

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА
ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ**

А. А. Игнатьев, А. В. Гаврилова, С. А. Игнатьев

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES
OF DYNAMIC QUALITY OF GRINDING MACHINES
FOR BEARING RINGS RACES PROCESSING**

A. A. Ignatyev, A. V. Gavrilova, S. A. Ignatyev

Аннотация. *Актуальность и цели.* Динамическое качество станков является важным фактором, влияющим на точность обработки высокоточных деталей. В условиях эксплуатации его оценка осуществляется на основе измерения виброакустических (ВА) колебаний основных формообразующих узлов. Последующая обработка ВА колебаний обеспечивает получение спектральных, корреляционных и других функций, на основе которых формируется оценка динамического качества станка. С точки зрения оценки динамического состояния станка при резании возможно измерение спектра колебаний в процессе обработки путем статистического анализа, однако в этом случае трудно дать физическое обоснование изменениям в динамике станка. В этом смысле более целесообразным представляется определение запаса устойчивости динамической системы (ДС). Запас устойчивости ДС изменяется при варьировании значениями параметров режима резания, например подачей шлифовального круга, или снижении его режущих свойств при износе. *Материалы и методы.* Рассматривается возможность определения рационального режима шлифования поверхностей качения колец подшипников на основе измерения виброакустических колебаний динамической системы. Представлена структурная схема ДС шлифовального станка при врезном шлифовании колец подшипников. Определяется запас устойчивости динамической системы станков по показателю колебательности или по критерию Михайлова. *Результаты.* На основе обработки результатов ВА колебаний установлена связь между запасом устойчивости (по показателю колебательности) и износом круга. Используется критерий Гурвица для оценки устойчивости ДС пятого порядка и выявления изменения запаса устойчивости по мере износа круга. *Выводы.* Построена передаточная функция ДС шлифовального станка для обработки колец подшипников, на основе анализа которой показано, что запас устойчивости ДС может служить численной оценкой динамического качества станка. Экспериментально установлена связь запаса устойчивости с износом круга при обработке колец подшипников. Проведено сравнение станков по динамическому качеству.

Ключевые слова: шлифовальный станок, динамическая система, виброакустические колебания, передаточная функция, критерий Гурвица, автокорреляционная функция, подача круга, износ круга, запас устойчивости.

Abstract. *Background.* The dynamic quality of the machines is an important factor in the precision machining of precision parts. Under service conditions of his assessment is based on the measurement of vibro-acoustic (VA) fluctuations of the basic formative com-

ponents. Post-treatment VA oscillation provides spectral, correlation and other functions on the basis of which is formed by a dynamic evaluation of the machine quality. From the standpoint of evaluating the dynamic quality of the machine when cutting is possible to measure the oscillation spectrum and changes in the processing by the statistical analysis, however, in this case, it is difficult to study physical changes in the machine dynamics. In this sense, seems more appropriate definition of the safety factor of the dynamic system (DS). Stability margin DS varies with the value of cutting mode settings, such as feeding the grinding wheel or the reduction of its cutting properties when wear. *Materials and methods.* The possibility of determining the rational mode of grinding surfaces of rolling bearing rings based on the measurement of vibro-acoustic vibrations of a dynamic system. The structural scheme of DC grinding machine when plunge grinding bearing rings. Determined a stability margin of the dynamic system of machines in index of oscillation or Mikhailov criterion. *Results.* Based on the results of processing VA fluctuations established between the margin of stability (in terms of oscillation) and wheel wear. Hurwitz criterion is used to assess the sustainability of the DS (fifth-order) and the identification of changes the stability margin as wheel wear. *Conclusions.* Constructed transfer function DC of a grinding machine for processing bearing rings, on the basis of the analysis which shows that the stock DS sustainability can serve as a dynamic assessment of the quality of the machine. Experimentally established communication stock sustainability and wear circle when handling bearing rings. A comparison of the dynamic quality of grinding machines.

Key words: grinding machines, dynamic system, vibro-acoustic oscillations, transfer function, Hurwitz criterion, autocorrelation function, supply range, wear circle, stability margin.

Введение

Повышение требований к качеству обработки деталей в машино- и приборостроении, применение новых обрабатываемых и инструментальных материалов обусловило необходимость снижения значений макро- и микро-геометрических параметров точности и стабильности физико-механических характеристик поверхностного слоя деталей, что определило целесообразность учета динамических процессов в автоматизированных станках [1, 2].

Динамическое качество станка является его важной характеристикой с точки зрения обеспечения качества шлифовальной обработки деталей подшипников. На круглошлифовальных станках для обработки колец без резания эффективно измерять виброскорость на частоте вращения круга и заготовки, что позволяет выявить дисбаланс шпинделей. Для оценки влияния виброакустических (ВА) колебаний на геометрические параметры точности деталей целесообразно измерять виброперемещение. Более целесообразно для оценки динамического качества использовать запас устойчивости динамической системы (ДС) [3, 4]. Экспериментальное подтверждение указанного положения для автоматизированных станков отражено в работах, выполненных в Саратовском государственном техническом университете имени Ю. А. Гагарина [2, 5, 6].

Основная часть

Динамические процессы играют важную роль в автоматизированных шлифовальных станках для обработки колец подшипников [2]. Для теорети-

ческого обоснования применимости на практике понятия «запас устойчивости ДС» целесообразно построить модель ДС.

Математическая модель динамической системы при врезном шлифовании отражает взаимосвязь регулирующих воздействий и сил резания, параметров упругой системы станка и износа абразивного круга, влияющих на динамические характеристики процесса шлифования и, соответственно, на качество обработки деталей. Подобные модели в виде передаточных функций рассматривались в работах В. А. Кудинова [3], В. Н. Михелькевича [7] и других авторов.

В работе [8] для упрощенной модели теоретически показано, что ДС по мере износа круга переходит из устойчивого состояния в неустойчивое, следовательно, запас устойчивости может служить критерием выбора режима шлифования с наибольшей эффективностью. При этом предполагается, что в течение времени обработки одной детали (1...3 мин) параметры ДС не изменяют своих значений, т.е. система линеаризована, хотя в целом ДС станка является нелинейной [3]. В этом случае для каждого обработанного кольца будет существовать передаточная функция ДС, но от кольца к кольцу значения ее коэффициентов будут изменяться, и, следовательно, будет изменяться запас устойчивости ДС.

Рассмотрим структурную схему ДС шлифовального станка при врезном шлифовании колец подшипников или малогабаритных валов (рис. 1), учитывающую износ круга. За основу взята схема из работы [7], но в нее внесены изменения: упругая система рассматривается в виде двух параллельно соединенных колебательных звеньев, соответствующих шпиндельным узлам (ШУ) круга и детали, а вместо коэффициента резания из схемы В. Н. Михелькевича введена передаточная функция, учитывающая изменение режущих свойств круга [8, 9].

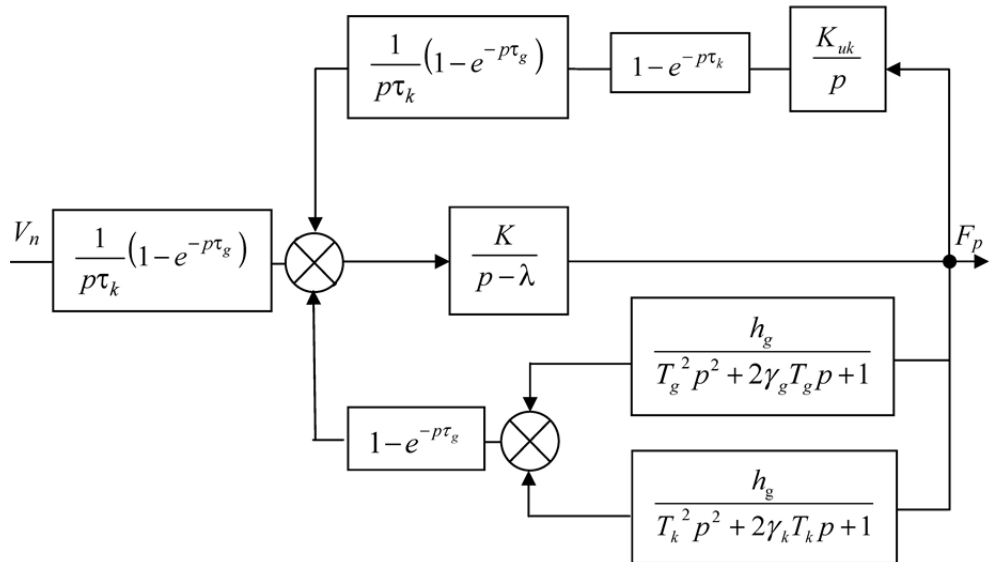


Рис. 1. Структурная схема динамической системы станка при врезном шлифовании с учетом износа круга и изменения его режущей способности

В этом случае передаточная функция ДС, равная отношению изображений по Лапласу силы резания и подачи круга, имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{(p-\lambda)} (1 - e^{-p\tau_g}) \left(1 + \frac{K(1 - e^{-p\tau_g})}{(p-\lambda)p} \left[\left(\frac{h_g}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_g T_g + 1} + \frac{h_k}{T_k^2 p^2 + 2\gamma_k T_k p + 1} \right) p + \frac{K_{uk}(1 - e^{-p\tau_k})}{p\tau_k} \right] \right)^{-1}. \quad (1)$$

На рис. 1 и в формуле (1) введены следующие обозначения: V_n – подача круга; τ_g, τ_k – время оборота детали и круга соответственно; K_{uk} – коэффициент износа круга; K – коэффициент резания; λ – коэффициент изменения режущей способности круга; T_k, T_g – постоянные времени круга и детали; γ_k, γ_g – коэффициенты демпфирования ШУ круга и ШУ детали, F_p – сила резания, h_k, h_g – податливость ШУ круга и ШУ детали.

После алгебраических преобразований (с учетом разложения экспонент в ряд ($e^{-p\tau_g} = 1 - p\tau_g, e^{-p\tau_k} = 1 - p\tau_k$)) имеем:

– числитель $B(p)$ в формуле (1) равен

$$B(p) = K\tau_g (T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1) (T_k^2 p^2 + 2\gamma_k T_k p + 1); \quad (2)$$

– знаменатель $A(p)$ в формуле (1) равен

$$A(p) = (p + K\tau_g K_{ku} - \lambda) (T_k^2 T_g^2 p^4 + 2\gamma_g T_k T_g^2 p^3 + T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g T_k^2 p^3 + 4\gamma_g T_k T_g p^2 + T_k^2 p + 2\gamma_k T_k p + 1) + (K\tau_g h_g T_k^2 p^3 + 2K\tau_g h_g T_g p^2 + 2K\tau_g h_g p^2 + K\tau_g h_k T_g^2 p^3 + 2K\tau_g h_k T_g p^2 + 2K\tau_g h_k p). \quad (3)$$

Для оценки устойчивости ДС и выявления изменения запаса устойчивости по мере износа круга необходимо применить критерий Гурвица [10] к характеристическому уравнению системы

$$A(p) = 0. \quad (4)$$

Выполнив алгебраические преобразования в формуле (3), получим выражение (4) в виде уравнения пятого порядка:

$$a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (5)$$

где

$$a_0 = K\tau_g K_{uk} - \lambda;$$

$$a_1 = 1 + (K\tau_g K_{uk} - \lambda) (2\gamma_g T_g + 2\gamma_k T_k + K\tau_g h_g + K\tau_g h_k);$$

$$\begin{aligned}
a_2 &= (2\gamma_g T_g + 2\gamma_k T_k + K\tau_g K_{uk} h_g + K\tau_s h_h) + \\
&+ (K\tau_g K_{uk} - \lambda)(T_g^2 + T_k^2 + 4\gamma_g \gamma_k T_g T_k + 2K\tau_g h_g \gamma_k T_k + 2K\tau_g h_g \gamma_g T_g); \\
a_3 &= (T_g^2 + T_k^2 + 4\gamma_g \gamma_k T_g T_k + 2K\tau_g h_g h_k T_k + 2K\tau_s h_g \gamma_g T_g) \times \\
&\times (K\tau_g K_{uk} - \lambda)(2\gamma_k T_k T_g^2 + 2\gamma_g T_s T_k^2 + K\tau_g h_g T_k^2 + K\tau_g h_k T_g^2); \\
a_4 &= (2\gamma_k T_k T_g^2 + 2\gamma_g T_g T_k^2 + K\tau_g h_g T_k^2 + K\tau_s h_k T_s^2)(K\tau_s K_{uk} - \lambda)T_k^2 T_g^2, \quad a_5 = T_k^2 T_g^2.
\end{aligned}$$

Необходимые и достаточные условия устойчивости для системы с характеристическим уравнением пятого порядка по критерию Гурвица следующие [6]:

1) коэффициенты уравнения (2) все больше нуля:

$$a_i > 0, i = \overline{0, 5};$$

2) определитель второго порядка больше нуля:

$$\Delta_2 = a_4 a_3 - a_5 a_2 > 0;$$

3) определитель четвертого порядка больше нуля:

$$\Delta_4 = (a_4 a_3 - a_5 a_2)(a_2 a_{13} - a_3 a_0) - (a_4 a_{13} - a_5 a_{02})^2 > 0.$$

Воспользовавшись значениями коэффициентов, входящих в коэффициенты характеристического уравнения a_i , которые приведены в работах [3, 7], можно показать, что все три условия устойчивости ДС выполняются в начальный момент времени. По мере износа абразивного круга при шлифовании, когда снимаемые припуски незначительны (не более 100 мкм), коэффициент $K_{ик}$ согласно исследованиям Г. Б. Лурье [11] достаточно длительное время сохраняет свое значение, а затем быстро падает практически до нуля. В этом случае коэффициент a_0 изменяет свой знак на отрицательный, т.е. ДС переходит в неустойчивое состояние. Указанное сопровождается снижением запаса устойчивости ДС, который оценивается на основе измерения ВА колебаний при шлифовании [2].

Следовательно, аналитически доказано, что запас устойчивости ДС шлифовального станка служит критерием оценки его динамического состояния.

На практике запас устойчивости вычисляется из передаточной функции замкнутой ДС станка $W_3(p)$, которая определяется в результате специальной математической обработки виброакустических колебаний при резании, на основе которой устанавливается аналитический вид автокорреляционной функции (АКФ) $K(\tau)$. Далее используется известное выражение, полученное В. А. Складчиковым [12]:

$$K(p) + K(-p) = W_3(p)W_3(-p), \quad (6)$$

где $K(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K(\tau)$ при условии, что на вход упругой системы подается сигнал типа «белый шум», в качестве которого рассматривается стохастическая компонента силы резания [2, 5].

Оценку запаса устойчивости замкнутой ДС шлифовального станка для обработки колец подшипников можно выполнить на основе применения критерия устойчивости Михайлова [13] путем вычисления минимального расстояния от кривой Михайлова до начала координат на комплексной плоскости ($ReM(j\omega)$, $ImM(j\omega)$), где $M(j\omega)$ – характеристический многочлен передаточной функции $W_3(j\omega)$; $ReM(j\omega)$, $ImM(j\omega)$ – действительная и мнимая части $M(j\omega)$. Так, например, полученный из идентифицированной по экспериментальным данным передаточной функции для внутришлифовального станка SIW-4 многочлен Михайлова имеет вид [2]:

$$M(j\omega) = \left[(j\omega + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2 \right] \left[(j\omega + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2 \right], \quad (7)$$

где ω_0 – основная (несущая) частота колебаний АКФ, представляющей собой затухающую косинусоиду; α – коэффициент затухания реальной АКФ; Ω – частота огибающей АКФ. Результаты экспериментов на станке SIW-4 показали [2], что с увеличением подачи круга от 0,2 до 0,6 мм/мин запас устойчивости ДС резко уменьшается при подаче 0,6 мм/мин, что сопровождается ростом уровня ВА колебаний, снижением качества шлифовальной поверхности ниже допустимого значения. По запасу устойчивости ДС была рекомендована подача 0,5 мм/мин, которая превышает на 25 % значение подачи, применяемой в производстве.

Для оценки изменения запаса устойчивости ДС по мере износа круга проведен эксперимент на круглошлифовальном станке SWaAGL-50, заключающийся в последовательной обработке колец подшипников с увеличенным интервалом времени между правками круга. В производственных условиях правка предусмотрена через 5 колец. В эксперименте обработка осуществляется до того момента, когда состояние поверхностного слоя дорожки качения колец существенно ухудшилось. В качестве показателя качества шлифования использовалась неоднородность структуры поверхностного слоя. Оценка осуществлялась вихрековым методом с помощью автоматизированного прибора ПВК-К2М в баллах (5 баллов – отличное состояние, 2 балла – брак) [2]. Запас устойчивости оценивался в условных единицах по критерию Михайлова.

Вычисление запаса устойчивости при обработке колец показало (рис. 2), что уровень ВА колебаний и запас устойчивости почти не изменялись с 1-го по 10-е кольцо, а начиная с 12-го кольца повысился уровень ВА колебаний и резко понизился запас устойчивости, что коррелирует с показателем качества шлифования.

Из изложенного следует, что правку круга можно осуществлять не через 5 колец, как принято по технологическому циклу, а через 10 колец, что повышает производительность при сохранении качества поверхностного слоя и экономит алмазный правящий инструмент.

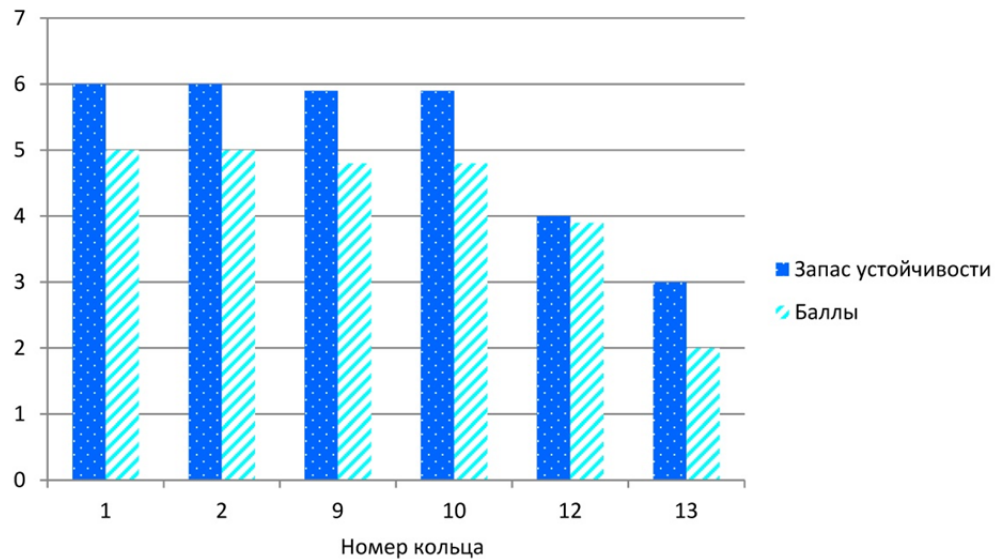


Рис. 2. Зависимость запаса устойчивости и качества поверхности от режима правки

С практической точки зрения более удобным для автоматизации оценки запаса устойчивости ДС является вычисление показателя колебательности. Заменой $P = j\omega$ можно получить из $W_3(p)$ частотную функцию $W_3(j\omega)$, после чего из нее определяется амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ (АЧХ), на базе которой по показателю колебательности $M_{\max}$ оценивается запас устойчивости замкнутой ДС [13]:

$$M_{\max} = \frac{[A(\omega)]_{\max}}{A(0)}, \quad (8)$$

где $A(\omega)_{\max}$ – максимальное значение АЧХ; $A(0)$ – значение АЧХ при $\omega = 0$.

При меньшем значении показателя колебательности ДС имеет больший запас устойчивости (для детерминированных систем значение показателя колебательности, соответствующее наибольшему запасу устойчивости, должно быть в пределах $1,1 \dots 1,5$).

Для установления связи точности обработки на круглошлифовальных станках SWaAGL-50 с запасом устойчивости динамической системы выполнены измерения волнистости дорожек качения колец подшипников и ВА колебаний при обработке. На станках шлифовались дорожки качения колец из стали ШХ-15 примерно одного типоразмера, кругом из одного и того же материала и с одинаковыми значениями параметров технологического режима. Сравнительный анализ показал (рис. 3), что имеется взаимосвязь точности обработки с запасом устойчивости ДС, а станок № 230, обладающий наибольшим запасом устойчивости (показатель колебательности M имеет наименьшее значение), обеспечивает более высокую геометрическую точность поверхности качения колец.

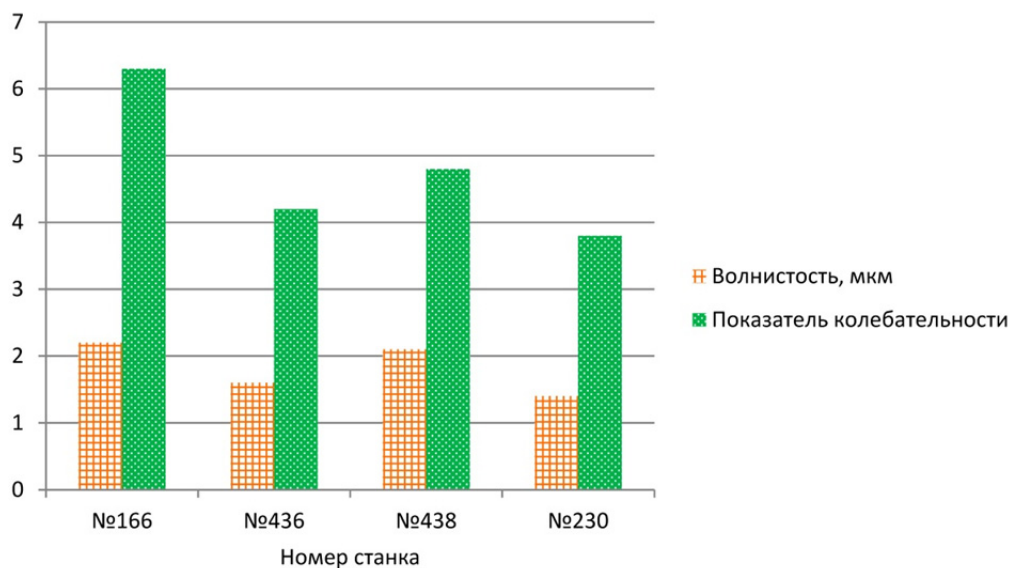


Рис. 3. Значения волнистости (B) дорожек качения колец подшипников и показатель колебательности (M) станков SWaAGL-50

Заключение

Теоретически и экспериментально подтверждено, что запас устойчивости ДС шлифовального станка может служить оценкой его динамического качества, что согласуется с положениями, рассмотренными ранее В. А. Кудиновым [3]. При условии сопоставления качества шлифованной поверхности с запасом устойчивости ДС в производственных условиях назначается момент правки круга или целесообразный режим обработки с точки зрения наибольшей эффективности. Экспериментально установлено, что период между правками круга при шлифовании колец подшипников может быть увеличен в 2 раза. Кроме того, однотипные станки можно сравнить по запасу устойчивости и определить станок с наиболее высоким динамическим качеством и, соответственно, с более высоким качеством шлифования.

Библиографический список

1. Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 124 с.
2. Игнатьев, А. А. Стохастические методы идентификации в динамике станков / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатьев. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2013. – 124 с.
3. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.
4. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин : справочник / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.

5. Игнатьев, А. А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов / А. А. Игнатьев, В. В. Коновалов, С. А. Игнатьев. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2014. – 92 с.
6. Самойлова, Е. М. Моделирование динамической системы автоматизированного токарного модуля при разработке экспертной системы / Е. М. Самойлова, А. А. Игнатьев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 2 (18). – С. 268–277.
7. Михелькевич, В. Н. Автоматическое управление шлифованием / В. Н. Михелькевич. – М. : Машиностроение, 1975. – 304 с.
8. Игнатьев, А. А. Динамическая модель врезного шлифования с учетом износа шлифовального круга / А. А. Игнатьев, Д. В. Козлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 3 (58). С. 62–65.
9. Филимонов, Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л. Н. Филимонов. – М. : Машиностроение, 1973. – 136 с.
10. Егоров, К. В. Основы теории автоматического регулирования / К. В. Егоров. – М. : Энергия, 1967. – 648 с.
11. Лурье, Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – М. : Машиностроение, 1969. – 172 с.
12. Складчиков, В. А. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем / В. А. Складчиков. – М. : Наука, 1965. – 475 с.
13. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.

Игнатьев Александр Анатольевич
 доктор технических наук, профессор,
 кафедра автоматизации, управления,
 мехатроники,
 Саратовский государственный
 технический университет
 им. Ю. А. Гагарина
 E-mail: atp@sstu.ru

Ignatyev Alexander Anatolyevich
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of automation, control,
 mechatronics,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

Гаврилова Анна Владимировна
 ассистент,
 Саратовский государственный
 технический университет
 им. Ю. А. Гагарина
 E-mail: anchutca08@mail.ru

Gavrilova Anna Vladimirovna
 assistant,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

Игнатьев Станислав Александрович
 доктор технических наук, профессор,
 кафедра автоматизации, управления,
 мехатроники,
 Саратовский государственный
 технический университет
 им. Ю. А. Гагарина
 E-mail: ignatievsa@mail.ru

Ignatyev Stanislav Alexandrovich
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of automation, control,
 mechatronics,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

УДК 681.5

Игнатьев, А. А.

Теоретические и экспериментальные исследования динамического качества шлифовальных станков для обработки дорожек качения колец подшипников / А. А. Игнатьев, А. В. Гаврилова, С. А. Игнатьев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 124–133.