

УДК 621.9.06-529:621.91

**В.Ф. СОРОКИН, И.А. ТЕРНЮК**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕХНОСТЕЙ МОНОКОЛЕС КОМПРЕССОРОВ И ТУРБИН ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Рассмотрены вопросы аналитического расчета производительности процессов механической обработки поверхностей моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей. Получены и унифицированы по иерархии аналитические выражения для расчета штучного времени обработки и потенциального роста производительности в зависимости от вида схемы технологического воздействия и количества позиций обработки. Проанализированы зависимости потенциального роста производительности механической обработки от количества партий деталей и от соотношения между основным временем обработки партии деталей и подготовительно-заключительным временем.*

**Ключевые слова:** *блиск, производительность, механическая обработка, расчетные зависимости, штучное время, схема технологического воздействия.*

### **Введение**

В структуре себестоимости моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей (ГТД) значительную часть занимают затраты на механическую обработку поверхностей их лопаток. Кроме того, трудоемкость обработки определяет объем капитальных затрат на оборудование и площади цеха. Поэтому задача снижения трудоемкости и повышения производительности механической обработки поверхностей моноколес компрессоров и турбин ГТД является актуальной.

Общие вопросы для расчета производительности процессов механической обработки поверхностей различных изделий, в том числе моноколес компрессоров и турбин ГТД, рассматривались в работах [1 – 5], в которых приведены зависимости для расчета штучного времени ряда видов изделий и на группе примеров показано влияние концентрации технологического воздействия на технико-экономические показатели процессов производства. В то же время в опубликованных работах не установлены связи между классами схем технологического воздействия и производительностью механической обработки поверхностей моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей, а имеющиеся зависимости для расчета производительности не унифицированы по иерархии.

**Цель данной статьи** – разработка расчетных зависимостей для определения штучного времени обработки и потенциального роста производительности для различных схем

технологического воздействия на различных иерархических уровнях геометрических образований поверхностей и разного количества позиций обработки.

### **1. Классификация схем технологического воздействия**

При решении задачи расчета штучного времени механической обработки можно принять во внимание классификацию схем технологического воздействия [6], которая представлена в таблице 1.

$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$  – числа, обозначающие вид схемы технологического воздействия на уровне единичной поверхности, лопатки в целом, венца, комплекса венцов, партии и группы партий.

### **2. Обобщение зависимостей для расчета штучного времени обработки изделий с повторяемыми поверхностями**

Общая зависимость для расчета штучного времени обработки изделий с периодически повторяющимися поверхностями может быть представлена согласно [3] в следующем виде:

$$t_{ij} = t_{Пj}^{(i)} + t_{Oj}^{(i)} + t_{Зj}^{(i)}, \quad (1)$$

где  $t_{ij}$  – время, затрачиваемое на осуществление технологического воздействия согласно принятой –  $j$ -й схемы  $i$ -го уровня;

$t_{Пj}^{(i)}, t_{Oj}^{(i)}, t_{Зj}^{(i)}$  – составляющие общего времени механической обработки детали, соответствующие подготовительной, основной и заключительной функциям.

Классификация схем технологического воздействия

Таблица 1

Уровень	Название схемы					
	Значение X					
6	Поочередная $X_6 = 1$		Частично-одновременная $X_6 = 2$		Одновременная $X_6 = 3$	
5	Однопозиционная $X_5 = 1$		Двухпозиционная $X_5 = 2$		Многопозиционная $X_5 = 3$	
4	Не совмещенная $X_4 = 1$		Частично-совмещенная $X_4 = 2$		Совмещенная $X_4 = 3$	
3	Последовательная $X_3 = 1$		Частично-параллельная $X_3 = 2$		Параллельная $X_3 = 3$	
2	Односторонняя $X_2 = 1$			Двухсторонняя $X_2 = 2$		
1	Прерывистая $X_1 = 1$	Полу-прерывистая $X_1 = 2$	Единовременно-прерывистая $X_1 = 3$	Непрерывная $X_1 = 4$	Единовременно-непрерывная $X_1 = 5$	Единовременная $X_1 = 6$

С учетом зависимости (1) для каждой схемы технологического воздействия, приведенной в таблице 1, можно получить коэффициент производительности труда, так как показано в таблице 2.

Здесь  $z$  – количество лопаток в рабочем колесе;

$F$  – общее количество промежуточных поверхностей, образуемых при многопроходном срезании припуска в межлопаточных каналах;

$h$  – количество моноколес в партии;

$Q$  – количество партий моноколес;

$k$  – показатель совмещенности обработки;

$m, n$  – коэффициенты, отражающие структуру геометрического контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью лопатки.

Особенностью полученных зависимостей для расчета штучного времени является их структурная унификация по иерархии. Это позволяет рассчитывать значения этого показателя последовательно, переходя от низшего иерархического уровня к верхнему, используя однотипные процедуры, в том числе, процедуры работы с базами нормативов.

### 3. Анализ зависимости потенциального роста производительности обработки от количества партий деталей

Как видно из данных, приведенных в таблице 2, потенциальный рост производительности линейно зависит от показателей, характеризующих уровень концентрации технологического воздействия на каждом иерархическом уровне геометрических образований поверхностей при многопроходной многопозиционной и многопартионной обработке изделий. В качестве примера на рисунке 1 показана зависимость потенциального роста производительности ( $\Pi$ ) от количества партий деталей для различных значений основного времени обработки партий деталей при фиксированном значении подготовительно-заключительного времени ( $t_{\Pi} = t_3 = 1$  мин).

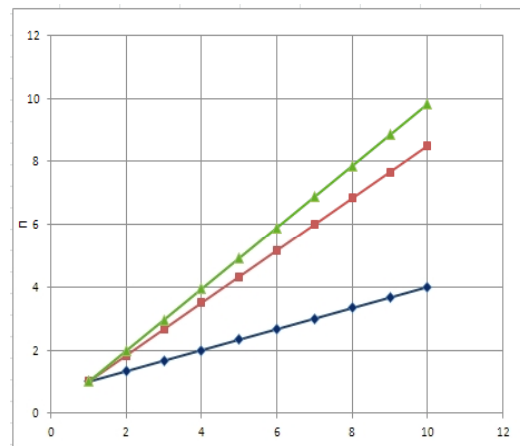


Рис. 1. Зависимость потенциального роста производительности механической обработки ( $\Pi$ ) от количества партий деталей ( $Q$ )

Как видно из рисунка 1, с увеличением количества партий обрабатываемых деталей ( $Q$ ) потенциальный рост производительности ( $\Pi$ ) увеличивается. При этом интенсивность роста потенциального роста производительности увеличивается при возрастании значения основного времени обработки партии деталей  $t_{ij}$  в формуле (1).

### 4. Анализ зависимости потенциального роста производительности обработки от соотношения между основным и подготовительно-заключительным временем обработки партии деталей

В качестве примера на рисунке 2 показана зависимость потенциального роста производительности ( $\Pi$ ) от коэффициента  $k$ , представляющего собой отношение основного времени обработки к подготовительно-заключительному времени для различных значений количества партий обрабатываемых деталей при фиксированном значении подготовительно-заключительного времени ( $t_{\Pi} = t_3 = 1$  мин).

Таблица 2  
Зависимость производительности труда от схемы технологического воздействия

Уро- вень	Класс схемы			Потенциальный рост производитель- ности (Π)
	Зависимость для расчета $t_{шт}$			
6	$X_6 = 1$	$X_6 = 2$	$X_6 = 3$	$\frac{t_{\Pi}^{(6)} + Q \cdot t_{ji}^{(5)} + t_3^{(6)}}{t_{\Pi}^{(6)} + t_{ji}^{(5)} + t_3^{(6)}}$
	$t_{61} = t_{\Pi}^{(6)} + \sum_{i=1}^Q t_{ij}^{(5)} + t_3^{(6)}$	$t_{62} = t_{\Pi}^{(6)} + \sum_{i=1}^Q t_{ji}^{(5)} + t_3^{(6)}$	$t_{63} = t_{\Pi}^{(6)} + t_{ji}^{(5)} + t_3^{(6)}$	
5	$X_5 = 1$	$X_5 = 2$	$X_5 = 3$	$\frac{t_{\Pi}^{(5)} + h \cdot t_{ji}^{(4)} + t_3^{(5)}}{t_{\Pi}^{(5)} + t_{ji}^{(4)} + t_3^{(5)}}$
	$t_{51} = t_{\Pi}^{(5)} + \sum_{i=1}^Q t_{ji}^{(4)} + t_3^{(5)}$	$t_{52} = t_{\Pi}^{(5)} + \sum_{i=1}^{\frac{h}{2}} t_{ij}^{(4)} + t_3^{(5)}$	$t_{53} = t_{\Pi}^{(5)} + t_{ji}^{(4)} + t_3^{(5)}$	
4	$X_4 = 1$		$X_4 = 3$	$\frac{t_{\Pi}^{(4)} + F \cdot t_{ji}^{(3)} + t_3^{(4)}}{t_{\Pi}^{(4)} + t_{ji}^{(3)} + t_3^{(4)}}$
	$t_{61} = t_{\Pi}^{(4)} + \sum_{i=1}^F t_{ji}^{(3)} + t_3^{(4)}$	$t_{42} = t_{\Pi}^{(4)} + \sum_{i=1}^{\frac{F}{k}} t_{ij}^{(3)} + t_3^{(4)}$	$t_{53} = t_{\Pi}^{(4)} + t_{ji}^{(3)} + t_3^{(4)}$	
3	$X_3 = 1$	$X_3 = 2$	$X_3 = 3$	$\frac{t_{\Pi}^{(3)} + z \cdot t_{ji}^{(2)} + t_3^{(3)}}{t_{\Pi}^{(3)} + t_{ji}^{(2)} + t_3^{(3)}}$
	$t_{31} = t_{\Pi}^{(3)} + \sum_{i=1}^z t_{ji}^{(2)} + t_3^{(3)}$	$t_{32} = t_{\Pi}^{(3)} + \sum_{i=1}^{\frac{z}{4}} t_{ij}^{(2)} + t_3^{(3)}$	$t_{33} = t_{\Pi}^{(3)} + t_{ji}^{(2)} + t_3^{(3)}$	
2	$X_2 = 1$	$X_2 = 2$		$\frac{t_{\Pi}^{(2)} + 2 \cdot t_{ji}^{(1)} + t_3^{(2)}}{t_{\Pi}^{(2)} + t_{ji}^{(1)} + t_3^{(2)}}$
	$t_{21} = t_{\Pi}^{(2)} + \sum_{i=1}^2 t_{ji}^{(1)} + t_3^{(2)}$	$t_{22} = t_{\Pi}^{(2)} + t_{ji}^{(1)} + t_3^{(2)}$		
1	$X_1 = 1$	$X_1 = 4$		$\frac{m(n+1)t_{\Pi}^{(1)}}{t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}} + \frac{m \cdot n \cdot t_0^{(1)}}{t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}} + \frac{m(n+1)t_3^{(1)}}{t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}}$
	$t_{11}^{(1)} = \sum_{i=1}^m [t_{\Pi i}^{(1)} + \sum_{j=1}^n t_{\Pi j}^{(1)} + t_{Oj}^{(1)} + t_{3j}^{(1)} + t_{3i}^{(1)}]$	$t_{14}^{(i)} = \sum_{i=1}^m [t_{\Pi i}^{(1)} + (t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}) + t_{3i}^{(1)}]$		
	$X_1 = 2$	$X_1 = 5$		
	$t_{12}^{(1)} = \sum_{i=1}^m [t_{\Pi i}^{(1)} + \sum_{j=1}^{\frac{n}{b}} (t_{\Pi j}^{(1)} + t_{Oj}^{(1)} + t_3^{(1)})]$	$t_{15}^{(i)} = \sum_{i=1}^m [t_{\Pi i}^{(1)} + (t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}) + t_{3i}^{(1)}]$		
	$X_1 = 3$	$X_1 = 6$		
	$t_{13}^{(i)} = \sum_{i=1}^m [t_{\Pi i}^{(1)} + (t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}) + t_{3i}^{(1)}]$	$t_{16}^{(i)} = t_{\Pi}^{(1)} + t_0^{(1)} + t_3^{(1)}$		

С увеличением соотношения между основным и подготовительно-заключительным временем обработки партий деталей потенциальный прирост производительности увеличивается, но интенсивность увеличения прироста потенциальной производительности уменьшается (рис. 2).

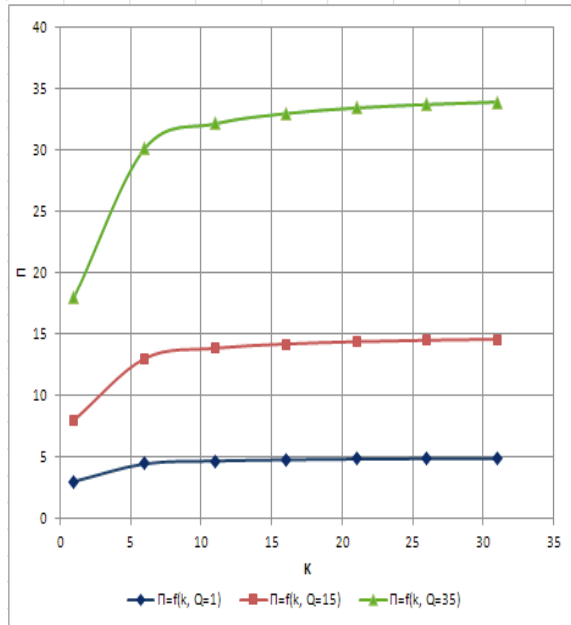


Рис. 2. Зависимость потенциального роста производительности от соотношения между основным временем обработки партии деталей и подготовительно-заключительным временем

Максимальная производительность достигается при одновременной обработке всех партий деталей, по всем межлопаточным каналам моноколес одновременно за один проход, при максимальных режимах обработки и минимальных затратах времени на установку-снятие деталей и подготовку технологической системы к работе. Поскольку такая организация обработки требует большого количества оборудования, рабочих позиций, инструментов с изменяемой геометрией и других элементов, труднореализуемых при современном уровне развития производственных систем. Задача создания и выбора рациональных схем срезания припуска и формообразования рабочих колес должна решаться как оптимизационная.

### Заключение

Схемы технологического воздействия при изготовлении моноколес компрессоров и турбин ГТД отличаются уровнем концентрации технологического воздействия, количеством слоев срезанного припуска, количеством одновременно обрабатываемых деталей и другими показателями, что существенно влияет на производительность обработки.

Влияние указанных факторов описывается линейными зависимостями.

В данной работе установлены связи между классами схем технологического воздействия и производительностью механической обработки поверхностей моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей.

Полученные зависимости для определения штучного времени обработки и потенциального роста производительности для различных схем технологического воздействия на различных иерархических уровнях позволяют на единой методологической основе рассчитать значение штучного времени для каждой схемы обработки, а также относительное повышение производительности при ее применении. Первые характеристики необходимы при нормировании технологических операций, расчете потребного количества оборудования и инструмента. Вторые показывают резервы роста производительности труда.

Структурная унификация по иерархии полученных зависимостей позволяет рассчитывать значения показателей эффективности последовательно, переходя от низшего иерархического уровня к верхнему, используя однотипные процедуры, в том числе, процедуры работы с базами нормативов, что снизит себестоимость моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двигателей и объем капитальных затрат на оборудование и площади цеха.

В дальнейших исследованиях желательно для каждой схемы формообразования рабочих лопаток определить значения сил резания и показатели энергоемкости, что необходимо при решении задач комплексной оптимизации процесса обработки.

### Литература

1. Шаумян Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов [Текст] / Г.А. Шаумян. — М.: Машиностроение, 1973. — 639 с.
2. Кошкин Л.Н. Роторные и роторно-конвейерные линии [Текст] / Л.Н. Кошкин. — М.: Машиностроение, 1982. — 336 с.
3. Тернюк Н.Э. Основы комплексной оптимизации технологических систем для производства зубчатых колес [Текст]: дис. доктора техн. наук: 05.02.08 / Тернюк Николай Эммануилович. — Харьков, 1983. — 433 с.
4. Сорокин В.Ф. Научные основы проектирования высокопроизводительных гибких технологических систем для производства фасонных деталей энергетических машин [Текст]: дис. доктора техн. наук: 05.02.08 / Сорокин Владимир Федорович. — Харьков, 2009. — 450 с.
5. Беловол А.В. Обеспечение производительности многономенклатурных механообработ-

вающих производств на основе синтеза структур технологических систем [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Беловол Анна Владимировна. – Харьков, 2010. – 191 с.

6. Уровни концентрации технологического воздействия при обработке моноколес компрессоров и турбин газотурбинных двига-

телей [Текст] / В.Ф. Сорокин, И.А. Тернюк, А.В. Беловол, Е.В. Шандыба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. – № 4(76). – С. 73 – 79.

*Поступила в редакцию 31.05.2014*

**В.Ф. Сорокин, І.О. Тернюк. Розрахунок продуктивності процесів механічної обробки поверхонь моноколес компресорів і турбін газотурбінних двигунів**

*Розглядаються питання аналітичного розрахунку продуктивності процесів механічної обробки поверхонь моноколес компресорів і турбін газотурбінних двигунів. Отримані та уніфіковані по ієрархії залежності для розрахунку штучного часу обробки і потенціального приросту продуктивності в залежності від виду схеми технологічної дії та кількості позицій обробки. Проаналізовані залежності потенціального приросту продуктивності від кількості партій деталей та від співвідношення між основним часом обробки партії деталей і підготовчо-заключним часом.*

**Ключові слова:** блиск, продуктивність, механічна обробка, розрахункові залежності, штучний час, схема технологічного впливу.

**V.F. Sorokin, I.O. Ternyuk. Calculation of the productivity of the machining processes of gas turbine engine's compressor and turbine blisks**

*The task of analytical calculation of the productivity of the machining processes of the of gas turbine engine's compressor and turbine blisks surfaces is considered in the article. The expressions for analytical calculation machining time of the mechanical processing and potential incremental capacity subject to scheme of the technological action and number of the machining positions are obtained. Functional depends of the potential increase in machining process effectiveness on number of the batch workpieces and ratio between main processing time and machine-setting time were analyzed.*

**Key words:** blisk, productivity, machining process, calculation expression, machining times, scheme of the technological action.