



О.Б. Федосеев, В.И. Малышев

# **АНАЛИЗ ЦИКЛА ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Методические указания  
по выполнению практической работы

Тольятти  
ТГУ  
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Автомеханический институт  
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного  
производства»

О.Б. Федосеев, В.И. Малышев

## **АНАЛИЗ ЦИКЛА ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Методические указания  
по выполнению практической работы

Тольятти  
ТГУ  
2011

УДК 621.923(075.8)

ББК 34.637.3я73

Ф338

Рецензенты:

д.т.н., профессор Поволжского государственного университета  
сервиса *Б.М. Горшков*;

к.т.н., доцент Тольяттинского государственного университета  
*Д.Г. Левашкин*.

**Ф338** Федосеев, О.Б. Анализ цикла врезного шлифования с учетом случайных погрешностей : методические указания по выполнению практической работы / О.Б. Федосеев, В.И. Малышев. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 40 с. : обл.

В методических указаниях представлена методика анализа цикла врезного шлифования с учетом случайных погрешностей. Издание предназначено для подготовки магистров направления 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение автоматизированных машиностроительных производств» по дисциплине «Системы ЧПУ в машиностроении».

Могут быть полезны студентам, занимающимся научно-исследовательской работой, а также аспирантам соответствующих специальностей.

УДК 621.923(075.8)

ББК 34.637.3я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2011

## **Введение**

В современном машиностроительном производстве важное место занимают технологические операции шлифования заготовок. Будучи операциями в основном финишной обработки, они обеспечивают получение заданных рабочим чертежом технических требований размерной точности и шероховатости шлифованных поверхностей. В этом случае качество обработки является техническим ограничением для достижения максимально возможной производительности операций шлифования.

В условиях непрерывного автоматизированного производства оптимизация технологических операций возможна при учете основных значимых факторов, влияющих на показатели процесса шлифования. Для этого необходим глубокий анализ циклов автоматизированного шлифования на основе использования компьютерных технологий.

Настоящие методические рекомендации разработаны авторами на базе собственных теоретических и экспериментальных работ и предназначены для освоения студентами, магистрантами и аспирантами методов выполнения научных исследований, обработки и объяснения полученных результатов.

## Основные обозначения

$\delta$  – вариация припуска детали, мкм.

$f$  – плотность распределения, мкм.

$\sigma$  – интенсивность флуктуаций, мкм<sup>3/2</sup>.

$t$  – время цикла, с.

$\tau$  – постоянная времени, с.

$u$  – упругая деформация, мкм.

$u_m$  – экстремум упругой деформации.

$V$  – заданная скорость подачи шлифовального круга, мкм/с.

$V_1$  – заданная скорость черновой подачи, мкм/с.

$V_2$  – заданная скорость чистовой подачи, мкм/с.

$V^*$  – фактическая скорость врезания круга, мкм/с.

$x$  – уменьшение радиуса детали, мкм.

$x_0$  – начальный припуск детали, мкм.

$x_1$  – точка переключения подачи, мкм.

$J$  – удельная энергия шлифования Дж/мм<sup>3</sup>, .

$a$  – толщина срезаемого слоя, мкм.

$\delta$  – жесткость, Н/мкм.

$$\lambda = t V.$$

$$\lambda_1 = t V_1.$$

$$\lambda_2 = t V_2.$$

$$p = f / u.$$

## **1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

**Цель работы** – получение студентами навыков научно-исследовательской работы при компьютерном анализе цикла врезного шлифования с учетом случайных погрешностей.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Ознакомиться с общими сведениями о циклах шлифования.
2. Построить детерминированную модель цикла.
3. Построить вероятностную модель цикла.
4. Сравнить детерминированную и вероятностную модели цикла.
5. Сделать заключение о влиянии технологических факторов на точность обрабатываемой поверхности.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИКЛАХ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В массовом и серийном производствах для обработки наружных и внутренних поверхностей валов при достижении точности, соответствующей 5–6 квалитетам, и параметра шероховатости  $Ra = 0,2 \dots 1,0$  мкм обычно применяют врезное шлифование с поперечной подачей круга. Схема типичной операции шлифования представлена на рис. 1.

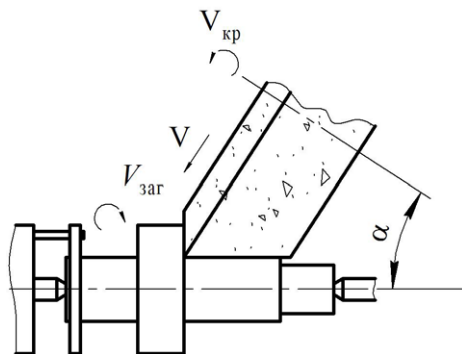


Рис. 1. Схема врезного шлифования

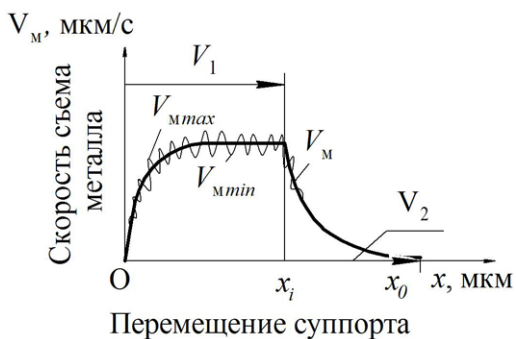


Рис. 2. Структура цикла шлифования

Шлифование с врезной подачей шлифовального суппорта  $V$  ( $V_1, V_2, V_3$ ), направленное обычно под углом  $\alpha = (0 \dots 30^\circ)$ , производится на станках-автоматах или полуавтоматах с окружной скоростью круга  $V_{кр}$ , заготовки  $V_{заг}$ .

Время непосредственного съема металла называют циклом шлифования.

Путь, который проходит шлифовальный суппорт при шлифовании припуска  $x_0$ , состоит из быстрого подвода круга к шлифуемой поверхности до момента его касания, а затем непосредственного врезания в металл, т.е. этапов чернового и чистового шлифования (рис. 2).

Рассмотрим динамику процесса шлифования в фазовой плоскости в координатах  $V_M$  и  $x$  (при анализе цикла шлифования координаты могут быть и другими).

На этапе врезания шлифовальный круг начинает процесс шлифования в точке  $O$  со скоростью черновой подачи  $V_1$ . Из-за ограниченной жесткости технологической системы станка происходит ее упругое отжатие, из-за чего фактическая скорость съема металла  $V^*$  получается меньше номинального значения скорости перемещения шлифовального суппорта  $V$ .

Нарастающее упругое отжатие  $u$ , зависящее от силы  $F_n$  и жесткости технологической системы, при дальнейшем перемещении суппорта постепенно увеличивает натяг в технологической системе станка, и соответственно этому возрастает съем металла. Поэтому шлифование в начальной фазе на этапе врезания представляет собой неустановившийся процесс. И только после создания в технологической системе определенного натяга, за счет упругого отжатия  $u$  нормальной составляющей  $F_n$  силой резания, этап врезания переходит к установившемуся процессу шлифования.

Завершающий этап шлифования ( $x_i - x_i$ ) должен обеспечить заданные параметры качества обработки. Поэтому здесь уменьшают подачу  $V_2$  до минимального значения или вообще производят выхаживание с  $V_2=0$ , как показано на рис. 2.

Отметим, что из-за флуктуации скорости подачи  $V$  шлифовального суппорта, обусловленной как детерминированными, так и случайными факторами, фазовая траектория  $V_M(x)$ , характеризующая скорость съема металла, носит колебательный характер с амплитудой в пределах от  $V_{Mmin}$  до  $V_{Mmax}$ .

При значительной амплитуде траектории  $V_M(x)$  на завершающем этапе выхаживания отклонение фазовой траектории может привести к отклонению размера готовой детали за пределы допуска на размер.



В этом случае выбирают другой метод правки круга, уменьшают скорости  $V_1$  и  $V_2$  шлифовального суппорта, обеспечивающие меньшие границы  $V_{Mmax}(x)$  и  $V_{Mmin}(x)$ , что чревато снижением производительности операции шлифования.

Поэтому для достижения заданных параметров качества операции шлифования требуется учет и анализ случайных факторов на основе построения вероятностной модели цикла шлифования.

Существуют два подхода к описанию цикла шлифования: с учетом (вероятностная модель) и без учета (детерминированная модель) случайных возмущений.

Параметрами детерминированной модели являются два коэффициента пропорциональности: во-первых, между нормальной составляющей силы резания и фактической скоростью врезной подачи и, во-вторых, между упругой реакцией и упругим отклонением системы. Отношение этих коэффициентов пропорциональности дает важнейший параметр детерминированной модели – постоянную времени системы.

В вероятностной модели к постоянной времени добавляется второй параметр – интенсивность флуктуаций, – который характеризует величину случайных колебаний (флуктуаций) постоянной времени около среднего значения и интенсивность флуктуаций скорости врезной подачи. Методика построения вероятностной модели сводится к замене постоянной времени в виде числа на случайный процесс (шум), при котором постоянная времени случайным образом изменяется во времени.

Теория стохастического цикла врезного шлифования изложена далее в соответствии с работой [1].

Детерминированная модель проще, но вероятностная модель позволяет учесть не только силы резания и жесткость детали и оборудования, но и такие параметры, как степень изношенности оборудования, стабильность режущих свойств инструмента, надежность подачи СОЖ и т. п.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### 3.1. Условия врезного шлифования заготовок

При шлифовании образцов на круглошлифовальном станке по схеме, изображенной на рис. 1, с помощью информационно-измерительной системы в режиме текущего времени производят измерения (за один оборот детали):

- фактического съема припуска с цилиндрической поверхности  $T$ , мкм;
- перемещения шлифовального суппорта  $x$ , мкм;
- составляющих  $F_n$  и  $F_v$  силы резания, Н;
- активной мощности  $N$  шлифования, Вт;
- скорости перемещения шлифовального суппорта  $\frac{dx}{dt}$ , мкм/с;
- скорости фактического съема металла  $\frac{dy}{dt}$ , мкм/с;
- упругого отжатия  $u$ , мкм.

Врезное шлифование образца производят в трехступенчатом автоматическом цикле в следующей последовательности:

- черновое шлифование ( $x_1 = 200$  мкм; скорость врезной подачи  $V_1 = 0,9$  мм/мин);
- чистовое шлифование ( $x_2 = 30$  мкм;  $V_2 = 0,25$  мм/мин);
- окончательное шлифование и выхаживание ( $V_3 = 0$  мм/мин).

В общем виде диаграмма скоростей такого трехинтервального цикла аналогична показанному на рис. 2 двухинтервальному циклу.

Условия шлифования:

- |                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| диаметр круга – 700 мм;    | длина детали – 50 мм;               |
| скорость резания – 44 м/с; | частота вращения детали – 2,5 об/с; |
| диаметр детали – 47мм;     | угол поворота оси круга – 26,5°.    |

#### 3.2. Детерминированная модель цикла шлифования

Уравнения цикла шлифования для детерминированной модели имеют вид

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = y; \quad \frac{dy}{dt} = V(x), \quad (1)$$

где  $x$  – уменьшение радиуса обрабатываемой детали;  $y$  – текущее положение поперечного суппорта (бабки) врезной подачи и  $V(x)$  – скорость

подачи бабки на врезание. Параметр  $\tau$  – постоянная времени системы  $\tau = B/k$ ,  $B$  – коэффициент пропорциональности между фактической скоростью врезной подачи  $V^* = dx/dt$  и нормальной составляющей силы резания  $F_n = BV^*$  в линейной модели,  $k$  – эффективная жесткость шлифовального станка. Если мы обозначаем упругое отклонение технологической системы через  $u = y - x$ , то сила упругой реакции может быть записана как  $R = ku$ . Из условия равновесия сил при пренебрежении динамическими эффектами получаем  $F_n = R$ , откуда и следуют уравнения (1).

Для врезного шлифования с датчиком размера детали, задаваемая в каждый момент времени радиальная скорость врезной подачи  $V(x)$  является функцией измеренного уменьшения радиуса детали  $x$ . Самый простой цикл врезного шлифования (рис. 2) состоит из двух стадий: врезание ( $V = V_1$  при  $x_0 < x < x_1$ ) и выхаживание ( $V = V_1 = V_2 = 0$  при  $x_1 < x < x_0$ ). Здесь мы обозначаем начальный радиальный припуск  $x_0$  и точку переключения от врезания к выхаживанию через  $x_1$ .

### 3.3. Фазовое пространство

Описываем цикл шлифования в фазовом пространстве  $(x, u)$ . Подставляя  $x = y - u$  в уравнение (1), получаем уравнение  $\tau(y' - u') = u$ . Принимая во внимание, что  $y' = V$ ,  $x' = u/t$  и поэтому  $u' = (du/dx)(u/t)$ , получаем детерминированное уравнение цикла шлифования в фазовом пространстве:

$$\frac{du}{dx} = -1 + \frac{\lambda}{u}, \quad (2)$$

где  $\lambda = \tau V$ . В течение периода выхаживания с  $\lambda = 0$  это уравнение сводится к  $du/dx = -1$ . Следовательно, в фазовом пространстве нет никакого экспоненциального выхаживания и упругая деформация в течение периода выхаживания дается простой зависимостью:

$$u = E + x_0 - x, \quad (3)$$

где  $E$  – упругая деформация в конце цикла шлифования. В течение чернового периода врезной подачи при  $\lambda = \lambda_1 = \tau V_1$  решение уравнения (2) следующее:

$$x + u - c + \lambda_1 \log((\lambda_1 - u)/(\lambda_1 - c)) = 0, \quad (4)$$

где  $u(0) = c$ . Подстановка  $u$  из уравнения (3) в уравнение (4) дает точку переключения:

$$x = E + x_0 - \lambda_1 + (\lambda_1 - c)\exp(-(E + x_0 - c)/\lambda_1). \quad (5)$$

Поскольку точка переключения известна, то остаточное упругое отклонение  $E$  может быть найдено от этого уравнения.

### 3.4. Вероятностная модель цикла шлифования

Цикл шлифования, описанный уравнением (2), нелинеен по переменной состояния  $u$ , но линеен по  $\lambda$ . Чтобы принять во внимание флуктуации скорости врезной подачи и флуктуации постоянной времени  $\tau$ , которая зависит от различных параметров шлифования, мы заменяем параметр  $\lambda = \tau V$  в уравнении (2) вероятностным процессом:

$$\lambda_1 = \lambda + Z_t, \quad (6)$$

где  $Z_t$  – шум. Учитывая, что флуктуации являются очень быстрыми, в пределе белого шума  $Z_t = \sigma dW$ , где  $W(x)$  – процесс Винера, мы получаем из уравнения (2) стохастическое дифференциальное уравнение:

$$du = (-1 + \lambda/u)dx + (\sigma/u)dW, \quad (7)$$

которое может трактоваться в соответствии с подходом Ито. В этом случае плотность вероятности флуктуаций в фазовом пространстве  $f(u, x)$  удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial u} \left( \left( -1 + \frac{\lambda}{u} \right) f \right) + \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial u^2} \left( \frac{1}{u^2} f \right). \quad (8)$$

Интенсивность шума  $\sigma$  отражает как интенсивность флуктуаций скорости врезной подачи, так и интенсивность флуктуаций постоянной времени.

Для следующих значений параметров:  $x_0 = 100$  мкм,  $\delta = 20$  мкм,  $x_1 = 65$  мкм,  $\lambda_1 = 40$  мкм/сек,  $\lambda_2 = 0$ ,  $\sigma = 10$  мкм<sup>3/2</sup> – численное решение уравнения Фоккера-Планка (8) представлено на рис. 3. Значение плотности вероятности  $f(u, x)$  представлено в зависимости от радиального съема  $x$  и упругой деформации  $u$ .

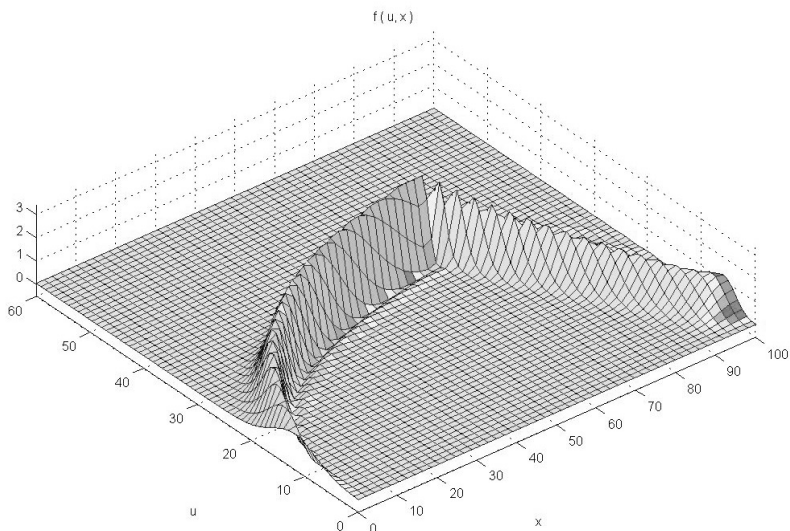


Рис. 3. Цикл шлифования в фазовом пространстве [1]

При нулевой интенсивности флуктуаций  $\sigma$  плотность вероятности  $f(u, x)$  превращается в дельта-функцию с нулевым разбросом и цикл шлифования тождественен детерминированному циклу из раздела 3.2. На рис. 3 интенсивность флуктуаций равна  $\sigma = 10 \text{ мкм}^{3/2}$  и мы видим, что при каждом значении радиального съема  $x$  распределение плотности вероятности  $f$  представляет собой колоколообразную функцию с ненулевой дисперсией. Это означает, что в реальном процессе шлифования фактические случайные траектории обработки в фазовом пространстве отклоняются от детерминированного цикла. Вероятность этого отклонения определяется интенсивностью флуктуаций  $\sigma$ , которая на практике зависит от степени изношенности оборудования, стабильности режущих свойств инструмента, надежности подачи СОЖ, т. е. таких технологических параметров, которые не имеют количественной оценки при традиционном анализе. Подход на основе уравнения Фоккера-Планка для плотности вероятности  $f(u, x)$  в фазовом пространстве легко решает эту задачу.

Кроме того, решение уравнения Фоккера-Планка позволяет определить параметры качества шлифованной детали. Из рис. 3 видно, что в момент окончания обработки, т. е. при съеме  $x_0 = 100 \text{ мкм}$ , уп-

ругая деформация лежит в интервале  $u = 0 - 20$  мкм. Скорость врезания пропорциональна упругой деформации и равна  $dx/dt = u/\tau$ , где  $\tau$  – постоянная времени системы. Шероховатость обработанной детали определяется скоростью врезания в конце цикла и может быть легко вычислена.

### **Вывод**

Уравнение (8) может описывать как детерминированные, так и случайные процессы шлифования. Пики плотности вероятности  $f(u, x)$  в фазовом пространстве (см. рис. 3) представляют наиболее вероятный цикл шлифования в фазовом пространстве. Интенсивность флуктуаций  $\sigma$  зависит от степени изношенности оборудования, стабильности режущих свойств инструмента, надежности подачи СОЖ и других технологических параметров, которые не имеют количественной оценки при традиционном анализе.

#### 4. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ РАБОТЫ

1. Студент получает от преподавателя один или несколько вариантов экспериментальных данных (Приложение 1).

2. Выполняется построение графиков показателей шлифования за время цикла:

- составляющих силы  $F_n$  и  $F_v$ ;
- упругой деформации  $u$ , Н/мкм;
- съема металла за один оборот заготовки,  $T$ , мкм;
- скорости перемещения шлифовального суппорта,  $\frac{dx}{dt}$ , мкм/с;
- скорости съема металла,  $\frac{dy}{dt}$ , мкм/с.

3. Рассчитывается детерминированный цикл шлифования и строятся графики съема припуска, положения суппорта и скоростей съема и подачи.

4. Производится сравнение графиков пп. 2 и 3 и делается вывод о величине случайных погрешностей в цикле врезного шлифования и допустимости проектирования технологом цикла врезного шлифования без их учета.

5. Оформляется отчет о работе.

## Контрольные вопросы

1. Опишите структуру цикла шлифования.
2. Что такое постоянная времени?
3. Что такое интенсивность флуктуаций?
4. Что такое жесткость?
5. Что такое случайный процесс?
6. Что такое уравнения Фоккера-Планка?
7. Какая модель цикла шлифования учитывает случайные возмущения?
8. Как учесть силу резания при анализе цикла шлифования?
9. Как учесть силу жесткости детали при анализе цикла шлифования?
10. Как учесть силу жесткости оборудования при анализе цикла шлифования?
11. Как учесть степень изношенности оборудования при анализе цикла шлифования?
12. Как учесть стабильность режущих свойств инструмента при анализе цикла шлифования?
13. Как учесть надежность подачи СОЖ при анализе цикла шлифования?
14. Укажите параметры детерминированной модели цикла шлифования.
15. Укажите параметры вероятностной модели цикла шлифования.
16. Сравните детерминированную и вероятностную модели цикла шлифования.



## **Библиографический список**

1. Fedoseev O.B. The Effect of Noise on Grinding Cycles. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. Vol. 113, November 1991, pp. 474-476.
2. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М. : Машиностроение, 1975.– 286 с.
3. Решетов, А.Г. Автоматизация шлифования и размерного контроля деталей : учеб. пособие / А.Г. Решетов. – СПб. : Политехника, 2003. – 193 с.
4. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М. : Машиностроение, 1975. – 304 с.

**Образцы экспериментальных данных**

Обозначения:

 $n$  – номер оборота заготовки; $F_n$  – нормальная составляющая силы резания, Н; $F_v$  – главная составляющая силы резания, Н; $N$  – мощность шлифования, кВт; $T$  – толщина слоя металла при шлифовании, мкм; $V_c$  – скорость перемещения шлифовального суппорта, мкм/сек; $V_m$  – скорость съема металла при шлифовании, мкм/сек. $u$  – упругая деформация системы СПИД, мкм.

Таблица 1

$n$ , об	$F_n$ , Н	$F_v$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
1	13,3	4,84	0,128	0,01	1,02	0,0251	0,397
2	67,3	25,2	0,512	0,24	13,6	0,605	5,57
3	124	47,4	1,14	0,9	11,7	2,27	9,3
4	172	64,9	1,86	1,7	11,2	4,46	11,9
5	231	88,1	2,51	2,4	12,9	6	14,6
6	288	109	3,07	2,9	14,1	7,2	17,4
7	345	129	3,71	3,4	13,8	8,48	19,5
8	386	144	4,37	3,9	14	9,61	21,3
9	416	155	4,67	4,3	13,6	10,6	22,6
10	439	163	4,91	4,5	13,5	11	23,6
11	469	172	5,23	4,8	14	11,8	24,5
12	509	185	5,58	5,05	17,9	12,4	26,7
13	552	199	5,94	5,45	19,4	14,5	28,6
14	571	205	6,19	6,1	17,1	15,1	29,4
15	591	212	6,53	6,25	17,5	15,3	30,3
16	602	215	6,58	6,35	17,6	15,3	31,2
17	593	214	6,59	6,75	15,2	16,5	30,7
18	585	210	6,67	6,75	15,2	16,4	30,2
19	581	210	6,5	6,3	15,1	15,3	30,1
20	584	211	6,5	6,35	15,9	15,4	30,4
21	582	209	6,54	6,4	15,6	16	30,2
22	588	211	6,54	6,35	16,9	16,3	30,4
23	577	207	6,54	6,5	14,4	15,9	29,8

$n, \text{об}$	$F_H, \text{Н}$	$F_V, \text{Н}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
24	571	206	6,43	6,5	15,6	15,8	29,7
25	588	214	6,61	6,6	18,1	16	30,6
26	601	218	6,66	6,75	17,9	16,5	31,1
27	604	220	6,69	6,75	17,2	16,3	31,5
28	611	223	6,86	7,1	19	17,2	32,2
29	602	221	6,8	6,75	16,2	17	31,9
30	587	219	6,66	6,5	15	16,6	31,3
31	572	212	6,69	6,7	14,7	16,3	30,6
32	574	212	6,54	6,5	16,6	15,9	30,9
33	591	216	6,59	6,75	19,1	16,4	32
34	597	219	6,77	7,25	17,8	17,7	32
35	599	217	6,77	7,1	17	17,4	31,9
36	611	219	6,83	6,55	20,2	17,3	33
37	605	220	6,78	6,55	16,6	16,1	33,2
38	560	206	6,7	6,3	10,9	15,5	31,3
39	482	180	6,22	5,9	4,81	14,5	27,4
40	417	158	5,38	4,75	4,8	11,6	24,6
41	364	139	4,83	3,6	4,48	9,07	22,8
42	317	124	4,21	6,85	5,19	10,2	20,9
43	278	111	3,78	6,6	4,06	9,11	18,9
44	241	98,7	3,25	3	4,47	7,54	17,7
45	210	86,2	2,86	2,9	4,04	7,3	16,4
46	192	80,3	2,62	2,4	4,6	6,2	15,7
47	169	70,7	2,34	2,4	3,74	6,3	14,8
48	150	63,9	2,08	2,65	4,05	6,69	13,7
49	125	53,2	1,84	2,05	1,82	5,24	12,4
50	99,2	44,5	1,55	1,65	0,899	4,17	11,1
51	74	34,8	1,23	1,4	0,462	3,64	9,86
52	59,9	30	1,01	1,55	1,44	4,19	8,85

Таблица 2

$n, \text{об}$	$F_H, \text{Н}$	$F_V, \text{Н}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
1	11,8	3,87	0,16	0,1	1,48	0,274	0,439
2	44,4	14,5	0,496	-0,5	14,1	-0,137	5,65
3	78,4	26,1	0,928	0,75	10,3	1,88	9
4	126	42,6	1,23	1,7	9,84	4,27	11,2
5	174	60	1,73	2,35	12	5,85	13,7
6	241	83,2	2,51	3,1	14,2	7,73	16,3

$n, \text{об}$	$F_H, \text{H}$	$F_V, \text{H}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{МКМ}$	$dy/dt, \text{МКМ/с}$	$dx/dt, \text{МКМ/с}$	$u, \text{МКМ}$
7	287	99,7	3,01	3,6	13,2	8,89	18
8	311	107	3,39	3,8	12,4	9,43	19,2
9	316	110	3,58	3,85	10,3	9,65	19,4
10	361	126	3,79	4,2	16,3	11,6	21,1
11	406	143	4,4	5	16,7	12,3	22,9
12	443	156	4,77	5,55	17,5	13,7	24,4
13	465	165	5,22	5,85	17	14,3	25,5
14	485	169	5,44	6,15	17,4	15	26,5
15	499	175	5,62	6,4	17,5	15,7	27,2
16	513	179	5,76	6,5	18,2	15,8	28,2
17	505	176	5,89	6,4	14,8	15,6	27,8
18	513	179	5,81	6,45	17,9	16,6	28,3
19	517	180	5,82	6,65	17,4	16,7	28,6
20	526	184	5,98	6,85	17,4	16,7	28,9
21	524	183	6,08	6,95	17,2	17,2	28,9
22	521	183	6	6,9	16,4	16,7	28,8
23	517	181	5,92	6,8	16,6	16,7	28,7
24	519	181	6,03	6,85	16,8	16,6	28,8
25	527	184	6,03	7,2	19,2	17,7	29,4
26	530	185	6,08	7,35	17,8	17,9	29,4
27	534	188	6,22	7,15	17,8	17,4	29,5
28	535	188	6,13	6,9	19,2	17,7	30,1
29	519	183	6,11	6,85	16	17,6	29,5
30	498	176	5,92	6,75	14,1	16,7	28,4
31	484	171	5,87	6,55	14,8	16	27,9
32	489	173	5,71	6,7	16,5	16,3	28
33	494	175	5,73	6,8	17,8	16,6	28,5
34	487	173	5,9	6,65	16,1	16,3	28,4
35	500	179	5,79	6,7	18,2	16,3	29,2
36	508	182	5,95	6,85	18,3	16,7	29,8
37	507	182	5,97	6,65	17,5	17,2	30
38	490	176	6,02	6,2	14,9	15,7	29,6
39	411	148	5,44	5,7	5,7	14	26,2
40	337	121	4,64	4,8	4,43	11,9	23,2
41	282	103	3,9	4,1	4,37	10,1	20,9
42	239	87,1	3,23	3,65	3,99	9,08	18,9
43	197	72,6	2,78	3,05	4,41	7,55	17,6
44	169	63,9	2,5	2,65	3,56	6,62	16,4

$n, \text{об}$	$F_H, \text{H}$	$F_V, \text{H}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
45	144	55,2	2,11	2,5	3,11	6,23	15,1
46	120	47,4	1,82	2	3,59	5,04	14,5
47	102	40,7	1,63	1,8	3,33	4,81	14
48	98,4	41,6	1,55	1,9	3,66	4,88	13,5
49	90,3	38,7	1,41	1,7	3,6	4,29	13,2
50	80,7	37,8	1,33	1,5	3,59	3,78	13,2
51	74,7	34,8	1,25	1,35	1,8	3,42	12,5
52	51,1	26,1	1,07	1,4	0,446	3,51	11,3
53	40,7	22,3	0,848	1,25	0,451	3,16	10,2
54	29,6	19,4	0,736	0,95	0,445	2,37	9,45
55	20,7	16,5	0,656	0,75	0,449	1,89	8,88
56	17	15,5	0,544	0,65	0,89	1,62	8,58
57	13,3	13,6	0,48	0,65	0,452	1,65	8,11
58	8,88	12,6	0,48	0,7	0,478	1,88	7,59
59	2,96	10,6	0,448	0,5	0,471	1,32	7,27
60	8,88	13,6	0,384	0,45	1,8	1,14	7,53
61	2,96	11,6	0,352	0,55	0,451	1,39	7,16
62	2,96	11,6	0,416	0,55	0,448	1,39	6,79
63	1,48	10,6	0,416	0,5	0,899	1,26	6,64

Таблица 3

$n, \text{об}$	$F_H, \text{H}$	$F_V, \text{H}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
1	33,3	12,6	0,24	0,05	5,01	0,139	1,75
2	94,7	31,9	0,912	0,35	14,2	0,902	6,92
3	161	53,2	1,71	1,35	13,1	3,44	10,7
4	228	78,4	2,42	2,15	12,4	5,35	13,6
5	295	104	3,04	2,6	13,3	6,5	16,3
6	343	121	3,66	3,05	14,9	8,24	18,8
7	378	135	4,27	3,5	12,5	9,14	20,1
8	416	149	4,54	4	14,2	9,95	21,8
9	435	155	4,88	4,3	12,4	10,7	22,5
10	476	168	5,09	4,35	15,3	11,7	23,8
11	509	179	5,62	4,7	15,9	12	25,3
12	544	191	5,9	5,25	17,2	13	27
13	569	199	6,14	5,75	17,1	14,2	28,2
14	590	203	6,37	5,8	17,6	15,9	28,8
15	602	208	6,59	5,95	16,4	14,8	29,5
16	602	208	6,7	6,35	15,6	15,5	29,5

$n, \text{об}$	$F_H, \text{H}$	$F_V, \text{H}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
17	596	206	5,56	6	15,2	14,6	29,8
18	600	208	6,66	6,1	16,1	16,2	29,7
19	606	210	6,66	6,45	16,3	15,9	29,8
20	604	210	6,72	6,35	15,9	15,8	29,9
21	604	210	6,64	6,65	15,6	16,2	29,7
22	618	215	6,7	6,5	18,4	16	30,6
23	605	211	6,82	6,3	15	16,6	30
24	597	209	6,74	6,15	14,7	15,4	29,8
25	605	211	6,62	6,3	16,9	15,4	30,4
26	621	216	6,83	6,95	18,7	17	31,1
27	633	222	6,93	7,15	19,1	17,8	31,6
28	637	224	6,96	7,15	18,1	18,7	31,4
29	630	221	6,93	6,7	15,9	16,6	31,1
30	613	216	6,91	6,35	14,9	15,6	30,8
31	592	210	6,78	6,55	13,9	15,9	30
32	599	212	6,64	6,65	18	17,2	30,2
33	613	216	6,69	6,8	19,3	17,6	30,9
34	619	220	6,93	7,1	17,8	17,3	31,1
35	619	220	6,91	7,15	17,3	17,4	31,1
36	624	222	6,85	6,8	18,2	16,6	31,8
37	628	223	7,01	6,15	18,7	16,2	32,7
38	568	203	6,83	5,6	8,58	14,2	30,5
39	490	179	6,14	5,7	3,98	14,1	26,4
40	423	157	5,42	4,75	4,81	11,7	23,6
41	362	136	4,85	4,11	4,4	10,1	21,3
42	313	117	4,21	3,85	4,17	10	19,1
43	283	106	3,73	3,3	5,74	8,87	17,9
44	252	94,9	3,26	3,5	3,99	8,73	16
45	218	83,2	2,98	2,95	4,03	7,41	14,6
46	194	73,6	2,66	2,45	4,9	6,12	14,2
47	179	69,7	2,37	2,2	4,78	5,91	13,7
48	158	62	2,13	2	2,7	5,05	12,8
49	124	49,4	1,9	2,05	1,36	5,23	11,3
50	65,5	38,7	1,55	2,2	0,901	5,57	9,44
51	78,4	31,9	1,23	1,7	0,906	4,33	8,1
52	59,9	26,1	1,02	1,25	0,901	3,16	7,21

Таблица 4

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
1	16,3	2,9	0,144	0,35	0,625	0,936	0,116
2	66,6	22,3	0,528	0,05	12,9	0,134	4,64
3	131	45,5	1,39	0,25	12,8	0,641	9,87
4	191	63,9	2,14	0,45	10,6	1,22	13,3
5	269	90	2,85	1,35	12,1	3,52	16,6
6	357	123	3,82	2	15,7	5,04	20,8
7	437	152	4,77	2,5	15,6	6,44	24,4
8	477	166	5,39	2,8	11,7	7,05	26,2
9	517	179	5,89	3,1	12	7,71	27,9
10	546	190	6,3	3,3	12,4	8,19	29,6
11	576	201	6,56	3,45	12,5	8,62	31,2
12	616	214	6,93	3,85	15,1	9,92	33,2
13	643	222	7,28	4,2	14,2	10,8	34,5
14	665	231	7,54	4,4	13,8	10,7	35,8
15	690	239	7,73	4,55	15,1	11,3	37,3
16	707	246	7,9	4,75	14,8	12	38,4
17	739	257	8,08	5,1	17,4	13,1	40,1
18	761	265	8,27	5,3	16	12,9	41,4
19	784	273	8,4	5,3	17,3	13,6	42,8
20	821	284	8,61	5,6	19,1	14,3	44,7
21	839	291	8,77	5,9	17,5	14,5	45,9
22	828	287	8,77	6,05	14,5	15,4	45,6
23	836	289	8,78	6,25	16,1	15,7	45,7
24	850	295	8,88	6,15	16,8	14,9	46,5
25	846	291	8,93	6,15	15,8	15,6	46,6
26	847	291	8,91	6,4	15,5	15,5	46,6
27	848	293	8,91	6,5	16,1	15,9	46,7
28	842	292	8,93	6,45	15,2	15,7	46,5
29	844	291	8,86	6,2	16,3	14,9	47
30	844	291	8,85	6,55	16,8	16,7	47,1
31	858	295	8,88	6,65	18,2	17	47,5
32	869	298	8,98	6,55	18	16,2	48,3
33	888	304	9,04	6,55	20	16,7	49,6
34	877	299	9,07	6,1	15,7	15,8	49,5
35	862	294	8,98	6,25	14,9	15,4	49,3
36	855	293	8,98	6,6	15,5	16,9	48,8
37	847	290	8,93	6,3	15,1	16,2	48,4

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
38	851	291	8,9	6,4	17,3	16,4	48,7
39	865	296	8,91	6,95	19,5	17,3	49,6
40	864	295	8,99	6,95	17	17,5	49,4
41	881	300	9,06	6,75	19,2	17	50,3
42	887	304	9,06	6,5	18,6	16,2	51,3
43	826	283	8,94	5,9	8,54	14,9	48,8
44	748	259	8,56	6	5,25	14,7	44,9
45	679	235	8,13	5,55	3,68	14,3	40,8
46	616	214	7,63	4,2	3,7	10,9	38
47	565	197	7,07	3,9	3,52	9,65	35,5
48	517	180	6,51	3,95	3,78	10,5	33
49	471	165	6	3,75	3,18	9,57	30,5
50	434	153	5,7	3,4	4,89	8,5	29,1
51	404	143	5,3	3,1	4,68	8,16	27,7
52	367	129	4,86	3,1	3,84	8,36	26,1
53	315	111	4,3	2,65	1,35	6,71	24

Таблица 5

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
1	27,4	8,71	0,16	0,75	3,83	1,92	0,743
2	83,6	28,1	0,64	1,15	15,5	3,13	5,29
3	143	46,5	1,34	2	14,2	5,14	8,81
4	178	58,1	1,97	2,75	12,1	6,94	10,9
5	216	71,6	2,26	3,3	13,3	8,23	12,9
6	250	82,3	2,56	3,7	14,6	9,46	14,9
7	276	91	3,01	4,15	15,9	11,6	16,4
8	245	96,8	2,19	4,45	12,5	11,2	17
9	294	97,8	3,41	4,6	12,8	11,4	17,5
10	292	95,8	3,26	4,65	12	11,7	17,7
11	306	101	3,38	4,55	16,1	12,9	18,8
12	299	97,8	3,49	4,6	11	11,9	18,5
13	295	96,8	3,44	4,6	12	11,5	18,7
14	244	79,4	3,1	4,1	5,52	10,6	16,8
15	263	85,2	2,86	4,35	13,3	11,6	17,4
16	322	106	3,23	5,35	19,6	13,4	19,9
17	369	123	4,05	5,95	20,8	14,8	22,3
18	384	129	4,37	6,2	17,5	15,3	23,2
19	400	134	4,43	6,4	18,7	16	24,3



$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
20	417	140	4,66	6,8	19,6	17,8	25
21	424	142	4,9	6,7	17,5	16,9	25,2
22	406	136	4,88	6,8	15,4	16,8	24,6
23	391	131	4,56	6,6	14,6	16,4	23,9
24	384	129	4,54	6,2	15,7	15,2	24,1
25	387	129	4,51	6,2	17,8	16,3	24,7
26	381	127	4,56	6,2	15,9	16,8	24,4
27	363	120	4,22	6,15	13,3	15,3	23,5
28	366	123	4,3	6,05	15,9	15	23,9
29	358	120	4,27	5,55	15	14,2	24,2
30	354	117	4,21	6	15,7	16,6	23,9
31	364	123	4,18	6,55	15,9	16,2	23,8
32	373	126	4,26	6,25	17,2	15,5	24,5
33	387	130	4,4	6,35	18,1	15,7	25,4
34	410	137	4,66	6,3	21,5	18,1	26,6
35	412	140	4,88	6,75	16,8	16,8	26,6
36	391	133	4,74	6,45	14,6	16	26
37	361	121	4,43	5,55	12,3	14,7	25,1
38	361	122	4,19	5,8	15,3	14,6	25,4
39	311	104	4,06	5,65	8,39	14	23,1
40	242	78,4	3,22	4,25	3,58	10,7	20,3
41	191	62	2,66	1,95	3,99	4,85	19,9
42	152	49,4	2,11	2,8	3,59	7,05	18,5
43	129	40,7	1,79	3,95	3,88	10,8	16
44	101	31,9	1,52	2,4	2,72	6,11	14,7
45	94,7	30	1,3	2	4,06	5,06	14,3
46	91	30	1,14	1,95	4,05	4,92	13,9
47	77	25,2	1,07	1,85	3,13	4,65	13,3
48	71	23,2	1,06	1,6	3,57	4,01	13,2
49	58,5	20,3	0,944	1,5	2,24	3,77	12,6
50	57,7	20,3	0,784	1,35	2,8	3,53	12,3
51	51,8	17,4	0,768	1,25	2,37	3,33	11,9
52	53,3	18,4	0,752	1,3	3,17	3,31	11,9
53	54	17,4	0,832	1,1	3,61	2,79	12,2
54	53,3	18,4	0,784	1,35	3,56	3,38	12,3
55	57	20,3	0,736	1,5	3,14	3,78	12
56	45,9	16,5	0,8	1	1,34	2,51	11,5
57	34	11,6	0,624	0,75	0,452	1,9	11

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
58	23,7	7,74	0,448	0,8	0,458	2,06	10,3
59	18,5	5,81	0,384	0,85	0,488	2,33	9,67
60	17,8	5,81	0,304	0,6	0	1,53	9,07
61	15,5	5,81	0,352	0,5	0,899	1,26	8,92

Таблица 6

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
1	32,6	12,6	0,208	1,6	4,09	4,37	-0,102
2	105	38,7	0,992	2,25	18,3	5,94	4,59
3	178	63,9	2,1	2,85	17,5	7,18	8,68
4	182	67,8	2,58	3,05	8,43	7,61	9,01
5	241	89,1	2,8	3,15	15,1	8,33	11,6
6	253	94,9	3,18	3,2	9,22	8,29	11,9
7	273	103	3,28	3,3	9,51	8,4	12,4
8	326	120	3,68	3,75	14,9	9,24	14,7
9	369	135	4,06	4,05	15,2	10,2	16,7
10	393	141	4,5	4,25	15	11,2	18,1
11	412	149	4,72	4,8	13,7	11,9	18,8
12	439	157	5,01	5,25	15,7	12,9	20
13	473	167	5,15	5,4	17,8	13,2	21,9
14	790	173	5,49	5,55	16,6	14,8	22,6
15	517	182	5,74	6,05	17,4	15,2	23,5
16	556	195	6,06	6,8	20,9	16,3	25,4
17	564	198	6,21	6,7	18,1	16,2	26,2
18	531	185	6,13	6,1	12,3	16,2	24,7
19	530	186	6,06	6,45	16,4	16,1	24,8
20	545	192	5,97	6,5	17,7	15,7	25,6
21	545	195	6,16	6,3	17,4	16,7	25,9
22	562	199	6,14	6,95	18,2	17,4	26,2
23	551	201	6,37	7,2	17,1	17,3	26,2
24	549	199	6,19	6,8	17	17	26,1
25	556	205	6,24	6,4	19,1	17,2	26,9
26	559	207	6,38	6,35	16,8	15,4	27,4
27	568	209	6,46	6,9	20,2	18,3	28,2
28	565	209	6,5	7,35	17,2	18,7	27,6
29	570	210	6,42	7,2	18,6	17,5	28,1
30	561	208	6,51	7	17,4	18,5	27,7

$n, \text{об}$	$F_H, \text{H}$	$F_V, \text{H}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
31	551	205	6,5	7,1	16,6	17,4	27,3
32	551	205	6,38	7,05	17,3	17,2	27,4
33	482	183	6,21	6,3	8,21	15,3	24,5
34	392	151	5,38	4,85	3,53	12	21
35	326	126	4,54	4,3	3,46	11,9	18
36	275	106	3,81	4,1	3,98	10,2	15,5
37	226	89,1	3,18	3,45	2,64	8,54	13,1
38	187	72,6	2,69	3,05	4,33	8,24	11,7
39	160	62,9	2,37	2,7	3,7	7,01	10,4
40	136	54,2	2,05	2,55	3,55	6,36	9,26
41	126	50,3	1,7	2,35	4,45	5,88	8,69
42	113	46,5	1,55	1,95	4,9	4,87	8,69
43	109	44,5	1,46	1,9	4,49	5,32	8,4
44	101	43,6	1,38	1,95	3,61	4,95	7,87
45	78,4	34,8	1,18	1,6	1,78	4,01	6,98
46	60,7	28,1	0,912	1,5	0,442	3,72	5,66
47	45,1	24,2	0,672	1,35	0,91	3,45	4,67
48	32,6	19,4	0,624	1,2	0,934	3,15	3,82
49	25,9	16,5	0,528	1,05	0,899	2,65	3,13
50	17,8	13,6	0,464	0,9	0,452	2,28	2,41
51	15,5	13,6	0,384	0,9	0,91	2,3	1,86

Таблица 7

$n, \text{об}$	$F_H, \text{H}$	$F_V, \text{H}$	$N, \text{кВт}$	$T, \text{мкм}$	$dy/dt, \text{мкм/с}$	$dx/dt, \text{мкм/с}$	$u, \text{мкм}$
1	20,7	6,78	0,096	0,05	4,68	0,126	1,81
2	56,2	20,3	0,464	0,4	13	1,05	6,39
3	94,7	34,8	0,96	0,95	10,4	2,51	9,36
4	147	56,1	1,47	1,6	10,8	4,04	12
5	210	79,4	2,1	2,45	14,2	6,11	15,3
6	272	104	2,82	3,1	14,2	7,73	17,9
7	321	122	3,44	3,5	13,6	8,64	19,9
8	335	127	3,86	3,75	11,9	9,28	20,9
9	352	134	3,97	4	11	9,85	21,4
10	402	152	4,4	4,45	15,4	11	23,2
11	455	169	4,88	4,95	19	12,9	25,5
12	486	181	5,38	5,5	16,9	13,7	26,8
13	511	190	5,6	5,8	17,2	14,4	27,9

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кБТ	$T$ , МКМ	$dy/dt$ , МКМ/с	$dx/dt$ , МКМ/с	$u$ , МКМ
14	528	195	5,89	5,9	17,1	14,5	29
15	554	204	6,06	6,35	18,8	15,6	30,3
16	559	207	6,19	6,65	17	16,3	30,6
17	566	208	6,35	6,9	16,9	16,8	30,6
18	569	207	6,3	7	16,8	17	30,6
19	569	208	6,35	6,8	16,5	16,6	30,5
20	571	208	6,37	6,6	16,9	16,5	30,7
21	565	206	6,38	6,3	16,6	16,8	30,6
22	565	206	6,34	6,75	15,7	16,5	30,3
23	562	205	6,26	7,2	17	17,6	30
24	571	207	6,43	7	17,7	17	30,3
25	587	212	6,42	7,1	19,1	17,3	31
26	583	212	6,48	7	16,9	17	31
27	585	212	6,51	7,05	18,7	17,2	31,6
28	588	213	6,5	7,3	18,6	18,2	31,8
29	578	208	6,5	6,9	16,8	17,6	31,4
30	556	202	6,34	6,75	13,6	16,6	30,2
31	543	197	6,22	6,7	15,3	16,4	29,7
32	539	196	6,14	6,75	16,3	16,7	29,6
33	538	196	6,11	6,7	16,5	16,4	29,6
34	539	195	6,14	6,45	16,5	15,7	30
35	562	204	6,16	6,75	19,4	16,4	31,2
36	563	204	6,34	6,65	17,8	16,3	31,9
37	487	178	6,02	5,85	6,96	14,3	28,9
38	410	149	5,25	4,85	3,67	12,5	25,4
39	345	125	4,48	3,9	3,67	10,1	23
40	300	106	3,82	3,9	4	9,73	20,7
41	252	89,1	3,26	3,95	4,43	9,83	18,5
42	216	74,5	2,85	3,35	4,02	8,4	16,7
43	192	65,8	2,46	2,8	3,54	6,97	15,4
44	157	52,3	2,06	2,2	3,56	5,5	14,6
45	135	43,6	1,76	2,2	3,55	5,49	13,8
46	130	42,6	1,63	2,25	3,57	5,64	13
47	115	37,8	1,49	1,75	4,02	4,39	12,8
48	96,9	31	1,28	1,55	1,8	3,91	12
49	77	23,2	1,09	1,5	0,489	4,12	10,7
50	62,2	16,5	0,848	0,45	0,453	1,15	10,4
51	50,3	11,6	0,704	1,1	0,906	2,8	9,67

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
52	42,9	8,71	0,576	1,85	0,897	4,66	8,17
53	37	6,78	0,496	0,95	0,899	2,4	7,58
54	29,6	4,84	0,448	0,9	0,447	2,26	6,86
55	26,6	2,9	0,368	0,85	0,449	2,15	6,19
56	22,2	0,968	0,272	0,65	0,892	1,63	5,89

Таблица 8

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
1	8,88	3,87	0,256	0,1	10,7	0,25	4,17
2	17,8	6,78	0,48	0,1	14,3	0,252	9,77
3	25,9	9,68	0,592	0,05	10,3	0,125	13,8
4	47,4	16,5	0,8	0,05	14,3	0,125	19,5
5	91	31,9	1,33	0,1	17,8	0,256	26,5
6	158	57,1	2,02	0,45	19,2	1,18	33,3
7	214	79,4	2,53	2,15	14,6	5,36	37,1
8	280	106	3,04	3,6	15,1	8,96	39,5
9	361	136	3,86	4,5	18,6	11,2	42,5
10	406	150	4,56	5	17,9	12,3	44,8
11	425	156	4,83	5,65	15,4	14	45,4
12	463	169	5,22	6	18,2	14,6	46,9
13	475	174	5,47	6,15	16,2	15,1	47,3
14	480	175	5,44	6,3	15,6	15,3	47,4
15	491	178	5,7	6,4	17,5	15,8	48,1
16	507	183	5,84	6,25	17,9	15,7	49
17	507	183	5,97	6,2	17	16,4	49,2
18	509	184	5,81	6,75	15,7	16,5	48,9
19	537	193	6,05	7,15	20,6	17,6	50,1
20	515	185	6,08	7,05	14,3	17,2	48,9
21	536	193	6,02	7,15	20,8	17,4	50,3
22	533	192	6,27	7,1	16,9	17,3	50,1
23	496	179	5,98	6,7	12,6	16,3	48,6
24	474	171	5,79	6,4	14	15,7	47,9
25	460	166	5,6	5,85	13,5	14,3	47,6
26	457	166	5,5	5,95	15,5	15,7	47,5
27	465	168	5,44	6,35	16,2	16	47,5
28	486	177	5,65	6,6	18,5	16,3	48,4
29	505	183	5,84	6,95	19,5	17	49,5
30	508	183	6,02	6,75	17,8	16,5	50

$n$ , об	$F_H$ , Н	$F_V$ , Н	$N$ , кВт	$T$ , мкм	$dy/dt$ , мкм/с	$dx/dt$ , мкм/с	$u$ , мкм
31	494	179	6,02	6,65	14,7	16,1	49,4
32	437	159	5,6	5,8	8,29	14,2	47
33	368	136	4,99	4,45	5,24	10,9	44,7
34	313	116	4,22	4,2	4,83	10,4	42,5
35	273	101	3,55	3,95	4,87	9,83	40,5
36	234	86,2	3,1	3,35	5,7	8,93	39,2
37	195	71,6	2,75	3,05	4,44	7,61	38
38	175	65,8	2,48	2,95	4,48	7,43	36,8
39	160	61	2,14	2,7	4,9	6,75	36,1
40	133	53,2	1,92	2,3	3,58	5,78	35,2
41	124	48,4	1,87	2,2	4,89	5,51	34,9
42	113	46,5	1,63	1,95	3,12	4,88	34,2
43	99,9	41,6	1,47	1,75	4,03	4,4	34,1
44	83,6	36,8	1,42	1,65	1,33	4,12	33
45	59,9	26,1	1,2	1,35	0,892	3,38	32
46	50,3	24,2	0,864	1,25	0,446	3,13	30,9
47	32,6	17,4	0,704	0,95	0,461	2,46	30,1
48	26,6	14,5	0,64	0,85	0,471	2,25	29,5
49	18,5	11,6	0,608	0,85	0,452	2,16	28,8
50	16,3	12,6	0,464	0,65	0,449	1,64	28,3
51	9,62	9,68	0,384	0,6	0,904	1,52	28,1
52	9,62	8,71	0,416	0,55	0,446	1,38	27,7
53	4,44	7,74	0,32	0,55	0	1,39	27,2

**Программа расчета детерминированного цикла (MATLAB)**

```

function Grinding_Cycle_det

%----- cycle in [x,t] space

% a, Vw, Vs, Dw, Ds, u, epsilon, U, U1, nu, nu1

% Py = m*u*Vw*a*width/Vs
% R = c0*(X - Z)
% a(i) = X(i-1) - X(i)
% Z(i) = Z(i-1) - a0(i)
% a0(i) = Vf(i)*t1
% t1 = pi*Dw/Vw
% m*u*Vw*(X(i-1) - X(i))*width/Vs = c0*(X(i) - Z(i))
% C*(X(i-1) - X(i)) = (X(i) - Z(i))
%
% C = m*u*Vw*width/Vs/c0;
%
% Z(i) = Z(i-1) - Vf(i)*t1
% X(i) = (Z(i) + C*X(i-1))/(1 + C)

clear,clc

nu = 3*1e6;      % 1/s
nu1 = 9.5* 1e6; % 1/s
U = 80*1e3;     % J/mol
U1 = 135*1e3;  % J/mol

Dw = 0.05;     % m
Ds = 0.75;     % m

Vw = .5;       % m/s
Vs = 80;       % m/s
t1 = pi*Dw/Vw

```

```

u = 60*1e9;

x0 = 350;      % mkm
x1 = 170;      % mkm
x2 = 70;       % mkm

v0 = 100;      % mkm/s
v1 = 40;       % mkm/s
v2 = 0;        % mkm/s

ym = 600;      % mkm
dy = 10;       % mkm
yy = 0:dy:ym;
yy0 = yy - x0;

t1 = pi*Dw/Vw; % s
m = 2.5;
width = 50*1e-3; % m
c0 = 10*1e6;   % N/m
C = m*u*Vw*width/Vs/c0
pause(1)

X = x0;
Z = x0;

XX = [];
ZZ = [];
aa = [];
aa0 = [];
O = zeros(1,length(yy));
while 1
    Vf = v0;
    if X < x1, Vf = v1; end
    if X < x2, Vf = v2; end

```



```

a0 = Vf*t1;      % mkm
Z = Z - a0;
Xold = X;
X = (Z + C*Xold)/(1 + C);
a = Xold - X;
if X < 0, break, end

I = find(yy >= (x0 - X) );
y = yy(I) - (x0 - X);

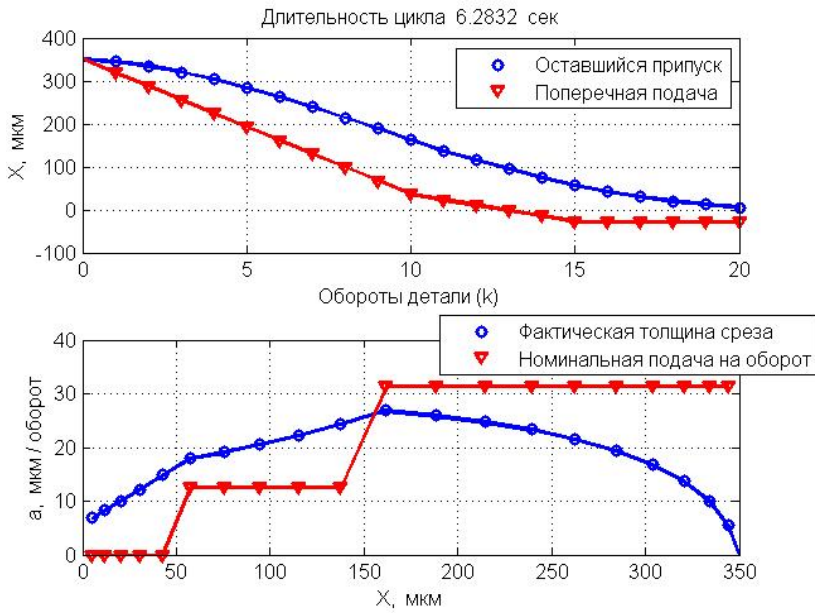
XX = [XX; X];
ZZ = [ZZ; Z];
aa = [aa; a];
aa0 = [aa0; a0];
end
n = length(XX);
kk = 1:n;

subplot(211)
plot(kk,XX,'ob', kk,ZZ,'vr',[0 kk],[x0; XX],'-b', [0 kk],[x0; ZZ],'-r',
'linewidth',2)
legend('Оставшийся припуск','Поперечная подача')
xlabel('Обороты детали (k)')
ylabel('X, мкм')
title(['Длительность цикла ',num2str(t1*n),' сек'])
grid

subplot(212)
plot(XX,aa,'ob', XX,aa0,'vr',[x0; XX],[0;aa],'-b', XX,aa0,'-r', 'linewidth',2)
legend('Фактическая толщина среза','Номинальная подача на оборот')
xlabel('X, мкм')
ylabel('a, мкм / оборот')
grid

```

**Пример расчета детерминированного цикла**



**Программа представления параметров стохастического цикла  
(MATLAB)**

```
function Grinding_Cycle_stoch
clear,clc

tit = '149'
% n.об Py.H Pz.H Py/Pz N.кВт Т.мкм DyDT.мкм/с DxDT.мкм/с
Уд.мкм
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9
m = [
1 27.4 8.71 3.14581 0.16 0.75 3.83 1.92 0.743
2 83.6 28.1 2.97509 0.64 1.15 15.5 3.13 5.29
3 143 46.5 3.07527 1.34 2 14.2 5.14 8.81
4 178 58.1 3.06368 1.97 2.75 12.1 6.94 10.9
5 216 71.6 3.01676 2.26 3.3 13.3 8.23 12.9
6 250 82.3 3.03767 2.56 3.7 14.6 9.46 14.9
7 276 91 3.03297 3.01 4.15 15.9 11.6 16.4
8 245 96.8 2.53099 2.19 4.45 12.5 11.2 17
9 294 97.8 3.00613 3.41 4.6 12.8 11.4 17.5
10 292 95.8 3.04802 3.26 4.65 12 11.7 17.7
11 306 101 3.0297 3.38 4.55 16.1 12.9 18.8
12 299 97.8 3.05726 3.49 4.6 11 11.9 18.5
13 295 96.8 3.04752 3.44 4.6 12 11.5 18.7
14 244 79.4 3.07305 3.1 4.1 5.52 10.6 16.8
15 263 85.2 3.08685 2.86 4.35 13.3 11.6 17.4
16 322 106 3.03774 3.23 5.35 19.6 13.4 19.9
17 369 123 3 4.05 5.95 20.8 14.8 22.3
18 384 129 2.97674 4.37 6.2 17.5 15.3 23.2
19 400 134 2.98507 4.43 6.4 18.7 16 24.3
20 417 140 2.97857 4.66 6.8 19.6 17.8 25
21 424 142 2.98592 4.9 6.7 17.5 16.9 25.2
22 406 136 2.98529 4.88 6.8 15.4 16.8 24.6
23 391 131 2.98473 4.56 6.6 14.6 16.4 23.9
24 384 129 2.97674 4.54 6.2 15.7 15.2 24.1
25 387 129 3 4.51 6.2 17.8 16.3 24.7
```

26 381 127 3 4.56 6.2 15.9 16.8 24.4  
27 363 120 3.025 4.22 6.15 13.3 15.3 23.5  
28 366 123 2.97561 4.3 6.05 15.9 15 23.9  
29 358 120 2.98333 4.27 5.55 15 14.2 24.2  
30 354 117 3.02564 4.21 6 15.7 16.6 23.9  
31 364 123 2.95935 4.18 6.55 15.9 16.2 23.8  
32 373 126 2.96032 4.26 6.25 17.2 15.5 24.5  
33 387 130 2.97692 4.4 6.35 18.1 15.7 25.4  
34 410 137 2.9927 4.66 6.3 21.5 18.1 26.6  
35 412 140 2.94286 4.88 6.75 16.8 16.8 26.6  
36 391 133 2.93985 4.74 6.45 14.6 16 26  
37 361 121 2.98347 4.43 5.55 12.3 14.7 25.1  
38 361 122 2.95902 4.19 5.8 15.3 14.6 25.4  
39 311 104 2.99038 4.06 5.65 8.39 14 23.1  
40 242 78.4 3.08673 3.22 4.25 3.58 10.7 20.3  
41 191 62 3.08065 2.66 1.95 3.99 4.85 19.9  
42 152 49.4 3.07692 2.11 2.8 3.59 7.05 18.5  
43 129 40.7 3.16953 1.79 3.95 3.88 10.8 16  
44 101 31.9 3.16614 1.52 2.4 2.72 6.11 14.7  
45 94.7 30 3.15667 1.3 2 4.06 5.06 14.3  
46 91 30 3.03333 1.14 1.95 4.05 4.92 13.9  
47 77 25.2 3.05556 1.07 1.85 3.13 4.65 13.3  
48 71 23.2 3.06034 1.06 1.6 3.57 4.01 13.2  
49 58.5 20.3 2.88177 0.944 1.5 2.24 3.77 12.6  
50 57.7 20.3 2.84236 0.784 1.35 2.8 3.53 12.3  
51 51.8 17.4 2.97701 0.768 1.25 2.37 3.33 11.9  
52 53.3 18.4 2.89674 0.752 1.3 3.17 3.31 11.9  
53 54 17.4 3.10345 0.832 1.1 3.61 2.79 12.2  
54 53.3 18.4 2.89674 0.784 1.35 3.56 3.38 12.3  
55 57 20.3 2.80788 0.736 1.5 3.14 3.78 12  
56 45.9 16.5 2.78182 0.8 1 1.34 2.51 11.5  
57 34 11.6 2.93103 0.624 0.75 0.452 1.9 11  
58 23.7 7.74 3.06202 0.448 0.8 0.458 2.06 10.3  
59 18.5 5.81 3.18417 0.384 0.85 0.488 2.33 9.67  
60 17.8 5.81 3.06368 0.304 0.6 0 1.53 9.07  
61 15.5 5.81 2.66781 0.352 0.5 0.899 1.26 8.92

];

% Диаметр круга мм: 696 (м) угол поворота: 26.5 скорость резания: 44

% Скорость детали: 2.5 диаметр детали мм: 47 длина мм: 50

Dw = 0.696; % Диаметр круга. м

psi = 26.5\*pi/180; % угол поворота круга

v = 44; % скорость резания. м/сек

n = 2.5; % Скорость детали. об/сек

d = 0.047; % диаметр детали. м

L = 0.050; % длина детали. м

%=====

tau = pi\*d\*n

v1 = pi\*d/tau

v1\_mmin = v1\*60

EL = m(:,9);

DxDt = m(:,8);

%----- проверка T -

DyDt = m(:,7);

a = DyDt\*tau; % m/s

Tm = m(:,6);

[Tm a]

%----- проверка упр деф - ОК

x = cumsum([DxDt\*tau]);

y = cumsum([DyDt\*tau]);

del = y - x;

[EL del]

%----- x,y

N = 1:length(x);

% plot(N,y,'-b', N,x,'-r')

%----- силы

Py = m(:,2);

Pz = m(:,3);

%----- a - u J/mm3

u = Pz.\*v./(v1.\*(a/1e6).\*L)/1e9

```

subplot(221)
plot(a,u,'ob')
% plot(Tm,u,'ob', a,u,'+r')
xlabel('a, mkm')
ylabel('u, J / mm^3')
title(tit)
grid

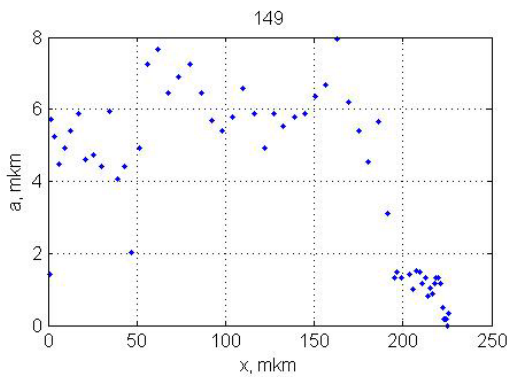
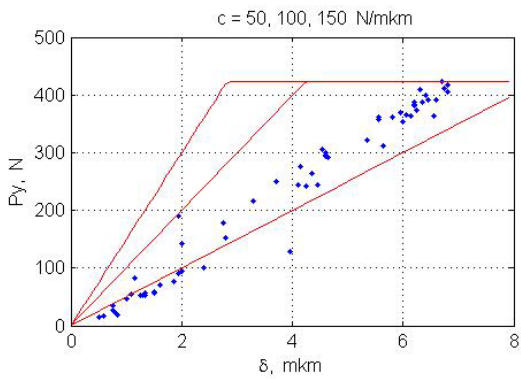
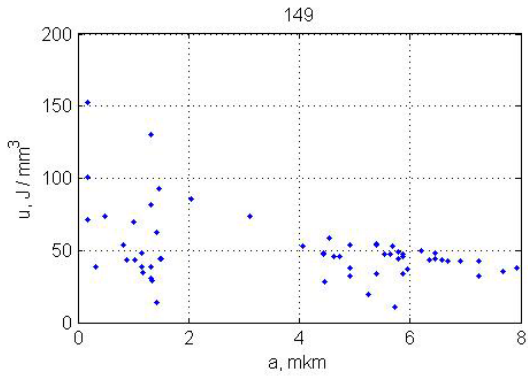
%----- x - a
subplot(222)
plot(x,a,'ob')
xlabel('x, mkm')
ylabel('a, mkm')
title(tit)
grid

%----- del - Py
subplot(223)
c1 = 50;
c2 = 100;
c3 = 150;
dd = 0:1:max(a);
Pyy1 = min(max(Py), c1*dd);
Pyy2 = min(max(Py), c2*dd);
Pyy3 = min(max(Py), c3*dd);
plot(Tm,Py,'ob', dd,Pyy1,'-r', dd,Pyy2,'-r', dd,Pyy3,'-r')
xlabel('\delta, mkm')
ylabel('Py, N')
title([' c = 50, 100, 150 N/mkm'])
grid

shg
end

```

**Пример представления параметров стохастического цикла**



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Основные обозначения.....	4
1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	5
2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИКЛАХ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ.....	6
3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	9
3.1. Условия врезного шлифования заготовок.....	9
3.2. Детерминированная модель цикла шлифования.....	9
3.3. Фазовое пространство.....	10
3.4. Вероятностная модель цикла шлифования.....	11
4. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ РАБОТЫ.....	14
Контрольные вопросы.....	15
Библиографический список.....	16
Приложения.....	17



Учебное издание

*Федосеев Олег Борисович*  
*Мальшев Владимир Ильич*

АНАЛИЗ ЦИКЛА ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ  
С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Методические указания  
по выполнению практической работы

Редактор *Е. Ю. Жданова*  
Технический редактор: *З. М. Малявина*  
Вёрстка: *Л. В. Сызганцева*  
Дизайн обложки: *Г. В. Карасева*

Подписано в печать 24.06.2011. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 2,32.

Тираж 40 экз. Заказ № 1-83-10.

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

