

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКА НА ЗУБОШЛИФОВАНИЕ ПО ЕГО ДИСКРЕТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

*Разработан способ восстановления непрерывного сигнала припуска по его дискретным измерениям. Восстановление сигнала выполнено на основании частотного преобразования Фурье. Указанный способ может быть использован для определения припуска в пропущенных при измерении впадинах. Установлена зависимость между числом дискретных измерений припуска и числом его гармонических составляющих.*

**Ключевые слова:** профильное зубошлифование, восстановление сигнала припуска, дискретный сигнал припуска, непрерывный сигнал припуска, частотный анализ сигнала припуска.

При профильном зубошлифовании величина припуска на отдельных участках зубчатой поверхности является неопределённой. Во-первых, это вызвано влиянием погрешности установки зубчатого колеса на планшайбу зубошлифовального станка, при которой центр заготовки зубчатого колеса (ЗК) не совпадает с центром вращения планшайбы. Эта погрешность приводит к синусоидальному характеру изменения припуска по левой и правой сторонам впадин ЗК. Причём, это – детерминированная составляющая припуска, вызванная кинематическим эксцентриситетом предыдущей операции и геометрическим эксцентриситетом текущей, которые складываются векторно [1]. Во-вторых, на припуск влияет искажение формы ЗК в связи с влиянием на неё химико-термической обработки ЗК, например, влияние цементации и закалки. Такая химико-термическая обработка сопровождается непредсказуемыми деформациями сложнопрофильной заготовки (усадка, растяжка, изгиб, кручение и их комбинации), что приводит к изменению толщины снимаемого слоя материала на последующей операции шлифования упрочнённых поверхностей зубьев [2, 3]. При определении припуска на обработку даже более простых поверхностей, например, плоских и цилиндрических, влияние химико-термической обработки обычно учитывают путём соответствующего увеличения припуска на последующую операцию шлифования [4, 5]. В результате влияния указанных факторов при зубошлифовании эвольвентного профиля в разных впадинах по периферии зубчатого колеса, припуск оказывается переменным, как по высоте впадины, так и в пределах оборота ЗК.

Пономаревым В.П. установлено, что в результате химико-термической обработки у зубчатых колес изменяется толщина зуба, как по периферии, так и по высоте зуба: у ножки зуба толщина больше, чем у вершины зуба [2]. Также у зубчатых колес химико-термическая обработка вызывает отклонения угла профиля исходного контура и шага зацепления. Таким образом, вследствие химико-термической обработки, величина припуска не постоянна как по высоте зуба в одной впадине, так и по периферии зубчатого колеса.

Современные зубошлифовальные станки с ЧПУ оснащены системами для измерения припуска по периферии зубчатого колеса с возможностью выбора числа измерений. При максимально возможном числе измерений получают адекватное представление о припуске в каждой впадине зубчатого колеса. Однако это связано с затратами времени на измерение, и с увеличением числа впадин уменьшается производительность операции зубошлифования. Однако в литературе нет сведений о выборе требуемого числа измерений и способах определения припуска во впадинах зубчатого колеса, в том числе в тех, которые был пропущены при измерении.

**Цель работы.** Исследовать влияние числа измерений припуска и возможность определения припуска по периферии зубчатого колеса по результатам его равноотстоящих выборочных измерений в отдельных впадинах.

**Основной материал.** Закон изменения припуска можно представить некоторой функцией от координат точек обрабатываемого участка. Например, при профильном зубошлифовании припуск на боковой стороне обрабатываемого профиля изменяется по закону, близкому к синусоидальному [1, 3, 6, 7]. Следовательно, в качестве детерминированной составляющей сигнала припуска может быть взята синусоидальная функция.

Однако экспериментальные исследования показывают [6,7], что указанная синусоидальность изменения припуска – это только первое приближение более сложного

закона его изменения. Выявить фактическое распределение припуска по периферии зубчатого колеса можно только путём его предварительного измерения, например, перед обработкой на этапе наладки зубошлифовальных станков. В свою очередь указанное измерение припуска занимает часть штучного времени операции и отражается на увеличении трудоёмкости обработки. Поэтому возникает задача оптимизировать число измерений припуска на различных участках сложнопрофильной поверхности, чтобы при минимальных затратах времени на измерение восстановить огибающую линию припуска по результатам его дискретных измерений на отдельных участках, например, зубчатой поверхности. Такую задачу можно решить путём восстановления припуска в отдельных, пропущенных при измерениях, впадинах заготовки ЗК. Математической основой восстановления припуска является преобразование Фурье, которому подвергают последовательность дискретных результатов измерения припуска. Чтобы выявить требуемое количество гармонических составляющих в сигнале припуска можно воспользоваться теоремой отсчётов В.А. Котельникова.

При разработке способа восстановления сигнала припуска в пропущенных впадинах могут быть использованы различные методы идентификации модели восстанавливаемого сигнала припуска. Например, оценку параметров модели производят методом наименьших квадратов, если заранее известно, что в сигнале присутствует гармоническая компонента, период которой известен [8]. Однако, как показано ниже в основе восстанавливаемой функции содержится не одна синусоидальная компонента, а некий набор таких компонент с разными периодами изменения, кратными периоду основной гармоники.

Восстановление сигнала припуска выполнено на основании частотного преобразования Фурье по дискретным отсчётам с равным угловым шагом [9]. Число отсчётов (40, 20, 10, 8 и 4) соответствует фактическому числу измерений припуска с постоянным угловым шагом между отсчётами ( $9^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ ). В соответствии с указанной теоремой отсчётов потенциально выявляемые частоты гармоник для указанного числа отсчётов составляют  $20f_1$ ,  $10f_1$ ,  $4f_1$  и  $2f_1$ , где  $f_1$  – частота основной гармоники с периодом  $2\pi$ . Здесь следует отметить, что понимается под частотой гармонических составляющих сигнала припуска. Дело в том, что традиционное преобразование Фурье при всех его разновидностях, используемых в компьютерных технологиях (прямое, обратное, непрерывное, дискретное, быстрое), связывает временную и частотную области изменения информационного сигнала. В этом случае частота гармонических составляющих сигнала измеряется в герцах. Однако в данном случае первичный сигнал припуска – это изменение припуска не во времени, а по длине измерительной окружности заготовки зубчатого колеса. Здесь удобнее пользоваться условной (относительной) частотой первичного сигнала, под которой понимают величину, обратную шагу (периоду) этого сигнала. Например, первая гармоника сигнала о припуске имеет шаг  $2\pi R$  мм, где  $R$  – радиус измерительной окружности заготовки.

Выполнены исследования по восстановлению фактического распределения припуска по правой и левой сторонам впадин зубчатого колеса ДТМВ 478. БЭ 40.005.

**Методика восстановления сигнала о припуске** включает следующие этапы.

1. Измеряют припуск на левой и правой боковых сторонах во всех впадинах зубчатого колеса, например в 40 впадинах на зубчатом колесе с 40 зубьями (рис.1). Формируют соответствующий дискретный сигнал в виде электронной таблицы отсчетов для программы LabVIEW 8.6, например, в виде текстового файла.

Припуск при зубошлифовании на станке с ЧПУ оценивают с помощью встроенной измерительной системы тактильного (tactile) типа, например, измерительной системы Renishaw.

2. Имея эти данные, как эталон для сравнения, формируют разные варианты равноотстоящих дискретных измерений  $N$  и соответствующие текстовые файлы для программы LabVIEW 8.6, причем  $2 \leq N \leq z$  ( $z$  – число зубьев). Например, для зубчатого колеса с 40 зубьями ( $z=40$ ) выбраны следующие варианты численных значений  $N$ : 2, 4, 8, 10, 20 и 40.

3. Производят нормализацию (rating) результатов измерений путем определения и вычитания постоянной составляющей для левой  $z_{ave}^L$  и правой  $z_{ave}^R$  боковых сторон впадин из текущих результатов измерений припуска

$$z_{ave}^L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^L \quad \text{и} \quad z_{ave}^R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^R .$$

Нормированный (rated) сигнал для левой и правой стороны имеет вид (рис.2)

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

$$z_{rated}^L = z^L(n) - z_{ave}^L \quad \text{и} \quad z_{rated}^R = z^R(n) - z_{ave}^R$$

Для данного колеса  $z_{ave}^L = 0,240135$  мм;  $z_{ave}^R = 0,283208$  мм.

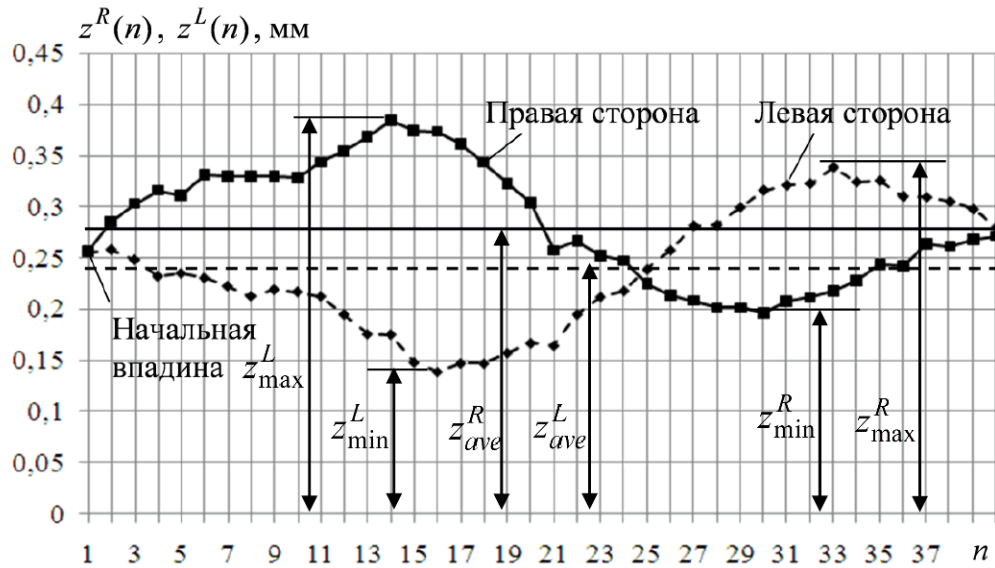


Рис.1. Сигнал припуска по правой  $z^R(n)$  и левой  $z^L(n)$  сторонам впадин ЗК после центрирования измерительного инструмента в начальной впадине

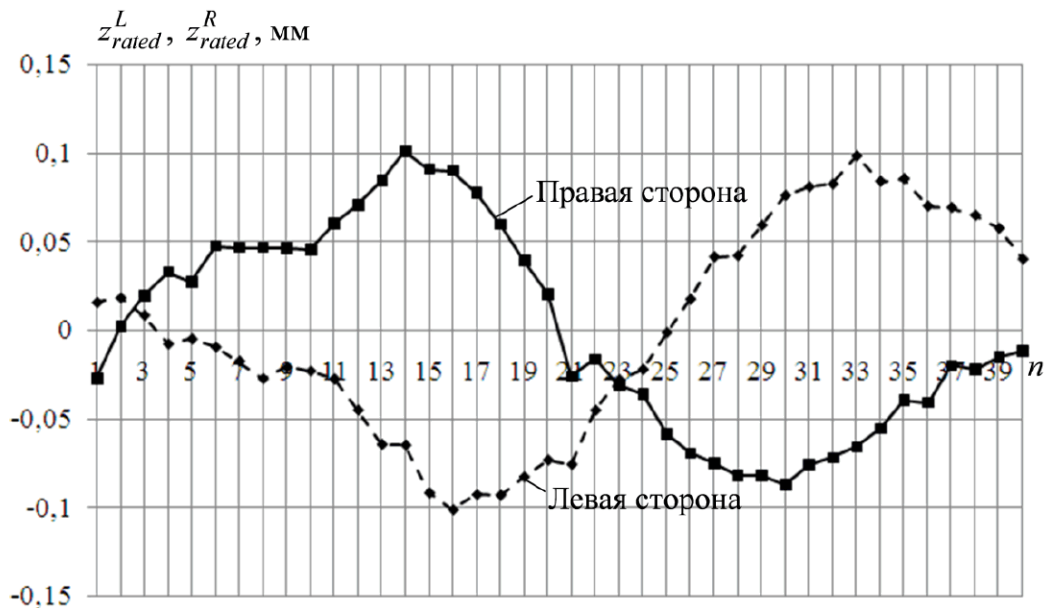


Рис.2. Нормированный (без постоянной составляющей) сигнал припуска для левой  $z_{rated}^L$  и правой  $z_{rated}^R$  сторон

4. В среде LabVIEW 8.6 программируют виртуальный прибор (рис.3) для выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ), на вход которого поступают данные о нормированных сигналах из сформированных текстовых файлов для каждого из указанных вариантов.

Для работы в среде LabVIEW с сигналом о припуске необходимо работать с блоками **Simulate Arbitrary Signal**, которые вызываются палитрой **Functions**. При вызове блока **Simulate Arbitrary Signal** (блок 1 на рис.3) открывается окно **Configure Simulate Arbitrary Signal**, в котором необходимо нажать клавишу **Define Signal**. В открывшемся окне **Define Signal** есть возможность задания сигнала (X, Y) с клавиатуры или путем считывания заранее созданного сигнала, который сохранен в файле с форматом *.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 окно **Define Signal**. В блоке 2 выполнена процедура быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Графическое изображение сигнала о припуске, амплитудный и частотный спектры выведены на лицевую панель виртуального прибора с помощью блоков индикации **Waveform Graph** (блоки 3, 4 и 5 на рис.3, соответственно). Данные блоки находятся в палитре **Controls** → **Graph Indicators**. Данные распространяются по блок-диаграмме посредством виртуальных линий связи 6 (рис.3).

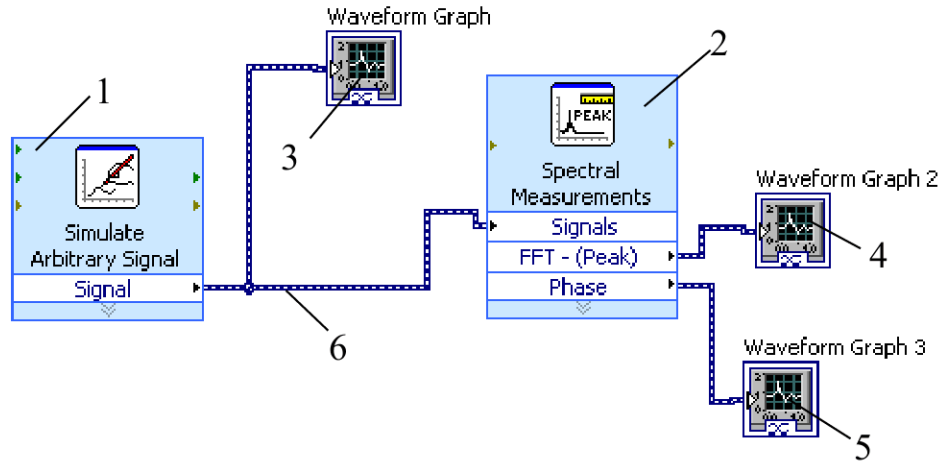


Рис.3. Виртуальный прибор для выполнения БПФ

5. Для каждой стороны профиля выявляют общее число гармонических составляющих сигнала (рис.4): для левой стороны -  $k^L(N)$ , для правой -  $k^R(N)$ . Фиксируют амплитуды и фазы доминирующих составляющих для левой  $k_d^L(N)$  и правой  $k_d^R(N)$  сторон (табл.1).

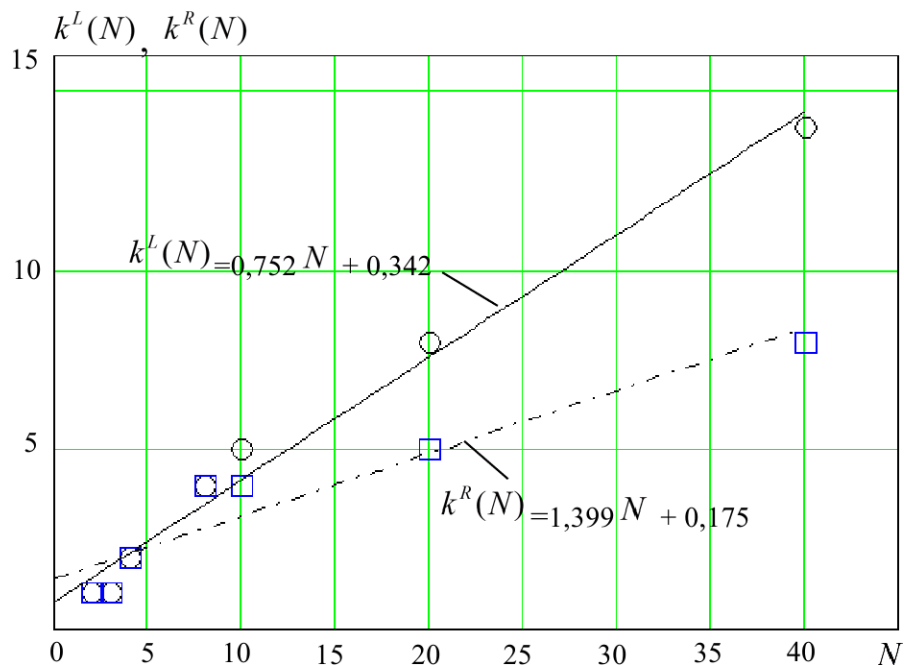


Рис. 4. Зависимость числа гармонических составляющих сигнала припуска  $k^L(N)$  и  $k^R(N)$  от числа  $N$  его дискретных измерений

Особенностью частотного анализа дискретных сигналов, характеризующих ограниченный ( $2\pi$ ) участок исходного сигнала (аналог временного процесса на ограниченном участке времени), является необходимость многократного повторения дискретного исходного

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

сигнала протяженностью  $2\pi$  (в радианах) или  $2\pi R$  (в миллиметрах). Т.к. периодические составляющие дискретного сигнала теоретически могут быть выявлены только для исходного «бесконечного» во времени периодического сигнала. Причём, с уменьшением числа отсчётов на периоде  $2\pi$  число необходимых повторов сигнала на этом периоде (40 отсчётов, 20 отсчётов, 10 отсчетов, 8 отсчётов, 4 отсчёта, 3 отсчета и 2 отсчета) возрастает. Путём моделирования в программе LabVIEW 8.6 экспериментально установлено число необходимых повторов указанных периодов дискретных последовательностей: 3, 5, 10, 10, 20, 20 и 20 повторов. При уменьшении числа повторов, по сравнению с указанными числами, идентификация амплитуд и фаз составляющих гармоник в программе LabVIEW 8.6 затрудняется.

Таблица 1.

Зависимость числа гармонических составляющих сигнала припуска от числа его измерений

N	Левая сторона		Правая сторона	
	$k^L(N)$	$k_d^L(N)$	$k^R(N)$	$k_d^R(N)$
2 (2+1)	1	1	1	1
3 (3+1)	2	1	1	1
4 (4+1)	2	1	2	1
8 (8+1)	4	3	4	3
10 (10+1)	5	4	4	4
20 (20+1)	8	4	5	4
40 (40+1)	14	4	8	4

Примечание: «+1» означает дополнение до периода  $2\pi$ .

Например, для распределения припуска (нормированный сигнал) по левой стороне впадин зубчатого колеса (рис.5) амплитудный спектр (рис.6) содержит 6 доминирующих гармоник:  $f_1, 2f_1, 3f_1, 4f_1, 6f_1, 10f_1$ .

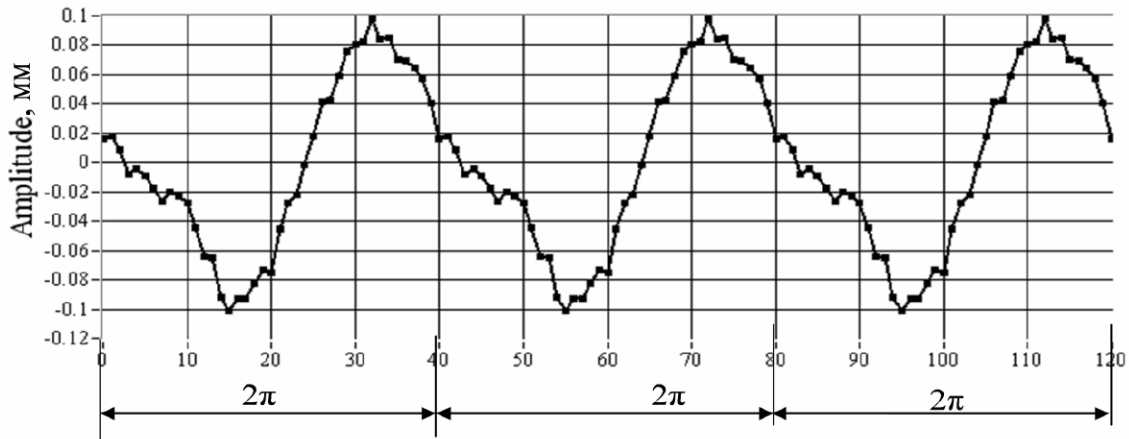


Рис.5. Нормированный сигнал припуска по левой стороне при  $N=40$  в программе LabVIEW 8.6

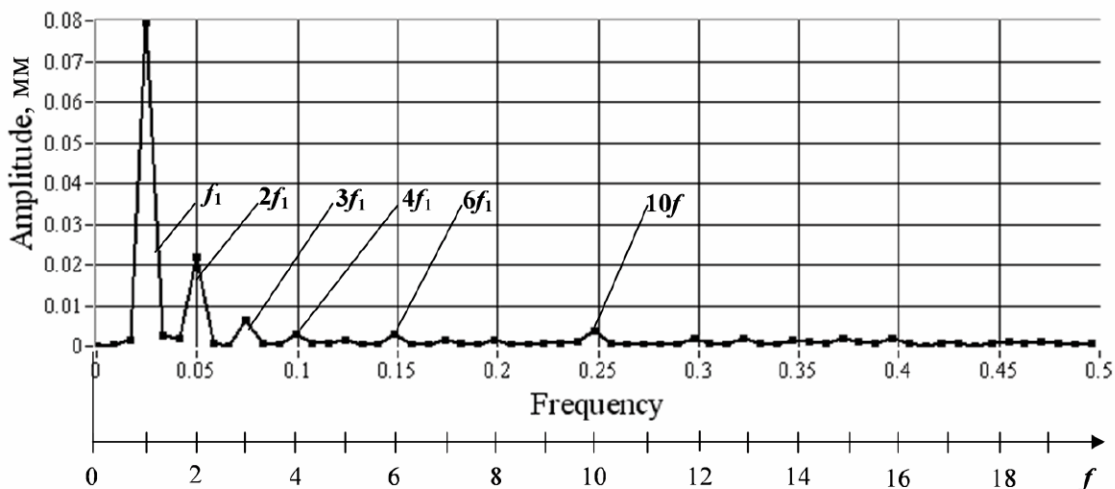
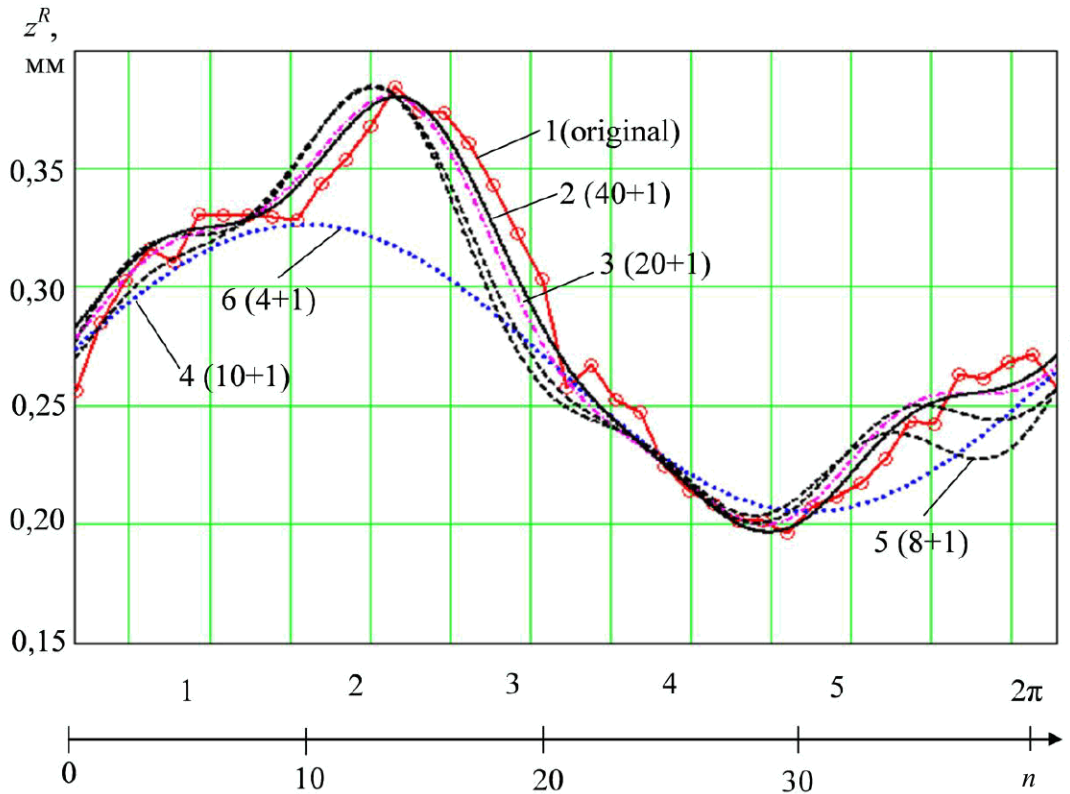


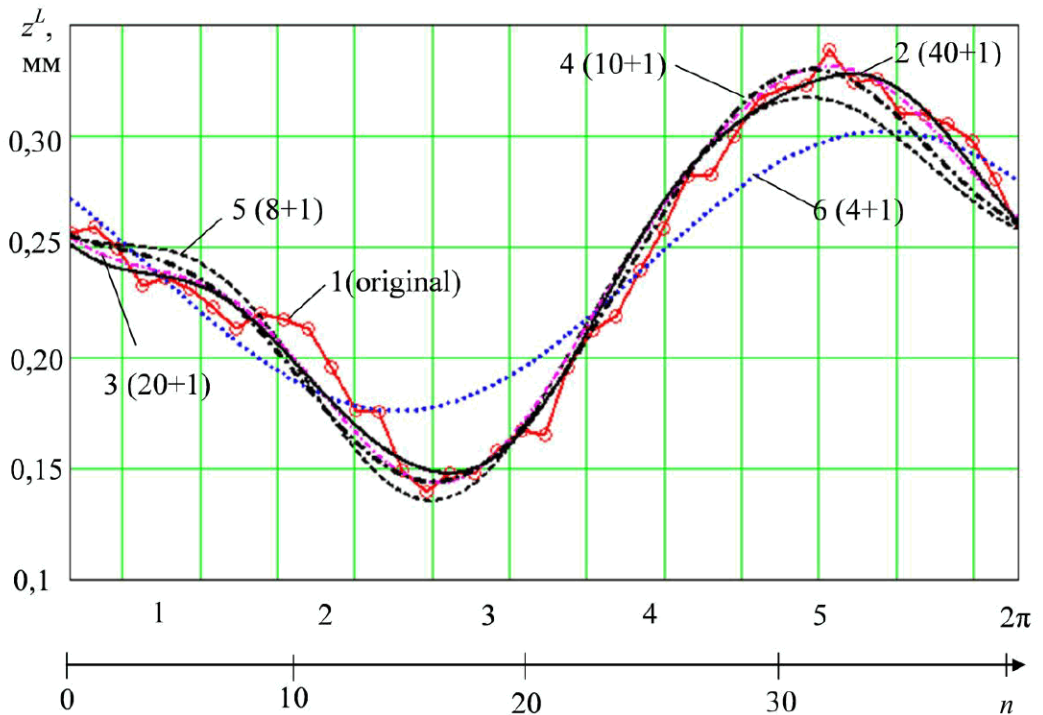
Рис.6 Амплитудный спектр нормированного сигнала припуска по левой стороне

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

6. Зная частотний состав первичного сигнала (рис.1), восстанавливают сигнал о припуске на боковых сторонах впадин ЗК суммированием синусоидальных компонент с разными гармониками (рис.7). Для данного ЗК непрерывный сигнал восстановлен в соответствии с выявленными доминирующими гармониками сигнала в п. 5 (табл.1).



a)



б)

Рис. 7 Восстановленный сигнал припуска по правой  $z^R$  (а) и левой  $z^L$  (б) сторонам впадин ЗК («+1» означает дополнение до периода  $2\pi$ )



## ПЕРСПЕКТИВНИ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

На рис.7 показано:  $N = 40$  (линия 2),  $N = 20$  (линия 3),  $N = 10$  (линия 4),  $N = 8$  (линия 5) и  $N = 4$  (линия 6). С увеличением числа измерений (от 2 до 20) восстановленный сигнал о припуске приближается к эталонному сигналу  $N=40$ . При  $N=10$  (рис.7, линия 4) восстановленный сигнал припуска практически не отличается от эталонного. Охарактеризуем восстановленный сигнал припуска его экстремальными значениями:  $z_{\max}^L$ ,  $z_{\max}^R$ ,  $z_{\min}^L$ ,  $z_{\min}^R$ . Чем больше число  $N$  измерений припуска, тем меньше погрешность  $\delta$  при определении экстремальных значений припуска по сравнению с эталоном (табл.2).

Таблица 2.

### Экстремальные значения припуска

$N$	$z_{\max}^L$	$z_{\max}^R$	$z_{\min}^L$	$z_{\min}^R$
4	0,30203	0,32684	0,17703	0,20607
10	0,33082	0,3843	0,14474	0,20054
40 (эталон)	0,33855	0,38425	0,13925	0,19595
$\delta$ , % ( $N=4$ )	27,13	5,2	10,8	14,9
$\delta$ , % ( $N=10$ )	3,9	2,3	2,3	0,013
Примечание: в скобках указано число измерений.				

Видно (табл.2), что при  $N=10$  погрешность при определении экстремальных значений меньше, чем при  $N=4$ .

Таким образом, на примере ЗК с 40 впадинами (линия 1 на рис.7) выполнено восстановление сигнала припуска при различном числе  $N$  дискретных измерений припуска ( $2 \leq N \leq z$ , где  $z$  – число впадин ЗК).

Восстановленный сигнал припуска (the stock reconstruction information) может быть использован для шлифования ЗК с учетом индивидуальных особенностей расположения припуска.

#### Выводы.

1. Сигнал припуска представляет собой полигармонический сигнал. Этот сигнал можно представить как сумму синусоидальных компонент с разными периодами изменения, кратными периоду основной гармонике для всех возможных вариантов числа  $N$  измерений припуска.

2. Количество гармонических составляющих (гармоник) сигнала в спектре увеличивается с ростом числа  $N$  измерений припуска.

3. Установлено, что при увеличении числа равноотстоящих измерений на одном и том же интервале наблюдения, равном длине измерительной окружности, количество доминирующих гармонических составляющих сигнала возрастает, например, от 1 до 4, и при последующем росте числа измерений не изменяется. Т.е. достаточно измерить припуск во впадинах ЗК минимально необходимое число раз, например 10 раз из 40 возможных.

4. Восстановление сигнала в его временной области по отдельным гармоникам (амплитуда и фаза), выявленным в частотной области позволяет установить величину временного сигнала припуска в пропущенных при измерении впадинах, что позволяет сократить время на измерение.

5. Описанный способ восстановления сигнала, характеризующего величину припуска во впадинах, которые были пропущены при измерениях, позволяет существенно уменьшить число необходимых измерений для выявления припуска во всех впадинах заготовки ЗК (по правой и левой стороне каждой впадины) и может быть использован, например, для определения положения впадины с максимальным припуском и его величины.

#### Список использованных источников

1. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колёс / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
2. Пономарев В.П. Оптимизация процессов механической обработки цементированных зубчатых колес. Челябинск, южно-Уральское книжное издательство, 1974, 263 с.
3. Качество изготовления зубчатых колёс / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояршинов и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

4. Харламов Г.А. Припуски на механическую обработку: Справочник / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
5. Лищенко Н.В. Анализ способов определения припуска на механическую обработку / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2011. – Вып. 1(35). – С.36-42.
6. A.Turich, S.Kobialka, D.Vucetic / Innovative concepts for grinding wind power energy gear. Gear technology / June 2009, pp.39-44.
7. Brian W.Cluff / Profile grinding gears from the solid...It is practical?. Gear technology / May/June 1997, pp.20-25.
8. 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.
9. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2009. – 656 с.

**Лищенко Н.В.**, к.т.н.

*Одеська національна академія харчових технологій*

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПРИПУСКУ НА ЗУБОШЛІФУВАННЯ ЗА ЙОГО ДИСКРЕТНИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ**

*Розроблено спосіб відновлення безперервного сигналу припуску за його дискретними вимірюваннями. Відновлення сигналу виконано на основі частотного перетворення Фур'є. Вказаний спосіб може бути використаний для визначення припуску в пропущених при вимірюванні западинах. Встановлено залежність між числом дискретних вимірювань і числом його гармонічних складових.*

**Ключові слова:** профільне зубошліфування, відновлення сигналу припуску, дискретний сигнал припуску, безперервний сигнал припуску, частотний аналіз сигналу припуску.

**N.V. Lishchenko**

*Odessa National Academy of Food Technologies*

### **GEAR GRINDING STOCK DETERMINATION BY ITS DISCRETE MEASUREMENTS**

*A continuous stock signal reconstruction method by its discrete measurements is developed. The signal is reconstructed on the basis of the frequency Fourier's transform. This method can be used to determine the stock in the tooth spaces which have been missed in the measurement. A relationship between the number of the stock discrete measurements and the number of its harmonic components is established.*

**Keywords:** form gear grinding, stock signal reconstruction, discrete stock signal, continuous stock signal, stock signal frequency analysis.