

УДК 692.66:62-83

Бойко А.А., к.т.н.

## **ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИФТОВЫХ ЛЕБЕДОК ТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ С ТИРИСТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

В настоящее время жилые и административные здания, преимущественно до 16-этажей, в Украине массово оборудованы лифтовыми лебедками традиционной конструкции с червячным редуктором, асинхронным двухскоростным электродвигателем (АД) и релейно-контактным управлением. Многолетний опыт их эксплуатации определил множество недостатков, которые вынуждают, искать пути повышения уровня надежности, улучшения динамических и энергетических характеристик традиционных лифтовых лебедок массового применения [1]. Широкие возможности по модернизации дает замена релейно-контакторных станций управления на тиристорные, в основе которых применяются бесконтактные тиристорные преобразователи переменного напряжения (ТПН), реализующие функции параметрического управления существующими двухскоростными асинхронными двигателями. Применение бесконтактного полупроводникового управления способствует не только повышению уровня надежности лифтов, но и позволяет получить улучшенные показатели комфортности по сравнению с релейно-контакторным управлением [2,3].

Рассмотрим динамику лифтовой лебедки с червячным редуктором, двухскоростным асинхронным двигателем и ТПН. Для этого целесообразно решить задачу реализации оптимального закона движения кабины, который должен обеспечивать ограничение ускорения и рывка [4]. Однако полностью реализовать этот закон трудно по ряду причин. Одна из важнейших причин состоит в том, что с целью достижения высокой экономической эффективности тиристорный электропривод целесообразно выполнять наиболее простым по структуре, а, следовательно, с ограниченными в смысле формирования динамических характеристик возможностями. В связи с этим следует ориентироваться не на оптимальный закон движения, а на близкий к оптимальному, который может быть получен при изменении момента АД во время пуска и замедления и с учетом необходимости ограничения величин ускорения и рывка, не превышающими  $1 \text{ м/с}^2$  и  $3 \text{ м/с}^3$ , соответственно [5].

Максимальное значение ускорения кабины при пуске может быть найдено [6]:

$$a_{\max} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\max} = \frac{D}{2i_p J} \left[ M_{\Pi} - a_1 \eta_H M_{IH} - (1 + v) \frac{V_H}{\omega_H} F_C \right] \leq 1,0, \quad (1)$$

где  $J$  – приведенный суммарный момент инерции;  $i_p$  – передаточное отношение редуктора;  $D$  – диаметр канатоведущего шкива лебедки;  $F_C$  – сила сопротивления со стороны поступательно движущихся частей подъемного механизма;  $a_1$  и  $v$  – коэффициенты постоянных и переменных потерь момента при передаче энергии, соответственно;  $M_I$  – номинальный момент на червяке;  $M_{\Pi}$  – пусковой момент АД;  $\omega$  – скорость вращения вала АД;  $V$  – линейная скорость кабины.

Максимальное значение замедления при остановке с учетом прямой передачи энергии через редуктор

$$a_{\max} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\max} = \frac{D}{2i_p J} \left[ M_T + a_1 \eta_H M_{IH} + (1 + v) \frac{V_H}{\omega_H} F_C \right] \leq 1,0, \quad (2)$$

а при обратной передаче энергии

$$a_{\max} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\max} = \frac{D}{2i_p J} \left[ M_T + \frac{a_{061}}{1 + v_{06}} M_{IH} + \frac{F_C}{1 + v_{06}} \cdot \frac{V_H}{\omega_H} \right] \leq 1,0. \quad (3)$$

Максимальное значение рывка следует ожидать при скачкообразном изменении ускоряющего или замедляющего момента [7]. Поэтому для ограничения максимального значения рывка момент необходимо изменять по нарастающей. Так при пуске в ход в случае изменения момента по выражению

$$M = M_{\Pi} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\Pi}}} \right), \quad (4)$$

где  $\tau_{\Pi}$  – постоянная времени пуска.

Максимальное значение рывка будет при  $t = t_3$ , когда  $\omega = 0$  [8], причем время запаздывания  $t_3$  может быть найдено из условия  $M = M_C$  (подъемный механизм расторможен), где момент АД изменяется по выражению (4), а  $M_C$  – по (5)

$$M_C = a \eta_H M_{IH} + (1 + v) F_C \frac{V_H}{\omega_H}, \quad (5)$$

$$t_3 = \tau_{\Pi} \ln \frac{M_{\Pi}}{M_{\Pi} - (a_1 + a_2) \eta_H M_{IH} - (1 + v) F_C \frac{V_H}{\omega_H}} \quad (6)$$

Подставляя, выражения (5) и (6) в уравнение движения кабины

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

с учетом замены  $e^{-\omega} \approx \omega$  и  $e^{-t/\tau_{\Pi}} \approx 1 - t/\tau_{\Pi}$ , определяется уравнение

$$J \frac{dV}{dt} - a_2 \eta_H M_{IH} c \omega = M_{\Pi} \frac{t}{\tau_{\Pi}} - (a_1 + a_2) \eta_H M_{IH} - (1 + v) \frac{V_H}{\omega_H} F_C, \quad (8)$$

решение которого имеет вид

$$\omega = \frac{1}{a_2 \eta_H M_{IH} c} \left[ \frac{J M_{II}}{\tau_{II} a_2 \eta_H M_{IH} c} - (a_1 + a_2) \eta_H M_{IH} - (1 + v) \frac{V_H}{\omega_H} F_C \right] x \times \left[ e^{p(t-t_3)} - 1 \right] + \frac{M_{II}}{\tau_{II} a_2 \eta_H M_{IH} c} \left[ t_3 e^{p(t-t_3)} - t \right], \quad (9)$$

где  $p = \frac{a_2 \eta_H M_{IH} c}{J}$ .

Дифференцируя это выражение дважды, учетом соответствующих замен, определяется максимальное значение рывка кабины при значении  $t_3$

$$r_{\max} = \left( \frac{d^2 V}{dt^2} \right)_{\max} = \frac{D}{2i_p} \left[ \frac{\frac{M_{II}}{\tau_{II} J} + \frac{a_2 \eta_H M_{IH} c M_{II}}{\tau_{II} J^2}}{(a_1 + a_2) \eta_H M_{IH} + (1 + v) \frac{V_H}{\omega_H} F_C} - \frac{V_H}{\omega_H} F_C \frac{a_2 \eta_H M_{IH} c}{J^2} \right] \quad (10)$$

Аналогичным путем можно найти максимальное значение рывка и в другие моменты времени цикла движения кабины. При этом главное влияние на величину рывка будет оказывать изменение момента двигателя. Расчет параметров динамических характеристик лифтовой системы с ТПН можно проиллюстрировать на примере исследуемого подъемного механизма пассажирского лифта, с параметрами приведенными в табл. 1. Общий вид лебедки изображен на рис. 1

Для случая пуска подъемного механизма, сила сопротивления  $F_C$  движению, принимая в среднем  $\mu = 0,12$ ;  $A_1 + B_1 = 0,2$  м;  $A_2 + B_2 = 2$  м и  $h = 2$  м; при подъеме кабины:  $F_C = 10,3 m_r - 720$ , Н; при спуске кабины:  $F_C = 2430 - 9,33 m_r$ , Н.

Для указанного значения прямого КПД:  $a = 0,22 + 0,72 e^{-0,048 \omega}$  и  $v = 0,1$ . Тогда в соответствии с (5), момент сопротивления  $M_C$ :

$$M_C = 5,9 + 0,0079 F_C + 18,7 e^{-0,048 \omega}, \text{ Нм}$$

Момент двигателя в начале пуска :  $M = 88,5 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{II}}} \right), \text{ Нм.}$

Суммарный момент инерции:

$$J = 0,977 + 0,566 \cdot 10^{-4} m_r, \text{ кгм}^2.$$

Максимальное значение ускорения:

Таблица 1. - Технические данные лифтовой установки

Наименование	Обознач	Ед. изм-я	Значени я
Номинальная скорость кабины	$V_H$	м/с	0,71
Номинальная скорость АД	$\omega_H$	Рад/с	99
Номинальный момент АД и червяка	$M_H; M_{IH}$	Нм	35,4
Пусковой момент	$M_{II}$	Нм	88,5
Передаточное отношение редуктора	$i_p$	о.е.	50
Диаметр шкива	$D$	м	0,77
Момент инерции ротора АД и муфты-маховика	$i_d + i_m$	кгм <sup>2</sup>	0,85
Момент инерции шкива	$i_{II}$	кгм <sup>2</sup>	100
Масса кабины	$m_K$	кг	650
Масса груза (номинальная)	$m_r$	кг	320
Масса противовеса	$m_{II}$	кг	810
Ном. прямой КПД редуктора	$\eta_H$	о.е.	0,732
Ном. обратный КПД редуктора	$\eta_{об.н}$	о.е.	0,625

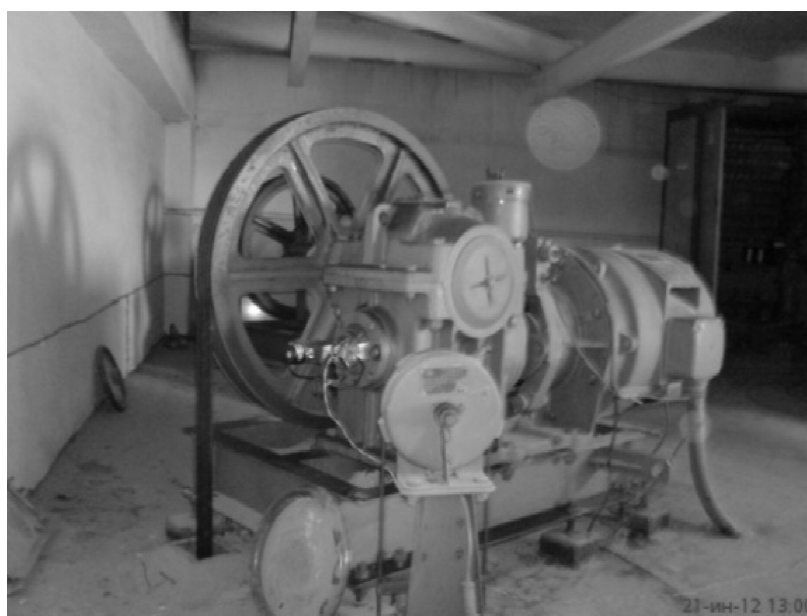


Рис. 1. Общий вид лифтовой лебедки традиционной конструкции

$$a_{\max} = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\max} = \frac{0,713 - 0,609 \cdot 10^{-4} F_c}{J}, \text{ м/с}^2.$$

Максимальное значение рывка:

$$r_{\max} = \left( \frac{d^2V}{dt^2} \right)_{\max} = \frac{0,682}{\tau_{\Pi} I} + \frac{0,612 t_3}{\tau_{\Pi} I^2} - \frac{0,172 + 0,547 \cdot 10^{-4} \cdot F_c}{I^2}, \text{ м/с}^3.$$

Время запаздывания пуска:

$$t_3 = \tau_{\Pi} I_n \frac{1}{0,723 - 0,805 \cdot 10^{-4} F_c}, \text{ с.}$$

Используя полученные выражения, рассчитываются основные параметры динамических характеристик, влияющие на условия комфортности движения кабины. Они приведены в табл. 2 - 4 и на рис.2

Таблица 2 - Максимальные значения ускорения кабины пассажирского лифта при пуске в зависимости от величины груза

Масса груза $m_r$ , кг	Максимальное ускорение кабины, $\text{м/с}^2$	
	при подъеме	при спуске
0	0,696	0,501
80	0,641	0,543
240	0,541	0,638
320	0,481	0,672

Таблица 3 - Основные параметры кабины пассажирского лифта при пуске в зависимости от величины груза

Масса груза $m_r$ , кг	Момент инерции системы $J$ , $\text{кгм}^2$	Сила сопротивления $F_c$ , Н	
		при подъеме кабины	при спуске кабины
0	0,977	-720	2430
80	0,981	105	1685
240	0,990	1760	190
320	0,995	2580	-550

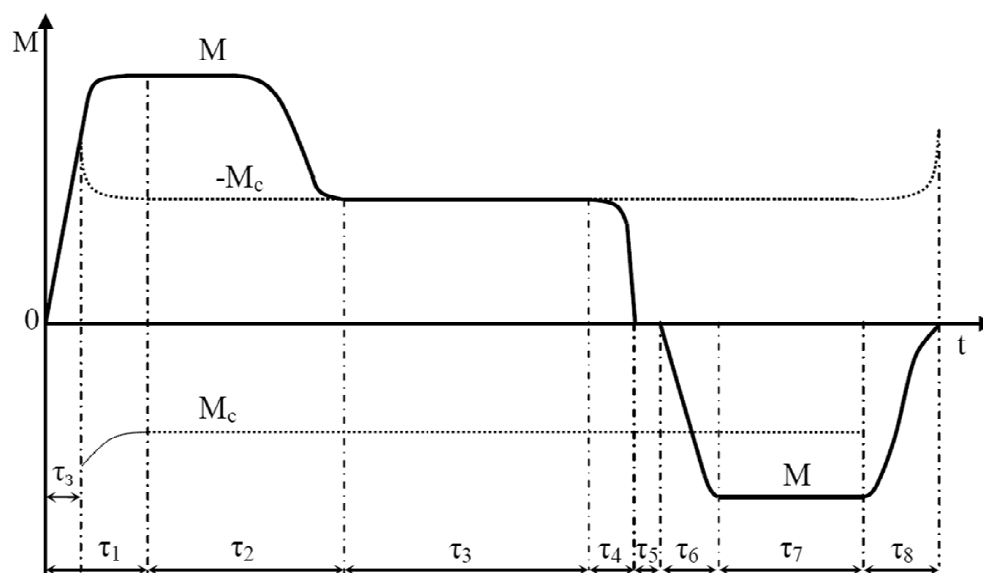


Рис. 2. Диаграмма изменения момента лебедки с червячным редуктором, АД с тиристорным управлением и момента сопротивления в течение времени цикла включения

Таблица 4 - Максимальные значения рывка и времени запаздывания, при пуске кабины пассажирского лифта в зависимости от величины груза и постоянной времени запаздывания пуска времени запаздывания пуска

Масса груза $m_r$ , кг	Постоянная времени $\tau_{п}$ , с	Подъем кабины		Спуск кабины	
		время запаздывания $t_3$ , с	$\Gamma_{max}$ , М/с <sup>3</sup>	время запаздывания $t_3$ , с	$\Gamma_{max}$ , М/с <sup>3</sup>
0	0,05	0,0124	4,21	0,0318	4,20
	0,10	0,0247	2,10	0,0635	2,13
	0,15	0,037	1,39	0,095	1,47
80	0,05	0,0168	4,18	0,0265	4,19
	0,10	0,0337	2,09	0,053	2,11
	0,15	0,0505	1,40	0,0795	1,41
240	0,05	0,0271	4,15	0,0172	4,14
	0,10	0,0542	2,09	0,0344	2,08
	0,15	0,0813	1,40	0,0516	1,40
320	0,05	0,0332	4,14	0,0131	4,12
	0,10	0,0663	2,08	0,0262	2,07
	0,15	0,099	1,40	0,0393	1,42

Таблица 5 - Максимальные значения ускорения кабины лифта при пуске в зависимости от величины груза

Масса груза $m_r$ , кг	Максимальное ускорение кабины, $m/c^2$	
	при подъеме	при спуске
0	0,696	0,501
80	0,641	0,543
240	0,541	0,638
320	0,481	0,672

### ВЫВОДЫ:

1. Максимальные значения ускорения при пуске кабины во всем диапазоне нагрузок значительно (вдвое) меньше максимально допустимых и сравнительно мало изменяются;

2. Использование тиристорного преобразователя позволяет обеспечить ограничение максимального значения рывка; для этого после включения двигателя лебедки его момент должен изменяться от нуля по закону экспоненты с постоянной времени  $\tau_{\Pi}$ ; рывок скорости будет в пределах допустимого, если постоянная времени пуска будет составлять  $\tau_{\Pi} < 0,08$  с;

3. Время запаздывания начала движения при  $0,08 < \tau_{\Pi} < 0,15$  с сравнительно невелико (не более 0,1 с), что, в целом, не отражается на производительности пассажирского лифта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Г.Г. Современные тенденции и перспективы развития лифтостроения // Стройпрофиль №7, 2008. - С. 94-96.
2. Масандилов Л.Б. Применение системы электропривода тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель для грузоподъемных машин // Электротехника. -1995. - №10. - С. 24-27.
3. Андрущенко О.А., Липатов Г.С., Семячкин А.Н. Асинхронный электропривод скоростного пассажирского лифта. // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1986. - Вып. 40. - С. 34.
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. Лифты. Учебник для вузов / под общей ред. Д. П. Волкова. - М.: изд-во АСВ, 1999. - 480 с

6. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Издательство МЭИ, 2003. - 224 с.

7. Андрущенко О.А, Бойко А.О., Акчешаш Н.В. Особливості математичного моделювання двохшвидкісного асинхронного електропривода пасажирського ліфту // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2013, Вип. 2 (41). - С 164 – 168.

8. Павлов Н.Г. Лифты и подъемники. М.: Машиностроение» , 1965. – 204 с.