

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОК МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА МОСТОВЫХ КРАНОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Варламов В.В.¹, д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной математики
и информатики (vadim.varlamov@mail.ru)*

*Кипервассер М.В.¹, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода
и промышленной электроники (kipervasser2012@ya.ru)*

Герасимук А.В.², ведущий специалист отдела электроснабжения (heavymetd17200@gmail.com)

¹ **Сибирский государственный индустриальный университет**
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
² **АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект»**
(654000, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 5)

Аннотация. Рассмотрены электромеханические процессы, протекающие при подъеме груза мостовым краном. Основная идея работы заключается в идентификации аварийного режима (перегрузки крана) методом, основанным на контроле тока статора электродвигателя подъема. Для получения диаграмм тока статора электродвигателя разработана математическая модель мостового крана (трехмассовой схемы), которая включает в себя уравнения, описывающие упругие свойства балок крана и его каната. Для описания приводного асинхронного электродвигателя принята система (α, β) -координат, неподвижных относительно статора электродвигателя. Цикл подъема груза рассматривается как последовательность трех этапов: выбор «слабины» каната; натяжение каната; отрыв и подъем груза. Для каждого этапа составлены системы дифференциальных уравнений, описывающие движение масс элементов мостового крана и поведение электрических параметров электродвигателя. Определены начальные и граничные условия для каждого из этапов. Проведены предварительные преобразования системы уравнений к решению численными методами и последующее моделирование этапов подъема грузов разной массы. Последовательное решение трех краевых задач позволяет получить величины интересующих токов статора в момент отрыва груза. Получены диаграммы токов фазы статора электродвигателя для грузов различной массы. Результаты моделирования свидетельствуют о наличии поддающейся фиксации разнице величин токов статора после отрыва груза от опорной поверхности. На основании разработанной модели и полученных результатов исследования предложена функциональная схема устройства защиты крана от перегрузки и описан принцип его работы, который заключается в контроле поднимаемой массы груза и контроле тока статора при подъеме груза. Сделан вывод о целесообразности и эффективности контроля электрических величин электродвигателя подъема для организации защиты мостового крана от перегрузок. Оценена эффективность работы предложенной системы.

Ключевые слова: ток статора, электродвигатель, защита, кран, моделирование, перегрузки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-646-651

ВВЕДЕНИЕ

Ведение технологических процессов на металлургических предприятиях обеспечивается значительным количеством технологического и ремонтного оборудования. На металлургических предприятиях одним из основных видов оборудования является грузоподъемное оборудование: мостовые краны и кранбалки различного назначения. Доля грузоподъемных механизмов в общем количестве технологического и ремонтного оборудования цехов металлургических предприятий может достигать 9 – 12 %. Например, общее количество мостовых кранов площадки строительного проката АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет порядка 530 единиц. От надежной и безопасной работы грузоподъемных кранов зависит безопасность персонала, ритмичность технологических процессов и экономические показатели предприятий. В этой связи разработка средств защиты и диагностики грузо-

подъемных механизмов от аварийных ситуаций является актуальной задачей [1, 2].

К основным аварийным ситуациям мостовых кранов можно отнести следующие события: обрыв подъемных канатов, переподъем грузозахватного органа, нарушение целостности и геометрии конструкции крана, выход из строя электродвигателя подъема. Значительная часть перечисленных аварийных ситуаций вызвана увеличением нагрузки при подъеме груза до недопустимой.

Для предотвращения аварийных режимов, вызванных подъемом грузов чрезмерной массы, используются предохранительные устройства (ограничители грузоподъемности). Предлагается к использованию несколько основных способов контроля перегрузки. Устройства с пружинно-рычажными системами не обладают достаточными точностью и быстродействием [3], тензодатчики также имеют недостаточную чувствительность [4, 5]. Возможны устройства

с применением дополнительных силовых элементов, усложняющих конструкцию и снижающих надежность защиты [6].

С учетом изложенного, а также в условиях недостатка эксплуатирующего и ремонтного персонала, для диагностики аварийной ситуации необходимо использовать все технические возможности, в том числе методы косвенного контроля. Идентификация аварийной ситуации подъема груза чрезмерной массы возможна с использованием косвенного метода, основанного на контроле электрических параметров электродвигателя механизма подъема [7, 8]. Для выявления диагностических признаков следует провести исследование модели объекта в аварийной ситуации.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА ГРУЗА КРАНОМ

Для описания механической части привода подъема мостовых кранов принята стандартная приведенная на рис. 1 трехмассовая модель с упругими связями между массами [9].

Движение масс трехмассовой модели после отрыва груза по данным работы [9] описывается выражениями

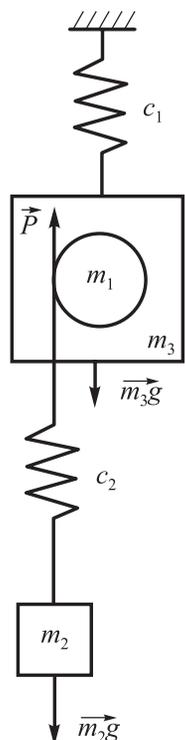


Рис. 1. Трехмассовая схема механизма подъема: m_1, m_2 и m_3 – приведенные к канату массы груза, моста и вращающихся частей механизма подъема; c_1 и c_2 – жесткости каната и моста крана; P – среднестартовая сила электродвигателя

Fig. 1. Three-mass diagram of the lifting mechanism: m_1, m_2 and m_3 are masses of the load, bridge, and rotating parts of the lifting mechanism brought to the rope; c_1 and c_2 – rigidity of rope and crane bridge; P – motor starting force

$$\begin{cases} m_1 x_1'' = P - F_k(t); \\ m_2 x_2'' = F_k(t) - Q + m_2 x_3''; \\ m_3 x_3'' = G + F_k(t) - F_{упр.м}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – перемещения масс; $Q = m_1 g$ – вес поднимаемого груза; $G = m_3 g$ – вес моста крана с тележкой; $F_k(t)$ – сила натяжения подъемного каната; $F_{упр.м}(t)$ – упругая сила балок моста.

Для описания приводного асинхронного электродвигателя принята система (α, β) -координат, неподвижных относительно статора электродвигателя [10, 11]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{мф} \sin(\omega t); \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = 0; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + r_r i_{r\alpha} + \frac{i}{R_{б\alpha\rho}} x_1' \psi_{r\beta} = 0; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} - \frac{i}{R_{б\alpha\rho}} x_1' \psi_{r\alpha} = 0; \\ \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}; \\ P = 3k(\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}), \end{cases} \quad (2)$$

где r_s и r_r – сопротивления статора и ротора; L_s и L_r – индуктивности статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность статора и ротора; ω – угловая частота; $U_{мф}$ – фазное напряжение; $\psi_{s\alpha}, \psi_{r\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\beta}$ – потокоцепления статора (ψ_s) и ротора (ψ_r) по продольной (α) и поперечной (β) осям; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ и $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – составляющие токов статора и ротора по продольной и поперечной осям; i – передаточное число механизма подъема; $R_{б\alpha\rho}$ – радиус барабана механизма подъема; $k = i/R_{б\alpha\rho}$ – коэффициент приведения электромагнитного момента двигателя к подъемному канату.

В работе [9] цикл подъема груза рассматривается как последовательность трех этапов:

- выбор «слабины» каната;
- натяжение каната;
- отрыв и подъем груза.

Для каждого из этапов с использованием выражений (1), (2) можно записать систему дифференциальных уравнений, описывающих движение масс и поведение электрических параметров двигателя [9, 10, 12].

Первый этап.

– начальные условия:

$$\begin{aligned} x_1' = 0; x_2' = 0; x_3' = 0; i_{s\alpha} = i_{s\alpha 0}; i_{s\beta} = i_{s\beta 0}; \\ i_{r\alpha} = i_{r\alpha 0}; i_{r\beta} = i_{r\beta 0}; t = 0; \end{aligned}$$

– система уравнений:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' = 3kL_m(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha}); \\ L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{\text{мф}} \sin(\omega t); \\ L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = 0; \\ L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + r_r i_{r\alpha} - \\ - kx_1'(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) = 0; \\ L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} + \\ + kx_1'(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) = 0; \end{cases} \quad (3)$$

– условие окончания:

$$F_{\kappa}(t) = c_1 x_1 > 0. \quad (4)$$

Второй этап.

– начальные условия:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_{1\kappa}' ; x_2' = 0 ; x_3' = x_{3\kappa}' ; i_{s\alpha} = i_{s\alpha\kappa} ; i_{s\beta} = i_{s\beta\kappa} ; \\ i_{r\alpha} &= i_{r\alpha\kappa} ; i_{r\beta} = i_{r\beta\kappa} ; t = t_{\kappa} ; \end{aligned}$$

– система уравнений:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' = 3kL_m(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha}) - \\ - c_1(x_1 - x_3); \\ m_3 x_3'' = G + c_1(x_1 - x_3) - c_2 x_3; \\ L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{\text{мф}} \sin(\omega t); \\ L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = 0; \\ L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + r_r i_{r\alpha} - \\ - kx_1'(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) = 0; \\ L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} + \\ + kx_1'(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

– условие окончания:

$$F_{\kappa}(t) = c_1(x_1 - x_2) = m_2 g. \quad (6)$$

Третий этап.

– начальные условия:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_{1\kappa}' ; x_2' = 0 ; x_3' = x_{3\kappa}' ; i_{s\alpha} = i_{s\alpha 2\kappa} ; i_{s\beta} = i_{s\beta 2\kappa} ; \\ i_{r\alpha} &= i_{r\alpha 2\kappa} ; i_{r\beta} = i_{r\beta 2\kappa} ; t = t_{2\kappa} ; \end{aligned}$$

– система уравнений:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' = 3kL_m(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha}) - Q - c_1(x_1 - x_2); \\ m_2 x_2'' = c_1(x_1 - x_2) - Q + m_2 x_3''; \\ m_3 x_3'' = G + c_1(x_1 - x_2) - c_2 x_3; \\ L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{\text{мф}} \sin(\omega t); \\ L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = 0; \\ L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + r_r i_{r\alpha} - kx_1'(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) = 0; \\ L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} + kx_1'(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Системы уравнений (3), (5), (7) являются задачами Коши. При этом начальные условия для каждой следующей задачи определяются по результатам расчета предыдущей.

Для приведения систем (3), (5), (7) к стандартному виду введем замену [13, 14]:

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma X_s} \Psi_{s\alpha} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \Psi_{r\alpha}; \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sigma X_s} \Psi_{s\beta} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \Psi_{r\beta}; \\ i_{r\alpha} = \frac{1}{\sigma X_r} \Psi_{r\alpha} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \Psi_{s\alpha}; \\ i_{r\beta} = \frac{1}{\sigma X_r} \Psi_{r\beta} - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} \Psi_{s\beta}, \end{cases} \quad (8)$$

где $X_m = \omega L_m$ – индуктивное сопротивление взаимной индуктивности машины; $X_r = \omega L_r$ и $X_s = \omega L_s$ – индуктивные сопротивления ротора и статора; $\sigma = \frac{X_m^2}{X_s X_r}$ – коэффициент рассеяния.

Введем также следующие обозначения:

Исходное обозначение . . . $\Psi_{s\alpha} \Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} \Psi_{r\beta} x_1' x_2' x_3' x_1 x_2 x_3$
 Замена $w_1 w_2 w_3 w_4 w_5 w_6 w_7 w_8 w_9 w_{10}$

Запишем соотношения (8) в новых обозначениях

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma X_s} w_1 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_3; \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sigma X_s} w_2 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_4; \\ i_{r\alpha} = \frac{1}{\sigma X_r} w_3 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_1; \\ i_{r\beta} = \frac{1}{\sigma X_r} w_4 - \frac{X_m}{\sigma X_r X_s} w_2. \end{cases} \quad (9)$$

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Преобразуем систему уравнений (3), (5), (7) с учетом (9) и вышеприведенной замены переменных [15 – 18].

На примере системы выражений (7) (третий этап) покажем приведение к стандартному виду. Запишем систему (7) с учетом замены и новых обозначений:

$$\begin{cases} \frac{dw_1}{dt} = -U_{\text{мф}} \sin(\omega t) - r_s i_{s\alpha}; \\ \frac{dw_2}{dt} = -r_s i_{s\beta}; \\ \frac{dw_3}{dt} = -r_r i_{r\alpha} + kw_3 w_4; \\ \frac{dw_4}{dt} = -r_r i_{r\beta} + kw_3 w_3; \\ \frac{dw_5}{dt} = \frac{3kL_m}{m_1} (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{c_1}{m_1} (w_8 - w_9); \\ \frac{dw_6}{dt} = \frac{c_1}{m_2} (w_8 - w_9) - \frac{Q}{m_2} + \frac{dw_7}{dt}; \\ \frac{dw_7}{dt} = \frac{G}{m_3} + \frac{c_1}{m_3} (w_8 - w_9) - \frac{c_2}{m_3} w_{10}; \\ \frac{dw_8}{dt} = w_5; \\ \frac{dw_9}{dt} = w_6; \\ \frac{dw_{10}}{dt} = w_7. \end{cases} \quad (10)$$

Последовательным решением трех задач Коши можно рассчитать величины интересующих токов статора. Совместное решение преобразованных выражений (3), (5), (7) позволяет получить электрические величины электродвигателя (токов статора) на этапе начала движения при отрыве груза от опорной поверхности.

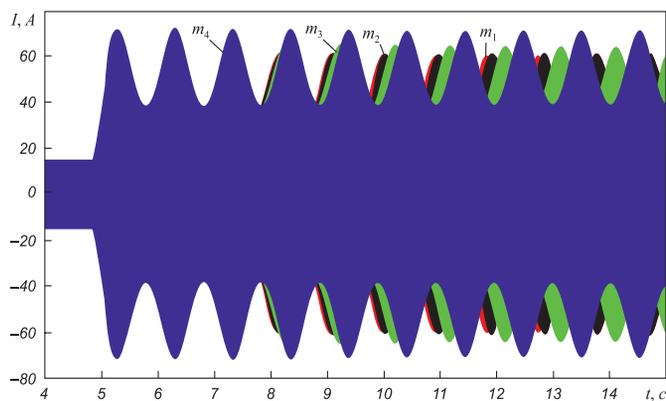


Рис. 2. Колебания тока статора электродвигателя при подъеме грузов различной массы для полной последовательности трех этапов в масштабе нескольких колебаний грузов

Fig. 2. Oscillations of current of the electric motor stator when lifting loads of different weights for a complete sequence of three stages on a scale of several loads oscillations

Приведенная методика была использована для расчетов токов статора двигателя механизма подъема ремонтного мостового крана грузоподъемностью 32 т АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в программном комплексе MatLab [19, 20].

Исследовали величины токов статора в режиме подъема грузов допустимой массы и подъема груза массой, превышающей допустимую на 3, 15 и 25 %. Результаты моделирования: величины токов статора электродвигателя подъема при отрыве от поверхности грузов массой $m_1 = 32\ 000$ кг, $m_2 = 33\ 000$ кг, $m_3 = 36\ 000$ кг и $m_4 = 40\ 000$ кг ($I_1(t)$, $I_2(t)$, $I_3(t)$ и $I_4(t)$ соответственно) показаны на рис. 2 – 4.

На рис. 2 до момента времени 4,8 с продолжается выбор «слабины» каната механизма подъема (первый этап движения механизма). На первом этапе ток статора не зависит от величины массы груза и одинаков для всех грузов. Значение тока в течение первого этапа неизменно (за исключением не изображенного на рис. 2 промежутка времени при запуске двигателя). Величина «слабины» каната принята одинаковой для всех грузов. В момент времени 4,8 с первый этап движения заканчивается в соответствии с условием (4) окончания первого этапа.

На втором этапе движения амплитудное значение тока возрастает по мере натяжения каната механизма подъема. До окончания этапа значения тока также не зависят от массы груза (рис. 2, 3).

Время начала третьего этапа движения для каждого из грузов различно (рис. 2, 3). В соответствии с условием окончания второго этапа (6) для грузов большей массы отрыв груза происходит позднее.

На третьем этапе движения амплитудные значения тока колеблются с частотой, определяемой соотношением приведенных масс и жесткостью связей. Кроме

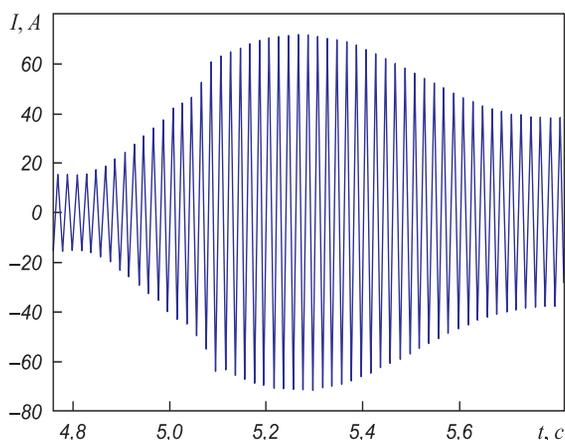


Рис. 3. Колебания тока статора электродвигателя при подъеме грузов различной массы в масштабе одного первого колебания грузов

Fig. 3. Oscillations of current of the electric motor stator when lifting loads of different weights on the scale of the first oscillation of loads

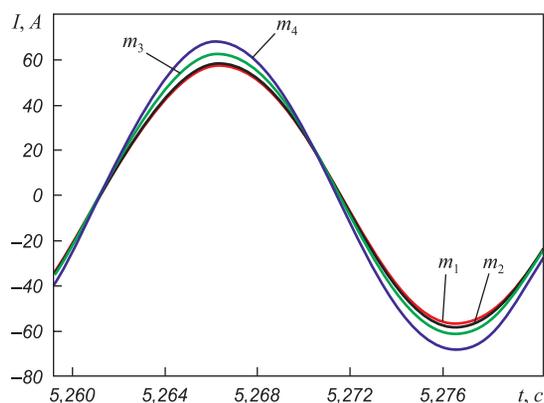


Рис. 4. Ток статора электродвигателя при подъеме грузов различной массы в масштабе одного полного колебания тока

Fig. 4. Current of the electric motor stator when lifting loads of different weights on the scale of one complete current oscillation

смещения по времени начала третьего этапа (отрыва груза) отличаются по величине мгновенные и амплитудные значения тока для разных масс m_1 , m_2 , m_3 и m_4 (рис. 2 – 4). Также наблюдается смещение колебаний по фазе для грузов различной массы. Появление различий в величинах моделируемого тока статора на третьем этапе свидетельствует о чувствительности модели к вариации массы поднимаемого груза.

Выводы

Проведено математическое моделирование процессов подъема грузов различной массы. На первых двух этапах значения тока приводного электродвигателя механизма подъема не зависят от массы груза. Время начала третьего этапа зависит от массы груза. Частота колебаний тока на третьем этапе зависит от массы груза, но при этом изменяется в небольших пределах (для грузов с массами 32 и 40 т разница составила 0,1 Гц). Мгновенные и амплитудные значения тока на третьем этапе возрастают по мере увеличения массы груза. Результаты моделирования свидетельствуют о наличии поддающейся фиксации разнице величин токов статора для грузов разной массы после отрыва груза от опорной поверхности. Таким образом, контроль электрических величин электродвигателя подъема позволяет создать защиту грузоподъемного механизма от перегрузки на основании метода амплитудного анализа тока статора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокофьев Б.И., Попов М.Ю. Безопасная эксплуатация крановых сооружений: Учебное пособие. – Томск: изд. Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2014. – 160 с.

2. Eihib M. Dynamics and Control of Cranes: A Review. Department of Engineering Science and Mechanics, MC 0219. – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2001. – 46 p.

3. Пат. 2144901 РФ. Устройство для измерения и ограничения грузоподъемности лебедки / Платонов Г.Г., Кудрявцев А.В., Сологубов С.Н.; заявл. 20.05.1998; опубл. 27.01.2000. Бюл. № 3.

4. Пат. 2464220 РФ. Тензометрическая ось для измерения нагрузки на крюке грузоподъемного крана / Потапов В.А., Тимин Ю.Ф., Корников М.В.; заявл. 24.03.2011; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29.

5. Пат. 2483016 РФ. Ограничитель нагрузки мостового крана / Коровин В.А., Коровин К.В.; заявл. 24.08.2011; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 15.

6. Пат. 2381984 РФ. Устройство для определения веса груза мостового крана / Кадыров Х.М.; заявл. 28.07.2008; опубл. 20.02.2010. Бюл. № 5.

7. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А. Диагностика неисправностей вентиляторных установок с помощью спектрального анализа токов статора // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 4. С. 37 – 42.

8. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С. Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров в горно-металлургической промышленности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 12. С. 906 – 911.

9. Казак С.А. Динамика мостовых кранов. – М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.

10. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.

11. Alan L. Sheldrake. Handbook of Electrical Engineering: For Practitioners in the Oil, Gas and Petrochemical Industry. – John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 631 p.

12. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С., Реморов В.Е. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 31 – 33.

13. Ansari A., Deshpande D. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2. No. 5. P. 1260 – 1267.

14. Arya M.K., Wadhvani S. Transient Analysis of Three Phase Squirrel Cage Induction Machine using Matlab // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2009. Vol. 1. No. 3. P. 918 – 922.

15. William F. Trench. Elementary differential equations. Department of Mathematics Trinity University San Antonio. – Texas, USA, 2017. – 663 p.

16. David J. Logan. First course in differential equations for scientists and engineers. – Springer-Verlag, 2015. – 380 p.

17. Jeffrey R. Chasnov Introduction to Differential Equations. – The Hong Kong University of Science and Technology, 2016. – 147 p.

18. Zhengyan Zhang D. Chen and Min Feng “Dynamics model and dynamic simulation of overhead crane load swing systems based on the ADAMS, “2008 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. – Kunming, 2008. P. 484 – 487.

19. Mark S. Gockenbach. MATLAB Tutorial to accompany Partial Differential Equations: Analytical and Numerical Methods, 2nd edition. – SIAM, 2010. – 136 p.

20. Howard P. Solving ODE in MATLAB. – Fall, 2007. – 22 p.

Поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.
После доработки 4 апреля 2019 г.
Принята к печати 29 мая 2019 г.

MODELING OF OVERLOADS OF RAISING MECHANISM IN METALLURGICAL OVERHEAD CRANES

V.V. Varlamov¹, M.V. Kipervasser¹, A.V. Gerasimuk²

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia

² JSC “Sibirskii Tyazhpromelektroproekt”, Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia

Abstract. Electromechanical processes occurring when the load is lifted by an overhead crane are considered. The main idea of the work is to identify emergency mode (crane overload) by a method based on control of stator current of lift motor. To obtain stator current diagrams of electric motor, mathematical model of overhead crane (three-mass circuit) has been developed, which includes equations describing elastic properties of crane beams and its rope. A system of (α, β) coordinates, fixed relative to electric motor stator, is adopted to describe the drive asynchronous motor. Lifting cycle is considered as sequence of three steps: choice of the rope “slack”; rope tension; separation of cargo lifting. For each stage, a system of differential equations has been compiled describing motion of masses of overhead crane elements and electrical parameters of electric motor. Initial and boundary conditions for each of the stages were determined. Preliminary transformations of the system of equations to their solution by numerical methods and subsequent modeling of stages of lifting loads were carried out for different weights. Sequential solution of three boundary value problems allows obtaining values of stator currents at time of load separation. Diagrams of stator phase currents of an electric motor were obtained for loads of different mass. Simulation results indicate the presence of fixable difference in magnitudes of stator currents after the load is separated from the support surface. On basis of the developed model and the study results, a functional diagram of crane overload protection device is proposed and its principle of operation is described. It consists in controlling lifted load mass and stator current when lifting the load. Conclusion is made about feasibility and effectiveness of monitoring electrical values of lifting motor for development of overhead crane protection against overloads. Effectiveness of the proposed system was evaluated.

Keywords: stator current, electric motor, protection, crane, modeling, overloads.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-646-651

REFERENCES

1. Prokof'ev B.I., Popov M.Yu. *Bezopasnaya ekspluatatsiya kranovykh sooruzhenii: Uchebnoe posobie* [Safe operation of crane units: Manual]. Tomsk: izd. Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universitetata, 2014, 160 p. (In Russ.).
2. Eihib M. *Dynamics and Control of Cranes: A Review*. Department of Engineering Science and Mechanics, MC 0219, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2001, 46 p.
3. Platonov G.G., Kudryavtsev A.V., Sologubov S.N. *Ustroistvo dlya izmereniya i ogranicheniya gruzopod'emnosti lebedki* [Device for measuring and limiting winch loading capacity]. Patent RF no. 2144901. *Bulleten' izobretenii*. 2000, no. 3. (In Russ.).
4. Potapov V.A., Timin Yu.F., Kornikov M.V. *Tenzometricheskaya os' dlya izmereniya nagruzki na kryuke gruzopod'emnogo krana* [Tensometric axis for measuring the load on the hook of a lifting crane]. Patent RF no. 2464220. *Bulleten' izobretenii*. 2012, no. 29. (In Russ.).
5. Korovin V.A., Korovin K.V. *Ogranichitel' nagruzki mostovogo krana* [Load limiter of overhead crane]. Patent RF no. 2483016. *Bulleten' izobretenii*. 2013, no. 15. (In Russ.).
6. Kadyrov Kh.M. *Ustroistvo dlya opredeleniya vesa gruza mostovogo krana* [A device for determining weight of the load of overhead crane]. Patent RF no. 2381984. *Bulleten' izobretenii*. 2010, no. 5. (In Russ.).
7. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A. Diagnostics of malfunctions of fan installations using spectral analysis of stator currents. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2016, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
8. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. The assessment of power changes in motor parameters in case of emergencies in the mechanical part of belt conveyor. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 12, pp. 906–911. (In Russ.).
9. Kazak S.A. *Dinamika mostovykh kranov* [Dynamics of overhead cranes]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 332 p. (In Russ.).
10. Sipailov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A. *Elektricheskie mashiny (spetsial'nyi kurs)* [Electric machines (special course)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 287 p. (In Russ.).
11. Alan L. Sheldrake. *Handbook of Electrical Engineering: For Practitioners in the Oil, Gas and Petrochemical Industry*. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 631 p.
12. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S., Remorov V.E. On the use of the method of monitoring the condition of machinery technological units by the energy parameters of the drive. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 12, pp. 31–33. (In Russ.).
13. Ansari A., Deshpande D. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010, vol. 2, no. 5, pp. 1260–1267.
14. Arya M.K., Wadhvani S. Transient analysis of three phase squirrel cage induction machine using MATLAB. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2009, vol. 1, no. 3, pp. 918–922.
15. William F. Trench. *Elementary differential equations*. Department of Mathematics Trinity University San Antonio, Texas, USA, 2017, 663 p.
16. David J. Logan. *First course in differential equations for scientists and engineers*. Springer-Verlag, 2015, 380 p.
17. Jeffrey R. Chasnov. *Introduction to Differential Equations*. The Hong Kong University of Science and Technology, 2016, 147 p.
18. Zhengyan Zhang D. Chen, Min Feng. Dynamics model and dynamic simulation of overhead crane load swing systems based on the ADAMS. In: *9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, Kunming, 2008*, pp. 484–487.
19. Mark S. Gockenbach. *MATLAB Tutorial to accompany Partial Differential Equations: Analytical and Numerical Methods*. 2nd edition. SIAM, 2010, 136 p.
20. Howard P. *Solving ODE in MATLAB*. Fall, 2007, 22 p.

Information about the authors:

V.V. Varlamov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Chair of Applied Mathematics and Informatics (vadim.varlamov@mail.ru)

M.V. Kipervasser, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics (kipervasser2012@ya.ru)

A.V. Gerasimuk, Leading Specialist of the Department of Power Supply (heavymetd17200@gmail.com)

Received February 19, 2019

Revised April 4, 2019

Accepted May 29, 2019