



Одним из эффективных способов устранения неуправляемой компоненты маятниковых колебаний груза в двух перпендикулярных плоскостях (в направлениях движения моста и грузовой тележки МК соответственно) является использование регуляторов. Предлагается использовать два регулятора, имеющие структуру, представленную на рис. 1, как задатчики координат моста и грузовой тележки МК, которые должны гасить неуправляемые колебания груза [7,8,9]. Механическая подсистема МК описывалась в виде имитационной модели [9].

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $x_{ГР}$ ,  $z_{ГР}$  – требуемые координаты груза;  $x_{ГП}$ ,  $z_{ГП}$  – действительные координаты груза;  $x_{П}$ ,  $z_{П}$  – требуемые координаты подвеса груза (моста и грузовой тележки МК соответственно);  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $N$  – эмпирические коэффициенты регуляторов моста и тележки МК [13].

Представленная на рис. 1 схема с регуляторами может быть использована как на математической имитационной модели, так и на реальном объекте МК. В последнем случае вместо виртуальных измерителей текущих координат груза МК необходимо ис-

пользовать систему датчиков, установленных на реальном объекте. Использование на реальном объекте схемы с регуляторами предполагает оснащение МК перспективным частотно-регулируемым приводом, позволяющим осуществлять бесступенчатое изменение скоростей движения моста и грузовой тележки МК от нуля до максимальных значений.

На рис. 2 приведена схема регулятора отдельного привода в обозначениях Simulink/MATLAB. На вход регулятора подается сигнал рассогласования между сигналом с задатчика требуемой координаты груза и сигналом фактической координаты груза. На выходе регулятора формируется сигнал требуемой координаты (задатчика) точки подвеса груза.

Необходимо обосновать рациональные значения коэффициентов  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $N$  двух регуляторов гашения колебаний, используемых в схеме рис. 1, при которых они будут успешно выполнять функцию гашения неуправляемой компоненты колебаний груза и, в то же время, при которых не возникают самоподдерживающиеся автоколебания моста и грузовой тележки.

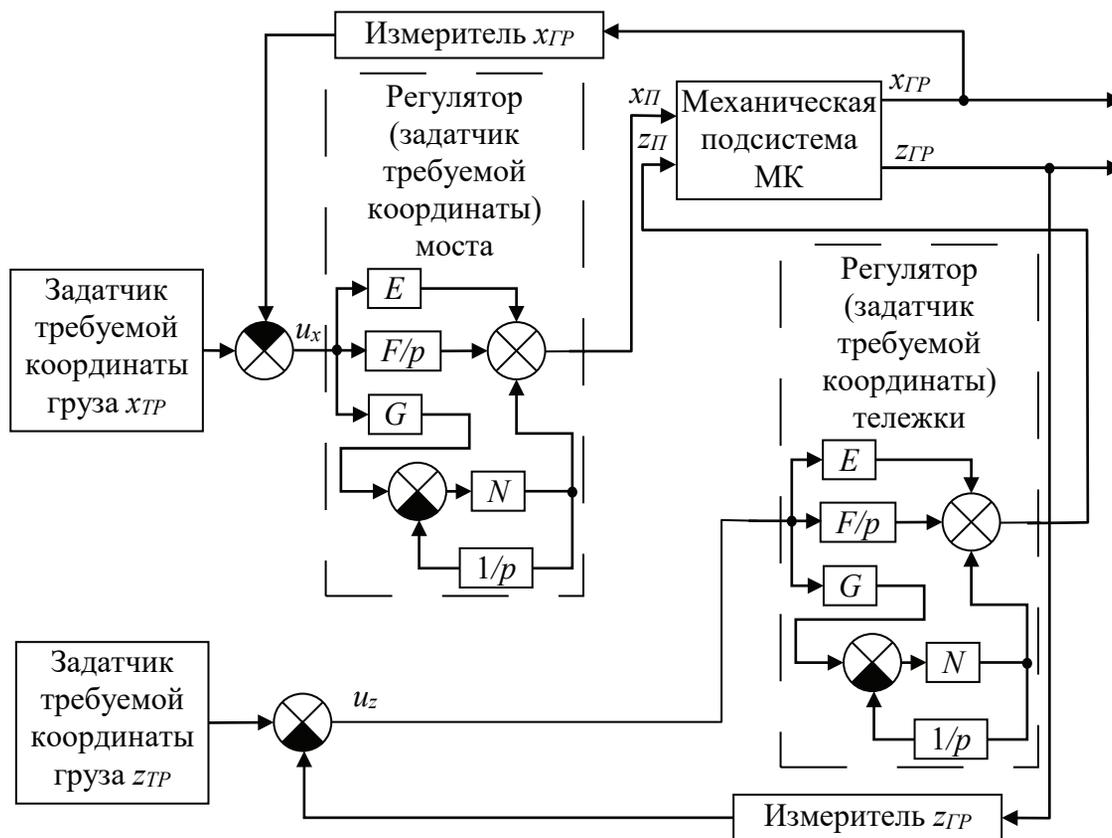


Рис. 1. Схема связей модели механической подсистемы мостового крана с регуляторами для гашения колебаний груза

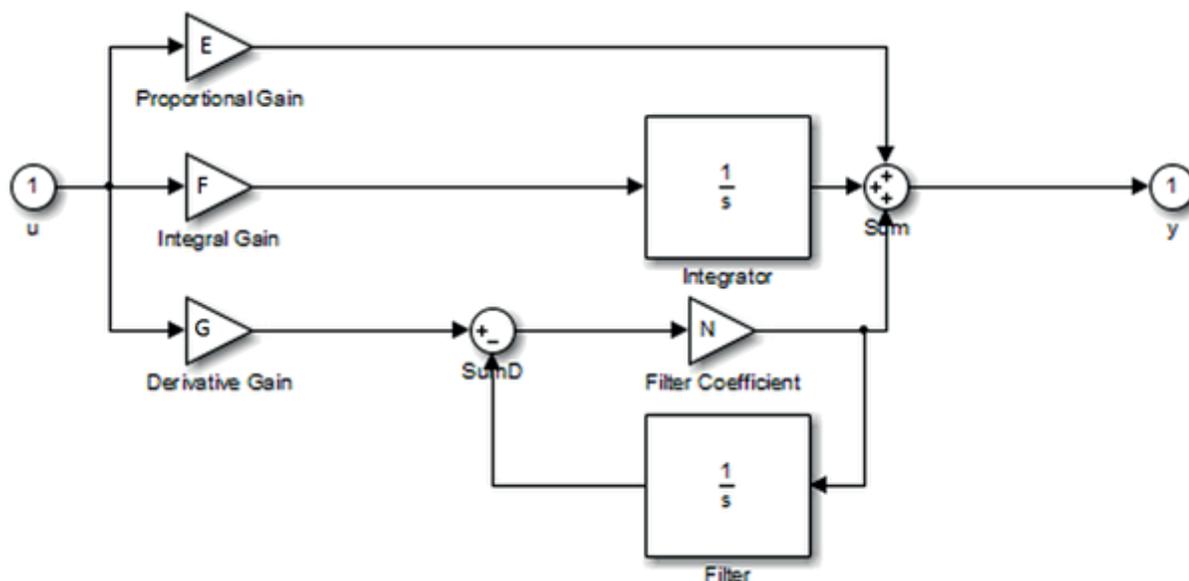


Рис. 2. Схема отдельного регулятора в обозначениях Simulink/MATLAB:  $u$  – входной сигнал рассогласования;  $y$  – выходной сигнал

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛЯТОРОВ**

С использованием разработанной согласно схеме рис. 1 имитационной математической модели МК с регуляторами (рис. 3) [9], была проведена серия имитационных вычислительных экспериментов. Коэффициенты E, F, G двух регуляторов принимали значения из диапазонов  $E=[10:10:80]$ ;  $F=[0:1:5]$ ;  $G=[0:1:5]$ . Исследовались все возможные сочетания. Коэффициент фильтров регуляторов N принимал постоянное значение  $N=100$ .

В серии имитационных вычислительных экспериментов моделировалось перемещение груза по тестовой траектории, имеющей вид дуги (рис. 4). Подобная траектория позволяет осуществить обход грузом препятствия (в виде стены, контейнера и т.п.). При помощи двух сигмоидальных (логистических) временных функций отдельно по каждой горизонтальной координате  $X_0$ ,  $Z_0$  пространства в неподвижной декартовой системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$ , формируется общая траектория в виде дуги для обхода единичного препятствия, не имеющая в  $O_0X_0Y_0Z_0$  точки перегиба [9, 14]:

$$X_{TP}(t, a, c) = l_x / (1 + e^{-a \cdot (t-c)}); \quad (1)$$

$$Z_{TP}(t, a_1, c_1, a_2, c_2) = (s_x \cdot k_{sx}) / ((1 + e^{-a_1 \cdot (t-c_1)}) \cdot (1 + e^{-a_2 \cdot (t-c_2)})), \quad (2)$$

$$Y_{TP} = \text{const},$$

где  $t$  – время;  $X_{TP}$ ,  $Z_{TP}$  – требуемые горизонтальные координаты груза в момент  $t$ ;  $Y_{TP}$  – вертикальная координата груза;  $a, c, a_1, c_1, a_2, c_2$  – параметры сигмоидальных функций;  $l_x$  – заданная длина перемещения груза вдоль оси  $X_0$  (начальная и конечная точки имеют нулевую координату  $Z=0$ );  $s_x$  – размер наибольшего заданного смещения дуги требуемой траектории груза вдоль оси  $Z_0$  (для обхода препятствия);  $k_{sx}$  – коэффициент коррекции наибольшего значения смещения груза вбок.

$$k_{sx} = (1 + e^{-a_1 \cdot (c-c_1)}) \cdot (1 + e^{-a_2 \cdot (c-c_2)}).$$

Функция (2) является произведением двух функций вида (1) – нарастающей и ниспадающей, с отличным друг от друга временем точек перегиба. Параметры  $c, c_1, c_2$  задают время точек перегиба сигмоидальных функций. Параметрами  $a, a_1, a_2$  определяется скорость изменения (роста или спада, определяется знаком) функций.

В результате в декартовой системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$  формируется траектория в виде дуги (см. рис. 4). Предельные размеры данной кривой в описываемой серии экспериментов были заданы параметрами  $l_x=10$  м и  $s_x=8$  м. Время перемещения точки подвеса груза  $T_{\Pi}$  принимало фиксированное значение  $T_{\Pi}=30$  с. Длина грузового каната принимала

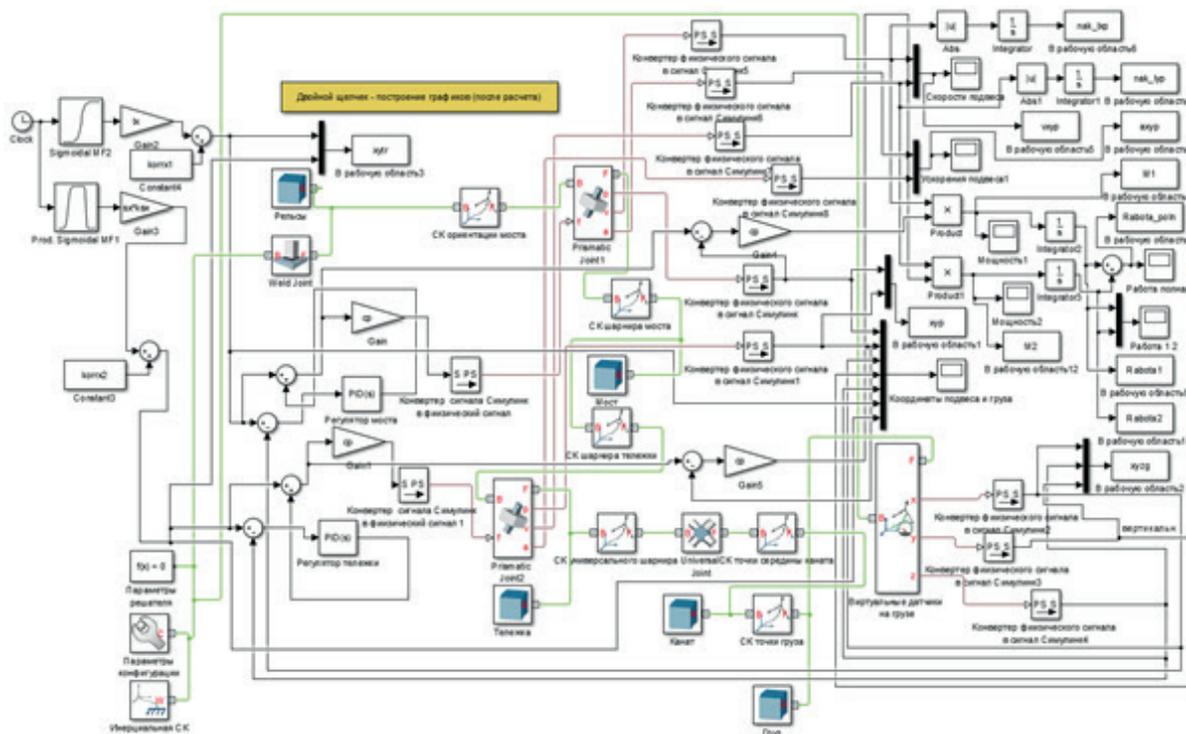


Рис. 3. Имитационная модель мостового крана с регуляторами в обозначениях SimMechanics Second Generation и Simulink

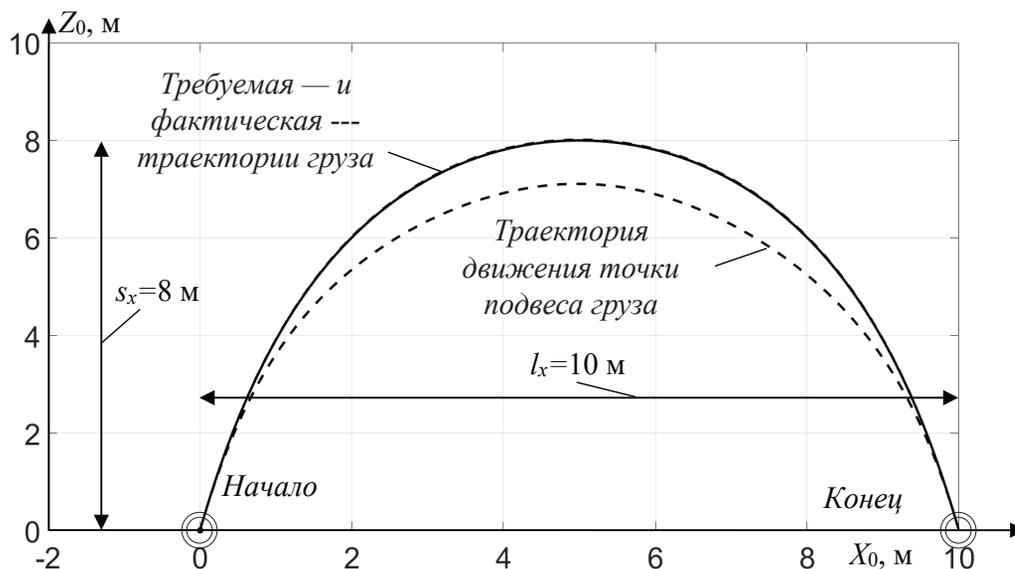


Рис. 4. Тестовая требуемая траектория груза, соответствующая ей фактическая траектория груза и траектория движения точки подвеса ( $l_x=10$  м,  $s_x=8$  м,  $T_n=30$  с,  $E=20$ ,  $F=5$ ,  $G=5$ )

также фиксированное значение 10 м. Масса груза была принята равной 100 кг.

В каждом эксперименте были получены значения максимальной абсолютной погрешности линейных координат груза  $\Delta_{max}$ , максимальных скоростей перемещения моста и грузовой тележки крана  $v_{1max}$ ,  $v_{2max}$ , максимальных ускорений моста и грузовой тележки  $a_{1max}$ ,  $a_{2max}$ .

Анализ результатов проведенного вычислительного эксперимента (рис. 5) показал, что для рассматриваемой тестовой траектории при увеличении значений пропорционального коэффициента регулятора  $E$  точность реализации сначала возрастает, а затем стабилизируется около минимальных ненулевых значений. При  $E \geq 50$  максимальная абсолютная

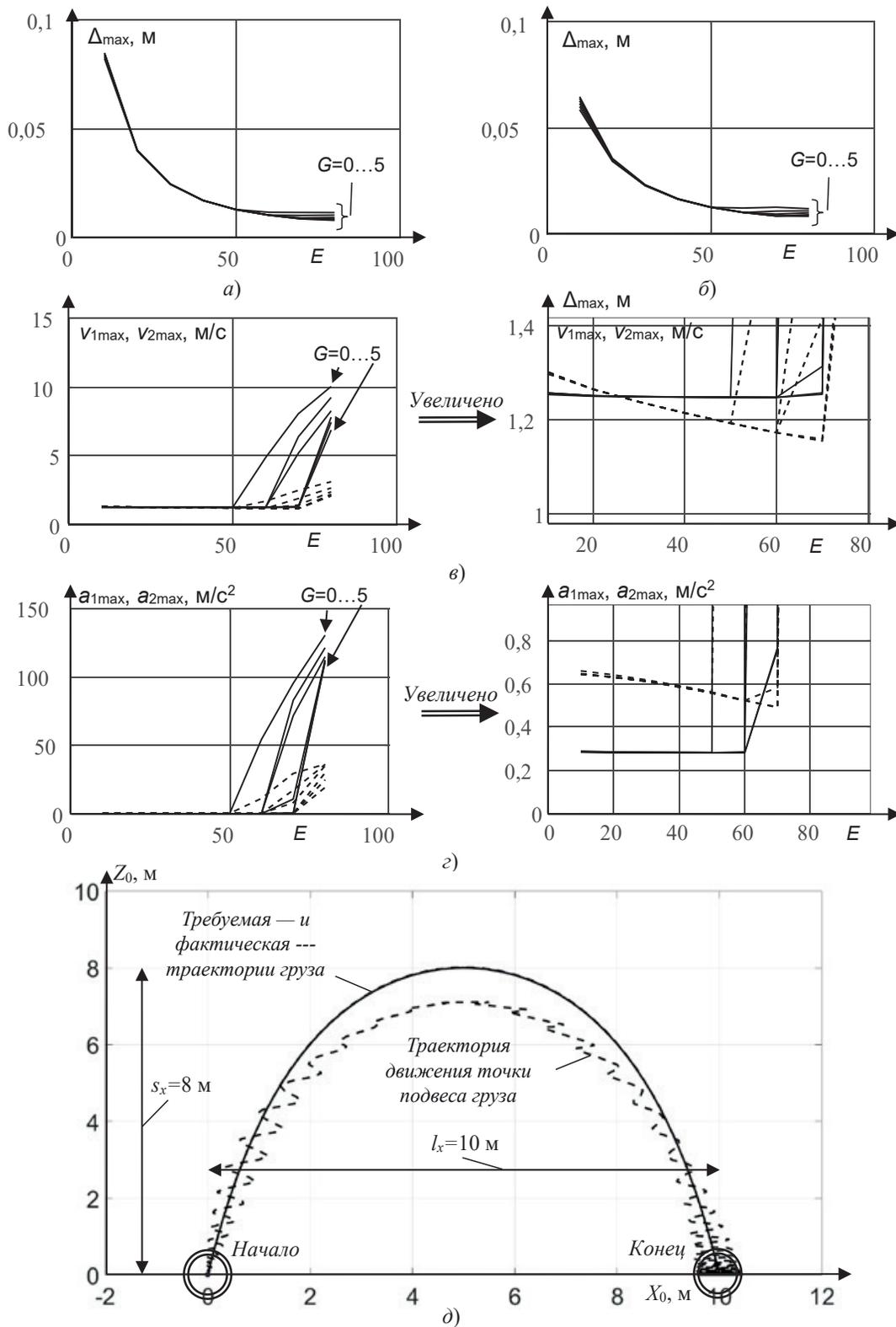


Рис. 5. Зависимости показателей, характеризующих процесс перемещения от пропорционального коэффициента регуляторов  $E$ : а – абсолютная погрешность линейных координат груза при  $F=0$ ; б – абсолютная погрешность линейных координат груза при  $F=5$ ; в – максимальные скорости перемещения моста (—) и грузовой тележки (---) крана при  $F=0$ ; г – максимальные ускорения моста (—) и грузовой тележки (---) крана при  $F=0$ ; д – фактическая траектория груза и траектория движения точки подвеса при  $E=60, F=0, G=0$

погрешность линейных координат груза стабилизируется около значений  $\Delta_{\max} \approx 0,01$  м (см. рис. 5, д). При этом изменение значений F и G в рассматриваемых диапазонах варьирования не оказывает существенного воздействия на точность перемещения (см. рис. 5, а и 5, б).

В то же время при  $E > 50$  возникают самоподдерживающиеся автоколебания моста и грузовой тележки, что выражается в резком, на порядок, увеличении максимальных скоростей перемещения моста и грузовой тележки МК (см. рис. 5, в), и увеличении на два порядка максимальных ускорений перемещения моста и грузовой тележки МК (см. рис. 5, г). Подобные ускорения практически не реализуемы ни современными, ни перспективными приводами моста и грузовой тележки МК, в том числе по причине больших значений масс и моментов инерции указанных подвижных звеньев. Поэтому сочетания значений коэффициентов регуляторов E, F и G, при которых скорости и ускорения моста и тележки МК резко возрастают, не могут быть использованы.

Увеличение значений F и G в рассматриваемых диапазонах варьирования повышает устойчивость динамической системы МК с регуляторами, что выражается в уменьшении максимальных скоростей и ускорений перемещения моста и грузовой тележки МК и сдвиге вправо по оси значений E точек начала резких скачков максимальных скоростей и ускорений.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С учетом анализа всех полученных результатов, на их основе был сделан следующий вывод. Для того, чтобы полностью исключить недопустимые самоподдерживающиеся автоколебания моста и грузовой тележки МК при обеспечении движения груза по тестовой и близким к ней траекториям в режиме гашения колебаний груза, целесообразно принять сочетание значений коэффициентов регуляторов  $E=15\dots 25$ ,  $F=4\dots 5$ ,  $G=4\dots 5$ . Данное сочетание значений коэффициентов, с одной стороны, обеспечивает достаточную точность реализации заданной траектории перемещения груза, а с другой стороны исключает самоподдерживающиеся автоколебания моста и грузовой тележки.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Щедринов, А.В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана / А.В. Щедринов, С.А. Сериков, В.В. Кол-

мыков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 8. – С. 13-17.

2. Толочко, О.И. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 22-28.

3. Шведова, О.А. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / О.А. Шведова и др. // Доклады БГУИР. – 2014. – № 1 (79). – С. 65-71.

4. Черноусько, Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 383 с.

5. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback // J. of Electrical and Electronics Engineering. – 1989. – Vol. 9, No. 1/2. – p. 17–26.

6. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes : PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. – 2003. – 100 p.

7. Korytov M., Shcherbakov V., Volf E. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes // International Journal of Mechanics and Control, ISSN: 1590-8844. – 2015. – Vol. 16, No. 2. – p. 3–8.

8. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size / V. Shcherbakov, etc. // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 811. – p. 99–103.

9. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, etc. // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vols. 701-702. – p. 715–720.

10. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes / Y.S. Kim, etc. // Industry Applications Conference. – 2003. – Vol. 1. – p. 262–269.

11. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / D. Blackburn, etc. // Journal of Vibration and Control. – 2010. – № 16. – p. 477–501.

12. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration // European Journal of Control. – 1999. – No. 5. – p. 208–218.

13. Денисенко В.В. Разновидности ПИД-регуляторов / В.В. Денисенко // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 6. – С. 45-50.

14. Mitchell, Tom M. Machine Learning. – WCB/McGraw-Hill, 1997. – 414 p.

## JUSTIFICATION OF VALUES FACTOR CONTROLLER VIBRATION DAMPING SHIPPING BRIDGE CRANES

**Abstract.** As a result of computational experiments on the simulation model of the bridge crane with controller cancellations load fluctuations when it is moved to test trajectories are obtained depending on the indicators characterizing the process of moving from the regulator coefficients. The indicators used by the maximum absolute error of the linear referencing load, the maximum speed of movement of the bridge crane and a cargo truck, the maximum acceleration of the bridge and trolley. Substantiated rational values of the vibration damping control factors, which do not appear self-sustaining self-oscillation of the bridge and trolley.

**Keywords:** bridge crane, vibration damping, controller, load sway.

## REFERENCES

1. Shedrinov, A. An automatic system of load's oscillation damping for the bridge crane / A. Shedrinov, S. Serikov, V. Kolmykov // Devices and systems, Management, Controlling, Diagnostic, 2007, № 8. pp. 13-17.
  2. Tolochko O. A comparative analysis of methods of damping the load suspended from the mechanism of translational motion of overhead crane / O. Tolochko, D. Bazhutin // Electrical engineering and electrical equipment, 2010. № 75. pp. 22-28.
  3. Shvedova, O.A. Algorithms for suppressing vibrations of goods lifting and transport mechanisms using fuzzy logic operation / O.A. Shvedova, etc. // Reports BSUIR. – 2014. – № 1 (79). – pp. 65-71.
  4. Chernousko, F.L. Fluctuations management / F.L. Chernousko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 383 p.
  5. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback // J. of Electrical and Electronics Engineering. – 1989. – Vol. 9, No. 1/2. – pp. 17-26.
  6. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes : PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. – 2003. – 100 p.
  7. Korytov M., Shcherbakov V., Volf E. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes // International Journal of Mechanics and Control, ISSN: 1590-8844. – 2015. – Vol. 16, No. 2. – pp. 3–8.
  8. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size / V. Shcherbakov, etc. // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 811. – pp. 99–103.
  9. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, etc. // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vols. 701-702. – pp. 715–720.
  10. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes / Y.S. Kim, etc. // Industry Applications Conference. – 2003. – Vol. 1. – pp. 262–269.
  11. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / D. Blackburn, etc. // Journal of Vibration and Control. – 2010. – № 16. – pp. 477–501.
  12. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration // European Journal of Control. – 1999. – No. 5. – pp. 208–218.
  13. Denisenko, V.V. Varieties of PID-regulators / V.V. Denisenko // Automation in the industry. – 2007. – № 6. – pp. 45-50.
  14. Mitchell, Tom M. Machine Learning. – WCB/McGraw-Hill, 1997. – 414 p.
- Корытов Михаил Сергеевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kms142@mail.ru)*
- Щербakov Виталий Сергеевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org)*
- Шершнева Елена Олеговна – инженер-программист отдела по связям с общественностью ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5)*
- Mikhail S. Korytov (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of a university department “Automobiles, construction materials and technologies”, The Siberian Automobile and Highway University (644080, Omsk, pr. Mira, 5, e-mail: kms142@mail.ru)*
- Vitaliy S. Sherbakov (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of*

*the Department "Automation of industrial processes and electrical", The Siberian Automobile and Highway University (644080, Omsk, pr. Mira, 5, e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org)*

*Elena O. Shershneva (Omsk, Russian Federation) – Software Engineer of Public Relations, The Siberian Automobile and Highway University (644080, Omsk, pr. Mira, 5)*

.....

УДК 621.926

## **ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*В. Н. Кузнецова, Я. В. Ярмович  
ФГБОУ ВО «СИБАДИ», Россия, г. Омск*

**Аннотация.** Вероятностный характер распределения ресурса агрегатов, сборочных единиц и деталей машин и оборудования, в том числе и дробильно-размольного, определяет наличие определенных резервов в совершенствовании системы планово-предупредительных работ при проведении технического обслуживания (ТО) и ремонта. Современный этап совершенствования системы технического обслуживания машин предусматривает разработки управляющих воздействий на основе показателей технической диагностики, которая обеспечивает возможность прогнозирования состояния элементов машин. В статье приведены результаты исследований по определению потребности дробильно-размольного оборудования в проведении ТО или ремонте исходя из фактического состояния смазочного материала.

**Ключевые слова:** Дробильно-размольное оборудование, долговечность, система смазки, фактическое состояние.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Структура системы планово-предупредительных работ по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту (система ППР) строительных и дорожных машин предусматривает выполнение их в плановом порядке с учетом наработки техники. Виды технического обслуживания производятся с различной периодичностью и отличаются регламентом выполняемых работ, трудоёмкостью и продолжительностью выполнения. Система планово-предупредительного ТО и ремонта дорожных и строительных машин базируется на фундаментальных исследованиях процессов трения, изнашивания и смазки материалов и деталей машин, а также на общих вопросах теории надежности. Она представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий предупредительного характера, проводимых периодически в плановом порядке и направленных на поддержание машин в работоспособном состоянии без учета фактического состояния машины и ее элементов. Периодичность и качество проведения операций технического обслуживания и ремонта зависит от принятой на предприя-

тии системы технической эксплуатации машин и оборудования, а также от квалификации обслуживающего персонала. Большое значение при этом имеет наличие и номенклатура технологических средств на предприятии.

В последние годы при назначении режимов обслуживания наметилась тенденция учета технического состояния машин и фактической потребности в ТО и ремонте почти во всех отраслях машиностроения. Кроме этого, проводятся исследования по оптимизации интервала между профилактическими ремонтами оборудования и создания оптимальных регламентов работ по ТО и ремонту. Очевидно, что совершенствование системы ТО и ремонта техники необходимо проводить в следующих направлениях: всестороннее определение технического состояния машин или их элементов и факторов, влияющих на него; учет индивидуальных особенностей машин; совершенствование производственно-технической базы предприятий. При этом особое значение имеет обоснование периодичности проведения управляющих воздействий: замены смазочных материалов и рабочих жидкостей, регулировочных и других видов работ [1].