

5. Balakin P.D., Rakimzhanov N.E., D.A. Skripnichenko, Je.A. Kuznecov Matematicheskoe modelirovanie dinamiki dvizhenija mnogocelevyh gusenichnyh mashin [Mathematical modelling of dynamics of motion multipurpose tracked vehicle]. *Omskij nauchnyj vestnik. Pribory, mashiny i tehnologii*, 2012, no 3 (113). pp. 40 – 44.

6. Alferov S.V., Kuznecov Je.A., Suhorukov Ja.V., D.A. Skripnichenko Obosnovanie neobходимosti avtomatizacii rezhimov raboty gidravlicheskih amortizatorov mnogocelevyh gusenichnyh mashin [The rationale for automation of modes of operation of hydraulic shock absorbers multi-purpose tracked machines]. *Vestnik Sibirskogo otdelenija akademii voennyh nauk*, № 23, 2013. pp. 181-191.

7. *Analizator vibracij dvuhkanal'noj «Diana - 2M».* Rukovodstvo po jekspluatacii. ILMF.402213.005.RJe [The dual channel vibration analyzer "Diana - 2M". Manual. ILMF.402213.005.Re].

8. *Teorija i konstrukcija tanka* [Theory and design of the tank]. Parametry vneshnej sredy, ispol'zuemye

v raschetah tankov. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 196 p.

Скрипниченко Дмитрий Александрович (Россия г. Омск) – преподаватель кафедры Омского автобронетанкового инженерного института (филиала) федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации. (644098, г Омск, городок Военный 14-й).

Skripnichenko Dmitry, (Russian Federation, Omsk) – lecturer of Omsk armored engineering Institute (branch) Federal state military educational institution of higher professional education "Military Academy of logistics behalf of the army General A.V. Khruleva" of the Ministry of defense of the Russian Federatio (644098, Omsk, 14th Military camp).

УДК 621.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАЯТНИКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА, ПЕРЕМЕЩАЕМОГО МОСТОВЫМ КРАНОМ С РЕЛЕЙНЫМ ПРИВОДОМ

В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Шершнева
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В результате проведенных исследований получены зависимости угла отклонения грузового каната мостового крана от вертикали и скорости изменения данного угла от ускорения и времени ускоренного движения точки подвеса груза. Полученные зависимости могут быть использованы для гашения маятниковых колебаний груза, перемещаемого мостовым краном, при торможении в конечный момент перемещения груза.

Ключевые слова: мостовой кран, привод, управление релейного типа, ускорение, груз, гашение колебаний.

Введение

Необходимым условием повышения производительности мостового крана (МК) является уменьшение остаточных маятниковых колебаний груза после его перемещения в целевую конечную позицию. Время завершения колебаний груза при отсутствии их гашения может составлять до 20 % от времени цикла МК [1,2,3].

Для приводов релейного типа, которыми оснащены большинство используемых в настоящее время МК, целесообразно при сохранении минимального числа включений и выключений обеспечить наиболее полное гашение остаточных колебаний груза, поскольку дополнительные пуски электродвигателей привода приводят к появлению больших пусковых токов, уменьшают срок службы электродвигателя [4].

Задача определения ускорения точки подвеса груза и времени его ускоренного движения для гашения остаточных колебаний груза

В связи с этим актуальной является задача оперативного определения таких значений ускорения точки подвеса груза $a_{\text{торм}}$ и времени его ускоренного движения $T_{\text{торм}}$, которые позволят минимизировать остаточные маятниковые колебания груза для определенных текущих значений угла отклонения грузового каната от вертикали θ и его производной $\dot{\theta}$.

Рассматривается процесс колебаний груза в плоскости, т.е. отдельная координата маятниковой системы МК. Пространственные колебания груза могут быть при малой амплитуде представлены как суперпозиция колебаний груза в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [1,2,3].

Решение сформулированной задачи для каждого из сочетаний двух значений $[\theta; \dot{\theta}]$ требует выполнения оптимизации двух значений $[a_{\text{торм}}; T_{\text{торм}}]$, т.е. решения двухпараметрической оптимизационной задачи.

При использовании методов имитационного моделирования для решения указанной задачи оптимизации, требуется перебор множества альтернативных вариантов с осуществлением для каждого варианта процесса имитационного моделирования торможения МК с грузом [5]. Это достаточно затратный по времени способ, что затрудняет его прямое использование в режиме реального времени (измерение текущих значений $[\theta; \dot{\theta}]$ с немедленным началом торможения точки подвеса в режиме $[a_{\text{торм}}; T_{\text{торм}}]$).

Аналитическое решение поставленной задачи также затруднено нелинейным характером дифференциальных уравнений, описывающих динамическую систему МК с грузом.

В то же время разгон МК из положения равновесия грузового каната и груза (отсутствие раскачивания) в режиме $[a_{\text{разг}}; T_{\text{разг}}]$ до некоторых, заранее неизвестных значений $[\theta; \dot{\theta}]$ (прямая задача № 1) и торможение с этих же значений до положения равновесия в режиме $[a_{\text{торм}}; T_{\text{торм}}]$ (обратная задача № 2, поставленная в настоящей работе) в силу голономности и стационарности динамической системы должны осуществляться с одинаковыми по модулю ускорениями ($|a_{\text{разг}}| = |a_{\text{торм}}|$) за оди-

наковое время ($T_{\text{разг}} = T_{\text{торм}}$) [4]. Данная закономерность подтверждена экспериментально.

Это открывает возможность использования результатов многократного решения прямой задачи при различных сочетаниях $[a_{\text{разг}}; T_{\text{разг}}]$ для интерполяции $[a_{\text{торм}}; T_{\text{торм}}]$ для заданного сочетания значений $[\theta; \dot{\theta}]$.

Результаты моделирования разгона мостового крана из положения равновесия с заданными ускорением моста и временем разгона

При помощи имитационной модели МК с грузом [5,6] путем варьирования ускорения разгона, времени разгона и длины грузового каната МК l в пределах

$$a_{\text{разг}} = (0, 1:0, 1:5) \text{ м/с}^2; T_{\text{разг}} = (0, 1:0, 1:3, 5) \text{ с}; \\ l = (2, 5:0, 5:12) \text{ м} \quad (1)$$

были сформированы два трехмерных массива конечных значений угла отклонения каната $\theta = f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ и скорости изменения указанного угла $\dot{\theta} = f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ в момент времени $T_{\text{разг}}$ (разгон начинался в нулевой момент времени).

На рисунке 1 приведен пример временных зависимостей θ и $\dot{\theta}$, полученных в отдельном вычислительном эксперименте, по конечным значениям которых (для момента времени $T_{\text{разг}} = 3,4$ с в рассматриваемом примере) формировались элементы массивов $\theta = f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ и $\dot{\theta} = f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$.

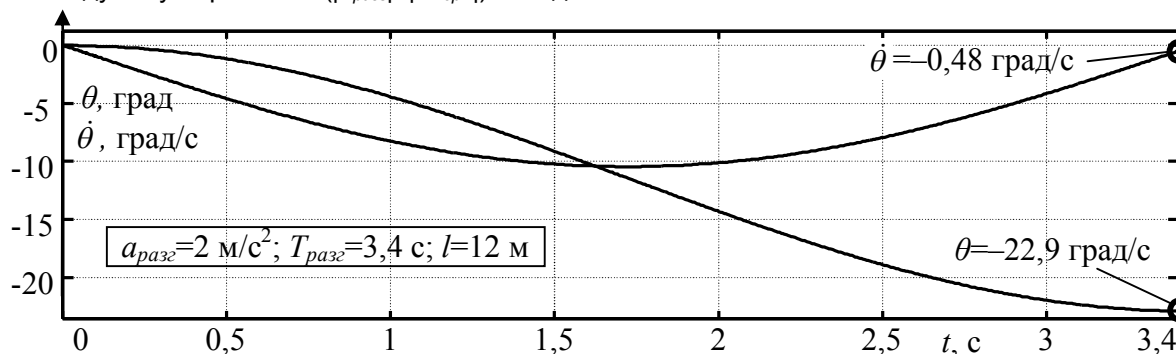


Рис. 1. Временные зависимости θ и $\dot{\theta}$ при разгоне с положения равновесия (решение прямой задачи, пример)

На рисунке 2 приведены некоторые формы графического представления полученных в результате решения прямой задачи по массивам $\theta = f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ и $\dot{\theta} = f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ функциональных зависимостей различных параметров друг от друга.

Решение задачи интерполяции значений ускорения и времени торможения для заданного сочетания значений угла отклонения каната и его производной

Попытки подобрать по данным массивам уравнения регрессии в виде выражений $a_{\text{разг}} = f(\theta, \dot{\theta}, l)$ и $T_{\text{разг}} = f(\theta, \dot{\theta}, l)$, в которых использовались выражения в виде симметричных многочленов от трех переменных-предикторов $\theta, \dot{\theta}$ и l в степенях $[0; 1; 2; 3; 4]$ во всех возможных сочетаниях степеней аргументов, не привели к положительному результату, поскольку максимальная относительная погрешность аппроксимации превышала 60 %.

Поэтому возникла задача интерполяции значений $[a_{\text{торм}}; T_{\text{торм}}]$ для заданного сочетания значений $[\theta_3; \dot{\theta}_3; l_3]$. Ее решение осложняется тем, что значения θ и $\dot{\theta}$, полученные в

результате решения прямой задачи при равномерном монотонном изменении $a_{\text{разг}}$, $T_{\text{разг}}$ и l , в свою очередь, изменяются неравномерно и немонотонно.

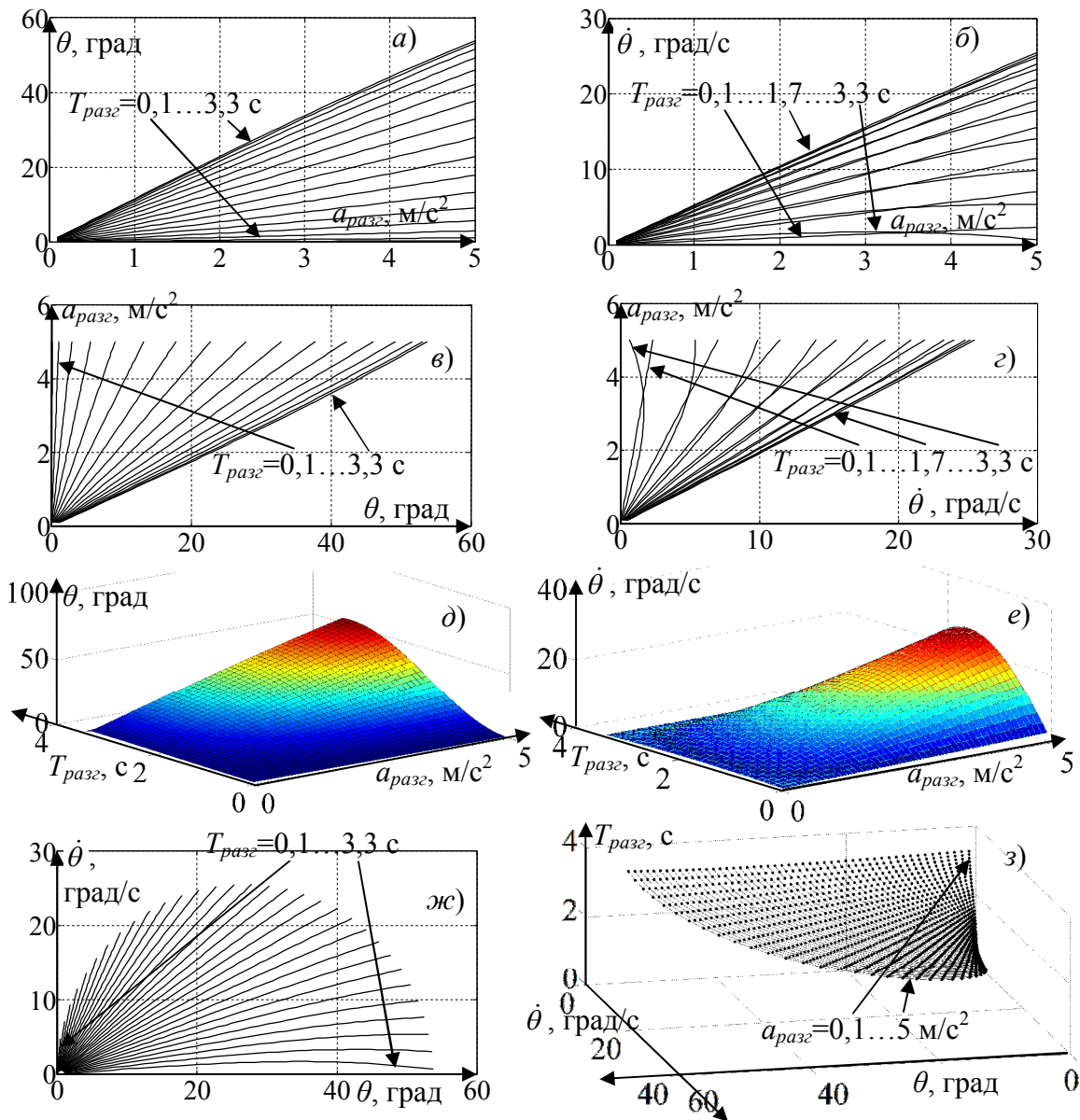


Рис. 2. Полученные в результате решения прямой задачи по массивам $\theta=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ и $\dot{\theta}=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}}, l)$ функциональные зависимости: а) θ от $a_{\text{разг}}$; б) $\dot{\theta}$ от $a_{\text{разг}}$; в) $a_{\text{разг}}$ от θ ; г) $a_{\text{разг}}$ от $\dot{\theta}$; д) поверхность $\dot{\theta}=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}})$; е) поверхность $\theta=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}})$; ж) $\dot{\theta}$ от θ ; з) поверхность $T_{\text{разг}}=f(\theta, \dot{\theta})$

На рисунке 3 приведены в качестве примера 4 экспериментальные точки данных, полученных из массивов $\theta=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}})$ и $\dot{\theta}=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}})$ для заданной точки со значениями $\theta_3 = 15,3629$ град и $\dot{\theta}_3 = 10,62$ град/с при $l = 10$ м ($l_3 = 10,16$ м).

Для их нахождения осуществлялся перебор всех экспериментальных точек массивов

$\theta=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}})$ и $\dot{\theta}=f(a_{\text{разг}}, T_{\text{разг}})$ с поиском экспериментальной точки, имеющей минимальное манхэттенское расстояние от заданной. Данное расстояние определялось по зависимости

$$R_{\text{manh}} = |\theta(i_a, i_T) - \theta_3| + |\dot{\theta}(i_a, i_T) - \dot{\theta}_3|, \quad (2)$$

где i_a, i_T – целочисленные индексы, соответствующие значениям ускорения разгона и времени $a_{разг}, T_{разг}$ соответственно из (1) в порядке возрастания последних. Индексы

экспериментальной точки, имеющей минимальное манхэттенское расстояние от заданной, обозначены i_{amin}, i_{Tmin} .

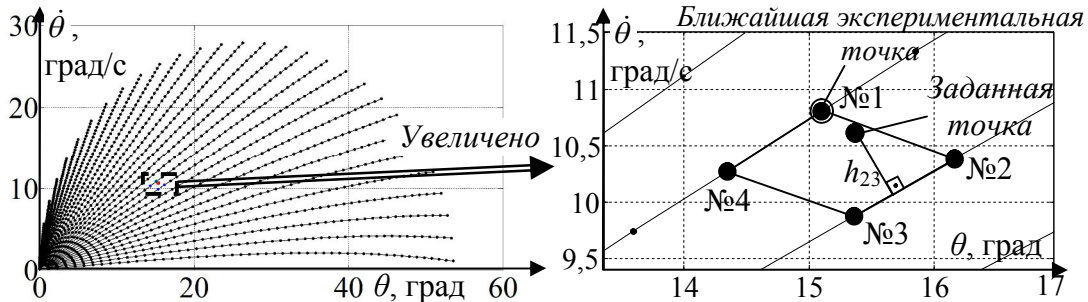


Рис. 3. Пример ближайших 4-х точек экспериментальных данных, полученных из массивов $\theta=f(a_{разг}, T_{разг})$ и $\dot{\theta}=f(a_{разг}, T_{разг})$ для заданной точки со значениями $\theta_3=15,3629$ град и $\dot{\theta}_3=10,62$ град/с

Далее с использованием известной численной операции проверки попадания точки на плоскости внутрь полигона [7] выполнялась проверка попадания заданной точки $[\theta_3; \dot{\theta}_3]$ внутрь каждого из четырех четырехугольников, имеющего в качестве одной из вершин экспериментальную точку с наименьшим расстоянием до заданной. При этом индексы точек, образующих четырехугольники i_a, i_T , принимали значения в пределах $[(i_{amin}-1): (i_{amin}+1); (i_{Tmin}-1): (i_{Tmin}+1)]$.

Пусть индексы ближайших 4-х точек экспериментальных данных, в четырехугольник из которых попадает заданная точка, равны $i_{a1}...i_{a4}$ и $i_{T1}...i_{T4}$ соответственно. Обозначим $x_A=\theta_3; z_A=\dot{\theta}_3; x_B=\theta(i_{a1}, i_{T1}); z_B=\dot{\theta}(i_{a1}, i_{T1}); x_C=\theta(i_{a2}, i_{T2}); z_C=\dot{\theta}(i_{a2}, i_{T2})$.

В этом случае высота h_{23} , опущенная из заданной точки с координатами $[\theta_3; \dot{\theta}_3]$ на линию стороны четырехугольника, образованную вершинами № 2 и № 3, будет вычисляться по формуле

$$h_{23} = \frac{|(z_B - z_C)x_A + (x_C - x_B)z_A + (x_B z_C - x_C z_B)|}{\sqrt{(z_B - z_C)^2 + (x_C - x_B)^2}} \quad (3)$$

Аналогичным образом будут вычисляться высоты из заданной точки на остальные линии сторон четырехугольника h_{12}, h_{34}, h_{14} .

Вычисление значений ускорения $a_{3н}$ и времени ускоренного движения $T_{3н}$, соответствующих заданным значениям угла отклонения грузового каната $\theta_{3н}$ и его скорости $\dot{\theta}_{3н}$, производилось методом линейной интерполяции по известным зависимостям [8]

$$a_{3н} = a_{разг1} + h_{12}(a_{разг1} - a_{разг2}) / (h_{12} + h_{34});$$

$$T_{3н} = T_{разг1} + h_{14}(T_{разг1} - T_{разг2}) / (h_{14} + h_{23}). \quad (4)$$

Вычисленные по (4) значения a_3, T_3 для варьируемой в вычислительных экспериментах длины грузового каната МК, ближайшей меньшей к заданной ($l_{3н}=10$ м) обозначены $a_{3н}, T_{3н}$. Аналогичные значения a_3, T_3 для длины грузового каната МК, ближайшей большей к заданной ($l_{3б}=10,5$ м) обозначены $a_{3б}, T_{3б}$.

Окончательные выражения для интерполяции значений ускорения и времени ускоренного движения будут иметь вид

$$a_3 = a_{3н} + (l - l_{3н})(a_{3б} - a_{3н}) / ((l - l_{3н}) + (l_{3б} - l));$$

$$T_3 = T_{3н} + (l - l_{3н})(T_{3б} - T_{3н}) / ((l - l_{3н}) + (l_{3б} - l)). \quad (5)$$

Блок-схема алгоритма интерполяции значений $[a_3; T_3]$ для заданного сочетания значений $[\theta_3; \dot{\theta}_3; l_3]$ приведена на рисунке 4.

Заключение

Проверка разработанного алгоритма с интерполяцией для гашения колебаний груза показала его работоспособность. Амплитуда остаточных колебаний при различных значениях исходных данных не превышала 1 град.

Использование разработанного алгоритма интерполяции значений $[a_3; T_3]$ для заданного сочетания значений $[\theta_3; \dot{\theta}_3; l_3]$ открывает возможность синтеза в режиме реального времени значений ускорения и времени торможения, обеспечивающих гашение маятниковых колебаний груза на канатном подвесе для текущих (измеряемых) значений угла отклонения грузового каната МК от вертикали и скорости изменения угла отклонения. При этом непосредственно не используется занимающее значительное время имитационное моделирование, синтез выполняется по численным значениям массивов $\theta=f(a_{разг}, T_{разг}, l)$ и $\dot{\theta}=f(a_{разг}, T_{разг}, l)$.

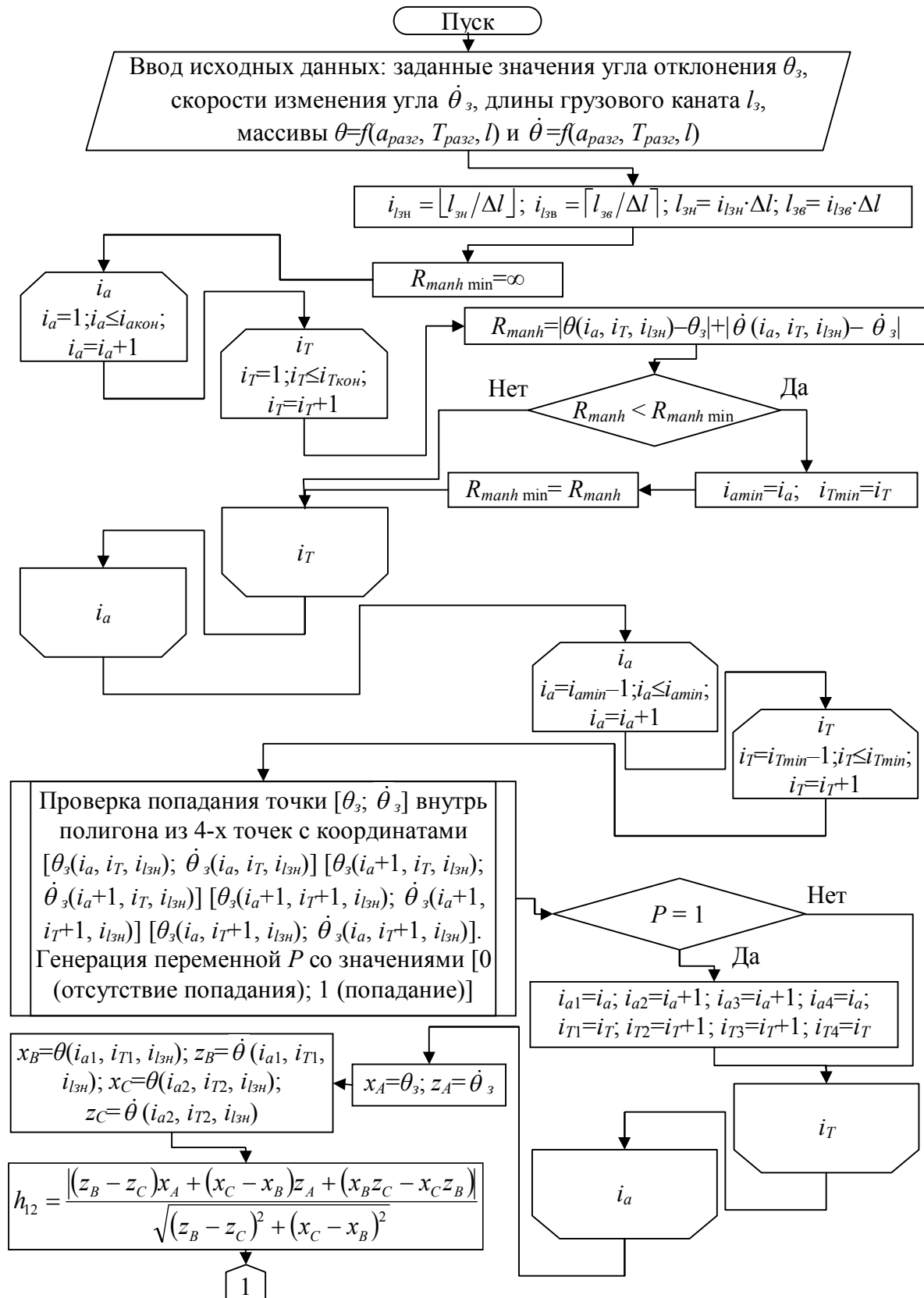


Рис. 4. Блок-схема алгоритма интерполяции значений $[a_3, T_3]$ для заданного сочетания значений $[\theta_3, \dot{\theta}_3, l_3]$ (начало)

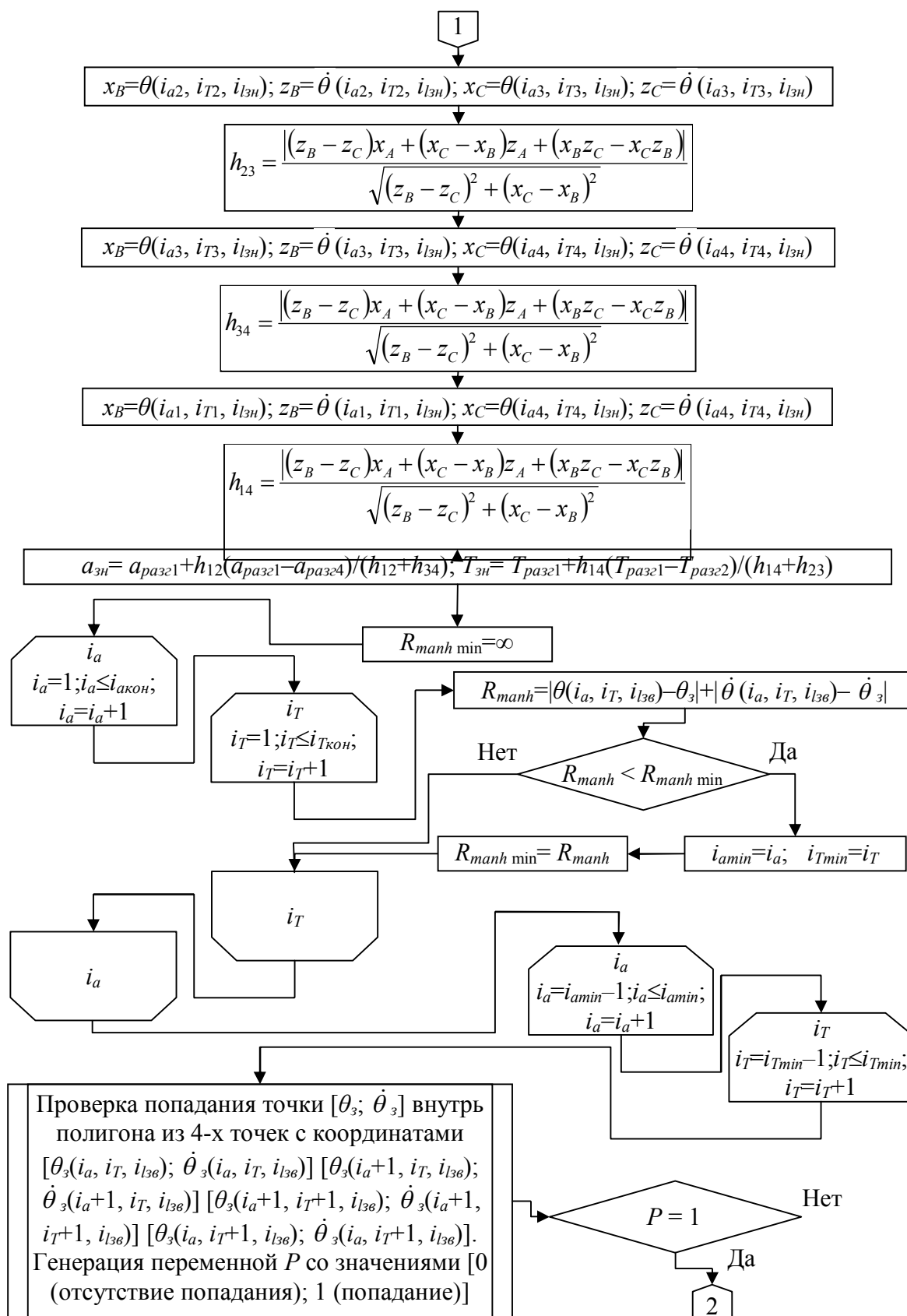


Рис. 4. Блок-схема алгоритма интерполяции значений $[a_3; T_3]$ для заданного сочетания значений $[\theta_3; \dot{\theta}_3; i_3]$ (продолжение)

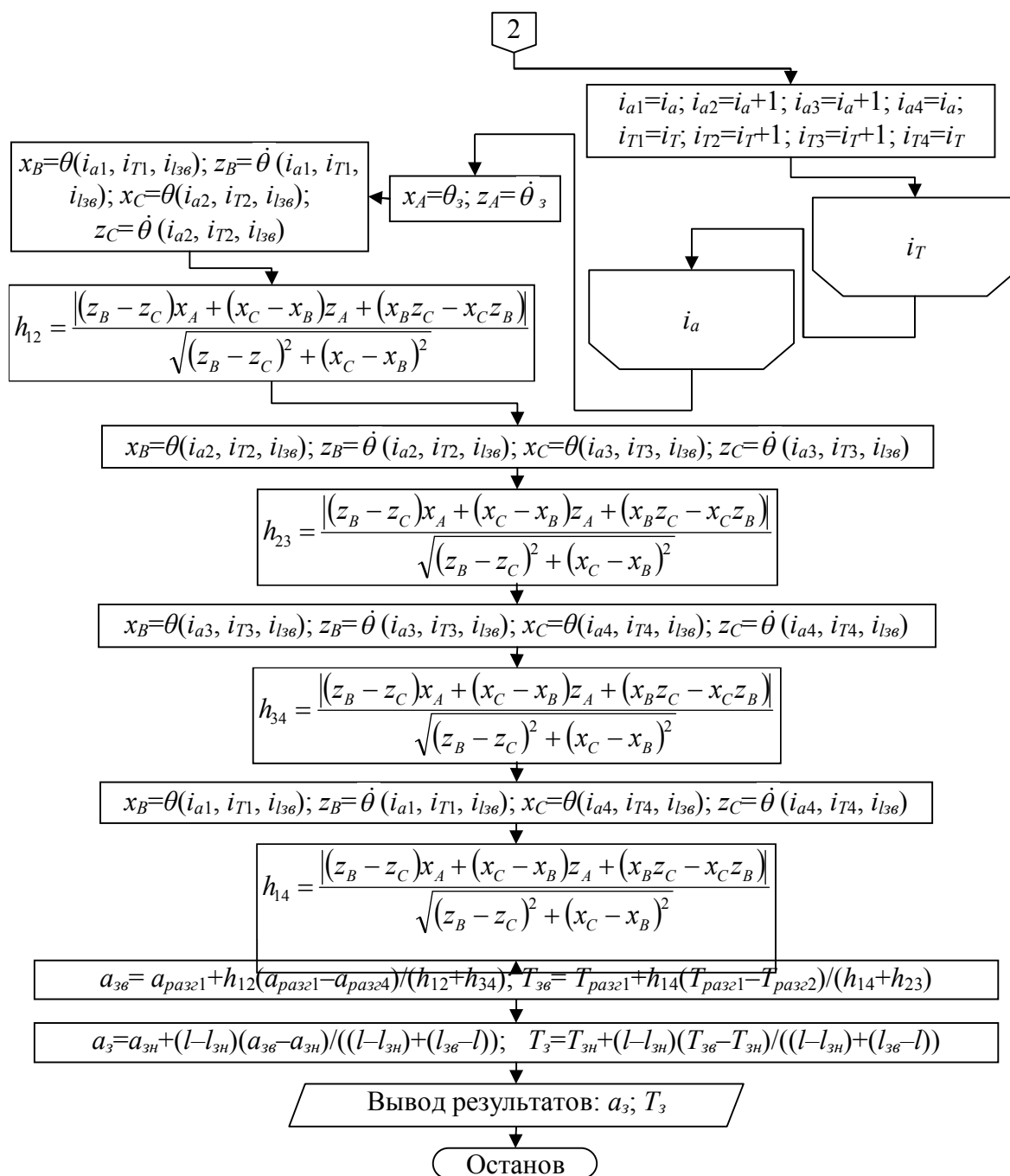


Рис. 4. Блок-схема алгоритма интерполяции значений $[a_3; T_3]$ для заданного сочетания значений $[\theta_3; \dot{\theta}_3; l_3]$ (окончание)

Библиографический список

1. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenu V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. № 16. pp. 477-501.
 2. Щедринов, А.В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана / А.В. Щедринов, С.А. Сериков, В.В. Колмыков //

Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 8. – С. 13-17.
 3. 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.
 4. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Академия, 2007. – 368 с.

5. Shcherbakov, V. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, M. Korytov, R. Sukharev, E. Volf // Applied Mechanics and Materials. Vols. 701-702 (2015). pp. 715-720.

6. Shcherbakov, V. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size / V. Shcherbakov, M. Korytov, E. Volf, I. Breus // Applied Mechanics and Materials. Vol. 811 (2015). pp. 99-103.

7. Сергеев, В.В. Алгоритмы локализации точки в трехмерном пространстве для генерации объекта при моделировании методом частиц / В.В. Сергеев, С.Ю. Коростелев, С.Г. Псахье // Известия ТПУ. – 2008. – №5. – С. 44-47.

8. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

RESEARCH OF INDICATORS OF PENDULAR FLUCTUATIONS OF THE FREIGHT MOVED WITH THE BRIDGE CRANE WITH THE RELAY DRIVE

V. S. Scherbakov, M. S. Korytov, E.O. Shershneva

Abstract. The studies were obtained depending the angle of deflection of the bridge crane hoist rope from the vertical, and the rate of change of the angle of the acceleration of time and the accelerated movement of the point of suspension of cargo. These dependencies can be used to extinguish the pendulum oscillation of the load being moved by overhead crane, when braking in the final moment of moving goods.

Keywords: bridge crane, drive, control relay type, acceleration, load, vibration damping.

References

1. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenu V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. № 16. pp. 477-501.

2. Shhedrinov A.V., Serikov S.A., Kolmykov V.V. Avtomaticheskaja sistema uspokoenija kolebanij gruza dlja mostovogo krana [An automatic system of load's oscillation damping for the bridge crane]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diag-nostika*, 2007, no 8. pp. 13-17.

3. Tolochko O.I. Bazhutin D.V. Sravnitel'nyj analiz meto-dov gashenija kolebanij gruza, podvешennogo k mehanizmu postupatel'nogo dvizhenija mostovogo krana [A comparative analysis of methods of damping the load suspended from the mechanism of translational motion of overhead crane]. *Jelektromashinostroenie i jelek-trooborudovanie*, 2010, no 75. pp. 22-28.

4. Moskalenko V.V. *Jelektricheskij privod* [Electric drive]. Moscow, Akademija, 2007. 368 p.

5. Shcherbakov, V. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, M. Korytov, R. Sukharev, E. Volf // Applied Mechanics and Materials. Vols. 701-702 (2015). pp. 715-720.

6. Shcherbakov, V. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size / V. Shcherbakov, M. Korytov, E. Volf, I. Breus // Applied Mechanics and Materials. Vol. 811 (2015). pp. 99-103.

7. Sergeev V.V., Korostelev S.Ju., Psah'e S.G. Algoritmy lokalizacii toch-ki v trehmernom prostranstve dlja generacii ob'ekta pri modelirovanii metodom chastic [Algorithms localization point in three-dimensional space to generate the object in the simulation by particle]. *Izvestija TPU*, 2008, no 5. pp. 44-47.

8. Kalitkin N.N. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1978. 512 p.

Щербakov Виталий Сергеевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира,5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

Корытов Михаил Сергеевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира,5, e-mail: kms142@mail.ru).

Шершнева Елена Олеговна (Россия, г. Омск) – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира,5, e-mail: wolf_eo@sibadi.org).

Sherbakov Vitaliy Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of The Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

Korytov Mikhail Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: kms142@mail.ru).

Shershneva Elena Olegovna (Russian Federation, Omsk) – graduate student of the department «Computer-aided manufacturing and electrical engineering», The Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: wolf_eo@sibadi.org).