

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОВИТЕЛЯ С НАБОРОМ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ПРУЖИН

*Емельянов Р.Т., Оленев И.Б., Турышева Е.С., Терехова И.И., Желонин Д.Н.
Сибирский федеральный университет, Красноярск*

Ключевые слова: ловитель, кабина, подъемник, динамическая модель, ускорение, самозаклинивание.

Аннотация. Рассмотрены результаты исследований ловителя с набором тарельчатых пружин в процессе аварийного торможения падающей кабины подъемника. Приведено описание процесса самозаклинивания ловителя с набором тарельчатых пружин и с дальнейшим разворотом эксцентрика и одновременным возвратно-поступательным движением подвижной части эксцентрика. Разработаны математические модели процесса падения кабины под действием собственного веса и торможения, когда эксцентрик ловителя входит в зацепление с направляющей и далее ее обкатывает до полной остановки на основе дифференциальных уравнений. Получены результаты реализации математического моделирования в виде зависимости ускорения кабины от конструктивных параметров ловителя. Определено влияние динамических характеристик ловителя с набором тарельчатых пружин на ускорения кабины, а также определены рациональные параметры процесса подъема груза: перемещение; скорость; ускорение; усилие в механизме подъема. Сделаны рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации подъемника. Показано, что дополнительным положительным эффектом применения эксцентриковых ловителей является снятие кабины с ловителей без применения дополнительных механизмов.

REGULATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS A CATCHER WITH A SET OF DISC SPRINGS

*Emelyanov R.T., Olenov I.B., Turyшева E.S., Terekhova I.I., Zhelonin D.N.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

Keywords: catcher, cabin, lift, dynamic model, acceleration, self-locking.

Abstract. The results of studies of a catcher with a set of disc springs in the process of emergency braking of a falling elevator cabin are considered. The description of the process of self-locking of the catcher with a set of disc springs and with further rotation of the eccentric and simultaneous reciprocating motion of the moving part of the eccentric is given. Mathematical models of the cabin falling process under the action of its own weight and braking have been developed, when the eccentric of the catcher engages with the guide and then rolls it to a complete stop based on differential equations. The results of the implementation of mathematical modeling in the form of a dependence of cabin acceleration on the design parameters of the catcher are obtained. The influence of the dynamic characteristics of the catcher with a set of disc springs on the acceleration of the cabin is determined, and the rational parameters of the cargo lifting process are determined: displacement; speed; acceleration; force in the lifting mechanism. Recommendations have been made to ensure the safe operation of the lift. It is shown that an additional positive effect of the use of eccentric catchers is the removal of the cabin from the catchers without the use of additional mechanisms.

Введение

Повышение уровня безопасности в строительстве должно осуществляться путем повышения уровня безопасности машин и оборудования, а также применением технологических процессов, исключаящих опасное производство работ. Возникновение опасных ситуаций может создавать угрозу для жизни и здоровья людей. Повышенным уровнем опасности характеризуется аварийное торможение кабины мачтового подъемника ловителями. При аварийном торможении кабины ловителями работа мачтовых строительных подъемников характеризуется повышенной загруженностью элементов конструкции.

Правилами Ростехнадзора определен уровень безопасности, при котором допускается эксплуатация строительных подъемников. При торможении кабины мачтового подъемника ловителями допускается замедление не выше 25 м/с^2 . Опасными для здоровья людей являются ускорения порядка $40\text{-}50 \text{ м/с}^2$ [1]. Торможение кабины ловителями сопровождается значительными колебаниями ловителей, кабины и мачты подъемника. В процессе

торможения возникают колебания мачты в горизонтальной плоскости с прогибом металлоконструкции, величина которого зависит от динамичности колебательного процесса подъемника и определяет устойчивость мачты. При посадке грузовой каретки на ловители с жёстким упором мачта подъёмника испытывает сильные колебания. В нижнем сечении мачты амплитуда колебаний достигает 24 мм, в нижнем не превышает 4 мм. Частота колебаний составляет 2,85 Гц [2].

Исследованием динамики строительных подъемников занимались известные ученые: Ауэрбах В.А., Баловнев В.И., Бауман В.А., Болотник Н.Н., Бродский М.Г., Вайнсон А.А., Волков Д.П., Гехт А.Х., Карапетян А.С. и др. Анализ известного опыта эксплуатации строительных подъемников в сопоставлении с общими требованиями безопасности показывает, что назрела необходимость решения проблемы предупреждения опасного состояния на стадии конструирования и в процессе эксплуатации [3-10].

Целью исследований является повышение уровня безопасности подъемников за счет регулирования параметров ловителей кабины.

Материалы и методы исследований

Движение грузонесущего органа подъемника в аварийной ситуации разделяется на два этапа:

- падение, когда грузонесущий орган движется под действием собственного веса;
- торможение, когда эксцентрик ловителя входит в зацепление с направляющей и далее ее обкатывает до полной остановки.

В свою очередь движение эксцентрика ловителя разделяется на следующие моменты:

- 1) разворот эксцентрика к направляющей мачты под действием сил поджимной пружины;
- 2) ввод эксцентрика в зацепление и выравнивание угловой скорости эксцентрика ϕ и скорости движения грузонесущего органа $\dot{x}$;
- 3) перекатывание эксцентрика по направляющей и торможения грузонесущего органа.

При выборе расчетных схем приняты следующие допущения:

- массу грузонесущего органа с грузом и ловителем считаем постоянной и неделимой;
- жесткость балки и осей ловителя значительно больше жесткости амортизирующих элементов;
- внутренние сопротивления трущихся элементов подчиняются законам системы с сухим трением.

Исходя из этих предположений, выбран ловитель с набором тарельчатых пружин (рис. 1).

В этом ловителе в качестве амортизатора применён набор тарельчатых пружин 4, установленный между подвижной частью эксцентрика 2 и его неподвижным, в направлении возвратно-поступательного движения, основанием 7. На торце эксцентрика расположена крышка 3 и стержень 6, на котором с помощью гайки 5 закреплен набор тарельчатых пружин 4. При срабатывании ловителя происходит разворот рычага 7 и синхронное вращение эксцентрика, относительно направляющей 1.

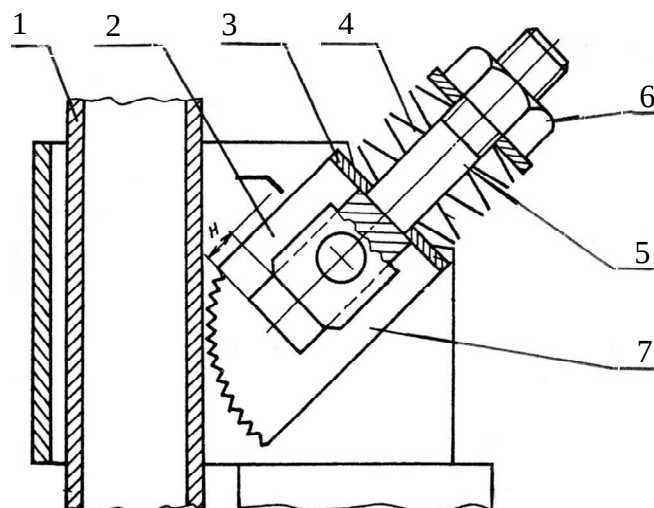


Рис. 1. Ловитель с набором тарельчатых пружин

Расчетная схема подъемника, оснащенного ловителями с набором тарельчатых пружин, представлена в виде трех массовой системы с сосредоточенными массами (рис. 2).

На этапе разворота эксцентрика к направляющей мачты под действием сил поджимной пружины силы сопротивления грузонесущего органа подъемника с канатным механизмом

подъема определяются трением в направляющих роликах. Эти силы учитываются коэффициентом сопротивления ψ .

Параметры подъемника, оснащенного ловителями с набором тарельчатых пружин, приведены в таблице 1.

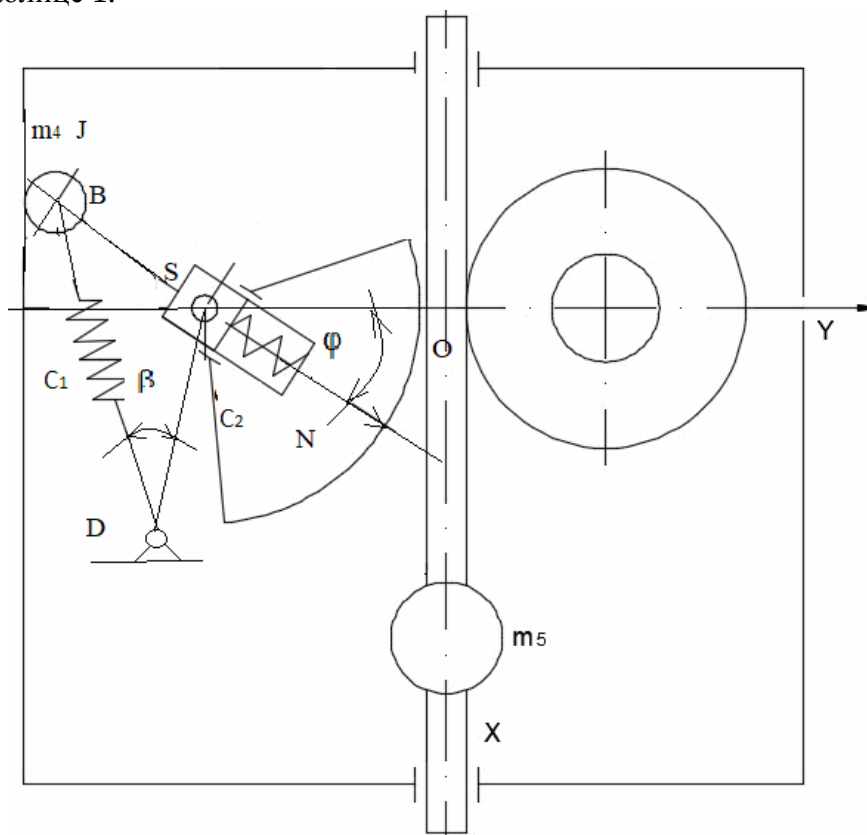


Рис. 2. Расчетная схема подъемника, оснащенного ловителями с набором тарельчатых пружин: m_4 – приведенная масса блока, щеки блока, трос, ловителей, каната; J – момент инерции эксцентрика; m_5 – приведенная масса каретки с грузом и опорным роликом; c_1 – жесткость поджимной пружины; c_2 – жесткость пружин, расположенных в ловителях; N – сила нормального давления на опорную поверхность эксцентрика; x, y – система координат; φ – угол поворота эксцентрика; SB, BD, SD – геометрические размеры; β – угол треугольника DBS

Табл. 1. Параметры подъемника, оснащенного ловителями с набором тарельчатых пружин

Параметры	Источник определения	Численное значение
c_2 – жесткость пружин, расположенных в ловителях, кН/м	Расчет	$2,0 \div 8,0$
a – постоянная архимедовой спирали, м/рад	По априорным данным	$0,0055 \div 0,02$
k – коэффициент диссипации тарельчатой пружины, кНс/м	Экспериментальная величина	$0 \div 6$
J – момент инерции эксцентрика, кг·м ²	Расчет	0,004
θ – расчетный коэффициент	Расчет	0,143
T – расчетный коэффициент	Расчет	0,073
β – угол треугольника SBD , рад	Рабочие чертежи	0,1
φ_0 – начальный угол разворота эксцентрика, рад	Расчет	0,52
g – ускорение свободного падения, м/с ²		9,81
μ – коэффициент трения	Эксперимент	$0,18 \div 0,5$
c_1 – жесткость поджимной пружины, кН/м	Расчет	8,0
l_0 – начальная длина пружины, м	Рабочие чертежи	0,434

Результаты

Для вывода уравнений, описывающих движение системы, приведенной на рисунке 2, воспользуемся уравнением Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial q_i} = \Sigma Q_i, \quad (1)$$

где P – кинетическая энергия; q_i – обобщенная координата; кинетическая энергия системы; ΣQ_i – обобщенная сила, соответствующая i -й обобщенной координате и состоящая из сил потенциальных, диссипативных и не потенциальных.

Система уравнений, описывающих движение грузонесущего органа на этапе падения, имеет вид:

$$(m_4 + m_5) (\ddot{x} - g) \psi = 0, \\ J \ddot{\phi} + m_4 g l \cos \varphi + \frac{c_1 [l_0 - \sqrt{\theta - T \cos(\beta - \varphi)}] T \sin(\beta - \varphi)}{2\sqrt{\theta - T \cos(\beta - \varphi)}} = 0, \quad (2)$$

где $\ddot{x}$ – ускорение кабины; g – ускорение свободного падения; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение эксцентрика; l – длина пружины; t – время; $\theta = SB^2 + SD^2$; $T = 2SB \cdot SD$.

При $t = 0$, $x = 0$, $\dot{x} = 0$, $\varphi = 0$, $\dot{\varphi} = 0$.

Логический элемент включается в работу при $\dot{x} \geq 1,4V_{ном}$, где $V_{ном}$ – номинальная скорость кабины.

Система функционирует, пока $\varphi \geq A$, где A – угол разворота эксцентрика до момента касания направляющей.

В период ввода эксцентрика в зацепление с направляющей подъемника происходит выравнивание угловой скорости эксцентрика $\dot{\phi}$ и скорости движения грузонесущего органа $\dot{x}$. Включается в работу логический элемент при $\dot{x} \geq 1,4V_{ном}$ и происходит упругая деформация пружины c_2 . Таким образом, математическая модель имеет вид:

$$(m_4 + m_5) \ddot{x} - (m_4 + m_5) g = \mp \frac{(c_2 y + k \dot{y}) \mu}{\cos \varphi}, \\ J \ddot{\phi} + m_4 g l \cos \varphi + \frac{c_1 [l_0 - \sqrt{\theta - T \cos(\beta - \varphi)}] T \sin(\beta - \varphi)}{2\sqrt{\theta - T \cos(\beta - \varphi)}} = \mp \frac{(c_2 y + k \dot{y}) \mu}{\cos \varphi}, \quad (3) \\ \dot{\phi} = \frac{\dot{x}}{a \varphi_{зах} + \Delta y},$$

где y – деформация пружины c_2 ; $\dot{y}$ – скорость деформации пружины c_2 ; k – коэффициент диссипации тарельчатой пружины; Δy – величина сжатия пружины

На этапе торможения грузонесущего органа ловителями в результате взаимодействия эксцентрика с направляющей возникают тормозные силы: сила нормального давления N и сила торможения $F_{тр}$, направленные взаимно перпендикулярно. Эти силы зависят от конструктивного исполнения ловителей и направляющей мачты подъемника и связаны между собой коэффициентом трения μ .

С учетом демпфирования колебаний системы математическая модель имеет вид:

$$m_4 \ddot{x}_4 - c_2 (x_4 - x_5) - k (\dot{x}_4 - \dot{x}_5) - m_5 g = -N \cdot \mu, \\ m_5 \ddot{x}_5 + c_2 (x_4 - x_5) + k (\dot{x}_4 - \dot{x}_5) - m_5 g = \begin{cases} 0, & \text{при } \Delta \varphi \leq 0,17, \\ + m_1 \ddot{x}_1 & \text{при } \Delta \varphi = 0, \end{cases} \quad (4) \\ \Delta \varphi = (-\dot{x}_4 / r + \dot{x}_5 / r) t + 0,17, \\ \dot{\phi} = \dot{x} [a(\varphi_{зах} + \varphi)]^{-1}.$$

где $\varphi_{зах}$ – угол захода эксцентрика до касания с направляющей, r – радиус эксцентрика.

В зависимости от знака неравенства в момент касания эксцентриком направляющей идет торможение или разгон.

Математическая модель описывается системой дифференциальных уравнений (4), пока $\dot{x}_5 > 0$. При $\dot{x}_5 = 0$ остается одно уравнение:

$$m_5 \ddot{x}_2 + c_2(x_4 - x_5) + k(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) - m_5 g = m_1 \ddot{x}_1, \quad (5)$$

где m_1 – масса привода подъемника; $\ddot{x}_1$ – ускорение привода подъемника.

По результатам моделирования процесса торможения кабины подъемника получена зависимость ускорений каретки подъемника от жесткости тарельчатых пружин, приведенная на рисунке 3.

Влияние параметров ловителя на величину тормозного ускорения распределилось следующим образом.

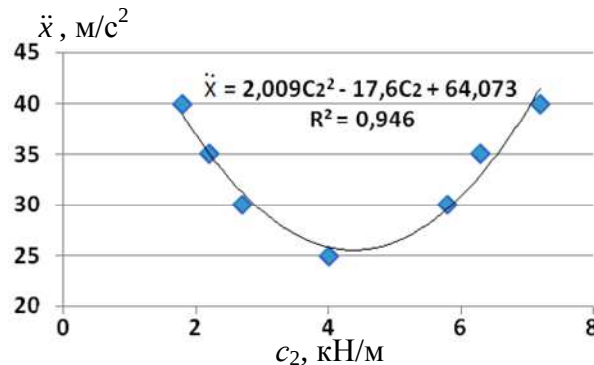


Рис. 3. Зависимость ускорений каретки подъемника от жесткости тарельчатых пружин при: упругости поджимной пружины $c_1 = 6$ кН/м, коэффициенте диссипации $k = 0,2$; и зазоре $\Delta = 0,002$ м

Величина жесткости c_2 оказывает существенное влияние на ускорение кабины. Ускорение увеличивается как при малой жесткости упругого элемента, так и при значительной величине жесткости. Это обусловлено тем, что при небольшой жесткости упругого элемента образуется зазор в системе, приводящий к увеличению ускорений, а при значительной величине жесткости упругого элемента система работает как с жестким упором. Приращение ускорения $\Delta \ddot{x}$ в начале торможения достигает 23 м/с², затем плавно уменьшается. На динамическую нагруженность подъемника при торможении грузонесущего органа ловителем оказывает существенное влияние введение диссипативных элементов с коэффициентом сопротивления в пределах 3-6 кНс/м.

Обсуждение и заключение

Полученные аналитические зависимости ускорений кабины подъемника обеспечивают конструктивную безопасность в случае аварийной ситуации в соответствии с нормативными требованиями за счет увеличения времени торможения кабины ловителями. Параметры ловителя с набором тарельчатых пружин определяются из условия обеспечения безопасности эксплуатации мачтового подъемника.

Положительный эффект достигается за счет регулирования конструктивных параметров ловителя. Динамическое состояние подъемника характеризуется степенью влияния колебательного процесса в зависимости от времени торможения кабины. Разработка ловителя с параметрами $c_1 = 6$ кН/м и $k = 0,2$; $\Delta = 0,002$ м и $c_2 = 4,0$ кН/м обеспечивает выполнение требований нормативных документов. Другим результатом данной работы является выполнение работ по снятию кабины подъемника с ловителей без применения дополнительных механизмов путем подъема кабины лебедкой подъемника. Это обеспечивается процессом поворота эксцентрика ловителя на оси.

Список литература

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации лифтов: ПБ 10-558-03: утв. Ростехнадзором России 16.05.03; обязат. для всех м-в, ведомств, предприятий и орг., независимо от их орг.-правовой формы и формы собственности, а также для индивидуальных предпринимателей. – СПб.: ДЕАН, 2005. – 172 с.

2. Емельянов Р.Т., Вильдерман В.Н. Исследование динамических нагрузок конструкции мачтовых подъемников // Строительные и дорожные машины. – 1981. – №1. – С. 18-20.
3. Судакова В.А., Гуков М.Г. Ловители двухстороннего действия плавного торможения как одно из направлений повышения безопасности и комфорта пассажирских лифтов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2019. – №4(65). – С. 66-74.
4. Яновски Л. Проектирование механического оборудования лифтов. – 3-е изд. – М.: АСВ, 2005. – 336 с.
5. Лифты, введенные в эксплуатацию в Российской Федерации. 2013 год. Ежегодный информационно-аналитический справочник. Выпуск № 4. – М.: НЛС, 2014. – 124 с.
6. Галкин А.А. Исследование безредукторного электропривода лифта с низкоскоростным асинхронным двигателем: Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 142 с.
7. Витчук П.В. Обеспечение долговечности лифтовых канатопроводящих шкивов: Дисс. ... канд. техн. наук. – Тула, 2013. – 140 с.
8. Степанов М.А., Мечиев А.В. Повышение надежности лифта при нормальной эксплуатации // Научное обозрение. – 2014. – №7-1. – С. 148-152.
9. Степанов М.А., Мечиев А.В. Анализ неисправностей пассажирских лифтов // Материалы XVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». – М.: МГСУ, 2014. – С. 70.
10. Негодин А.В., Попов М.Ю., Ананин В.Г. Анализ процесса торможения лифтовых ловителей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – №4. – С. 170-176.

References

1. Rules for the installation and safe operation of elevators: PB 10-558-03: approved Gostekhnadzor of Russia on 16.05.03: obliged for all ministries, departments, enterprises and organizations, regardless of their legal form and form of ownership, as well as for individuals, entrepreneurs. – SPb.: DEAN, 2005. – 172 p.
2. Emelyanov R.T., Vilderman V.N Investigation of dynamic loads of mast lifts // Construction and road vehicles. 1981, no. 1, pp. 18-20.
3. Sudakova V.A., Gukov M.G. Catchers of the two-way action of smooth braking as one of the directions for improving the safety and comfort of passenger elevators // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2019, no. 4(65), pp. 66-74.
4. Yanovski L. Design of mechanical equipment of elevators. – 3rd edition. – M.: ASV, 2005. – 336 p.
5. Elevators put into operation in the Russian Federation. The year is 2013. The annual information and analytical handbook. Issue No. 4. – M.: NLS, 2014. – 124 p.
6. Galkin A.A. Investigation of a gearless electric elevator drive with a low-speed asynchronous motor: Diss. ... cand. of tech. sc. – M., 2011. – 142 p.
7. Vitchuk P.V. Ensuring the durability of elevator rope pulleys: Diss. ... cand. of tech. sc. – Tula, 2013. – 140 p.
8. Stepanov M.A., Mechiev A.V. Increasing the reliability of the elevator during normal operation // Scientific review. 2014, no. 7, pp. 148-152.
9. Stepanov M.A., Mechiev A.V. Malfunction analysis of passenger elevators // Materials of the XVIII Moscow International Interuniversity scientific and technical Conference of students, postgraduates and young scientists "Lifting, transport, construction, road, track machines and robotic complexes". – M.: MUCS, 2014. – P. 70.
10. Negodin A.V., Popov M.Yu., Ananin V.G. Analysis of the braking process of elevator catchers // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2016, no. 4, pp. 170-176.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Емельянов Рюрик Тимофеевич – доктор технических наук, профессор	Emelyanov Ryurik Timofeevich – doctor of technical sciences, professor
Турьшева Евгения Сергеевна – кандидат технических наук, доцент	Turysheva Evgeniya Sergeevna – candidate of technical sciences, associate professor
Оленев Игорь Борисович – кандидат технических наук, доцент	Olenev Igor Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor
Терехова Ирина Ивановна – кандидат технических наук, доцент	Terekhova Irina Ivanovna – candidate of technical sciences, associate professor
Желонин Дмитрий Николаевич – магистрант	Zhelonin Dmitry Nikolaevich – master's degree
ert-44@yandex.ru	

Получена 25.11.2024