frac{T_{12}\Omega_{\delta}}{2}. \quad (22)$$

Относительная величина усилия развиваемого приводным двигателем, изменяется по закону

$$\mu = \frac{m_1+m_2+m_3}{m_1} \left[k_1 \frac{\vartheta}{\vartheta_A} + k_2 \right] + \frac{m_1-m_3}{m_1} \mu_g + \mu_{C1} + \mu_{C3}, \quad (23)$$

где относительная длительность первого участка оптимальной диаграммы [4].

$$\vartheta_A = \frac{a_H}{r_H} \frac{1}{T_{\delta}} = \frac{t_A}{T_{\delta}}. \quad (24)$$

Дифференцируя третье уравнение (20) по ϑ , с учетом (22) после преобразований

$$\frac{d^2\mu_{12}}{d\vartheta^2} + 2\xi \frac{d\mu_{12}}{d\vartheta} + \mu_{12} = k_1 \frac{\vartheta}{\vartheta_A} + k_2 + 2\xi \frac{k_1}{\vartheta_A} + \mu_{C1} + \mu_g. \quad (25)$$

Из (25) определяется закон изменения усилия μ_{12} :

$$\mu_{12} = [C_1 \cos(\sqrt{1 - \xi^2}\vartheta) + C_2 \sin(\sqrt{1 - \xi^2}\vartheta)] \exp(-\xi\vartheta) + k_3 + k_4 \frac{\vartheta}{\vartheta_A} + \mu_{C1} + \mu_g \quad (26)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из условий

$$\mu_{12}|_{\vartheta=0} = \mu_{12_0}, \quad (27)$$

$$\frac{d\mu_{12}}{d\vartheta}|_{\vartheta=0} = \frac{m_2+m_3}{m_1+m_2+m_3} (v_{кш0} + v_0) + 2\xi[k_3 - \mu_{12_0} - \mu_{C1} + \mu_g], \quad (28)$$

где μ_{12_0} , $v_{кш0}$, v_0 – значения переменных μ_{12} , $v_{кш}$, v в начале участка оптимальной диаграммы, равные величине этих переменных в конце предыдущего участка оптимальной диаграммы движения (рис. 1). В начале первого участка $v_{кш0} = 0$, $v_0 = 0$, $\mu_{12_0} = \mu_{C1} + \mu_g$.

После подстановки (25) в (26) и (27) определяются равенства

$$\mu_{12_0} = C_1 + k_2 + \mu_g + \mu_{C1},$$

$$\frac{m_2+m_3}{m_1+m_2+m_3} (v_{кш} - v_0) + 2\xi[k_2 - \mu_{12_0} - \mu_g + \mu_{C1}] = \frac{k_1}{\vartheta_A} - \xi C_1 \sqrt{1 - \xi^2} C_2 \quad (29)$$

после решения, которых находится выражения для определения μ_{12}

$$\mu_{12_0} = k_2 + k_1 \frac{\vartheta}{\vartheta_A} + \mu_g + \mu_{C1} + M_m [\sin(\sqrt{1 - \xi^2}) \exp(-\xi\vartheta)] \quad (30)$$

где

$$M_m = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 - 2 \cos \delta S_1 S_2}{1 - \xi^2}}, \quad (31)$$

$$\Psi = \arcsin\left(\frac{S_1}{M_m}\right), \quad (32)$$

$$S_1 = \mu_{12_0} - k_2 - \mu_g - \mu_{C1}, \quad (33)$$

$$S_2 = \frac{m_2+m_3}{m_1+m_2+m_3} (v_{кш0} - v_0) - \frac{k_1}{\vartheta_A}, \quad (34)$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}\right). \quad (35)$$

С учетом теоремы косинусов, можно утверждать, что при любых начальных условия подкоренное выражение (3.57) больше нуля [10]. Закон изменения скорости кабины лифта находится путем интегрирования выражения (30)

$$v = v_0 + k_2\vartheta + k_1 \frac{\vartheta^2}{2\vartheta_A} - M_m [\sin(\sqrt{1 - \xi^2}\vartheta + \Psi + \delta) \exp(-\xi\vartheta) - \sin(\Psi + \delta)]. \quad (36)$$

Аналогично находится закон изменения скорости канатоведущего шкива

$$v_{кш} = v_{кш0} + k_2\vartheta + k_1 \frac{\vartheta^2}{2\vartheta_A} - M_m [\sin(\sqrt{1 - \xi^2}\vartheta + \Psi + \delta) \exp(-\xi\vartheta) - \sin(\Psi + \delta)] \quad (37)$$

Относительное ускорение кабины лифта определяется

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{d\vartheta}, \quad (38)$$

$$\alpha = k_2 + k_1 \frac{\vartheta}{\vartheta_A} + M_m [\sin(\sqrt{1 - \xi^2} \vartheta + \Psi) \exp(-\xi \vartheta)]. \quad (39)$$

Закон изменения относительно рывка находится из уравнения

$$\rho = \frac{d\alpha}{d\vartheta}, \quad (40)$$

решение, которого имеет вид

$$\rho = \frac{k_1}{\vartheta_A} - M_m [\sin(\sqrt{1 - \xi^2} \vartheta + \Psi - \delta) \exp(-\xi \vartheta) - \sin(\Psi - \delta)] \quad (41)$$

закон изменения пути, проходимого кабиной лифта, определяется по соотношению

$$\varphi = \int_0^{\vartheta} dv, \quad (42)$$

где $\varphi = \frac{p}{a_H T_{\delta}^2}$ - путь, проходимый кабиной лифта.

Получено

$$\varphi = \varphi_0 + v_0 \vartheta + k_2 \frac{\vartheta^2}{2\vartheta_A} + k_1 \frac{\vartheta^3}{6\vartheta_A} + M_m [\sin(\sqrt{1 - \xi^2} \vartheta + \Psi + 2\delta) \exp(-\xi \vartheta) - \sin(\Psi + 2\delta)] \quad (43)$$

где φ_0 - путь, пройденный кабиной за время, предшествовавшее рассматриваемому участку оптимальной диаграммы (рис. 1). В начале движения (на начальном участке диаграммы) $\varphi_0 = 0$.

Расчетная диаграмма изменения скорости, ускорения и рывка кабины лифта, в качестве примера, представлена на рис. 2.

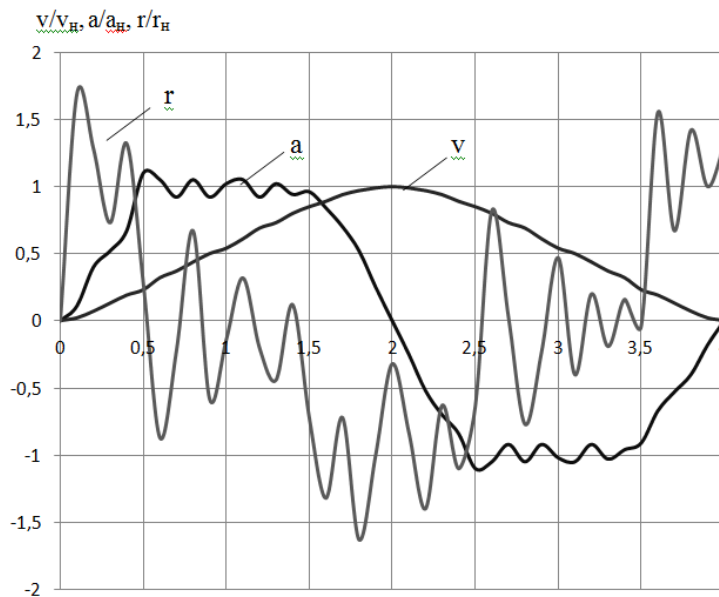


Рис. 2. Расчетные диаграммы параметров при движении кабины пассажирского лифта при номинальной нагрузке

$$\gamma_{12} = 3; \Omega_{12} = 4\pi; \lambda = 1$$

ВЫВОДЫ

Полученные математические соотношения, при любых заданных параметрах подъемного механизма лифта, позволяют, с учетом упругих свойств канатной передачи, рассчитать фактическую диаграмму движения кабины, определить максимальные значения скорости, ускорения и рывка, а тем самым оценить возможность управления лифтом по заданному закону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лифты. Учебник для вузов / под общей ред. Д. П. Волкова. - М.: АСВ, 1999.- 480 с.
2. Бондарев С.А. Лифты и подъемники. – М.: Машиностроение, 1965, 389 с.
3. Архангельский Г.Г., Овчинникова Ю. С. Исследование вибрации кабины лифта методом математического моделирования // Подъемно транспортное дело. 2010. № 5-6. С. 24-27
4. Бойко А.А. Синтез и анализ диаграмм движения лифтовых подъемных механизмов // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Збірник наукових праць. - Вип. 4(5) - Одеса: АО Бахва, 2013. - С. 83-91.
5. Дербенев Н. А. Динамические процессы двухмассовой электромеханической системы // Тр. управления кадров и учебных заведений - Выпуск 45. -1972. - С. 93-107.
6. Бойко А.А. Ограничение колебаний лифтовых подъемных механизмов за счет жесткости механической характеристики электропривода // ІХ Матеріали міжнародної науково - практичної конференції «Наука в інформаційному просторі» - Дніпропетровськ: «Біла» - 2013. – С. 20 – 23.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1998. -704 с.
8. Зубов В.И. Динамика управляемых систем. - М.: Высш. шк., 1982. - 284 с.
9. Динамика автоматизированного электропривода с упругой механической связью / В. И. Ключев, В. И. Яковлев, Л. Я. Теличко, А. М. Усманов, Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский // Электричество -1973.- № 1.- С. 40-46.
10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. - М.: Наука, 1986. - 544 с.

t
с