

Анализ динамики механизма передвижения мостового крана с частотным управлением привода

© В.С. Ловейкин, Ю.А. Ромасевич

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
г. Киев, 03014, Украина

При исследовании режима движения крана мостового типа с частотно-управляемым приводом использована динамическая механическая характеристика двигателей. На основании проведенного анализа основных показателей работы крана (энергетических, электрических, динамических, кинематических) установлены рациональные настройки частотных преобразователей, которые позволяют увеличить эффективность эксплуатации крана. Выявлены нежелательные характеристики работы крана, которые нельзя устранить с помощью опционной настройки частотных преобразователей.

Ключевые слова: мостовой кран, частотное управление, динамика движения, численный эксперимент, показатели эффективности, асинхронный электродвигатель, гибкий подвес.

Введение. В настоящее время значительную часть мостовых и козловых кранов оснащают частотно-управляемым асинхронным электроприводом. Существует также тенденция к замене устаревших релейно-контактных систем управления приводами кранов на микроконтроллерные, которые взаимодействуют с частотно-управляемыми электродвигателями. Данные изменения в оборудовании кранов свидетельствуют о том, что современный кран — это сложная мехатронная система, работающая в жестких производственных условиях.

Новые частотно-управляемые электроприводы, используемые в кранах, позволяют плавно регулировать величину приводного усилия (момента). Для эффективной эксплуатации грузоподъемного крана необходимо иметь достаточно полную информацию о характере действующих в его элементах усилий и моментов, для чего следует провести динамический анализ работы крана. Для частотного управления приводами крана такой анализ является особенно важным, так как в результате удастся выявить наиболее предпочтительные (рациональные) режимы эксплуатации крана.

Вопросы динамического анализа работы подъемных кранов с учетом механических характеристик асинхронного привода рассмотрены

в трудах [1–9] и др. Однако в этих и других исследованиях не в полной мере уделено внимание энергетическим, кинематическим и электрическим показателям работы крана. Поэтому целесообразно провести комплексный анализ работы грузоподъемного крана с учетом частотного управления привода, что даст возможность эффективно решать проблему подбора рациональных режимов работы крана.

Динамическая модель мостового крана. Целью данного исследования является всесторонний анализ режима работы механизма перемещения, установленного в подъемном кране мостового типа, с учетом динамики частотно-управляемого кранового привода. Для проведения расчетов выбран мостовой кран грузоподъемностью 20/5 т, динамическая модель которого приведена на рис. 1. В этой модели мостовой кран представлен как голономная механическая система с четырьмя степенями свободы. За обобщенные координаты выбраны линейные координаты приведенных масс приводного механизма x_{Π} , крановых балок $x_{к.б.}$, моста $x_{\text{м}}$ и груза x .

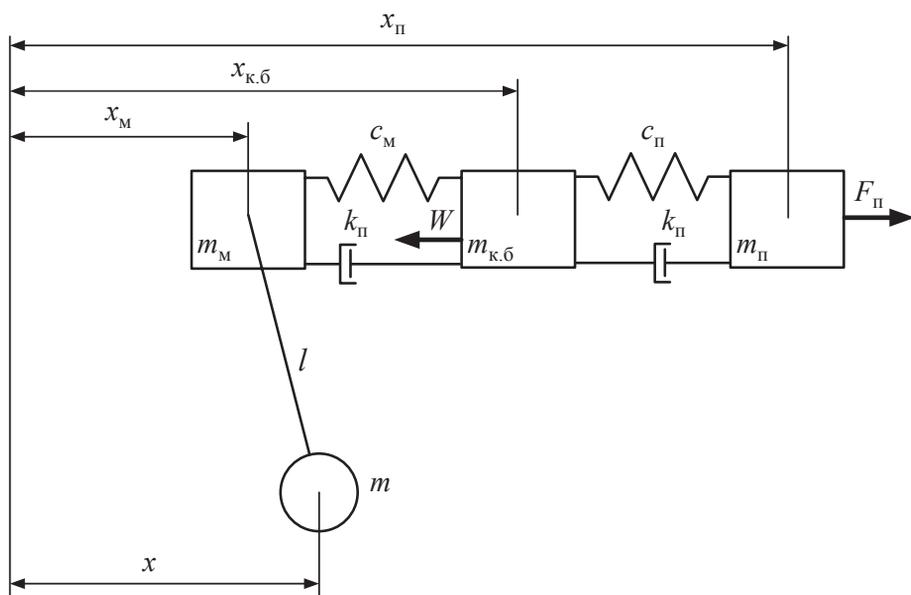


Рис. 1. Динамическая четырехмассовая модель мостового крана

В качестве приводных двигателей используются асинхронные короткозамкнутые двигатели МТН411-6. Обобщенная математическая модель динамики движения крана с учетом характеристики привода приведена ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\
 \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\
 \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\
 \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\
 3pL_{12}(i_{1\beta}i_{2\alpha} - i_{1\alpha}i_{2\beta}) \frac{u\eta_{\text{пер}}}{r_{\text{кол}}} = m_{\text{п}} \ddot{x}_{\text{п}} + c_{\text{п}} (x_{\text{п}} - x_{\text{к.б}}) + k_{\text{п}} (\dot{x}_{\text{п}} - \dot{x}_{\text{к.б}}); \\
 m_{\text{к.б}} \ddot{x}_{\text{к.б}} = c_{\text{п}} (x_{\text{п}} - x_{\text{к.б}}) + k_{\text{п}} (\dot{x}_{\text{п}} - \dot{x}_{\text{к.б}}) - \\
 \quad - c_{\text{м}} (x_{\text{к.б}} - x_{\text{м}}) - k_{\text{м}} (\dot{x}_{\text{к.б}} - \dot{x}_{\text{м}}) - W \text{sign}(\dot{x}_{\text{к.б}}); \\
 m_{\text{м}} \ddot{x}_{\text{м}} = c_{\text{м}} (x_{\text{к.б}} - x_{\text{м}}) + k_{\text{м}} (\dot{x}_{\text{к.б}} - \dot{x}_{\text{м}}) - \frac{mg}{l} (x_{\text{м}} - x); \\
 \ddot{x} = \frac{g}{l} (x_1 - x),
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ — проекции обобщенного вектора тока статора на неподвижные координатные оси α и β ; $i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ — проекции обобщенного вектора тока ротора на неподвижные координатные оси α и β ; L_1, L_2 — индуктивности статорной и роторной обмоток соответственно; L_{12} — взаимоиндукция; k_r и k_s — коэффициенты магнитной связи ротора и статора соответственно $\left(k_r = \frac{L_{12}}{L_2}; k_s = \frac{L_{12}}{L_1} \right)$; p — количество пар полюсов электрической машины; $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ — проекции обобщенного вектора напряжения статора на координатные оси α и β $(u_{1\alpha} = U_{\text{max}} \cos(2\pi \int f dt), u_{1\beta} = U_{\text{max}} \sin(2\pi \int f dt))$, U_{max} — амплитуда фазного напряжения питания двигателя, f — частота напряжения питания двигателя; $e_{2\beta}, e_{2\alpha}$ — ЭДС, индуцируемая потокоцеплениями ротора по осям α и β соответственно, $(e_{2\alpha} = p\omega_{\text{дв}}(L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2, e_{2\beta} = p\omega_{\text{дв}}(L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) - i_{2\beta} R_2)$; R_1 — активное сопротивление статорной обмотки; R_2 — приведенное к статору активное сопротивление роторной обмотки; δ — коэффициент рассеяния $\left(\delta = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{X_1}{2\pi f L_{12}}\right) \left(1 + \frac{X_2}{2\pi f L_{12}}\right)} \right)$; X_1 — индуктивное сопро-

тивление статорной обмотки; X_2 — приведенное к статору индуктивное сопротивление роторной обмотки; W — сопротивление перемещению мостового крана, приложенное к колесам концевых балок; l — длина гибкого подвеса груза; g — ускорение свободного падения; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передач привода крана; $r_{\text{кол}}$ — радиус приводного колеса механизма перемещения крана; $m_{\text{п}}, m_{\text{к.б}}, m_{\text{м}}, m$ — приведенные массы привода, концевых балок, моста и груза соответственно; $c_{\text{п}}, c_{\text{м}}$ — жесткости привода и моста крана соответственно; $k_{\text{п}}, k_{\text{м}}$ — коэффициенты демпфирования привода и кранового моста соответственно.

Примем, что начальные условия моделирования движения крана — нулевые:

$$\begin{aligned} i_{1\alpha}(0) = i_{1\beta}(0) = i_{2\alpha}(0) = i_{2\beta}(0) = x_{\text{п}}(0) = \dot{x}_{\text{п}}(0) = \\ = x_{\text{к.б}}(0) = \dot{x}_{\text{к.б}}(0) = x_{\text{м}}(0) = \dot{x}_{\text{м}}(0) = x(0) = \dot{x}(0) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Нулевые значения токов означают, что любые электромагнитные процессы в электрических двигателях к началу движения отсутствуют. Интегрируем системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) численным методом Рунге–Кутта [10].

Современные частотные преобразователи имеют опционные настройки, которые можно легко изменять. При этом изменяется характер возмущения, действующий в динамической системе крана. Ниже приведены основные опции частотных преобразователей [11]:

продолжительность разгона и торможения — изменяется в диапазоне значений 0...3600 с с шагом 0,1 с (данная опция показывает продолжительность нарастания и убывания частоты напряжения питания от нулевого значения к установившемуся; реальная продолжительность разгона и торможения механизма может отличаться от значения конкретной настройки);

характеристика разгона и торможения — существует, как правило, три стандартных характеристики: линейная, S-подобная и двойная S-подобная;

начальное напряжение питания — служит для обеспечения начального крутящего момента двигателя, достаточного для преодоления сил сопротивления; напряжение питания изменяется согласно зависимости:

$$U_{\text{пт}} = U_0 + (U_{\text{ном}} - U_0) \frac{f}{f_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где U_0 — начальное значение напряжения питания; $U_{\text{ном}} = 380$ В — номинальное напряжение питания двигателя; $f_{\text{ном}} = 50$ Гц — номинальная частота напряжения питания двигателя. Как правило, значение U_0 изменяется в пределах от 0 до $0,3U_{\text{ном}}$.

Движение механизма перемещения мостового крана. При проведении анализа движения данного механизма изменялись три независимых фактора: длина гибкого подвеса, продолжительность разгона и торможения, начальное напряжение питания двигателей. Покажем, на каких уровнях варьируются независимые факторы. Длина гибкого подвеса составляет 3, 8 и 15 м. Продолжительность разгона и торможения выбрана 3 и 6 с. Начальное напряжение питания составляет 0; $0,1U_{\text{НОМ}}$ и $0,3U_{\text{НОМ}}$. Все численные эксперименты проведены для линейной характеристики разгона и торможения. Таким образом, количество расчетных экспериментов составляет $3^2 \cdot 2 = 18$. В каждом эксперименте необходимо определить 13 показателей эффективности работы крана:

энергетические — затраты энергии E на выполнение движения; потери энергии ΔE в электродвигателе; относительные потери энергии

$$\left(\Delta \tilde{E} = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\% \right);$$

электрические — максимальный электромагнитный момент M_{max} двигателя; кратность максимального момента двигателя $\left(\tilde{M}_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} \right);$

максимальный ток I_{max} двигателя; кратность максимального тока $\left(\tilde{I}_{\text{max}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{НОМ}} \sqrt{2}} \right)$ двигателя;

динамические — максимальный момент $M_{\text{п. max}}$ на быстроходном валу привода; максимальное приведенное усилие $R_{\text{м. max}}$, действующее на мост;

кинематические — максимальное отклонение каната Δx_{max} с грузом от вертикали; максимальный угол отклонения $\Delta \varphi_{\text{max}}$ каната с грузом от вертикали; линейная амплитуда Δx_{maxT} остаточных колебаний каната с грузом после остановки крана; угловая амплитуда $\Delta \varphi_{\text{maxT}}$ остаточных колебаний каната с грузом после остановки крана.

Все показатели занесены в таблицу, в которой по три значения каждого показателя соответствуют начальным напряжениям питания двигателя — 0; 10 % и 30 % от $U_{\text{НОМ}}$.

Проведем последовательный анализ данных таблицы. Продолжительность разгона и торможения, а также начальное значение напряжения питания двигателя существенно влияет на энергетические показатели движения крана. При продолжительности разгона и торможения 3 с и нулевом начальном напряжении питания потери и затраты энергии приблизительно в 2 раза превышают аналогичные показатели, если продолжительность разгона и торможения составляет 6 с и ненулевое начальное напряжение (10 % и 30 % от $U_{\text{НОМ}}$). Причина этого заключается в том, что при незначительной продолжительности разгона и торможе-

Показатели эффективности работы мостового крана

Показатель	Длина гибкого подвеса груза, м					
	3	8	15	3	8	15
	Продолжительность разгона и торможения, с					
	3			6		
E , Дж	484788	468632	469440	220918	218512	225342
	228357	256749	271938	221623	219377	225761
	228929	257845	273506	226489	224212	230468
ΔE , Дж	321551	286058	289916	26343	24366	26694
	33571	42398	41252	26935	25051	27072
	34022	43452	42887	31731	29813	31719
\tilde{E} , %	66,32	61,00	61,75	11,92	11,15	11,84
	14,70	16,51	15,16	12,15	11,41	11,99
	14,86	16,85	15,68	14,01	13,29	13,76
M_{\max} , Нм	209	237	202	201		
		212	209			
\tilde{M}_{\max}	3,74	4,24	3,62	3,60		
		3,79	3,75			
I_{\max} , А	249			181	188	191
	160			152		
	148			145		
\tilde{I}_{\max}	6,14			4,46	4,65	4,70
	3,95			3,75		
	3,65			3,58		
$M_{п. \max}$, Нм	776	772	757	150	165	168
	247	245		187	173	
	306			200	186	180
$R_{м. \max}$, Н	59156	44123	43585	21668	23359	24968
	32676	41908	39915	36873	34318	33484
	47357	42854	41419	36498	34154	33381
Δx_{\max} , м	0,285	1,014	1,272	0,165	0,355	0,965
	0,291	1,155	2,082	0,160	0,342	0,952
	0,291	1,153	2,080	0,159	0,343	0,953
$\Delta \varphi_{\max}$, рад	0,095	0,126	0,084	0,055	0,044	0,064
	0,097	0,144	0,138	0,053	0,042	0,063
	0,097	0,144	0,138			
$\Delta x_{\max T}$, м	0,096	1,009	1,270	0,115	0,092	0,754
	0,136	1,154	2,124	0,112	0,095	0,745
	0,138	1,152	2,118			
$\Delta \varphi_{\max T}$, рад	0,032	0,125	0,084	0,037	0,011	0,049
	0,045	0,144	0,141			
	0,046	0,144	0,141			

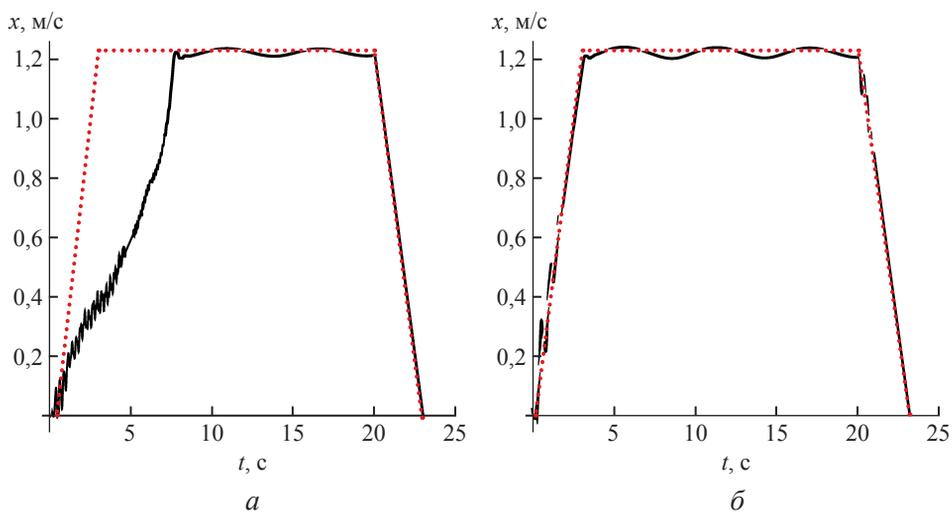


Рис. 2. Скорость движения моста крана при продолжительности разгона и торможения 3 с, длине гибкого подвеса 8 м и начальном напряжении питания двигателей 0 (а) и 30 % (б) от $U_{\text{ном}}$

ния двигатель работает в режиме, близком к прямому пуску, т. е. скольжение двигателя, а следовательно, и потери довольно значительны. Ввиду больших потерь растет общее энергопотребление электропривода крана. Повышение начального напряжения питания двигателя приводит к тому, что увеличивается его крутящий момент, и двигатель лучше «отрабатывает» угловую скорость (рис. 2). Заданная (установившаяся) скорость движения крана, которая пропорциональна частоте напряжения питания двигателя, показана на рис. 2 линией серого цвета.

При увеличении начального напряжения питания несколько возрастают потери энергии в приводе крана. Это объясняется тем, что при повышении начального напряжения питания двигателей возрастает начальный ток двигателя и соответственно тепловые потери энергии во время пуска. Отметим, что указанный рост энергетических потерь незначительный; корреляция между энергетическими показателями и длиной гибкого подвеса груза отсутствует.

Электрические показатели крана. На максимальное значение тока, протекающего по обмоткам электродвигателя, существенное влияние оказывает продолжительность разгона и торможения и в меньшей мере — величина начального напряжения. Зависимость между длиной подвеса и величиной максимального тока отсутствует. С ростом продолжительности разгона и торможения, а также начального напряжения питания двигателя максимальное значение тока уменьшается. Для анализа зависимости I_{max} и U_0 приведем графики токов, которые построены по данным расчетных экспериментов (рис. 3). Увеличение

начального напряжения питания двигателя (см. рис. 3) приводит к ускорению процесса стабилизации тока (уменьшается продолжительность электромагнитного переходного процесса в двигателе).

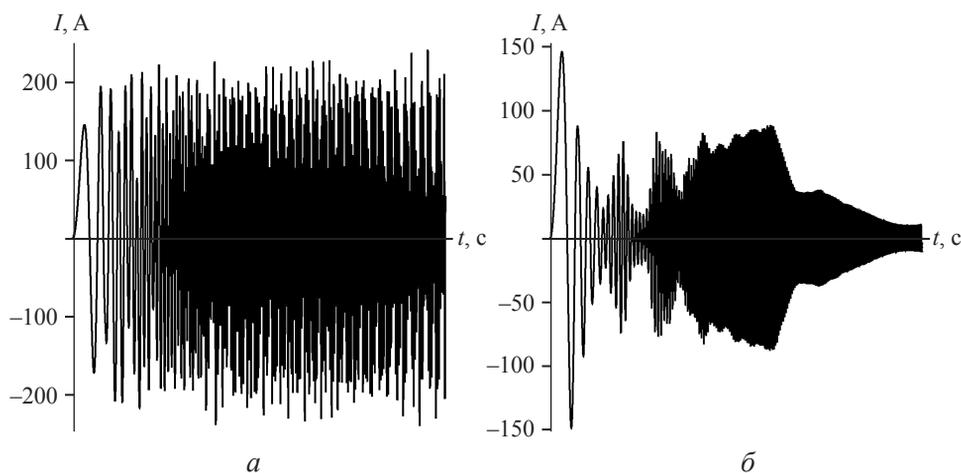


Рис. 3. Ток в обмотке фазы А двигателя при продолжительности разгона и торможения 3 с и начальном напряжении 0 (а) и 30 % (б) от $U_{\text{ном}}$

В случае нулевого значения начального напряжения питания двигатель не успевает набрать обороты, поскольку крутящий момент имеет небольшое значение. В результате этого продолжительность электромагнитного переходного процесса двигателя затягивается, приводя к возникновению пиков тока (рис. 3, а).

Максимальный электромагнитный момент двигателя не зависит от длины гибкого подвеса груза. При увеличении фактора продолжительности разгона и торможения максимальное значение электромагнитного момента несколько уменьшается. Таким образом, имеет место слабая корреляция между продолжительностью разгона и торможения и максимальным значением электромагнитного момента двигателя.

Динамические показатели движения мостового крана. Согласно данным таблицы, видим, что для продолжительности разгона и торможения 3 с увеличение начального напряжения питания с 0 до 10 % от $U_{\text{ном}}$ приводит к уменьшению максимальных значений приведенного усилия в мосту крана и момента на быстроходном валу привода. При дальнейшем повышении начального значения напряжения эти показатели увеличиваются. Если продолжительность разгона и торможения крана составляет 6 с, то увеличение U_0 приводит к росту динамических показателей.

Таким образом, зависимость динамических показателей от U_0 нелинейна: вероятно, она имеет минимум, который желательно найти. При изменении параметров крана (исследование другого крана) мини-

мум может быть достигнут уже при других параметрах. Поэтому перед введением крана в эксплуатацию необходимо проводить моделирование его работы для того, чтобы установить оптимальные или хотя бы рациональные настройки частотного привода.

Зависимость между динамическими показателями и длиной гибкого подвеса отсутствует. Это, очевидно, является следствием того, что частоты колебаний груза на гибком подвесе и элементов привода и моста крана различаются в несколько раз, и потому не имеют взаимного влияния.

При исследовании колебаний груза, закрепленного на гибком подвесе, установлено, что максимальный угол отклонения каната с грузом от вертикали составляет $0,144$ рад ($8,2^\circ$). Это отвечает продолжительности разгона и торможения 3 с и длине гибкого подвеса 8 м при начальных напряжениях питания двигателей 10% и 30% от $U_{ном}$. Для этих же расчетных экспериментов характерно и максимальное значение амплитуды остаточных колебаний груза, также равное $0,144$ рад. При увеличении продолжительности разгона и торможения с 3 до 6 с амплитуда колебаний груза в процессе движения крана и после его остановки уменьшается соответственно в $2,28$ и $2,94$ раз. Однако колебания не устраняются полностью, и эта проблема не может быть решена с помощью рациональной настройки частотных преобразователей: в данном случае требуются другие подходы, например, использование оптимального управления краном.

Необходимо отметить, что величина остаточных колебаний в значительной степени зависит от фазы колебаний груза в начале торможения, поэтому строить общие заключения относительно влияния того или другого фактора на кинематические показатели движения мостового крана с грузом нельзя.

Выводы

1. Значительное влияние на энергетические потери в электроприводе мостового крана, максимальные значения тока оказывают продолжительность разгона и торможения, а также начальное напряжение питания двигателей. Длину гибкого подвеса можно не учитывать при определении максимальных значений энергетических и электрических показателей работы крана.

2. Для установления рациональных настроек частотных преобразователей, которые питают электропривод механизма перемещения крана, производителям кранов рекомендуется проводить динамический анализ работы крана перед введением его в эксплуатацию.

3. Для всех проведенных расчетных экспериментов характерно наличие остаточных колебаний груза: для их устранения требуются дополнительные меры. Значения амплитуд остаточных колебаний груза на гибком подвесе зависят от фазы колебаний в начале торможения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лобов Н.А. *Динамика грузоподъемных кранов*. Москва, Машиностроение, 1987, 160 с.
- [2] Будиков Л.Я. *Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа*. Луганск, Изд-во ВУГУ, 1997, 210 с.
- [3] Герасимьяк Р.П., Лещёв В.А. *Анализ и синтез крановых электромеханических систем*. Одесса, СМИЛ, 2008, 192 с.
- [4] Григоров О.В. *Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Харьков, 1995, 386 с.
- [5] Ахтулов А.Л., Кирасиров О.М., Комерзан Е.В. Теоретическое исследование и моделирование процесса разгона грузоподъемного крана мостового типа. *Омский научный вестник*, 2008, № 1, с. 59–63.
- [6] Ловейкин В.С. *Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин*. Киев, УМК ВО, 1990, 168 с.
- [7] Синальщикова А.В. *Динамика и сейсмостойкость мостовых кранов*, Дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2000, 156 с.
- [8] Кабанов С.А., Никулин Е.Н., Якушев Б.С., Якушева Д.Б. Управление перемещением груза мостовым краном по методу обратных задач динамики. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2011, № 1, с. 30–33.
- [9] Теличко Л.Я., Дорофеев А.А. Система управления электроприводами, обеспечивающая бесперекусное передвижение мостовых кранов. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2012, № 3, т. 6, с. 113–116.
- [10] Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. *Численные методы*. Москва, Физматлит, 2004, 400 с.
- [11] *Преобразователи частоты FR-E7: руководство по эксплуатации: артикул 212650. Версия В*. Mitsubishi Electric Industrial Automation, 2008, 512 с.

Статья поступила в редакцию 25.03.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

В.С. Ловейкин, Ю.А. Ромасевич. Анализ динамики механизма передвижения мостового крана с частотным управлением привода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/731.html>

Ловейкин Вячеслав Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, академик Подъемно-транспортной академии наук Украины; заведующий кафедрой конструирования машин Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Область деятельности и научные интересы: динамика машин и механизмов, подъемно-транспортная техника, оптимальное управление

Ромасевич Юрий Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования машин Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Область деятельности и научные интересы: оптимальное управление, динамика грузоподъемных машин, мехатроника, электропривод. e-mail: d.um@mail.ru