

8. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448с.

SIMULATION OF LOADING CONDITIONS OF KINEMATIC PAIR "DRIVING GEAR – SLEWING RING'S CROWN" IN THE STUDY OF ENERGY INTENSITY OF EXCAVATOR'S SLEWING MECHANISM

V.N. Kuznetsova, V.V. Savinkin

Abstract. The paper presents the results of calculating kinematic pair of slewing ring of a single bucket excavator and distribution of the load over its contact surface. On the basis of studying loading conditions of a slewing ring with maximum values of inertia which appears in quick acceleration and braking, it is determined that peak voltages, appearing in teeth's engagement, contribute to decrease of durability.

Keywords: single bucket excavator, slewing ring, efficiency, simulation, calculation, process.

References

1. Batenkina O.V. *Sozdanie sistemy avtomatizacii konstruktorsko-tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva: avtoref. dis.... kand. tehn. nauk*. [Creation of a system of automating design-engineering preparation of production. Avtoref. cand. tech. science]. Omsk, 2005. 19 p.
2. Probe T. *Reshenie inzhenernykh zadach na JeVM: Prakticheskoe rukovodstvo* [The solution of engineering tasks on the computer: Practical guidance]. Moscow, World, 1982. 238 p.
3. Bondarovich B.A. *Nadjozhnost' metallokonstrukcij zemlerojnykh mashin. Metody ocenki i raschjota* [Reliability of metal constructions of earthmoving machinery. Methods of assessment and calculation]. Moscow, Engineering, 1971. 216 p.
4. Volkov D.P. *Problemy dinamiki, prochnosti, dolgovechnosti i nadjozhnosti stroitel'nykh i dorozhnykh mashin* [Problems of dynamics, strength, durability

and reliability of construction and road machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1993. no 5. pp. 4 - 9.

5. Alyamovskiy A.A. *SolidWorks/COSMOSWorks. Inzhenernyj analiz metodom konechnykh jelementov* [SolidWorks / COSMOSWorks. Engineering analysis by the finite element method]. Moscow, DMK Press, 2004. 432 p.

6. Brussat T.R. [An approach to predicting the growth to failure of fatigue crack subjected to arbitrary cyclic loading, *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 486, 1971, American Society For Testing and Materials]. pp. 122-143.

7. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij* [Predicting machine and structures' resource]. Moscow, Engineering, 1984. 312 p.

8. Bolotin V.V. *Resurs mashin i konstrukcij* [Resource of machines and structures]. Moscow, Engineering, 1990. 448 p.

Кузнецова Виктория Николаевна (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, ул. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Савинкин Виталий Владимирович (Казахстан, г. Петропавловск) – кандидат технических наук, заведующий кафедрой Транспорт и машиностроение Северо-Казахстанского государственного университета им. М. Козыбаева (150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86).

Kuznetsova Viktoria Nikolaevna (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave. 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru)

Savinkin Vitaliy Vladimirovich (Kazakhstan, Petropavlovsk) – candidate of technical sciences, head of the department "Transport and mechanical engineering" of The North Kazakhstan state university of M. Kozybayev (150000, Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin St., 86)

УДК 621.86

ОБОСНОВАНИЕ МНОГОМЕРНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МОСТОВОГО КРАНА

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

Аннотация. Предложена расчетная схема мостового крана, а также его имитационная модель. На основании имитационной модели построена регрессионная модель, позволяющая определить различные показатели рабочего процесса мостового крана. Сделан вывод о том, что усложнение регрессионного выражения путем увеличения числа его слагаемых свыше 12 не приводит к дальнейшему увеличению точности аппроксимации.

Ключевые слова: рабочий процесс мостового крана, нелинейная множественная регрессия, точность аппроксимации, коэффициент регрессии, абсолютная погрешность.

Введение

Для решения задачи обоснованного назначения параметров технологического процесса перемещения груза мостовым краном (МК), а также для анализа конструктивных решений при проектировании МК, их приводов и элементов, могут использоваться разнообразные критерии сравнения вариантов.

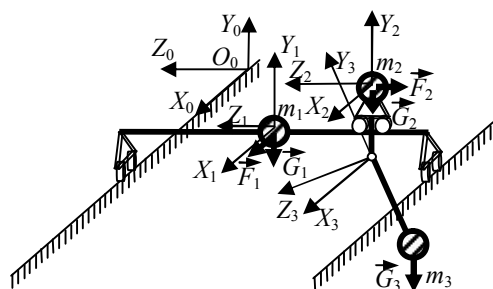


Рис. 1. Расчетная схема мостового крана: $m_1 \dots m_3$ – массы подвижных звеньев моста, грузовой тележки и груза; $\vec{G}_1 \dots \vec{G}_3$ – силы тяжести масс

звеньев; $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ – управляющие воздействия в виде сил со стороны привода на мост и грузую тележку; $O_0X_0Y_0Z_0 \dots O_3X_3Y_3Z_3$ – декартовы системы координат, связанные с неподвижным (стойкой) и подвижными звеньями системы

Согласно предложенной расчетной схеме МК (рис. 1) в пакете математического моделирования механических систем SimMechanics Second Generation системы MATLAB была разработана имитационная математическая модель МК с ПИД-регуляторами, позволяющая изучать перемещения МК и груза в различных рабочих режимах [1, 2, 3, 4, 5].

Разработкой математических моделей мостовых кранов и других механических систем в пакете SimMechanics системы MATLAB занимались многие исследователи [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Отличие предложенной модели в том, что

для обеспечения требуемой траектории перемещения груза с одновременным гашением его неуправляемых колебаний используются ПИД-регуляторы.

Использование имитационной модели в задаче оптимизации траектории груза с учетом ограничений, накладываемых на параметры приводов МК, затруднено, поэтому целесообразно построение на ее основе регрессионной модели, позволяющей определять различные показатели рабочего процесса МК.

Построение регрессионной модели

Разработанная имитационная модель позволяет получать функциональные зависимости таких показателей рабочего процесса МК, как максимальные и средние скорости перемещений, максимальные и средние ускорения перемещений моста и грузовой тележки, стандартные отклонения скоростей и ускорений перемещений моста и грузовой тележки, максимальные и средние значения мощностей, затрачиваемых приводами моста и грузовой тележки, максимальная абсолютная погрешность реализации траектории $\Delta_{\max}$, средняя погрешность реализации траектории, работа, совершенная приводом моста, тележки и МК в целом.

При помощи имитационной модели МК могут быть получены численные зависимости всех перечисленных показателей от времени перемещения $T_{\text{п}}$, размеров и формы траектории перемещения груза в виде множеств дискретных численных значений.

В качестве примера рассматривалась реализация траектории в виде дуги, позволяющей грузу обогнуть единичное препятствие в виде стены. Данная траектория характеризуется размерами l_x и s_x вдоль осей X_0 и Z_0 неподвижной системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ (рис. 2).

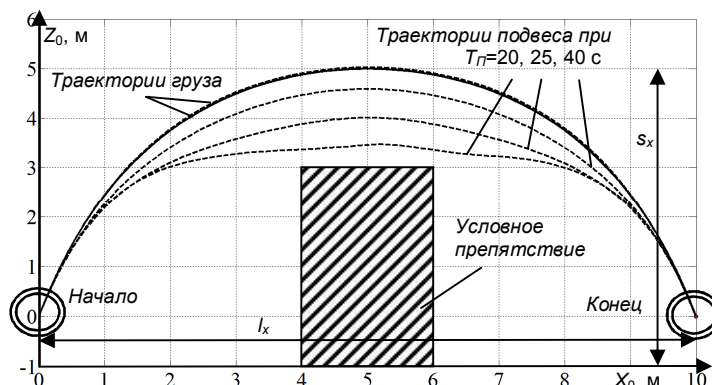


Рис. 2. Графики траекторий груза и точки подвеса для размеров дуги $l_x=10$ м, $s_x=5$ м, и времени перемещений $T_{\text{п}}=20, 25, 40$ с (пример)

Были получены в виде трехмерного массива числовых данных $N(i, j, k)$ зависимости максимальной абсолютной погрешности реализации перемещения груза по дуге $\Delta_{\max}$ от размеров дуги s_x, l_x и времени перемещений T_{Π} . Согласно разработанному плану полного факторного эксперимента с ограничениями, была сформирована выборка из 125 наблюдений $\Delta_{\max}$ (отдельных вычислительных экспериментов) [5, 18]. Индексы массива N принимали целочисленные значения $i \in [1; i_{\max}]$; $k \in [1; k_{\max}]$; $l \in [1; l_{\max}]$, где $i_{\max}=k_{\max}=l_{\max}=5$. Соответствующие параметры варьировались в пределах $s_x \in [3; 7]$ м; $l_x \in [8; 12]$ м; $T_{\Pi} \in [24; 32]$ с.

Фиксированные параметры МК при этом принимали значения: масса моста МК – $m_1=3500$ кг; масса грузовой тележки МК – $m_2=1250$ кг; масса груза – $m_3=100$ кг; длина каната, на котором подвешен груз $l=12$ м; приведенные коэффициенты демпфирования по угловым координатам отклонений грузового каната от вертикали в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях – 100 Н·м·с/рад; пропорциональный коэффициент, интегральная и дифференциальная постоянные времени ПИД-регуляторов имитационной модели: $P=20$; $I=5$; $D=5$ соответственно [2].

Учитывая существенную нелинейность полученных зависимостей $\Delta_{\max}$, возникла необходимость в использовании нелинейной множественной регрессии [18, 19, 20].

Однако в этом случае возникает задача оптимального выбора зависимостей многомерной нелинейной регрессии. Усложнение зависимости приводит к повышению точности уравнения регрессии, однако увеличивает время расчетов, что не всегда допустимо [18, 19, 20].

В качестве критерия сравнения различных уравнений регрессии использовались, в качестве примера, количество слагаемых уравнения $n_{\text{ост}}$ и максимальная относительная погрешность аппроксимации $\delta_{\max}$:

$$\delta_{\max} = \max\{100 \cdot ((\Delta_{\max})_{\text{ИСТ}i} - (\Delta_{\max})_{\text{РЕГ}i}) / (\Delta_{\max})_{\text{ИСТ}i}\}, \quad i \in [1; 125], \quad (1)$$

где $(\Delta_{\max})_{\text{ИСТ}}$ – истинное значение максимальной абсолютной погрешности согласно массиву $N(i, j, k)$; $(\Delta_{\max})_{\text{РЕГ}}$ – полученное по уравнению регрессии для тех же значений предикторов s_x, l_x и T_{Π} значение максимальной абсолютной погрешности.

Было получено нелинейное уравнение регрессии максимальной абсолютной погрешности $\Delta_{\max}$, соответствующей определенным значениям s_x, l_x и T_{Π} , имеющее вид [18, 19, 20]

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} = & b_{27} \cdot s_x^2 \cdot l_x^2 \cdot T_{\Pi}^2 + b_{26} \cdot s_x^2 \cdot l_x^2 \cdot T_{\Pi} + b_{25} \cdot s_x^2 \cdot l_x^2 + b_{24} \cdot s_x^2 \cdot l_x \cdot T_{\Pi}^2 + b_{23} \cdot s_x^2 \cdot l_x \cdot T_{\Pi} + b_{22} \cdot s_x^2 \cdot l_x + \\ & + b_{21} \cdot s_x^2 \cdot T_{\Pi}^2 + b_{20} \cdot s_x^2 \cdot T_{\Pi} + b_{19} \cdot s_x^2 + b_{18} \cdot s_x \cdot l_x^2 \cdot T_{\Pi}^2 + b_{17} \cdot s_x \cdot l_x^2 \cdot T_{\Pi} + b_{16} \cdot s_x \cdot l_x^2 + b_{15} \cdot s_x \cdot l_x \cdot T_{\Pi}^2 + \\ & + b_{14} \cdot s_x \cdot l_x \cdot T_{\Pi} + b_{13} \cdot s_x \cdot l_x + b_{12} \cdot s_x \cdot T_{\Pi}^2 + b_{11} \cdot s_x \cdot T_{\Pi} + b_{10} \cdot s_x + b_9 \cdot l_x^2 \cdot T_{\Pi}^2 + b_8 \cdot l_x^2 \cdot T_{\Pi} + b_7 \cdot l_x^2 + \\ & + b_6 \cdot l_x \cdot T_{\Pi}^2 + b_5 \cdot l_x \cdot T_{\Pi} + b_4 \cdot l_x + b_3 \cdot T_{\Pi}^2 + b_2 \cdot T_{\Pi} + b_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $b_1 \dots b_{27}$ – коэффициенты уравнения множественной регрессии.

Выражение (2) представляет собой симметричный многочлен от трех переменных-предикторов s_x, l_x и T_{Π} в степенях [0; 1; 2] в 27-ми всевозможных сочетаниях.

Степень многочлена (2) по совокупности всех переменных – 6. Использовалась реализация алгоритма Левенберга-Марквардта в программном продукте MATLAB [5, 18, 19, 20].

Значения коэффициентов уравнения регрессии (2) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов b_i ($i \in [1; 27]$) уравнения регрессии максимальной абсолютной погрешности $\Delta_{\max}$ при изменении s_x, l_x и T_{Π}

Коэф-т	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
Значение	0,023355	-0,0021	4,57E-05	-0,00199	0,000337	-8,48E-06	0,000105	-1,73E-05
Коэф-т	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}
Значение	4,31E-07	-0,02292	0,001784	-3,45E-05	0,004546	-0,00036	6,97E-06	-0,00019
Коэф-т	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}
Значение	1,62E-05	-3,27E-07	0,003284	-0,00025	4,65E-06	-0,00065	4,97E-05	-9,36E-07
Коэф-т	b_{25}	b_{26}	b_{27}					
Значение	2,94E-05	-2,32E-06	4,46E-08					

Таблица 2 – Значения показателей качества уравнения (2) регрессии максимальной абсолютной погрешности $\Delta_{\max}$ от параметров s_x , l_x и T_{Π}

Показатель	Значение
Коэффициент детерминации R^2	0,9995
Скорректированный коэффициент детерминации $\bar{R}^2$	0,9994
Критерий Фишера F	7419,71
Сумма квадратов остатков RSS	0,00000011
Стандартная ошибка уравнения регрессии SEE	0,00003387
Максимальная относительная погрешность аппроксимации $\delta_{\max}$, %	0,72

Анализ показателей качества уравнения множественной нелинейной регрессии (2) (таблица 2) показал, что регрессия по уравнению данного вида дает наилучшие результаты по точности (минимальная погрешность $\delta_{\max}$). Все коэффициенты уравнения регрессии согласно t-статистике Стьюдента, значимы. Максимальная относительная погрешность аппроксимации $\delta_{\max}$ во всем рассматриваемом диапазоне изменения предикторов не превышает 0,72 %.

Были проведены дополнительные исследования возможности упрощения выражения (2) путем исключения из него части слагаемых. На каждой итерации случайным образом по закону равномерного распределения исключалась часть слагаемых

выражения (2) количеством $n_{\text{искл}} \in [1; 24]$ последовательно от 0 до 24 (соответствующие коэффициенты уравнения b_i ($i \in [1; 27]$) обнулялись). В результате число оставшихся слагаемых уравнения $n_{\text{ост}}$ составляло от 27 до 3. Методом Левенберга-Марквардта выполнялась многомерная нелинейная регрессия, определялись значения оставшихся коэффициентов. Для каждого $n_{\text{искл}}$ выполнялось сравнение относительной погрешности $\delta_{\max}$ текущей итерации с минимальным значением, полученным на прошлых итерациях. И в случае, если текущее $\delta_{\max}$ оказывалось меньше минимального, происходила замена значения последнего с сохранением также всех коэффициентов уравнения регрессии.

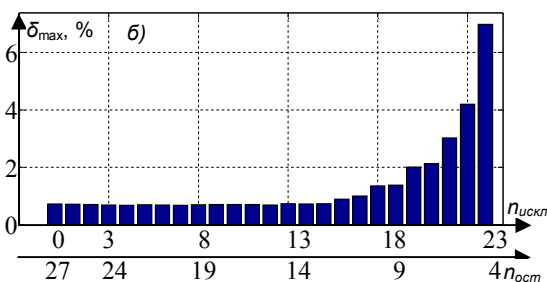
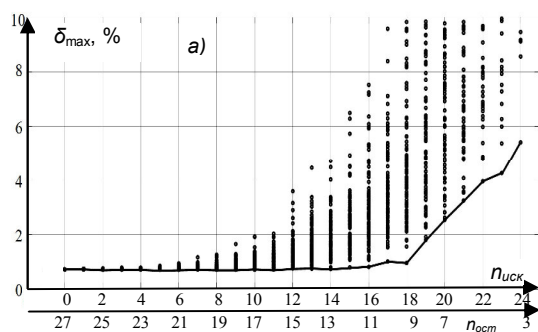


Рис. 3. Максимальная относительная погрешность аппроксимации $\delta_{\max}$ при случайном исключении части слагаемых выражения (2): а – все результаты за 100 итераций; б – наилучшие результаты после 1000 итераций

На рисунке 3 приведены результаты исследования возможности упрощения выражения (2) путем исключения из него части слагаемых. При достаточно большом количестве итераций зависимость минимальных значений максимальной относительной погрешности аппроксимации от количества слагаемых выражения

приобретает характер, близкий к гиперболическому (см. рис. 3, б).

Соответствующие погрешностям рис. 3, б регрессионные зависимости $\Delta_{\max}$ приведены ниже в выражениях (3)...(26). Приведенные выражения соответствуют числу исключаемых слагаемых $n_{\text{искл}} = 2 \dots 24$ соответственно.

$$\Delta_{\max} = b_6 \cdot l_x \cdot T_{\Pi}^2 + b_{11} \cdot s_x \cdot T_{\Pi} + b_4 \cdot l_x. \quad (26)$$

количестве исключаемых слагаемых
 $n_{искл}=0...24$ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения показателей качества уравнений регрессии (2)...(26) максимальной абсолютной погрешности $\Delta_{\max}$ от параметров s_x , l_x и T_{Π}

$n_{\text{искл}}$	$n_{\text{ост}}$	$\delta_{\max}, \%$	R^2	$\bar{R}^2$	F	RSS	SEE
0	27	0,72	0,9995	0,9994	7419,7	0,0000001127	0,0000338767
1	26	0,71	0,9995	0,9994	7340,7	0,0000001136	0,0000340505
2	25	0,7	0,9995	0,9993	7265,9	0,0000001148	0,0000342252
3	24	0,69	0,9995	0,9993	7171,1	0,0000001163	0,0000344507
4	23	0,68	0,9995	0,9993	7018,7	0,0000001188	0,0000348225
5	22	0,69	0,9995	0,9993	7167	0,0000001164	0,0000344606
6	21	0,68	0,9995	0,9993	6985,8	0,0000001194	0,0000349044
7	20	0,67	0,9994	0,9993	6615,7	0,0000001261	0,0000358669
8	19	0,69	0,9995	0,9993	7081,1	0,0000001178	0,0000346689
9	18	0,7	0,9995	0,9993	6870,9	0,0000001214	0,0000351950
10	17	0,7	0,9995	0,9993	6870,9	0,0000001214	0,0000351950
11	16	0,7	0,9995	0,9993	6939	0,0000001202	0,0000350219
12	15	0,68	0,9994	0,9993	6465	0,0000001290	0,0000362823
13	14	0,73	0,9994	0,9993	6577,5	0,0000001268	0,0000359708
14	13	0,72	0,9994	0,9993	6495,9	0,0000001284	0,0000361958
15	12	0,73	0,9994	0,9993	6501,6	0,0000001283	0,0000361801
16	11	0,89	0,9993	0,9991	5524,9	0,0000001509	0,0000392459
17	10	1	0,9992	0,999	4815	0,0000001732	0,0000420374
18	9	1,35	0,9983	0,9979	2255	0,0000003695	0,0000614003
19	8	1,37	0,9983	0,9979	2247,5	0,0000003707	0,0000615026
20	7	2	0,9952	0,9939	778,2	0,0000010672	0,0001043543
21	6	2,12	0,9951	0,9937	758,47	0,0000010948	0,0001056964
22	5	3,03	0,991	0,9886	415,33	0,0000019912	0,0001425431
23	4	4,2	0,9773	0,9713	162,39	0,0000050223	0,0002263795
24	3	6,99	0,9706	0,9628	124,42	0,0000065102	0,0002577412

Использовались следующие показатели качества регрессии: максимальная относительная погрешность аппроксимации $\delta_{\max}, \%$, коэффициент детерминации R^2 , скорректированный коэффициент детерминации $\bar{R}^2$, критерий Фишера F , сумма квадратов остатков RSS , стандартная ошибка уравнения регрессии SEE [19, 20].

На рисунке 4 в качестве примеров приведены экспериментальные и

регрессионные графические зависимости максимальной абсолютной погрешности реализации траектории $\Delta_{\max}$ для самого длинного рассматриваемого выражения с максимальным количеством слагаемых (рис. 5, а, $n_{\text{искл}}=0$, $n_{\text{ост}}=27$) и для самого короткого рассматриваемого выражения с минимальным количеством слагаемых (рис. 5, б, $n_{\text{искл}}=24$, $n_{\text{ост}}=3$) от значений параметров предикторов s_x , l_x и T_{Π} .

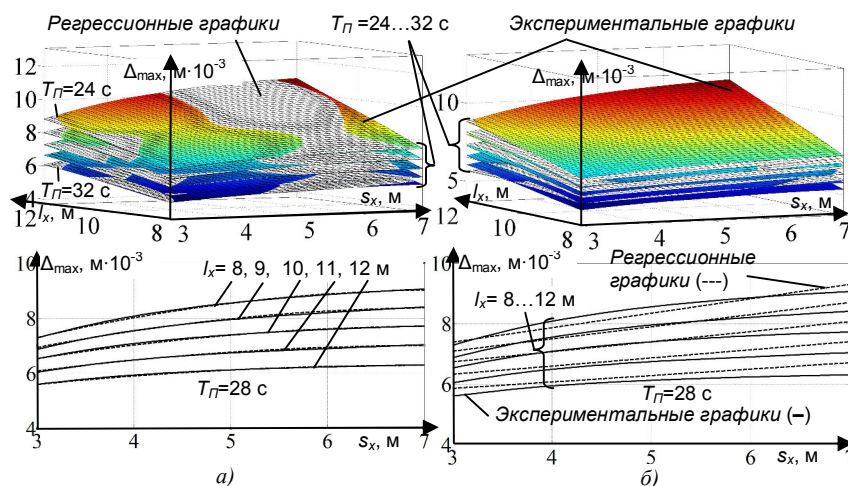


Рис. 4. Экспериментальные и регрессионные зависимости максимальной абсолютной погрешности реализации траектории $\Delta_{\max}$ (примеры): а – поверхности и линии, соответствующие $n_{\text{искл}}=0$, $n_{\text{ост}}=27$; б – поверхности и линии, соответствующие $n_{\text{искл}}=24$, $n_{\text{ост}}=3$

Заключение

Выявлено, что усложнение регрессионного выражения путем увеличения числа его слагаемых свыше 12 не приводит к дальнейшему увеличению точности аппроксимации. Задание предельного порогового (максимально допустимого) значения относительной погрешности аппроксимации $\delta_{\max}$ позволяет подобрать наиболее простое выражение с минимальным количеством слагаемых, обеспечивающее заданный уровень точности аппроксимации.

Так, например, при пороговом значении $\delta_{\max} \leq 1\%$ целесообразно использовать в качестве уравнения регрессии выражение (19), полученное при $n_{\text{искл}}=17$, $n_{\text{осст}}=10$, имеющее 10 слагаемых. А при пороговом значении $\delta_{\max} \leq 2\%$ целесообразно использовать в качестве уравнения регрессии выражение (22), полученное при $n_{\text{искл}}=20$, $n_{\text{осст}}=7$, имеющее 7 слагаемых.

Регрессионные выражения могут быть также упрощены по другим показателям качества уравнений регрессии (см. табл. 3).

Библиографический список

1. Щербаков, В.С. Способ повышения точности траектории перемещения объекта грузоподъемным краном путем компенсации его неуправляемых пространственных колебаний / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф // Механизация строительства. – 2014. – № 2. – С. 21-25.
2. 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.
3. Щербаков, В.С. Повышение точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф // Системы. Методы. Технологии. Братск: БГУ. – 2014. – № 4 (24). – С. 52-57.
4. Щербаков, В.С. Система гашения пространственных колебаний груза, перемещаемого мостовым краном / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф // Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. – Омск: СибАДИ. – № 6 (40). – 2014. – С. 56-61.
5. Корытов, М.С. Построение регрессионной модели определения энергетических затрат рабочего процесса грузоподъемного крана / М.С. Корытов, В.С. Щербаков, С.В. Коткин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т.8, № 3. – С. 92-95.
6. Ахтулов, А.Л. Теоретическое исследование и моделирование процесса разгона грузоподъемного крана мостового типа / А.Л. Ахтулов, О.М. Кирасиров, Е.В. Комерзан // Омский научный вестник. – 2008. – № 1 (64). – С. 59-63.
7. Ахтулов, А.Л. Математическая модель процесса разгона мостового крана / А.Л. Ахтулов, О.М. Кирасиров, Е.В. Комерзан // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 7. – С. 54-56.
8. Ахтулов, А.Л. Обеспечение качества проектирования мостовых кранов с учетом динамических характеристик: монография / А. Л. Ахтулов [и др.]; под общ. ред. А. Л. Ахтулова. – Омск: СибАДИ, 2010. – 144 с.
9. Ахтулов, А.Л. Построение имитационной модели двухбалочного мостового крана / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова, О.М. Кирасиров, В.А. Машонский // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 25. – С. 7-11.
10. Ахтулов, А.Л. Построение алгоритма автоматизации проектирования процесса передвижения грузоподъемных кранов мостового типа с учетом динамических характеристик / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова, О.М. Кирасиров, В.А. Машонский // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 136-138.
11. Ахтулова, Л.Н. Визуальное моделирование двухбалочного мостового крана как сложной динамической системы / Л.Н. Ахтулова, А.Л. Ахтулов, О.М. Кирасиров, В.А. Машонский // Омский научный вестник. – 2014. – № 1 (127). – С. 147-152.
12. Мирзаев, Р.А. Математическое моделирование механических устройств с помощью пакета SIMMECHANICS / Р.А. Мирзаев, Д.А. Климовский, А.Н. Смирнов, Н.А. Смирнов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. Т.1. – № 8. – С. 84-85.
13. Паркова, С.Н. Имитационное моделирование механической подсистемы строительного манипулятора для укладки дорожных плит с помощью MATLAB. В сборнике: Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ» Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации – Омск, 2013. – С. 275-279.
14. Мирзаев, Р.А. Исследование кинематики манипулятора с помощью пакета SIMMECHANICS / Р.А. Мирзаев, О.В. Каменюк, Н.А. Смирнов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. Т. 1. – № 8. – С. 82-83.
15. Змеу, К.В. Применение среды SIMMECHANICS для моделирования нежестких систем / К.В. Змеу, М.Н. Невмержицкий, Б.С. Ноткин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2012. – № 1 (10). – С. 5-10.
16. Ковалев, В.А. Из опыта моделирования нежестких систем с распределенными параметрами в среде MATLAB / В.А. Ковалев, К.В. Змеу, Б.С. Ноткин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2012. – № 1 (10). – С. 10-14.
17. Перечесова, А.Д. Исследования механизмов различного уровня с помощью MATLAB / А.Д. Перечесова, И.И. Калапышина, К.А. Нуджин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 11 (656). – С. 42-55.

18. Гилл, Ф. Практическая оптимизация: пер. с англ. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

19. Халафян, А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.

20. Seber G.A.F Wild C.J. Nonlinear Regression. – New York: John Wiley and Sons, 1989. – 781 p.

RATIONALE OF THE MULTIDIMENSIONAL NONLINEAR REGRESSION MODEL OF THE PARAMETERS OF BRIDGE CRANE'S WORKING PROCESS

V.S. Shcherbakov, M.S. Korytov,
M.Y. Arkhipenko, E.O. Volf

Abstract. The authors present a design scheme of a bridge crane and also its simulation model. A regression model, which allows determining various parameters of the bridge crane's working process, is built on the basis of the simulation model. It is concluded that the complexity of the regression expression by increasing the number of its items beyond 12 doesn't lead to further increasing the accuracy of approximation.

Keywords: working process of bridge crane, nonlinear multiple regression, accuracy of approximation, the regression coefficient, absolute error.

References

1. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Volf E.O. Способ повышения точности траектории перемещения объекта грузоподъемным краном путем компенсации его неуправляемых пространственных колебаний [A method for improving the accuracy of a trajectory of moving an object with a crane by compensating its uncontrolled spatial oscillations]. *Mehanizacija stroitel'stva*, 2014, no 2. pp. 21-25.

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

3. Shcherbakov V.S., Korytov M., Volf E. Повышение точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа [Improving the accuracy and speed of load's movement along required trajectory by a bridge crane]. *Sistemy. Metody. Tehnologii*, Bratsk: BGU, 2014, no 4(24). pp. 52-57.

4. Shcherbakov V.S., Korytov M., Volf E. Система гашения пространственных колебаний груза, перемещаемого мостовым краном [The system of spatial fluctuations' suppression of a load moved by a bridge crane]. *Vestnik SibADI*. 2014. no 6 (40). pp.56-61

5. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Kotkin S.V. [Building a regression model of determining power expenses of a crane's working process]. *Vestnik of VGTU*, 2012, V.8, no 3. pp. 92-95.

6. Akhtulov A.L., Cuirassiers O., Komerzan E. Теоретическое исследование и моделирование процесса разгона грузоподъемного крана мостового типа

[Theoretical research and modeling of an acceleration process of a bridge crane]. *Omskij nauchnyj vestnik*, 2008, no 1 (64). pp. 59-63.

7. Akhtulov A.L. Keyrasirov O., Komerzan E. Matematicheskaja model' processa razgona mostovogo kрана [A mathematical model of an acceleration process of a bridge crane]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2009, no 7. pp 54-56.

8. Akhtulov A.L. Obespechenie kachestva proektirovanija mostovyh kранov s uchetom dinamicheskikh ha-rakteristik [Ensuring the quality of designing bridge cranes with dynamic characteristics]. Omsk, SibADI, 2010. 144 p.

9. Akhtulov A.L., Akhtulova L.N., Cuirassiers O.M., Mashonsky V.A. Postroenie imitacionnoj modeli dvuhbalochnogo mostovogo kрана [Building of a simulation model of a double-girder bridge crane]. *Vestnik SibADI*, 2012, no 25. pp. 7-11.

10. Akhtulov A.L. Akhtulova L.N., Cuirassiers O.M., Mashonsky V.A. Postroenie algoritma avtomatizacii proektirovanija processa peredvizhenija gruzopodemnyh kранov mostovogo tipa s uchetom dinamicheskikh harakteristik [Design of an algorithm of computer-aided engineering the process of moving bridge cranes with the dynamic characteristics]. *Vestnik of Izhevsk State Technical University*, 2012, no 2. pp. 136-138.

11. Akhtulova L.N., Akhtulov A.L., Cuirassiers O.M., Mashonsky V.A. [Visual simulation of double-girder bridge crane as a complex dynamic system]. *Omskij nauchnyj vestnik*, 2014, no 1 (127). pp. 147-152.

12. Mirzayev R.A., Klimovskii D.A., Smirnov A.N., Smirnov N.A. Matematicheskoe modelirovanie mehanicheskikh ustrojstv s pomoshh'ju paketa SIMMECHANICS [Mathematical modeling of mechanical devices using SIMMECHANICS package]. *Actual problems of aviation and space exploration*, 2012, Vol.1. - no 8. pp. 84-85.

13. Parkova S.N. Imitacionnoe modelirovanie mehanicheskoy podsystemy stroitel'nogo manipuljatora dlja ukladki dorozhnyh plit s pomoshh'ju MATLAB [Simulation modeling of the mechanical subsystem of a building manipulator for laying the pavement plates using MATLAB]. *Proceedings of the International Congress of FGBOU VPO «SibADI» Architecture. Building. Transport. Technology. Innovation*. Omsk, 2013. pp. 275-279.

14. Mirzayev, R.A. Kamenyuki O.V., Smirnov N.A. [The study of manipulator's kinematics using SIMMECHANICS package]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*, 2012, no 8. pp. 82-83.

15. Zmeu K.V. Nevmerzhit'skiy M.N., Notkin B.S. [Using the SIMMECHANICS medium for modeling non-rigid systems]. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo univer-siteta*, 2012, no 1 (10). pp 5-10.

16. Kovalev V.A., Zmeu K.V., Notkin B.S. Iz opyta modelirovanija nezhestkih sistem s raspredelennymi parametrami v srede [From the experience of modeling non-rigid systems with distributed parameters in the MATLAB medium]. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2012, no 1 (10). pp. 10-14.

17. Perechesova A.D., Kalapyshina I.I., Nuzhdin K.A. Issledovanija mehanizmov razlichnogo urovnja s pomoshh'ju MATLAB [Study of the mechanisms of various levels using MATLAB]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroyenie*, 2014, no11 (656). pp. 42-55.

18. Gill F., Murray W., Wright M. *Prakticheskaja optimizacija* [Practical optimization]. Moscow, Peace, 1985. 509 p.

19. Khalafyan, A.A. *STATISTICA 6. Statisticheskij analiz dannyh* [STATISTICS 6. Statistic analysis of data]. Moscow, Binom-Press, 2007. 512 p.

20. Seber G.A.F Wild C.J. *Nonlinear Regression*. New York: John Wiley and Sons, 1989. 781 p.

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

Архипенко Маргарита Юрьевна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика» ФГБОУ ВПО СибАДИ. (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: arkhipenko_m@sibadi.org).

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

Scherbakov Vitaliy Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor, dean of faculty «Oil, gas and construction technology» of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

Korytov Mikhail Sergeevich – (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the department «Automobiles, constructional materials and technologies» of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: kms142@mail.ru).

Arkhipenko Margarita Yurievna (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, associate professor of the department «Mechanics» of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: arkhipenko_m@sibadi.org).

Volf Elena Olegovna (Russian Federation, Omsk) – graduate student of the department «Automation of production processes and electrical engineering» of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: wolf_eo@sibadi.org).