

## Методическое обеспечение для управления шлифованием колец подшипников на основе автоматизированной оценки динамического качества станка

*Я.Ш. Шамсадова<sup>1</sup>, А.А. Игнатъев<sup>2</sup>, К.Л. Вахидова<sup>1</sup>, М.Р. Исаева<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова*

*<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина*

**Аннотация:** Рассматривается вопрос разработки и практического применения разработанного методического обеспечения для управления шлифованием на основе автоматизированной оценки динамического качества станка по интегральным оценкам автокорреляционной функции колебаний и ее связи с качеством обработки дорожек качения колец подшипников.

**Ключевые слова:** управление шлифованием, виброакустические колебания, автоматизированные измерения, стохастические характеристики, динамическое качество станка, кольца подшипников, качество обработки.

### Введение

В настоящее время современное производство не стоит на месте, оно стремится модернизировать как аппаратную часть технологического процесса на каждом этапе, так и программную, путем внедрения современных средств автоматизации.

Стоит отметить, что обеспечение высокого качества обработки деталей в машиностроительном производстве базируется на соответствующем уровне технологической надежности автоматизированных металлорежущих станков (АМС), которая в условиях эксплуатации зависит от комплекса мероприятий, связанных с поддержанием заданных эксплуатационных характеристик оборудования, обеспечивающих заданные точность обработки и производительность [1]. В подшипниковом производстве для этого реализуется система мониторинга технологического процесса (СМТП) шлифования колец подшипников, в рамках которой осуществляются не только автоматизированный контроль и диагностирование станков, а также

---

их исследование и испытания, на основе результатов которых принимаются управляющие решения либо по корректировке параметров режима обработки, либо по ремонтно-профилактическим работам [2].

Важнейшей характеристикой высокоточных шлифовальных АМС, влияющей на качество обработки колец, которое необходимо обеспечивать при эксплуатации, является их динамическое качество. Вопрос оценки динамического качества станков рассматривался в работах В.А. Кудинова [3], В.Н. Михелькевича [4], М.М. Аршанского [5] и других, но основное внимание в них уделялось теоретическим аспектам рассматриваемой задачи. Методы исследования и динамических испытаний станков на основе измерения виброакустических (ВА) характеристик станков затрагивались в работе [6], однако четкого методического обоснования проведения автоматизированных измерений и обработки данных стохастических колебаний в них не рассматривалось. Соответственно, недостаточно внимания уделено практическому применению полученных ВА характеристик станков для управления качеством шлифования, в частности, колец подшипников.

В связи с изложенным, целью работы является разработка методического обеспечения для управления шлифованием колец подшипников, основанного на системном подходе, предусматривающем сопоставительный анализ информативных стохастических ВА характеристик станков, по которым оценивается их динамическое качество, с качеством обработки деталей.

**Методическое обеспечение  
для управления шлифованием колец подшипников  
в производственных условиях**

---

Опыт проведения исследований и испытаний станков различных типов и моделей по ВА характеристикам показал, что существенное повышение эффективности измерений обеспечивается за счет их автоматизации и компьютерной обработки результатов [7].

Современные методы исследования и испытания АМС должны иметь научно-методическую основу и соответствующие техническое, программное и информационное обеспечение. Следует отметить, что выбор измерительной аппаратуры, метода обработки результатов виброизмерений и обоснование критерия принятия управляющего решения должны базироваться как на предварительно полученных со станков экспериментальных данных, так и на теоретическом обосновании информативности применяемых характеристик ВА колебаний основных элементов формообразующей подсистемы станка, на основе которых оценивается его динамическое качество.

Для эффективной реализации управления шлифованием с высоким качеством необходимо учитывать большое число факторов, включающих законы управления рабочими органами, технологические параметры, тепловые, колебательные и другие процессы в зоне резания, а также использовать данные экспериментальных исследований колебаний основных узлов станков с дальнейшей математической обработкой данных для формирования оценок динамического качества. Указанное требует системного подхода к формированию методического обеспечения для управления шлифованием, в основе которого лежит оценка динамического качества станков по стохастическим характеристикам колебаний (рис. 1).

Важным моментом является построение теоретических моделей колебательных процессов в динамической системе (ДС), необходимых для выявления их особенностей в данном станке и последующей идентификации

---

по экспериментальным данным, а также на экспериментальных исследованиях качества обработки и ее взаимосвязи с колебаниями и их обработке различными методами для выбора информативных параметров. Следует отметить, что особый интерес представляет оценка динамического качества станка с учетом стохастического характера колебаний, поскольку они реально регистрируются при обработке и более адекватно отражают взаимодействие детали и инструмента. Стохастическая компонента колебаний обусловлена аналогичной компонентой силы резания, которая объясняется воздействием нескольких случайных факторов: неравномерность снимаемого припуска, неоднородность физико-механических свойств материалов детали и инструмента, колебания широкого спектра ДС от двигателей приводов и другими.

Построение модели ДС станка необходимо для определения спектра ее колебаний и сопоставления его с экспериментальным, что служит основой для практического подтверждения связи стохастических характеристик ВА колебаний с качеством обработки колец подшипников, что ранее обосновано в работе [7].

Оценку динамического качества шлифовального АМС следует использовать при решении следующих задач управления:

- для определения значения параметров режима шлифования на каждом станке, при которых уровень ВА колебаний в паре деталь-круг минимален, так что в этом случае обеспечивается высокое качество обработки;
  - для назначения периодичности правки абразивного инструмента, что повышает эффективность шлифования;
  - при оценке динамического качества каждого станка и учете этого при диагностировании и проведении технического обслуживания станков по реальному состоянию для обеспечения заданного качества шлифования.
-



Рис. 1. Методическое обеспечение для практической реализации управления качеством колец подшипников

Важным при решении задач является автоматизация формирования результатов за счет компьютерной обработки данных виброизмерений и выбор информативного параметра.

Для автоматизированной оценки динамического качества станков, в том числе и при различных режимах резания, были предложены и обоснованы две стохастические характеристики ВА колебаний:

- интегральная оценка спектральной плотности  $S(\omega)$  колебаний ДС вида [7]:

$$I_C = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, (1)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – нижняя и верхняя границы диапазона частот измеряемых колебаний ДС.

- интегральная оценка  $I_A$  автокорреляционной функции (АКФ)  $K(\tau)$  ВА колебаний [7]:

$$I_A = \int_0^{\tau_k} K^2(\tau) d\tau, (2)$$

где ( $\tau_k$ ) – время корреляции.

Такая оценка была предложена ранее в работе [7] для анализа динамических свойств линейных систем управления, а в данном случае применена для станков как объектов управления.

Ранее выполненными исследованиями на токарных модулях было установлено, что наиболее высокой точности обработки соответствуют минимальные значения предложенных интегральных оценок.

Вычисление интегральной оценки АКФ по сравнению с интегральной оценкой спектра является предпочтительным, так как спектр содержит стохастическую составляющую, и ее интегральная оценка меняется, хотя и незначительно, за время измерения. В то же время интегральная оценка АКФ более стабильна, так как АКФ обладает фильтрующими свойствами по отношению к стохастической компоненте колебаний ДС [7]. С этой точки зрения в производственных условиях более корректно вычислять

---

интегральную оценку АКФ как информативный параметр динамического качества станка.

Для регистрации колебаний ДС применяется виброизмерительная ВШВ-003М2, датчик которого устанавливается на опоре кольца на магнитном основании. Далее вибросигналы подаются на компьютер и обрабатываются с помощью программного продукта Matlab. В зависимости от величины информационного параметра станки оцениваются по четырех балльной шкале (наиболее высокое динамическое качество станка, соответствующее некоторому минимальному значению информационного параметра, – 5 баллов, некоторое наиболее высокое значение параметра, соответствующее низкому динамическому качеству станка – 2 балла).

В силу того, что на шлифовальных станках используется активный контроль, обеспечивающий высокую точность диаметрального размера дорожки качения колец, этот параметр в рассматриваемом случае дополнительно не измеряется. Другие геометрические параметры точности дорожек качения колец (волнистость, шероховатость) контролируются с помощью автоматизированных средств измерения, включающих кругломер модели «Talyrond 131» и профилометр модели Hommel tester T1000.

Качество шлифованного поверхностного слоя определяется с помощью автоматизированного прибора вихретокового контроля ПВК-К2М, позволяющего выявить неоднородность структуры поверхностного слоя дорожки качения колец [9]. Прибор включен в Госреестр средств измерений № 26079-03. Оценка качества выполняется по 4-х балльной системе (наиболее высокое качество, соответствующее практическому отсутствию дефектов в поверхностном слое, – 5 баллов, наиболее низкое качество – 2 балла).

Полученные индивидуально для каждого станка результаты передаются в базу данных экспертной системы [7], входящей в структуру

---

СМТП, что позволяет использовать их для принятия решения при наладке и последующем техническом обслуживании станков для обеспечения заданного качества шлифования колец.

На рисунке 2 показаны типичные спектр и АКФ колебаний ДС внутришлифовального станка модели SIW-5. Они получены при экспериментальных исследованиях качества обработки колец и колебаний ДС станков, выполненных в ОАО «Саратовский подшипниковый завод» (в настоящее время АО ЕПК-Саратов).

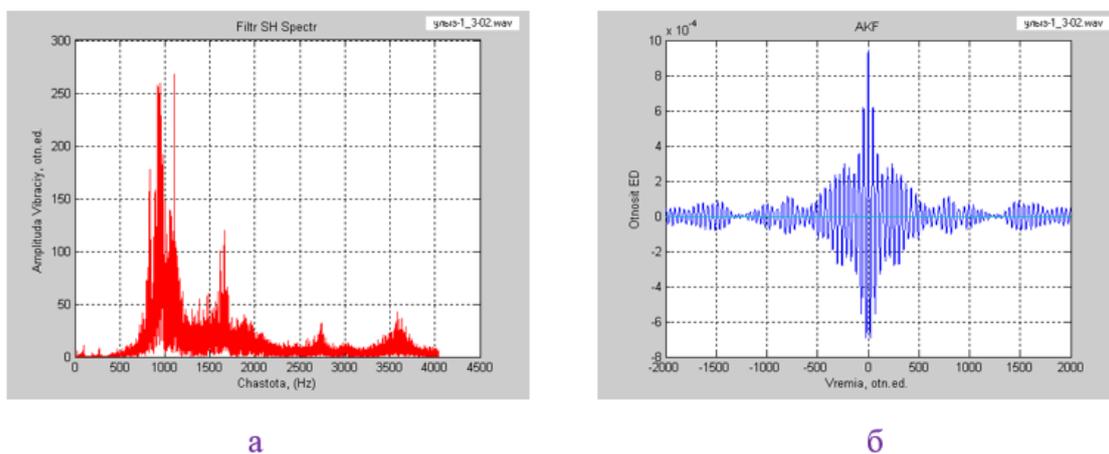


Рис. 2. Экспериментальные стохастические характеристики колебаний динамической системы внутришлифовального станка SIW- 5 (а – спектр колебаний, б – автокорреляционная функция колебаний)

Экспериментальный спектр колебаний содержит значительное количество частот, что соответствует теоретическому спектру, формирование которого отражено в работе [7]. Полученные при измерениях данные используются для оценки динамического качества станков по интегральным оценкам спектра и АКФ.

В качестве практического примера можно привести использование интегральных оценок АКФ и спектра ВА колебаний для сравнения шлифовальных станков по динамическому качеству. Интегральные оценки вычисляются для нескольких станков одной модели при практически одинаковых режимах шлифования (рис. 3).

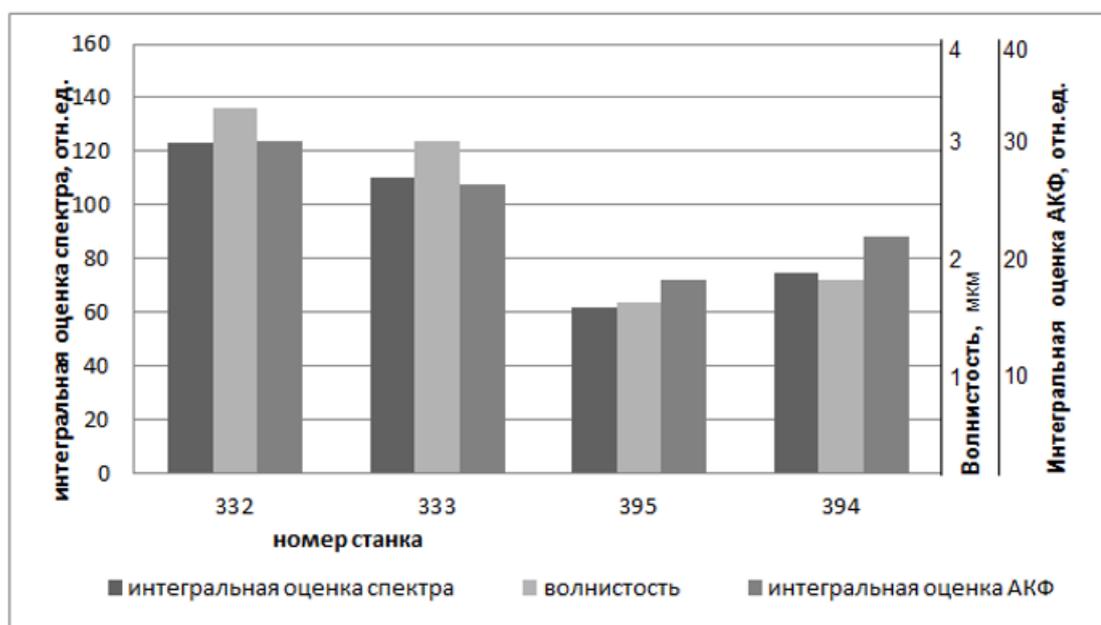


Рис. 3. Значения интегральных оценок спектра, интегральных оценок АКФ для внутришлифовальных станков SIW-5 и волнистости дорожек качения колец подшипников (среднее значение по 5 кольцам, допустимое значение 2 мкм)

Результаты показывают, что изменения интегральных оценок спектра согласуется с изменением интегральных оценок АКФ и параметра точности дорожки качения колец – волнистости. Приведенные результаты позволяют сопоставить динамическое качество станков и наметить технические мероприятия по повышению качества обработки на станках с низкой точностью дорожек качения.

На рис. 4 приведены результаты измерений на тех же станках, но в данном случае оценивалась однородность структуры поверхностного слоя дорожек качения. Цифрами над правыми столбиками указаны баллы, которыми оценивается качество шлифованного поверхностного слоя вихретоковым методом.

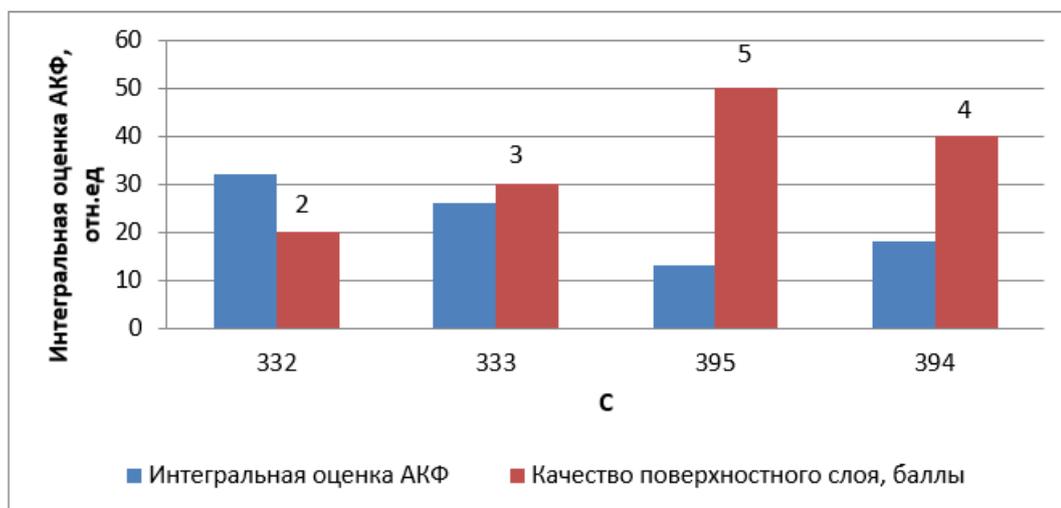


Рис. 4. Интегральные оценки АКФ и качество поверхностного слоя дорожек качения колец, обработанных на внутришлифовальных станка модели SIW-5

Из рисунков видно, что станок № 395 имеет самое низкое значение интегральных оценок АКФ, что соответствует наиболее высокому динамическому качеству из рассмотренной группы станков и, соответственно, наиболее высокому качеству поверхностного слоя дорожки качения колец. На станках № 333 и № 394 следует скорректировать режим шлифования или провести техническое обслуживание, а на станке № 332, имеющем наиболее низкие показатели качества, необходимо выполнить ремонтные работы. Для более точного определения необходимых мероприятий на станках следует выполнить их диагностирование. Полученные результаты целесообразно использовать для составления электронного паспорта динамического качества каждого шлифовального станка, содержащегося в базе данных СМТП [9].

Вторым примером служит применение интегральных оценок АКФ при испытаниях станков, направленных на выбор режима шлифования колец с более высоким качеством. В производственных условиях это осуществлялось

путем небольшого изменения частоты вращения круга относительно назначенного по технологической карте.

На станке № 332 исходная заданная частота вращения абразивного круга составляла  $n = 6500$  об/мин, а качество поверхностного слоя, оцененное вихретоковым методом, составляло 3 балла (рис. 5). Изменение частоты вращения круга с шагом 400 об/мин (как в меньшую, так и в большую стороны) позволило определить как целесообразный режим шлифования с частотой  $n = 6900$  об/мин, при котором качество поверхностного слоя и производительность обработки повысились.

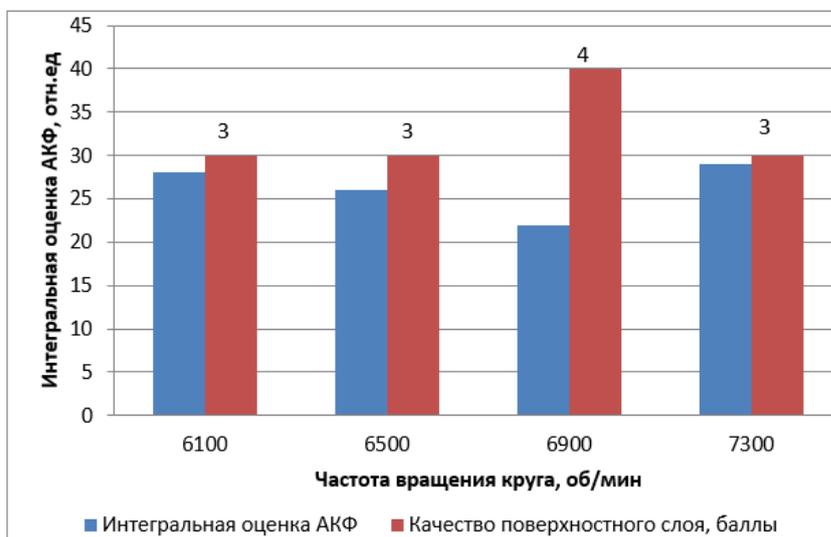


Рис. 5. Пример выбора режима шлифования с более высоким качеством поверхности качения

Следует отметить, что предложенное и апробированное методическое обеспечение может служить основой для разработки автоматизированной системы научных исследований и испытаний станков в условиях эксплуатации, являющейся необходимым компонентом системы мониторинга технологического процесса как элемента обратной связи в системе управления качеством продукции. Так же стоит добавить, что в последствии, необходимо учитывать количественную оценку тепловых

эффектов при шлифовании, таких, как распределение тепла и теплового потока [10-11].

### **Заключение**

1. Разработано методическое обеспечение для реализации управления качеством шлифования колец подшипников в производственных условиях, включающее ряд этапов и базирующееся на выявлении связи значений параметров качества деталей со значениями определенных функционалов, полученных из измеренных стохастических виброакустических колебаний динамической системы, по значениям которых оценивается динамическое качество автоматизированных станков.

2. По результатам автоматизированных измерений установлено, что минимальным значениям интегральных оценок АКФ и интегральных оценок спектра колебаний соответствует наиболее высокое динамическое качество станка и, соответственно, наиболее высокое качество обработки дорожек качения колец подшипников, на основе чего осуществляется как назначение режима шлифования, так и определение динамического качества индивидуально каждого станка для проведения при необходимости ремонтно-профилактических мероприятий.

## Литература

1. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
  2. Игнатьев А.А., Горбунов В.В., Игнатьев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2023. 240 с.
  3. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
  4. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.
  5. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение. 1988. 136 с.
  6. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М.: Машиностроение. 1987. 224 с.
  7. Шамсадова Я.Ш., Игнатьев А.А. Модель динамической системы шлифовального станка с учетом основных частот шпиндельного узла // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2024. С.104-109.
  8. Паштова Л.Г. Актуальные вопросы организации и управления производством на предприятии. Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2442](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2442)
  9. Вахидова К.Л., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Шухин В.В, Игнатьев С.А. Распознавание дефектов поверхностного слоя подшипников с применением метода фрактальной размерности // Инженерный вестник Дона. 2019. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5664](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5664)
  10. Brehl D.E., Dow T.A. Review of vibration-assisted machining. *Precis Eng*, 32 (2008), pp. 153-172.
-

11. Doman D.A., Warkentin A., R. Bauer Finite element modeling approaches in grinding Int J Mach Tools Manuf, 49 (2009), pp. 109-116

### References

1. Pronikov A.S. Programmnyj metod ispytaniya metallovezhushchih stankov [Software method for testing metal-cutting machines]. M.: Mashinostroenie, 1985. 288 p.
2. Ignat'ev A.A., Gorbunov V.V., Ignat'ev S.A. Saratov: SGTU, 2023. 240 p.
3. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Machine dynamics] M.: Mashinostroenie, 1967. 360 p.
4. Mihel'kevich V.N. Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem [Automatic grinding control]. M.: Mashinostroenie, 1975. 304 p.
5. Arshanskij M.M., SHCHerbakov V.P. Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu na metallovezhushchih stankah [Vibration diagnostics and precision control on metal-cutting machines]. M.: Mashinostroenie. 1988. 136 p.
6. Dobrynin S.A., Fel'dman M.S., Firsov G.I. Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibracii mashin [Methods for automated study of machine vibration]. M.: Mashinostroenie. 1987. 224 p.
7. SHamsadova YA.SH., Ignat'ev A.A. Avtomatizaciya i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sb. nauch. tr. Saratov: SGTU, 2024. p.104-109.
8. Pashtova L.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2442](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2442)
9. Vahidova K.L., Isaeva M.R., Xakimov Z.L., Shuxin V.V, Ignat'ev S.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5664](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5664)
10. Brehl D.E., Dow T.A. Review of vibration-assisted machining. Precis Eng, 32 (2008), pp. 153-172



11. Doman D.A., Warkentin A., R. Bauer Finite element modeling approaches in grinding Int J Mach Tools Manuf, 49 (2009), pp. 109-116.

**Дата поступления: 6.12.2024**

**Дата публикации: 27.01.2025**