

Для цитирования: Кленова И.А., Рудиков Д.А., Холодова С.Н. Нормирование точности привода металлорежущих станков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (1):17-25. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-17-25

For citation: Klenova I.A., Rudikov D.A., Kholodova S.N. Normalisation of the drive precision of metal-cutting machines. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (1):17-25. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-17-25

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК: 621.9.06:519.876

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-1-17-25

НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИВОДА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Кленова И.А.¹, Рудиков Д.А.², Холодова С.Н.³

^{1,2} Ростовский государственный университет путей сообщения,
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного
Ополчения, д.2,

³ Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д.1,
e-mail: ¹⁻²d-studio@mail.ru, ³holls9@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является создание методики проектного расчета привода главного движения металлорежущих станков, позволяющей снизить погрешность реализации ряда предпочтительных чисел. **Методы.** Точность установленных режимов является определяющим фактором, от которого зависит эффективность обработки резанием. Определить и оценить погрешность привода металлорежущего станка предложено тремя методами: непосредственным измерением частот ряда, расчетами по уравнениям кинематического баланса и суммированием отдельных составляющих. Проверку точности ряда, реализуемого приводом станка, рекомендуется проводить на станке, работающем без нагрузки. **Результаты.** Разработанная методика создает возможность на стадии проектирования с достаточно высокой точностью рассчитать и оценить погрешность реализуемого приводом металлорежущего станка ряда путем замера фактических частот вращения шпинделя, кинематического расчета и суммирования составляющих общей погрешности.

Представленный комплекс способствует выявлению роли погрешности округления предпочтительных чисел в формировании общей относительной погрешности и дает возможности ее снижения. **Вывод.** Использование предложенной методики расширяет научную базу для разработки алгоритмов и программ, облегчающих подбор чисел зубьев для множительных групп, структур и гарантирующих высокую точность реализуемого ряда.

Ключевые слова: точность станка, погрешность привода, кинематический баланс, предпочтительно число, знаменатель ряда

PHYSICAL-MATEMATICALSCIENCE MECHANICS

NORMALISATION OF THE DRIVE PRECISION OF METAL-CUTTING MACHINES

Klenova I.A.¹, Rudikov D.A.², Kholodova S.N.³

^{1,2} Rostov State Transport University (RSTU)
2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq.,
Rostov-on-Don 344038, Russia

³Don State Technical University (DSTU)
1, Gagarin sq., 344000 Rostov-on-Don, Russia
e-mail: ¹⁻²d-studio@mail.ru, ³holls9@mail.ru

Abstract. Objectives The purpose of the study is to create a methodology for computing the design of the primary drive mechanism of metal cutting machines, making it possible to reduce error when realising a set of preferred output criteria. **Methods** The accuracy of established modes of operation is a key determinant on which the efficiency of cutting operations depends. In order to determine and evaluate drive errors in metal-cutting machines, three methods were proposed: direct measurement of the frequencies of the series, calculations using kinematic balance equations and summation of individual components. It is recommended that an unloaded machine be used to check the accuracy of the series gained by the machine's drive. **Results** By measuring the actual spindle rotation frequencies and kinematic calculation – as well as summing the components of the total error – the developed methodology makes it possible to calculate and estimate the error of a series gained by the drive of a metal-cutting machine at the design stage with a sufficiently high accuracy. The presented complex helps to reveal the role of the rounding error of the output criteria in the formation of the general relative error and provides a basis for its possible reduction. **Conclusion** The use of the proposed methodology expands the scientific basis for the development of algorithms and programs facilitating the selection of the optimal number of gear teeth for multiplying groups and structures and guaranteeing high accuracy of the gained series.

Keywords: machine precision, drive error, kinematic balance, preferred numbers, series denominator

Введение. Отраслевой стандарт ОСТ 2 Н11-1-72 «Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел» в существующей на сегодняшний день редакции содержит в себе ряд недостатков, которые снижают его эффективность и вызывают трудности в его применении. Точность установленных режимов является определяющим фактором, от которого зависит эффективность обработки резанием [3]. Если режимы завышены, то, как следствие, снижается стойкость инструмента, что ведет к потерям за счет частой переналадки, переточки, а также за счет увеличения расхода инструментального материала. Если же режимы обработки резанием занижены, то это приведет к потерям за счет снижения производительности [4].

Постановка задачи. С целью устранения выявленных недостатков [1] с учетом предложения [2] по улучшению отраслевого стандарта была разработана новая его редакция, текст которой приводится в данной статье.

Методы исследования. В отрасли станкостроения погрешность реализуемого приводом ряда считается важным показателем качества [5], которая имеет строгие ограничения и показана к обязательной проверке при приемке и испытании станков.

На стадии проектирования привода металлорежущих станков рекомендуется придерживаться основных и выборочных рядов предпочтительных чисел по ГОСТ 8032-84 [6] учитывая следующие ограничения и дополнения: не рекомендовано применение дополнительных и приближенных рядов предпочтительных чисел; допускается в исключительных случаях использовать составные ряды, но лишь при условии, что больший знаменатель имеют составляющие на границах ряда (в начале и в конце), таким образом, в средней части ряда плотность чисел будет большей; дополнительно приведен уточненный ряд предпочтительных чисел с указанием его погрешности округления. В данном отраслевом стандарте описаны основные определения, методика расчета погрешности ряда, а также допускаемый диапазон отклонений погрешности.

Основной величиной, которая характеризует точность реализуемого приводом фактического ряда, является относительная погрешность, определяемая по формуле:

$$w_k = \frac{f_k - h_k}{g_k} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где, f_k – определенное по уравнению кинематического баланса или измеренное значение k -го члена фактического ряда; h_k – стандартное значение предпочтительного числа; g_k – расчетное значение предпочтительного числа (целая степень знаменателя исходной геометрической прогрессии).

При выполнении приближенных расчетов для определения относительной погрешности допустимо использовать формулу (2), в которой в знаменателе вместо расчетного значения предпочтительного числа g_k подставлено существующее предпочтительное число h_k :

$$w_k \approx w'_k = \frac{f_k - h_k}{h_k} \cdot 100\%, \quad (2)$$

Разность между наибольшим и наименьшим значениями относительной погрешности C является основным контролируемым параметром – поле рассеивания относительной погрешности:

$$C = w_{max} - w_{min} \leq C_d, \quad (3)$$

где, C_d – допускаемое значение поля рассеивания относительной погрешности.

Проверку точности реализуемого приводом станка ряда рекомендуется проводить на станке, работающем без нагрузки (холостой ход) [7].

Отклонение относительной погрешности по среднему должно быть близко к нулю:

$$-0,1\% \leq \frac{w_{max} + w_{min}}{2} \leq +0,1\%. \quad (4)$$

Для реализации сказанного необходимо рассчитывать передаточное отношение постоянного звена так, чтобы обеспечить симметричное расположение поля рассеивания между максимальным w_{max} и минимальным w_{min} отклонениями [8].

Величина полей рассеивания и их отклонений должна находиться в пределах значений, указанных в табл.1.

Таблица 1. Допуски на поля рассеивания и отклонения относительной погрешности
Table 1. Tolerances for scattering fields and deviations of the relative error

Уровень ограничения	Допускаемое поле рассеивания, C_d %, для класса точности станков.							
	нормальный		повышенный		точный		особо точный	
	поле	отклонение	поле	отклонение	поле	отклонение	поле	отклонение
1	5,2	±2,6	4,4	±2,2	3,6	±1,8	2,8	±1,4
2	4,6	±2,3	3,9	±1,95	3,2	±1,6	2,5	±1,25
3	4,0	±2,0	3,4	±1,7	2,8	±1,4	2,2	±1,1

При условии выполнения допуска на поле рассеивания (табл.1) с увеличением нагрузки асинхронного электродвигателя до номинальной, возможно уменьшение на 5% экстремальных отклонений относительной погрешности.

В случае бесступенчатого регулирования привода металлорежущего станка контроль относительной погрешности необходимо осуществлять по значениям ряда $R20$ и допускам на поля рассеивания (табл.1).

При проектировании точных и особо точных станков рекомендуется использование уточненного ряда $R40U$ (табл.2), который обладает меньшей погрешностью округления (табл.3), чем нормальный ряд.

Таблица 2. Предпочтительные числа уточненного ряда R40U
Table 2. Preferred numbers of the refined R40U series

1,00	1,33	1,78	2,37	3,16	4,22	5,60	7,50
1,06	1,41	1,89	2,50	3,35	4,45	5,95	7,95
1,12	1,50	2,00	2,65	3,55	4,75	6,30	8,40
1,19	1,59	2,12	2,81	3,75	5,00	6,70	8,90
1,26	1,68	2,24	3,00	4,00	5,30	7,05	9,45

Таблица 3. Погрешность округления уточненного ряда R40У
Table 3. Rounding error of the refined R40U series

-0,0002	0,2639	-0,0970	0,0577	-0,0718	-0,0722	0,4161	-0,0144
-0,0706	0,1794	-0,3374	0,4730	-0,0105	0,3767	0,1109	-0,0848
0,1797	-0,2518	-0,2377	0,4029	-0,0528	-0,3910	0,1515	0,1655
-0,1262	-0,3224	-0,3083	0,2972	-0,2226	0,2366	-0,2480	0,1401
-0,1077	-0,0714	-0,0574	-0,4899	-0,4757	0,1663	0,4158	-0,0998

Обсуждение результатов. Любой нормативный документ, регулирующий какой-либо критерий техники, включает в себя понятия и зависимости, общие норма и положения, а также методики расчета и рекомендации по их использованию.

Как было отмечено выше, действующая редакция отраслевого стандарта ОСТ 2 Н11-1-72 содержит ряд недостатков. Отсутствие формул и зависимостей для расчета точности реализуемого приводом металлорежущего станка ряда является одним из основных его недостатков. Вследствие этого у большинства металлорежущих станков фактический ряд частот в приводе главного движения не соответствовал требованиям отраслевого стандарта (присутствовало превышение норматива в несколько раз) [2].

Множительная структура - группа передач, объединенных в множительные группы, реализующая при постоянной входной частоте необходимый ряд частот на выходе. Характеризуется такая структура числом входящих в нее групп, порядком их чередования или количеством передач в этих группах. Множительная структура может представляться структурной формулой, структурной сеткой, а также графиком частот. Множительные структуры разделяются на *нормальные множительные структуры* – образованные последовательным соединением множительных групп, каждая из которых участвует в передаче движения и *сложные множительные структуры* – структуры в которых множительные группы могут исключаться из передачи движения на определенных ступенях.

Множительная группа – элементарный механизм, состоящий из двух валов и передачи между ними. Связь между валами может осуществляться несколькими передачами, переключение которых происходит с помощью какого-то устройства (подвижные блоки, муфты и т.п.). Множительная группа может характеризоваться числом передач, величиной передаточного отношения (одного) или характеристикой группы.

Характеристика множительной группы p – степень, в которую необходимо возвести знаменатель ряда, чтобы получить частное от деления большего передаточного отношения на соседнее меньшее:

$$\frac{i_2}{i_1} = \varphi^p; \quad i_2 = i_1 \varphi^p; \quad p = \frac{\lg i_2 - \lg i_1}{\lg \varphi}, \quad (5)$$

где, i_1 , – меньшее передаточное отношение в множительной группе, i_2 – соседнее большее передаточное отношение в множительной группе; φ – знаменатель ряда; p – характеристика множительной группы.

Характеристика передаточного отношения A – степень, в которую надо возвести знаменатель ряда, чтобы получить значение передаточного отношения:

$$i_1 = \varphi^A; \quad A = \frac{\lg i_1}{\lg \varphi}. \quad (6)$$

Если в формуле определения относительной погрешности ряда (1) в числитель добавить и вычесть расчетное значение предпочтительного числа g_k , а затем из полученного выражения выделить две дроби:

$$w = \frac{f_k - g_k + g_k - h_k}{g_k} \cdot 100\% = \frac{f_k - g_k}{g_k} \cdot 100\% + \frac{g_k - h_k}{g_k} \cdot 100\% = w_{II} + w_{OK}, \quad (7)$$

то видно, что общая относительная погрешность будет содержать в себе две составляющие – погрешность привода металлорежущего станка w_{II} и погрешность округления предпочтительного числа w_{OK} :

$$w_{II} = \frac{f_k - g_k}{g_k} \cdot 100\%; \quad w_{OK} = \frac{g_k - h_k}{g_k} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Например, дано предпочтительное число 170 (ряд R40), и необходимо рассчитать погрешность его округления. Определение степени t , в которую необходимо возвести знаменатель ряда φ , чтобы получить предпочтительное число 170:

$$\varphi = \sqrt[40]{10} = 1,0593; \quad \lg \varphi = \lg 1,0593 = 0,025; \quad \lg 170 = 2,2305$$

$$t = \frac{\lg 170}{\lg \varphi} = \frac{2,2305}{0,025} = 89,2 \approx 89.$$

Расчетное значение числа:

$$g_k = \varphi^t = 1,0593^{89} = 167,8804.$$

Погрешность округления предпочтительного числа:

$$w_{OK} = \frac{g_k - h_k}{g_k} \cdot 100\% = \frac{167,8804 - 170}{167,8804} \cdot 100\% = -1,2626\%$$

Если в знаменателе выражения (8) произвести замену g_k на h_k , то получим формулу, по которой традиционно определяется погрешность округления при кинематических расчетах и которую возможно использовать для приближенных расчетов:

$$w_{OK} = \frac{g_k - h_k}{h_k} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Погрешность привода w_{II} определяется по результатам измерений или по уравнениям кинематического баланса.

Рассчитаем погрешность привода для фактической частоты равной $f_k = 172 \text{ мин}^{-1}$ при стандартном значении 170 мин^{-1} .

По формуле (1) определяется общая погрешность:

$$w_k = \frac{f_k - h_k}{g_k} \cdot 100\% = \frac{172 - 170}{167,8804} \cdot 100\% = 1,1913\%.$$

Погрешность привода:

$$w_{II} = \frac{f_k - g_k}{g_k} \cdot 100\% = \frac{172 - 167,8804}{167,8804} \cdot 100\% = 2,4539\%,$$

оказывается больше общей, потому что при суммировании с отрицательной погрешностью округления ее величина уменьшается (компенсируется):

$$w = w_{II} + w_{OK} = 2,4539 - 1,2626 = 1,1913\%.$$

Следовательно, при суммации погрешностей привода и округления предпочтительного числа, общая погрешность может быть больше слагаемых (в случае суммирования величин одного знака) и меньше (в случае суммирования величин с разными знаками). Погрешность привода формируется в результате суммации входящих в ее состав погрешности множительной части w_V (изменяющуюся при переключении передач), и погрешности постоянной части w_p [9]:

$$w_{II} = w_V + w_p. \quad (10)$$

Погрешность множительной части в свою очередь есть сумма относительных погрешностей передаточных отношений w_{mj} кинематических пар, которые участвуют в передаче движения на данной ступени [10]:

$$w_V = \sum_{j=1}^{j=J} (w_{1j} + \dots + w_{mj} + \dots + w_{Mj}), \quad (11)$$

где, m, M – номер и количество множительных групп; j, J – номер и количество передач в группе.

Общее поле рассеивания погрешности C_V равно сумме полей рассеивания в группах:

$$C_V = C_1 + \dots + C_m + \dots + C_M; \quad C_V = w_{max} + w_{min}. \quad (12)$$

а общее среднее S_V равно сумме средних значений погрешности передаточных в множительных группах [11]:

$$S_V = S_1 + \dots + S_m + \dots + S_M; \quad S_V = \frac{w_{max} + w_{min}}{2}. \quad (13)$$

Постоянная составляющая общей погрешности считается неизменной для каждой ступени только в первом приближении [12]. На практике же с переключением скоростей меняется мощность холостого хода, а также нагрузка на электродвигатель и скольжение в нем. Погрешность постоянной части состоит из скольжения в электродвигателе $\delta_{ос}$ [13], погрешности постоянной передачи w_{pp} и компенсирующей добавки w_D (уравнивающей ее экстремальные отклонения по абсолютной величине):

$$w_p = \delta_{ос} + w_{pp} + w_D. \quad (14)$$

Уравнение кинематического баланса применяется для определения реализуемого приводом членов фактического ряда и представляет собой произведение частоты двигателя $f_{ос}$ и передаточных отношений постоянных звеньев и множительных групп:

$$f_k = f_{ос} \cdot i_{pp} \cdot i_{ij} \cdot \dots \cdot i_{mj} \cdot \dots \cdot i_{Mj}, \quad (15)$$

где, i_{pp} – передаточное отношение постоянного звена, $i_{ij} \cdot \dots \cdot i_{mj} \cdot \dots \cdot i_{Mj}$ – передаточные отношения в множительных группах (варьируемые величины).

Итоговая относительная погрешность ряда может быть определена не только как произведение, но и как сумма погрешностей сомножителей.

Суммарная погрешность w_s ряда, реализуемого приводом металлорежущего станка, может быть определена по формуле [14]:

$$w_s = \delta_{ос} + w_{pp} + w_D + \sum_{j=1}^{j=J} (w_{1j} + \dots + w_{mj} + \dots + w_{Mj}) + w_{OK}. \quad (16)$$

Последовательность при суммировании не важна. К ступени жестко привязаны лишь скольжение в асинхронном электродвигателе и погрешность округления предпочтительного числа, которые можно суммировать отдельно от других составляющих общей погрешности и на определенных этапах кинематического расчета использовать единым блоком.

В случае, когда известны числа зубьев всех зубчатых колес множительной структуры, а также числа зубьев постоянной пары, то для всех ступеней реализуемого приводом металлорежущего станка постоянными будут только значения w_{pp} и w_D .

Баланс погрешности представляет собой итоговую таблицу с числом строк равным числу реализуемых приводом ступеней [15]. Для каждой ступени в строке приводятся значения всех составляющих величин общей погрешности, а также другие величины, используемые в расчете. Таблицы 1-3 в компактной форме наглядно демонстрируют мельчайшие детали процесса образования погрешности в приводе металлорежущего станка; создает возможность анализа источников формирования погрешности и причины их образования, а также позволяет найти пути и мероприятия по снижению относительной погрешности. Помимо этого, итоговая таблица позволяет оценить надежность и качество используемых расчетных зависимостей и методик.

Вывод. Рассмотренный комплекс понятий и зависимостей создает возможность на стадии проектирования с достаточно высокой точностью рассчитать и оценить погрешность реализуемого приводом металлорежущего станка ряда путем замера фактических частот вращения шпинделя, путем кинематического расчета и путем суммирования составляющих общей погрешности. Помимо этого, данный комплекс способствует выявлению роли погрешности округления предпочтительных чисел в формировании общей относительной погрешности и дает возможности ее снижения.

Установлено, что составляющие общей погрешности могут взаимно друг друга компенсировать, чем открывают принципиальные возможности создания новых методов кинематического расчета приводов металлорежущих станков. Также возможно создание научной базы, разработки алгоритмов и программ для расчета на ЭВМ таблиц, облегчающих подбор чисел зубьев для множительных групп, структур и гарантирующих высокую точность реализуемого ряда.

Библиографический список:

1. Рудиков Д.А. Совершенствование методов кинематического расчета привода главного движения металлорежущих станков по критерию минимизации погрешности ряда: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, 2006.
2. Заверняев Б.Г. Предложения по совершенствованию системы нормирования точности привода металлорежущих станков: /Заверняев Б.Г., Щеглов М.В., Рыжкин А.А./ Стандартизация, сертификация, управление качеством продукции: теория и практика. Материалы Междунар. науч.-практ. конф., 25-27 сент., пгт. Партенит. – Киев, 2001.
3. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. The International Academy for Production Engineering/Editors: Luc Laperrière, Gunther Reinhart. -Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. -1320 p.
4. Lee C.B., Lee S.K. Multi-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision machine using laser encoder: Review//Journal of Mechanical Science and Technology. -2013. - V. 1. -№ 27.-P. 141 -152.
5. Machine tool feed drives. Y. Altintas, A. Verl, C. Brecher et al.//CIRP Annals -Manufacturing Technology. -2011. -№ 62. -P. 779 -796.
6. ГОСТ 8032-84 «Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел».
7. Trends in research on metal-cutting machines. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Russian Engineering Research. 2016. Т. 36. № 6. С. 488-495.
8. Precision and efficiency of metal-cutting machines. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Russian Engineering Research. 2016. Т. 36. № 9. С. 762-773.
9. Рудиков Д.А. Оценочные математические модели для определения точности привода металлорежущих станков. Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. №1(41). С.25-30.
10. Рудиков Д.А. Совершенствование кинематических расчетов коробок передач металлорежущих станков. Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т.10. №2(45). С. 224-228.
11. Заверняев Б.Г. Использование средних величин погрешности в кинематическом расчете коробок передач: /Заверняев Б.Г., Рудиков Д.А./ Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства: материалы Междунар. конф., 16 - 19 сент. - Волгоград, 2003.
12. Заверняев Б.Г. Элементы погрешности постоянной части множительной структуры: /Заверняев Б.Г., Курис Э.В., Рудиков Д.А./ Проектирование технологического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. /ГОУ ДПО "ИУИ АП". - Ростов н/Д, 2003.

13. Рудиков Д.А. Математическая модель для анализа скольжения в электродвигателе и ременной передаче: /Рудиков Д.А., Тишина А.В./ Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт 2015», 12-15 апр.2015, г. Ростов-на-Дону: Изд. РГУПС, Ростов н/Д, 2015
14. Рудиков Д.А. Анализ составляющих общей погрешности множительной структуры металлорежущего станка: /Рудиков Д.А., Тишина А.В./ Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сб. ст. Междунар. науч. - практ. конф. в рамках IXпром. конгр. Юга России, 11-13 сент. г. Ростов-на-Дону. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2013.
15. Заверняев Б.Г. Использование баланса составляющих погрешности для выявления роли постоянных звеньев: /Заверняев Б.Г., Курис Э.В., Рудиков Д.А./ Проектирование технологического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. /ГОУ ДПО "ИУИ АП". - Ростов н/Д, 2002.

References:

1. Rudikov D.A. Sovershenstvovanie metodov kinemacheskogo rascheta privoda glavnogo dvizheniya metallozhushchikh stankov po kriteriyu minimizatsii pogreshnosti ryada. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni cand. tekhn. nauk. Rostov-on-Don; 2006. [Rudikov D.A. Improvement of the methods of kinematic calculation of the main motion drive of metal-cutting machine tools by the criterion of error minimization of the series. Published summary of PhD of Technical Sciences thesis. Rostov-on-Don; 2006. (In Russ.)]
2. Zavernyaev B.G., Shcheglov M.V., Ryzhkin A.A. Predlozheniya po sovershenstvovaniyu sistemy normirovaniya tochnosti privoda metallozhushchikh stankov. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii "Standartizatsiya, sertifikatsiya, upravlenie kachestvom produktsii: teoriya i praktika". Kiev; 2001. [Zavernyaev B.G., Shcheglov M.V., Ryzhkin A.A. Proposals for improving the system for the normalization of the accuracy of the drive of metal-cutting machines. Proceedings of the International scientific-practical conference "Standardisation, certification, production quality management: theory and practice". Kiev; 2001. (in Russ.)]
3. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014.
4. Lee C.B., Lee S.K. Multi-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision machine using laser encoder: Review. Journal of Mechanical Science and Technology. 2013; 27:141-152.
5. Altintas Y., Verl A., Brecheret C. Machine tool feed drives. CIRP Annals -Manufacturing Technology. 2011; 62: 779 -796.
6. GOST 8032-84 "Predpochtitel'nye chisla i ryady predpochtitel'nykh chisel". [GOST 8032-84 "Preferred numbers and series of preferred numbers" (in Russ.)].
7. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Trends in research on metal-cutting machines. Russian Engineering Research. 2016; 36:488-495.
8. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Precision and efficiency of metal-cutting machines. Russian Engineering Research. 2016; 36:762-773.
9. Rudikov D.A. Otsenochnye matematicheskie modeli dlya opredeleniya tochnosti privoda metallozhushchikh stankov. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya. 2011; 41:25-30. [Rudikov D.A. Evaluation mathematical models for determining the drive precision of metal cutting machines. Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. 2011; 41:25-30. (in Russ.)]
10. Rudikov D.A. Sovershenstvovanie kinemacheskikh raschetov korobok peredach metallozhushchikh stankov. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010; 45: 224-228. [Rudikov D.A. Improvement of kinematic calculations of gearboxes of metal-cutting machine tools. Vestnik of DSTU. 2010; 45:224-228. (in Russ.)]
11. Zavernyaev B.G., Rudikov D.A. Ispol'zovanie srednikh velichin pogreshnosti v kinemacheskoy raschete korobok peredach. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii "Aktual'nye problemy konstruktorsko-tekhnologicheskogo obespecheniya mashinostroitel'nogo proizvodstva". Volgograd; 2003. [Zavernyaev B.G., Rudikov D.A. Using average error values in the kinemat-

- ic calculation of gearboxes. Proceedings of the International conference “Relevant problems of design and technological support of machine-building production”. Volgograd; 2003. (in Russ.)]
12. Zavernyaev B.G., Kuris E.V., Rudikov D.A. Elementy pogreshnosti postoyannoi chasti mnozhitel'noi struktury. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov “Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya”. Rostov-on-Don; 2003. [Zavernyaev B.G., Kuris E.V., Rudikov D.A. Elements of error in the constant part of the multiplying structure. Interuniversity collection of scientific works “Design of technological equipment”. Rostov-on-Don; 2003. (in Russ.)]
 13. Rudikov D.A., Tishina A.V. Matematicheskaya model' dlya analiza skol'zheniya v elektrodvigatele i remennoi peredache. Trudy Mezhdunarodnoy naucno-practicheskoy konferentsii “Transport 2015”. Rostov-on-Don; 2015. [Rudikov D.A., Tishina A.V. Mathematical model for the analysis of sliding in the electric motor and belt transmission. Proceedings of the International scientific-practical conference “Transport 2015”. Rostov-on-Don; 2015. (in Russ.)]
 14. Rudikov D.A., Tishina A.V. Analiz sostavlyayushchikh obshchei pogreshnosti mnozhitel'noi struktury metallovezhushchego stanka. Sbornik statey Mezhdunarodnoy naucno-practicheskoy konferentsii v ramkakh IX Promyshlennogo kongressa Yuga Rossii “Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii i metallurgii”. Rostov-on-Don; 2013. [Rudikov D.A., Tishina A.V. Analysis of the general error components of the multiplying structure of the machine tool. Proceedings of the International scientific-practical conference within the IX Industrial Congress of the South of Russia “Innovative technologies in machine-building and metallurgy”. Rostov-on-Don; 2013. (in Russ.)]
 15. Zavernyaev B.G., Kuris E.V., Rudikov D.A. Ispol'zovanie balansa sostavlyayushchikh pogreshnosti dlya vyyavleniya roli postoyannykh zven'ev. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov “Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya”. Rostov-on-Don; 2002. [Zavernyaev B.G., Kuris E.V., Rudikov D.A. Using the balance of error components to identify the role of constant links. Interuniversity collection of scientific works “Design of technological equipment” Rostov-on-Don; 2002. (in Russ.)]

Сведения об авторах.

Кленова Ирина Анатольевна - кандидат биологических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

Рудиков Дмитрий Алексеевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

Холодова Светлана Николаевна - кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды».

Information about the authors.

Irina A. Klenova – Cand. Sc.(Biological), Department Life Safety, Assoc.Prof.

Dmitry A. Rudikov – Cand. Sc.(Technical), Department Life Safety, Assoc.Prof.

Svetlana N. Kholodova – Cand. Sc.(Technical), Department Life safety and environmental protection, Assoc.Prof.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 29.12.2016.

Received 29.12.2016.

Принята в печать 12.01.2017.

Accepted for publication 12.01.2017.