

УДК 621.9.06: 006.82

DOI: 10.12737/22098

О.В. Аникеева

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Изложены методологические основы стандартизации параметров геометрической точности металлорежущих станков с учетом взаимосвязей между точностью узлов станков и обрабатываемых на них поверхностей деталей при использовании вариационного метода расчета точности. На при-

мере обработки цилиндрической и торцовой поверхностей на токарном станке раскрыт подход к формированию системы уравнений взаимосвязей.

Ключевые слова: металлорежущие станки, стандартизация, геометрическая точность, функция формообразования.

O.V. Anikeeva

METHODOLOGICAL FUNDAMENTALS IN PARAMETERS STANDARDIZATION OF MACHINE-TOOLS GEOMETRICAL ACCURACY

Machine-tools belong to the basic technological equipment in mechanical engineering ensuring the creation of other machines with high accuracy and productivity unattainable in coming decades on the basis of additive techniques. Machining accuracy on machine-tools is an integral index of quality and despite the diversity of approaches to the identification of correlations, computations and estimates of machining accuracy, the value of a general error seems to be as a sum of partial errors. A significant part in the formation of a general error of machining cause machine-tools themselves. Besides, a significant role in assurance of guarantees for machine-tools users (operators) the standards for their geometrical accuracy play.

A significant problem having scientific and practical meaning is the absence of a single approach substantiated scientifically to the formation of a system of such standards both for machine-tools of new types,

and for the revision of the system with actual standards on geometrical accuracy of machine-tools. In the paper there are offered methodological fundamentals for the parameters standardization of machine-tools geometrical accuracy on the basis of revealed interrelations between accuracy of units and parts surfaces machined at the use of a variational method for the computation of machines accuracy.

The practical use of the approach offered requires both the development of the variational method itself for the computation of machines accuracy in the field of obtaining corresponding estimates of accuracy of various surfaces machined, for example, deviations from parallelism of two faces and others, and thorough investigations of the structure of relationship equations themselves.

Key words: machine-tools, standardization, geometrical accuracy, shaping function.

Введение

Металлорежущие станки являются основным технологическим оборудованием в машиностроении, обеспечивающим создание других машин с высокой точностью и производительностью, недостижимой в ближайшие десятилетия на основе

аддитивных технологий. Так, в 2014 году во всем мире было реализовано станков на 75,5 млрд долларов [1], и уже в течение ряда лет выпускается оборудование с точностью обработки резанием $\sim 1\div 5$ нм [2].

Проблемы стандартизации норм геометрической точности станков

Точность обработки является интегральным показателем качества как самого процесса резания, так и заготовки, оборудования, режущего инструмента, приспособлений, наладчика (оператора), измерительных и управляющих систем, окружающей среды и др. При всем разнообразии подходов к выявлению взаимосвязей, рас-

чету и оценке точности обработки [3-5] значение общей погрешности представляется как сумма частных погрешностей. Так, в работе [4] для погрешности обработки Δ_1 предложено выражение, представляющее собой алгебраическую или векторную сумму:

$$\Delta_1 = \Delta_y + \Delta_c + \Delta_d, \quad (1)$$

где Δ_y , Δ_c и Δ_d – суммарные погрешности установки, статической и динамической настройки соответственно.

Значимую долю в формирование общей погрешности обработки вносят сами станки. Выходные параметры станков, определяющие точность обработки, зависят от их начальных параметров геометрической точности и жесткости, изменяющихся под влиянием процессов различных скоростей, рабочих нагрузок и внешних воздействий [3]. При этом к наиболее исследованным и, тем не менее, не до конца изученным факторам, оказывающим непосредственное влияние на точность обработки, относится геометрическая точность станков.

Важную роль в обеспечении гарантий для потребителей станков играют стандарты по их нормам геометрической точности. Существенной проблемой, имеющей научное и практическое значение, является отсутствие единого научно обоснованного подхода к построению системы таких стандартов как для металлорежущих

станков новых видов и типов, так и для пересмотра системы действующих стандартов по геометрической точности. Так, для станков токарной группы отсутствуют стандарты на следующие типы: специализированные автоматы и полуавтоматы, токарно-револьверные полуавтоматы, многолезцовые и копировальные станки, специализированные и разные токарные станки [6]. В работах [7; 8] также была выявлена частичность номенклатур показателей геометрической точности, установленных в действующих стандартах, что позволяет лишь как-то оценить качественный уровень изготовления станка. Появление новых видов и типов станков, их компоновок еще больше повышает значимость данной проблемы.

В данной работе предложены методологические основы стандартизации параметров геометрической точности металлорежущих станков с учетом вскрытых взаимосвязей между точностью узлов и обрабатываемых на станках поверхностей деталей при использовании вариационного метода расчета точности станков [8].

Разработка методологических основ стандартизации параметров геометрической точности металлорежущих станков

Целью разработки данных основ является формирование единого подхода к получению системы уравнений, связывающих погрешности размера, положения и формы обрабатываемых деталей с погрешностями положения звеньев формообразующей системы (ФС) металлорежущего станка и погрешностями поверхностей, базирующих режущий инструмент и заготовку.

Исходные данные – чертежи обрабатываемых деталей с требованиями к точности их обработки, структура ФС, включающей в свой состав станок и режущие инструменты для обработки данных деталей без дополнительных приспособлений, а также значение доли геометрических погрешностей станка в каждой погрешности обработки для всех обрабатываемых поверхностей выбранных деталей.

При разработке стандарта организации такой комплект чертежей обрабаты-

ваемых деталей должен быть согласован с потребителями (заказчиками), а при разработке национального стандарта – с техническим комитетом ТК70 «Станки» Росстандарта. Вместо набора обрабатываемых деталей, предоставляемого каждым конкретным потребителем, допускается использовать детали-представители.

Результат – система линейных уравнений, связывающих погрешности размера, положения и формы обрабатываемых деталей с погрешностями положения звеньев ФС и погрешностями поверхностей, служащих для базирования инструмента и заготовки.

Предпосылки включают в себя базовые положения вариационного метода расчета точности металлорежущих станков, а также идеальность режущих инструментов и использование точных схем формообразования.

Применение приближенных схем

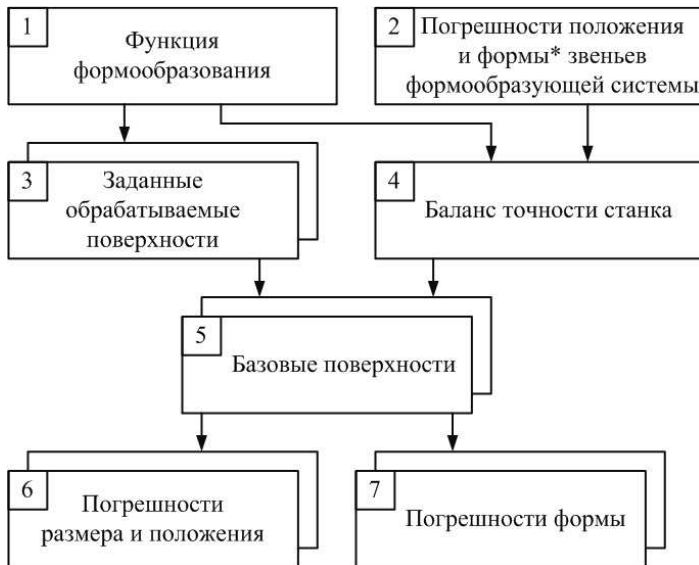


Рис. Адаптированная структура модели выходной точности станка (под погрешностью формы звеньев понимаются только погрешности поверхностей, базисуемых режущим инструментом и заготовку)

формообразования на практике зачастую позволяет повысить точность обработки за счет взаимной компенсации составляющих выражения (1), однако здесь не рассматривается. Идеальность режущего инструмента означает, что все погрешности размера, положения и формы поверхностей обрабатываемых деталей формируются только станком, а для учета влияния погрешностей инструмента можно использовать соответствующие поправки.

На рисунке показана преобразованная структура модели выходной точности станка [8], служащая для достижения поставленной цели.

В блоке 1 модели формируется функция формообразования с использованием однородных координат в виде

$$r_0 = A_{ст} A_{и} e^4, \quad (2)$$

где r_0 – радиус-вектор связывающий координаты точек режущего инструмента в системах координат самого режущего инструмента и обрабатываемой детали; $A_{ст}$ и $A_{и}$ – матрицы преобразований координат станка и инструмента соответственно, являющиеся произведениями матриц элементарных перемещений; $e^4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радиус-вектор начала координат; T – символ транспонирования.

В блоке 2 модели каждому i -му звену ФС, рассматриваемому как твердое тело и входящему в состав матрицы $A_{ст}$, ставится в соответствие матрица ϵ_i :

$$\epsilon_i = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta x_i \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta y_i \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ – величины малых смещений i -го звена ФС относительно осей X, Y и Z ; α, β и γ – величины малых углов поворота i -го звена ФС относительно осей X, Y и Z .

При этом для звеньев, осуществляющих базирование режущего инструмента и заготовки, величины малых смещений и углов поворота учитывают также погрешности соответствующих поверхностей.

Блоку 3 модели на основе выражения (2) соответствует формирование множества уравнений обрабатываемых поверхностей $\{r_0\}$ в векторно-параметрическом виде:

$$r_0 = r_0(u, v, q_0), \quad (3)$$

где u, v – криволинейные координаты поверхности; q_0 – вектор размерных параметров поверхности; $q_0 = (q_{01}, \dots, q_{0m})^T$; m – количество составляющих вектора q_0 с учетом накладываемых связей для всех заданных деталей и инструментов. Сами уравнения связей не используются как отдельная подсистема, а служат для выражения зависимых аргументов матриц элементарных преобразований от двух независимых аргументов – u и v , причем один из них должен соответствовать главному движению станка, а второй – подаче.

В блоке 4 модели происходит определение векторного баланса точности станка. С учетом принятых предпосылок и выражения (2) полная вариация радиуса-вектора r_0 (Δr_0) равна

$$\Delta r_0 = \Delta A_{ст} A_{и} e^4 + A_{ст} \Delta A_{и} e^4 = \Delta A_{ст} A_{и} e^4. \quad (4)$$

Поскольку инструмент принят идеальным, то $\Delta A_{и} = 0$.

Сам векторный баланс точности станка Δr_0 задает вектор погрешности по-

ложения каждой точки обрабатываемой поверхности по отношению к заданным (номинальным) обрабатываемым поверхностям, определенным в блоке 3. Такие векторные балансы определяются для каждой обрабатываемой поверхности и режущего инструмента, а при обработке только точечным инструментом ($A_n = E$, где E – единичная матрица) они будут совпадать.

Нормальные (скалярные) балансы точности определяются как проекция векторного баланса на n – единичный вектор нормали к обрабатываемой поверхности, т.е. $\Delta r_n = \Delta r_0 n$.

Блоку 5 модели соответствует построение уравнений реально обработанных (r) и базовых (r_b) поверхностей, соответствующих заданному обрабатываемым поверхностям, в виде

$$r = r_0 + \Delta r_0 = r(u, v, q_0)$$

и

$$r_b = r_0(u, v, q), \quad (5)$$

где $q = (q_1, \dots, q_p)^T$ – вектор параметров базовой поверхности; p – количество составляющих вектора q .

Иное представление выражения (5) имеет следующий вид:

$$r_b = r_0 + \Delta r_b = r_0 + \varepsilon_b r_0 + dr_0,$$

где ε_b – матрица погрешности расположения системы координат, связанной с базовой поверхностью, относительно системы координат, в которой задано уравнение (4), равная

$$\varepsilon_b = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_b & \beta_b & \delta x_b \\ \gamma_b & 0 & -\alpha_b & \delta y_b \\ -\beta_b & \alpha_b & 0 & \delta z_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\text{а } dr_0 = \sum_{i=1}^m (\partial r_0 / \partial q_{0i}) \Delta q_{0i}.$$

Вектор Δr_b можно рассматривать как полный дифференциал r_b по составляющим вектора q , т.е.

$$\Delta r_b = G \Delta q, \quad (6)$$

где G – матрица ($4 \times p$), состоящая из вектор-столбцов частных производных $\partial \Delta r_b / \partial \Delta q_i$; Δq – p -мерный вектор-столбец, состоящий из погрешностей Δq_i положения и размеров.

В блоке 6 модели выполняется построение систем уравнений для составляющих вектор q погрешностей размера и положения в зависимости от принятого типа базовой поверхности (средней квадратической или прилегающей) для всех обрабатываемых поверхностей.

Так, для средней квадратической базовой поверхности имеется система p линейных уравнений относительно вектора Δq

$$H \Delta q = d, \quad (7)$$

где H – матрица ($p \times p$) с элементами $h_{ki} = \int_S f_k f_i dS$; d – вектор ($p \times 1$) с элементами

$d_i = \int_S f_i \Delta r_n dS$; f_k, f_i – k -я и i -я координаты

вектора f нормальных передаточных коэффициентов ($k, i = 1, 2, \dots, p$); $f = G^T n$; n – единичный вектор нормали к поверхности r_0 ; $\Delta r_n = (\Delta r_0 n)$ – нормальная погрешность; S – поверхность интегрирования, определяемая вектором r_0 .

В уравнении (7) погрешности положения и размеров базовой поверхности являются составляющими вектора Δq , определенного в выражении (6), а геометрические погрешности станка – составляющими вектора d .

Блок 7 модели включает построение систем уравнений для определения взаимосвязи глобальных погрешностей формы для всех обрабатываемых поверхностей с геометрическими погрешностями станка. При этом используется малое искажение номинально обрабатываемой поверхности, т.е. вариации функции, заданной выражением (3), что соответствует построению следующей поверхности:

$$r_1(u, v, q_0) = r_0(u, v, q_0) + \delta r(u, v),$$

где $\delta r = G \delta q$; $\delta q = \delta q(u, v, \Delta b)$ – известная функция координат u и v , заданным образом искажающая номинальную поверхность; Δb – бесконечно малый вектор, определяемый путем минимизации линей-

ной части среднего квадратического отклонения обработанной поверхности $r(u, v)$ от поверхности $r_1(u, v)$.

Таким образом, в результате выполнения этапов 6 и 7 будет полностью сформирована система уравнений, связывающих погрешности размера, положения и

формы обрабатываемых деталей с погрешностями положения звеньев ФС станка, а величины погрешностей поверхностей, базирующих инструмент и заготовку, будут являться составляющими погрешностей положения начального и конечного звеньев, принадлежащих станку.

Опытная апробация предложенного подхода

Рассмотрим применение предложенного подхода на известном примере [8]. Требуется разработать нормы точности для токарного станка, предназначенного для обработки точечным режущим инструментом (резцом) гладкой цилиндрической детали, для которой заданы требова-

ния к цилиндрической поверхности и торцовым поверхностям. Опуская промежуточные выкладки, приведем конечные результаты выполнения блоков модели.

Блок 1. Функция формообразования имеет вид

$$r_0 = A^6(\varphi)A^3(z)A^1(x)e^4 = (xcos\varphi; xsin\varphi; z; 1)^T,$$

$A_{ст} = A^6(\varphi) A^3(z) A^1(x)$, $A_{и} = E$, где $A^6(\varphi)$ – матрица поворота вокруг оси Z ; $A^3(z)$ и $A^1(x)$ – матрицы перемещений вдоль осей Z и X ; φ – угол поворота шпинделя с заготовкой; z, x – смещения вершины резца вдоль и поперек оси вращения шпинделя соответственно.

Блок 2. Учитываются все возможные погрешности, матрицы ε_i которых будут введены в векторный баланс точности.

Блок 3. Уравнения обрабатываемых поверхностей имеют вид:

1) для цилиндрической поверхности с радиусом R :

$$r_0 = A^6(\varphi)A^3(z)A^1(R)e^4 = (Rcos\varphi; Rsin\varphi; z; 1)^T;$$

2) для торцовой поверхности $z=c$:

$$r_0 = A^6(\varphi)A^3(c)A^1(x)e^4 = (xcos\varphi; xsin\varphi; c; 1)^T.$$

Блок 4. Векторный баланс точности:

$$\Delta r_0 = \sum_{i=0}^3 A_{0,i} \varepsilon_i A_{i,3} e^4 = (\varepsilon_0 A^6 A^3 A^1 + A^6 \varepsilon_1 A^3 A^1 + A^6 A^3 \varepsilon_2 A^1 + A^6 A^3 A^1 \varepsilon_3) e^4,$$

или

$$\Delta r_0 = \begin{pmatrix} \Delta_1 \cos\varphi - \Delta_2 \sin\varphi + \Delta_3 \\ \Delta_1 \sin\varphi + \Delta_2 \cos\varphi + \Delta_4 \\ \Delta_5 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{17}$$

где $\Delta_1 - \Delta_5$ выражаются через элементарные погрешности положения звеньев следующим образом: $\Delta_1 = z\beta_1 + \sum_{i=1}^3 \delta x_i$; $\Delta_2 = -z\alpha_1 + x \sum_{i=0}^2 \gamma_i + \sum_{i=1}^3 \delta y_i$; $\Delta_3 = \delta x_0 + z\beta_0$; $\Delta_4 = \delta y_0 - z\alpha_0$;

$$\Delta_5 = \sum_{i=0}^3 \delta z_i - x \cos\varphi \cdot \beta_0 + x \sin\varphi \cdot \alpha_0 - x(\beta_1 + \beta_2).$$

Скалярные балансы точности равны:

1) для цилиндрической поверхности:

$$\Delta r_n = \delta x_0 \cos\varphi + \delta y_0 \sin\varphi - \alpha_0 z \sin\varphi + \beta_0 z \cos\varphi + \beta_1 z + \sum_{i=1}^3 \delta x_i;$$

2) для торцовой поверхности:

$$\Delta r_n = \alpha_0 x \sin \varphi - \beta_0 x \cos \varphi - (\beta_1 + \beta_2)x + \sum_{i=0}^3 \delta z_i.$$

Блок 5. Выражения (6) для базовых поверхностей имеют вид:

1) для цилиндрической поверхности:

$$\Delta r_b = \varepsilon_b r_0 + dr_0 = \begin{pmatrix} \delta x_b + \beta_b z + \cos \varphi \cdot \Delta R \\ \delta y_b - \alpha_b z + \sin \varphi \cdot \Delta R \\ -\beta_b R \cos \varphi + \alpha_b R \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix};$$

2) для торцевой поверхности:

$$\Delta r_b = (\beta_b c; -\alpha_b c; -x \cos \varphi \cdot \beta_b + x \sin \varphi \cdot \alpha_b + \Delta c; 0)^T.$$

Блок 6. Выражения (7) для базовых поверхностей имеют вид:

1) для цилиндрической поверхности:

$$H = \frac{1}{6} \pi L R \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 & 3L & 0 \\ 0 & 6 & -3L & 0 & 0 \\ 0 & -3L & 2L^2 & 0 & 0 \\ 3L & 0 & 0 & 2L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{pmatrix},$$

где элементы d_i вектора d определяются как $d_i = \int_0^{2\pi} \int_0^L R f_i \Delta r_n dz d\varphi$, $i = 1, 2, \dots, 5$;

2) для торцевой поверхности:

$$H = \pi R^2 \begin{pmatrix} \frac{1}{4} R^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} R^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где элементы d_i вектора d определяются как $d_i = \int_0^{2\pi} \int_0^R f_i \Delta r_n x dx d\varphi$, $i = 1, 2, \dots, 5$.

Блок 7. Основная проблема реализации данного блока заключается в построении вариации $\delta r(u, v)$, заданным образом искажающей номинальную поверхность, и требует выполнения дополнительных исследований. Такие исследования были проведены для указанных поверхностей, и позволили получить линейные интегральные оценки погрешностей размера, положения и формы (объединить блоки 6 и 7) в виде следующих выражений:

1) для цилиндрической поверхности:

$$\Delta_i = \frac{1}{2\pi L} \iint_S g_i \Delta r_n dz d\varphi; \quad (8)$$

2) для торцевой поверхности:

$$\Delta_i = \frac{1}{\pi R^2} \iint_S g_i \Delta r_n x dx d\varphi. \quad (9)$$

Выражения для определения g_i приведены в табл. 5.5 [8], а скалярные балансы

погрешностей приведены в блоке 4 данного примера. Например, для цилиндра с применением выражения (8) установлены восемь выражений для значений погрешностей этой поверхности (погрешность радиуса, конусообразность, корсетность (бочкообразность) и др.), а для погрешностей торца даны два выражения.

Выражения (8) и (9) и являются линейными уравнениями, образующими систему, связывающую погрешности размера, положения и формы обрабатываемых деталей с погрешностями положения звеньев ФС станка. Полученная в итоге система уравнений может быть как определенной, так и недо- и переопределенной, решение которой будет выполняться с использованием известных методов линейной алгебры.

Заключение

В заключение следует отметить, что практическое применение предложенного подхода требует как развития самого вариационного метода расчета точности станков в части получения соответствующих

оценок точности положения различных обрабатываемых поверхностей, например отклонений от параллельности двух торцов и других, так и детального исследования структуры уравнений взаимосвязи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60049.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- World Machine-Tool Output & Consumption Survey 2015. – Режим доступа: <http://www.gardnerweb.com/cdn/cms/GR-2015-WMTS.pdf>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 12.07.2015).
- Shinno, H. Quantitative SWOT Analysis on Global Competitiveness of Machine Tool Industry / H. Shinno, H. Yoshioka, S. Marpaung, S. Nachiga // Journal of Engineering Design. – 2006. - Vol.17. - № 3. – P. 251-258.
- Проников, А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1985. – 288 с.
- Балакшин, Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. В 2 кн. / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1982. – 239 с.
- Червяков, Л.М. Управление процессом обеспечения точности изделий машиностроения на ос-
- нове когнитивных моделей принятия технологических решений: автореф. дис...д-ра техн. наук / Л.М. Червяков. – Москва, 1999. – 41 с.
- Долженкова, С.Б. Выявление геометрических погрешностей металлорежущих станочных систем, влияющих на точность обработки / С.Б. Долженкова, А.Г. Ивахненко, В.В. Куц // Известия Курского государственного технического университета. – 2010. - № 2 (31). – 2010. – С. 60-65.
- Аникеева, О.В. Управление этапом планирования для повышения качества процесса ремонта металлорежущих станков: автореф. дис... канд. техн. наук / О.В. Аникеева. – Курск, 2012. – 16 с.
- Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
- Chervyakov, L.M. Accuracy control support for metal product based on cognitive models of technological decision-making: *Abstract of the Thesis for D.Eng. degree competition* / L.M. Chervyakov. – Moscow, 1999. – pp. 41.
- Dolzhenkova, S.B. Geometric errors identification in machine-tool systems affecting machining accuracy / S.B. Dolzhenkova, A.G. Ivakhnenko, V.V.Kuts // *Proceedings of Kursk State Technical University*. – 2010. - № 2 (31). – 2010. – pp. 60-65.
- Anikeeva, O.V. Planning stage management for quality increase in machine-tools repair process: *Abstract of the Thesis for Can.Eng. degree competition* / O.V. Anikeeva. – Kursk, 2012. – pp. 16.
- Reshetov, D.N. Machine-Tools Accuracy / D.N. Reshetov, V.T. Portman. – М.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 336.

Статья поступила в редколлегию 22.07.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева Барсуков Г.В.

Сведения об авторах:

Аникеева Олеся Владимировна, ст. науч. сотрудник кафедры «УКМиС» Юго-Западного государственного университета, тел.: 8(4712) 32-60-90, e-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru.

Anikeeva Olesya Vladimirovna, Senior researcher of the Dep. "UKM & S" of the South-Western State University, Phone: 8(4712) 32-60-90, e-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru.