

УДК 621.001.2

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

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЬНОГО ЗУБОШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКЕ С ЧПУ И СИСТЕМОЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИПУСКА**

*Розроблено та апробовано на прикладах два методи оптимізації технологічної операції профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК: шляхом порівняння альтернатив з використанням оціночної функції (сума квадратів відхилень) і шляхом пошуку екстремуму цільової функції. У першому випадку знаходять найкраще наближення за якістю оцінки екстремальних значень вимірюного припуску в залежності від числа його вимірювань на етапі налагодження верстата. У другому – шляхом побудови моделі оптимізації у вигляді унімодальної функції, що має екстремум при оптимальному значенні того ж самого регульованого параметра – числа вимірювань припуску.*

**Ключові слова:** профільне зубошліфування, модель оптимізації, вимірювання припуску

*Разработаны и апробированы на примерах два метода оптимизации технологической операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ: путём сравнения альтернатив с использованием оценочной функции (сумма квадратов отклонений) и путём поиска экстремума целевой функции. В первом случае находят наилучшее приближение по качеству оценки экстремальных значений измеренного припуска в зависимости от числа его измерений на этапе настройки станка. Во втором – путём построения модели оптимизации в виде унимодальной функции, имеющей экстремум при оптимальном значении того же самого регулируемого параметра – числа измерений припуска.*

**Ключевые слова:** профильное зубошлифование, модель оптимизации, измерение припуска

*It is developed and tested on examples two methods to optimize a profile gear grinding operation on CNC machines: by comparing alternatives using the evaluation function (the sum of squared deviations), and by searching the objective function extremum. In the first case a better approximation is found by the evaluation quality criterion for the stock to be removed extreme values measured, depending on the number of its measurements on the machine set-up stage. In the second – by constructing an optimization model in the form of an unimodal function, having the extremum at the optimum value of the same controlled parameter – the number of the stock measurements.*

**Keywords:** profile gear grinding, optimization model, stock measurements

**Введение.** Изготовление зубчатых колёс (ЗК) – дорогостоящий и трудоёмкий технологический процесс, требующий высокой культуры производства, применения современного технологического оборудования, компьютерных средств и методов измерения. Для повышения эффективности этого процесса необходимо увеличивать производительность наиболее трудоёмких операций, к числу которых относятся операции лезвийной и абразивной обработки базовых и исполнительных поверхностей ЗК. Использование современных станков с ЧПУ от ведущих зарубежных фирм (Höfler, Reishauer, Siemens, Naas и других), взамен традиционного оборудования с ручным и цикловым управлением, явилось необходимым и

эффективным условием резкого увеличения производительности лезвийной и абразивной обработки в технологии изготовления ЗК. Технологическая диагностика этих операций на основе компьютерной системы сбора данных обуславливает возможность учёта технологической наследственности, которая проявляется между предыдущими (лезвийная обработка) и последующими (абразивная обработка) операциями. Однако для дальнейшего повышения производительности обработки на станках с ЧПУ необходима структурная и параметрическая оптимизация соответствующих мехатронных технологических систем, которые помимо собственно станка с ЧПУ включают правильно выбранный лезвийный и абразивный инструмент, СОТС и оптимальные режимы обработки. Именно оптимизация технологических операций на станках с ЧПУ по всем составляющим технологической системы позволит реализовать технологические принципы гибкого автоматизированного производства, которые позволяют перенести высокопроизводительные методы серийного производства на индивидуальное и мелкосерийное производство. Примером может быть гибкий производственный модуль на основе зубошлифовального станка с ЧПУ, имеющего автоматическую смену высокопористых шлифовальных кругов, спрофилированных на заданный модуль ЗК.

**Постановка проблемы.** Оптимизация в технике (engineering optimization) – быстро развивающаяся область науки, вытекающая из математической теории оптимизации технических систем: конструкций и процессов. Под теорией оптимизации понимают совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов. Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, поскольку классические функции инженера заключаются в том, чтобы, с одной стороны, проектировать новые более эффективные и менее дорогостоящие технические системы и, с другой стороны, разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем [1]. Традиционная постановка задачи оптимизации включает ряд этапов: установление границ технической системы, определение количественного критерия для сравнительного анализа вариантов, выбор внутрисистемных переменных для определения характеристик и идентификации вариантов, построение модели, отражающей взаимосвязи между переменными. Корректная постановка задачи является необходимым условием успешного завершения оптимизационного исследования и «ассоциируется в большей степени с искусством, нежели с точной наукой» [1]. Следовательно, актуальной в технологии машиностроения является не только методика решения, но методика

постановки задачи оптимизации, в частности применительно к операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Применение оптимизационных исследований для операции зубошлифования на станках, работающих по методу обката тарельчатыми кругами, позволяет применить возможности оптимизации цикла обработки, для обеспечения наивысшей производительности (по объёму снятого материала за единицу времени) за счёт поиска экстремума унимодальной функции – машинного времени зубошлифования [2]. Однако применительно к методу копирования такая задача не поставлена и не решена. Кроме того, анализ состояния вопроса показывает, что основное внимание в имеющейся литературе уделено не постановке задач оптимизации, а математическим приёмам их решения как для классического случая унимодальной целевой функции (unimodal programming), так для известных методов математического программирования: линейного (linear), нелинейного (nonlinear), целочисленного (integer), сепарабельного (separable), квадратичного (quadratic) и других.

**Целью статьи** является разработка и исследование математической модели для постановки и решения задачи оптимизации профильного зубошлифования на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 по двум изучаемым направлениям оптимизации. Первое направление – оценка альтернативных вариантов с помощью разработанной оценочной функции, представляющей собой сумму квадратов отклонений (дисперсий) от достоверного, но трудоёмкого варианта построения операции (разомкнутое управление). Второе направление – формирование унимодальной целевой функции, имеющей экстремум (замкнутое управление при проектировании операции).

**Материалы исследования.** В соответствии с первым направлением оптимизации выполнили измерение припуска на боковых сторонах всех 40 впадин ЗК (код детали ДТМВ.478.БЭ.40.005). Из 40 измерений припуска выбирается возможное количество дискретных измерений: 2, 3, 4, 8, 10 и 20. После центрирования первой впадины выполняют доворот зубчатого колеса для выравнивания минимальных припусков по боковым сторонам впадин [3]. Фиксируют максимальные значения припуска на левой  $z_{\max}^L$  и правой  $z_{\max}^R$  стороне впадины ЗК и минимальную величину припуска (минимальные припуски на боковых сторонах одинаковы). Из двух зафиксированных максимальных значений припусков ( $z_{\max}^L$  и  $z_{\max}^R$ ) выбирают наибольшую величину, которую назовём максимаксом  $z_{\max}^{\max i}$  (максимальную из двух максимальных). Результаты замера припуска на этапе наладки станка сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Экстремальные значения припусков для колеса № 1 (в числителе) и колеса № 3 (в знаменателе)

Параметр	Количество измеряемых впадин, $N$						
	2	3	4	8	10	20	40
$z_{\max}^L$	0,3016 0,4441	0,2979 0,4711	0,3425 0,4441	0,3552 0,5885	0,3653 0,5831	0,3653 0,5653	0,3669 0,5725
$z_{\max}^R$	0,2117 0,3941	0,368 0,4081	0,3221 0,3941	0,3393 0,4045	0,3411 0,3692	0,3474 0,4160	0,3559 0,4215
$z_{\max}^{\max i}$	0,3016 0,4441	0,3680 0,4711	0,3425 0,4441	0,3552 0,5885	0,3653 0,5831	0,3653 0,5653	0,3669 0,5725
$z_{\min}^L =$ $z_{\min}^R$	0,2104 0,0069	0,1919 -	0,1861 0,0069	0,1733 -	0,1745 -	0,1745 -	0,1676 -
		0,0201		0,0355	0,0379	0,0557	0,0557

Данные о максимальных (максимакс  $z_{\max}^{\max i}$ ) и минимальных припусках ( $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ ) использованы для определения дисперсий  $D_1$  ( $z_{\max}^{\max i}$ ) и  $D_2$  ( $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ ), соответственно (табл. 2 и 3). Дисперсия  $D_1$  представляет собой квадрат разности соответствующего припуска для сравниваемого варианта с аналогичным припуском, найденного по 40 измерениям. В данном случае базовым вариантом является 40 дискретных отсчетов. Например, для варианта  $N=2$  получим:  $D_1 = (0,3669 - 0,3016)^2 = 4270 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ ;  $D_2 = (0,1676 - 0,2104)^2 = 1827 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ . Сумма двух дисперсий:  $D_1 + D_2 = 6097 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ .

Таблица 2 – Оценочная функция для разного числа измерений колеса № 1

Параметр	Число измеряемых впадин, $N$					
	2	3	4	8	10	20
$D_1, \text{мм}^2$	$4270 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$597,8 \cdot 10^{-6}$	$136,89 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$
$D_2, \text{мм}^2$	$1827 \cdot 10^{-6}$	$590 \cdot 10^{-6}$	$340 \cdot 10^{-6}$	$32,5 \cdot 10^{-6}$	$47,61 \cdot 10^{-6}$	$47,61 \cdot 10^{-6}$
$D_1 + D_2, \text{мм}^2$	$6097 \cdot 10^{-6}$	$591 \cdot 10^{-6}$	$937,8 \cdot 10^{-6}$	$169 \cdot 10^{-6}$	$50,2 \cdot 10^{-6}$	$50,2 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3 – Оценочная функция для разного числа измерений колеса № 3

Параметр	Число измеряемых впадин, $N$					
	2	3	4	8	10	20
$D_1, \text{мм}^2$	0,016486	0,010280	0,016486	0,000256	0,000111	0,000052
$D_2, \text{мм}^2$	0,003920	0,001267	0,003920	0,000408	0,000315	0
$D_1 + D_2, \text{мм}^2$	0,020406	0,011550	0,020406	0,000664	0,000426	0,000052

Результаты оценки по параметрам  $z_{\max}^{\max i}$  и  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$  для ЗК № 1 и №3 в порядке увеличения суммы дисперсий (ухудшения оценки) сведены в табл. 4, а на рис.1 приведен график изменения оценочной функции  $D_1 + D_2$  в зависимости от числа измерений  $N$ . Из рис.1 видно, что  $N_{opt} = 8$ .

Таблиця 4 – Результати оцінки по параметрам  $z_{\max}^{\max}$  и  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$

Метод оцінки	ЗК № 1	ЗК № 3
Два параметра: $z_{\max}^{\max}$ и $z_{\min}^L = z_{\min}^R$	10; 20; 8; 4; 3; 2	20; 10; 8; 3; 2; 4

Рассмотренный метод выбора оптимального решения вытекает из известного метода наименьших квадратов, в соответствии с которым выбирают такое приближение для уравнения регрессии, при котором минимизируется сумма квадратов отклонений (сумма дисперсий) между экспериментальными отсчётами величины и её теоретическими значениями по уравнению регрессии. В этом смысле указанная сумма дисперсий может быть оценочной функцией для сравнения альтернативных вариантов. Один из этих вариантов должен быть предпочтительным по точности оценки, но может уступать другим вариантам по другим критериям, например, по трудоёмкости возможного построения технологической операции.

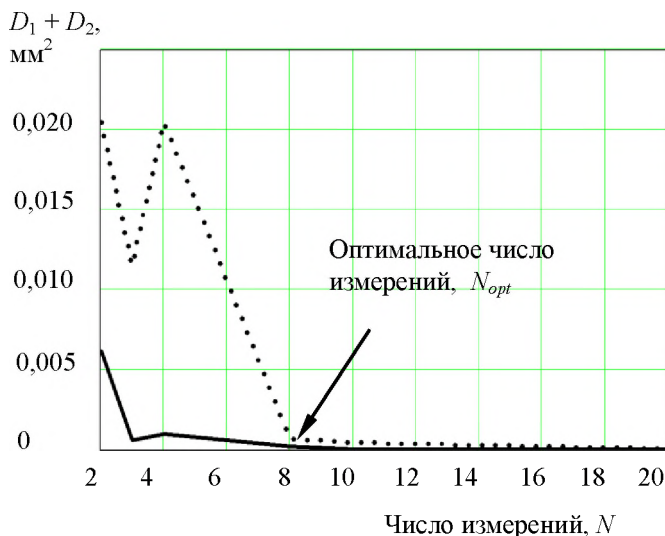


Рисунок 1 – Изменение оценочной функции  $D_1 + D_2$  для ЗК №1 (сплошная линия) и ЗК № 3 (пунктирная линия)

При зубошлифовании методом копирования возможно применение двух циклов съема припуска с боковых поверхностей впадин: без вариабельности с вариабельностью. В первом случае (без вариабельности) цикл съема припуска

при зубошлифовании заключается в фиксации максимакса (максимального значения из двух максимальных значений припуска) после выравнивания минимальных припусков по боковым сторонам впадин. Этот «максимаксный» припуск распределяется на этапы и рабочие ходы. Цикл шлифования выполняется с впадины с максимаксным припуском (фиксация точки касания круга и указанной выше впадины). Данный цикл съёма припуска сопровождается «шлифованием воздуха», когда припуск в отдельной впадине меньше, чем максимальный припуск. Каждая впадина зубчатого колеса шлифуется за одинаковое число ходов, найденное исходя из максимального припуска. Для устранения «шлифования воздуха» необходимо использовать индивидуальное распределение припуска по впадинам зубчатого колеса. Эта возможность реализована в опции «вариабельность». Во втором случае (с вариабельностью) каждая впадина шлифуется за разное число ходов согласно индивидуальному припуску на отдельной впадине, который измерен встроенной системой измерения припуска на станке с ЧПУ.

Для обоих случаев (без вариабельности и с вариабельностью) необходимо назначить добавку на припуск, которая зависит от числа измеренных впадин. Чем меньше впадин измерено, тем большую добавку к припуску надо назначить на максимаксовый припуск. Поэтому появилась задача определения добавки к припуску, зависящей от числа измерений. Рассмотрим эту задачу для первого случая (без вариабельности).

В соответствии со вторым направлением оптимизации выполнен ряд исследований с использованием экспериментальных данных, полученных на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250. Выявлены две противоположные тенденции, зависящие от одной и той же независимой переменной – числа  $N$  измерений припуска на заготовке ЗК. Штучное время зубошлифования на станке с ЧПУ и встроенной системой измерения припуска складывается из двух составляющих: времени измерения  $T_{\text{изм}}$  фактического расположения припуска на заготовке (этап наладки станка) и времени обработки  $T_{\text{обр}}$ , зависящего от фактического расположения измеренного припуска по правой и левой стороне впадин ЗК (этап обработки), т.е.

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{обр}} + T_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{шт}}$  – переменная часть штучного времени операции, мин.

Достоверная информация о припуске по всем впадинам ЗК позволяет учитывать при обработке индивидуальные особенности заготовки и, как следствие, минимизировать непроизводительные затраты времени при уменьшении припуска. Степень достоверности этой информации зависит от числа  $N$  измерений припуска. Очевидно, что максимальное число измерений равно числу впадин (или числу зубьев) ЗК и предпочтительно для получения

максимально достоверной информации. Однако с ростом числа измерений штучное время операции (в минутах) увеличивается на время измерений в соответствии с формулой

$$T_{\text{изм}} = \frac{1}{60}(T_1 + T_2 + T_3 + T_4), \quad (2)$$

где  $T_1$  – время на развёртывание тактильного прибора в измерительную позицию и его возврат в исходную позицию, с;  $T_2 = mN$  – время, затрачиваемое на  $N$  измерений ( $N$  – количество измеряемых впадин), с;  $m$  – время цикла измерительных перемещений ЗК при касании щупом датчика правой и левой сторон впадины, с;  $T_3 = m'N$  – суммарное время на  $N$  вводов и выводов щупа датчика, с;  $m'$  – время одного цикла ввода-вывода щупа, с;  $T_4 = k(N)\tau_r$  – время на один полный поворот ЗК при измерении припуска, с;  $k(N) > 1$  – переменный коэффициент, учитывающий неравномерность вращения ЗК при его старт-стопном режиме движения;  $\tau_r$  – время на один полный поворот ЗК при его равномерном движении, с.

Зависимость коэффициента  $k(N)$  от величины  $N$  установлена экспериментально на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 методом хронометража и имеет следующий вид:

$N$	2	4	8	10	20	40
$k(N)$	1,0	1,2	1,4	1,5	2,0	2,5.

В свою очередь

$$T_4 = k(N) \frac{1}{V} \frac{2\pi R}{z} \frac{z}{N} N = k(N) \frac{2\pi R}{V}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус измерительной окружности, м;  $z$  – число зубьев;  $V$  – линейная скорость точки на измерительной окружности ЗК, м/с; Учитывая, что  $V = \omega R$ , где  $\omega = \pi n / 30$  – угловая скорость ЗК (рад/с),  $n$  – частота вращения заготовки ЗК при измерении припуска ( $\text{мин}^{-1}$ ), выражение (3) принимает вид

$$T_4 = 60 \frac{k(N)}{n} \quad (4)$$

Возвращаясь к уравнению (2) получаем

$$T_{\text{изм}} = \frac{T_1}{60} + \frac{m + m'}{60} N + \frac{k(N)}{n} \quad (5)$$

Видно, что с увеличением числа измерений  $N$  время измерения возрастает (первая тенденция из двух противоположных альтернатив в математической модели оптимизации). Ранее в качестве измерительного элемента был рассмотрен щуп тактильного прибора компании Renishaw. В практике возможен метод измерения припуска шлифовальным кругом

(при пониженной частоте его вращения) по сигналу акустической эмиссии (АЭ) при касании. Такой метод применяют для измерения заготовок после их термообработки, когда высокая точность контроля щупом не соответствует неудовлетворительному качеству измеряемой (после термообработки) поверхности. Принимаем для расчета:  $T_1 = 5(8)$  с;  $m = 20$  (5) с;  $m' = 5$  (5) с (в скобках указаны данные для измерения припуска щупом);  $n = 20$  мин<sup>-1</sup>. Для измерения припуска по сигналу АЭ формула (5) принимает вид (в минутах)

$$T_{\text{изм}} = \frac{5}{60} + \frac{20+5}{60}N + \frac{k(N)}{20} \quad (6)$$

Основное время зубошлифования (в минутах), т.е. время обработки  $T_{\text{обр}}$ , можно найти по выражению, которое соответствует структуре технологической операции зубошлифования

$$T_{\text{обр}} = \left( \frac{b+l_1+l_2}{S} i + \frac{\tau_{\text{дел}}}{60} \right) z, \quad (7)$$

где  $b$  – ширина зубчатого венца, мм;  $l_1, l_2$  – величина пути врезания и перебега, мм;  $S$  – подача, мм/мин;  $i = z_{\text{max}}^{\text{maxi}} / t_n$  – число ходов с подачей  $S$  для удаления припуска  $z_{\text{max}}^{\text{maxi}}$ , мм;  $t_n$  – глубина шлифования;  $\tau_{\text{дел}}$  – время деления ЗК, с;  $z$  – число впадин (или зубьев) ЗК.

Например, для исследуемой заготовки ЗК:  $b = 24$  мм;  $l_1 = l_2 = 7,9$  мм;  $S = 7000$  мм/мин;  $\tau_{\text{дел}} = 5$  с;  $z = 40$ ;  $t_n = 0,015$  мм;

Для установления тенденции, в соответствии с которой увеличение числа измерений приводит к уменьшению времени обработки по уравнению (1), выполнено дополнительное исследование, позволяющее установить влияние числа  $N$  измерений припуска на величину расчётного максимального припуска, которую задают в устройство ЧПУ станка перед обработкой. Чем меньше фактическое число  $N$  измерений, тем большую величину максимального расчётного припуска задают. В данном случае расчётный припуск рассматривается как статистический параметр, который может иметь доверительный интервал (confidence interval). Доверительным называют интервал, который покрывает неизвестный параметр с заданной надёжностью [4]. Теория доверительных интервалов в основном касается линейных уравнений регрессии. Поэтому для использования теоретических положений задачу сводят к линейному виду с помощью соответствующих приёмов. Это следует из принципа обратной связи между постановкой задачи и вычислением её результата. В соответствии с этим принципом «точная постановка всей задачи возможна лишь после начала вычислений» [5].

Для получения зависимости между расчётным припуском  $z_{\text{max}}^{\text{maxi}}$  на зубошлифование и числом измерений разработана следующая методика.



1. Производят дискретные измерения припуска на боковых сторонах всех впадин ЗК, например, на всех 40 впадинах (после штатного центрирования припуска в первой начальной впадине).

2. Рассматривают все возможные варианты задания числа измерений припуска ( $N = z$ ;  $N = z/2$ ;  $N = z/3$ ;  $N = z/4$  и т.д.). Например, для рассматриваемой заготовки ДТМВ.478.БЭ.40.005 с 40 впадинами выбранное число  $N$  измерений составляет: 40, 20, 10, 8, 4 и 2.

3. Для каждого из  $N$  вариантов выполняют выравнивание минимальных припусков (штатная процедура на станке с ЧПУ), т.е. обеспечивают условие  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ .

4. Фиксируют максимальную величину припуска  $z_{\max}^{\max}$ , названную максимаксом (табл.5).

Таблица 5 – Максимаксные значения припуска и добавки к ним для заготовки № 1

Параметр	Число измерений						
	0	2	4	8	10	20	40
$z_{\max}^{\max}$ , мм	0,8	0,3016	0,3425	0,3552	0,3653	0,3653	0,3669
$\Delta z$ , мм	0,433	0,065	0,024	0,012	0,002	0,002	–

5. Находят величину доверительного интервала (добавка  $\Delta z$  от неопределённости припуска) в виде разности по модулю между максимаксом при  $N = z$  и текущими максимаксами для каждого из вариантов, установленных в п. 2 (табл. 5).

6. Выбирают доверительный интервал для  $N = 0$  (при отсутствии измерений). Этот припуск соответствует значению, выбранному на этапе технологической подготовки производства, например, 0,5-0,8 мм.

7. Строят график добавок припуска  $\Delta z$ , найденных в п.5 и аппроксимируют эти точки экспоненциальной зависимостью. В данном случае эта зависимость имеет вид  $\Delta z = 0,5\exp(-0,5N)$ .

8. Формируют зависимость  $z(N)$  как функцию от числа измерений  $N$ :  $z(N) = z_{\max}^{\max} + \Delta z$  т.е.  $z(N) = 0,367 + 0,5\exp(-0,5N)$ . Припуск равен сумме максимаксного припуска при максимальном числе измерений ( $z_{\max}^{\max}$  при  $N = z = 40$ ) и добавки  $\Delta z$ , найденной в п. 7.

9. Задают подачу на сторону на один ход (например,  $t_n = 0,015$  мм).

10. Формируют уравнение для определения числа рабочих ходов  $i$ , зависящее от  $z(N)$  и  $t_n$ , т.е.  $i(N) = z(N)/t_n$ .

11. На основании формулы (7) получают уравнение для времени обработки  $T_{\text{обр}}$  как функцию от  $i(N)$ , т.е.

$$T_{обр} = \left( \frac{b+l_1+l_2}{S} i(N) + \frac{\tau_{оел}}{60} \right) z = \left( \frac{b+l_1+l_2}{S} \frac{z(N)}{t_n} + \frac{\tau_{оел}}{60} \right) z. \quad (8)$$

Видно, что с увеличением числа измерений  $N$  время обработки  $T_{обр}$  уменьшается за счёт уменьшения расчётного припуска  $z(N)$  (вторая тенденция из двух противоположных альтернатив в математической модели оптимизации).

12. Формируют уравнение для времени измерения  $T_{изм}$  по формуле (5).

13. Формируют целевую функцию – штучное время (1) на зубошлифование. Для приведенных выше данных целевая функция представлена на графике (рис. 2).

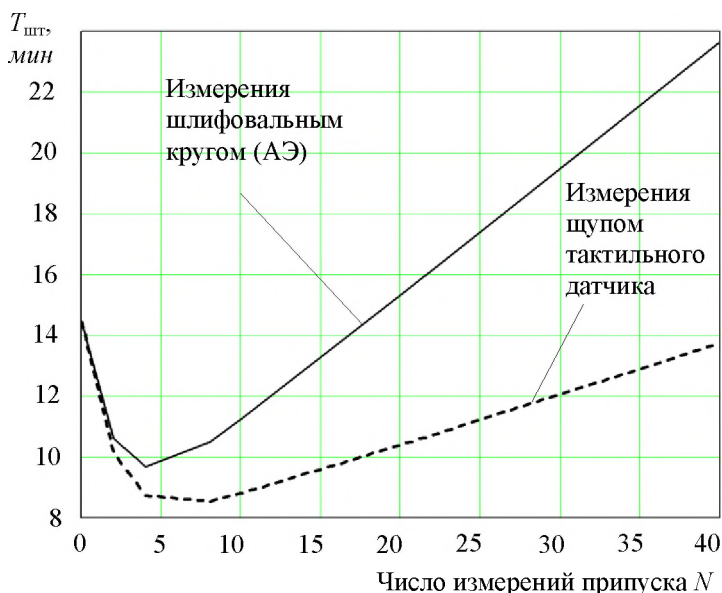


Рисунок 2 – Штучное время зубошлифования  $T_{шт}$  в зависимости от числа  $N$  измерений припуска во впадинах ЗК №1 для разных способов измерения припуска (АЭ – сигнал акустической эмиссии)

14. Находят производную целевой функции (1) с учётом приведенных выше данных.

15. Приравнивают производную нулю и определяют оптимальную величину параметра  $N$ , т.е.  $N_{opt}$ , при котором целевая функция имеет экстремум. Также число  $N_{opt}$  можно найти графически по рис.2, где  $N_{opt} = 4$  (измерения шлифовальным кругом) и  $N_{opt} = 8$  (измерения щупом). В обоих случаях число измерений меньше максимально возможного числа  $N = 40$ .

## **Выводы и перспективы развития**

1. Разработаны и апробированы теоретические предпосылки по оптимизации операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ, в соответствии с которыми оптимизацию выполняют либо путём сравнительной оценки альтернативных вариантов по минимуму отклонения оптимального варианта от наиболее достоверного, но трудоёмкого варианта (разомкнутое управление), либо путём поиска экстремума унимодальной целевой функции (замкнутое управление). В обоих случаях с позиции теории технических систем оптимизация рассматривается как метод управления при проектировании технологической операции зубошлифования.

2. Выявлены две противоположные тенденции, зависящие от одной и той же независимой переменной – числа измерений припуска на заготовке зубчатого колеса. Первая тенденция: с ростом числа измерений штучное время операции увеличивается на величину времени измерения. Вторая тенденция: с ростом числа измерений штучное время операции уменьшается в связи с уменьшением расчётного припуска на зубошлифование. Сформирована целевая функция, представляющая собой сумму времени измерения и времени обработки. Показано, что эта функция имеет экстремум (минимум) при оптимальном числе измерений припуска.

3. На конкретном примере обработки заготовок зубчатых колёс на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 показаны основные этапы формирования математической модели оптимизации операции зубошлифования на станке с ЧПУ. Разработанная модель представляет собой унимодальную функцию – переменную часть штучного времени операции, содержащую время измерения и время обработки, каждое из которых зависит от числа измерений припуска на этапе наладки станка.

4. Разработаны технологические рекомендации по выбору числа измерений припуска на этапе наладки зубошлифовального станка с ЧПУ, оснащённом соответствующей измерительной системой, например, тактильной системой компании Renishaw или модернизированной системой измерения на основе контроля сигнала акустической эмиссии при касании шлифовального круга и боковой стороны впадины заготовки зубчатого колеса. Например, для рассмотренного примера оптимальное число измерений припуска составляет 4 (измерения шлифовальным кругом по сигналу акустической эмиссии) и 8 (измерения шупом тактильного датчика) из 40 возможных измерений.

**Список использованных источников:** 1. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В двух книгах. Кн. 1. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэтсдел. – М.: Мир, 1986. – 349 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 8. "Оптимизация технологических процессов в машиностроении" / Ф.В. Новиков, А.В. Якимов, Г.В. Новиков, А.А. Якимов, В.П. Ларишин и др. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 509 с. 3. Ларишин В.П. Выравнивание

припуска по профілю при наладке на зубшліфование методом копіювання / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкций металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VI Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С.181-189. 4. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов. Пер. с нем. и предисл. В.М. Ивановой / Э. Фёрстер, Б. Рёнц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 303 с. 5. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. Пер. англ. В.А. Арлазарова и др. Изд. второе, испр. / Р.В. Хемминг. – М.: Наука, 1972. – 400 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Rekleytis G. Optimizatsiya v tekhnike: V dvukh knigakh. Kn. 1.* Per. s angl. / G. Rekleytis, A. Reyvindran, K. Retsdel. – М.: Mir, 1986. – 349 s. 2. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Pod obshch. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V desyati tomakh. – T. 8. "Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii"* / F.V. Novikov, A.V. Yakimov, G.V. Novikov, A.A. Yakimov, V.P. Larshin i dr. – Odessa: ONPU, 2004. – 509 s. 3. *Larshin V.P. Vyravnivanie pripuska po profilu pri naladke na zuboshlifovanie metodom kopirovaniya* / V.P. Larshin, N.V. Lishchenko // *Sovremennye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruktsiyakh metalloobrabatyvayushchikh mashin i komplektuyushchikh izdeliy: materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-tekhn. konf.* – Ufa: UGATU, 2016. – S.181-189. 4. *Ferster E. Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza. Rukovodstvo dlya ekonomistov.* Per. s nem. i predisl. V.M. Ivanovoy / E. Ferster, B. Rents. – М.: Finansy i statistika, 1983. – 303 s. 5. *Khemming R.V. Chislennye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov.* Per. angl. V.A. Arlazarova i dr. Izd. vtoroe, ispr. / R.V. Khemming. – М.: Nauka, 1972. – 400 s.