

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.313: 621.874

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-3-12

Семыкина Ирина Юрьевна^{1,2,*}, Кипервассер Михаил Вениаминович³,
Поползин Иван Юрьевич³

¹ Севастопольский государственный университет

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

³ Сибирский государственный индустриальный университет

*E-mail: arinasemykina@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОДЪЕМА МОСТОВЫХ КРАНОВ ПРИ ПОДЪЕМЕ ГРУЗА ЧРЕЗМЕРНОЙ МАССЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ В ПОДЪЕМНОМ КАНАТЕ



Информация о статье

Поступила:

06 октября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 ноября 2023 г.

Принята к печати:

01 декабря 2023 г.

Опубликована:

19 декабря 2023 г.

Ключевые слова:

привод мостового крана;
трехмассовая механическая
система; асинхронный двига-
тель; динамическая модель в
среде Simulink; этап отрыва
груза; амплитуда тока ста-
тора

Аннотация.

В статье рассматриваются процессы изменения величин привода механизма подъема мостовых кранов в аварийных ситуациях, связанных с подъемом груза массой, превышающей допустимую. Целью исследования является определение диагностического признака для системы косвенной защиты, позволяющего определить наличие аварийного превышения массы груза по информации, извлекаемой из измеренных токов электродвигателя. В качестве основного метода исследования использовано компьютерное моделирование. Описана математическая модель привода мостового крана, в качестве которой использована трехмассовая модель с сосредоточенными массами, учитывающая жесткость подъемного каната и жесткость опоры. Дополнительно рассмотрена модель, учитывающая вязкое трение в канате. Приведены результаты компьютерного моделирования в среде Simulink, описывающие работу привода механизма мостового крана в процессе выбора слабины каната, натяжения каната до уравновешивания усилием в канате веса груза и отрыва груза с его последующим подъемом. Показано, что в момент, соответствующий отрыву груза, мгновенное значение тока статора для груза повышенной массы больше, чем для груза номинальной массы, причем разница достаточна для ее выявления типовыми средствами измерения, применяемыми в электроприводе. Таким образом, превышение амплитудного значения тока может использоваться в качестве диагностического признака аварийной ситуации.

Для цитирования: Семыкина И.Ю., Кипервассер М.В., Поползин И.Ю. Моделирование величин в электроприводе подъема мостовых кранов при подъеме груза чрезмерной массы с учетом влияния вязкого трения в подъемном канате // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 5 (169). С. 3-12. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-3-12, EDN: GHLVDR

Введение

Мостовые краны и кран-балки различного назначения являются одним из основных видов транспортного, технологического и ремонтного оборудования на предприятиях горной и металлур-

гической промышленности. Удельный вес грузоподъемных механизмов в составе оборудования предприятий может достигать 10–13%. От надежной и безаварийной работы грузоподъемных механизмов зависит нормальный ход технологических

процессов, экономические показатели и безопасность персонала предприятий [1, 2]. Обзор научных работ [3], посвященных требованиям безопасности кранов, показал, что аварийные ситуации могут быть связаны с недостатками проектирования крана, организацией работ по подъему груза, ошибочными действиями персонала, эксплуатационными факторами. В этой связи разработка надежных средств диагностики и защиты от аварийных ситуаций грузоподъемных механизмов является актуальной задачей [4-6]. Для мостовых кранов предприятий горно-металлургического комплекса наиболее распространенными являются аварийные ситуации переподъема грузозахватного органа, нарушения целостности и геометрии элементов конструкции, обрыв подъемных канатов, перегрев и выход из строя электродвигателя подъема. Кроме переподъема, к перечисленным выше аварийным ситуациям может привести, в частности, подъем груза недопустимо большой массы.

В настоящее время применяется несколько способов контроля перегрузки с применением пружинно-рычажных систем [7] и использованием тензодатчиков [8,9], которые, однако, не обладают достаточными точностью, чувствительностью и быстродействием. Также возможны системы защиты с применением дополнительных силовых элементов, однако они усложняют конструкцию грузоподъемных механизмов, снижая этим надежность защиты [10]. Еще одним вариантом является применение систем дополнительных оптических систем [11], машинного зрения и конечно-элементного моделирования конструкции крана для оценки его технического состояния и возможных неисправностей [12], однако данный метод весьма сложный и не может быть использован в целях оперативной защиты оборудования.

Для распознавания аварийного превышения

массы груза возможно использовать методы косвенного контроля, в том числе анализ динамического состояния приводных электродвигателей [13,14]. Методы косвенного контроля массы груза в процессе подъема для кранов различного назначения описаны в [15-17] для мобильного, башенного и мостового кранов соответственно. Описанные системы строятся с применением дополнительных энкодеров и тензодатчиков. В [18] для грузоподъемных механизмов используется схема контроля частоты вращения вала приводов добега, изменяющейся в зависимости от массы груза. Устройства, описанные в [19,20] в качестве основной контролируемой величины используют значения потребляемой активной мощности приводного электродвигателя. При этом требуется замер частоты вращения и питающего напряжения для определения момента на валу двигателя при распознавании ситуации подъема груза чрезмерной массы. В [21] описана система управления для подъемного крана буровой платформы, в которой масса груза вычисляется по данным тензодатчика подъемного каната и датчика гидродинамического давления.

Таким образом, системы защиты электропривода кранов от превышения массы груза с косвенным определением параметров находят довольно широкое применение, однако подход, не требующий установки в механической части привода дополнительных датчиков, в настоящее время отсутствует.

В [22] предложено оценивать факт подъема груза чрезмерной массы, контролируя величины тока статора приводного электродвигателя механизма подъема. Было сформулирован диагностический признак, позволяющий распознать данный режим: увеличение тока статора по сравнению с нормальными значениями при подъеме груза уже в первом полупериоде напряжения питания. Однако при составлении модели в [22] в качестве допущения со-

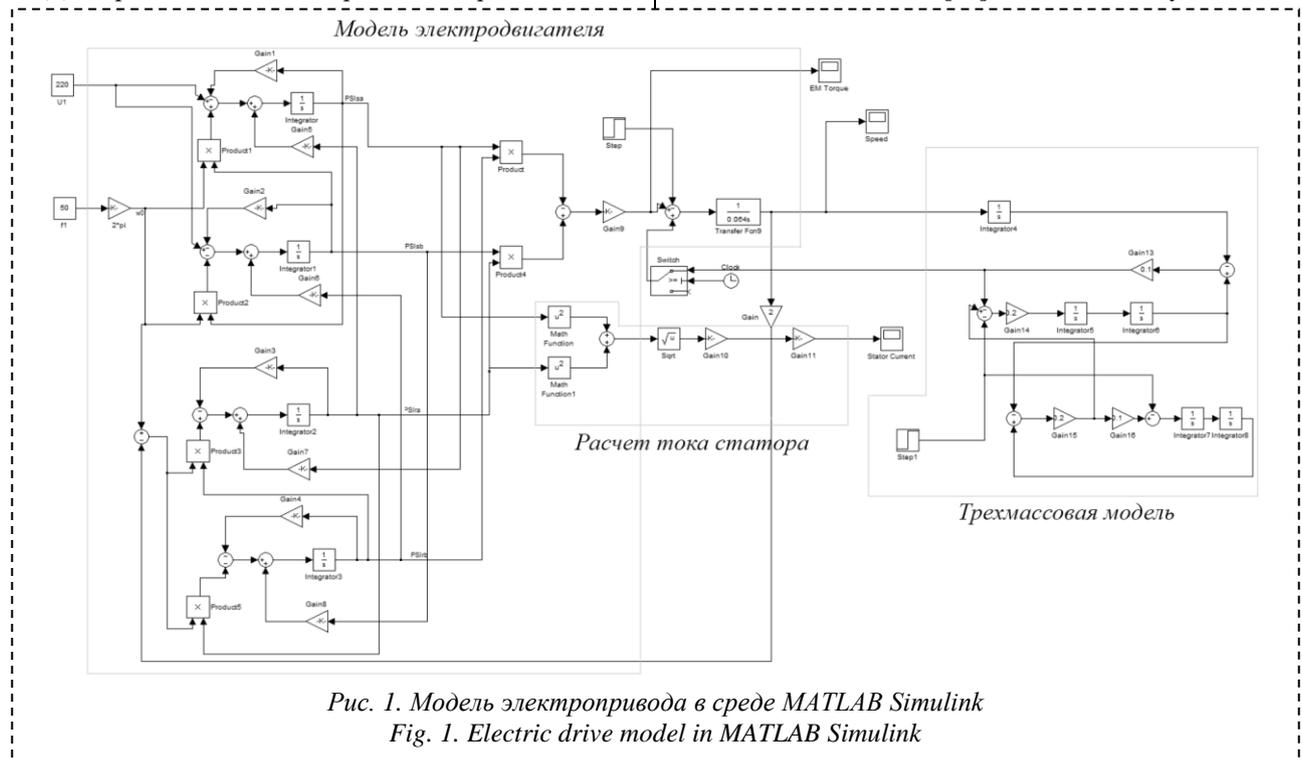


Рис. 1. Модель электропривода в среде MATLAB Simulink
Fig. 1. Electric drive model in MATLAB Simulink

гласно [23] принималось отсутствие вязкого трения в канатах механизма подъема. Между тем в других источниках (например, [24]) указывается на то, что наличие вязкого трения в канатах обуславливает изменение динамических свойств электромеханической системы по сравнению с системой, в которой вязкое трение не учтено. Поэтому возникает вопрос об адекватности выявленного в [22] диагностического признака реальным электромеханическим системам, в которых всегда присутствует вязкое трение.

Математическое описание объекта

Движение механической части электропривода подъема мостового крана может быть описано с разных позиций. Например, в работе [25] предлагается для описания движения груза использовать модель двойного маятника. Авторы [26] предлагают дополнительно учитывать упругость опорных конструкций. В отечественной практике для описания механической части привода подъема мостовых кранов дополнительная упругость между точкой подвеса груза и самим грузом не учитывается, предполагая, что подъемный канат имеет существенно большую длину, а следовательно, и преобладающее влияние на механические процессы. Исходя из этого, в данной работе будет использоваться трехмассовая модель, описанная в [23,24], для которой справедливы следующие допущения: сосредоточенные массы приводятся к усилию в канате; жесткости связей линейны, масса каната не учитывается; опора груза жесткая, колебания в канате незатухающие; зазоры в зубчатых зацеплениях и соединительных муфтах не учитываются.

Операция подъема груза состоит из трех последовательных этапов: выбора слабины каната, натяжения каната до уравнивания усилием в канате веса груза и отрыва груза с его последующим подъемом. На этапе выбора слабины каната связь между грузом и приводным электродвигателем отсутствует, поэтому диагностирование превышения массы груза косвенным методом возможно только при переходе от первого этапа ко второму и третьему, в ходе которого требуется установить диагностические признаки аварийной ситуации подъема груза чрезмерной массы.

Движение масс в трехмассовой модели после отрыва груза описывается следующими выражениями:

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

где x_1, x_2, x_3 – перемещения масс; m_1, m_2, m_3 – приведенные к канату массы груза, моста и вращающихся частей механизма подъема; c_1, c_2 – жесткости каната и моста крана; P – усилие в канате, создаваемое двигателем; $Q = m_1 g$ – вес поднимаемого груза; $G = m_3 g$ – вес моста крана с тележкой; $F_\kappa(t)$ – сила натяжения подъемного каната; $F_{\text{упр.моста}}(t)$ – упругая сила балок моста.

При этом условием окончания второго этапа является равенство усилия в канате весу груза:

$$F_{\kappa(t)} = c_1(x_1 - x_2) = m_2 g. \quad (2)$$

Для описания приводного асинхронного электродвигателя с питанием от сети удобно принять описание асинхронного двигателя как обобщенной двухфазной машины в ортогональной системе координат $\alpha\beta$, неподвижной относительно статора электродвигателя, где приняты следующие обозначения: $U_{s\alpha} = U_{m\phi} \sin(\omega_0 t)$, $U_{s\beta} = U_{m\phi} \cos(\omega_0 t)$ – составляющие напряжения статора по продольной и поперечной осям; $U_{m\phi}$ – фазная амплитуда питающего напряжения; $\psi_{s\alpha}, \psi_{r\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\beta}$ – потокосцепления статора и ротора по продольной и поперечной осям; $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$ – составляющие токов обмоток статора и ротора по продольной и поперечной осям, $M_{эм}$ – момент электродвигателя; ω_0 – угловая частота вращения магнитного поля машины; ω – угловая частота вращения ротора; r_s, r_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; L_s, L_r – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; p_0 – число пар полюсов машины, $k = i_\Sigma / R_{\text{бар}}$ – коэффициент приведения электромагнитного момента двигателя к подъемному канату, i_Σ – суммарное передаточное число механизма; $R_{\text{бар}}$ – радиус подъемного барабана. Сама модель записывается как:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{m\phi} \sin(\omega_0 t); \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = U_{m\phi} \cos(\omega_0 t); \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + r_r i_{r\alpha} + k x_1' \psi_{r\beta} = 0; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} - k x_1' \psi_{r\alpha} = 0; \\ \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}; \\ P = \frac{3}{2} k p_0 (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) = \\ = \frac{3}{2} k p_0 L_m (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) = M_{эм}. \end{cases} \quad (3)$$

Для каждого из этапов с использованием (1) и (3) можно записать систему дифференциальных уравнений, описывающих движение масс и поведение электрических величин двигателя, и составить начальные и граничные условия для величин переменных.

Начальные условия для третьего этапа:

$$t = t_{2\kappa}; \quad x_1' = x_{12\kappa}' ; \quad x_2' = 0; \quad x_3' = x_{32\kappa}' ;$$

$$i_{s\alpha} = i_{s\alpha 2\kappa}; \quad i_{s\beta} = i_{s\beta 2\kappa}; \quad i_{r\alpha} = i_{r\alpha 2\kappa}; \quad i_{r\beta} = i_{r\beta 2\kappa}.$$

Граничные условия:

$$x_1 = x_{12\kappa}; \quad x_2 = 0; \quad x_3 = x_{32\kappa}.$$

Совместная система уравнений для третьего этапа:

$$\begin{cases}
 m_1 x_1'' = \frac{3}{2} k p_0 L_m (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) - Q - c_1 (x_1 - x_2); \\
 m_2 x_2'' = c_1 (x_1 - x_2) - Q + m_2 x_3''; \\
 m_3 x_3'' = G + c_1 (x_1 - x_2) - c_2 x_3; \\
 L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} + r_s i_{s\alpha} = U_{m\phi} \sin(\omega_0 t); \\
 L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} + r_s i_{s\beta} = U_{m\phi} \cos(\omega_0 t); \\
 L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + r_r i_{r\alpha} + k x_1' (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) = 0; \\
 L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} + r_r i_{r\beta} - k x_1' (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) = 0.
 \end{cases} \quad (4)$$

Выражения для этапов после замены переменных и приведении к нормальному виду позволяют найти значения тока статора и ротора на интервале времени после отрыва груза. Ток статора асин-

хронного двигателя выбран в качестве контролируемого параметра для диагностического признака подъема груза чрезмерной массы, поскольку согласно (3) он определяется моментом двигателя, то есть усилием в канате, и доступен прямому измерению на асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором.

Следует отметить, что в силу изначальных допущений модель (4) не учитывает вязкое трение в канатах, поэтому и для достижения поставленной цели исследования будет в дальнейшем дополнена.

Выявление диагностического признака

В качестве исследуемого выбран мостовой двухбалочный кран КМ-32/5-34-23/23-A2-У3 обогатительной фабрики «Энергетическая» предприятия ОАО «Кузбассразрезуголь». Механизм подъема оснащен асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором типа DRS160MC4BE20HR SEW-EURODRIVE.

Величина жесткости моста крана c_2 была определена по паспортным данным конструкционных

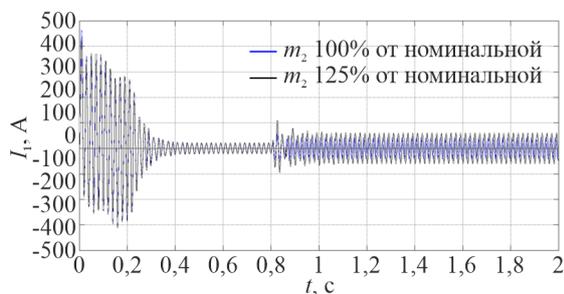


Рис. 2. Мгновенные значения тока статора на этапах 1-3

Fig. 2. Instantaneous values of the stator current at the stages 1-3

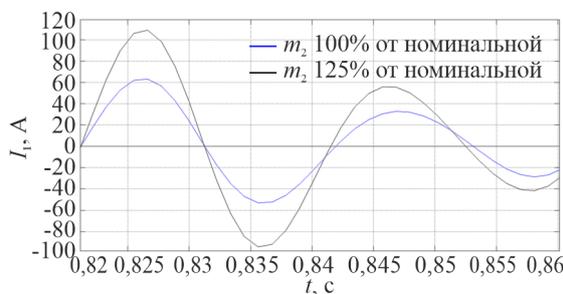


Рис. 3. Мгновенные значения тока статора при переходе от этапа 2 к этапу 3

Fig. 3. Instantaneous values of the stator current when transitioning from stage 2 to stage 3

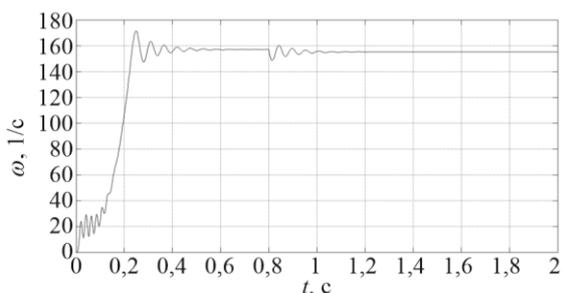


Рис. 4. Угловая частота вращения ротора на этапах 1-3 для m_2 125% от номинальной

Fig. 4. Rotor angular frequency at the stages 1-3 for m_2 is 125% of nominal

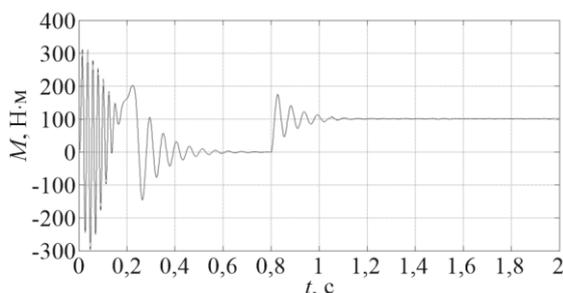
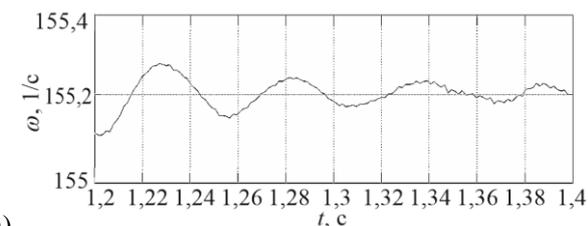
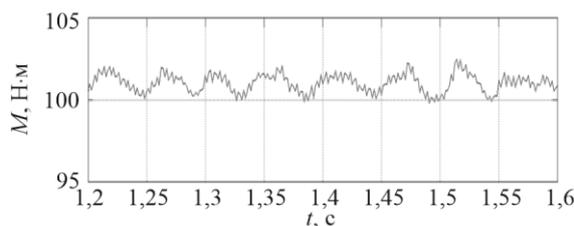


Рис. 5. Электромагнитный момент двигателя на этапах 1-3 для m_2 125% от номинальной

Fig. 5. Motor torque at the stages 1-3 for m_2 is 125% of nominal



а)



б)

Рис. 6. Двухчастотные колебания частоты вращения (а) и момента (б) для m_2 125% от номинальной

Fig. 6. Double-frequency oscillations of angular frequency (a) and torque (b) for m_2 is 125% of nominal

балок моста. Приведенная масса вращающихся частей m_1 , масса моста крана с тележкой m_3 определены в соответствии с [23]. Жесткость каната c_1 определялась согласно отраслевой инструкции РД 03-439-02.

Для исследования на базе уравнений (4) была построена математическая модель электропривода в среде Simulink с использованием базовых блоков, которая показана на Рис. 1. При этом все величины приводятся к валу двигателя. Среда Simulink была выбрана для моделирования по причине наличия широкого выбора элементов, а также возможности использования различных методов численного интегрирования, как неадаптивных, так и адаптивных. Последнее важно при моделировании поведения системы в крайних условиях, особенно в начале

работы и при переходе между этапами подъема.

Моделирование проводилось для случаев подъема груза номинальной массы и груза с массой, превышающей номинальную на 25%. Длительность первого этапа задавалась таймером. Длительность второго и третьего этапов определялась свойствами упругих механических связей. Результаты моделирования показаны на Рис. 2 – Рис. 6.

Анализ Рис. 2 и Рис. 3 показывает, что в момент, соответствующий отрыву груза, пиковое мгновенное значение тока статора для груза повышенной массы больше, чем для груза номинальной массы. Превышение составляет около 42% от значений при номинальной массе груза. В установившемся режиме ток статора для груза повышенной массы превышает номинальный ток статора на

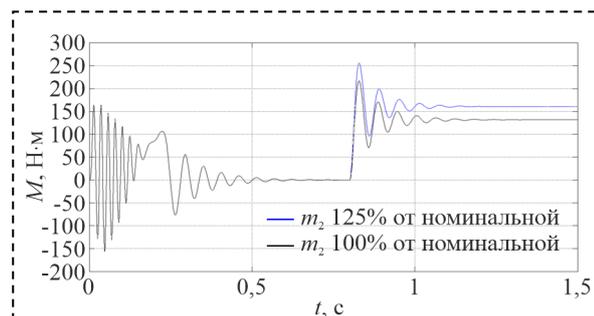


Рис. 7. Электромагнитный момент двигателя на этапах 1-3 с учетом вязкого трения

Fig. 7. Motor torque at the stages 1-3 taking viscous friction

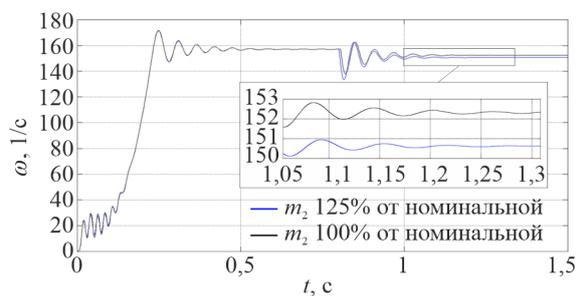


Рис. 8. Угловая частота вращения ротора на этапах 1-3 с учетом вязкого трения

Fig. 8. Rotor angular frequency at the stages 1-3 taking viscous friction

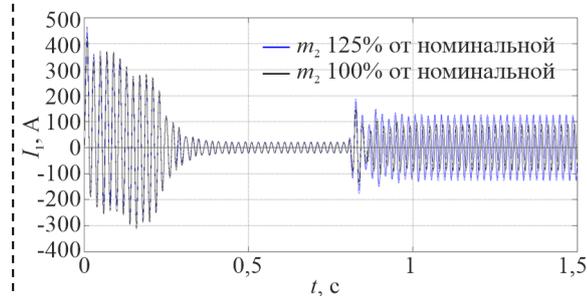


Рис. 9. Мгновенные значения тока статора на этапах 1-3 с учетом вязкого трения

Fig. 9. Instantaneous values of the stator current at the stages 1-3 taking viscous friction

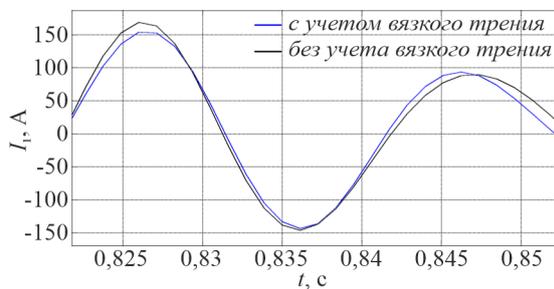


Рис. 10. Мгновенные значения тока статора при переходе от этапа 2 к этапу 3 для m_2 125% от номинальной

Fig. 10. Instantaneous values of the stator current when transitioning from stage 2 to stage 3 for m_2 is 125% of nominal

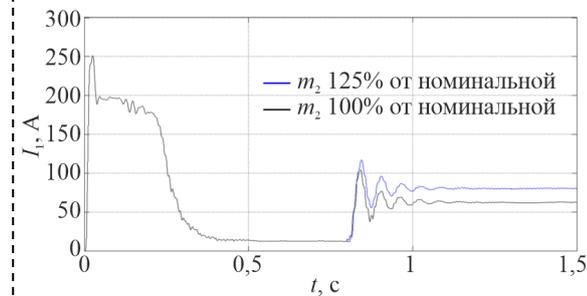


Рис. 11. Действующие значения тока статора на этапах 1-3 с учетом вязкого трения

Fig. 11. RMS stator current at the stages 1-3 taking viscous friction

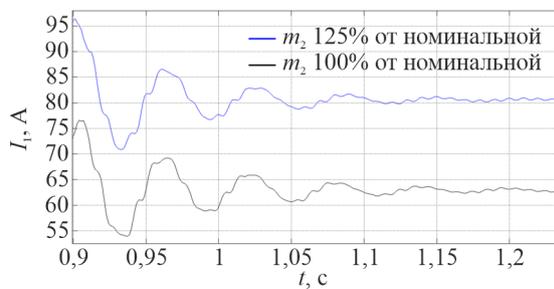


Рис. 3. Действующие значения тока статора при переходе от этапа 2 к этапу 3 с учетом вязкого трения

Fig. 3. RMS stator current when transitioning from stage 2 to stage 3 taking viscous friction

28%. Также видно, что различие в массе поднимаемого груза изменяет характер упругих колебаний в электромеханической системе: для грузов разной массы различаются частота и фаза колебаний. Последнее может быть использовано как дополнительный диагностический критерий.

Графики на Рис. 4 – Рис. 6 показывают, что как для частоты вращения ротора двигателя, так и для электромагнитного момента наблюдаются двухчастотные колебания, обусловленные упругими колебаниями моста крана и груза на канате. Эти колебания носят незатухающий характер, поскольку модель (4) не учитывает вязкое трение в канатах.

Чтобы обойти данное допущение, в модель было введено нелинейное звено, позволяющее учесть влияние вязкого трения в канате. Уравнения, описывающие движение масс трехмассовой модели мостового крана с учетом вязкого трения для третьего этапа подъема груза, имеют вид [24]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1' = P - F_k(t) - 2\mu(x_1 - x_2)'; \\ m_2 \ddot{x}_2' = F_k(t) - Q + m_2 \ddot{x}_3' + 2\mu(x_1 - x_2)'; \\ m_3 \ddot{x}_3' = G + F_k(t) - F_{\text{упр.моста}}(t), \end{cases} \quad (5)$$

где $2\mu(x_1 - x_2)' = F_{\text{мп}}$ – сила вязкого трения в канате, μ – коэффициент, характеризующий силы вязкого сопротивления.

Длительность этапов 2 и 3 определялась свойствами упругих механических связей. Результаты моделирования показаны на Рис. 7 – Рис. 12.

Сравнение графиков на Рис. 9, Рис. 11, Рис. 12 с графиками на Рис. 2 – Рис. 6 показывает, что наличие вязкого трения в канатах вызывает затухание колебаний (в среднем колебания затухают в течение 3-4 периодов), однако слабо влияет на амплитуду тока статора двигателя в первом полупериоде колебаний (Рис. 10), вызванных окончанием вытяжки каната и отрывом груза. Так разность в пиковых значениях тока статора с учетом и без учета вязкого трения составляет 3,8%. Таким образом установлено, что учет вязкого трения в канатах не влияет на формулировку полученного диагностического признака, который может быть применен для реальных электромеханических систем, обладающих вязким трением в упругих связях.

Выводы

Сравнительный анализ результатов моделирования показывает следующее:

- в полученных графиках изменений тока статора, момента и скорости ротора электродвигателя присутствуют двухчастотные колебания, вызванные движением масс трехмассовой системы. Превышение тока статора при подъеме груза больше номинального фиксируется в первом полупериоде питающего напряжения сети после отрыва груза;

- учет вязкого трения в канате влияет на результаты моделирования. Низкочастотные колебания исследуемых величин, вызванные движением собственной массы механизма подъема и массы груза [23,24], затухают в течение четырех периодов собственной частоты (Рис. 9, Рис. 12). При этом высокочастотные колебания от движения моста крана не затухают;

- разница амплитудных значений тока статора в первом полупериоде колебаний с учетом и без учета вязкого трения в канате составляет не более 1,8% и, таким образом, полученный диагностический признак подъема груза недопустимой массы может быть использован для кранов без необходимости принятия допущения об отсутствии вязкого трения в канате.

Таким образом, факт превышения массы груза может быть зафиксирован непосредственно после окончания натяжения каната. Следовательно, на основании проведенных исследований можно прийти к выводу о том, что возможно установить следующий диагностический критерий для распознавания ситуации подъема груза с превышением массы – возрастания пикового значения тока статора в первом полупериоде после окончания этапа вытяжки каната. При этом современная техника обладает высоким быстродействием, и, следовательно, измерение мгновенных значений тока статора и фиксация сформулированного критерия могут быть осуществлены сравнительно просто с использованием датчика тока статора без добавления в систему управления приводом и его силовую и механическую часть дополнительных устройств. При этом вопрос об определении критериев окончания этапа вытяжки каната должен являться предметом отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голдобина Л. А., Деменков П. А., Трушко О. В. Обеспечение безопасности строительно-монтажных работ при возведении зданий и сооружений // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 583–595. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.583
2. Songbo Hu, Yihai Fang, Yu Bai. Automation and optimization in crane lift planning: A critical review // Advanced Engineering Informatics. 2021. Vol. 49. P. 101346. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101346.
3. Sanaz Sadeghi, Nazi Soltanmohammadlou, Payam Rahnamayiezekavat. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements // Safety Science. 2021. Vol. 133. P. 105002. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105002.
4. Извекоев Ю. А., Гугина Е. М., Анисимов А. Л., Шеметова В. В. Оценка рисков потенциально опасных металлургических объектов за пределами гарантийных сроков эксплуатации в менеджменте качества промышленного предприятия // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (Ч. 2). С. 179–182.
5. Турышева Е. С. Совершенствование процесса автоматической защиты гидрофицированного крана от перегрузки и опрокидывания. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009. 18 с.
6. Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and Control of Cranes: A Review // Journal of Vibration and Control. 2003. Vol. 9(7). P. 863–908. DOI: 10.1177/1077546303009007007.
7. Платонов Г. Г., Кудрявцев А. В., Сологубов С. Н. Устройство для измерения и ограничения

грузоподъемности лебедки. Патент РФ № 2144901. Оpubл. 27.01.2000. Бюлл. № 3.

8. Потапов В. А., Тимин Ю. Ф., Корников М. В. Тензометрическая ось для измерения нагрузки на крюке грузоподъемного крана. Патент РФ № 2464220. Оpubл. 20.10.2012. Бюлл. № 29.

9. Коровин В. А., Коровин К. В. Ограничитель нагрузки мостового крана. Патент РФ № 2483016. Оpubл. 27.05.2013. Бюлл. № 15.

10. Кадыров Х. М. Устройство для определения веса груза мостового крана. Патент РФ № 2381984. Оpubл. 20.02.2010. Бюлл. № 5.

11. Gillham J., Bentz E. C., Hoult N.A. Measuring support reactions and damage detection in steel beams using distributed strain sensing // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 262. P. 114389. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114389.

12. Grzegorz Przybyłek, Jędrzej Więckowski. Method of assessing the technical condition and failure of overhead cranes designed to work in difficult conditions // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. P. e00811. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00811.

13. Иванов С. Д., Назаров А. Н. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36–47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47.

14. Семькина И. Ю., Кипервассер М. В., Герасимук А. В. Исследование переходного процесса в цепи тока при дефекте мультипликатора турбокомпрессора и разработка структурной схемы системы обнаружения дефекта мультипликатора // *Вестник Чувашского университета*. 2017. № 3. С. 138–144.

15. Fang Y., Cho Y.K., Chen J. A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane lifting operations // *Automation in Construction*. 2016. Vol. 72. Part 3. P. 367–379. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.025.

16. Gu Liang-Yao, Yang Yue, Chen Feng. Research on intelligent monitoring and protection system of distributive multi-tower cranes // *International Conference on Computer Application and System Model-*

ing, 22–24 October, 2010, Taiyuan, China. IEEE, 2010. P. 540–543. DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5623149.

17. Szpytko J. Control and Fault Diagnosis System of Crane Operation // *IFAC Proceedings Volumes*. 2001. Vol. 34. Iss. 17. P. 237–242. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)33286-X.

18. Однокопылов Г. И., Дементьев Ю. Н., Орлов Д. Ю., Однокопылов И. Г. Ограничитель грузоподъемности электрического крана. Патент РФ на полезную модель № 61700. Оpubл. 10.03.2007.

19. Однокопылов И. Г. Асинхронный электропривод механизма подъема крана мостового типа с повышенной безопасностью и живучестью. Дис. ... канд. техн. наук. Томск: Томский политехнический университет, 2008. 162 с.

20. Однокопылов Г. И., Однокопылов И. Г., Орлов Ю. А., Орлов Д. Ю., Столяров Д. П. Способ ограничения грузоподъемности крана мостового типа. Патент РФ № 2354604. Оpubл. 10.05.2009. Бюлл. № 13.

21. Messineo S., Serrani A. Offshore Crane Control Based on Adaptive External Models // *Automatica*. 2009. Vol. 45. Iss. 11. P. 2546–2556. DOI: 10.1016/j.automatica.2009.07.032.

22. Семькина И. Ю., Кипервассер М. В., Герасимук А. В. Исследование токов привода подъема мостовых кранов металлургических предприятий для раннего диагностирования превышения массы груза // *Записки Горного института*. 2021. Т. 247. С. 122–131. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.13.

23. Казак С. А. Динамика мостовых кранов. Москва: Машиностроение, 1968. 332 с.

24. Степанов А. Г. Динамика машин. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 304 с.

25. Thomas M., Sawodny O. Flatness-based feed-forward and modal model-predictive state-feedback control of a double pendulum bridge crane // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55. Iss. 27. P. 19–24. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.482.

26. Hanjun Pu, Xiaopeng Xie, Guangchi Liang, Xiangyong Yun, Haining Pan. Analysis for Dynamic Characteristics in Load-lifting system of the Crane // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 16. P. 586–593. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1128.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Семькина Ирина Юрьевна, доктор техн. наук, доцент, Севастопольский государственный университет, (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: arinasemykina@gmail.com
Кипервассер Михаил Вениаминович, кандидат техн. наук, доцент, Сибирский государственный индустриальный университет, (654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Поползин Иван Юрьевич, кандидат техн. наук, Сибирский государственный индустриальный университет, (654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Заявленный вклад авторов:

Семькина Ирина Юрьевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования.

Кипервассер Михаил Вениаминович – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, построение математической модели, выводы, написание текста.

Поползин Иван Юрьевич – анализ данных, моделирование системы, обработка результатов моделирования, написание текста, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-3-12

Irina Yu. Semykina^{1,2,*}, Mikhail V. Kiperwasser³, Ivan Yu. Popolzin³

¹ Sevastopol State University, 299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Str. Vesennaya 28

³ Siberian State Industrial University, 654007, Russia, Novokuznetsk, Str. Kirovat 42

*E-mail: arinasemykina@gmail.com

MODELING THE ELECTRIC DRIVE FOR LIFTING OVERHEAD CRANES WHEN A LOAD HAS EXCESSIVE MASS, TAKING INTO ACCOUNT THE VISCOUS FRICTION IN THE LIFTING ROPE



Article info

Received:

06 October 2023

Accepted for publication:

30 November 2023

Accepted:

01 December 2023

Published:

19 December 2023

Keywords: overhead crane drive; three-mass mechanical system; induction motor; dynamic model in the Simulink; lift-off stage; stator current amplitude.

Abstract.

The article discusses the changing processes of the values at the lifting drive of overhead cranes in emergencies associated with lifting a load having a mass exceeding the permissible limit. The purpose of the study is to determine a diagnostic sign for the indirect protection system, which makes it possible to detect an emergency excess weight of the load using information extracted from the measured electric motor currents. Computer simulation was used as the main research method. The mathematical model of the overhead crane drive is described, which is based on a three-mass model with lumped masses, considering the rigidity of the hoisting rope and the rigidity of the support. Additionally, the model is used that takes into account viscous friction in the rope. The simulation results in the Simulink are presented, describing the transients in the overhead crane drive while selecting the slack of the rope, then tensioning the rope until the force in the rope balances the weight of the load, and finally lifting the load with its subsequent lifting. It is shown that at the moment corresponding to the lifting of the load, the instantaneous value of the stator current for a load of excessive mass is higher than for a load of nominal mass, and the difference is sufficient for its detection by standard measuring tools used in an electric drive. Thus, the exceeding the amplitude value of the drive current can be used as a diagnostic sign of an emergency.

For citation: Semykina I.Yu., Kiperwasser M.V., Popolzin I.Yu. Modeling the electric drive for lifting overhead cranes when a load has excessive mass, taking into account the viscous friction in the lifting rope. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 5(169):3-12 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-3-12, EDN: GHLVDR

REFERENCES

1. Goldobina L.A., Demenkov P.A., Trushko O.V. Ensuring the Safety of Construction Works During the Erection of Buildings and Structures. *Journal of Mining Institute*. 2019; 239:583-595. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.583

2. Songbo Hu, Yihai Fang, Yu Bai. Automation and optimization in crane lift planning: A critical review.

Advanced Engineering Informatics. 2021; 49:101346. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101346.

3. Sanaz Sadeghi, Nazi Soltanmohammadlou, Payam Rahnamayiezekavat. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements. *Safety Science*. 2021; 133:105002. DOI: 10.1016/j.ssci.020.105002.

4. Izvekov Yu.A., Gugina E.M., Anisimov A.L., Shemetova V.V. Risk assessment of potentially hazardous metallurgical facilities beyond the warranty period in the quality management of an industrial enterprise. *Modern science-intensive technologies*. 2018; 11(2): 179–182.

5. Turysheva E.S. Improving the process of automatic protection of a hydraulic crane from overload and capsizing. Abstract of the PhD thesis. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2009. 18 p.

6. Abdel-Rahman E.M., Nayfeh A.H., Masoud Z.N. (2003) Dynamics and Control of Cranes: A Review. *Journal of Vibration and Control*. 2003; 9(7):863–908. DOI: 10.1177/1077546303009007007.

7. Platonov G.G., Kudryavtsev A.V., Sologubov S.N. A device for measuring and limiting the lifting capacity of a winch. RF Patent No. 2144901. 2000.

8. Potapov V.A., Timin Yu.F., Kornikov M.V. Strain gauge axis for measuring the load on the hook of a crane. RF Patent No. 2464220. 2012.

9. Korovin V.A., Korovin K.V. Overhead crane load limiter. RF Patent No. 2483016. 2013.

10. Kadyrov Kh.M. A device for determining the weight of an overhead crane load. RF Patent No. 2381984. 2010.

11. Gillham J., Bentz E. C., Hoult N.A. Measuring support reactions and damage detection in steel beams using distributed strain sensing. *Engineering Structures*. 2022; 262:114389. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114389.

12. Grzegorz Przybyłek, Jędrzej Więckowski. Method of assessing the technical condition and failure of overhead cranes designed to work in difficult conditions. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 16:e00811. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00811.

13. Ivanov S.D., Nazarov A.N. Assessing the applicability of electrical parameters of the drive to determine the load on the lifting mechanism of bridge-type cranes. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. 2022; 19,1(83):36–47. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47.

14. Semykina I.Yu., Kiperwasser M.V., Gerasimuk A.V. Study of the transient process in the current circuit during a defect in the multiplier of a turbocompressor and the development of a block diagram of a system for detecting a defect in the multiplier. *Bulletin of the Chuvash University*. 2017; 3:138–144.

15. Fang Y., Cho Y.K., Chen J. A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane

lifting operations. *Automation in Construction*. 2016; 72(3):367–379. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.025.

16. Gu Liang-Yao, Yang Yue, Chen Feng. Research on intelligent monitoring and protection system of distributive multi-tower cranes. *International Conference on Computer Application and System Modeling, Taiyuan, China*. 2010. Pp. 540–543. DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5623149.

17. Szpytko J. Control and Fault Diagnosis System of Crane Operation. IFAC Proceedings Volumes. 2001; 34(17):237–242. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)33286-X.

18. Odnokopylov G.I., Demytyev Yu.N., Orlov D.Yu., Odnokopylov I.G. Load limiter for electric crane. RF patent for utility model No. 61700. 2007.

19. Odnokopylov I.G. Induction electric drive of the overhead crane lifting mechanism with increased safety and survivability. PhD thesis. Tomsk: Tomsk Polytechnic University. 2008. 162 p.

20. Odnokopylov G.I., Odnokopylov I.G., Orlov Yu.A., Orlov D.Yu., Stolyarov D.P. A method for limiting the lifting capacity of an overhead crane. RF Patent No. 2354604. 2009.

21. Messineo S., Serrani A. Offshore Crane Control Based on Adaptive External Models. *Automatica*. 2009; 45(11):2546–2556. DOI: 10.1016/j.automatica.2009.07.032.

22. Semykina I.Yu., Kiperwasser M.V., Gerasimuk A.V. Study of drive currents for lifting bridge cranes of metallurgical enterprises for early diagnosis of load excess weight. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247:122–131. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.13.

23. Kazak S.A. Dynamics of overhead cranes. Moscow: Mechanical Engineering; 1968. 332 p.

24. Stepanov A.G. Machine dynamics. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 1999. 304 p.

25. Thomas M., Sawodny O. Flatness-based feed-forward and modal model-predictive state-feedback control of a double pendulum bridge crane. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(27):19–24. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.482.

26. Hanjun Pu, Xiaopeng Xie, Guangchi Liang, Xiangyong Yun, Haining Pan Analysis for Dynamic Characteristics in Load-lifting system of the Crane. *Procedia Engineering*. 2011; 16:586–593. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1128.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Irina Yu. Semykina, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, (299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33), T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Str. Vesennyaya 28), e-mail: arinasemykina@gmail.com

Mikhail V. Kiperwasser, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Siberian State Industrial University, (654007, Russia, Novokuznetsk, Str. Kirovat 42)

Ivan Yu. Popolzin, C. Sc. in Engineering, Siberian State Industrial University, (654007, Russia, Novokuznetsk, Str. Kirovat 42)

Contribution of the authors:

Irina Yu. Semykina– formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research.

Mikhail V. Kiperwasser– review of relevant literature, data collection and analysis, construction of a mathematical model, conclusions, writing a text.

Ivan Yu. Popolzin– data analysis, system modeling, processing of modeling results, writing text, conclusions.

Author have read and approved the final manuscript.

