

## Алгоритмическое обеспечение микропроцессорного прибора активного контроля процесса шлифования колец подшипников

*В.В. Симонов, А.А. Игнатьев*

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

**Аннотация:** Приводится алгоритмическое обеспечение микропроцессорного прибора активного контроля процесса шлифования колец подшипников для различных режимов обработки.

**Ключевые слова:** шлифование, кольца подшипников, активный контроль, микроконтроллер, алгоритмическое обеспечение.

### Введение

Проблема обеспечения заданного качества деталей, обрабатываемых на автоматизированных станках, приобрела особую значимость, так как от этого зависит создание высокоточных наукоемких изделий для авиационной и ракетной техники, машиностроения, приборостроения, энергетики и других отраслей. Решение проблемы обуславливает необходимость внедрения систем управления качеством продукции, одним из компонентов которой является активный управляющий контроль, позволяющий повысить точность технологического процесса и предупредить возникновение бракованных деталей [1, 2]. Для реализации указанного необходимо иметь достоверную информацию о реальных значениях параметров точности, обработанных деталей. Важное место в этом случае отводится операционному активному контролю качества обработки, результаты которого позволяют осуществлять корректировку настройки технологического оборудования и режима резания [3, 4].

Достаточно эффективным методом для обеспечения заданной точности обработки деталей является применение принципа обратной связи, использующего информацию об отклонении значений выходных параметров от заданных [5, 6]. Этот метод успешно применяется в подшипниковой промышленности при шлифовании дорожек качения колец [7, 8]. При

---

производстве подшипников основные показатели качества колец, такие, как точность геометрических размеров, волнистость и шероховатость дорожки качения, однородность структуры поверхностного слоя, формируются на заключительном этапе обработки - этапе шлифования [9, 10]. Тем не менее, на данном этапе обработки колец подшипников не исключено появление брака. Именно по этой причине важен мониторинг параметров обрабатываемых деталей, оборудования и процесса обработки [11], что уменьшает влияние человеческого фактора на качество продукции. Следует отметить, что одним из направлений улучшения качества шлифования колец является применение многопараметрового активного контроля, при котором контролируется не только отклонение размера, но и скорость снятия припуска [12]. В связи с изложенным, научный и практический интерес представляет совершенствование алгоритмов управления шлифованием колец на основе современных компьютерных средств.

### **Алгоритмизация процесса шлифования колец подшипников**

Одним из направлений автоматизации процессов шлифования колец подшипников является активный контроль параметров точности обрабатываемых деталей, в рамках которого осуществляется корректировка процесса обработки. Для этого внедряется прибор активного контроля (ПАК), регистрирующий информацию о параметрах точности детали и процесса ее обработки, на основании которой в системе управления станком формируется управляющее решение, направленное на обеспечение заданной точности шлифования.

Все современные ПАК оснащаются микропроцессорными блоками, которые обеспечивают питание индуктивных преобразователей, расположенных в измерительной оснастке и осуществляющих контроль текущего размера колец, суммирование и преобразование их сигналов, индикацию результатов измерения на цифровом дисплее, светодиодную

сигнализацию, выдачу релейных управляющих команд, выходного аналогового сигнала постоянного тока и выходного кодового сигнала в цепи управления станком. Микропроцессорный блок может работать с индуктивными и растровыми фотоэлектрическими преобразователями. Количество подключаемых к блоку преобразователей от 1 до 4 [13].

Работы по созданию ПАК подразделяются на два основных этапа: анализа и синтеза. Ранее был проведен анализ существующих моделей ПАК и новых разработок в рассматриваемой области, также проведена разработка функциональных и электрических принципиальных схем прибора. В общем виде принцип его работы можно представить в виде функциональной схемы процесса обработки шлифованием (рис.1).

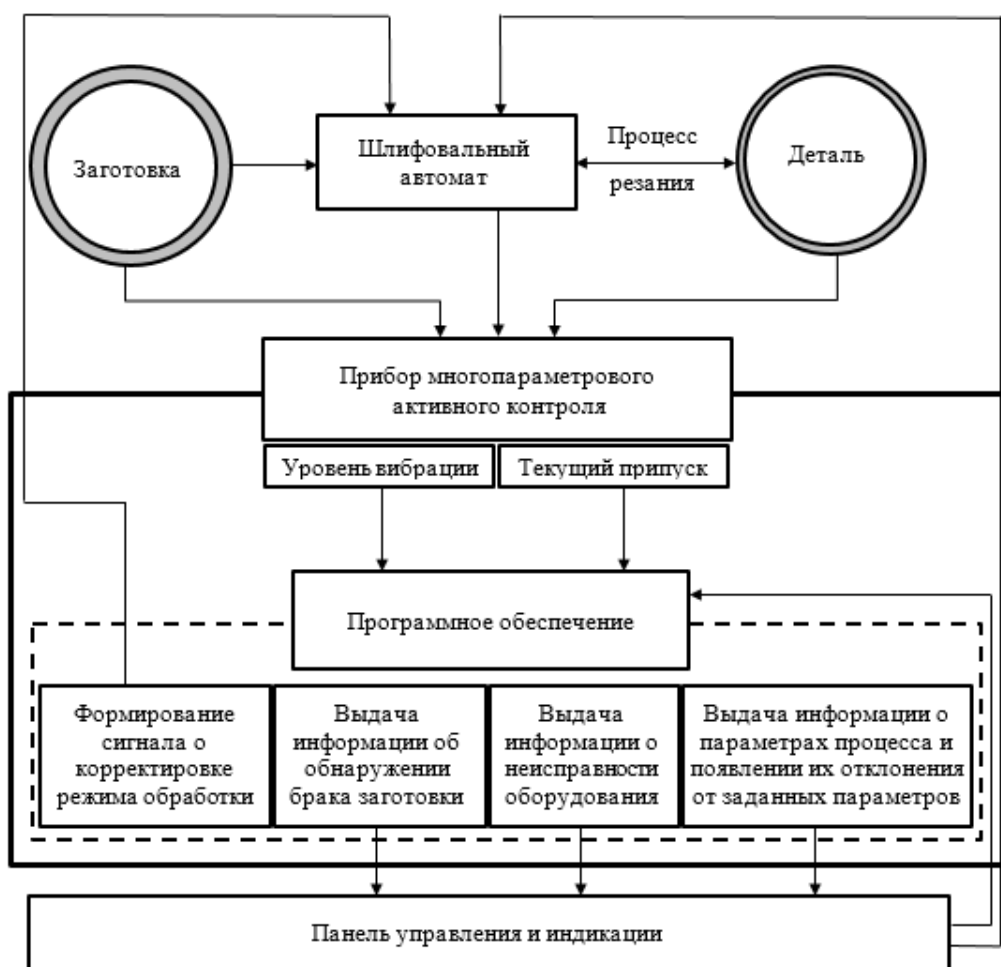


Рис. 1. – Функциональная схема процесса обработки шлифованием колец подшипников с применением цифрового прибора активного контроля

Прибор многопараметрового активного контроля получает информацию, во-первых, посредством двух индуктивных датчиков о текущем припуске на заготовке, во-вторых, посредством вибродатчика об уровне вибрации шпинделя абразивного круга. Обработывая данные с датчиков с помощью специализированного программного обеспечения, прибор вносит изменения в процесс обработки и выдает соответствующую информацию оператору на панель управления.

Основную роль в анализе данных и принятии управляющего решения выполняет разработанное для прибора программное обеспечение, в связи с чем рассмотрим соответствующие алгоритмы его работы. Она делится на три основных этапа: этап до начала обработки, этап непосредственной обработки колец подшипников, этап диагностирования станочного оборудования,

На первом этапе до начала обработки прибор должен проверить возможность шлифования установленной на станок заготовки: необходимо определить отсутствие погрешности формы, равномерность припуска, оставленного под обработку, отсутствие биения заготовки без обработки и наличие возможности обработки, а именно наличие необходимого для процесса шлифования минимального припуска. Все эти условия учтены в алгоритме проверки кондиционности заготовки, блок-схема которого представлена на рис. 2.

Проверка кондиционности заготовки в соответствии с алгоритмом происходит следующим образом. На станок до начала выполнения программы обработки устанавливается заготовка. Индуктивные преобразователи, являющиеся датчиками припуска, устанавливаются нулевой точкой на значение равное размеру готовой детали, и подводятся к поверхности заготовки, тем самым снимая размер  $Z_0$ . Запускается выполнение программы, и заданные параметры, о значении припуска на заготовке  $Z_0$ , минимально возможной скорости вращения шпинделя детали

---

$vd\_min$ , и безопасном уровне вибрации  $a1\_max$ , передаются для обработки в программу.

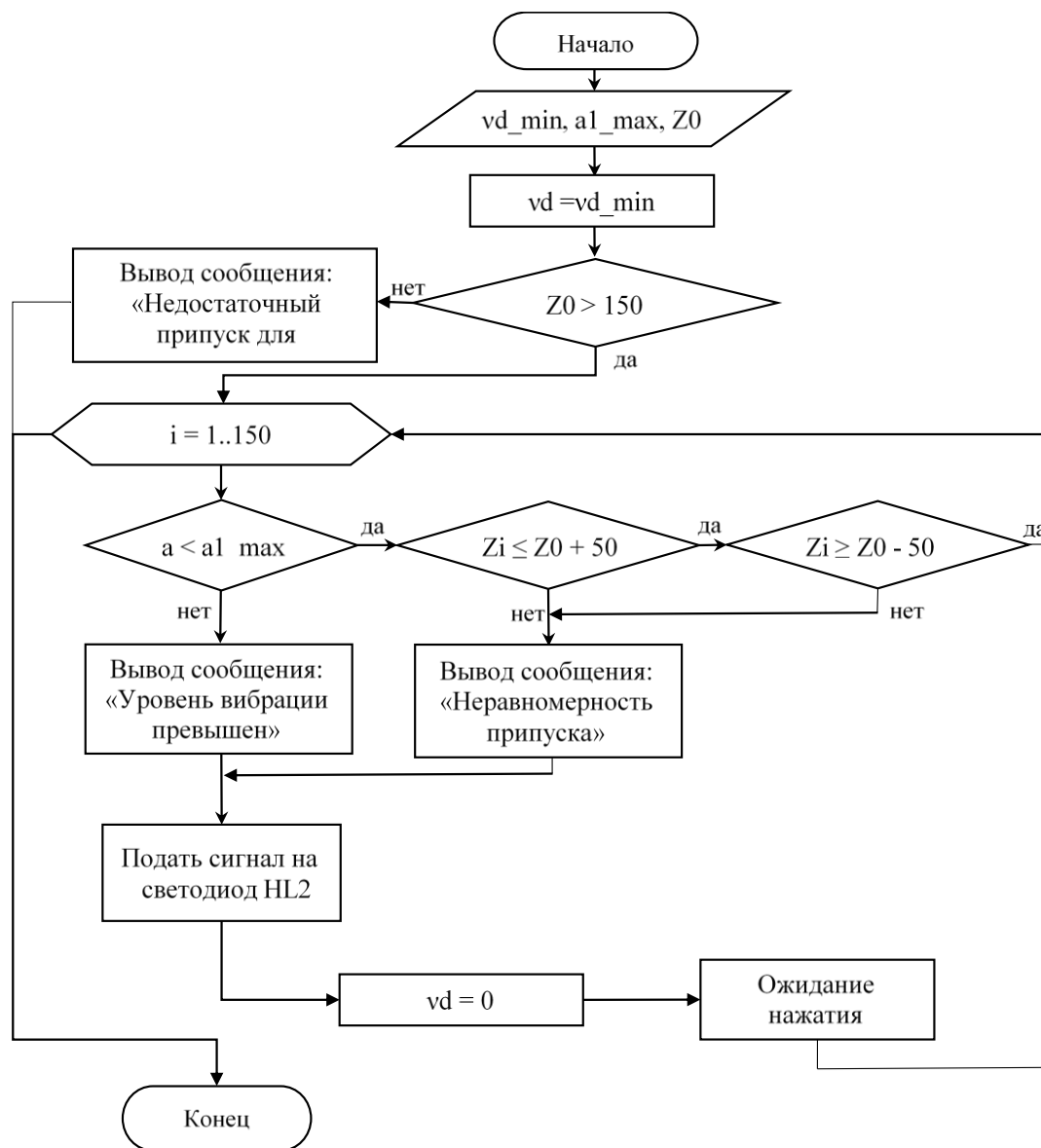


Рис. 2. – Алгоритм проверки кондиционности заготовки:  $vd$ ,  $vd\_min$  – значение вращения шпинделя с установленной на нем деталью, и то же значение равно минимально возможному значению данного параметра для станка,  $a1$ ,  $a1\_max$  – уровень вибрации и максимально возможная частота вибрации, при которой безопасно выполнение обработки и уровнем которой можно пренебречь,  $Z0$ ,  $Zi$  – значение припуска, получаемое при установке датчиков на поверхность детали, и значение припуска, снимаемое с заготовки.

После получения необходимых данных программой, начинается вращение детали закрепленной на шпинделе, с минимально возможной скоростью. Благодаря этому, программа проверяет наличие на заготовке минимального уровня припуска, допустимого для обработки равного 150 мкм. В случае, если припуск, присутствующий на заготовке, меньше заданного, прибор выдает об этом соответствующее сообщение. В случае, если припуск превышает минимальное значение, то программа переходит к дальнейшему контролю заготовки. Проверяется уровень вибрации шпинделя с установленной заготовкой, и если уровень не соответствует заданному, то выдается сообщение оператору, подается сигнал включения на светодиод HL2 и выполнение программы останавливается до вмешательства оператора. Если уровень вибрации не выходит за допустимые пределы, то производится контроль формы заготовки, отклонение которой от нулевого значения не должно быть больше 50 мкм.

В случае соблюдения вышеперечисленных условий, программа переходит к первому циклу обработки детали алгоритм работы которого представлен на рис. 3.

Алгоритм программы реализует быстрый подвод инструмента к заготовке и ее последующую черновую обработку следующим образом. В программу поступают все представленные выше значения. Снимается сигнал с датчика вибрации и до тех пор, пока он не выходит за допустимые пределы, установленные на предыдущем цикле работы, осуществляется подвод инструмента при скорости подачи гораздо большей, чем данный показатель при обработке и минимальных значениях скорости вращения детали и инструмента. При достижении инструментом поверхности заготовки уровень вибрации начинает возрастать, и программа, фиксируя это, завершает цикл быстрого подвода.

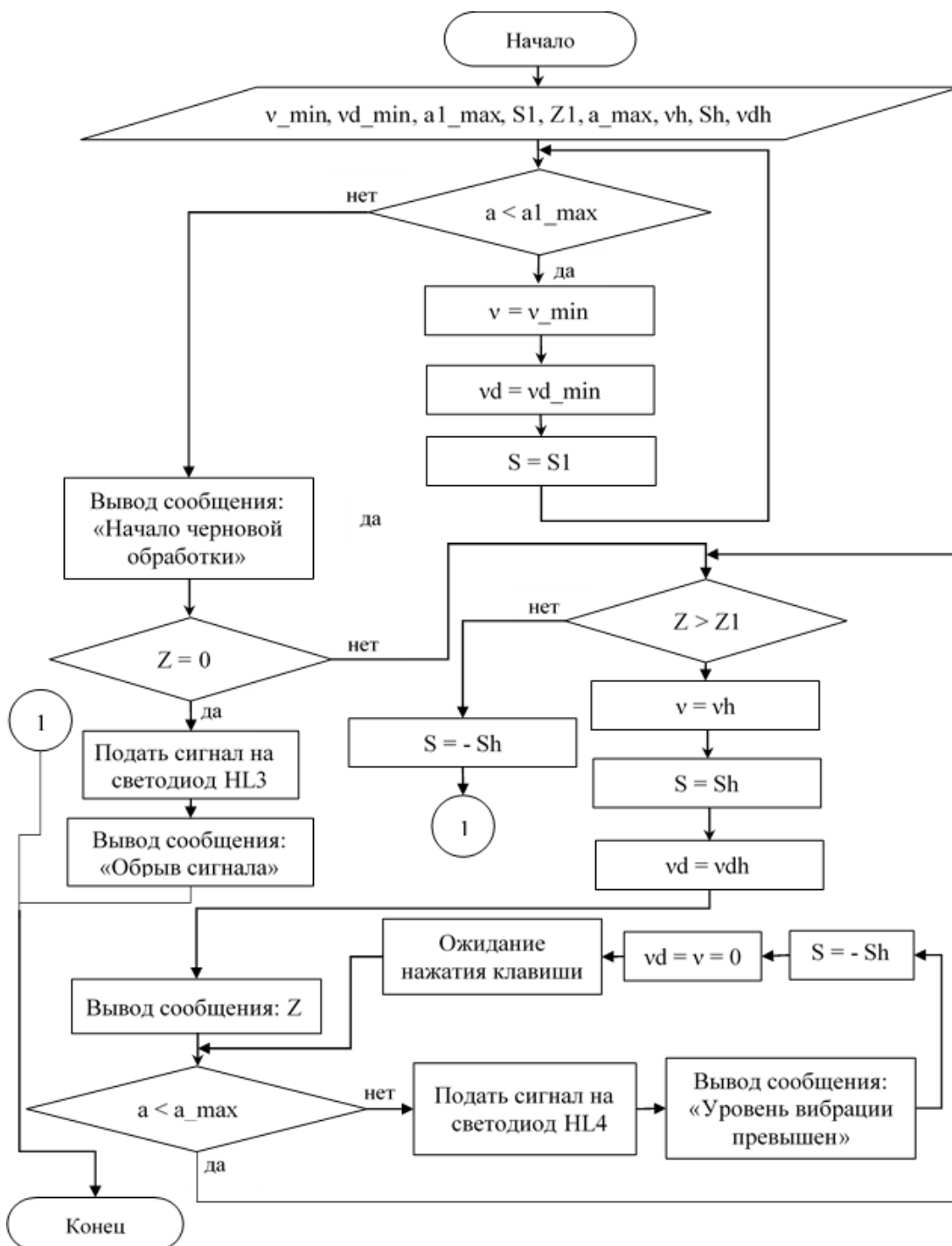


Рис. 3. – Алгоритм быстрого подвода и черновой обработки детали.

Используемые обозначения приведены в таблице 1.

По завершению цикла быстрого подвода, оператору на дисплей выдается сообщение о начале черновой обработки и прибор переходит к выполнению следующего цикла программы.

Таблица № 1

## Применяемые обозначения на рис. 3

Обозначение	Наименование
a	уровень вибрации, снимаемый с датчика
v	скорость вращения шпинделя инструмента
vd	скорость вращения детали
S	скорость подачи инструмента
Z	уровень текущего припуска заготовки
v_min	минимальная скорость вращения инструмента, доступная для используемой модели станка
vd_min	минимальная скорость вращения шпинделя с установленной деталью, доступная для используемой модели станка
a1_max	безопасный максимальный уровень вибраций для детали без обработки
S1	скорость подачи инструмента при быстром подводе
Z1	уровень припуска, при котором заканчивается черновая обработка
a_max	максимально допустимый уровень вибрации при обработке детали
vh	скорость вращения инструмента при черновой обработке
Sh	скорость подачи инструмента при черновой обработке
vdh	скорость вращения детали при черновой обработке

При переходе к черновой обработке прибор сравнивает уровень текущего припуска с нулем, и если сравнение выдает равенство этих значений, прибор посылает сигнал на светодиод HL3 расположенный на панели индикации и управления и выдает сообщение оператору. Если сравнение с нулем выдает отрицательный результат, то прибор переходит к процессу черновой обработки.

При выполнении черновой обработки прибор получает значение припуска с индуктивных преобразователей, сравнивает его с уровнем, при котором следует осуществить переход на чистовую обработку и до достижения данного уровня производит выполнение программы черновой обработки. Если уровень припуска больше требуемого, прибор задает значение скорости вращения инструмента, скорости подачи инструмента и



скорости вращения детали равными показателям значения, которые обусловлены параметрами шероховатости и классом точности детали. В процессе обработки оператору на дисплей выдается значение текущего припуска детали, снимаемое датчиками в реальном времени.

В процессе обработки система снимает значения показателей с датчиков уровня вибрации, и если денные показатели не превышают критических значений, то система успешно продолжает работу. Если система получает сигнал с датчика вибрации, превышающий либо равный максимальному допустимому значению, то, посредством программы, выполняются следующие действия: подается сигнал на светодиод HL4, оператору на дисплей выводится сообщение о превышении уровня вибрации, производится отвод режущего инструмента, со скоростью, равной скорости подачи, останавливается вращение детали и инструмента до возобновления процесса оператором.

По окончании процесса черновой обработки прибор производит отвод инструмента и переходит к алгоритму выполнения чистовой обработки. Для операции шлифования данный цикл является заключительным, и по его завершении процесс шлифования заканчивается, а на выходе получается готовая деталь. Поскольку датчики измерения припуска, подключенные к прибору активного контроля, устанавливаются нулевым значением на требуемый размер детали, то окончательной точкой обработки для процесса чистовой обработки будут являться нулевые показания с датчиков. Алгоритм процесса чистовой обработки представлен на рис. 4.

При переходе к чистовой обработке на экран, расположенный на панели оператора, выводится сообщение о начале чистовой обработки. Прибор снимает показания с датчиков текущего припуска, и если эти показания не больше и не равны нулю, то прибор подает сигнал на светодиод HL5 и сообщение на дисплей оператору. Если значение сигнала, получаемого

---

от датчиков, удовлетворяет условию, то программа проводит проверку разницы предыдущего и текущего показаний датчиков, и если они отличаются больше, чем на значение скорости подачи, то выдается ошибка о обрыве сигнала с датчика. Такая ошибка может появиться на нулевом шаге итерации, для этого введена последовательность действий, исключающая ее появление. Далее полученное значение сравнивается с нулем, и если оно является большим, то начинается обработка детали со скоростью вращения инструмента и детали, равной скорости чистовой обработки с подачей, рассчитанной для чистовой обработки. На каждом шаге итерации на экран выводится значение текущего припуска на панель оператора. По завершении каждого шага к номеру итерации прибавляется единица. Итерации продолжаются до тех пор, пока значение припуска на заготовке не станет равно нулю.

Таблица № 2

Применяемые обозначения на рис. 4

Обозначение	Наименование
a	уровень вибрации, снимаемый с датчика
v	скорость вращения инструмента
vd	скорость вращения детали
S	скорость подачи инструмента
Z	уровень текущего припуска заготовки
a_max	максимально допустимый уровень вибрации при обработке детали
vl	скорость вращения инструмента при чистовой обработке
Sl	скорость подачи инструмента при чистовой обработке
vdl	скорость вращения детали при чистовой обработке.

Также, как и в предыдущем цикле операций, прибор контролирует значение вибрации и при ее выходе за допустимые пределы информирует оператора и прекращает обработку заготовки до запуска процесса оператором.

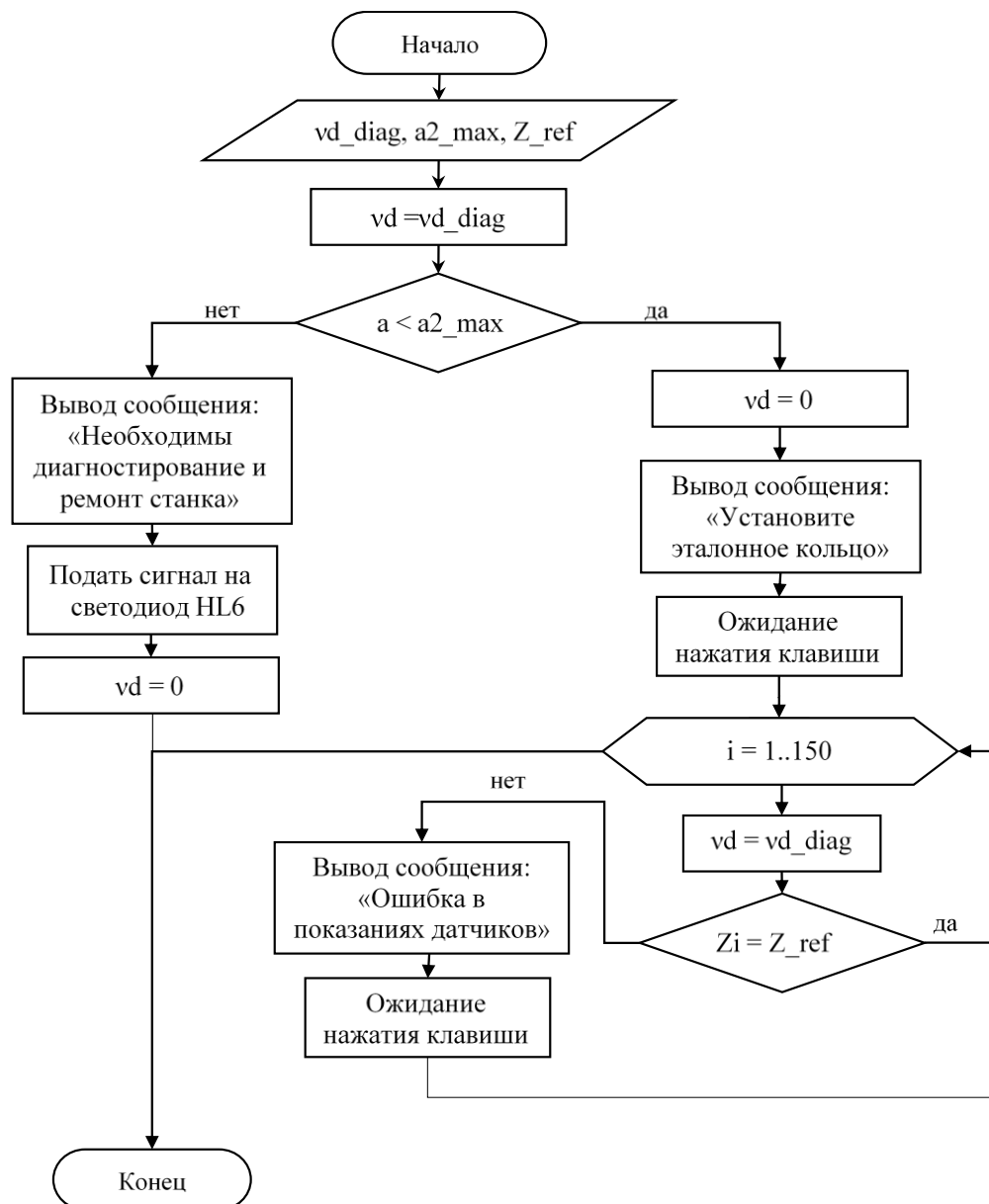


Рис. 4. – Алгоритм чистовой обработки детали. Используемые обозначения приведены в таблице 2.

Благодаря представленному алгоритму прибор производит обработку детали и доводит ее размеры до требуемых значений. Дополнительно в прибор встроен алгоритм, производящий диагностирование станка, а также самодиагностику прибора. Данный алгоритм не включен в основную программу станка и запускается периодически по команде оператора, для контроля погрешности датчиков и износа станка, контролируемого

разрабатываемым прибором. Алгоритм диагностирования прибора и станка представлен на рис.5.

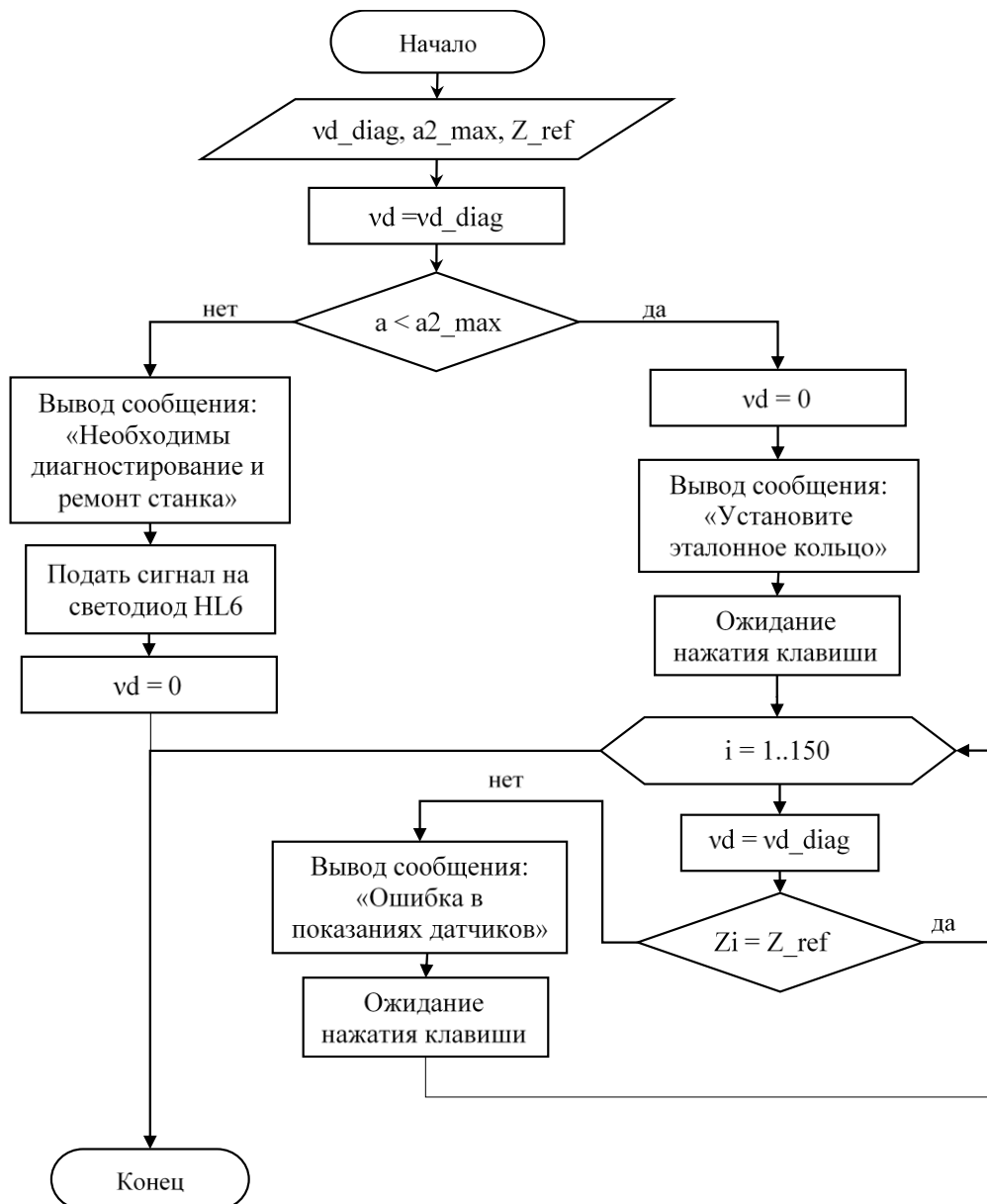


Рис. 5. – Алгоритм диагностирования прибора и станка. Используемые обозначения приведены в таблице 3.

Программа проверяет соответствие уровня вибраций шпинделя детали без воздействия на деталь инструмента, при нахождении показателя в заданном диапазоне программа переходит к диагностированию корректности показаний датчиков. Далее работа станка останавливается и выдается сообщение о необходимости установки эталонного кольца, и после

выполнения всех манипуляций запускается процесс проверки показаний с датчиков. В случае, если показания датчиков не равны заданному значению, выдается сообщение на панель оператора о необходимости корректировки.

Таблица № 3

Применяемые обозначения на рис. 5

Обозначение	Наименование
a	уровень вибрации, снимаемый с датчика
vd	скорость вращения детали
Z	уровень текущего припуска заготовки
a2_max	максимально допустимый уровень вибрации шпинделя детали без установленной заготовки
vd_diag	скорость вращения шпинделя детали при диагностировании
Z_ref	величина припуск соответствующая припуску эталонного кольца

Реализация алгоритмов управления шлифованием колец позволяет существенно повысить качество обработки дорожки качения. Проведен сопоставительный анализ отклонения геометрических параметров точности колец подшипников на внутришлифовальных станках SIW4/1, оснащенных прибором активного контроля «ЭКОМ» и опытным образцом микропроцессорного ПАК. Шлифовалась дорожка качения наружных колец шарикового радиально-двухрядного подшипника 256907 из стали ШХ15 кругами 24A250M1K. Результаты измерений показали существенное повышение стабильности значений параметров при применении микропроцессорного прибора: разброс диаметральных размеров дорожки качения снизился с 4...8 мкм до 1...3 мкм, овальность уменьшилась с 1,8...4,0 мкм до 0...1,2 мкм, огранка уменьшилась с 1,3...2,6 мкм до 0...0,6 мкм. Вихретоковый контроль тех же колец показал существенное повышение качества дорожек качения – однородности структуры поверхностного слоя, что подтверждается данными измерений, выполненных на автоматизированном приборе ПВК-К2М (рис.6) [12, 14].

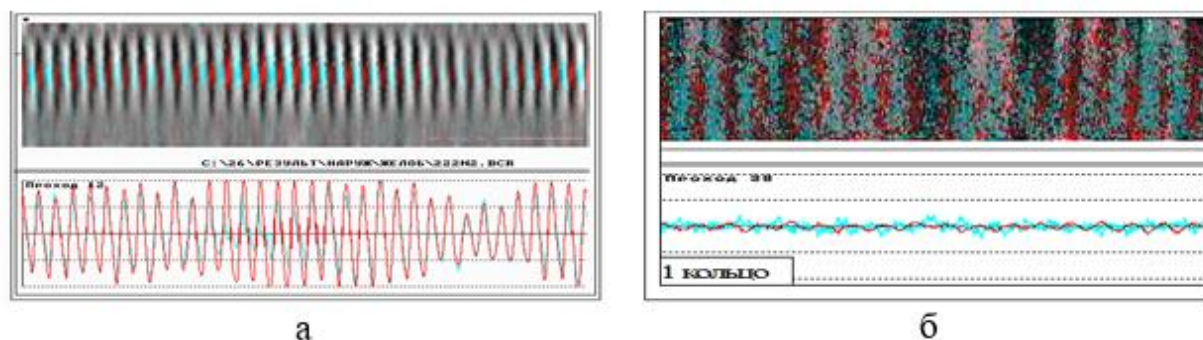


Рис. 6. – Вихретоковые образы дорожки качения кольца, отражающие периодическую неоднородность поверхностного слоя (а) при повышенном уровне вибраций и практически однородный поверхностный слой (б)

### Заключение

Разработанные алгоритмы работы позволяют в полной мере удовлетворить требования, предъявляемые к качеству деталей, уменьшается количество брака обработки, время, затрачиваемое на обработку одной детали и возможность попадания некондиционных заготовок в обработку, что позволяет сократить потери времени и уменьшить себестоимость готовой продукции. Данные алгоритмы учитывают возможность включения в прибор таких функций, как: функция автоблокировщика, препятствующая попаданию в зону обработки некондиционной продукции, функции автоостанова, вызывающей прекращение процесса обработки в случае возникновения нештатных ситуаций, а также ситуаций критических для оборудования, функции автоподналадчика, позволяющей вносить коррективы в процесс обработки на основании измерения обработанных деталей, функции автотолератора, позволяющей поддерживать в заданных пределах параметры обрабатываемой заготовки, а также функции диагностики станочного оборудования, позволяющей обнаружить и своевременно устранить неполадки, способные негативно отразиться на качестве будущих деталей. Представленные данные позволяют судить об

улучшении качества процесса обработки при применении разработанного прибора в сравнении с существующими аналогами.

### 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. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. М.: Машиностроение, 1982. 208 с.
4. Активный контроль размеров / под ред. С.С. Волосова. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
5. Воронцов Л.Н., Корндорф С.Ф. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
6. Агеев Ю.В., Карпович И.Б., Этингоф М.И. Микропроцессорные приборы активного контроля. СТИН. 2002. № 4. С.33-40.
7. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.
8. Игнатъев А. А., Горбунов В.В., Игнатъев С.А. Активный контроль и мониторинг процесса шлифования деталей подшипников. Саратов: СГТУ, 2007. 104 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. Цысь А.С., Пашкевич Р.Р. Система технологических мехатронных объектов нейронной сети анализа состояний. Инженерный вестник Дона, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161).
11. 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](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/5/052057/pdf)

12. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 160 с.

13. Этингоф М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках. М.: АПР, 2016. 336 с.

14. 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193)

### 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. Tverskoj M.M. Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami obrabotki detalej na stankah[Automatic control of machining modes on machine tools]. М.: Mashinostroenie, 1982. 208 p.

4. Aktivnyj kontrol' razmerov[Active size control] pod red. S.S. Volosova. М.: Mashinostroenie, 1984. 224 p.



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

6. Ageev Ju.V., Karpovich I.B., Jetingof M.I. STIN. 2002. № 4. pp.33-40.

7. Mihel'kevich V.N. Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem [Automatic grinding control]. M.: Mashinostroenie, 1975. 304 p.

8. Ignat'ev A. A., Gorbunov V.V., Ignat'ev S.A. Aktivnyj kontrol' i monitoring processa shlifovaniya detalej podshipnikov [Active control and monitoring of the grinding process of bearing parts]. Saratov: SGTU, 2007. 104 p.

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

10. Cys' A.S., Pashkevich R.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161).

11. Ignat'ev A.A., Dobrjakov 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](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/5/052057/pdf)

12. Ignat'ev S.A., Gorbunov V.V., Ignat'ev A.A. Monitoring tehnologicheskogo processa kak jelement sistemy upravlenija kachestvom produkcii [Monitoring of the technological process as an element of the product quality management system]. Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t, 2009. 160 p.

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

14. Ignat'ev A.A., Dobrjakov 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193)

---