

Моделирование процессов в динамической системе шлифовального станка

В.В. Симонов, А.А. Игнатьев

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Аннотация: Произведено моделирование динамической системы шлифовального станка, учитывающей износ инструмента. Целью моделирования является совершенствование алгоритмического обеспечения микропроцессорного прибора активного контроля. Произведены исследования вибрационных характеристик опоры кольца станка SIW-5 на холостом ходу и во время обработки для определения уровня вибраций в момент касания шлифовальным кругом обрабатываемой детали. Разработан и смоделирован алгоритм поддержания скорости резанья при уменьшении диаметра круга вследствие износа.

Ключевые слова: шлифование, кольца подшипников, активный контроль, математическая модель шлифования, алгоритмическое обеспечение.

Введение

Обеспечение конкурентоспособности подшипников как на внутреннем, так и на международном рынке, во многом связано с внедрением системы управления качеством продукции (УКП). Решение этой проблемы базируется на применении научных, в том числе системных, подходов к управлению качеством [1, 2], а также в системе подготовки персонала. При этом, в подшипниковом производстве важная роль в обеспечении качества отводится системе мониторинга технологического процесса (СМТП). Для построения эффективной СМТП разработаны методические основы, позволяющие на основе системных представлений рекомендовать её целесообразную организацию и принципы функционирования, а также разработать научное обоснование и комплекс технических решений [3].

Для эффективной реализации СМТП необходимы большой объем достоверной измерительной информации и использование современных информационных технологий для ее обработки и представления в удобной для анализа и принятия решения форме [4,5]. Источниками информации о состоянии технологического процесса (ТП) служат встроенные и внешние

средства контроля станков, режимов обработки и деталей, которые позволяют осуществлять измерение определяющих параметров в ручном, автоматизированном или автоматическом режиме [6,7].

Эксплуатационная надежность подшипников и затраты на их изготовление в значительной степени определяются шлифовальной обработкой колец подшипников, в ходе которой в основном формируются точность размеров и качество поверхностного слоя дорожек качения [8]. Исследования Д.Г. Евсеева, А.В. Королева, Л.Н. Филимонова, Г.Б. Лурье, Л.В. Худобина, Ю.М. Кулакова и других авторов выявили влияние на качество обработанной поверхности различных параметров технологического процесса. Для дорожек качения колец основными параметрами качества являются геометрические (овальность, огранка, волнистость, шероховатость) и однородность физико-механических характеристик поверхностного слоя [3, 9]. Однако, в связи с интенсивной автоматизацией процессов обработки, базирующейся на внедрении высокопроизводительных автоматизированных металлорежущих станков (АМС) и новых инструментов, возникает задача обеспечения качества шлифования применением средств автоматического управления режимом обработки с контролем текущего припуска, а также применением средств послеоперационного контроля физико-механических свойств поверхностного слоя обработанных деталей. Для более эффективного управления обработкой колец подшипников на станках, помимо активного контроля размеров и обоснованного выбора технологического режима в рамках СМТП целесообразно использовать дополнительные информационные параметры.

Системный подход к организации системы мониторинга процесса шлифования колец подшипников [3], проблемно ориентированный на повышение их качества, предусматривает совершенствование средств активного контроля обработки на основе использования возможностей

микропроцессорной техники. В этом случае может быть существенно сокращен объем приемочного контроля вне станка.

В связи с изложенным целью работы является модернизация и развитие алгоритмов обработки детали, основанная на данных полученных при помощи теоретических методов.

Моделирование и экспериментальное определение информативных частот вибраций для выявления момента касания кругом заготовки

При шлифовальной обработке колец подшипников широко используется активный контроль [2, 10]. Все современные приборы активного контроля (ПАК) оснащаются микропроцессорными блоками, которые обеспечивают питание индуктивных преобразователей, расположенных в измерительной оснастке и осуществляющих контроль текущего размера колец, суммирование и преобразование их сигналов [11, 12]. Разработанный в ОАО «Саратовский подшипниковый завод» микропроцессорный ПАК помимо контроля текущего припуска производил вычисление скорости съема припуска, что позволяло снижать подачу шлифовального круга при повышении скорости съема выше допустимого значения, установленного экспериментально. Это позволяло значительно снизить вероятность возникновения дефектов в поверхностном слое, что выявлялось вихретоковым методом [13]. Для этого применялся автоматизированный прибор вихретокового контроля ПВК-К2М, включенный в Госреестр средств измерений под номером 26079-03 [3]. Результаты измерений с ПАК и вихретокового прибора поступают в СМТП.

Для управления шлифованием, помимо аппаратной части, важно алгоритмическое и программное обеспечение, значительно расширяющее возможности микропроцессорного ПАК. Ранее в работе [14] был рассмотрен ряд алгоритмов, направленных на совершенствование работы ПАК. Научный и практический интерес представляет обоснование частоты вибраций

динамической системы, измерение которой позволяет зафиксировать момент касания кругом заготовки и осуществлять управление съемом и скоростью съема припуска по специальному алгоритму.

Измерение вибраций осуществляется вибродатчиком, включенным в микропроцессорный ПАК. Уровень вибрации увеличивается при касании шлифовальным кругом обрабатываемой заготовки. Этот факт позволяет уменьшить время на обработку кольца, используя алгоритм быстрого подвода, подразумевающий увеличенную подачу инструмента по сравнению с рабочей до момента касания кругом заготовки. Для определения частоты рассматриваемого вибросигнала, прибегнем к построению математической модели динамической системы (ДС) станка. Рассмотрим структурную схему ДС (рис. 1), представленную в работе [3]. Ее основой послужила модель, предложенная В.Н. Михелькевичем [15]. Предлагаемая модель отличается модифицированной передаточной функцией процесса резания, учитывающей износ инструмента [16], а также передаточными функциями шпиндельных узлов (ШУ) инструмента и детали, представленных в виде колебательных звеньев.

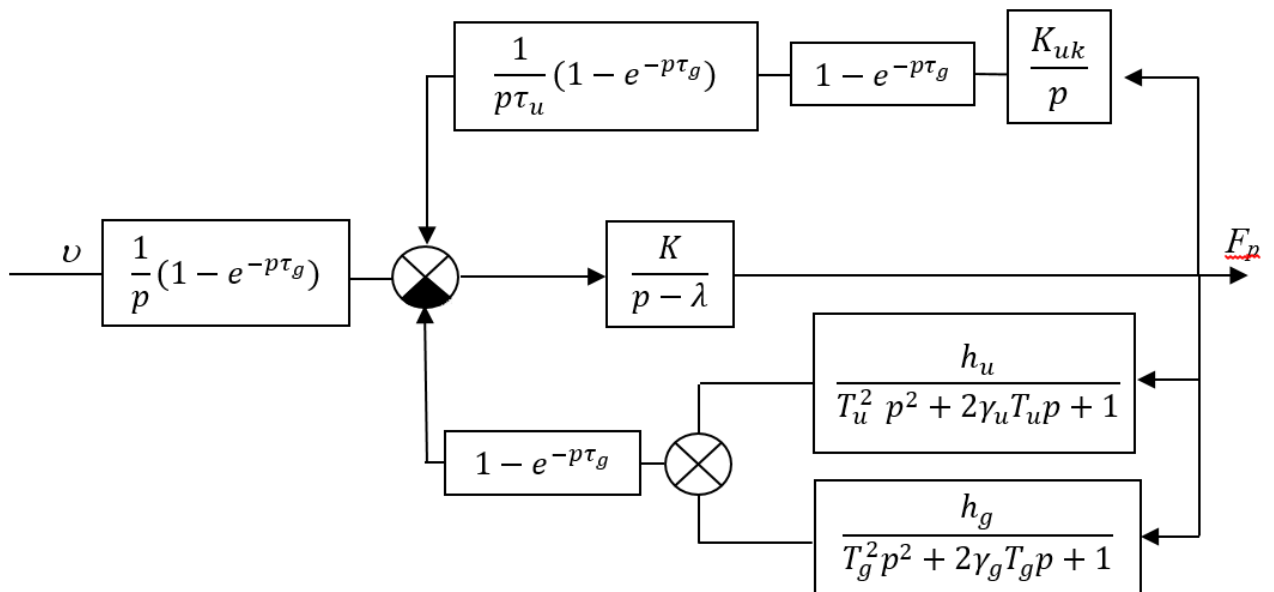


Рис. 1. – Структурная схема динамической системы станка

где: ν – заданная глубина резания, F_y – сила резания, K – коэффициент резания, τ_g – время одного оборота детали, λ – коэффициент, отражающий изменение режущих свойств круга, $h_u, h_g, T_u, T_g, \gamma_u, \gamma_g$ – коэффициенты, описывающие шпиндельные узлы инструмента и детали, K_{uk} – коэффициент износа круга

Рассмотрим упругую систему, состоящую из параллельно соединенных колебательных звеньев (1).

$$\begin{cases} W_u(p) = \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1}, \\ W_d(p) = \frac{h_g}{T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1}. \end{cases}, \quad (1)$$

Рассмотрим сигнал на выходе упругой системы при условии, что на ее вход подается стохастический сигнал типа «белый шум» – сила резания F_p [15]. Спектр сигнала, согласно теории автоматического управления, определяется выражением (2):

$$S_{yy}(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_{xx}(\omega), \quad (2)$$

где $|W(j\omega)|^2$ – квадрат модуля частотной функции системы; $S_{xx}(\omega)$ – спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала на входе системы.

Согласно теории автоматического управления СПМ сигнала «белый шум» может быть принят за 1, тогда имеем:

$$S_{yy}(\omega) = |W(j\omega)|^2, \quad (3)$$

Найдем квадрат модуля частотной передаточной функции упругой системы станка, зная, что его передаточная функция представляет собой алгебраическую сумму передаточных функций инструмента и детали (4).

$$W(p) = \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1} + \frac{h_g}{T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1}, \quad (4)$$

Произведем замену $p = j\omega$ в (4), тогда частотная функция запишется, как:

$$W(j\omega) = \frac{h_u}{1 - T_u^2 \omega^2 + 2j\omega\gamma_u T_u} + \frac{h_g}{1 - T_g^2 \omega^2 + 2j\omega\gamma_g T_g}, \quad (5)$$

Произведя ряд преобразований найдем квадрат частотной передаточной функции (6):

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{A_g^2}{M_g^2} + \frac{A_u^2}{M_u^2} + \frac{2A_gA_u}{M_gM_u} + \frac{B_g^2}{M_g^2} + \frac{B_u^2}{M_u^2} + \frac{2B_gB_u}{M_gM_u}, \quad (6)$$

В выражении (6) введены обозначения (7):

$$\begin{aligned} A_g &= h_g(1 - T_g^2\omega^2) \\ A_u &= h_u(1 - T_u^2\omega^2) \\ B_g &= -2h_g\gamma_g T_g\omega \\ B_u &= -2h_u\gamma_u T_u\omega \\ M_g &= (1 - T_g^2\omega^2)^2 + 4\gamma_g^2 T_g^2\omega^2 \\ M_u &= (1 - T_u^2\omega^2)^2 + 4\gamma_u^2 T_u^2\omega^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Моделирование при помощи программного комплекса Matlab спектра сигнала упругой системы по формуле(6) позволило определить его вид (рис.2), причем компоненты спектра соответствуют собственным частотам шпиндельных узлов станка. Моделирование показывает, что при касании кругом заготовки повышение амплитуды входного сигнала приводит к повышению уровня выходного сигнала на указанных частотах, что и позволяет зафиксировать момент касания.



Рис. 2. – Модель спектра сигнала упругой системы

Проведены исследования виброакустических колебаний станка модели SIW-5, проверяющие результаты, полученные с помощью теоретической

модели. Сигналы, полученные при помощи виброизмерителя ВШВ-003М3, датчик которого установлен на опоре заготовки, обработаны посредством программного комплекса на компьютере. Производилось снятие графиков вибрации на холостом ходу станка (рис. 3) и в процессе обработки (рис. 4).

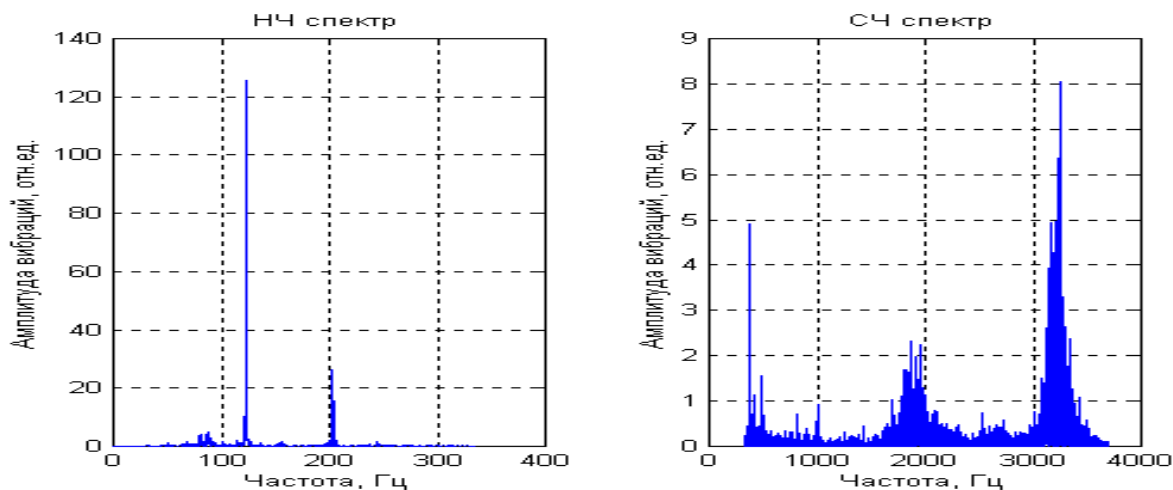


Рис. 3. – Спектр вибрации опоры кольца станка SIW-5 на холостом ходу

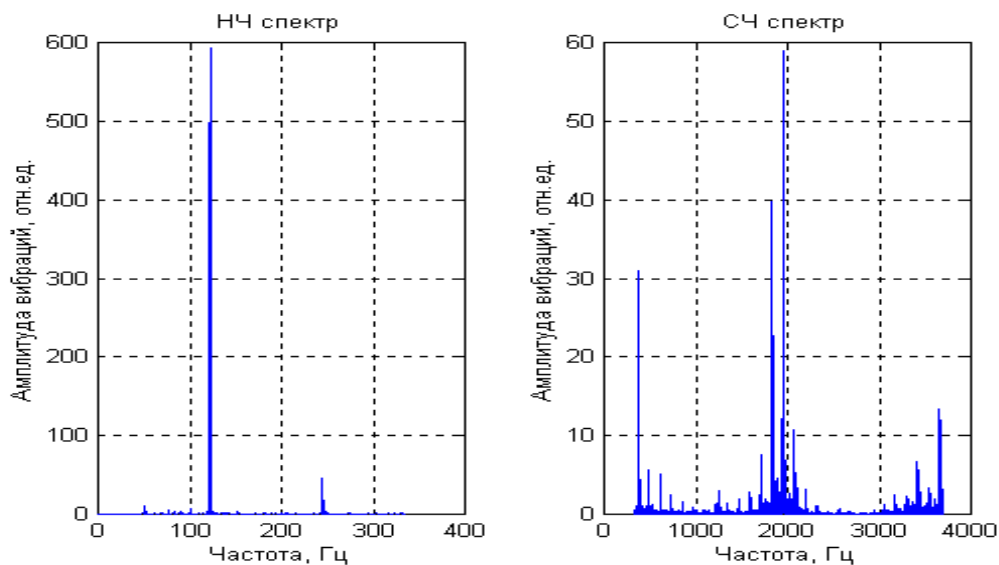


Рис. 4. – Спектр вибраций опоры кольца станка SIW-5 при шлифовании

Исходя из представленных спектров, можно заметить, что сигналы низкочастотного и среднечастотного спектра на частотах 120 Гц и 2000 Гц увеличиваются до 10 раз. Именно эти частоты следует использовать для определения момента касания шлифовальным кругом обрабатываемой

детали и управлять подачей круга по алгоритму, рассмотренному ранее в работе [14].

Алгоритм поддержания скорости резанья при уменьшении диаметра шлифовального круга

По мере износа кругов, работающих периферией с постоянной частотой вращения, их линейная скорость уменьшается, что, как правило, способствует увеличению износа и степени самозатачивания кругов, а также уменьшению производительности процесса и снижению качества шлифования. Кроме того, уменьшается масса круга, что сказывается на динамике процесса. [17] Рассмотрим возможность нивелирования данного негативного эффекта процесса обработки.

Поскольку при выполнении шлифования деталей, до начала обработки производится расчет оптимального режима резанья, в состав которого входят подборы материала инструмента, скорости его подачи, скорости вращения круга и заготовки, мощности резанья и прочее, необходимо поддерживать данные параметры согласно разработанного технологического процесса. Одним из таких параметров является линейная скорость круга, вычисляемая по (8).

$$v_{кр} = \frac{\pi \times D_{кр} \times \nu_{кр}}{60 \times 1000}, \quad (8)$$

где $v_{кр}$ – линейная скорость круга, $D_{кр}$ – диаметр шлифовального круга, $\nu_{кр}$ – частота вращения.

Можно заметить, что линейная скорость шлифовального круга напрямую зависит от его диаметра, соответственно линейная скорость будет снижаться при уменьшении диаметра круга. Для поддержания на заданном уровне линейной скорости необходимо изменять остальные параметры выражения (8), среди которых переменной может являться лишь частота вращения круга.

Рассмотрим уравнения (9) для определения пропорции изменения частоты вращения круга, приравняв линейные скорости до и после изменения диаметра друг к другу.

$$\begin{aligned}v_{кр1} &= v_{кр2} \\ \frac{\pi \times D_{кр1} \times v_{кр1}}{60 \times 1000} &= \frac{\pi \times D_{кр2} \times v_{кр2}}{60 \times 1000} \\ \frac{\pi \times D_{кр1} \times v_{кр1} \times 60 \times 1000}{\pi \times D_{кр2} \times 60 \times 1000} &= v_{кр2} \\ v_{кр2} &= \frac{D_{кр1} \times v_{кр1}}{D_{кр2}}\end{aligned}\tag{9}$$

где $v_{кр1}, v_{кр2}$ – линейные скорости до и после уменьшения диаметра круга в следствии износа.

Исходя из формул (9) можно сказать, что при уменьшении диаметра круга для поддержания линейной скорости круга необходимо увеличивать частоту вращения круга прямо пропорционально произведению диаметра не изношенного круга на его частоту вращения и обратно пропорционально текущему диаметру круга.

Данное выражение позволяет создать алгоритм поддержания линейной скорости круга. В связи с невозможностью использования метода прямых измерений, для определения диаметра шлифовального круга необходимо воспользоваться методом косвенных измерений, рассмотрев ряд формул.

В работе [14] указано, что основными устройствами, снимающими показания, являются датчики текущего припуска и датчик вибрации. На основании сведений, получаемых с данных устройств, необходимо определить текущий размер шлифовального круга.

Исходя из получаемых сведений можно узнать диаметр заготовки равный сумме диаметра готового изделия D_0 и припуска на детали z до начала обработки.

$$D_{заг} = D_0 + z ,\tag{10}$$

Рассмотрев схему процесса обработки шлифованием (рис. 5), можно сказать, что расстояние между центрами шлифовального круга и заготовки позволяет определить диаметр инструмента.

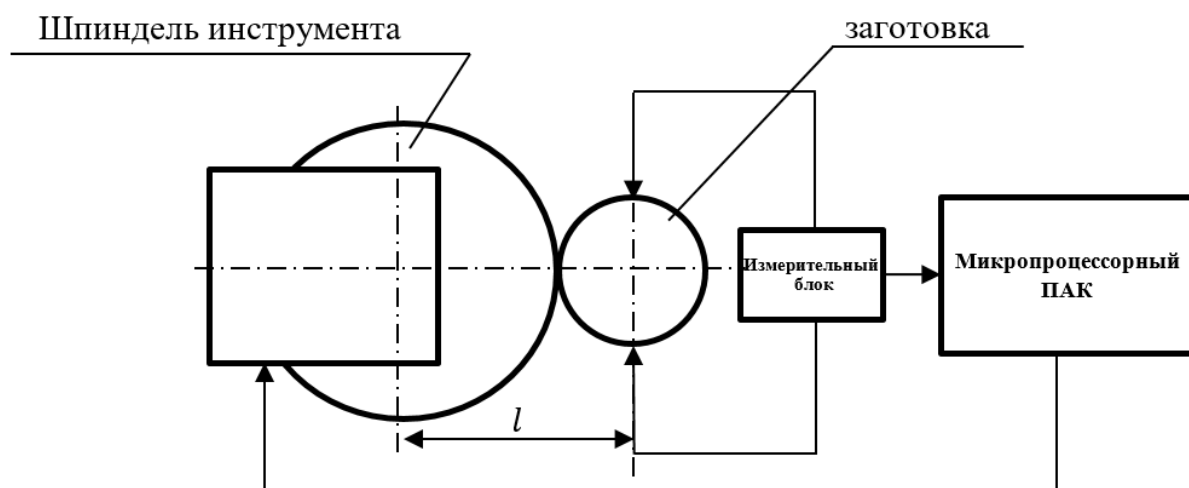


Рис. 5. – Общий вид схемы процесса обработки шлифованием.

Исходя из расстояния между центрами шпинделей детали и инструмента в начальный момент времени, на основании алгоритма быстрого подвода, рассмотренного ранее, можно вычислить диаметр шлифовального круга согласно формуле (11).

$$D_{кр} = 2(l - \frac{D_{заг}}{2} - \sum_n S(t)dt), \quad (11)$$

Где l – расстояние между центрами шлифовального круга и заготовки в начальный момент времени, равное максимальному паспортному отводу инструмента,

$\sum_n S(t)dt$ – формула характеризующая расстояние, проходимое приводом до момента касания инструментом заготовки, при постоянной скорости подачи численно равно произведению $\frac{S \times t}{60 \times 1000}$.

По окончании алгоритма быстрого подвода, в момент касания инструментом заготовки расстояние между центрами шпиндельных узлов будет минимальным и позволит определить диаметр шлифовального круга.



Эти данные будут использованы для поддержания скорости резанья в заданных технологическим процессом пределах.

На основании представленных выше сведений возможно создать алгоритм поддержания линейной скорости шлифовального круга (рис. 6).

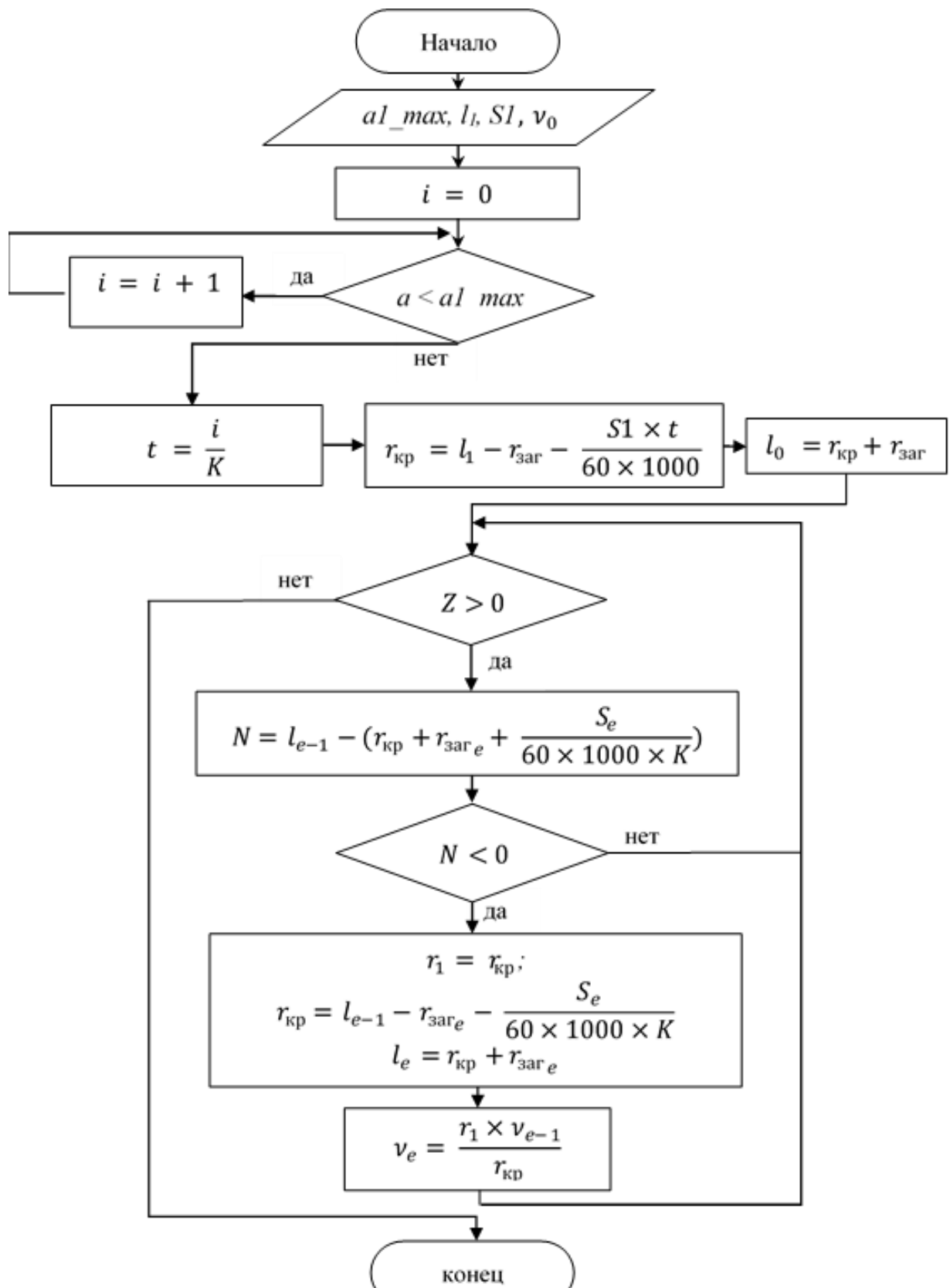


Рис. 6. – Алгоритм работы подпрограммы минимизации влияния износа инструмента.

В алгоритме приняты следующие обозначения, таблица 1.

Таблица № 1

Применяемые обозначения на рис. 6

| Обозначение | Наименование |
|-------------------|---|
| a | уровень вибрации, снимаемый с датчика |
| ν_0 | частота вращения шпинделя инструмента заданная в начальный момент времени |
| S | скорость подачи инструмента |
| Z | уровень текущего припуска заготовки |
| aI_{max} | безопасный максимальный уровень вибраций для детали без обработки |
| SI | скорость подачи инструмента при быстром подводе |
| l_1, l_0, l_e | расстояние между центром заготовки и инструмента максимально удаленно возможное для станка, в момент начала обработки, и на e -ом шаге итерации |
| $r_{кр}, r_{заг}$ | радиус шлифовального круга и заготовки |
| S_e | подача на e -ом шаге итерации, во время обработки |
| t | время выполнения цикла быстрой подачи |
| K | Коэффициент численно равны количеству итераций, выполняемых управляющим устройством в единицу времени |

До начала работы в программу поступает информация о максимальном уровне вибрации при быстром подводе, а также скорость его подачи и частоту вращения, расстояние между центрами шлифовального круга и заготовки. Для определения времени, затрачиваемого на выполнение быстрого подвода инструмента к детали, производится подсчет количества итераций до возрастания уровня вибраций до значения, соответствующего касанию инструментом заготовки. Количество итераций, разделенное на количество итераций выполняемое контроллером за единицу времени, позволяет определить время быстрого подвода и на основе ранее приведенных формул рассчитать радиус шлифовального круга.

До тех пор, пока припуск на заготовке не станет равен нулю, производится сравнение расстояний между центрами шпиндельных узлов круга и заготовки, в случае, если расстояния на разных шагах итерации не

равны, производится перерасчет диаметра круга и изменение частоты его вращения.

Рассматриваемый алгоритм позволяет изменять частоту вращения шлифовального круга, что положительно сказывается на производительности процесса обработки. Итогом работы представленного алгоритма является уменьшение паразитных эффектов, вызванных уменьшением диаметра шлифовального круга.

Практическая проверка алгоритмов

Проведены экспериментальные исследования отклонений геометрических параметров точности колец подшипников на внутришлифовальных станках SIW-4, оснащенных микропроцессорным ПАК. Выполнялось шлифование дорожки качения наружных колец шарикового радиально-двухрядного подшипника 256907. Внедрение микропроцессорного прибора, реализующего разработанные алгоритмы, позволило осуществить в производственных условиях управления точностью шлифовальной обработки колец подшипников, что способствовало снижению дисперсии геометрических параметров точности на 60...70%. Дисперсия волнистости колец при шлифовании при использовании аналогового ПАК типа «ЭКОМ» и микропроцессорного ПАК приведена на рис. 7. Снижение дисперсии свидетельствует о существенном повышении точности обработки.

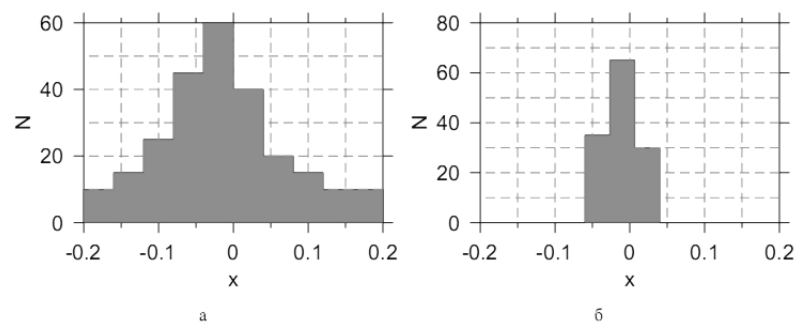


Рис. 7. – Дисперсия волнистости колец при шлифовании при использовании:
а – прибора активного контроля «ЭКОМ»; б – микропроцессорного ПАК

Интегрирование микропроцессорных ПАК в СМТП способствует не только повышению качества обработки колец подшипников, но и получению и накоплению объективной информации о состоянии процесса шлифования на каждом станке индивидуально, что необходимо для принятия решения о корректировке процесса обработки в случае его разладки.

Заключение

Выполненные исследования позволяют сформулировать ряд выводов.

Одним из вариантов усовершенствования алгоритмов управления шлифованием колец подшипников является изменение подачи круга в зависимости от скорости съема припуска при наличии ограничений на скорость съема и уровень вибраций, которые контролируются в процессе обработки микропроцессорным прибором активного контроля, что стабилизирует показатели качества поверхности. Представленные выше результаты позволяют определить момент касания кругом заготовки, что дает возможность определить реальную величину припуска на данной заготовке и учитывать его при переключении подачи круга.

Представленный алгоритм управления частотой вращения круга, учитывающий изменение его диаметра в процессе шлифования, позволяет поддерживать скорость резания на расчетном уровне, что способствует поддержанию заданного качества поверхности качения колец подшипников.

Литература

1. Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И., Зорин Ю.В. Всеобщее управление качеством М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
2. Волосов С.С., Гейлер З.Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. М.: Изд-во стандартов, 1989. 264 с.

3. Игнатъев А.А., Горбунов В.В., Игнатъев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов, СГТУ, 2023. 240 с.
 4. Пуш А.В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.
 5. Тугенгольд А.К., Димитров В.П., Волошин Р.Н., Борисова Л.В. Мониторинг состояния станков и станочных систем. СТИН. 2017. № 3. С. 11-17.
 6. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Игнатъев С.А., Казинский А.А., Насад Т.Г., Насад И.П. Automated measurements in process monitoring system in bearing production. Journal of Physics: Conference Series. 1515(2020) 052057 (ICMIT-2020 – Metrological Support of Innovative Technologies: International Scientific Conference. Saint Petersburg-Krasnoyarsk, 2020. March 4). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/5/052057/pdf
 7. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Захарченко М.Ю., Игнатъев С.А., Каракозова В.А., Березина Е.В. Автоматизированный неразрушающий контроль в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников. Инженерный вестник Дона, 2021, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193
 8. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А., Дунин-Барковский И.В. Предотвращение дефектов при шлифовании. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
 9. Lin Z.H., Hodgson D.C. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures Int. J. Mach. Tools and Manufact. 1988 V. 28 № 2 pp. 93-101.
 10. Воронцов Л.Н., Корндорф С.Ф. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
-

11. Агеев Ю.В., Карпович И.Б., Этингоф М.И. Микропроцессорные приборы активного контроля. СТИН. 2002. № 4. С.33-40.
12. Этингоф М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках. М.: АПР, 2016. 336 с.
13. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Игнатъев С.А. Автоматизированный контроль в системе управления качеством изготовления деталей подшипников. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1(84). С.14-25.
14. Симонов В.В., Игнатъев А.А. Алгоритмическое обеспечение микропроцессорного прибора активного контроля процесса шлифования колец подшипников. Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7707
15. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.
16. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 176 с.
17. Салов П. М. Определение оптимального диапазона износа круга. Высокие технологии в машиностроении материалы международной научно-технической конференции (19.11.2002-21.11.2002), 2002. с. 11-13.

References

1. Gludkin O.P., Gorbunov N.M., Gurov A.I., Zorin Ju.V. Vseobshhee upravlenie kachestvom [Universal quality management]. М.: Radio i svjaz', 1999. 600 p.
2. Volosov S.S., Gejler Z.Sh. Upravlenie kachestvom produkcii sredstvami aktivnogo kontrolja [Product quality management by means of active control]. М.: Izd-vo standartov, 1989. 264 p.
3. Ignat'ev A.A., Gorbunov V.V., Ignat'ev S.A. Monitoring tehnologicheskogo processa kak element sistemy upravleniya kachestvom

produkcii [Monitoring of the technological process as an element of the product quality management system.]. Saratov, SGTU, 2023. 240 p.

4. Push A.V. STIN. 2000. № 9. p. 12-20.

5. A.K. Tugengol'd, V.P. Dimitrov, R.N. Voloshin, L.V. Borisova. STIN. 2017. № 3. p. 11-17.

6. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Zaharchenko M.Ju., Ignat'ev S.A., Karakozova V.A., Berezina E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193

7. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Kazinskij A.A., Nasad T.G., Nasad I.P. Journal of Physics: Conference Series. 1515(2020) 052057 (ICMIT-2020 Metrological Support of Innovative Technologies: International Scientific Conference. Saint Petersburg-Krasnoyarsk, 2020. March 4). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/5/052057/pdf

8. Kulakov YU.M., Hrul'kov V.A., Dunin-Barkovskij I.V. Predotvrashchenie defektov pri shlifovanii [Prevention of defects during grinding]. M.: Mashinostroenie, 1975. 144 p.

9. Lin Z.H., Hodgson D.C. Int. J. Mach. Tools and Manufact. 1988. V. 28. № 2 pp. 93-101.

10. Voroncov L.N., Korndorf S.F. Pribory avtomaticheskogo kontrolya razmerov v mashinostroenii [Automatic size control devices in mechanical engineering]. M.: Mashinostroenie, 1988. 280 p.

11. Ageev YU.V, Karpovich I.B., Etingof M.I. STIN. 2002. № 4. pp.33-40.

12. Jetingof M. I. Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallorezhushhih stankah [Automatic dimensional control on metal-cutting machines]. M.: APR, 2016. 336 p.

13. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. № 1(84). pp.14-25.



14. Simonov V.V., Ignat'ev A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №6. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7707>
15. Mihel'kevich V.N. Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem [Automatic grinding control]. M.: Mashinostroenie, 1975. 304 p.
16. Lur'e G.B. SHlifovanie metallov [Grinding of metals]. M.: Mashinostroenie, 1969. 176 p.
17. Salov P. M. Vysokie tekhnologii v mashinostroenii materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii [Determination of the optimal wear range of the circle. High technologies in mechanical engineering materials of the International scientific and technical conference] (19.11.2002-21.11.2002), 2002. p.11-13