

УДК 621.87 (075.8)

С.В. Бондарев канд.техн.наук, Ю.П. Горбатенко, О.В. Загора  
НТУ України «Київський політехнічний інститут», г. Киев, Украина

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПАССАЖИРСКОГО ЛИФТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАМНОЙ СИСТЕМЫ MATLAB

*В статті викладений підхід до моделювання електромеханічної системи пасажирського ліфта з канатоведучим шківом. Представлена динамічна модель ліфта. Складено рівняння руху елементів моделі. Визначені динамічні параметри елементів та виконані дослідження характерних перехідних процесів. Розроблені рекомендації по забезпеченню плавності руху кабіни.*

*In this article is an approach to modeling of electro-mechanical system of the passenger lift with rope driving pulley. The dynamic model by lift is presented. The equations of movement of elements of model are worked out. The dynamic parameters of element are determine and the investigation typical transition process is execute.*

Лифтовой парк в Украине, только в жилом фонде, составляет почти 96000 единиц. Из них треть машин отработали нормативный срок службы, значительное количество выведено из строя в результате преднамеренной порчи и разорения. Как следствие, остро стоит задача восстановления и модернизации лифтов, причем в массовом порядке. Подавляющее большинство машин, входящих в этот перечень, составляют лифты грузоподъемностью 400 кг, с приводом от двухскоростного короткозамкнутого электродвигателя с релейной системой управления. Оптимальной, с точки зрения расходования материальных средств и времени, выглядит такая схема замены и модернизации лифтовых установок, при которой строительная часть и основное оборудование в шахте (направляющие кабины и противовеса), вследствие их малого износа остаются, а заменяются (модернизируются) только кабина и приводное устройство. В зависимости от технического состояния модернизация и восстановление приводной установки может заключаться в замене канатоведущего шкива, восстановлении (замене) редуктора, замене электродвигателя на новый двухскоростной либо односкоростной с переходом на частотную систему управления. Однако, обязательным элементом этой схемы модернизации является замена старой модели кабины на новую – вандалозащищенную, с неподвижным полом и взвешивающим устройством, расположенным на верхней балке.

Изменения соотношений параметров электромеханической системы (ЭМС) лифтовой установки (масс, жесткостей, коэффициентов демпфирования и др.) должны быть с максимальной достоверностью оценены и отражены в настройках систем управления приводом – либо релейной, либо частотной. Применяемые в практике проектирования лифтов методики расчетов [1], [2] не позволяют в полном объеме решить эту задачу, т.к. в них не учтено упругодеформированное взаимодействие масс системы.

Целью данной работы является качественная и количественная оценка динамических процессов, происходящих в ЭМС лифта при пуске и торможении кабины и разработка рекомендаций по обеспечению плавности хода кабины в эти периоды.

Первым и важнейшим шагом на этом пути является динамическое моделирование, исследование и анализ переходных процессов в электромеханической системе лифта с канатоведущим шкивом.

Полученная в результате качественная и количественная оценка динамики пуска и торможения пассажирского лифта с канатоведущим шкивом при подъеме и опускании кабины используется для разработки рекомендаций по обеспечению плавности движения кабины в эти периоды.

## 1. Расчетная динамическая модель лифта и уравнения движения

При соблюдении условий отсутствия буксования расчетная динамическая модель лифта имеет вид крутильной системы, приведенной к валу двигателя (рис. 1).

Параметры системы:

$m_k=577\text{кг}$  – масса кабины;  $m_z=400\text{кг}$  – масса груза;  $m_{np}=777\text{кг}$  – масса противовеса;  $R_{ш}=0,255\text{м}$  – радиус канатоведущего шкива;  $u_p=40$  – передаточное отношение редуктора; момент инерции кабины и груза, приведенный к валу двигателя  $I_1 = (m_k + m_z)R_{ш}^2 / u_p^2 = 3,97 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент инерции противовеса, приведенный к валу двигателя  $I_3 = m_{np}R_{ш}^2 / u_p^2 = 3,16 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент инерции ротора двигателя  $I_p=0,125\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент инерции муфты с тормозным шкивом  $I_m=0,076\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент инерции маховика  $I_{max}=0,439 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; коэффициент, учитывающий моменты инерции вращающихся масс редуктора и шкивов  $\delta=1,15$ ; момент инерции лебедки, приведенный к валу двигателя  $I_2 = (I_p + I_m)\delta + I_{max} = 0,67\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$C_1 = n_k \frac{F_k E_k R_{ш}^2}{l_k u_p^2}$  – жесткость канатов подвески кабины, приведенная к крутильной на валу двигателя [1],

$C_1 = 9,274 H \cdot м / рад$  при положении кабины на 1-ом и  $C_1 = 149,32 H \cdot м / рад$  на 12-ом этаже, где  $F_k = 37,5 мм^2$  – площадь проволок каната,  $E_k = 0,97 \cdot 10^{11} H / м^2$  – модуль упругости для канатов,  $n_k = 3$  – количество канатов в подвеске,  $l_k = 47,97 м$  и  $l_k = 2,97 м$  – длина отвеса канатов подвески кабины, соответственно при ее положении на 1-ом и на 12-ом этаже.

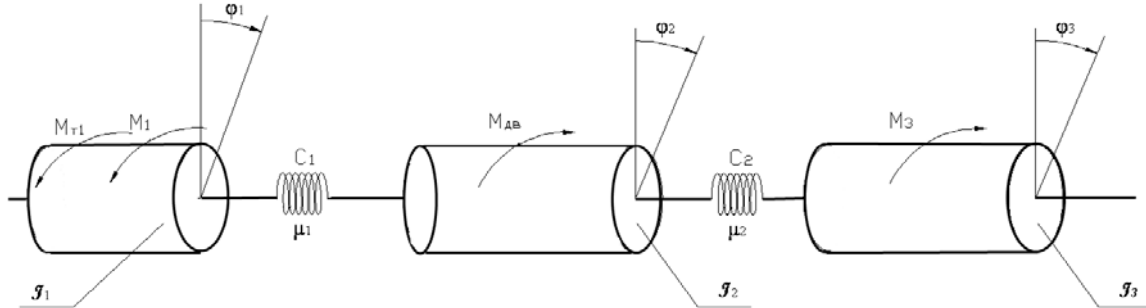


Рис. 1. Динамическая модель лифта

$C_2 = k_{л.пр} R_{ш}^2 / u_p^2$  – жесткость канатов и пружин подвески противовеса, приведенная к крутильной на валу двигателя, определяется для двух положений кабины на 12-ом и на 1-ом этажах:  $C_2 = 10,56 H \cdot м / рад$ ,  $C_2 = 5,527 H \cdot м / рад$ ; при этом линейная жесткость пружин подвески противовеса  $k_{пр} = n_{пр} \cdot k'_{пр} = 292890 H / м$ ,

линейная жесткость канатов подвески противовеса  $k_k = \frac{n_k F_k E_k}{l_k} = 3,31 \cdot 10^6 H / м$ ,  $k_k = 0,2548 \cdot 10^6 H / м$ , где

$n_{пр} = 3$  – количество пружин в подвеске,  $k'_{пр} = 97630 H / м$  – линейная жесткость одной пружины,  $l_k = 3,3 м$  – длина отвеса канатов подвески противовеса, когда кабина находится на 1-ом этаже,  $l_k = 48,3 м$  – длина отвеса канатов подвески

противовеса, когда кабина находится на 12-ом этаже. Линейная жесткость подвески противовеса  $k_{л.пр} = \frac{k_{пр} k_k}{k_{пр} + k_k}$ ;

если кабина находится на 1-ом этаже  $k_{л.пр} = 0,26 \cdot 10^6 H / м$ , если кабина находится на 12-ом этаже  $k_{л.пр} = 0,136 \cdot 10^6 H / м$ .

Коэффициенты демпфирования (рассеивания) колебаний в подвесках кабины  $\mu_1 = \frac{\psi \sqrt{I_1 C_1}}{2\pi}$  и противовеса

$\mu_2 = \frac{\psi \sqrt{I_3 C_2}}{2\pi}$ , где  $\psi = \frac{\Delta \Pi}{\Pi} = 2l_n \frac{a_i}{a_{i+1}}$  – относительное рассеивание энергии колебаний;  $\Delta \Pi$  – энергия

рассеиваемая системой за один цикл колебаний, Дж;  $\Pi$  – энергия системы, отвечающая амплитуде цикла колебаний, Дж;  $a_i$  – амплитуда  $i$ -го колебания;  $a_{i+1}$  – амплитуда  $i+1$ -го колебания.

Коэффициенты определялись для положений кабины на 1-ом и 12-ом этажах соответственно:  $\mu_1 = 5,98 \cdot 10^{-2} H \cdot м \cdot с / рад$ ,  $\mu_2 = 5,5 \cdot 10^{-2} H \cdot м \cdot с / рад$ ;  $\mu_1 = 0,2324 H \cdot м \cdot с / рад$ ;  $\mu_2 = 3,99 \cdot 10^{-2} H \cdot м \cdot с / рад$ .

Н.И.Григорьев [2] дает значение  $\psi$  для рассеяния энергии в канатах  $\psi = 0,4 \dots 0,6$ ; примем в расчетах  $\psi = 0,6$ .

Силы тяжести кабины, груза, противовеса отнесем к внешним силам, действующим на систему. Силу трения кабины в направляющих, также отнесем к внешним силам. Моменты крутящие, развиваемые двигателем или механическим тормозом отнесем к моментам внешних сил, действующих на систему. Трением в направляющих противовеса пренебрегаем.

Моменты, крутящие приведенные к валу двигателя:  $M_1 = (m_k + m_{зп}) g R_{ш} / u_p = 61,1 H \cdot м$  – от веса кабины и груза;  $M_{Т1} = 0,07 m_{зп} g R_{ш} / u_p = 1,75 H \cdot м$  – от силы трения кабины с грузом о направляющие;  $M_3 = m_{пр} g R_{ш} / u_p = 48,59 H \cdot м$  – от веса противовеса.

Для расчета режимов подъема кабины с грузом примем следующее правило знаков:  $\varphi_1 > 0$ ,  $\varphi_2 > 0$ ,  $\varphi_3 > 0$  – соответствуют режиму подъема кабины (соответственно режиму опускания противовеса),  $M_{дв} > 0$  – двигательный режим работы привода,  $M_{дв} = 0$  – двигатель вращается с синхронной угловой скоростью (или выключен),  $M_{дв} < 0$  – генераторный режим работы двигателя. Моменты от веса и сил трения направлены, как показано на рис. 1.

Уравнения движения тел системы:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 &= (C_1 \varphi_2 - C_1 \varphi_1 + \mu_1 \dot{\varphi}_2 - \mu_1 \dot{\varphi}_1 - M_1 - M_{Т1}) / I_1; \\ \ddot{\varphi}_2 &= (C_1 \varphi_1 - C_1 \varphi_2 - C_2 \varphi_2 + C_2 \varphi_3 + \mu_1 \dot{\varphi}_1 - \mu_1 \dot{\varphi}_2 - \mu_2 \dot{\varphi}_2 + \mu_2 \dot{\varphi}_3 + M_{дв}) / I_2; \end{aligned}$$

$$\ddot{\varphi}_3 = (C_2\varphi_2 - C_2\varphi_3 + \mu_2\dot{\varphi}_2 - \mu_2\dot{\varphi}_3 + M_3) / I_3.$$

При отключении двигателя лебедки включается механический колодочный тормоз, тогда вместо  $M_{об}$  во второе уравнение нужно подставить значение тормозного момента со знаком «минус».

Для расчета режимов опускания кабины с грузом примем следующее правило знаков:  $\varphi_1 > 0$ ,  $\varphi_2 > 0$ ,  $\varphi_3 > 0$  – соответствуют режиму спуска кабины (соответственно режиму подъема противовеса),  $M_{об} > 0$  – двигательный режим работы привода,  $M_{об} = 0$  – двигатель вращается с синхронной угловой скоростью (или выключен),  $M_{об} < 0$  – генераторный режим работы двигателя. В первом уравнении перед моментом  $M_1$  знак "-" нужно поменять на "+". В третьем уравнении перед моментом  $M_3$  знак "+" нужно поменять на "-".

## 2. Учет параметров приводного двигателя

В приводе лебедки лифта используется электродвигатель с короткозамкнутым ротором двухскоростной 4АМН160S6/18НЛБУЗ  $N=3/1$  кВт,  $n_0=1000/333$  об/мин.

Характеристика №1 (рис.2):  $N=3$  кВт,  $n_0=1000$  об/мин,  $\omega_0=104,7$  рад/с,  $n_n=950$  об/мин,  $\omega_n=99,48$  рад/с,  $M_n=78 \dots 94,5$  Н·м,  $M_{max}=M_k=86 \dots 108$  Н·м,  $M_n = \frac{N}{\omega_n} = 30,2$  Н·м, номинальное скольжение  $S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = 0,05$ .

Примем  $M_k=108$  Н·м при этом  $S_k=0,5$ .

Статическая характеристика двигателя описывается формулой Клосса  $M_{об} = \frac{2M_k}{S_k/S + S/S_k}$ , где  $S = \frac{\omega_0 - \dot{\varphi}_2}{\omega_0}$

- текущее скольжение двигателя,  $\dot{\varphi}_2$  - угловая скорость ротора двигателя, рад/с.

При  $|S| \leq 0,5$   $S_k$  наиболее точно переходные процессы в двигателе описываются уравнением динамической характеристики  $T_3 \dot{M}_{об} + M_{об} = \frac{2M_k}{S_k/S + S/S_k}$ , где  $T_3 = 1/\omega_c S_k = 0,0064$  с - электромагнитная постоянная времени двигателя;  $\omega_c = 2\pi f_c = 314,16$  рад/с - круговая частота сети;  $f_c$  - частота сети.

Поскольку при пусках и генераторных торможениях условие  $|S| \leq 0,5$   $S_k$  не соблюдается и кроме того постоянная времени двигателя очень мала, положим  $T_3 \dot{M}_{об} \approx 0$  и для анализа переходных процессов в системе лифта используем характеристику двигателя по формуле Клосса [3].

Уравнение характеристики №1  $M_{об} = 1,0315(104,7 - \dot{\varphi}_2) / (0,25 + (1 - \dot{\varphi}_2 / 104,7)^2)$  достаточно точно описывает характеристику двигателя. Ошибка - номинальное скольжение не 5%, а 7% в пределах точности моделирования.

Характеристика двигателя №2  $N=1$  кВт,  $n_0=333$  об/мин;  $\omega_0=34,87$  рад/с;  $n_n=280$  об/мин;  $\omega_n=29,32$  рад/с; номинальное скольжение  $S_n = 0,159$ ;  $M_n \geq 63,5$  Н·м;  $M_{max} \geq 63,5$  Н·м; наибольший момент в режиме генераторного торможения  $M_{max.ген} = -(86 \dots 108)$  Н·м; номинальный момент двигателя  $M_n = 34$  Н·м.

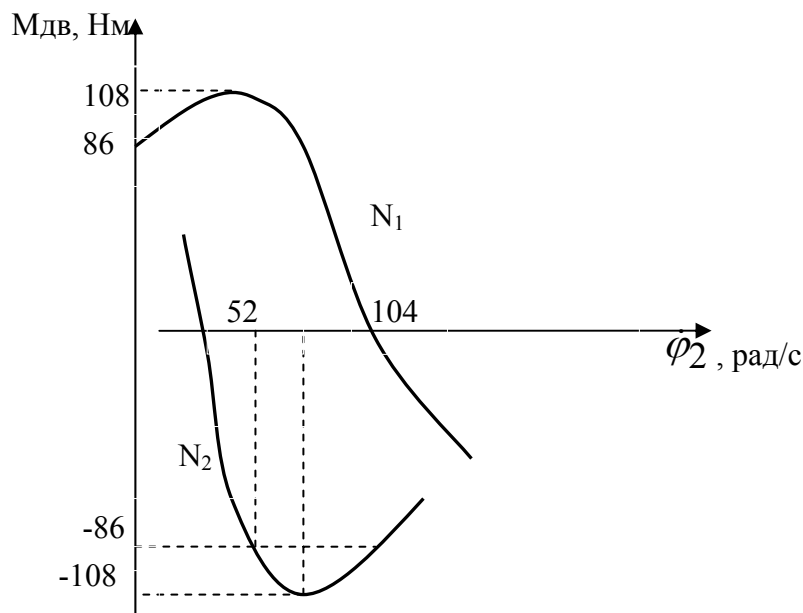


Рис. 2. Статическая характеристика двухскоростного двигателя 4АМН160S6/18НЛБУЗ.

Примем наибольший момент в режиме генераторного торможения  $M_{max} = -108$  Н·м, при этом скольжение составляет  $S = -0,985$ .

Уравнение характеристики №2  $M_{об} = 6,1(34,87 - \dot{\phi}_2) / (0,97 + (1 - \dot{\phi}_2 / 34,87)^2)$ . Характеристики двигателя №1 и №2 показаны на рис.2.

При анализе режимов пуска привода, производится интегрирование системы уравнений движения совместно с уравнением характеристики двигателя №1. При анализе режимов генераторного торможения привода производится интегрирование системы уравнений движения совместно с уравнением характеристики двигателя №2. При анализе режимов механического торможения уравнения характеристики двигателя не используются, момент двигателя во втором уравнении заменяется тормозным моментом, создаваемым механическим тормозом [4].

Исходные данные для численного решения задачи (кроме указанных ранее): собственная частота колебаний кабины с грузом на длинной подвеске на уровне 1-2 этажа  $f_1=2,43Гц$ ; период колебаний  $T_1=0,4с$ ; собственная частота колебаний кабины на короткой подвеске на уровне 11-12 этажа  $f_2=6,5Гц$ ; период колебаний  $T_2=0,154с$ ; собственная частота колебаний противовеса на короткой подвеске (кабина на уровне 1-2 этажа)  $f_2=2,91Гц$ ;  $T_2=0,34с$ ; собственная частота колебаний противовеса на длинной подвеске (кабина на уровне 11-12 этажа)  $f_2=2,1Гц$ ;  $T_2=0,475с$ ; скорость кабины  $v = 0,75 м/с$ .

Имеющейся баланс инерционных показателей ( $I_2/I_1 = 16,88$  и  $I_2/I_3 = 21,2$ ) объясняет тот факт, что при процессах, как пуска, так и торможения скорость и момент электродвигателя не содержат вибрационных компонент с приведенными выше частотами. Кроме того, отсутствует взаимное влияние колебаний противовеса на колебания кабины и наоборот.

### 3. Интегрирование уравнений движения тел динамической системы лифта

Для численного решения уравнения движения тел системы используется приложение к системе MatLab, пакет Simulink. В качестве примера показана схема, моделирующая уравнение движение тел при пуске (рис.3) и графики изменения кинематических и силовых параметров (рис. 4., 5).

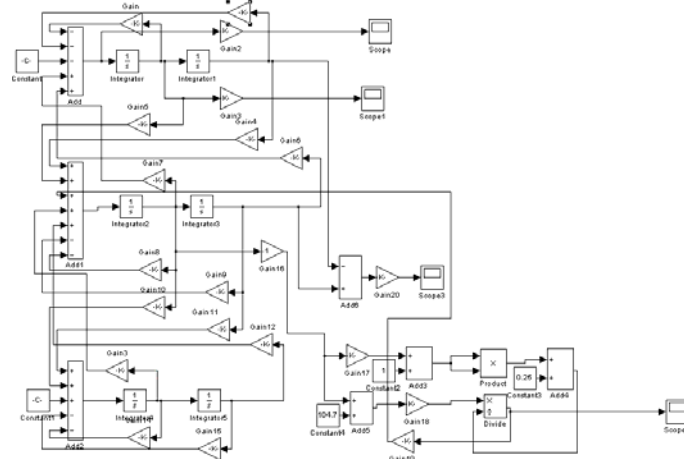


Рис. 3. Схема, моделирующая пуск лифта

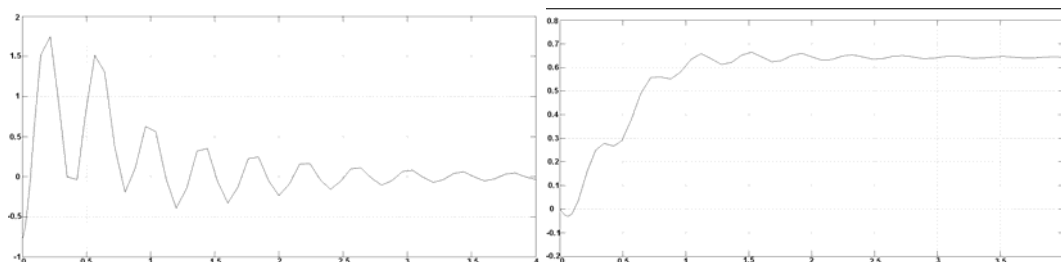


Рис. 4. Ускорение и скорость кабины при пуске на подъем с 1-го на 2-й этаж

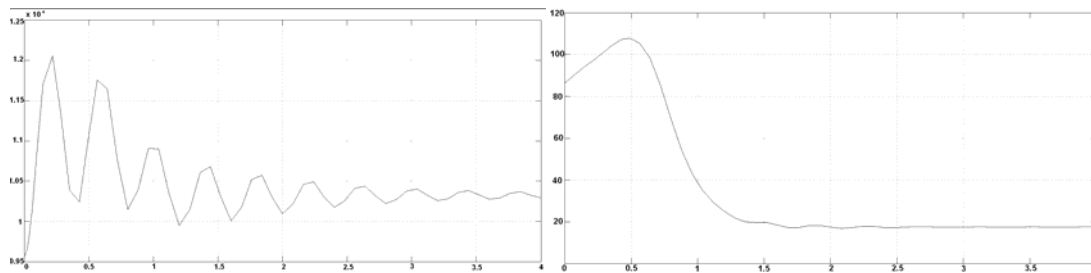


Рис. 5. Усилия в канатах и момент на валу двигателя при пуске на подъем с 1-го на 2-й этаж

### 4. Пусковые процессы лифта

Расчет процессов пуска лифта выполнен при длинной подвеске кабины вверх с 1-го этажа, вниз со 2-го этажа и при короткой подвеске кабины вверх с 11-го этажа, вниз с 12-го этажа. Расчет процессов генераторного торможения лифта при длинной подвеске кабины вверх перед 2-м этажом, вниз перед 1-м этажом и при короткой

подвеске кабины вверх перед 12-м этажом, вниз перед 11-м этажом. Ускорение кабины при пуске на подъем и опускание как на длинной, так и на короткой подвеске носят явно выраженный колебательный характер (рис. 4., табл.1) и изменяются в широком диапазоне. Максимальное и среднее ускорение при пуске кабины на подъем и опускание выше допустимых; допустимое значение  $a \leq 0,65 \text{ м/с}^2$  при скорости  $0,75 \text{ м/с}$ .

Характеристики электромеханической системы лифта

1	2	$t, \text{ с}$	$a_{\text{max}}, \text{ м/с}^2$	$a_{\text{min}}, \text{ м/с}^2$	$a_{\text{cp}}, \text{ м/с}^2$	Путь, $S, \text{ м}$
Пуск при подъеме	на длинной подвеске	1,2	1,47	0,17	0,82	0,47
	на короткой подвеске	1,2	1,43	0,24	0,83	0,47
Пуск при опускании	на длинной подвеске	1,0	1,88	0,3	1,09	0,42
	на короткой подвеске	1,0	1,85	0,1	0,975	0,42
Генераторное торможение при подъеме при подходе:	к 2-му этажу	0,72	-1,73	-0,267	-0,999	0,26
	к 12-му этажу	0,72	-1,73	-0,40	-1,065	0,26
Генераторное торможение при опускании при подходе:	к 1-му этажу	0,72	-1,17	-0,5	-0,835	0,32
	к 11-му этажу	0,72	-1,23	-0,25	-0,74	0,32
Механическое торможение при подъеме $M_T=42 \text{ Н}\cdot\text{м}$	к 2-му и 12-му этажам	0,45	-0,904	-0,149	-0,53	0,048
Механическое торможение $M_T=42 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при опускании и подходе	к 1-му и 11-му этажам	0,88	-0,548	-0,042	-0,30	0,102
Механическое торможение $M_T=60 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при подъеме и подходе	к 2-му и 12-му этажам	0,34	-1,207	-0,157	-0,68	0,036
Механическое торможение $M_T=60 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при опускании и подходе	к 1-му и 11-му этажам	0,56	-0,831	-0,093	-0,46	0,067

#### Выводы

1. Исследования электромеханической системы лифта показали, что ускорение кабины при всех переходных режимах носят явно выраженный колебательный характер.

2. Существенно снизить ускорения и колебание ускорений кабины при пуске и генераторном торможении возможно путем создания плавного нарастания пускового момента короткозамкнутым электродвигателем с частотным регулированием, а не за счет увеличения момента инерции вращающейся массы маховика, посаженного на вал двигателя.

3. Применение электродвигателя с частотным регулированием позволит минимизировать величину момента инерции маховика и тем самым существенно улучшить параметры механического торможения, т.е. снизить ускорения и их колебательный характер.

4. Расчетное значение общего пути движения кабины с 5-ю пассажирами при торможении: при подъеме составляет  $S_0=0,682 \text{ м}$ , при этом время движения  $t_0=2,91 \text{ с}$ ; при опускании –  $S_0=0,785 \text{ м}$ , время движения  $t_0=3,36 \text{ с}$ .

С учетом уточненного расчета общий путь движения кабины с номинальным грузом при торможении: при подъеме составляет  $S_0=0,646 \text{ м}$ , время движения  $t_0=2,95 \text{ с}$ ; при опускании -  $S_0=0,81 \text{ м}$ , время движения  $t_0=3,64 \text{ с}$ .

5. Расчеты показывают, что давление между канатом и канатоведущим шкивом составляет  $10,4 \text{ МПа}$ , что превышает допустимое давление  $[p]=6,5 \text{ МПа}$ .

6. В процессе эксплуатации канатоведущего шкива по мере износа ручья его профиль приобретает круглую форму с углом подреза  $\beta = 89^\circ$ , при котором приведенный коэффициент трения составляет  $\mu = 0,171$ . При таком коэффициенте трения канатоведущий шкив при пуске может проскальзывать относительно подъемных канатов, что недопустимо.

7. Предлагается к разработке пассажирский лифт грузоподъемностью 400 кг с приводом, оборудованным электродвигателем с короткозамкнутым ротором с частотным регулированием, имеющим канатоведущий шкив диаметром приблизительно 870 мм, при котором обеспечивается допустимое давление между канатом и шкивом. В новом пассажирском лифте будут обеспечены плавный пуск и торможение кабины, благодаря чему улучшится комфортность пассажиров.

8. Для уточнения расчетных параметров целесообразно провести промышленные испытания лифта с измерением основных его параметров в условиях реальной эксплуатации.

#### Список литературы

1. Федорова З.М., Лукин И.Ф., Нестеров А.П. Подъемники. – К.: Вища школа. Головне издательство, 1976.
2. Григорьев Н.И. Нагрузки кранов. – М. – Л.: Машиностроение, 1964.
3. Справочник по электрическим машинам. В 2 т./Под ред. И.П.Копылова, Б.К.Клокова. – М: Энергоатомиздат, 1988– т1-2
4. Бондарев В.С., Дубинець О.І., Колісник М.П., Бондарев С.В., Горбатенко Ю.П., Барабанов В.Я. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підймальних і транспортувальних машин. К.: Вища школа, 2009.