

УДК 621.865 (075)

В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Н.В. Лищенко, канд. техн. наук,
Одесса, Украина

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИПУСКА НА ЗУБОШЛИФОВАНИЕ

Апробовано теоретико-імовірнісний підхід в задачі моделювання припуску на зубошліфування, відповідно до якого припуск містить дві компоненти: систематичну, викликану векторної сумою кінематичного і геометричного ексцентриситетів зубчастого колеса, і випадкову, обумовлену дією незалежних випадкових величин. Запропоновано новий метод моделювання припуску – на основі віртуальних приладів для синтезу і перетворення сигналу припуску.

Ключові слова: зубошліфування, моделювання припуску

Апробирован теоретико-вероятностный подход в задаче моделирования припуска на зубошлифование, в соответствии с которым припуск содержит две компоненты: систематическую, вызванную векторной суммой кинематического и геометрического эксцентриситетов зубчатого колеса, и случайную, обусловленную действием независимых случайных величин. Предложен новый метод моделирования припуска – на основе виртуальных приборов для синтеза и преобразования сигнала припуска.

Ключевые слова: зубошлифование, моделирования припуска

The theoretical-probabilistic approach is tested in the problem of modeling a stock allowance for gear grinding, in accordance with which the allowance contains two components: systematic, caused by the vector sum of the kinematic and geometric eccentricities of gear wheel, and the random one, due to the action of independent random variables. A new method of the allowance simulation is proposed, which is based on virtual instruments for synthesis and transformation of the allowance signal.

Keywords: gear grinding, allowance simulation

1. Постановка проблемы. Для определения припуска на зубошлифование можно воспользоваться теоретико-вероятностным подходом [1, 2], однако для этого необходимо иметь возможность разделить сигнал припуска на детерминированную и случайную компоненту [3]. Или доказать наличие случайной компоненты при известной детерминированной компоненте, например в условиях дискретного выборочного измерения припуска на отдельных равноотстоящих впадинах зубчатого колеса. Для этого существует два пути: или сбор экспериментальных статистических данных в заводских условиях на реальных зубчатых колесах разного типоразмера или разработка имитационной модели припуска на основе имеющихся выборочных заводских измерений. Первый путь отличается высокой трудоёмкостью и необходимостью иметь современное прецизионное метрологическое обеспечение (аппаратное и программное). Второй – связан с проблемой разработки математической модели припуска, которую можно настраивать на основе выборочных экспериментальных данных.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Теория определения припуска на механическую обработку является одним из основных разделов технологии машиностроения [4] и связана с общей проблемой моделирования технологических процессов [5]. Эту проблему пытаются решить на основе теоретико-вероятностного подхода [6], который в отличие от классического подхода [4] не связан с обязательным учётом ограниченного числа факторов (высота микронеровностей, дефектный слой, пространственные отклонения, погрешность установки). Теоретической предпосылкой для теоретико-вероятностного подхода является центральная предельная теорема А.М. Ляпунова, позволяющая ввести в модель припуска нормальный закон распределения случайной величины.

На современных зубошлифовальных станках с ЧПУ имеется возможность измерить припуск перед обработкой с помощью встроенных измерительных систем контактного типа. В качестве измерительного инструмента используют или шлифовальный круг, или тактильный датчик системы Renishaw. Известно, что припуск на зубошлифование содержит совокупность погрешностей, вызванных предыдущими операциями, и погрешность установки заготовки на зубошлифовальном станке [7-9]. Для сложнопрофильных деталей типа зубчатых колёс это положение остается в силе, но для определения погрешности базирования необходим функциональный пересчёт, учитывающий положение обрабатываемых поверхностей относительно технологических баз зубчатого колеса. Закономерная синусоидальная составляющая припуска с периодом 2π , обусловленная погрешностью базирования, вызвана отклонением центра заготовки зубчатого колеса от центра вращения планшайбы зубошлифовального станка [9].

Фактически после термической обработки делительная окружность зубчатого колеса получает случайное искажение формы, которое приводит к появлению дополнительной составляющей к указанной закономерной синусоидальной компоненте. Для определения фактического центра зубчатого венца строят среднюю окружность, располагая ее таким образом, чтобы расстояние от контура делительной окружности до средней окружности являлось наименьшим [7]. Фактический замкнутый контур делительной окружности представляют в виде периодической функции с периодом 2π и заменяют контур делительной окружности тригонометрическим рядом Фурье. Причем первый член ряда Фурье представляет собой основную гармонику, имеющую период 2π . Этот член ряда характеризует смещение оси вращения колеса относительно его геометрической оси – эксцентриситет. В работе [9] отмечается, что средняя линия окружности проводится таким образом, чтобы центр окружности совпадал с точкой, относительно которой все расстояния до любой точки контура имели бы наименьшую дисперсию. Из представленного в работе [9]

определения средней линии следует, что замкнутый искаженный контур делительной окружности заменяют средней линией, уравнение которой может быть получено методом наименьших квадратов. В той же работе [9] имеются данные по оценке отклонений длины общей нормали зубчатых колес, которые по данным автора являются случайными, имеющими центр группирования и среднеквадратическое отклонение в предположении нормального закона распределения погрешностей после зубонарезания и химико-термической обработки.

3. Целью статьи является апробирование теоретико-вероятностного подхода в задаче моделирования припуска на зубошлифование, а именно доказательство случайного характера соответствующей компоненты при имеющейся детерминированной составляющей. На этой основе строится моделирование и имитационное исследование по разработанной модели припуска на зубошлифование (modelling and simulation) по методике, описанной в работе [10].

4. Материалы исследования. Известно, что фактический припуск на зубошлифование на практике определяют через длину общей нормали. Поэтому, можно предположить, что случайное изменение длины общей нормали обуславливает случайное изменение припуска. Таким образом, появляется идея о случайной составляющей в припуске.

В соответствии с теоретико-вероятностным подходом, всякое отклонение величины какого-либо параметра от требуемого значения предполагается состоящим из двух частей: систематической (детерминированной, периодической, синусоидальной, регулярной) и случайной (аперiodической, стохастической, иррегулярной) [2]. В этой связи можно предположить, что величина припуска на зубошлифование содержит две составляющие: систематическую и случайную. При отсутствии измерений припуска на зубошлифовальном станке это предположение носит формальный характер. В то же время при наличии встроенных систем измерения припуска на станках с ЧПУ, например, на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250, данное предположение получает дальнейшее развитие. Например, при решении задачи определения максимального припуска на зубошлифование при ограниченном числе измерений.

Как следует из анализа Б.А. Тайца [9] геометрическое (векторное) суммирование кинематического и геометрического эксцентриситетов, в конечном счете, обуславливает синусоидальное распределение припуска по периферии зубчатого колеса. Такое распределение обуславливает детерминированную или систематическую составляющую припуска, поскольку эту составляющую находят по детерминированной функции.

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что в сигнале припуска содержится

систематическая синусоидальная компонента, вызванная погрешностью базирования (геометрический эксцентриситет или векторная сумма предыдущего кинематического и текущего геометрического эксцентриситетов) и другие компоненты [11]. Если эти компоненты случайны, то возможна научная гипотеза о том, что сигнал припуска содержит систематическую синусоидальную и случайную компоненты. Эта гипотеза является исходной предпосылкой для разработки теории определения припуска на основании его дискретных равноотстоящих (по центральному углу зубчатого колеса) измерений. Для доказательства предположения о случайности одной из двух компонент припуска необходимо проверить соответствие распределения величины этой компоненты нормальному закону. Для этого используют аналитический способ проверки соответствия опытного распределения нормальному распределению, например, с помощью критерия W для выборок объемом от 3 до 50 результатов [12].

Рассмотрим методику имитационного моделирования припуска на примере результатов его измерения для 3-х зубчатых колес типа В1318В.41.004 (код завода-изготовителя). Параметры колес: $z=29$; $m=7$ мм; $d_a=233,4$ мм; $d_b=199,3473$ мм; $d_f=207,0270$ мм; ширина зуба $B=60$ мм; коэффициент смещения исходного контура $x=0,545$; угол профиля $\alpha=20^\circ$; угол наклона зуба $\beta=-18^\circ$.

Например, для зубчатого колеса № 1 первичные результаты измерения припуска по левой $z^L(n)$ и правой $z^R(n)$ сторонам 29 впадин показаны графически (рис. 1).

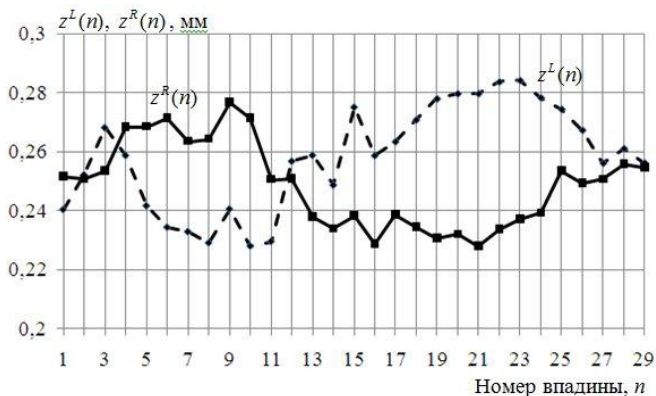


Рисунок 1 – Распределение припуска по правой $z^R(n)$ и левой $z^L(n)$ стороне впадин заготовки зубчатого колеса после выравнивания минимальных значений припуска

Данные на рис.1 нормируют путем вычитания соответствующих постоянных составляющих по левой z_{ave}^L и правой z_{ave}^R сторонам впадин (рис. 2), т.е.

$$z_{rated}^L(n) = z^L(n) - z_{ave}^L, \quad (1)$$

$$z_{rated}^R(n) = z^R(n) - z_{ave}^R. \quad (2)$$

В свою очередь в соответствии с теоретико-вероятностным подходом переменную составляющую лево- и правостороннего припуска представим в виде суммы двух компонент [3]: систематической x_β и случайной x_γ , например, для левой стороны получим

$$z_{rated}^L(n) = x_\beta + x_\gamma. \quad (3)$$

Зависимость (3) соответствует аддитивной модели зашумлённого сигнала [13].

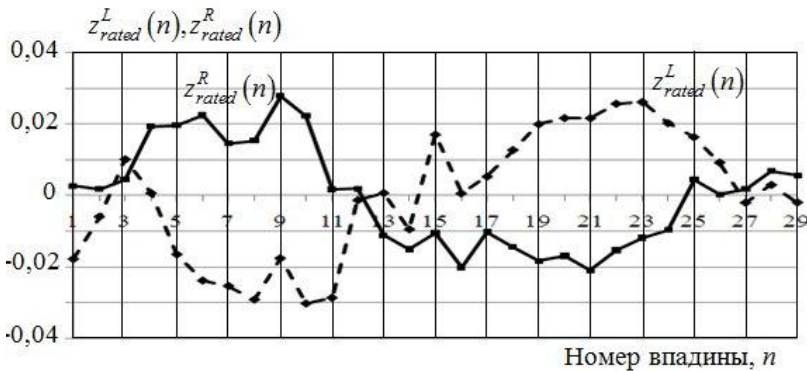


Рисунок 2 – Нормированный сигнал припуска для левой $z_{rated}^L(n)$ и правой $z_{rated}^R(n)$ сторон впадин

Далее рассмотрим нормированный сигнал, например, левостороннего припуска $z_{rated}^L(n)$ (рис. 3). Разделим этот сигнал на систематическую и случайную составляющие по следующей методике.

1. Из суммарного сигнала припуска $z_{rated}^L(n)$ вычитают гармоническую составляющую x_β , полученную с помощью метода наименьших квадратов

(рис. 3). Получают сигнал припуска x_γ , который не содержит систематическую составляющую.

2. Для сигнала x_γ определяют критерий W в соответствии с известной методикой [12].

3. Сравнивают значение критерия W с табличным значением W^* .

4. Гипотеза о нормальности закона распределения справедлива при $W > W^*$.

Для преемственности исходных данных, помещённых на рис. 1 и рис. 2 (отсчёт переменной n по оси абсцисс 1...29), с последующими временными и частотными зависимостями (отсчёты 0...28 и 0...2 π) на рис. 3 показаны обе оси абсцисс.

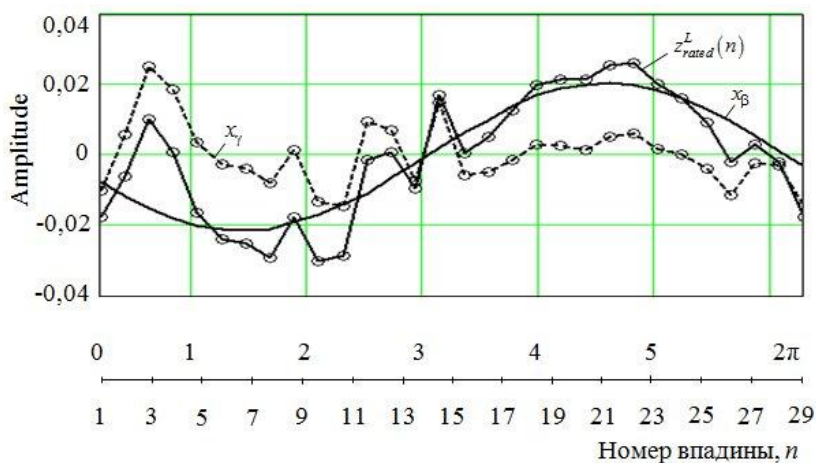


Рисунок 3 – Представление исходного нормированного сигнала припуска

$$z_{rated}^L(n) \text{ в виде суммы двух компонент: } x_\beta \text{ и } x_\gamma$$

Например, для левостороннего припуска критерий $W = 0,959141$. При доверительной вероятности 95 % $W^* = 0,927$. Таким образом, сигнал x_γ (рис. 3) подчиняется нормальному закону распределения. Аналогичные процедуры проверки на нормальность выполнены для экспериментальных данных по 3-м зубчатым колесам того же типоразмера (см. табл.).

Таблица – Экспериментальное определение критерия W

Номер ЗК	1	2	3
	Значение критерия W		
Левая сторона	0,959141	0,937549	0,952079
Правая сторона	0,950315	0,948181	0,941853

Таким образом, анализируемые дискретные значения случайной компоненты припуска χ_γ подчиняются нормальному закону распределения, что можно назвать необходимым условием случайного процесса.

Другим способом, доказывающим, что эти дискретные значения припуска относятся к случайному процессу, является проверка известного свойства случайного процесса: Например, свойство эргодичности стационарного случайного процесса, заключается в следующем: усреднение ансамбля реализаций случайного процесса по множеству приводит к тому же результату, что усреднение одной реализации по времени. Причем это приводит к уменьшению и в пределе к исчезновению амплитудного спектра случайного процесса [14]. Однако для приближения к пределу необходимо иметь достаточное количество реализаций случайного процесса, 3-х реализаций не достаточно. Для увеличения количества реализаций, т.е. для создания ансамбля реализаций, разработана имитационная модель в среде LabVIEW 8.6. Модель представляет собой виртуальный прибор (рис.4), позволяющий генерировать реализации случайного процесса – случайной составляющей сигнала припуска. Для этого формируют соответствующий нормированный дискретный сигнал припуска в виде электронной таблицы отсчетов для программы LabVIEW 8.6, например, в виде текстового файла. В среде LabVIEW 8.6 программируют виртуальный прибор (рис. 4) для выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ), на вход которого поступают данные о нормированных сигналах из сформированных текстовых файлов.

Для работы в среде LabVIEW 8.6 с сигналом припуска необходимо работать с блоками Simulate Arbitrary Signal, которые вызываются палитрой Functions. При вызове блока Simulate Arbitrary Signal (блок 1 на рис.4) открывается окно Configure Simulate Arbitrary Signal, в котором необходимо выбрать Define Signal. В открывшемся окне Define Signal есть возможность задания сигнала (X , Y) с клавиатуры или путем считывания созданного текстового файла сигнала, который сохранен в формате *.lvm* (читается и редактируется в программе Excell). В данном случае все сигналы о припуске (припускограммы) были сохранены в соответствующих файлах с форматом *.lvm* и загружены с помощью клавиши Load Data в окне Define Signal. В блоке 2 выполнена процедура БПФ.

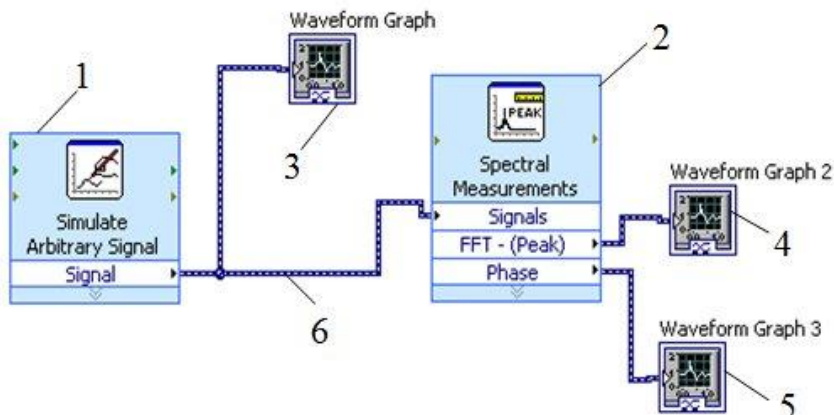


Рисунок 4 – Виртуальный прибор для выполнения БПФ в среде LabVIEW 8.6

Графическое изображение исходного сигнала о припуске в виде его амплитудного (рис. 5) и фазового спектра выведено на лицевую панель виртуального прибора. Этот вывод данных выполняют с помощью блоков индикации Waveform Graph (блоки 3, 4 и 5 на рис. 4). Эти блоки находятся в палитре Controls → Graph Indicators. Сигналы распространяются по блок-диаграмме посредством виртуальных линий связи 6 (рис. 4).

Исходный сигнал о припуске, измеренном на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250, можно записать, например, для левой стороны впадин измеряемого зубчатого колеса, в виде дискретной функциональной зависимости

$$f(n) = z_{rated}^L(n). \quad (4)$$

Для измеренных на указанном станке зубчатых колёс (ЗК), соответствующие временные и частотные зависимости для ЗК №1, ЗК № 2 и ЗК № 3 можно представить в виде

$$f_1(n) = z_{rated}^{L1}(n), \quad F\{f_1(n)\} = F\{z_{rated}^{L1}(n)\}, \quad (5)$$

$$f_2(n) = z_{rated}^{L2}(n); \quad F\{f_2(n)\} = F\{z_{rated}^{L2}(n)\}, \quad (6)$$

$$f_3(n) = z_{rated}^{L3}(n); \quad F\{f_3(n)\} = F\{z_{rated}^{L3}(n)\}. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим спектрограмму (рис. 5, а) для ЗК №1 с исходным сигналом припуска $f_1(n) = z_{rated}^{L1}(n)$, содержащим систематическую и случайную компоненты по формуле (3). После удаления из этого сигнала систематической компоненты x_β путём её вычитания из исходного сигнала (рис. 3) виртуальный прибор (рис. 4) формирует спектр случайной составляющей x_γ сигнала припуска (рис. 5, б) на котором хорошо видно отсутствие первой гармоники этого сигнала.

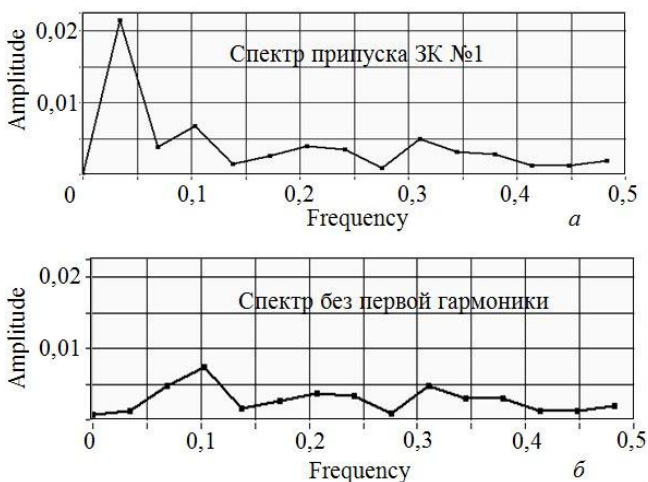


Рисунок 5 – Амплитудный спектр исходного сигнала $z_{rated}^L(n)$ припуска (а) и его случайной компоненты x_γ (б), не содержащей первую гармонику

Разработанный виртуальный прибор является моделью припуска на зубошлифование [10], содержащей временную (или пространственную) и частотную характеристику припуска в виде отдельной реализации случайного процесса, которая может имитировать результаты измерения припуска на отдельном зубчатом колесе. На основе этого виртуального прибора может быть создана статистическая многоканальная модель для получения ансамбля реализаций припуска (рассмотрена далее), что позволяет изучать припуск на зубошлифование путём его имитационного моделирования.

5. Выводы и перспективы развития

1. На основании экспериментального измерения припуска для 3-х зубчатых колёс получены временные (исходные) и частотные (после БПФ) характеристики сигнала припуска.

2. Выявлен гармонический состав сигнала припуска, содержащий систематическую (синусоидальную) и случайную компоненты.

3. Установлен нормальный закон распределения случайной компоненты припуска, измеренного в заводских условиях.

4. Из предварительного анализа следует, что спектр усредненной предполагаемой случайной компоненты X_{γ} должен иметь слабую тенденцию к исчезновению, что подтверждает правомерность предположения о наличии случайной компоненты X_{γ} . Поскольку данная тенденция в одной реализации сигнала припуска слабо выражена, достоверность данного вывода требуется подтвердить дополнительно (следует далее).

Список использованных источников: 1. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход), под ред. А.А. Первозванского / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с. 2. Ларшин В.П. Теоретико-вероятностный и частотный подходы в технологическом анализе / В.П. Ларшин, Н.В. Лиценко, В.В. Нежебовский // Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали ХХІІ Міжнар. науков.-практичн. конф., 7-9 грудня 2016 р. – Харків. – Д: ЛІРА, 2016, С. 208-212. 3. Лиценко Н.В. Разделение профиля поверхности на систематическую и случайную составляющие / Н.В. Лиценко, В.П. Ларшин // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. . – Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. – С. 62-73. 4. Лиценко Н.В. Анализ способов определения припуска на механическую обработку / Н.В. Лиценко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2011. – Вип. 1(35). – С.36-42. 5. Гришкевич А.В. Проектирование операций механической обработки / А.В. Гришкевич, И.Л. Цымбал. – Х: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 144 с. 6. Васин А.Н. Теоретико-вероятностные основы формирования припуска на механическую обработку / А.Н. Васин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 128 с. 7. Пономарев В.П. Оптимизация процессов механической обработки зубчатых колес / В.П. Пономарев. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1974. – 268 с. 8. Качество изготовления зубчатых колёс / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояришинов и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. 9. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колёс / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с. 10. Larshin V.P. Grinding system modelling and simulation / V.P. Larshin, N.V. Lishchenko // Современная наука: проблемы, инновации, решения – IV: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. (Курск, 15-16 декабря 2016 г.). – Курск: ООО "Учитель", 2016. – С. 13-18. 11. Ларшин В.П. Исследование технологической системы зубошлифования / В.П. Ларшин, Н.В. Лиценко // Перспективні технології та прилади. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С.104-114. 12. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов измерения / К.Г. Рего. – К.: Техніка, 1987. – 128 с. 13. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич, изд. второе испр. – М.: Наука, 1965. – 275 с. 14. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.

Bibliography (transliterated): 1. Khusu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyy podkhod), pod red. A.A. Pervozvanskogo /. – М.: Nauka, 1975. – 344 s. 2. Larshin V.P., Lishchenko N.V., Nezhebovskiy V.V. Teoretiko-veroyatnostnyy i

chastotnyy podkhody v tekhnologicheskoy analize. – Fizichni ta komp'yuterni tekhnologii. Materiali KhKhII Mizhnar. nauk.- praktichn. konf., 7-9 grudnya 2016 r. – Kharkiv. – D: LIRA, 2016, S. 208-212. **3.** Lishchenko N.V., Larshin V.P. Razdelenie profilya poverkhnosti na sistematischeckuyu i sluchaynyuyu sostavlyayushchie. – Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekh. sb. . – Khar'kov: NTU «KhPI», 2016. – S. 62-73. **4.** Lishchenko N.V., Larshin V.P., Makarov S.N. Analiz sposobov opredeleniya pripuska na mekhanicheskuyu obrabotku. – Pratsi Odes'kogo politekhnichnogo universitetu: Naukoviy ta naukovo-virobnichiy zbirnik. – Odesa, 2011. – Vip. 1(35). – S.36-42. **5.** Grishkevich A.V., Tsybmal I.L. Proektirovanie operatsiy mekhanicheskoy obrabotki. – Kh: Vishcha shk. Izd-vo pri Khar'k. un-te, 1985. – 144 s. **6.** Vasin A.N. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy formirovaniya pripuska na mekhanicheskuyu obrabotku. – Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2006. – 128 s. **7.** Ponomarev V.P. Optimizatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki zubchatykh koles. – Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe kn. izd-vo, 1974. – 268 s. **8.** Kachestvo izgotovleniya zubchatykh koles / A.V. Yakimov, L.P. Smirnov, Yu.A. Boyarshinov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 191 s. **9.** Tayts B.A. Tochnost' i kontrol' zubchatykh koles. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 368 s. **10.** Larshin V.P., Lishchenko N.V. Grinding system modelling and simulation. – Sovremennaya nauka: problemy, innovatsii, resheniya – IV: materialy nauchn.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. (Kursk, 15-16 dekabrya 2016 g.). – Kursk: OOO "Uchitel", 2016. – S. 13-18. **11.** Larshin V.P., Lishchenko N.V. Issledovanie tekhnologicheskoy sistemy zuboshlifovaniya – Perspektivni tekhnologii ta priladi. – Luts'k: Luts'kiy NTU, 2017. – S.104-114. **12.** Rego K.G. Metrologicheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniya. – K.: Tekhnika, 1987. – 128 s. **13.** Kharkevich A.A. Bor'ba s pomekhami, izd. vtoroe ispr. – M.: Nauka, 1965. – 275 s. **14.** Gutnikov V.S. Fil'tratsiya izmeritel'nykh signalov. – L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. – 192 s.