

М. Ю. Попов, канд. техн. наук, доц.; Р. В. Федяев
ГОУ ВПО «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Томск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ТОРМОЗНОЙ СИЛЫ ЛИФТОВЫХ ЛОВИТЕЛЕЙ ПЛАВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В данной статье предложена методика моделирования тормозной силы лифтовых ловителей плавного торможения. Предложенная методика позволяет на стадии проектирования ловителей, исследовать и формировать их тормозное усилие, тем самым снижая динамические нагрузки, возникающие в процессе торможения кабины лифта или подъёмника.

Ловители лифтов должны останавливать и удерживать на направляющих движущуюся вниз кабину (противовес) при их включении от действия ограничителя скорости [1].

По принципу работы ловители представляют собой разновидность линейного колодочного тормоза, давление на колодку в котором создаётся эффектом самозаклинивания.

Ловители плавного торможения в своей конструкции имеют устройство, ограничивающее силу нормального давления на тормозные колодки с гладкой рабочей поверхностью. Тормозная сила таких ловителей на всем пути замедления сохраняет обычно постоянное значение, определяемое конструкцией или регулировкой [3].

Ограничение силы нормального давления до установленного уровня достигается применением предварительно сжатой пружины или упруго-деформируемого элемента конструкции.

Применяемые ловители плавного торможения имеют различные конструкции, однако, ни одна из них не является совершенной [2]. Ловители клещевого типа, вследствие конструктивных недостатков, не обеспечивают стабильных путей торможения кабины. При нескольких последовательных посадках на ловители, разброс по разнице путей торможения может достигать 1-2 м, что может приводить к перегрузкам. Также клещевые ловители неудовлетворительно реагируют на нестабильность толщины головки направляющей, ее волнистость, отклонение от плоскостности, погрешности монтажа.

Тормозное усилие ловителей плавного торможения всегда переменное по времени [2].

Современные методы расчёта лифтовых ловителей сводятся к получению значения необходимой тормозной силы при известных значениях

улавливаемой массы и скорости движения. Уравнение энергии движения кабины (противовеса) при посадке на ловители [3]

$$\frac{m_{\text{л}} \cdot V_{\text{н}}^2}{2} + m_{\text{л}} \cdot g \cdot S_{\text{T}} = K \cdot R \cdot S_{\text{T}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{л}}$ – улавливаемая масса кабины (противовеса), кг; $V_{\text{н}}$ – начальная скорость включения ловителей, м/с; R – тормозная сила ловителей, Н; V – скорость движения кабины (противовеса), м/с; S_{T} – путь торможения кабины (противовеса), м; g – ускорение свободного падения, м/с²; K – коэффициент учитывающий зависимость тормозной силы от пути торможения ($K=0,5$ – при линейном законе нарастания тормозной силы, $K=1$ – при постоянной величине тормозной силы).

Из уравнения энергии определяется формула расчета тормозной силы

$$R = \frac{m_{\text{л}}}{K} \cdot \left(g + \frac{V_{\text{н}}^2}{2 \cdot S_{\text{T}}} \right),$$

и пути торможения кабины (противовеса)

$$S_{\text{T}} = \frac{m_{\text{л}} \cdot V_{\text{н}}^2}{2(K \cdot R - m \cdot g)}. \quad (2)$$

Ускорение замедления при этом будет определяться тормозной силой ловителей

$$a = \frac{R - m \cdot g}{m}. \quad (3)$$

Однако процесс торможения занимает некоторое время. В течение этого времени тормозная сила изменяется от нуля до своего максимального значения.

Выкопировки из осциллограмм кинематических параметров торможения кабин пассажирских лифтов [2] показывают, что тренды ускорений при посадке на ловители плавного торможения не являются линейными. Это значит, что и силы тормозящие кабину также изменяются не линейно и не являются константой с какого-то момента после начала торможения и до его окончания. Существующие же методы расчёта дают только максимальное значение требуемой тормозной силы R и длины пути торможения кабины S_{T} .

При сертификации лифтов необходимо проводить испытания устройств безопасности. При испытании ловителей среди прочей информации необходимо иметь график нагрузки на упругие элементы ловителей и формулы, или графики показывающие изменение усилия торможения, как функцию установленного параметра для ловителей плавного торможения, рассчитанных на улавливание различных масс [1, 4]. Усилие торможения, развиваемое ловителями при использовании направляющих одного типа, определяется как средняя величина средних усилий торможения, определённых в процессе проведения испытаний. Усилие торможения, развиваемое

мое ловителями со ступенчатым или плавным регулированием, определяется соответственно для минимальной и максимальной улавливаемых масс [1]. То есть так же принимаются равными постоянной величине.

Современные высокоскоростные лифты движутся со скоростями 7–12 м/с. Масса улавливаемая ловителями, составляет 5000 – 10000 кг. Кинетическая энергия движущейся кабины должна быть погашена в течение 1–4 с. При этом тормозной путь кабины не должен превышать 15–20 м. При создании ловителей, которые удовлетворяли бы указанным условиям, изменение тормозной силы с момента начала торможения и до его окончания - должно учитываться.

Необходимо иметь функцию силы нормального давления ловителей $R=f(t)$ на направляющую. Имея такую зависимость можно получить функции суммарной энергии движущейся кабины $E=f(R)$, скорости $V=f(E)$, ускорения $A=f(V)$ и пути торможения кабины $S=f(V,A)$.

Если существующую формулу (1) преобразовать к следующему виду

$$E_{i+1} = \left(\frac{m_{\text{Л}} \cdot V_i^2}{2} + m_{\text{Л}} \cdot g \cdot S_i \right) - V_i \cdot R_i \cdot \varphi \cdot dt,$$

где E_i – суммарная энергия движущейся кабины на i – временном интервале, Дж; V_i – скорость кабины на i – временном интервале, м/с; S_i – путь пройденный кабиной на i – временном интервале, м; R_i – сила нормального давления на тормозную колодку, Н; φ – коэффициент трения между колодкой и направляющей, то при достаточно малом значении dt и заданной функции $R=f(t)$ можно получить зависимости $E=f(t)$, $V=f(t)$, $A=f(t)$, $S=f(t)$.

$$V_{i+1} = \sqrt{2 \cdot \frac{E_{i+1}}{m_{\text{Л}}}};$$

$$A_{i+1} = \frac{V_{i+1} - V_i}{dt};$$

$$S_{i+1} = S_i + \left(V_{i+1} \cdot dt + \frac{A_{i+1} \cdot dt^2}{2} \right).$$

Однако путь торможения S_i последовательно вычисляется из уравнения (3) и будет вычислен на первом шаге итерации. Поэтому приращение пути торможения S_i необходимо выразить через известные на нулевом шаге итерации E_i и V_i , тогда

$$S_i = \left(V_i \cdot dt + \frac{A_i \cdot dt^2}{2} \right);$$

$$S_i = \left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_i}{m_{\text{Л}}}} \cdot dt + \frac{\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_i}{m_{\text{Л}}}} - \sqrt{2 \cdot \frac{E_{i-1}}{m_{\text{Л}}}} \right) \cdot dt^2}{2 \cdot dt} \right).$$

Окончательно уравнение энергии тормозящей кабины запишется как

$$E_{i+1} = \left(\frac{m_{\text{Л}} \cdot V_i^2}{2} + m_{\text{Л}} \cdot g \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_i}{m_{\text{Л}}}} \cdot dt + \frac{\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_i}{m_{\text{Л}}}} - \sqrt{2 \cdot \frac{E_{i-1}}{m_{\text{Л}}}} \right) \cdot dt}{2} \right) \right) - n \cdot V_i \cdot R_i \cdot \varphi \cdot dt, \quad (4)$$

где n – количество трущихся поверхностей.

Процесс трения рабочих элементов ловителей по направляющей (металл по металлу) является нестабильным и зависит от множества факторов, главным из которых является температура в зоне контакта трущихся поверхностей. Так же значение коэффициента трения, принимаемого при расчёте тормозного усилия ловителей, определено приблизительно и переменено во время всего процесса. При моделировании процесса торможения кабины лифтовыми ловителями это явление также требует обязательного учёта.

Согласно исследованиям И.В. Крагельского при больших давлениях с увеличением скорости скольжения коэффициент трения падает. Нагревание поверхностных слоёв меняет свойства материалов: их жесткость уменьшается, а площадь касания увеличивается. Поэтому среднее значение фактического удельного давления уменьшается, коэффициент трения падает. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения для различных нормальных давлений приведена на рисунке 1.

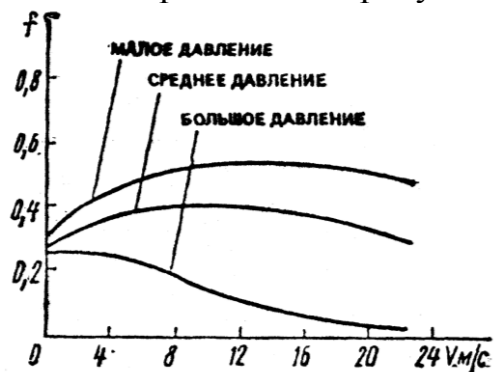


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения для различных нормальных давлений (для стали) [2]

Если представить полиномом зависимость коэффициента трения от скорости скольжения и силы нормального давления в виде функции $\varphi=f(V,R)$, то уравнение (4) можно представить в виде

$$E_{i+1} = \left(\frac{m_{\text{Л}} \cdot V_i^2}{2} + m_{\text{Л}} \cdot g \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_i}{m_{\text{Л}}}} \cdot dt + \frac{\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_i}{m_{\text{Л}}}} - \sqrt{2 \cdot \frac{E_{i-1}}{m_{\text{Л}}}} \right) \cdot dt}{2} \right) \right) - n \cdot V_i \cdot R_i \cdot f(V,R) \cdot dt. \quad (5)$$

Представленные на рис. 2 графики ускорения замедления и пути торможения кабины в зависимости от времени, получены моделированием по формуле (5). Исходные данные: масса улавливаемого груза $M=1000\text{кг}$; сила нормального давления колодки на клин $R=1200\text{ кг}$, является постоянной со второго шага расчёта; скорость при которой сработали ловители $V=2,5\text{ м/с}$; количество трущихся поверхностей $n=4$. Расчёт коэффициента

трения принимался по зависимости на рисунке 1, для большого давления. Из графиков видно, что максимальное ускорение замедления $A=9,1 \text{ м/с}^2$, а путь торможения кабины $S=0,631 \text{ м}$.

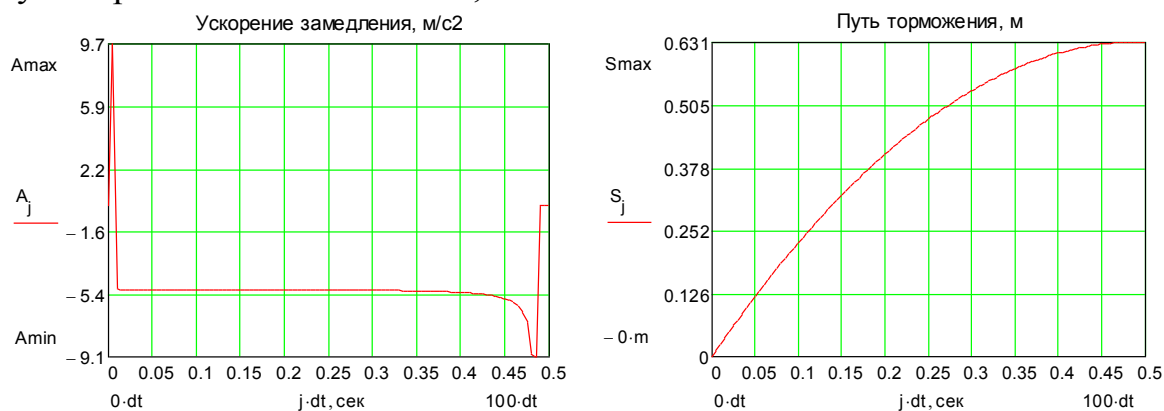


Рис. 2. Графики ускорения замедления и пути торможения кабины в зависимости от времени

При заданных условиях значение пути торможения полученное по формуле (2) составило $S_T=0,638 \text{ м}$, а ускорение замедления $a=4,9 \text{ м/с}^2$. Сравнивая эти результаты можно отметить, что они почти одинаковы по значению пути торможения. По значению ускорения они различны приблизительно в 1,8 раза. Из графика ускорения замедления на рисунке 2 видно, что среднее ускорение замедления $A=5,1 \text{ м/с}^2$ действует на практически всём временном участке торможения, что близко результату полученному по формуле (3). Исключение составляет конечный участок торможения на котором наблюдается пик ускорения замедления. Временной интервал нарастания составил приблизительно 0,05 секунды.

Выводы

1. Существующие методы расчёта лифтовых ловителей сводятся к получению максимального и минимального значения тормозной силы, создаваемой ловителями, и исходя из этого минимального и максимального пути торможения кабины (противовеса) лифта.
2. Процесс торможения кабины (противовеса) лифта ловителями занимает некоторое время. В течение этого времени тормозная сила изменяется от нуля до своего максимального значения, что при высоких скоростях движения кабины (противовеса) влияет на ускорение замедления, длину тормозного пути.
3. При моделировании действия тормозной силы лифтовых ловителей необходимо учитывать изменение тормозной силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации лифтов. ПБ 10-558-03 – с. 124.
2. **Иоффе, Е. Я.** Сертификация лифтов / Е. Я. Иоффе, В. Р. Глушов. – М. : Стройиздат, 1994.
3. Лифты: учеб. для вузов / Под общ. ред. Д.П.Волкова – М. : изд-во АСВ, 1999. – 480 с.: ил.
4. **ГОСТ Р 53781-2010.** Лифты. Правила и методы исследований (испытаний) и измерений при сертификации лифтов. Правила отбора образцов. – М. : Стандартинформ, 2010.