

УДК 621.86  
DOI: 10.12737/22050

К.А. Гончаров, И.А. Денисов, Е.И. Ильин

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ПОДВЕСНОЙ ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ МОСТОВОГО КРАНА С ЛИНЕЙНЫМ ПРИВОДОМ

Описаны особенности динамического анализа механизма передвижения подвесной грузовой тележки мостового крана с линейным приводом. Показана необходимость регулирования механической характеристики двигателя в процессе пуска и при установившемся режиме работы. Обоснована необходимость обязательного проведения расчётов

механизма передвижения с использованием двухмассовой динамической модели.

**Ключевые слова:** линейный электродвигатель, механическая характеристика, одностепенная модель, двухмассовая модель, мостовой кран, подвесная грузоподъемная тележка.

K.A. Goncharov, I.A. Denisov, E.I. Ilyin

## DYNAMIC ANALYSIS PECULIARITIES OF SUSPENSION TRUCK TRAVEL IN BRIDGE CRANE WITH LINEAR DRIVE

The paper reports the results of a dynamic analysis of suspension truck travel in a bridge crane with a linear drive. As compared with the existing designs this drive possesses a number of advantages and distinguishing capacities which should be taken into account at the formation of dynamic models. So, the interaction force between the elements of an electric motor affects the resistance value to a truck travel of friction forces.

A nominal operating rate of linear electric motors exceeds 1 m/sec. The operating rates of the travel of most load-lifting machines and their separate elements are within the bounds of 0.1 – 1 m/sec. It is evident that even to maintain the same rate of travel the introduction of a control system is necessary. On the other hand, linear electric motors with the control systems possess high dynamic characteristics and may be used to reduce load oscillations on a flexible suspen-

sion which is particularly significant for technological cranes.

A dynamic analysis is carried out for a single-mass and double-mass models. The results of computations confirmed a necessity for the drive control to obtain a working speed of movement and also to reduce load oscillations and dynamic loads upon mechanisms and a metal structure of a load-lifting machine. The analysis has also shown that a single-mass model does not give a complete comprehension of changes in a speed of a mechanism at acceleration and it should not be used at the design computations of movement mechanisms of this type.

**Key words:** linear electric motor, mechanical data, single-mass model, double-mass model, bridge crane, suspension truck.

Представленная в [2] конструктивная схема механизма передвижения тележки мостового крана отличается компактностью и относительной простотой. Дополнительным преимуществом данной схемы является отсутствие зависимости качества передачи тягового усилия от загрузки тележки и распределения масс между ходовыми колёсами.

Линейный электродвигатель непосредственно приводит в движение тележку крана при помощи поперечного тягового усилия, возникающего при взаимодействии электромагнитных полей первично-

го и вторичного элементов. В связи с отсутствием вращающихся масс уравнение движения центра масс тележки (одностепенная динамическая модель) имеет следующий вид:

$$m_{\Sigma} \frac{dv}{dt} = F_{ДВ} - W_C,$$

где  $W_C$  – общая сила сопротивления передвижению тележки, Н;  $F_{ДВ}$  – движущая поперечная сила, Н;  $m_{\Sigma}$  – масса тележки с учётом транспортируемого груза или без него, в зависимости от расчётного случая, кг.

Кроме движущей силы между первичной и вторичной частями линейного электродвигателя возникает постоянная по модулю сила притяжения  $F_D$ . В предложенной конструкции подвесной тележки [2] указанная сила уменьшает опорную реакцию ходовых колёс и, как следствие, сопротивление движению  $W_C$ , в частности величины составляющих:

– сопротивления передвижению от сил трения

$$W_{TP} = \frac{G_{ГР} + G_T - F_D n_{Л.Д.}}{D_{Х.К.}} (2\mu + fd) k_p,$$

где  $G_{ГР}$  – вес транспортируемого груза, Н;  $G_T$  – вес грузовой тележки, Н;  $d$  – диаметр цапфы вала, мм;  $D_{Х.К.}$  – диаметр ходового колеса, мм;  $f$  – приведённый ко-

эффициент трения для подшипников опоры колеса;  $\mu$  – коэффициент трения качения ходового колеса, мм;  $k_p$  – коэффициент трения реборд;  $n_{Л.Д.}$  – число используемых линейных электродвигателей;

– сопротивления передвижению от уклона пути

$$W_y = \alpha(G_{ГР} + G_M - F_D n_{Л.Д.}),$$

где  $\alpha$  – уклон ходового пути.

Сила  $F_{ДВ}$  определяется механической характеристикой электродвигателя. Для получения аналитического выражения функции механической характеристики с достаточной точностью её можно аппроксимировать прямыми [3]. Вид механической характеристики зависит от типа линейного электродвигателя (рис. 1) [8; 11].

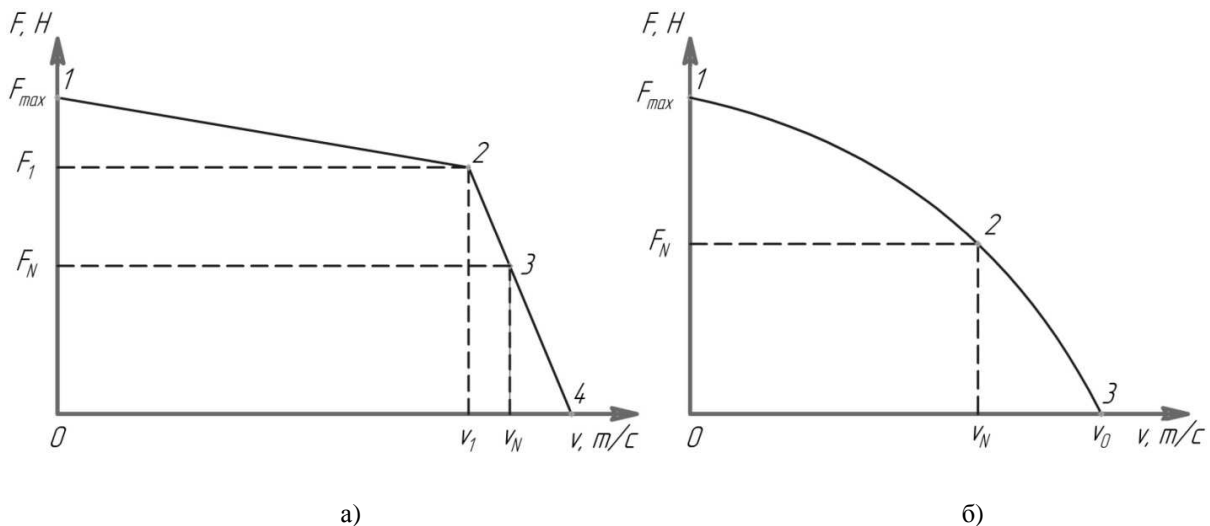


Рис. 1. Механические характеристики линейных электродвигателей:

а – характеристика линейного синхронного электродвигателя *SL2* производства фирмы *SEW Eurodrive*;  
б – характеристика линейного асинхронного электродвигателя *DLA* производства фирмы *SEW Eurodrive*

Все существующие линейные электродвигатели в номинальном режиме работы развивают скорость более 1 м/с, что обусловлено их конструктивными особенностями. Для получения меньшей скорости передвижения, характерной для многих тележек мостовых кранов, применяются системы управления с использованием частотного преобразователя. Системы управления в совокупности с линейными электродвигателями и другими

электронными компонентами входят в состав различных сервоприводов.

Линейный синхронный электродвигатель работает по вентильному принципу. Скорость регулируется частотным преобразователем, который управляется специальным датчиком обратной связи в зависимости от положения первичного элемента [7]. Скорость движения асинхронного линейного электродвигателя регулируется частотным преобразователем по аналогии

с ротационным асинхронным электродвигателем. Для этого чаще всего применяют закон частотного управления, при котором соблюдается постоянное соотношение между напряжением и частотой, с использованием различных методов IR-компенсации [9].

Подобные системы управления двигателями подъёмно-транспортной техники также позволяют автоматически успокаивать колебания груза различными способами. Один из таких способов заключается в поддержании постоянного ускорения точки подвеса в течение промежутка времени, кратного периоду собственных колебаний груза. Другой способ заключается в формировании закона изменения ускорения на трех временных интервалах. На первом и третьем интервалах поддерживается одинаковое ускорение, на втором ускорение равно нулю, продолжительности первого и третьего интервалов одинаковы (поэтому на каждом из них изменение скорости равно полуразности между конечной и установившейся скоростями) [10]. Наиболее перспективным выглядит способ регулирования, полученный с помощью математической модели «точка подвеса – груз» [5; 10].

Рассмотрим процесс разгона подвесной грузовой тележки мостового крана грузоподъемностью 15 тонн с приводом от линейного синхронного электродвигателя

*SL2-150ML Basic* производства фирмы *SEW Eurodrive* [2; 8].

Примем следующие начальные условия:

- в начале разгона груз находится в подвешенном состоянии в нижнем возможном положении;
- тележка движется вверх по уклону ходового пути с наличием трения реборд.

Динамический анализ проведён с помощью одномассовой динамической модели и двухмассовой модели с учётом раскачивания груза.

В ходе динамического анализа проведено сравнение характеристик привода механизма при разгоне электродвигателя до номинальной скорости  $v_{ном} = 1,1$  м/с и до нормальной рабочей скорости  $v_p = 0,4$  м/с, реализуемой с помощью системы управления.

Исходное уравнение одномассовой динамической модели с учётом функции механической характеристики двигателя имеет вид

$$m_{\Sigma} \frac{dv}{dt} = A_i + B_i v - W_c,$$

где  $A_i$  и  $B_i$  – постоянные функции участка механической характеристики (рис. 2).

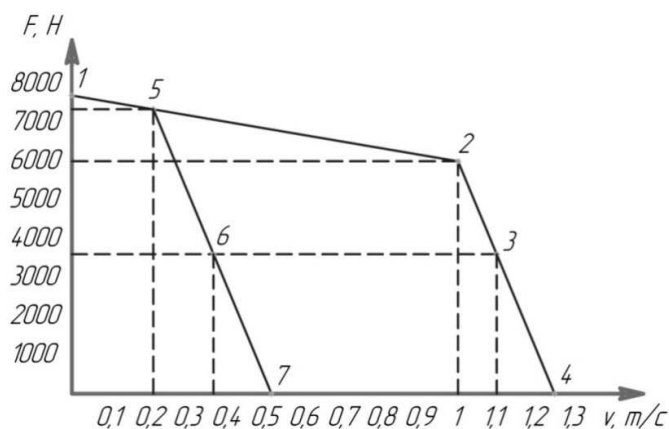


Рис. 2. Механическая характеристика линейного синхронного электродвигателя *SL2-150ML Basic* производства фирмы *SEW Eurodrive*

Графики, полученные в результате расчётов, представлены на рис. 3.

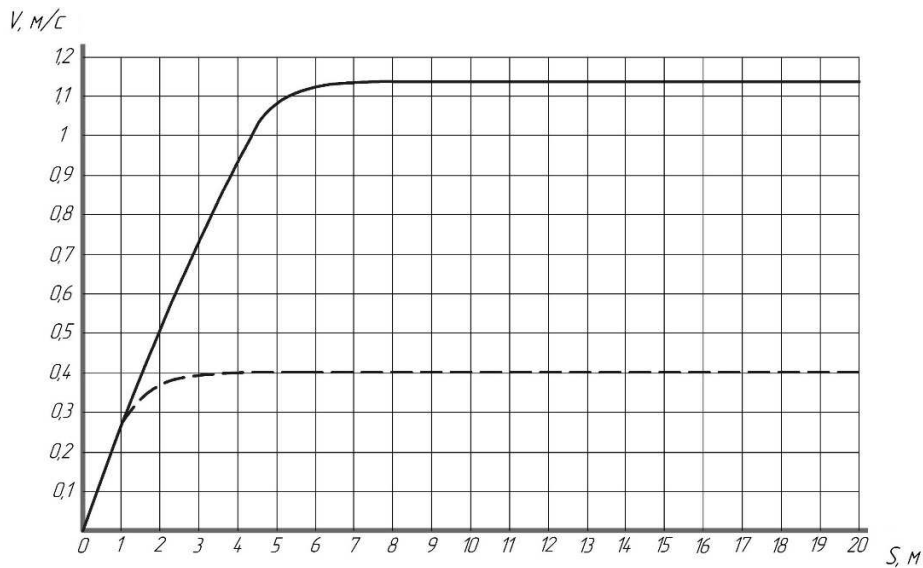


Рис. 3. Графики разгона тележки мостового крана

Сплошной линией обозначен разгон до номинальной скорости электродвигателя, пунктирной – до нормальной рабочей скорости тележки.

В результате расчётов в первом случае ( $v_{НОМ} = 1,1 \text{ м/с}$ ) получено: ускорение при разгоне тележки  $a_{P.T.} = 0,21 \text{ м/с}^2$ , время разгона  $t_{P.T.} = 5,315 \text{ с}$ , длина пути разгона  $S_{P.T.} = 2,97 \text{ м}$ . Найденное ускорение превышает рекомендуемое значение для ГПМ заданной грузоподъёмности  $a_D = 0,15 \text{ м/с}^2$  [1], а полученная длина разгона допустима только для кранов с пролётом более 20 м.

Во втором расчётном случае ( $v_P = 0,4 \text{ м/с}$ ) получены следующие значения: ускорение при разгоне тележки  $a_{P.T.} = 0,103 \text{ м/с}^2$ , время разгона  $t_{P.T.} = 3,865 \text{ с}$ , длина пути разгона  $S_{P.T.} = 0,77 \text{ м}$ . Также анализ показал, что

максимальная рабочая скорость, которую может реализовать данный линейный электродвигатель без превышения допускаемого ускорения равна  $v_D = 0,7 \text{ м/с}$ , причём переход двигателя с ветви механической характеристики 1-2 (рис. 2) должен происходить при скорости  $0,57 \text{ м/с}$ .

Одномассовая динамическая модель не учитывает явление раскачивания груза, которое может оказывать существенное влияние на равномерность движения крановой тележки и ГПМ в целом, что особенно важно при пониженном сопротивлении движению, характерном для линейных электродвигателей. Для оценки гибкости подвеса груза и его влияния на динамику механизма передвижения тележки примем в качестве расчётной схемы простейшую двухмассовую систему (рис. 4) [1; 4].

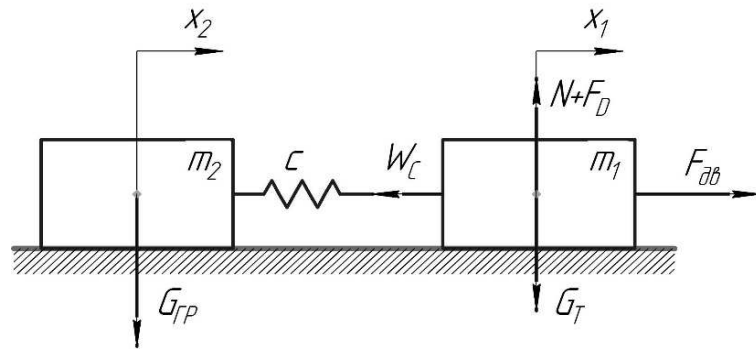


Рис. 4. Расчётная схема механизма передвижения с учётом гибкости подвеса груза

Система уравнений двухмассовой модели примет вид

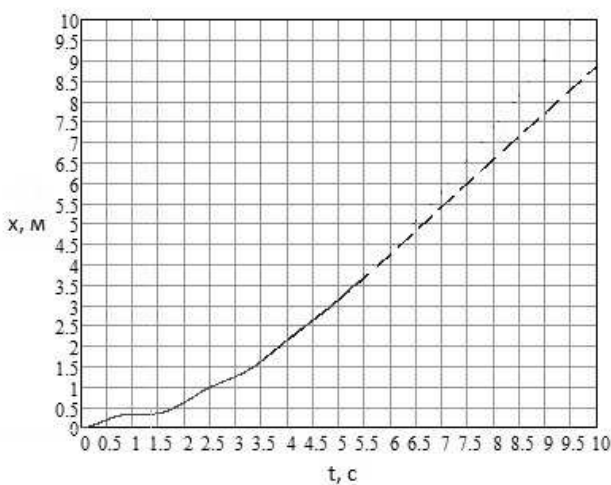
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + \frac{m_2 g}{l} (x_1 - x_2) = A_i + B_i \dot{x}_1 - W_C; \\ m_2 \ddot{x}_2 + \frac{m_2 g}{l} (x_2 - x_1) = 0, \end{cases}$$

где  $m_1$  – приведённая к поступательному движению масса тележки, кг;  $m_2$  – масса груза, кг;  $x_1$  – горизонтальное перемещение тележки, м;  $x_2$  – горизонтальное перемещение груза, м;  $l$  – длина подвеса груза, м.

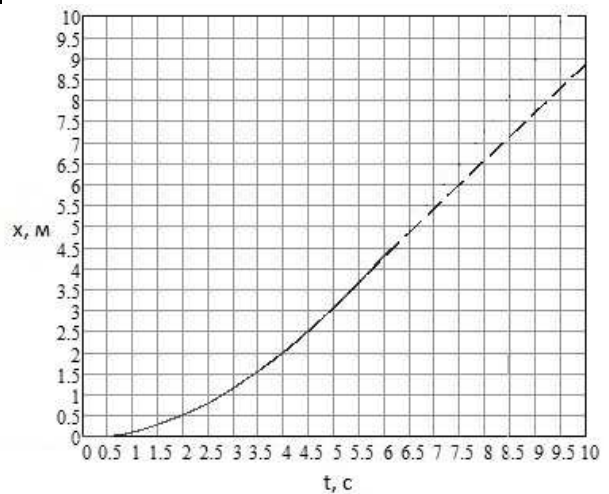
Графики перемещений тележки и груза на гибком подвесе, полученные в результате решения системы уравнений при разгоне до номинальной скорости электродвигателя  $v_{НОМ} = 1,1$  м/с, представлены рис. 5. Графики, описывающие колебание скоростей

тележки и груза, представлены на рис. 6.

Точка стыка сплошной и пунктирной линий соответствует моменту перехода электродвигателя с одной ветви механической характеристики на другую (рис. 2). Через 0,625 с. с момента начала движения скорость тележки меняет своё направление, падая с 0,744 до -0,002 м/с. Подобные явления недопустимы для нормальной работы ГПМ и приводят к возникновению высоких динамических нагрузок. Данное обстоятельство подтверждает необходимость регулирования скорости, причём, как видно из графика (рис. 6 а), переключение между прямыми механической характеристики линейного электродвигателя должно происходить в момент времени, соответствующий экстремуму первой гармоники колебания скорости тележки.



а)



б)

Рис. 5. Графики перемещений при разгоне до номинальных характеристик линейного двигателя: а – тележки; б – груза на гибком подвесе.

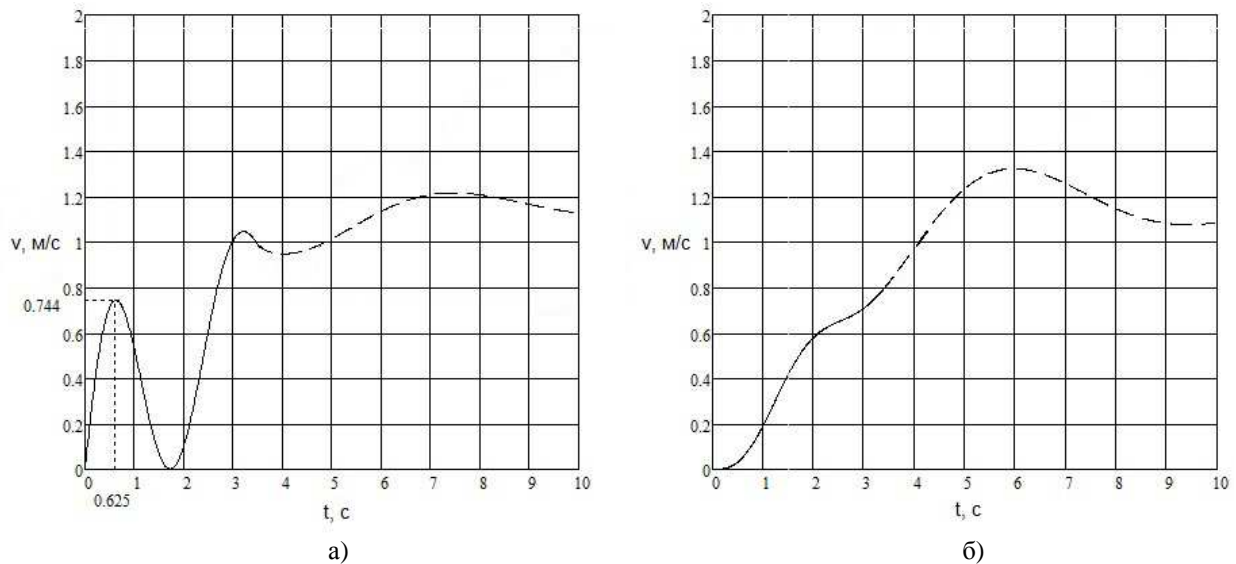


Рис. 6. Графики колебания скоростей при разгоне до номинальных характеристик линейного двигателя: а – тележки; б – груза на гибком подвесе

Графики перемещений, колебания скоростей тележки и груза при разгоне до нормальной рабочей скорости ( $v_p = 0,4$  м/с) представлены на рис. 7, 8.

При правильном подборе параметров регулирования скорости удаётся значительно снизить колебания самой тележки и подвешенного груза (рис. 7, 8). В данном случае регулирование скорости и успокоение колебаний может осуществляться с помощью системы управления, схожей с описанной в работах [5; 10], но выстроенной на базе существующих сервоприводов, с вводом в систему дополнительных датчиков измерения массы транспортируемого груза и высоты его подвеса. Измерение

показаний датчиками может выполняться прямыми и косвенными методами [6]. Путём параметрирования данную систему управления можно настроить на три различных режима: регулирование в контуре положения, регулирование в контуре скорости, регулирование движущей силы.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. При проведении проверочного расчёта механизма передвижения тележки с линейным электродвигателем необходимо использовать двухмассовую динамическую модель, позволяющую определять необходимые параметры настройки системы управления.

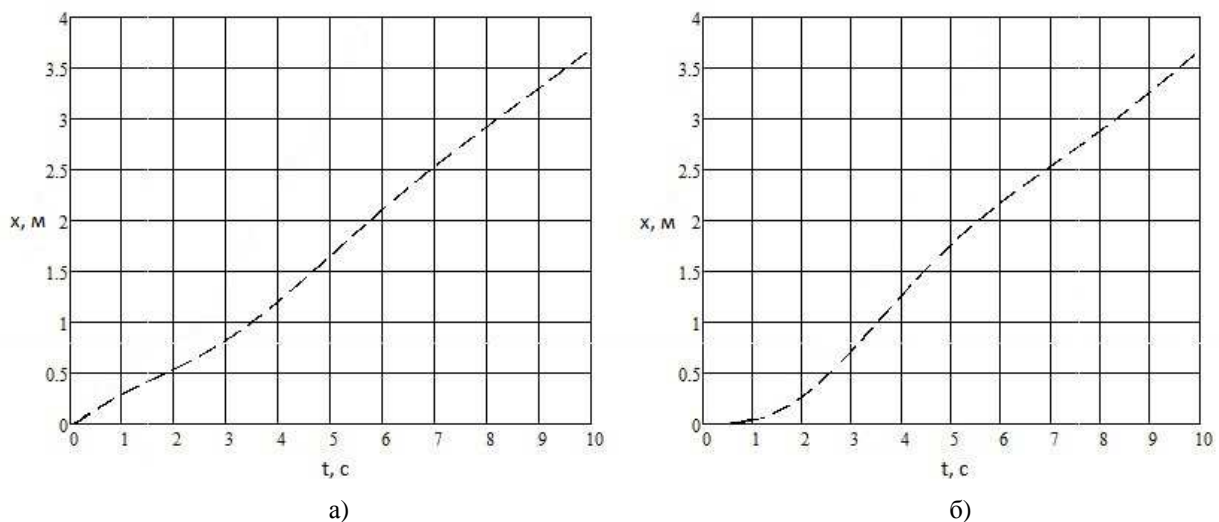


Рис. 7. Графики перемещений при разгоне до нормальной рабочей скорости с применением частотного регулирования: а – тележки; б – груза на гибком подвесе

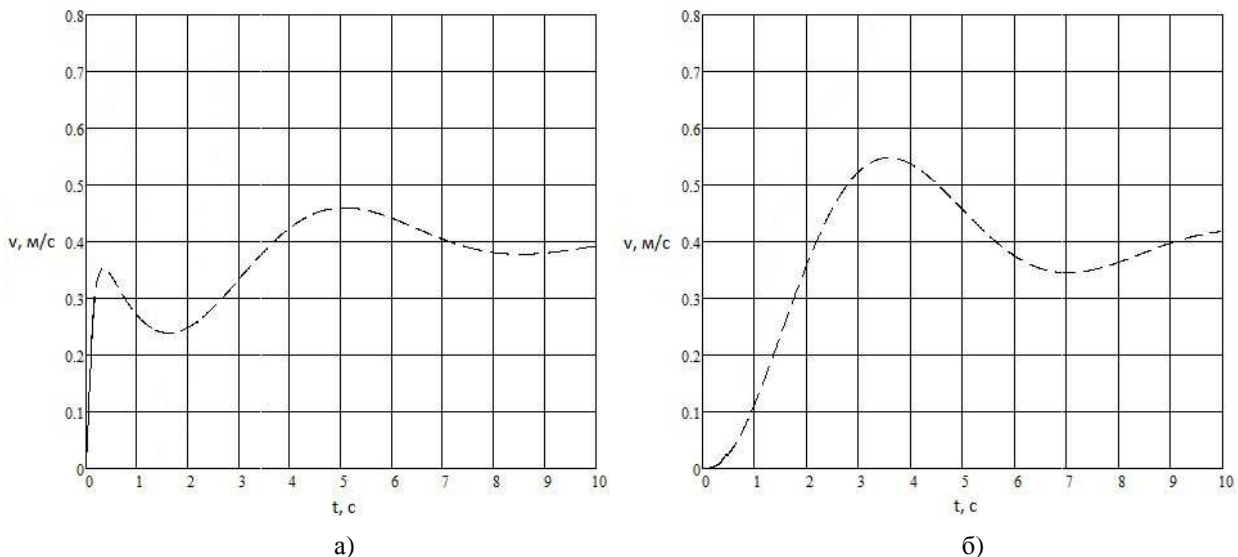


Рис 8. Графики колебания скоростей при разгоне до нормальной рабочей скорости с применением частотного регулирования: а – тележки; б – груза на гибком подвесе

2. Применение линейных синхронных электродвигателей в механизмах передвижения ГПМ возможно только в совокупности с системами управления на базе

сервоприводов, позволяющими в широких пределах регулировать скорости их движения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: учеб. для вузов/М.П. Александров. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
  2. Денисов, И.А. Применение линейных электродвигателей в механизмах передвижения тележек грузоподъемных машин...// Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы всерос. науч.-практ. конф./ под ред. К.А. Гончарова. – Брянск: БГТУ, 2015. – 76 с.
  3. Зайцев, А.В. Асинхронный электропривод подъемно-транспортных машин: учеб. пособие /А.В. Зайцев. – Саратов: АН ВЭ, 2011. – 258 с.
  4. Лагерев, И.А. Исследование движения базового шасси крана-манипулятора с помощью много-массовых динамических моделей... // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №2. – С. 74-81.
  5. Мещеряков, В.Н. Ограничение колебаний груза, перемещаемого мостовыми кранами... // Фундаментальные исследования. – 2015. – №6–2. – С. 268-271.
  6. Мещеряков, В.Н. Способы определения параметров груза, перемещаемого мостовыми кранами с системой автоматического успокоения колебаний... // Фундаментальные исследования. – 2015. – №7–1. – С. 79-84.
  7. Практика приводной техники. Сервоприводы. Основы, характеристики, проектирование. 2006. – Режим доступа: <http://www.seweurodrive.ru/files/pdf/11322853.pdf>.
  8. Синхронные линейные двигатели SL2. Инструкция по эксплуатации. 2008 – Режим доступа: <http://download.seweurodrive.com/download/pdf/16630866.pdf>.
  9. Усольцев, А.А. Общая электротехника: учеб. пособие... – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
  10. Щедринов, А.В. Автоматизированная система успокоения колебаний груза с использованием модели в системе регулирования... // Автоматизация в промышленности. – 2009. – №3. – С. 15-18.
  11. DLD Фsynchronous Linear Motors. Operating Instructions. 2009. – Режим доступа: <http://download.seweurodrive.com/download/pdf/16673212.pdf>.
1. Alexandrov, M.P. *Load-lifting Machinery: Textbook for Colleges*/M.P. Alexandrov. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 400.
  2. Denisov, I.A. *Linear electric motor application in mechanisms of trolleys movement in load-lifting machines...*// *Innovation Development of Lifting and Transport Equipment: Proceedings of All-Russian Scientific-Pract. Conf./* under the editorship of K.A. Goncharov. – Bryansk: BSTU, 2015. – pp. 76.

3. Zaitsev, A.V. *Asynchronous Electric Drive of Lifting and Transport Machines: Manual* /A.V. Zaitsev. – Saratov: AS VE, 2011. – pp. 258.
4. Lagerev, I.A. Investigation of main chassis movement in crane-manipulator using multimass dynamic models... // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2010. – №2. – pp. 74-81.
5. Meshcheryakov, V.N. Oscillation limitation of load transferred by bridge cranes... // *Fundamental Investigations*. – 2015. – №6-2. – pp. 268-271.
6. Meshcheryakov, V.N. Methods for parameters definition of load transferred by bridge cranes with system of oscillations automated damping ... // *Fundamental Investigations*. – 2015. – №7-1. – pp. 79-84.
7. *Practice of Drive Equipment. Servo-motors. Fundamentals, Characteristics, Design*. 2006. – Access Mode: <http://www.seweurodrive.ru/files/pdf/11322853.pdf>.
8. *Synchronous Linear Motors SL2*. Operating Instruction. 2008 – Access Mode: <http://download.seweurodrive.com/download/pdf/16630866.pdf>.
9. Usoltsev, A.A. *General Electrical Engineering: Manual...* – S-Pb.: SPbSU ITMO, 2009. – pp. 301.
10. Shchedrinov, A.V. Automated system of load oscillations damping using models in control system... // *Automation in Industry*. – 2009. – №3. – pp. 15-18.
11. *DLD Synchronous Linear Motors*. Operating Instructions. 2009. – Access Mode: <http://download.seweurodrive.com/download/pdf/16673212.pdf>.

Статья поступила в редколлегию 13.01.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Федяева Г.А.

#### Сведения об авторах:

**Гончаров Кирилл Александрович**, к.т.н, доцент, зав. кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-13, e-mail: [ptm@tu-bryansk.ru](mailto:ptm@tu-bryansk.ru).

**Денисов Илья Александрович**, аспирант кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Брянского государственного технического университета, тел.: +7(980)-331-74-32, e-mail: [ilia.denisow@yandex.ru](mailto:ilia.denisow@yandex.ru).

**Ильин Евгений Иванович**, к.т.н, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Брянского государственного технического университета, тел.: +7(950)-692-80-08.

**Goncharov Kirill Alexandrovich**, Can.Eng, Assistant Prof., Head of the Dep. “Lifting & Transport Machines and Equipment” of Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-13, e-mail: [ptm@tu-bryansk.ru](mailto:ptm@tu-bryansk.ru).

**Denisov Ilya Alexandrovich**, Post graduate student of the Dep. “Lifting & Transport Machines and Equipment” of Bryansk State Technical University, Phone: +7(980)-331-74-32, e-mail: [ilia.denisow@yandex.ru](mailto:ilia.denisow@yandex.ru).

**Ilyin Evgeny Ivanovich**, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Lifting & Transport Machines and Equipment” of Bryansk State Technical University, Phone:+7(950)-692-80-08.