

Критериальная оценка технического уровня малогабаритного погрузчика с учетом точности определения его параметров

02, февраль 2011

авторы: Минин В. В., Носков М. В.

УДК 621.869.44

Введение. Универсальные малогабаритные погрузчики с бортовым поворотом (УМП) изобретены и внедрены в практику выполнения транспортно-технологических операций с середины XX в. В России применение УМП активно началось с 1990-х гг., что связано с появлением и развитием рыночных отношений и необходимостью модернизации промышленного сектора экономики.

Данный тип минимашин (рис. 1) является высокоэффективным средством механизации ручного труда для малых объемов работ на различных рассредоточенных объектах, где УМП составляют конкуренцию машинам средней и большой мощности.



Рис. 1. Универсальный малогабаритный погрузчик «Соболь»,
разработка Сибирского Федерального университета

В настоящий момент в мире производится более 100 тыс. УМП в год, которые используются во многих отраслях: строительство и реконструкция зданий и сооружений, дорожное и коммунальное хозяйство, сельское хозяйство и т. д. Возможность такого применения обеспечивается сменными рабочими органами циклического и непрерывного действия (номенклатура насчитывает более 70 наименований).

УМП широко внедряются в практику использования в условиях Сибири и Дальнего Востока, где климатические условия существенно отличаются от европейских стран. Без усовершенствования конструкции и определения рациональных параметров область применения данных машин в этих условиях имеет ограничения.

Существует ряд недостатков, снижающих эффективность УМП: например, короткобазовое шасси, ограничивающее грузоподъемность; высокая динамическая нагруженность машины за счет жесткого крепления колес к раме и плохая управляемость машины на твердых скользких поверхностях; значительные затраты энергии и ресурсов на обеспечение бортового поворота; затрудненный и небезопасный вход в кабину оператора со стороны рабочего оборудования. К сожалению, в настоящее время, несмотря на постоянное совершенствование конструктивной схемы, не найден вариант машины, устраняющий все недостатки.

В случае определения эффективности работы УМП по существующим методикам, математическая постановка задачи сводится к описанию машины в виде функциональных уравнений (обычно [1, 2], дифференциальных) и задачам линейного и нелинейного программирования. Математическая формулировка осложняется необходимостью учета детерминированных и стохастических возмущений с заданной точностью и достоверностью.

Постановка задачи. Для определения рациональных параметров УМП хорошо себя зарекомендовали статистические методы [3] и метод размерностей. Анализ размерностей конструктивных и эксплуатационных параметров, входящих в целевую функцию (критерий) оценки степени совершенства (эффективности), позволяет определить структуру математической модели в виде зависимости между безразмерными комбинациями, составленными из этих параметров [2].

Целью данной работы является разработка критериев для оценки технического уровня УМП, обладающих свойством устойчивости их по отношению к погрешностям исходных данных, а также способностью нивелирования этих погрешностей (робастность).

Традиционная постановка задачи проектирования для УМП [3] по теоретическим положениям и методикам, апробированным для машин среднего и тяжелого классов не всегда применима в виду установленной авторами теоретически и экспериментально нелинейной зависимости большинства конструктивных параметров от главного параметра УМП – эксплуатационной массы (силы тяжести) машины.

Многообразие методик приводит к неоднозначной величине, рассчитываемого параметра. По результатам статистического анализа (решение задачи получено с применением программного продукта Data Fit версии 9.0 фирмы Oakdale Engineering, где расчет коэффициентов уравнений регрессии производится по методу наименьших квадратов) получены уравнения, представленные на рис. 2, 3. Вид уравнения регрессии принимался по значениям минимума стандартной и относительной ошибок аппроксимации, а надежность полученных результатов – по значению коэффициента детерминации R^2 . Для исследования были приняты параметры моделей УМП, выпускаемых следующими фирмами-производителями: J I Case Company; Clark Equip. Co. (Bobcat); Davis Welding & Mfg. Co.; John Deere; Erickson Corp.; Ford; Gehl Co.; Hydra – Mac Inc.; International Harvester; Northwestern Motor Co.; Owatonna Mfg. Co.; Prime Mover Co.; Sperry New Holland; TCI Inc.; Thomas Equip. Ltd. Анализ зависимостей показывает, что для заданного значения эксплуатационной массы G грузоподъемная сила Z и установочная мощность двигателя N имеют как минимум 30 % диапазон разброса значений.

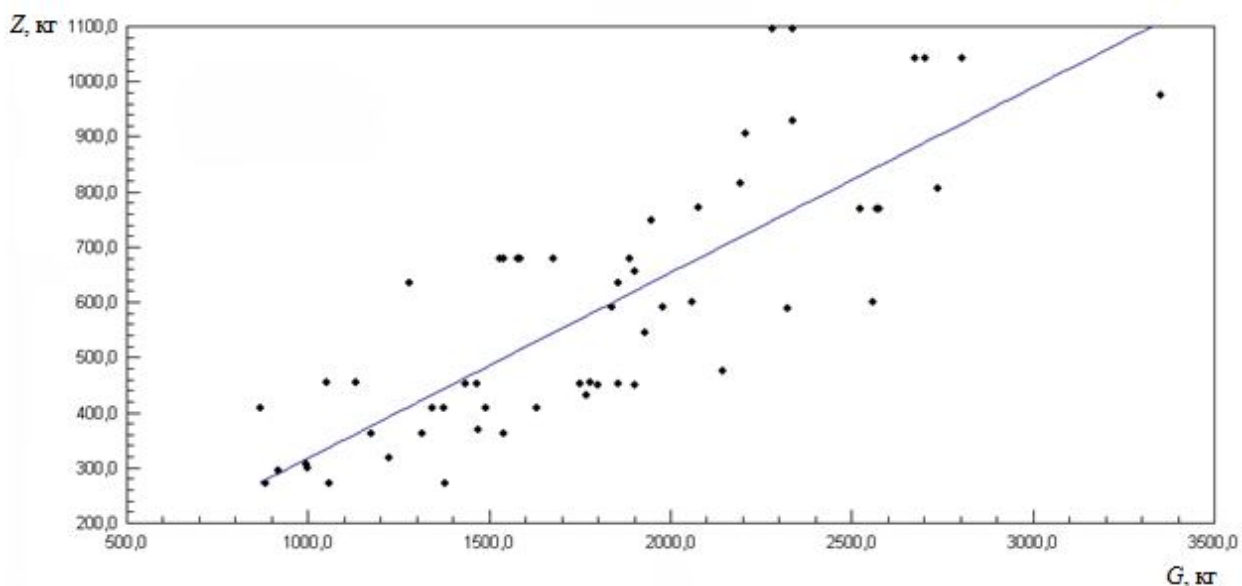


Рис. 2. Зависимость грузоподъемной силы Z от эксплуатационной массы G машины:
 $Z = 0,336 \cdot G - 18391$; $R^2 = 0,6619$

Метод решения. Ввиду сложности математического описания рабочих процессов, обеспечивающего необходимую точность расчетов, принята концепция выявления структуры модели на основе теории размерностей.

Известно [1–3], что безразмерные критерии (математические модели) устанавливают закономерности, характеризующие технологический процесс работы машины и взаимосвязи конструктивных параметров, имеющих различную размерность. Задача обеспечения точности и адекватности таких математических моделей решена с применением полуэмпирических зависимостей, разработанных с использованием теории размерности.

В обобщенной форме модель взаимосвязи параметров УМП записывается в виде

$$\Phi = \Phi'(A, H, Q, N, G),$$

где A – удельная энергоёмкость рабочего процесса, Н/м^2 ; H – линейный размер, м; Q – производительность машины, $\text{м}^3/\text{с}$; N – установочная мощность двигателя, кВт; G – эксплуатационная масса (сила тяжести) машины, кг.

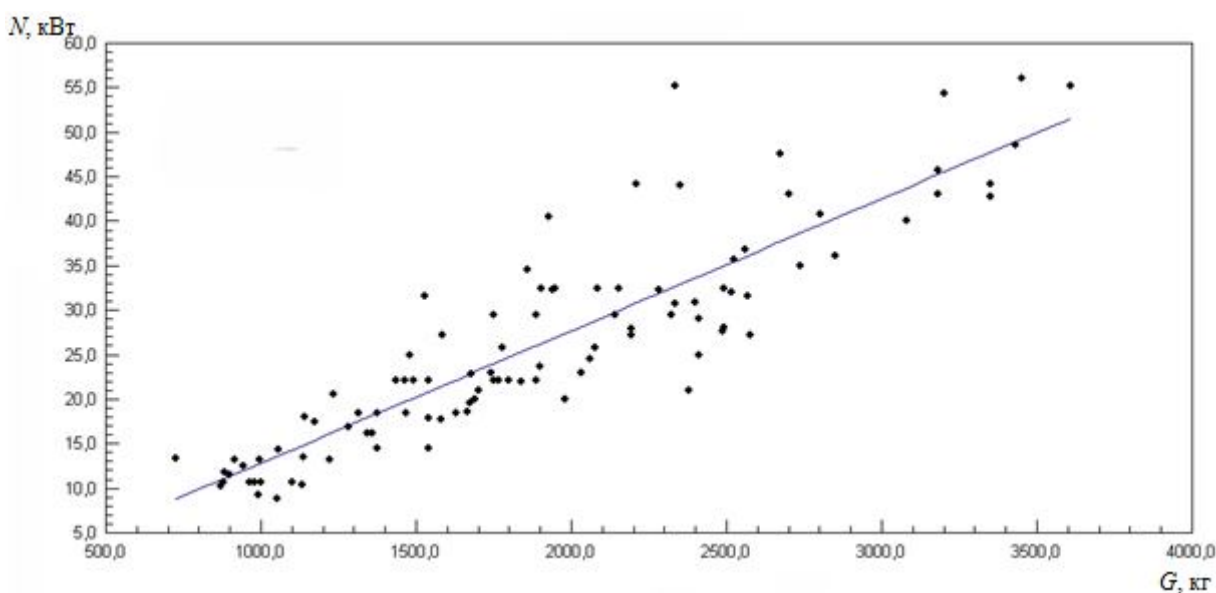


Рис. 3. Зависимость установочной мощности двигателя N от эксплуатационной массы G машины: $N = 0,015 \cdot G + 2,02$; $R^2 = 0,7909$

Руководствуясь теоремами теории подобия и размерности по существующим методикам, разработаны два критерия:

$$\pi_Q = \frac{AH^4}{Q} \sqrt[3]{\frac{H^2}{G^2 N}}; \quad (1)$$

$$\pi_N = \frac{AQ}{N}. \quad (2)$$

Зависимости (1), (2) определяют направления повышения эффективности УМП и предназначены для оценки технического уровня (степени совершенства и проработанности конструкции) машин. С учетом стремления критериев к своим возможным предельным значениям (максимуму). Имея в виду ограничения для конкретных условий эксплуатации, можно записать

$$\pi_N, \pi_Q \rightarrow \max \text{ при } \begin{cases} A - \text{const}, \\ H - \text{const}, \\ G \rightarrow \min, \\ Q \rightarrow \max, \\ N \rightarrow \min. \end{cases}$$

Эластичность E безразмерных критериев изучена исходя из нижеследующих положений. Принимаем, что изменение численного значения критерия связано с изменением только одного из входящих в него параметров. Тогда критерии (1) и (2) записываются в следующем виде (при условии, что $C = \text{const}$):

$$\text{для } \pi_N: F(N) = C \cdot N^{-1}; F(Q) = C \cdot Q; F(A) = C \cdot A;$$

$$\text{для } \pi_Q: F(G) = C \cdot G^{-2/3}; F(N) = C \cdot N^{-1/3}; F(Q) = C \cdot Q^{-1}; F(H) = C \cdot H^{1/3}; F(A) = C \cdot A.$$

Устанавливая связь приращений критерия с приращением параметров (условно обозначив его X), запишем:

$$\Delta_X = \frac{X - X_0}{X_0},$$

где X_0 – изначальное значение. Следовательно $X = X_0 + \Delta_X X$.

Представим критерий в виде $\pi = C \cdot \pi(X)$. Тогда для приращения безразмерного критерия имеем

$$\Delta_\pi = \frac{\pi - \pi_0}{\pi_0} = \frac{C \cdot \pi(X) - C \cdot \pi(X_0)}{C \cdot \pi(X_0)} = \frac{\pi(X_0 + \Delta_X X_0) - \pi(X_0)}{\pi(X_0)} = \frac{\pi(X_0 + \Delta_X X_0)}{\pi(X_0)} - 1.$$

Обозначим $E_x = \Delta_\pi / \Delta_x$ - коэффициент эластичности. В результате подстановок получим следующие выражения для каждого из конструктивных параметров.

Для удельной энергоемкости технологического процесса A :

$$\pi_N = \Delta; \quad E_A = 1;$$

$$\pi_Q = \Delta; \quad E_A = 1.$$

Для линейного размера H :

$$\Delta_{\pi_Q} = \sqrt[3]{(1+\Delta)^{14}} - 1; \quad E_H = \frac{\sqrt[3]{(1+\Delta)^{14}} - 1}{\Delta}.$$

Для производительности Q :

$$\pi_N = \Delta; \quad E_Q = 1;$$

$$\Delta_{\pi_Q} = -\frac{\Delta}{1+\Delta}; \quad E_Q = -\frac{1}{1+\Delta}.$$

Для установочной мощности двигателя N :

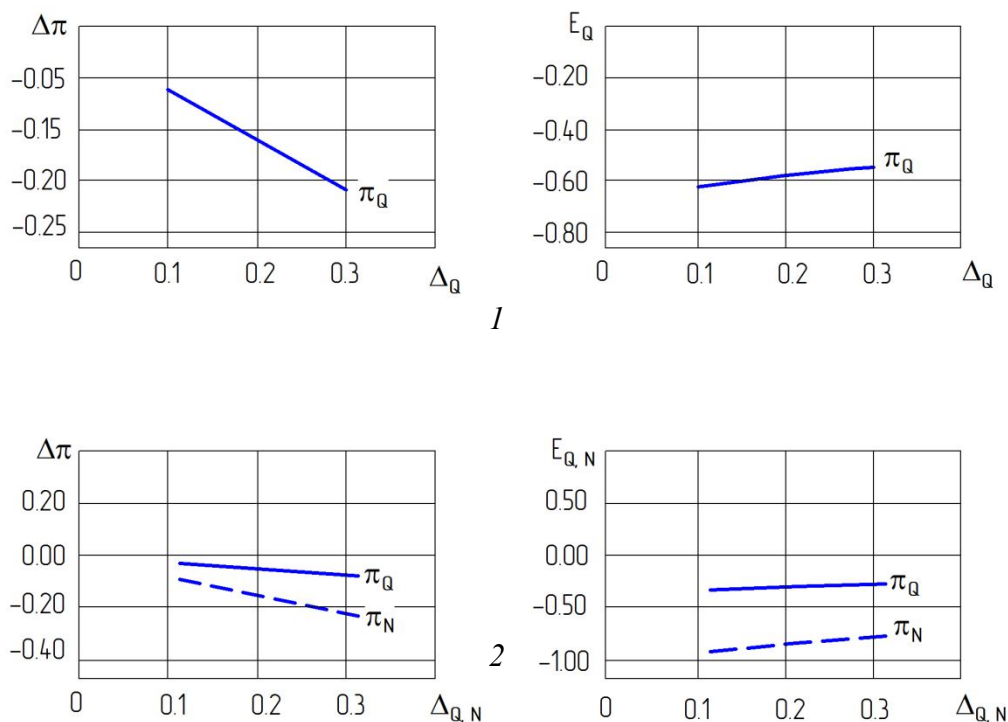
$$\Delta_{\pi_N} = -\frac{\Delta}{1+\Delta}; \quad E_N = -\frac{1}{1+\Delta};$$

$$\Delta_{\pi_Q} = \sqrt[3]{\frac{1}{1+\Delta}} - 1; \quad E_N = \left(\sqrt[3]{\frac{1}{1+\Delta}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta}.$$

Для эксплуатационной массы (силы тяжести) G :

$$\Delta_{\pi_Q} = \sqrt[3]{\frac{1}{(1+\Delta_G)^2}} - 1; \quad E_G = \left(\sqrt[3]{\frac{1}{(1+\Delta_G)^2}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta_G}.$$

На рис. 4 представлены графики приращения и эластичности вышеперечисленных безразмерных критериев.



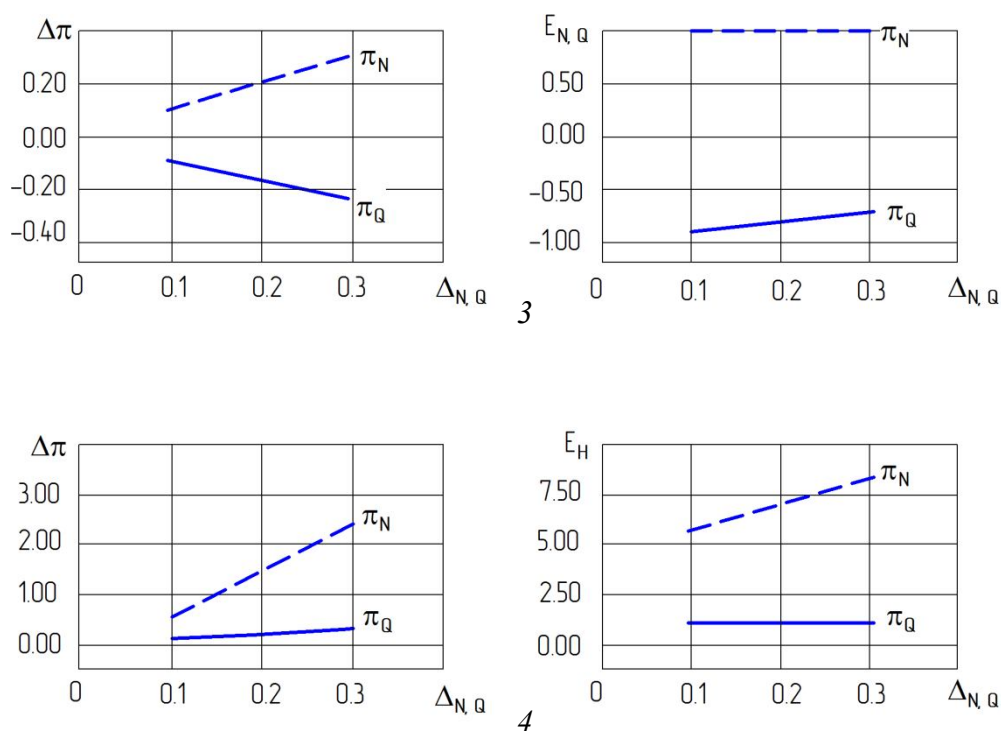


Рис. 4. Эластичность безразмерных критериев: 1 – для эксплуатационной массы G ; 2 – для установочной мощности двигателя N ; 3 – для производительности машины Q ; 4 – для линейного размера H

Формулы для расчета абсолютной погрешности безразмерных критериев выведем на основе выражения

$$\Delta_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(\pi)}{\partial x_i} \right)^2 \Delta_{x_i}^2},$$

где $f(\pi)$ – функция в виде безразмерного комплекса; x_i – значения i -го конструктивного параметра; Δ_{x_i} – погрешность вычисления значений i -го параметра [4].

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta_{\frac{AQ}{N}} &= \sqrt{(QN^{-1})^2 \Delta_A^2 + (AN^{-1})^2 \Delta_Q^2 + (-AQN^{-2})^2 \Delta_N^2} = \sqrt{\frac{Q^2 \Delta_A^2}{N^2} + \frac{A^2 \Delta_Q^2}{N^2} + \frac{(AQ)^2 \Delta_N^2}{N^4}}; \\ \Delta_{\frac{AH^4}{Q} \sqrt{\frac{H^2}{G^2 N}}} &= \sqrt{\left(Q^{-1} G^{\frac{2}{3}} N^{-\frac{1}{3}} H^{\frac{14}{3}} \right)^2 \Delta_A^2 + \left(AG^{-\frac{2}{3}} N^{-\frac{1}{3}} Q^{-1} \right)^2 \frac{169}{9} H^{\frac{11}{3}} \Delta_H^2 + \left(AG^{-\frac{2}{3}} N^{-\frac{1}{3}} H^{\frac{14}{3}} \right)^2 Q^{-4} \Delta_Q^2 +} \\ &+ \left(AQ^{-1} N^{-\frac{1}{3}} H^{\frac{14}{3}} \right)^2 \frac{4}{9} G^{-\frac{5}{3}} \Delta_G^2 + \left(AQ^{-1} G^{-\frac{2}{3}} N^{\frac{14}{3}} \right)^2 \frac{1}{9} N^{-\frac{4}{3}} \Delta_N^2 = \\ &= \sqrt{\frac{\Delta_A^2}{Q^2} \sqrt{\frac{H^{14}}{NG^2}} + \frac{169A^2 \Delta_H^2}{9Q^2} \sqrt{\frac{H^{11}}{NG^2}} + \frac{A^2 \Delta_Q^2}{Q^4} \sqrt{\frac{H^{14}}{G^2 N}} + \frac{4A^2 \Delta_G^2}{9Q^2} \sqrt{\frac{H^{14}}{G^5 N}} + \frac{A^2 \Delta_N^2}{9Q^2} \sqrt{\frac{H^{14}}{G^2 N^4}}}; \end{aligned}$$

Графическая интерпретация результатов исследования в среде MathCAD представлена на рис. 5, 6.

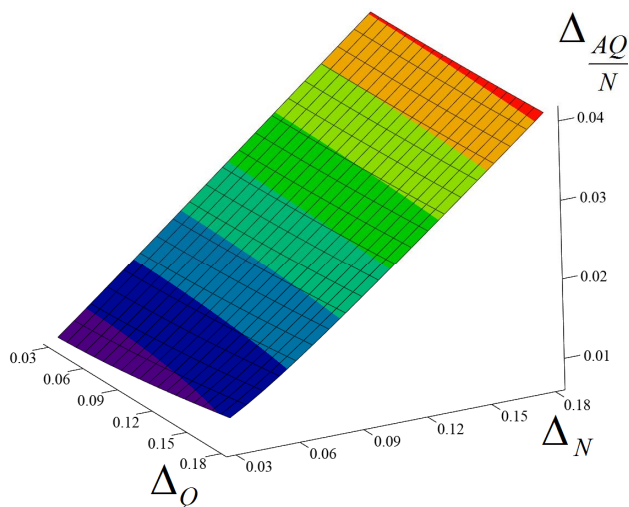


Рис. 5. Зависимость абсолютной погрешности безразмерного критерия π_N от погрешностей значений производительности Q и установочной мощности двигателя N

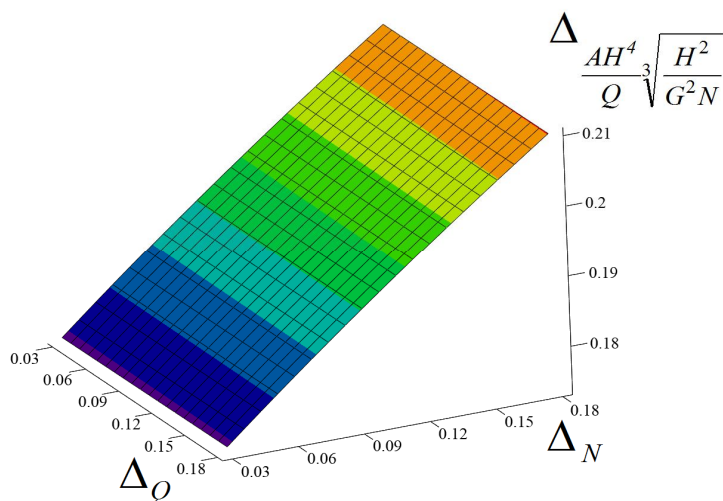


Рис. 6. Зависимость абсолютной погрешности безразмерного критерия π_Q от погрешностей значений производительности Q и установочной мощности двигателя N

Заключение. Установлено, что при равных условиях (значениях погрешностей в определении производительности машины Δ_Q и установочной мощности двигателя Δ_N) критерий π_N на порядок менее чувствителен критерия π_Q . Это объясняется структурой критерия π_Q , включающей параметр линейного размера (например, такие характеристики технологического процесса, как дальность транспортирования и высота разгрузки ковша).

Рассматриваемый вопрос оценки технического уровня УМП с учетом влияния погрешности параметров решен путем формирования уравнений в безразмерном виде,

отражающих физические процессы работы УМП, где погрешность определяется самой единицей измерения, а погрешность уравнений следует принимать с учетом результатов исследований, представленных на рис. 5, 6. Установлено, что критерии эффективности и оценки технического уровня УМП являются устойчивыми по отношению к погрешностям исходных данных, а также способностью нивелирования этих погрешностей и определяют направления совершенствования конструкций с учетом ресурсо- и энергосберегающих технологий при проектировании и в эксплуатации.

Список литературы

1. Баловнев В. И. Многоцелевые дорожно-строительные и технологические машины / В. И. Баловнев. – Омск – М. : ОАО «Омский дом печати», 2006. – 320 с.
2. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике : учеб. для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 496 с.
3. Минин В. В. Методика выбора оптимизируемых параметров универсальных малогабаритных погрузчиков // Известия Самарского научного центра. РАН, Том 12 (33) № 1(2). Тематический выпуск «Машиностроение». Самара, 2010. С. 449-452.
4. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин. Л. : Наука, 1985. 112 с.