

УДК 621.874  
DOI: 10.12737/17144

Г. А. Федяева, Т.В. Смородова, Д. В. Кочевин, Д.В. Конохов

## ЧАСТОТНО-ТОКОВАЯ СИСТЕМА РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА

Представлена частотно-токовая система релейно-векторного управления электроприводом механизма передвижения, позволяющая корректировать поперечное смещение с высоким быстродействием и точностью. Приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** мостовой кран, асинхронный электропривод, система управления, перекоп, поперечное смещение, блок коррекции, бесконтактные датчики, электромеханическая модель.

G.A. Fedyeva, T.B. Smorudova, D.V. Kochevinov, D.V. Konokhov

## FREQUENCY-CURRENT SYSTEM FOR RELAY VECTOR CONTROL OF NONSYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN BRIDGE CRANE TRAVEL MECHANISM

This paper reports the variant for the advancement of the functional circuit and algorithms to control a bridge crane travels with the correction of misalignment and transverse displacement on basis of the use of new systems of a non-synchronous electric drive with frequency control. It is offered to use a simple and reliable frequency – current with an autonomous inverter of current and a relay-vector algorithm of control. A functional circuit of the system of frequency-current control for the mechanism of a bridge crane travel with the correction of misalignment and transverse displacement. To analyze a crane position there are used differential values obtained by means of the indication difference in contactless sensors measuring a distance from the preset crane points to rails on the opposite

supports. The procedure for the computation of control system parameters is stated. For the check of created functional circuits and algorithms of control there is used a complex electromechanical computer model of a bridge crane with a high degree of detailed elaboration (a virtual prototype of a bridge crane). The modeling results of are shown. The shown frequency – current system of control with the correction of misalignment and transverse displacement allows the decrease of threshold differential valuations and the increase of speed and accuracy of regulation.

**Key words:** bridge crane, non-synchronous electric drive, control system, misalignment, transverse displacement, correction block, contactless sensors, electromechanical model.

Подъемно-транспортные машины широко используются для перемещения грузов в производственных отраслях, на транспорте и в строительстве. В наиболее тяжелых условиях и интенсивных режимах работают мостовые краны. Раскачивание транспортируемого груза и перекоп фермы моста вызывают динамические перегрузки, что ведет к преждевременному выходу из строя элементов механизмов кранов и подкрановых конструкций.

Самым эффективным способом снижения динамических нагрузок является модернизация существующих схем электроприводов и внедрение новых. В настоящее время в подъемно-транспортном машиностроении активно внедряются асинхронные двигатели с короткозамкнутым

ротором (АКЗ). Это открывает широкие возможности для создания высокодинамичных способов и алгоритмов управления в рамках систем асинхронного электропривода различного класса.

В данной статье рассмотрен вариант совершенствования функциональной схемы и алгоритмов управления механизма передвижения мостового крана с коррекцией перекопа и поперечного смещения на базе использования новых систем асинхронного частотно-регулируемого электропривода. Это позволит снизить динамические нагрузки, вызываемые перекопом и поперечным смещением тележки с грузом, и обеспечить бесперекопное движение.

Для проверки созданных функциональных схем и алгоритмов управления была использована комплексная электро-механическая компьютерная модель мостового крана с высокой степенью детализации (виртуальный прототип мостового крана) с асинхронным электроприводом механизма передвижения на основе совмещения программных комплексов (ПК) «Универсальный механизм» («УМ») и MatLab/Simulink [1; 2]. Адекватность модели механической подсистемы мостового крана проверена путем сравнения результатов моделирования отдельных режимов движения мостового крана грузоподъемностью 70 т с аналитическими расчетами.

Основой для разработки современных систем управления асинхронными электроприводами является принцип классического векторного управления [3], который позволяет синтезировать алгоритмы управления с высокими энергетическими характеристиками. Однако они имеют ряд недостатков, связанных со сложностью системы управления и повышенной чувствительностью к возмущениям. Существенно увеличить быстродействие и снизить чувствительность, а также получить предельно достижимые динамические характеристики привода с учетом заданных физических ограничений позволяет применение принципов релейно-векторного формирования алгоритмов управления [4].

Для синтеза систем управления применяется математическое описание асинхронного двигателя на основе обобщенной машины. Уравнения наиболее компактно записываются с использованием метода пространственного вектора [3]:

$$\begin{aligned}\vec{u}_s &= R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\psi}_s; \\ \vec{u}_r &= R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_{эл}) \vec{\psi}_r; \\ \vec{\psi}_s &= L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r; \\ \vec{\psi}_r &= L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r; \\ M &= k_M Mod(\vec{\psi}_s \times \vec{i}_s); \\ \frac{d\omega}{dt} &= (M - M_c) / J,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\omega_{эл} = p_{II}\omega$ ,  $p_{II}$  – число пар полюсов двигателя;  $\omega$  – угловая скорость (частота вращения) ротора;  $\vec{i}_s, \vec{\psi}_s$  – результирующие векторы потокосцеплений статора и ротора асинхронной машины соответственно;  $\vec{u}_s, \vec{i}_s$  и  $\vec{u}_r, \vec{i}_r$  – векторы напряжений и токов статора и ротора соответственно, для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором  $\vec{u}_r = 0$ ;  $R_s, R_r, L_s, L_r$  и  $L_m$  – активные сопротивления, полные индуктивности обмоток статора и ротора, индуктивность от главного потока соответственно (параметры ротора и  $L_m$  приведены к статору);  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_c$  – момент сопротивления на валу;  $J$  – суммарный момент инерции ротора и связанных с ним масс;  $\omega_k$  – частота вращения системы координат;  $Mod$  – модуль векторного произведения;  $k_M$  – коэффициент пропорциональности (свой для каждой пары векторов).

Для реализации в электроприводе механизма передвижения мостового крана предлагается использовать простую и надежную частотно-токовую систему с автономным инвертором напряжения (АИН) и релейно-векторным алгоритмом управления. Алгоритм реализуется в осях  $x, y$ , вращающихся со скоростью магнитного поля АКЗ, при условии  $\psi_R = \psi_{Rx} = \psi_{Ry} = const$ , где  $\psi_{Rn}$  – номинальное потокосцепление ротора.

Функциональная схема системы частотно-токового управления механизма передвижения мостового крана с коррекцией перекося и поперечного смещения при использовании четырех датчиков расстояния представлена на рис. 1 [5]. Данная система содержит для каждого двигателя (M1/M2) три внутренних контура релейного регулирования фазных токов (РФТ) статора, обеспечивающих работу АИН в токовом режиме. Гистерезис релейного регулятора  $\delta$  выбирается исходя из допустимой величины пульсаций электромагнитного момента и допустимой частоты переключений вентилях АИН. Распределители импульсов (РИ) осуществляют распределение сигналов управления по шести ключам АИН с учетом формирования задержек при переключениях ключей одной фазы.

Данная система управления представляет собой замкнутую двухконтурную систему регулирования скорости АКЗ (M1/M2) с коррекцией перекаса по сигналам бесконтактных датчиков расстояния. Обратные связи в соответствующих контурах регулирования формируются с учетом принятых коэффициентов обратной связи по скорости ( $K_{oc}$ ) и току ( $K_{от}$ ). Блок задания момента (БЗМ) формирует сигнал задания момента двигателя с учетом ограничений. Сигнал  $I_{3y}$  (сигнал задания тока по оси  $y$ ) задает момент двигателя, сигнал  $I_{3x}$  (сигнал задания тока по оси  $x$ ) задает

величину потокосцепления ротора.

Переход от системы координат  $x, y$  к фазным координатам осуществляется координатным преобразователем (КП). Необходимая для этого угловая скорость магнитного поля АКЗ определяется выражением

$$\omega_0 = \omega + \omega_{ск} \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – сигнал задания угловой скорости магнитного поля АКЗ;  $\omega$  – сигнал задания угловой скорости ротора двигателя;  $\omega_{ск}$  – сигнал задания угловой скорости скольжения.

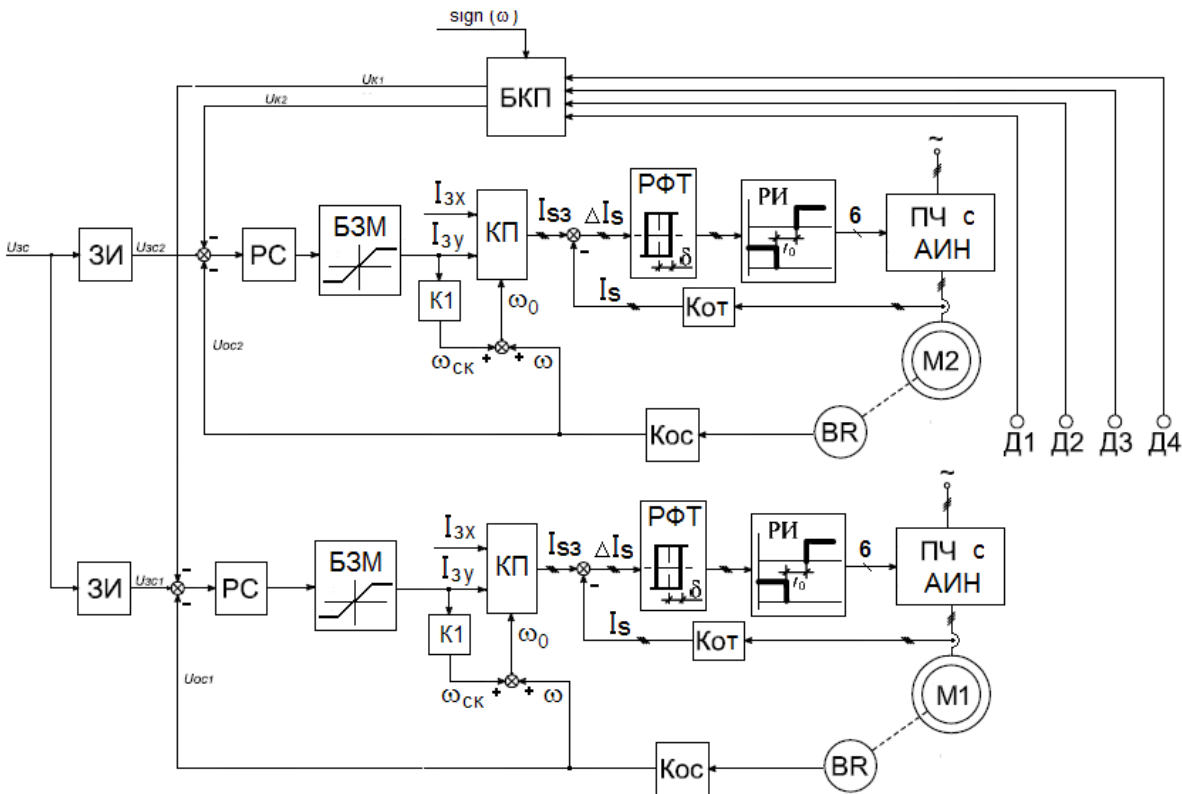


Рис. 1. Функциональная схема системы частотно-токового управления механизма передвижения мостового крана с коррекцией перекаса и поперечного смещения

При  $\psi_R = const$  угловая скорость скольжения пропорциональна моменту. Коэффициент пропорциональности  $K_1$  определяется с учетом уравнения, связывающего скорость скольжения с током статора по оси  $y$ , по выражению [6]

$$K_1 = L_m K_{oc} / (K_{от} p T_2), \quad (3)$$

где  $K_1$  – коэффициент пропорциональности между сигналом задания тока статора по оси  $y$  и сигналом задания угловой скорости скольжения;  $T_2$  – постоянная време-

ни роторной цепи,

$$T_2 = L_R / R_R.$$

Координатный преобразователь КП осуществляет преобразование сигналов обобщенной машины, представленной уравнениями (1), из двухфазной координатной системы  $x, y$ , вращающейся со скоростью магнитного поля, в естественную трехфазную неподвижную систему координат  $A, B, C$  по следующим формулам:

$$\begin{aligned} I_{3A} &= I_{3\alpha}; \\ I_{3B} &= \frac{\sqrt{3}}{2} I_{3\beta} - \frac{1}{2} I_{3\alpha}; \\ I_{3C} &= -\frac{\sqrt{3}}{2} I_{3\beta} - \frac{1}{2} I_{3\alpha}, \end{aligned} \tag{4}$$

где

$$\begin{aligned} I_{3\alpha} &= I_{3X} \cos [(p_{II}\omega_0 / K_{OC})t] - I_{3Y} \sin [(p_{II}\omega_0 / K_{OC})t]; \\ I_{3\beta} &= I_{3X} \sin [(p_{II}\omega_0 / K_{OC})t] - I_{3Y} \cos [(p_{II}\omega_0 / K_{OC})t]. \end{aligned} \tag{5}$$

Электромагнитный момент двигателей (M1/M2) в данной системе пропорционален току по оси  $y$  и определяется по формуле

$$M = (3/2)p_{II}K_2\psi_R I_{Sy}, \tag{6}$$

где  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $I_{Sy}$  – ток статора по оси  $y$ ;  $K_2$  – коэффициент пропорциональности,

$$K_2 = L_m/L_R.$$

Итак, на выходе координатного преобразователя КП мы имеем задание на токи статора в фазах А, В и С. Ввиду высокого быстродействия релейных регуляторов тока внутренний контур регулирования момента (тока по оси  $y$ , которому пропорционален момент) является практически безынерционным.

Внешний контур скорости кроме почти безынерционного контура момента включает механическую часть электропривода. С учетом того, что постоянная времени контура момента  $\tau \approx 0$ , передаточная функция контура скорости имеет вид

$$W_{KCP} = W_{PC} \frac{1}{K_{OM}} \frac{1/K_{BT}}{T_M p + 1} K_{OC}, \tag{7}$$

где  $W_{KCP}$  – передаточная функция разомкнутого контура скорости;  $K_{OM}$  – коэффициент обратной связи по моменту;  $T_M$  – механическая постоянная времени.

Коэффициент обратной связи по моменту можно рассчитать, исходя из максимальных значений электромагнитного момента и тока по оси  $y$ , по формуле

$$K_{OM} = K_{OT} M_m / I_{Sym}, \tag{8}$$

где  $M_m$  – максимальное значение электромагнитного момента;  $I_{Sym}$  – максимальное значение тока по оси  $y$ .

Нагрузку электропривода в данной системе можно принять в виде вязкого трения, тогда механическая постоянная времени определяется как

$$T_M = J_{\Sigma} / K_{BT}, \tag{9}$$

где  $K_{BT}$  – коэффициент вязкого трения.

В электроприводе механизма передвижения мостового крана с целью коррекции перекоса регулятор скорости целесообразно выбрать пропорциональным, тогда коэффициент усиления регулятора скорости определяется по выражению

$$K_{PC} = K_Y K_{OM} K_{BT} / K_{OC}, \tag{10}$$

где  $K_Y$  – коэффициент усиления разомкнутого контура скорости.

Для анализа положения крана используются дифференциальные значения, получаемые посредством разности показаний бесконтактных датчиков Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>, Д<sub>3</sub>, Д<sub>4</sub>

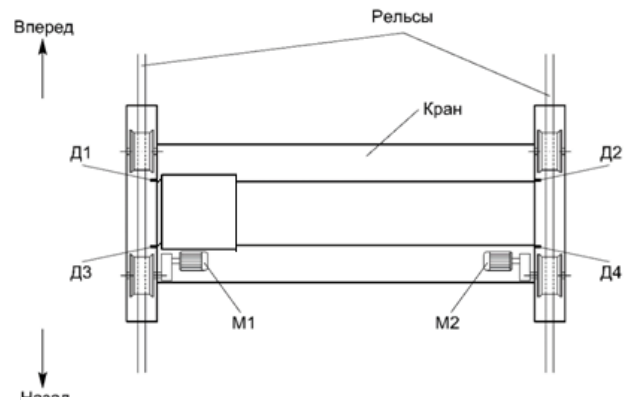


Рис. 2. Схема расположения бесконтактных датчиков: М1 и М2 – электродвигатели левой и правой опор соответственно

(рис. 2), измеряющих расстояния от заданных точек крана до рельсов на противоположных опорах:

$$\Delta_{12} = L_{D1} - L_{D2};$$

$$\Delta_{34} = L_{D3} - L_{D4},$$

где  $\Delta_{12}$ ,  $\Delta_{34}$  – дифференциальные значения;

$L_{Д1}, L_{Д2}, L_{Д3}, L_{Д4}$  – показания датчиков  $Д_1, Д_2, Д_3, Д_4$  соответственно, диапазон изменения  $[0 \dots L_{Дi \max}]$  [2].

Измеренные дифференциальные значения позволяют однозначно идентифицировать как перекося крана относительно подкрановых путей, так и его поперечное смещение. На основании этих значений с учетом направления движения крана формируется сигнал коррекции  $U_{k1}/U_{k2}$ , который вычитается из сигнала задания скорости  $U_{3C1}/U_{3C2}$  одного из электродвигателей, обеспечивая таким образом выравнивание крана в сложившейся ситуации. В случае бокового смещения для его устранения перекося формируется принудительно. Блок коррекции перекося БКП (рис. 1) выполняет функции вычисления  $\Delta_{12}$  и  $\Delta_{34}$  исходя из показаний датчиков, а также формирования сигнала коррекции на основе полученных данных. При этом учитывается текущее направление движения крана (сигнал  $sign[\omega]$ ), так как для эффективного устранения перекося при различных направлениях движения требуются разные корректирующие воздействия.

Значение корректирующего воздействия рассчитывается пропорционально максимальной из величин  $\Delta_{12}$  и  $\Delta_{34}$  по формуле

$$U_k = k \cdot \max(\Delta_{12}; \Delta_{34}),$$

где  $U_k$  – значение корректирующего воздействия;  $k$  – коэффициент пропорциональности, который выбирается в зависимости от уровней сигналов и допустимого поперечного смещения крана.

Поскольку опасен не перекося, а поперечное (боковое) смещение моста, кото-

рое он вызывает, можно упростить алгоритм работы блока коррекции и систему в целом, вдвое сократив число датчиков и оставив только датчики  $Д_1, Д_2$  на передних (необмоторенных) колесах [7;8]. Это приведет к определенной потере точности, так как система не будет непосредственно реагировать на перекося (а только косвенно, через контроль поперечного смещения), но будет способствовать упрощению алгоритма работы и его аппаратной реализации. Блок коррекции в этом случае можно реализовать как релейный регулятор с гистерезисным допуском  $\Delta_{12}$ , а корректирующее воздействие будет вычисляться по формуле

$$U_k = k \Delta_{12}.$$

Проверку созданных функциональных схем и алгоритмов управления целесообразно вести на основе компьютерного моделирования. На рис. 3-9 в качестве примера представлены результаты моделирования движения мостового крана с релейно-векторной системой управления (алгоритм с двумя датчиками) при условии, что тележка расположена вблизи левой опоры (рис. 2). Для наглядности приведены результаты с коррекцией и без коррекции.

Из графиков видно, что в начале приложения корректирующего воздействия в данном случае перекося изменяется довольно резко (рис. 3) и далее остается примерно постоянным, обеспечивая требуемое поперечное смещение для поддержания центрального положения крана (рис. 4).

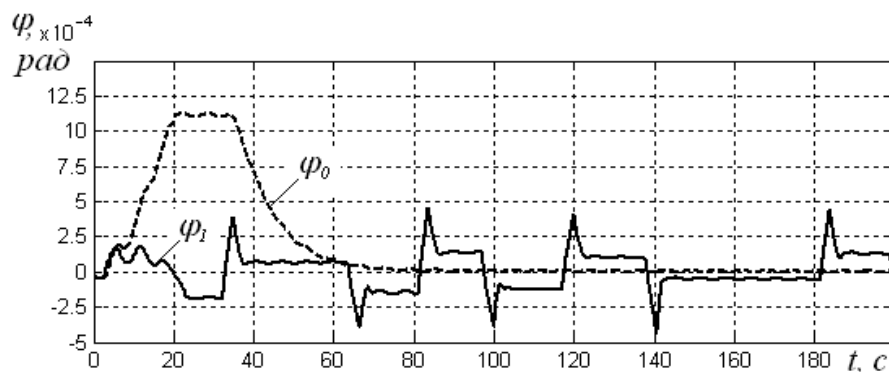
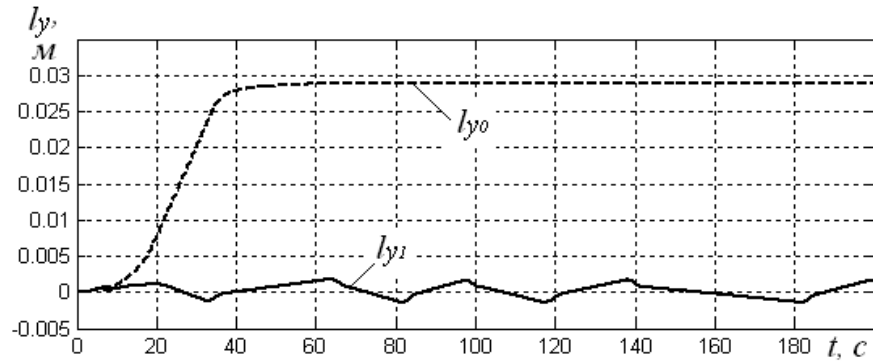


Рис. 3. Перекося крана:  $\varphi_0$  – без коррекции,  $\varphi_1$  – с коррекцией

Рис. 4. Поперечное смещение:  $l_{y0}$  – без коррекции,  $l_{y1}$  – с коррекцией

Без коррекции максимальное поперечное смещение и соприкосновение колес крана с рельсами происходит за 35 секунд. Электромагнитные моменты двигателей в

случае отсутствия коррекции (рис. 5, 6) стабилизируют скорости двигателей на заданном пропорциональным регулятором скорости уровне.

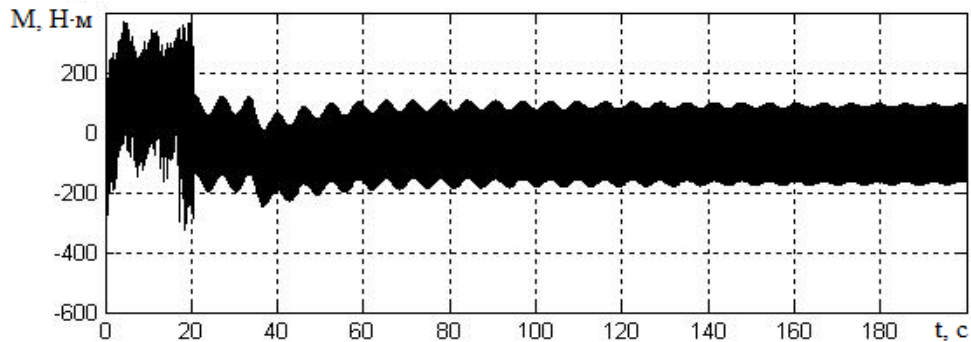


Рис. 5. Электромагнитный момент двигателя левой опоры без коррекции

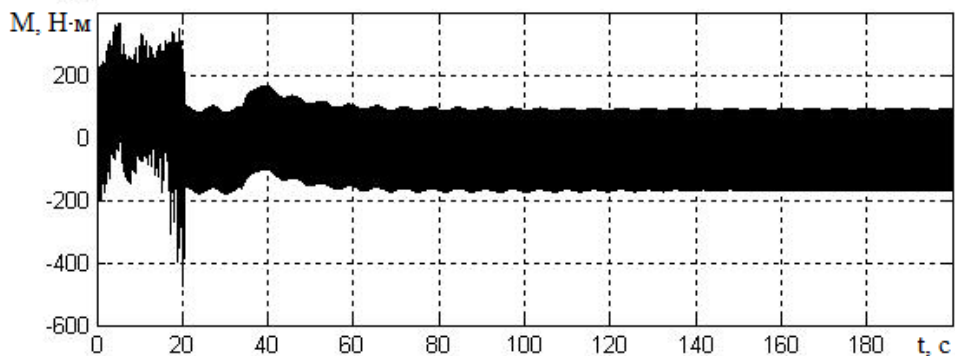


Рис. 6. Электромагнитный момент двигателя правой опоры без коррекции

Колебания электромагнитного момента с частотой около 0,2 Гц вызваны колебаниями груза и, соответственно, скорости роторов асинхронных двигателей.

Сигналы коррекции, вырабатываемые системой управления (рис. 7), вызывают требуемые изменения электромагнитного момента (рис. 8, 9).

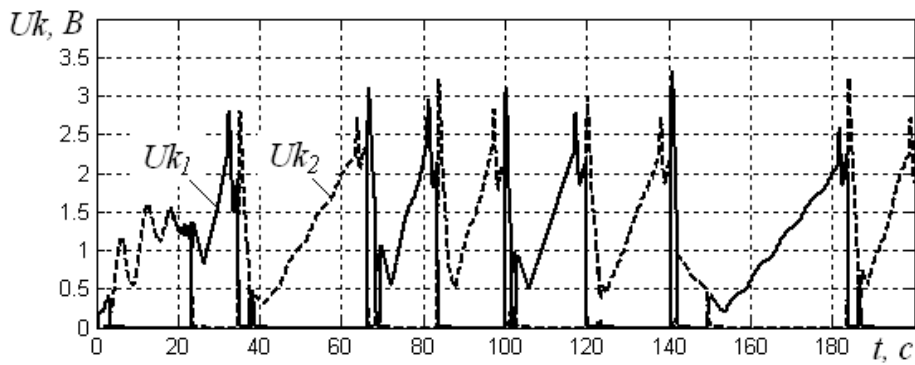
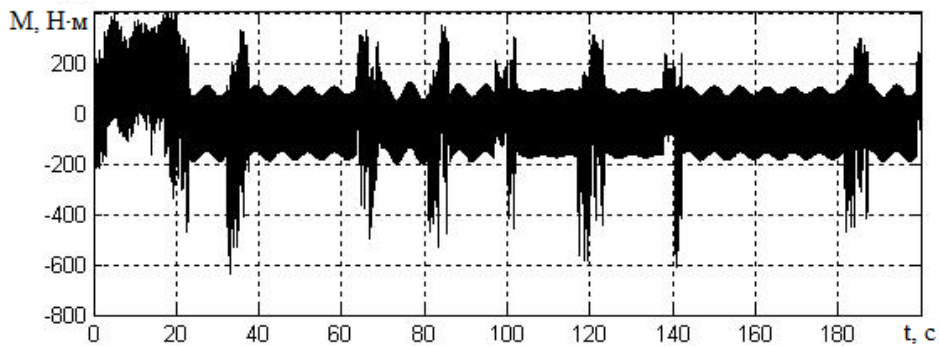
Рис. 7. Сигналы коррекции  $U_{k1}(t)$ ,  $U_{k2}(t)$ 

Рис. 8. Электромагнитный момент двигателя левой опоры с коррекцией

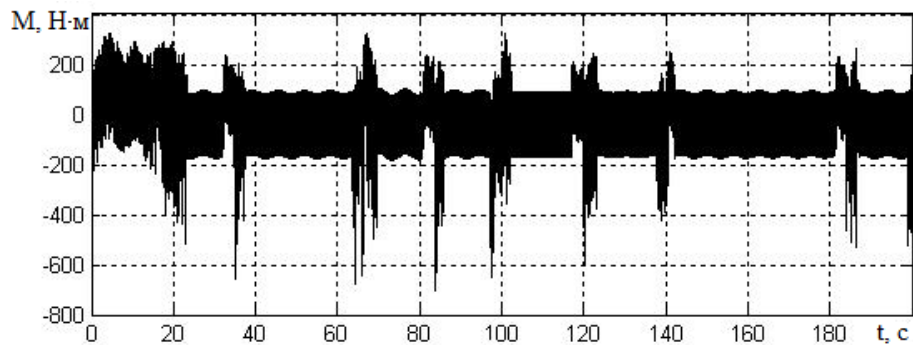


Рис. 9. Электромагнитный момент двигателя правой опоры с коррекцией

Итак, при отсутствии корректировки положения крана контакт реборд с рельсами вследствие поперечного смещения влево происходит при  $t \approx 35$  с. Поперечное смещение при этом достигает максимальной величины 28 мм. Далее кран движется с трением реборд о рельсы, что вызывает износ рельсов и подкрановых путей. При движении с коррекцией за все время моделирования не зафиксировано ни одного контакта реборд с рельсами. Кран движется практически симметрично относительно путей. В данном случае система управления препятствует возникновению смещения крана влево, одновременно воздей-

ствуя на скорости опор. Активный сигнал коррекции вычитается из сигнала задания скорости забегающей опоры, таким образом замедляя ее, и прибавляется к скорости отстающей опоры для ее ускорения. Это вызывает принудительный поворот крана, весьма резко изменяющий перекося. Пульсации электромагнитного момента (рис. 5,6,8,9) можно снизить, уменьшив гистерезис релейных регуляторов.

Представленная частотно-токовая система управления с коррекцией перекося и поперечного смещения (рис. 1) с релейно-векторным алгоритмом управления и параметрами, определяемыми по методике

(2–10), позволяет снизить пороговые дифференциальные значения и увеличить быстродействие и точность регулирования, чтобы удерживать кран наиболее близко к

оптимальному центральному положению относительно рельсов и гарантированно исключить контакт реборд с рельсами.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (НИР № 1633 (06/62) «Прогнозирование динамических процессов в электромехатронных системах»).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федяева, Г. А. Моделирование динамики электромеханической системы мостового крана / Г.А. Федяева, Д.В. Кочевинов, В.П. Лозбинец, Ф.Ю. Лозбинец // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 63-67.
2. Кочевинов, Д. В. Система управления электропривода передвижения мостового крана / Д.В. Кочевинов, Г.А. Федяева // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 4-11.
3. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие / А. А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
4. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. - 298 с.
5. Способ автоматизированного управления асинхронным электроприводом передвижения с коррекцией поперечного смещения: заявка на изобрет. 2015124617 / Федяева Г.А., Смородова Т.В., Конохов Д.В., Бойко В.Н. - Заявл. 23.06.15.
6. Зотин, В.Ф. Системы управления электроприводов / В.Ф. Зотин. – Брянск: БГТУ, 2008. – 80 с.
7. Система управления асинхронным электроприводом передвижения: пат. РФ RU 152038 / Федяева Г.А., Кочевинов Д.В., Смородова Т.В., Бутарев И.Ю. // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. – Оpubл. 27.04.15, Бюл. № 12.
8. Система автоматизированного управления асинхронным электроприводом передвижения: пат. РФ RU 152678 / Федяева Г.А., Иньков Ю.М., Феоктистов В.П., Кочевинов Д.В. // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. – Оpubл. 10.06.15, Бюл. № 16.
1. Fedyaeva, G.A., Modeling dynamics of bridge crane electromechanical system/ G.A. Fedyaeva, D.V. Kochevinov, V.P. Losbinev, F.Yu. Losbinev//*Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2014. – No 1. – pp. 63-67.
2. Kochevinov, D.V., System of bridge crane travel electric drive control / D.V. Kochevinov, G.A. Fedyaeva // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2012. – No 3. – pp. 4-11.
3. Usoltsev, A.A., *Frequency Control for Non-Synchronous Motor*: text-book / A.A. Usoltsev. – S-P.: SPSU ITMO, 2006. – pp. – 94.
4. Vinogradov, A.B., *Vector Control for Electric Drives of Alternating Current* / A.B. Vinogradov. – Ivanovo: Publishing House of ISEU, 2008. – pp. 298.
5. Method for Automated Control for Non-synchronous Electric Drive of Travel with Transverse Displacement Correction: Application for Invention. 2015124617 / Fedyaeva G.A., Smorudova T.V., Konokhov D.V., Boiko V.N., - *Applic.* 23.06.15.
6. Zotin, V.F., *Systems for Electric Drive Control* / V.F. Zotin. – Bryansk: BSTU, 2008. – pp. 80.
7. System to control non-synchronous electric drive of travel: Patent of RF RU 152038 / Fedyaeva G.A., Kochevinov D.V., Smorudova T.V., Butarev I.Yu. // *Official Journal of Russian Agency of Patents and Trade Marks. Inventions. Utility Models*. – Published 27.04.15, Journal No 12.
8. System for automated control of non-synchronous electric drive of travel: Patent of RF RU 152678 / Fedyaeva G.A., Inkov Yu.M., Feoktistov V.P., Kochevinov D.V. // *Official Journal of Russian Agency of Patents and Trade Marks. Inventions. Utility Models*. –Published 10.06.15, Journal No 16.

*Статья поступила в редколлегию 9.10.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Л.А. Потапов*



**Сведения об авторах:**

**Федяева Галина Анатольевна**, д.т.н., профессор кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: [galina-fed@yandex.ru](mailto:galina-fed@yandex.ru).

**Сморудова Татьяна Владимировна**, аспирантка кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел. (4832) 56-36-02, e-mail: [farabellum@gmail.com](mailto:farabellum@gmail.com).

**Fedyaeva Galina Anatolievna**, D.Eng., Prof. of the Dep. «Electronic, Radio-electronic and Electro-technical Systems»

Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-36-02, e-mail: [galina-fed@yandex.ru](mailto:galina-fed@yandex.ru).

**Smorudova Tatiana Vladimirovna**, Post graduate student of the Dep. «Electronic, Radio-electronic and Electro-technical Systems» Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-36-02, e-mail: [farabellum@gmail.com](mailto:farabellum@gmail.com).

**Кочевин Дмитрий Викторович**, инженер кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: [dima32rus@yandex.ru](mailto:dima32rus@yandex.ru).

**Конохов Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел. (4832) 62-37-25, e-mail: [jos924@yandex.ru](mailto:jos924@yandex.ru).

**Kochevinov Dmitry Victorovich**, Engineer of the Dep. «Electronic, Radio-electronic and Electro-technical Systems» Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-36-02, e-mail: [dima32rus@yandex.ru](mailto:dima32rus@yandex.ru).

**Konokhov Dmitry Vladimirovich**, Post graduate student of the Dep. «Electronic, Radio-electronic and Electro-technical Systems» Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 62-37-25, e-mail: [jos924@yandex.ru](mailto:jos924@yandex.ru).