

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель:

Голенков В. А. д.т.н., проф.

Зам. председателя:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Светкин В. В. к.т.н. доц.

Колчунов В. И. д.т.н., проф.

Гордон В. А. д.т.н., проф.

Константинов И. С. д.т.н., проф.

Садков В. Г. д.э.н., проф.

Кулаков А. Ф. к.т.н., доц.

Фролова Н. А. к.социол.н., доц.

Соков О. А. к.т.н., доц.

Борзенков М. И. к.т.н., доц.

Поландова Л. И.

Одолева М. В.

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Киричек А. В. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Подмастерьев К. В. д.т.н., проф.

Васильев А. С. д.т.н., проф.

Васин С. А. д.т.н., проф.

Дальский А. М. д.т.н., проф.

Зубарев Ю. М. д.т.н., проф.

Суслев А. Г. д.т.н., проф.

Технический редактор:

Черепенько А. А. к.т.н., доц.

Художественный редактор:

Барсуков Г. В. к.т.н. доц.

Компьютерная верстка:

Подзолков М. Г. к.т.н.

Гончаров А. В.

АДРЕС РЕДАКЦИИ СЕРИИ

302020 Россия, Орел,

Наугорское шоссе, д. 29

Кафедра ТМСИ

Редколлегия журнала Известия

ОрелГТУ.

Серия «Машиностроение. Приборостроение»

тел: (0862) 41-98-77, 41-98-18

факс: (0862) 41-66-84

e-mail: tmsi@ostu.ru, upk@ostu.ru

Зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания, и средств массовой информации. Свидетельство: ПИ № 77-15496 от 20 мая 2003 г.

Формат 69×90/8

Печать ризография. Бумага

Офсетная. Усл. печ. л. 6,88

Тираж 500 экз.

© ОрелГТУ, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

• **ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН**

- Филиппов В. Н., Пасько Н. И., Филиппов В. Н. Оценка показателей надежности трикотажных автоматов при плане испытаний [NMT] 2
- Козлова Л. Д. К вопросу проектирования пластмассовых зубчатых передач малого модуля 7
- Поляков Р. Н. Анализ возможностей повышения надежности и долговечности опорного узла при различных комбинациях подшипников качения и скольжения 9

• **ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

- Евсеев Д. Д., Тарапанов А. С. Анализ обработки поверхности катания колесных пар на основе теории фракталов 12
- Степанов Ю. С., Шуметов В. Г., Дьяченко С. А., Афанасьева В. В. Применение нейросетевых технологий для анализа влияния параметров спиральных ножей строгальных машин и режимов резания на качество натуральных кож 15
- Степанов Ю. С., Барсуков Г. В., Белкин Е. А. Вероятностно-математическая модель количественных характеристик контактного взаимодействия абразивной частицы с поверхностью материала 20

• **ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ**

- Киричек А. В., Щебров О. М., Телков И. А. Вибрации при обработке поверхностным пластическим деформированием 23
- Новиков А. Н., Иващук О. А., Е. В. Дворнов Повышение эффективности управления технологическими процессами восстановления и упрочнения деталей машин 28
- Соловьев Д. Л., Киричек А. В. Моделирование технологического процесса упрочнения плоских поверхностей статико-импульсной обработкой 30
- Киричек А. В., Афонин А. Н. Перспективы развития резьбонакатывания 36

• **ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ**

- Начвай В. Ф. Универсальная методика решения сборочных размерных цепей (срц) методом пригонки .. 42

• **ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ**

- Подмастерьев К. В., Мишин В. В., Марков В. В. Исследование влияния эксцентricности дорожек качения колец подшипника на состояние смазочного слоя в зонах трения 50
- Захаров М. Г. Теоретическое исследование изменения толщины смазочной пленки в зонах трения подшипников качения 55

• **ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ**

- Ногачева Т. И., Углова Н. В. Источники погрешностей при термоэлектрическом методе контроля толщины покрытий 60
- Никулина И. Н. Определение относительного растяжения экзокарпия при сжатии растительных плодов 63
- Меркулов Д. В. Экспертная система для автоматизации радиоволнового неразрушающего контроля качества строительных материалов и изделий 66
- Располов А. В. Неразрушающий контроль дефектов керамической плитки по параметрам СВЧ поля 72
- Поляков В. И. Контроль величин преднапряжения арматуры, прочностных и деформативных показателей качества железобетонных конструкций вибрационным методом 77
- Суздальцев А. И., Лихачев Д. В. Об одном подходе к проектированию составов бетонных смесей с прогнозируемой моделью оценки качества 82

• **ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

- Смирнов В. А. Исследование точности системы стабилизации и наведения линии визирования при учете кинематики оптического элемента 85
- Матасов В. Ф., Моржов О. В. Обоснование и опыт применения оптических систем для определения перемещений элементов АМ 87
- Богданов М. Б., Прохорцов А. В., Савельев В. В. О компенсации погрешностей трехкомпонентного измерителя угловой скорости, обусловленных эффектом некоммутируемости конечных поворотов 89

• **БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

- Шалобаев Е. В., Юркова Г. Н., Монахов Ю. С., Ефименко В. Т., Ефименко А. В., Корндорф С. Ф., Дунаев А. В. Проблемы создания биологических обратных связей и их применение в сканирующих лазерных медицинских установках 92

• **ДАТЧИКИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ**

- Есипов А. В. Гидроакустический дифференциальный датчик негоризонтальности 97
- Дубовицкий М. А. Устройство сопряжения для частотных датчиков 100

• **СООБЩЕНИЯ**

- Добротин С. А., Зубков И. Л. Оптические химические сенсоры для контроля герметичности изделий машиностроения 104
- Анохин А. М. К проблеме совершенствования уплотнений насосных агрегатов 105
- Звягина Е. А. К вопросу повышения долговечности рабочих органов мультифазных насосов 107

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 519.241.27

Д-р техн. наук, проф. В. Н. Филиппов, д-р техн. наук, проф. Н. И. Пасько,
инж. В. Н. Филиппов
(Тульский государственный университет)

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТРИКОТАЖНЫХ АВТОМАТОВ ПРИ ПЛАНЕ ИСПЫТАНИЙ [NMT]

Theoretical justification of weaving machines reliability evaluation at the testing plan [NMT] for several types of failures. Asymptotic results of the restoration and accumulation processes theory are applied. Evaluation of reliability and maintenanceability parameters for various kinds of failures is performed with the momentum method.

Особенность испытаний трикотажных автоматов по плану [NMT] [1] состоит в том, что число типов отказов велико. Например, при испытаниях чулочно-носочного автомата типа ГАММА фиксируется 24 типа отказов, где отказ – это выпуск некондиционного изделия – не всегда связан с поломкой автомата и последующим его восстановлением, а является сбоем из-за дефектов пряжи и других причин.

При выводе необходимых зависимостей будем исходить из следующих предположений и допущений.

Наработка испытываемого автомата измеряется в единицах времени работы автомата, то есть T – это наработка автомата за время испытаний, одинаковая для всех N автоматов испытываемой партии.

Предполагается, что в начальный момент испытаний автоматы полностью исправны и отказы различных типов возникают независимо друг от друга. Если по достижении наработки T произойдет $N_j(T)$ отказов j -го типа, то общее число отказов всех типов:

$$N(T) = \sum_{j=1}^m N_j(T). \quad (1)$$

Среднее число отказов:

$$\bar{N}(T) = \sum_{j=1}^m \bar{N}_j(T). \quad (2)$$

Дисперсия числа отказов благодаря взаимной независимости чисел отказов каждого типа $N_j(T)$ равна сумме дисперсий по каждому типу отказов $D_{N_j}(T)$, то есть:

$$D_N(T) = \sum_{j=1}^m D_{N_j}(T). \quad (3)$$

Определим теперь $\bar{N}_j(T)$ и $D_{N_j}(T)$ через функцию ненадежности $F_j(t)$ [2] и другие числовые характеристики, такие как средняя наработка на отказ \bar{T}_j , коэффициент вариации наработки на отказ ν_j и др. Из теории восстановления [3] известно, что среднее число отказов $\bar{N}_j(T)$ определяется через функцию ненадежности $F_j(t)$ в результате решения интегрального уравнения восстановления:

$$\bar{N}_j(T) = F_j(T) + \int_0^T \bar{N}_j(T-t) dF_j(t). \quad (4)$$

В явном виде это уравнение в общем случае не решается, поэтому приходится решать его численно или использовать приближенные асимптотические решения. В одном практически важном случае, когда функция ненадежности показательно распределена, то есть:

$$F_j(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\bar{T}_j}\right), \quad (5)$$

уравнение (4) имеет простое явное решение:

$$\bar{N}_j(T) = \frac{T}{\bar{T}_j} \quad (6)$$

В общем случае практический интерес представляют следующее асимптотическое решение, справедливое при $T \gg \bar{T}_j$:

$$\bar{N}_j(T) \approx \frac{T}{\bar{T}_j} + \frac{1}{2}(v_j^2 - 1). \quad (7)$$

Практически формулой (7) можно пользоваться при

$$T > \frac{\bar{T}_j}{v_j}. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены результаты численного решения уравнения (4) и асимптотического решения (7).

Среднее число отказов

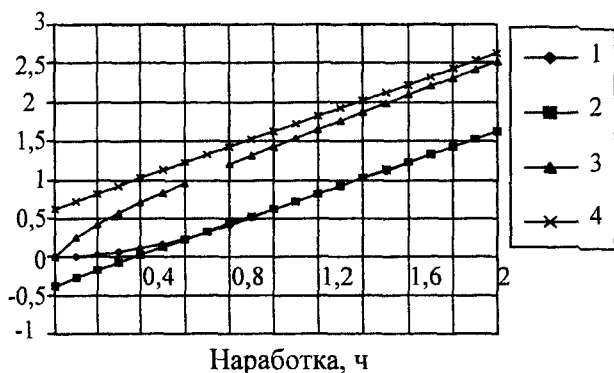


Рис. 1. — Графики зависимости среднего числа отказов от наработки для распределения наработки на отказ по закону Вейбулла: средняя наработка на отказ 1 ч; графики 1 и 3 соответствуют точному решению при коэффициентах вариации 0,5 и 1,5 соответственно, а 2 и 4 — асимптотическому

Таким образом, для среднего числа отказов получаем следующие асимптотическую формулу, если выполняются условия (8) для всех j :

$$\bar{N}(T) \approx T \sum_{j=1}^m \frac{1}{\bar{T}_j} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (v_j^2 - 1), \quad (9)$$

Если ввести обозначение:

$$\beta = \sum_{j=1}^m \beta_j, \quad \beta_j = 1/\bar{T}_j, \quad (10)$$

то получим, что:

$$\bar{N}_j(T) \approx T\beta + \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^m v_j^2 - 1 \right), \quad (11)$$

где β_j — стационарная интенсивность потока отказов j -го типа, то есть не зависящая от состояния автомата в момент начала испытаний;

β — соответствующая величина для автомата в целом.

Определение именно этих и других, независимых от начального состояния (стационарных) показателей надежности, является целью испытаний на надежность.

Дисперсия числа отказов j -го типа определяется более сложно. Приведем здесь только практически важный асимптотический результат [3], справедливый как и (7) при условии (8):

$$D_{N_j}(T) \approx \frac{T}{\bar{T}_j} v_j^2 + \left(\frac{1}{12} + \frac{5}{4} v_j^4 - \frac{2}{3} S_{kj} v_j^3 \right), \quad (12)$$

где S_{kj} — асимметрия плотности распределения наработки на отказ $f_j(t)$.

Например, для показательного распределения (5) $S_{kj} = 2$. Для гамма распределения $S_{kj} = 2v_j$. Для распределения Вейбулла:

$$F_j(t) = 1 - \exp[-(t/\rho_j)^{b_j}]$$

эта формула выглядит более сложно [4]:

$$S_{kj} = \frac{1}{v_j^3} \left[\frac{\Gamma(1+3/b_j)}{\Gamma^3(1+1/b_j)} - 3v_j^2 - 1 \right],$$

где $v_j = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/b_j)}{\Gamma^2(1+1/b_j)} - 1},$

$\Gamma()$ — гамма-функция.

Для практического использования могут быть полезными следующие приближенные формулы:

$$\begin{aligned} v_j &= b_j^{-1} + 0,1449(b_j^{-1} - 1)^2, \\ S_{kj} &\approx 3v_j - 1, \end{aligned} \quad (13)$$

дающие практически достаточную точность при

$$0,3 \leq v_j \leq 1,5,$$

Затраты времени на восстановление отказов j -го типа за время испытания автомата $T_{ej}(T)$ получаются как сумма $N_j(T)$ реализаций случайной величины T_{ej} – времени восстановления отказа j -го типа. Среднее значение этих затрат:

$$\bar{T}_{ej}(T) = \bar{N}_j(T) \cdot \bar{T}_{ej}. \quad (14)$$

Если отказ типа сбоя, то T_{ej} и $T_{ej}(T)$ равны 0, а значит \bar{T}_{ej} , v_j и $\bar{T}_{ej}(T)$ тоже равны 0.

Если воспользоваться асимптотической формулой (7), то получим:

$$\bar{T}_{ej}(T) \approx \frac{T}{\bar{T}_j} \bar{T}_{ej} + \frac{\bar{T}_{ej}}{2} (v_j^2 - 1) = T \cdot B_j + \frac{\bar{T}_{ej}}{2} (v_j^2 - 1), \quad (15)$$

где $B_j = \frac{\bar{T}_{ej}}{\bar{T}_j} = \beta_j \bar{T}_{ej}$ – удельное время восстановления отказов j -го типа, равное нулю для сбоев.

Среднее значение затрат времени на восстановление отказов всех типов определяется как сумма средних затрат по всем типам отказов, то есть:

$$\bar{T}_e(T) = \sum_{j=0}^m \bar{T}_{ej}(T) = \sum_{j=1}^m \bar{N}_j(T) \bar{T}_{ej}. \quad (16)$$

Если воспользоваться асимптотическим выражением (15), то:

$$\bar{T}_e(T) \approx TB + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \bar{T}_{ej} (v_j^2 - 1), \quad (17)$$

где

$$B = \sum_{j=1}^m B_j - \quad (18)$$

удельное время восстановления отказов автомата в целом.

Дисперсия затрат времени на восстановление отказов j -го типа при наработке T :

$$D_{ej}(T) = \bar{N}_j(T) \bar{T}_{ej}^2 v_{ej}^2 + D_{Nj}(T) \bar{T}_{ej}^2. \quad (19)$$

При выводе этой формулы был использован известный результат для процессов накопления [3].

Дисперсия затрат на восстановление отказов всех типов, учитывая взаимную независимость затрат $T_{ej}(T)$:

$$D_e(T) = \sum_{j=1}^m D_{ej}(T) = \sum_{j=1}^m \bar{T}_{ej}^2 \{ \bar{N}_j(T) v_{ej}^2 + D_{Nj}(T) \}. \quad (20)$$

Если воспользоваться ранее выведенными асимптотическими формулами (7, 12, 15), то получим соответствующие асимптотические формулы и для дисперсий.

$$D_{ej}(T) \approx T d_j + c_j, \quad (21)$$

где

$$d_j = B_j \bar{T}_{ej} (v_j^2 + v_{ej}^2), \quad (22)$$

$$c_j = \bar{T}_{ej}^2 \left[\frac{1}{2} (v_j^2 - 1) v_{ej}^2 + \frac{5}{4} v_j^4 - \frac{2}{3} S_{kj} v_j^3 + \frac{1}{12} \right]. \quad (23)$$

Асимптотическая формула для дисперсии суммарных затрат времени на восстановление

$$D_e(T) \approx Td + c, \quad (24)$$

где

$$d = \sum_{j=1}^m d_j, \quad c = \sum_{j=1}^m c_j. \quad (25)$$

Ценность для практики полученных асимптотических формул состоит в том, что они не требуют явного задания законов распределения наработок на отказ T_j и длительностей восстановления T_{ej} , которые на практике обычно не известны, а используют только их простые числовые характеристики: средние значения, коэффициенты вариации и показатели асимметрии.

Рассмотрим теперь частный случай. Если наработка на отказ j -го типа имеет *показательное распределение* (5), то $v_j = 1$, $S_{kj} = 2$ и тогда формулы (22, 23) значительно упростятся, то есть:

$$d_j = B_j \bar{T}_j (1 + v_{ej}^2), \quad c_j = 0. \quad (26)$$

Из-за простоты отмеченных и других формул при показательном распределении наработки на отказ их без достаточного на то оснований часто применяют и в случаях непоказательного распределения.

Оценим погрешность, которая при этом возникает. Пусть испытания проводятся до наработки $T = 3$ ч, средняя наработка на отказ j -го типа $\bar{T}_j = 1$ ч, коэффициент вариации наработки на отказ $v_j = 0,5$, асимметрия распределения наработки на отказ $S_{kj} = 1$, среднее время восстановления отказа $\bar{T}_{ej} = 10$ мин, коэффициент вариации длительности восстановления $v_{ej} = 1,5$.

При этих исходных данных, так как $T = 3$ больше $\frac{\bar{T}_j}{v_j} = 2$, то можно пользоваться асимптотическими формулами (7, 12, 15, 17, 21-25).

В результате получаем:

- среднее число отказов $\bar{N}_j(3) = 2,63$;
- дисперсия числа отказов $D_{N_j}(3) = 0,83$;
- средние затраты времени на восстановление отказов j -го типа $\bar{T}_{ej}(3) = 0,44$ ч.;
- дисперсия этих затрат времени $D_{ej}(3) = 0,19$ ч².

Если аналогичные показатели рассчитать, основываясь на показательном распределении наработки на отказ (5), для которого $v_j = 1$, $S_{kj} = 2$, то аналогичные показатели будут иметь значения:

$$\bar{N}_j(3) = 3,0, \quad D_{N_j}(3) = 3,0, \\ \bar{T}_{ej}(3) = 0,5 \text{ ч.}, \quad D_{ej}(3) = 0,27 \text{ ч.}^2,$$

что для первого показателя больше на 14 %; для второго показателя больше на 260 %; для третьего показателя больше на 14 %; для четвертого показателя больше на 45 %.

Если испытание автомата заканчивается после наработки T , то общее время испытания T_u будет не меньше наработки T из-за затрат времени на восстановление возможных отказов, то есть:

$$T_u = T + T_g(T).$$

Среднее значение длительности испытания:

$$\bar{T}_u(T) = T + \bar{T}_g(T) = T + \sum_{j=1}^m \bar{N}_j(T) \cdot \bar{T}_{ej}.$$

Дисперсия длительности испытания:

$$D_u(T) = D_g(T) = \sum_{j=1}^m [\bar{N}_j(T) D_{ej} + D_{N_j}(T) \bar{T}_{ej}^2],$$

так как T не случайная величина и имеет, поэтому, нулевую дисперсию. Соответственно справедлива и асимптотическая формула (24).

При параллельном испытании партии из N автоматов длительность испытания равна большому из значений $T_u^{(i)}(t')$, где $i = (1, \dots, N)$ – номер испытываемого автомата.

Воспользуемся полученными формулами для оценки показателей надежности по типам отказов и для автоматов в целом. Пусть $N_j^{(i)}$ – число отказов j -го типа, которое было зафиксировано при испытаниях i -го автомата, тогда:

$$\hat{N}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N N_j^{(i)}, \quad (27)$$

статистическое среднее число отказов j -го типа на автомат, а статистическая дисперсия этого числа отказов:

$$\hat{D}_{N_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N_j^{(i)})^2 - (\hat{N}_j)^2. \quad (28)$$

Приравнявая теоретические средние и дисперсии (7, 12) с соответствующим статистическими величинами (27, 28), получаем систему из двух уравнений для \hat{T}_j - оценка средней наработки на отказ j -го типа \bar{T}_j - и \hat{v}_j - оценка коэффициента вариации наработки на отказ j -го типа v_j :

$$\frac{T}{\hat{T}_j} + \frac{1}{2}(v_j^2 - 1) = \hat{N}_j, \quad (29)$$

$$\frac{T}{\hat{T}_j} v_j^2 + \left(\frac{1}{12} + \frac{5}{4} v_j^4 - \frac{2}{3} S_{kj} v_j^3 \right) = \hat{D}_{N_j}. \quad (30)$$

Чтобы эта система имела решения, нужно выразить показатель асимметрии S_{kj} через коэффициент вариации, а это можно сделать, только если известен вид закона распределения наработки на отказ. Для закона Вейбулла, который в нашем случае с достаточной для практики точностью описывает распределение наработки на отказ для различных типов отказов, можно воспользоваться формулой (13).

Если из первого уравнения выразить T/\bar{T}_j и подставить во второе и выразить показатель асимметрии через коэффициент вариации, то после необходимых преобразований в случае гамма распределения наработки на отказ получаем биквадратное уравнение относительно ν_j :

$$\frac{7}{12}\nu_j^4 - \left(\hat{N}_j + \frac{1}{2}\right)\nu_j^2 + \hat{D}_{Nj} - \frac{1}{12} = 0. \quad (31)$$

В случае распределения Вейбулла с учетом формулы (13) получаем уравнение четвертой степени относительно ν_j :

$$\frac{5}{4}\nu_j^4 - \frac{2}{3}\nu_j^3 - \left(\hat{N}_j + \frac{1}{2}\right)\nu_j^2 - \frac{1}{12} + \hat{D}_{Nj} = 0, \quad (32)$$

которое хотя и решается в радикалах, но практически проще его решать численно, с использованием известных алгоритмов, например алгоритма Берстоу-Ньютона из справочника [5]. Уравнения (31, 32) имеют четыре корня, из которых физический смысл имеет меньший положительный.

После определения оценки $\hat{\nu}_j$ коэффициента вариации наработки на отказ в результате решения уравнения (31) или (32) и подстановки ее в уравнение (29) получаем оценку для средней наработки на отказ:

$$\hat{T}_j = \frac{T}{\hat{N}_j - 0,5(\hat{\nu}_j^2 - 1)}, \quad (33)$$

и соответственно оценку для интенсивности потока отказов $\hat{\beta}_j = 1/\hat{T}_j$.

Если наработка на отказ подчиняется показательному распределению (5), то $\nu_j = 1$ и $\hat{T}_j = T/\hat{N}_j$. Из уравнений (31, 32) следует, что

необходимое условие показательного распределения наработки на отказ является равенство $\hat{N}_j \approx \hat{D}_{Nj}$.

Для оценки показателей ремонтпригодности, по каждому типу отказов необходимо в ходе испытаний фиксировать не только число отказов каждого типа, но и длительность простоев из-за каждого типа отказов. Если $T_{ej}^{(i)}(T)$ – простой i -го автомата по достижении наработки T , а средний статистический простой автомата из-за отказов j -го типа:

$$\hat{T}_{ej}(T) = \frac{1}{N} \sum_i T_{ej}^{(i)}(T),$$

то оценка среднего времени восстановления отказа j -го типа получается из соотношения (14), то есть:

$$\hat{T}_{ej} = \frac{\hat{T}_{ej}(T)}{\hat{N}_j}.$$

Оценку для коэффициента вариации длительности восстановления отказа j -го типа получаем из соотношения (19), то есть:

$$\hat{\nu}_{ej} = \sqrt{\frac{\hat{D}_{ej}(T) - \hat{D}_{Nj} \cdot \hat{T}_{ej}^2}{\hat{N}_j \cdot \hat{T}_{ej}^2}}.$$

Литература:

1. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М.: Изд-во стандартов, 1988. 109 с.
2. Гнеденко Б.В. Математические методы теории надежности. / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. М.: Наука, 1985. 524 с.
3. Кокс Д.Р. Теория восстановления. / Д.Р. Кокс, В.Л. Смит. М.: Советское радио, 1967. 300 с.
4. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах. / Г. Хан, С. Шатиро. М.: Мир, 1969. 396 с.
5. Библиотека алгоритмов 16-506. Справочное пособие. М.: Советское радио, 1975. 176 с.
6. Васин С.А. Теоретико-вероятностный анализ производительности станочных систем. / С.А. Васин, А.Н. Иноземцев, Н.И. Пасько. Тула: Тул. гос. ун-т, 2002. 276 с.

УДК 681.2-233:678.6

Канд. техн. наук, проф. Л. Д. Козлова
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (086) 419876, e-mail: pms35@ostu.ru

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАСТМАССОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ МАЛОГО МОДУЛЯ

There are some characteristic properties while designing plastic toothed gears of small module, they are attributed by using few teeth gears and considerable in per unit errors of real toothed gearings. Herewith it is proposed the ways of optimizing of toothed gears profile at the expense both changes of original profile parameters and profile modification teeth.

Оптимизация основных геометрических параметров зубчатых пластмассовых передач малого модуля (от 0,08 до 0,3 мм) направлена на получение необходимых эксплуатационных характеристик прибора. Кинематическая схема и модули зубчатой передачи определяются назначением прибора, его габаритами и массой. Основные эксплуатационные требования к зубчатым передачам малого модуля, которые широко применяются, в частности, в приборах времени и работают в импульсном режиме, учитывают следующие факторы:

- использование шестерен с малым числом зубьев ($Z > 6$);
- большие величины относительных погрешностей изготовления при значениях допусков на отклонения шагов, диаметров вершин, радиального биения и других параметров, не превышающих 0,010 мм;
- среднеэкономическая точность принятых методов изготовления.

Для зубчатых передач, работающих в импульсном режиме от шагового двигателя с циклическим изменением передаваемого крутящего момента, важнейшими эксплуатационными характеристиками являются коэффициент полезного действия и мгновенные значения передаточного отношения моментов. При выборе геометрических параметров передачи конструктор должен обеспечить максимально возможное мгновенное значение передаточного отношения моментов при работе пары сопряженных зубьев на линии зацепления, чтобы при каждом импульсе движущий момент превышал момент нагрузки. Не менее важным требованием является обеспечение максимального среднего значения передаточного отношения моментов в зацеплении, так как этот показатель связан с коэффици-

ентом полезного действия (КПД) передачи, влияющим на расход энергии автономного источника питания и надёжность прибора.

В зубчатых передачах малого модуля относительная суммарная погрешность межосевого расстояния может достигать значения до 0,3 модуля.

Для обеспечения работоспособности рассматриваемых зубчатых передач в них должны предусматриваться боковые и радиальные зазоры, компенсирующие реальные суммарные погрешности. Обеспечить требуемые зазоры в зубчатой паре с шестерней, имеющей от 6 до 10 зубьев на базе стандартного исходного за счёт дополнительного смещения невозможно. Для образования требуемых зазоров необходимо изменить некоторые параметры стандартного исходного контура, в частности, применить исходный контур с неравноделённым шагом.

В реальных зубчатых передачах малого модуля коэффициент перекрытия не может быть больше единицы, так как в них всегда присутствует погрешность окружных шагов, вызывающая кромочный контакт зубьев либо на входе, либо на выходе из зацепления. Наличие кромочного контакта приводит к перераспределению до- и заплоского участков линии зацепления и уменьшению КПД, особенно, если возрастает доплоский участок и угол входа в зацепление. С целью уменьшения длин участков кромочного зацепления следует провести модификацию сопряженных зубьев. Необходимость профильной модификации зубьев - это ещё один серьёзный довод ухода от стандартного исходного контура при проектировании пластмассовых зубчатых передач малого модуля. Параметры исходного контура таких передач, а так же параметры модификации определяются из условий:

- обеспечения максимального КПД в зубчатой передаче;
- обеспечения необходимых зазоров в реальной зубчатой передаче, изготовленной со средней экономической точностью принятого метода обработки.

Основными методами изготовления пластмассовых зубчатых колёс является литьё под давлением на термопластавтоматах. Формообразующие детали пресс-формы для литья получают методом гальванопластики или электроэрозионным методом. Первый метод освоен давно и широко применяется в часовой промышленности. Электроэрозионный метод реализуется двумя методами: с использованием проволочного электрода на станках с ЧПУ и с использованием профильных электродов по принципу прошивки с объёмным копированием электрода. Последний метод успешно реализуется на двухпозиционном станке, имеющем позиции для электроимпульсной (черновой) и электроискровой (чистой) обработки матриц пресс-форм с высоким качеством и производительностью.

Метод гальванопластики позволяет получить размеры матрицы по 7-му качеству точности с шероховатостью обрабатываемых поверхностей $Ra = 0,08$ мкм. Для получения указанной точности требуется точный оригинал: профильный электрод или мастер-модель, которые используются для изготовления матрицы.

Расчёт и изготовление матриц ведут с учётом компенсации усадки полимерного материала и самой матрицы, если последняя изготавливается электроэрозионным методом профильным электродом или из цветных сплавов по мастер-модели. При малом числе зубьев усадка имеет сложный, неравномерный характер, хотя при расчёте применяют упрощённую модель равномерной радиальной усадки. Для повышения точности отливаемых колёс размеры матрицы корректируются с учётом средней величины усадки конкретной марки материала. Для компенсации технологической усадки на стадии проектирования пластмассовой зубчатой передачи можно изменять коэффициент смещения исходного контура, изменять угол профиля или модуль зацепления. Чаще всего корректируют модуль зацепления с учётом величины усадки поступившей партии материала. Практика показывает, что для малозубых шестерен в целях компенсации усадки следует корректировать одновремен-

но и модуль и угол профиля. Таким образом, и при проектировании мастер-модели необходим отход от стандартного исходного контура мелко модульных зубчатых передач.

Очевидно, что при проектировании и изготовлении пластмассовых зубчатых передач малого модуля, получаемых методом литья под давлением, вопрос унификации технологической оснастки не является основным. Для каждого зубчатого колеса с заданным числом зубьев, модулем, изготавливаемым из конкретного полимерного материала необходимо спроектировать мастер-модель и формообразующие детали пресс-формы. Следовательно, оптимизация параметров исходного контура и профильной модификации в этом случае не ограничивается требованиями применения стандартного зуборезного инструмента. Это обстоятельство послужило в своё время основанием для разработки «Системы автоматического проектирования часовых зубчатых передач с произвольным профилем зуба САПР ЧЗП/П» в Научно-исследовательском институте часовой промышленности.

Система может успешно применяться для проектирования мелко модульных зубчатых передач различных приборов точной механики, когда зубчатая передача со стандартным эвольвентным профилем имеет низкие показатели качества и возникает задача оптимизации профиля зуба. Достоинством САПР ЧЗП/П является то, что она позволяет проектировать не только зубчатые передачи с произвольным профилем зуба, но и зуборезный инструмент (дисковые и червячные фрезы), а так же инструмент второго порядка (фасонные резцы и затыловочные круги). Система САПР ЧЗП/П позволяет рассчитать параметры мастер - модели для изготовления пластмассовых колёс с учётом усадки, параметры дисковых фрез для изготовления мастер-модели, а так же инструментов второго порядка - дисковых резцов для изготовления дисковых фрез. Кроме того, данная система позволяет анализировать работу зубьев в нескольких точках линии зацепления, даёт наглядное представление об углах входа и выхода зубьев из зацепления, о величине зазоров при предельно допустимых значениях геометрических параметров зубчатой передачи. Система обеспечивает расчёт проектных чертежей, которые используются для контроля профиля зубьев колёс, а также зуборезного инструмента первого и второго порядка.

УДК 621.822.5+621.822.6

Асп. Р. Н. Поляков

(Орловский государственный технический университет)

г.Орел, тел. (0862)419849; e-mail: pmpl@ostu.ru

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПОРНОГО УЗЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОМБИНАЦИЯХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ

The use of combined supports of a rotor, which combine a ball bearing and a fluid-film bearing, allows to improve dynamic characteristics and to increase lifetime of a turbomachine. Comparative analysis of increase of reliability and durability of a rotor support under various combinations of a roll bearing and a fluid-film bearing is presented in this paper.

Эффективным путем повышения полезной мощности машин является увеличение частот вращения роторов. Ограниченность подшипников качения (ПК) по параметру предельной быстроходности обуславливает невозможность их применения в качестве опор высокоскоростных роторов. Различные виды подшипников скольжения (ПС), применяемые в качестве опор турбомашин, наряду со своими достоинствами имеют и недостатки, связанные с износом опор скольжения в периоды пуска-останова, при ударных нагрузках, вследствие касаний цапфы и втулки при неустойчивой работе.

Комбинированные опоры (КО), являющиеся совмещенными подшипниками качения и скольжения сочетают достоинства и исключают не-

достатки обоих типов опор за счет разделения и дублирования их функций, повышая тем самым надежность и долговечность опорного узла.

Отличительным признаком различных видов КО является принцип работы: разделение нагрузки и разделение скоростей (рис. 1). В свою очередь, КО с разделением скоростей делятся по расположению подшипника скольжения относительно поверхности вала: КО с внутренним расположением ПС (рис. 1, б) и КО с внешним расположением ПС (рис. 1, в).

Основными факторами повреждения обоих типов опор [1], [2] являются:

- подшипники качения: усталостное выкрашивание, абразивный износ, вмятины, механические разрушения в результате перегрузок;

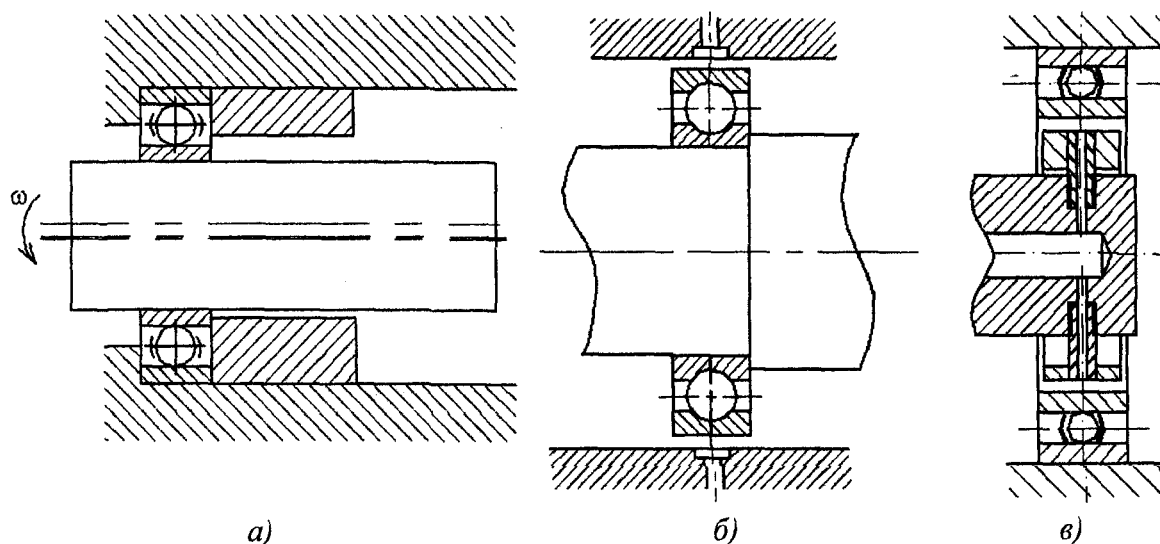


Рис. 1. – Виды комбинированных опор

– подшипники скольжения: износ поверхностей втулки в периоды “пуска-останова”, в результате ударных нагрузок, касаний цапфы и втулки в результате неустойчивого движения ротора.

Рассмотрим каждый тип КО и факторы улучшения условий работы.

1. Объект классифицируется как радиальная КО с разделением нагрузки (рис. 1, а). Повышение долговечности и надежности работы опоры происходит за счет того, что в нерабочем состоянии ПС имеет гарантированный радиальный зазор, что исключает контакт цапфы и втулки ПС и на основных режимах работы ПК более разгружен за счет реакции со стороны ПС.

2. Объект классифицируется как радиальная КО с разделением скоростей и внешним расположением ПС (рис. 1, б). Повышение долговечности и надежности происходит за счет того, что на основных режимах работы происходит демпфирование со стороны ПС и наружное кольцо ПК вращается – вся дорожка качения попадает в область максимальных напряжений, что обуславливает равномерный износ рабочих поверхностей ПК.

3. Объект классифицируется как радиальная КО с разделением скоростей и внутренним расположением ПС (рис. 1, в). Повышение долговечности и надежности происходит за счет того, что в режиме «пуск – останов» ротор вращается в ПК, а на основных режимах в ПС. Что исключает факторы износа обоих типов опор.

Проведем оценку повышения долговечности каждого типа КО.

Радиальная комбинированная опора с разделением нагрузки (рис. 1, а). Долговечность всей опоры будет определяться ПК, так как ПС имеет гарантированный радиальный зазор, и исключаются основные факторы износа втулки ПС.

Известна эмпирическая формула определения долговечности ПК [1]:

$$L^{ПК} = \left(\frac{C_{дин}}{P} \right)^k, \quad (3)$$

где $C_{дин}$ – динамическая грузоподъемность ПК;

P – эквивалентная нагрузка на подшипник;

k – значение степени выражения, зависящие от вида тел качения ($k = 3$ – для шарикоподшипников, $k = 10/3$ – для роликоподшипников).

Как уже говорилось выше, на основных режимах работы появится дополнительная сила со стороны ПС. То есть можно подобрать параметры подшипника скольжения такими, что реакция ПС будет по максимуму разгружать подшипник качения. Можно записать, что долговечность будет равна:

$$L^{ПК} = \left(\frac{C_{дин}}{P - R^{ПС}} \right)^3, \quad (4)$$

где $R^{ПС}$ – реакция подшипника скольжения, направленная против внешней нагрузки.

Как видно из формулы, теоретически можно подобрать параметры подшипника скольжения так, что на определенных режимах работы он будет воспринимать всю внешнюю нагрузку, а подшипник качения будет максимально разгружен.

Радиальная комбинированная опора с разделением скоростей и внешним расположением подшипника скольжения (рис. 1, б).

Эмпирическая формула (3) выводится на основе экспериментальных исследований, результаты которых зависят от многих факторов, один из которых – обычное условие работы ПК – одно из колец закреплено. Из этого можно сделать предположение, что на дорожке качения одного из колец есть некоторая область, которая подвержена усталостному выкрашиванию больше всего. При работе ПК в данной КО вся дорожка качения будет последовательно проходить область максимального нагружения и, следовательно, количество циклов напряжений для появления усталостных трещин в некотором месте дорожки качения должно быть во столько раз больше сколько таких контактных областей можно расположить по кольцу.

Тогда в первом приближении можно записать, что долговечность ПК при постановке в данную КО будет определяться по формуле:

$$L^{ПК} = n \left(\frac{C_{дин}}{P} \right)^3, \quad (5)$$

где n – число контактных областей (n_{min} можно принять равным числу тел качения).

Радиальная комбинированная опора с разделением скоростей и внутренним расположением подшипник скольжения (рис. 1, в).

Долговечность всей опоры будет определяться подшипником скольжения так как подшипник качения работает в условиях низких скоростей вращения.

Предположим, что существует некоторая функция, которая определяет долговечность ПС в зависимости от условий работы, геометрии подшипника и др. Одним из определяющих факторов, влияющим на долговечность ПС является износ поверхности втулки ПС в результате силового воздействия от крутящего момента микронеровностей цапфы на микронеровности втулки. Причем долговечность зависит обратно пропорционально от крутящего момента. Схема контакта микронеровностей представлена на рис. 2.

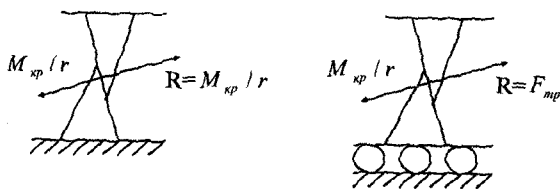


Рис. 2. – Схема контакта микронеровностей

Напряжения, возникающие в контакте при жестко установленной втулке, определяются следующим образом (рис. 2, а):

$$\sigma = \frac{M_{кр}/r}{S}, \quad (6)$$

где $M_{кр}/r$ – сила, действующая в контакте, которая равна реакции со стороны микронеровностей втулки ПС на микронеровности цапфы вала

(при жестко установленной втулке она будет равна силе от крутящего момента);

S – площадь контакта.

При постановке втулки ПС во внутреннее кольцо ПК, напряжения, возникающие в контакте, будут определяться следующим образом (рис. 2, б):

$$\sigma = \frac{F_{тр}}{S}, \quad (7)$$

где $F_{тр}$ – сила, действующая в контакте, при нежестко установленной втулке равняется силе трения подшипника качения;

S – площадь контакта.

Сила трения ПК $F_{тр}$ будет намного меньше силы от крутящего момента $M_{кр}/r$. Отсюда меньшие значения напряжений в контакте при установке втулки ПС во внутреннее кольцо шарикоподшипника. Следовательно, меньший износ и увеличение долговечности подшипника скольжения и всей опоры в целом.

Таким образом, можно говорить о том, что комбинирование подшипников качения и скольжения повышает ресурс и надежность работы опорного узла ротора машины. В зависимости от условий работы опоры и конструктивных особенностей машины можно варьировать различными комбинациями ПК и ПС. Например, для тяжело нагруженных опор можно применять комбинированную опору с разделением нагрузок (рис. 1, а). Для быстро-ходных турбомашин комбинированные опоры с разделением скоростей (рис. 1, б, в).

Литература:

1. Решетов Д.Н. Детали машин. Учебник для вузов. Изд. 4-е. М.: Машиностроение, 1989.
2. Пронников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9

Д. Д. Евсеев, *д-р техн. наук, проф.* А. С. Тарапанов
(Орловский государственный технический университет)
г. Орел, тел. (0862)419877; e-mail: evseevdd@mail.ru

АНАЛИЗ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ

In article is considered possibility of the using to theories fractals for analysis of the processing to surfaces of the wheel pairs. The offered criterion to efficiency of the processing the rim wheel about, which material has a lumpy structure after usage. Estimation of the application of the designed approach is given.

При восстановлении поверхности обода колеса к наиболее часто применяемым методам можно отнести точение по копиру. Проблемы, возникающие при использовании данной технологии, связаны с трудностью обработки материала обода колеса имеющего неоднородную структуру, полученную в результате эксплуатации. В качестве решения возникающих в связи с этим трудностей, на данный момент, используют различные подходы. К ним относят ряд режимов термической обработки, а в самом простом случае производят точение «под корку».

При проведении работ по восстановлению колесных пар методы термической обработки занимают значимое место. В настоящее время в практике термообработки используют три режима [1]: индукционный отжиг (ИО), для улучшения обрабатываемости; однократное индукционное термоупрочнение (ОИТ) с целью восстановления физико-механических свойств металла обода после обточки; индукционное термоциклирование (ИТЦ) с целью улучшения структуры и физико-механической свойств металла обода после обточки. Как видно, только режим ИТЦ способен, в некоторой мере, восстанавливать структуру материала, но он применяется после режима ИО и механической обработки и повышает при этом твердость металла вплоть до верхней границы по ТУ.

Точение «под корку», в большинстве случаев, является экономически не эффективным методом, поскольку в стружку при этом снимается не только технологически необходимый, но и полезный слой металла и как следствие происходит перерасход инструмента, а зачастую следующая за такой обработкой наплавка поверхности обода колеса приводит к повышению ее твердости.

Исходя из вышеизложенного возникает необходимость разработки альтернативных способов об-

работки, имеющих другие технологические схемы. Такие способы могут быть получены в результате симбиоза уже имеющихся, а так же могут содержать совершенно неожиданные решения.

Например, возможно применять дисковые фрезы с демпфированными зубьями. Конструкция такой фрезы позволяет режущему лезвию перемещаться под углом вдоль оси инструмента или в радиальном направлении, что снижает ударные нагрузки. К тому же, такая схема обработки позволит инструменту самому адаптироваться к имеющейся неоднородности структуры обрабатываемого материала.

Так же может иметь место способ обработки дисковой фрезой или резцовой головкой, у которых режущая часть имеет возможность проскальзывать относительно корпуса под действием сил резания, критических для рабочей части инструмента. При этом такой инструмент будет сам реагировать на неоднородность структуры обрабатываемого материала. Последовательно сочленив дисковые фрезы с фасонной режущей кромкой имеющие аналогичную конструкцию, можно получить фасонную фрезу для обработки всего профиля обода колеса. Причем чем больше независимо обрабатываемых элементов будет иметь такая фреза, тем более чувствительно она будет реагировать на неоднородность поверхностного слоя.

Структура материала обода старогодного колеса априорно неоднородна и представляет собой фрактальную структуру, т.е. структуру, которая обладает свойствами нерегулярности и самоподобия [2]. Такие свойства оказывают большое влияние на параметры качества обработанной поверхности. Ряд данных содержащих в себе информацию об этой структуре по всей толщине обода колеса возможно получить, используя методы неразрушающего контроля. В частности, к ним можно от-

нести акустические методы с цифровой обработкой данных (рис. 1). Распределение неоднородности структуры по толщине обода колеса имеет градиентный характер, т.е. эволюционирует вглубь обода, что связано с термомеханическим характером возникновения поверхностных дефектов во время эксплуатации. Такое обстоятельство, в случае если полученный сигнал несет суммарную информацию обо всех уровнях, позволяет обоснованно применять вейвлет-анализ рядов [3], результатом которого является масштабно-временной спектр, который дает информацию об эволюции относительного вклада частей неоднородной структуры на каждом уровне во времени (рис. 2).

В качестве критерия оценки неоднородности на выделенном уровне логично применить значение размерности фрактального множества. Размерность такого множества может быть определена разными способами. Наиболее известна так называемая размерность Хаусдорфа-Безиковича, вычисляемая по формуле (1) и описывающая «степень изгибания» кривой [2].

$$D = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\ln N(l)}{\ln(1/l)}, \quad (1)$$

где l – ребро n -мерной ячейки, на которые разбита исследуемая область пространства;

$N(l)$ – число ячеек, содержащих точки множества.

Среди всех известных размерностей, описанная выше, всегда имеет наибольшее значение. Это связано с тем, что характер разбиения исследуемой области пространства позволяет оказаться в ячейке хотя бы одной точке множества.

Траекторные кривые движения режущей кромки инструмента в процессе обработки также имеют фрактальную сущность, поскольку фракталы можно определить как множество точек, инвариантных относительно преобразований подобия. В частности к преобразованиям подобия можно отнести параллельный перенос и поворот, т.е. те составляющие которые заложены в алгоритм математического описания траекторных кривых [4]. Данное фрактальное множество так же имеет размерность, которая определяется из вышеизложенных соображений.

Обработка становится возможна при условии пересечения рассмотренных фрактальных множеств (множества описывающего неоднородность обода колеса, и множества описывающего траекторную кривую движения режущей кромки инструмента). Следовательно, одним из обязательных условий необходимых для достижения высокого качества обработки поверхности катания, при наличии неоднородности структуры материала, служит неравенство:

$$D_{mi} \geq D(a), \quad (2)$$

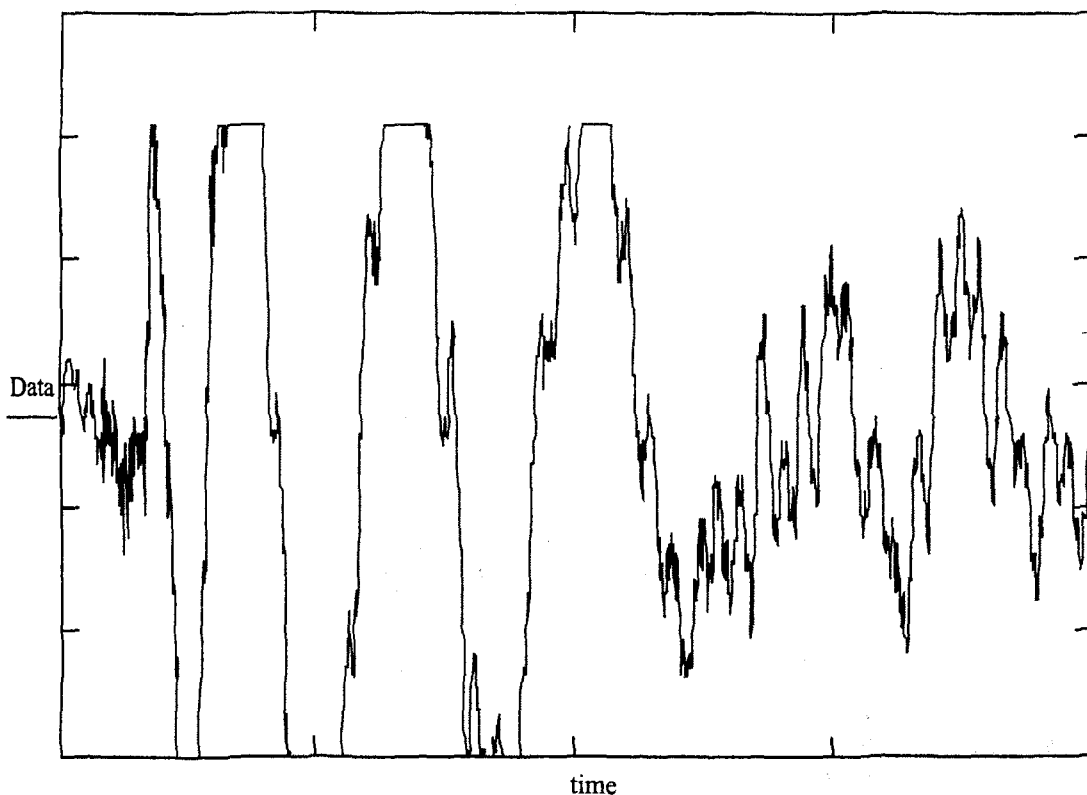


Рис. 1. – Ряд данных описывающих неоднородность структуры

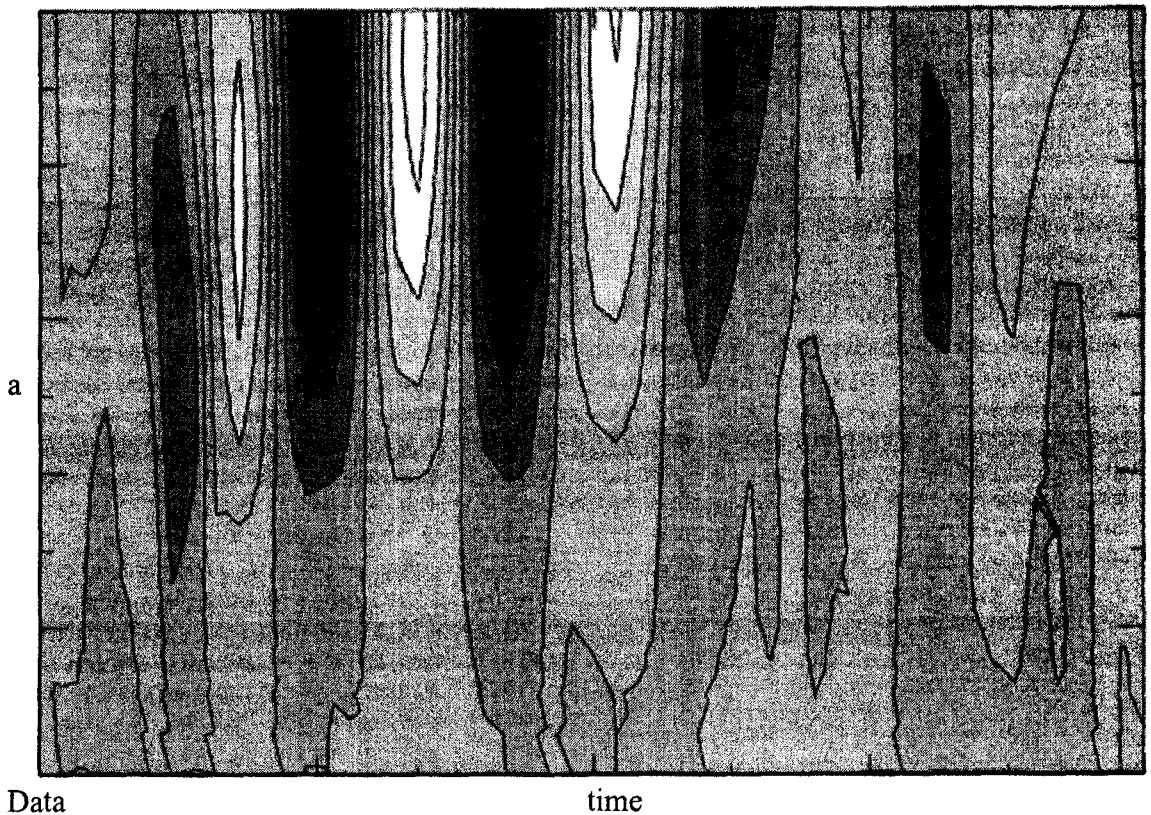


Рис. 2. – Масштабно-временной спектр, полученный для ряда данных описывающих неоднородность структуры

где D_{mi} – фрактальная размерность множества, описывающего траекторную кривую режущей кромки инструмента;

$D_{(a)}$ – фрактальная размерность множества, описывающего неоднородную структуру обода колеса на выделенном уровне a . Физический смысл a трактуется, как глубина резания.

Если задаться системой ограничений по технологическим возможностям исследуемых инструментов, то неравенство (2) позволяет оптимизировать режимы обработки.

Более того, можно предположить, что фрактальная размерность неоднородной структуры обрабатываемого материала на различных участках обода колеса имеет различное значение. Тогда становится обоснованным применение многоинструментальной обработки, когда различные режущие инструменты при обточке разных поверхностей обода колеса работают с различными скоростями резания (частота вращения колеса постоянна) и нагрузками. Если же в наличие имеется однотипный инструмент, траекторные кривые которого обладают недостаточной фрактальной размерностью, то усложнить траекторию можно наложив дополнительные движения на инструмент, но при этом обязательно использовать систему ограниче-

ний по прочности инструмента. Такой подход позволяет иметь обрабатывающей системе самоорганизующуюся структуру. На различных участках вид дополнительных движений инструмента увязывается с особенностями структуры номинальной поверхности детали.

Литература:

1. Богданов А. Ф., Иванов И. А., Ситаж М. Восстановление профиля поверхности катания колесных пар: Учебное пособие. С.-Пб.: ПГУПС, 2000.
2. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов. Учебное пособие. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 1999.
3. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996. Т.166. №11.
4. Евсеев Д. Д. Математическое отображение кинематических схем резания для механической обработки поверхности катания колесных пар / Д.Д. Евсеев, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов // Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: Материалы 3-го Международного научно-технического семинара г. Свалява. Киев: АТМ Украины, 2003. С. 43–46.

УДК 681.324

Д-р техн. наук, проф. Ю. С. Степанов

(Орловский государственный технический университет)

г. Орел, тел. (0862) 419877; e-mail: tmsi@ostu.ru

Канд. техн. наук В. Г. Шуметов, канд. пед. наук С. А. Дьяченко

(Орловская региональная академия государственной службы)

г. Орел, тел. (0862) 434007; e-mail: orags@orl.ru

В. В. Афанасьев

(Московский государственный университет дизайна и технологий)

г. Москва, тел. (0895) 1802279; e-mail: afanasik@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНЫХ НОЖЕЙ СТРОГАЛЬНЫХ МАШИН И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО НАТУРАЛЬНЫХ КОЖ

For analysis on influence of various factors of the shaving machine screw knives on the quality shaving of natural leather can be used neural network on basis of multilayer perceptron and radial basis function. The best results has been becoming by use of radial basis network with ten centres. In practice, efficiency of neural network can be realized by use to forecasting of the what if? Tool in the software system neural connection.

Основным дефектом при строгании натуральных кож являются лестницы, что ограничивает производительность строгальных машин, снижает сортность готовой кожи [1]. Это актуализирует теоретические и экспериментальные работы по выявлению количественных соотношений параметров строгальных машин, с одной стороны, и режимов строгания, с другой. Выполненные теоретические исследования показали, что одной из основных причин образования лестниц на коже при строгании является биение ножевого вала [2]. Хотя в процессе заточки ножевого вала на строгальной машине биение по вершинам ножей теоретически должно устраняться, динамическая неуравновешенность вала в результате технологических нагрузок вызывает его вибрацию с амплитудой, пропорциональной величине эксцентриситета вала, обуславливающего биение по верши-

нам ножей до заточки, а также квадрату изменения скорости вращения вала при строгании [3]. В работе [2] аналитически выведена формула, связывающая расчетную высоту «гребешков» лестницы с амплитудой биения ножевого вала по вершинам ножей, величиной подачи кожи, количеством ножей и радиусом ножевого вала.

Данная работа содержит анализ влияния режимов резания на качество обработки кож на широкопроходной строгальной машине МСГ-1500-К с параметрами: диаметр ножевого вала 240 мм; число ножей 12; частота вращения вала 1500 мин⁻¹.

Расчетная высота «гребешков» лестницы при строгании кож в интервале скорости подачи от 0,05 до 0,30 м/с при изменении амплитуды биения вала по вершинам ножей от 25 до 200 мкм дана в табл. 1.

По рис. 1 и 2, построенным по данным табл. 1 в

1. Расчетная высота «гребешков» лестницы при строгании кож на МСГ-1500-К

Амплитуда биения ножевого вала, мкм	Скорость подачи кожи, м/с					
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
25	4,17	14,92	29,17	41,67	49,07	50,00
50	4,17	16,67	32,74	52,99	71,30	87,50
75	4,17	16,67	36,09	56,34	82,39	104,17
100	4,17	16,67	37,50	59,69	85,74	116,67
125	4,17	16,67	37,50	63,04	89,08	120,91
150	4,17	16,67	37,50	66,39	92,43	124,28
175	4,17	16,67	37,50	66,67	98,78	127,81
200	4,17	16,67	37,50	66,67	99,18	130,98

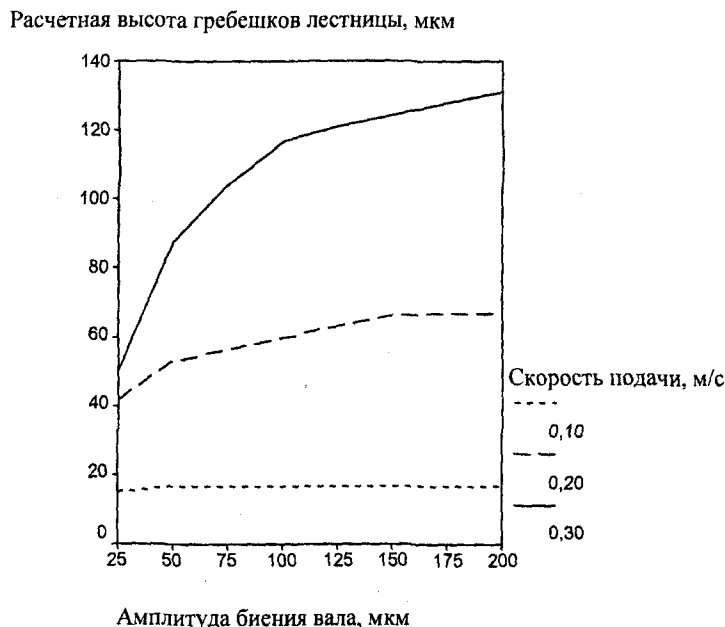


Рис. 1. – Зависимость расчетной высоты гребешков лестницы от амплитуды биения ножевого вала строгальной машины МСГ-1500-К

системе анализа данных SPSS Base 8.0 [4], можно заключить, что зависимость расчетной высоты гребешков лестницы от амплитуды биения носит характер экспонент с насыщением, а зависимость расчетной высоты гребешков лестницы от скорости подачи кожи может быть аппроксимирована трехпараметрическими логистическими функциями. Отсюда следует, что для аппроксимации наблюдаемой зависимости необходимо привлекать более сложные методы обработки по сравнению с квадратичными функциями, традиционно используемыми при обработке данных, полученных при планирова-

нии экстремального эксперимента [2]. Стандартные преобразования переменных, предусмотренные процедурами нелинейной аппроксимации [5], также не могут обеспечить построение моделей, описывающих наблюдаемые зависимости.

Нами выполнена попытка использовать для этих целей нейросетевые технологии. При достаточном объеме исходных данных (т.н. «примеров» с известными результатами) с помощью нейросетевых моделей могут быть описаны нелинейные зависимости практически любой сложности [6]. В качестве про-

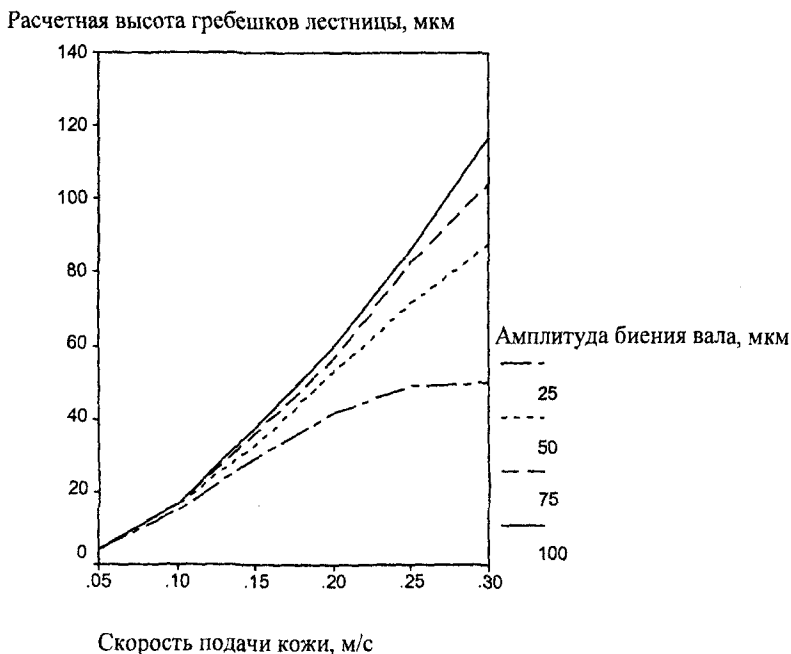


Рис. 2. — Зависимость расчетной высоты гребешков лестницы от скорости подачи кожи при разных амплитудах биения ножевого вала строгальной машины МСГ-1500-К

граммы, реализующей нейросетевые алгоритмы моделирования, использовали пакет Neural Connection [7], отличающийся сочетанием прозрачности интерфейса с развитыми функциональными характеристиками. Исходными данными для моделирования зависимости расчетной высоты гребешков лестницы от амплитуды биения ножевого вала и скорости подачи кожи на строгальной машине МСГ-1500-К служили «примеры» из табл. 1.

Прежде всего необходимо ответить на вопрос: какой из возможных типов нейросетей необходимо использовать для получения модели, адекватно отражающей нелинейную зависимость высоты «гребешков» лестницы от независимых переменных. Программа Neural Connection v. 2.0 позволяет применять в исследованиях четыре типа нейросети и три статистических метода. Из предоставляемых пакетом средств нами использовались две нейросети — многослойный перцептрон (*MLP* от *Multi-Layer Perceptron*) и радиальная базисная функция (*RBF* от *Radial Basis Function*), которые обычно применяются для решения задач классификации и предсказания. Сеть первой структуры (*MLP*) может моделировать нелинейную функцию практически любой сложности, определяемой числом слоев и элементов в каждом слое. Сети *RBF* гораздо быстрее обучаются, но их недостаток — чувствительность к «проклятию размерности» (при большом числе факторов входа сети возникают определенные трудности в создании достаточно точной модели).

При построении модели нейросети нужно предъявить так называемые факты (обучающие примеры), которые представляют собой набор

входных факторов и известного результата (выходной величины) в виде электронной таблицы, где столбцы — это наборы входных и выходных переменных, а строки — это примеры, т.е. в одном столбце содержится одна переменная, а в одной строке один обучающий пример. При формировании набора обучающих примеров необходимо соблюдать следующее правило: размер таблицы должен составлять не менее $10 \times (m+n)$ строк, где m — число входных факторов, n — число выходных факторов. Результатом работы программы является настроенная (обученная) нейронная сеть, в которой зафиксирована топология искусственных нейронов, а также веса связей.

В нашем случае, при числе «примеров» 48 и трех переменных (двух входных и одной выходной) имеющийся массив данных достаточен для разделения исходной выборки на обучающую, тестовую и контрольную. В соответствии с принятой при нейросетевом моделировании практикой, сети предоставлялось для обучения 80 % от всего множества фактов, т.е. 38, 10 % резервировалось для проверки правильности настройки модели и 10 % для тестирования — по 5 фактов, что позволяет рассчитывать на достаточно высокие прогностические характеристики нейросетевой модели.

Лучшие результаты были получены моделированием данных *RBF*-сетью с десятью центрами. Из рис. 3 для тестовых данных, на которых проверялась правильность настройки модели, следует, что *RBF*-сеть обеспечивает хорошее совпадение фактических и предсказанных значений высоты гребешков лестницы в широком диапазоне каче-

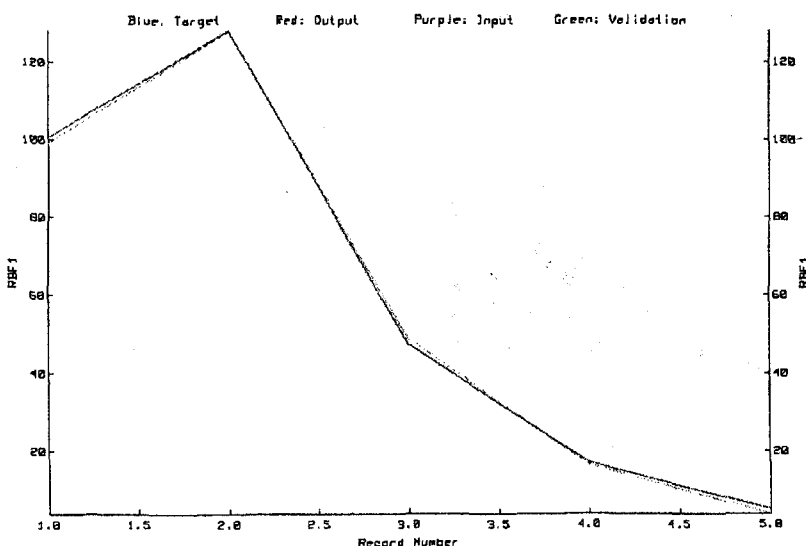


Рис. 3. — Фактические и предсказанные значения высоты гребешков лестницы моделью, полученной с помощью нейросетевой *RBF*-технологии

ства строгания — от 4 до 130 мкм.

Рис. 4, сгенерированный средствами программы Neural Connection, демонстрирует отсутствие на поверхности отклика локальных экстремумов, что свидетельствует об устойчивости полученной модели к возможным «выбросам».

Полученные в работе результаты положительно отвечают на вопрос о применимости нейросетей в исследованиях зависимости качества строгания кожи на строгальных машинах от параметров оборудования и режимов обработки, а также ставят ряд новых задач. Одна из них — исследование возможности применения этих технологий для управления качеством обработки кожи в производственных условиях, поскольку использование аппарата нейронных сетей позволяет не только

описывать и прогнозировать, но и отвечать на вопросы типа «Что если?», носящие характер управления.

Сказанное иллюстрируют рис. 5, являющийся результатом работы с инструментом «What If...» программы Neural Connection и представляющий пример моделирования строгания кожи с подачей 0,27 м/с при биении ножевого вала 49,5 мкм (контурная диаграмма в левой части рисунка). График в правой части рисунка показывает результаты предсказания: при увеличении величины биения вала примерно на 50 % (с 49,5 до 74,0 мкм) высота гребешков возрастает на 16,34. % (с 80,3 до 93,4 мкм), что отражено в окне текстового вывода в нижней части рис. 5.

С помощью инструмента «What If...» можно

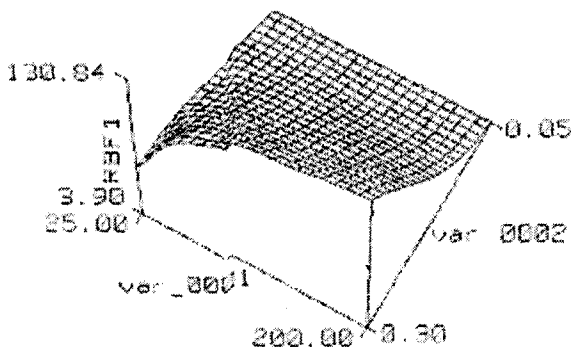


Рис. 4. – Предсказанная нейросетевой моделью зависимость высоты гребешков лестницы от амплитуды биения ножевого вала (переменная var_0001) и величины подачи кожи (переменная var_0002)

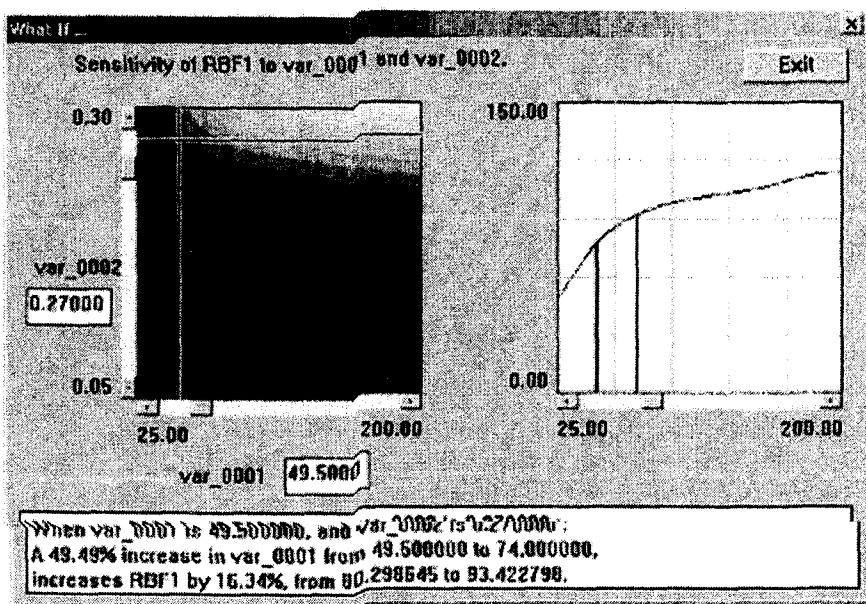


Рис. 5. – Прогнозирование качества строгания (высоты гребешков лестницы) при заданной подаче кожи (переменная var_0002) и изменении амплитуды биения ножевого вала (переменная var_0001)

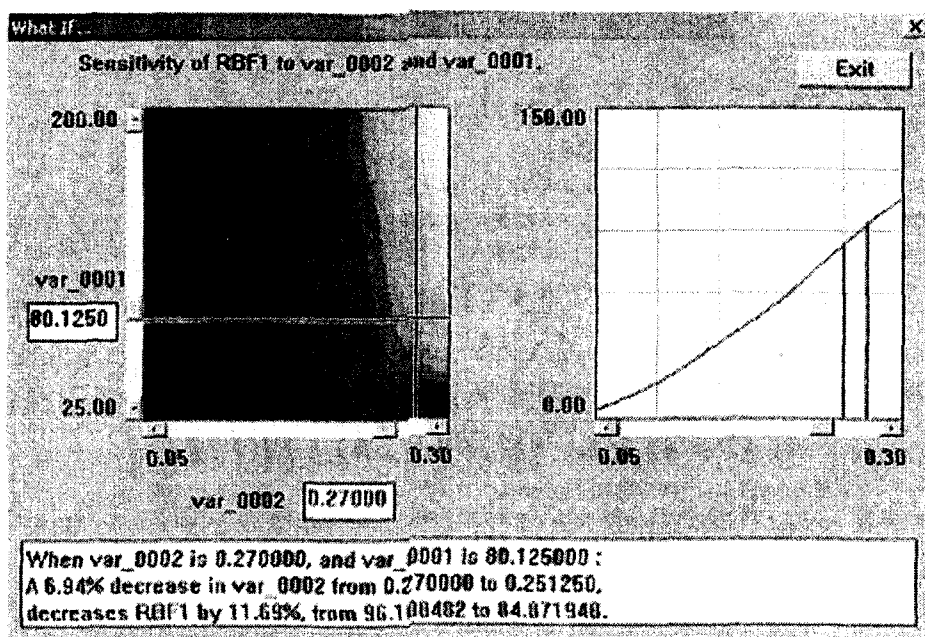


Рис. 6. – Прогнозирование качества строгания (высоты гребешков лестницы) при заданном биении вала (переменная var_0001) и изменении подачи кожи при строгании (переменная var_0002)

решать также обратную задачу: прогнозировать качество строгания при заданном биении ножевого вала и изменении режимов строгания (рис. 6). Как следует из рис. 6, при величине биения вала около 80 мкм и скорости подачи кожи 0,27 м/с высота гребешков составляет 96,1 мкм. Повысить качество строгания, например, снизить высоту гребешков лестницы до 85 мкм, можно за счет снижения скорости подачи до 0,25 м/с. График в правой части рис. 6 показывает, что при заданных режимах наблюдается высокая эластичность качества строгания от скорости подачи, величину которой можно оценить по информации в окне текстового вывода. При уменьшении скорости подачи на 6,94 % высоты гребешков лестницы снижается на 11,69 %, т.е. эластичность качества строгания по скорости подачи составляет $11,69/6,94=1,68$.

Приведенные примеры демонстрируют возможности нейросетевых технологий для управления режимами строгания с целью достижения высокой производительности обработки кожевенного сырья при обеспечении заданного качества готовой кожи.

Литература:

1. Афанасьев В.В. Анализ точности строгания кожи на широкопроходных машинах / В.В. Афа-

насьев, В.Г. Шуметов, Л.Г. Захаров, В.С. Парамонов, В.А. Скатерной // Известия вузов. Технология легкой промышленности, 1987. №5. С.79-83.

2. Захаров Л.Г. Влияние биения ножевого вала на формообразование поверхности кожи при строгании / Л.Г. Захаров, В.Г. Шуметов, Э.А. Иванов, В.А. Скатерной // Известия вузов. Технология легкой промышленности, 1984. №5. С.85-90.

3. Захаров Л.Г. К вопросу образования лестниц на коже при строгании / Л.Г. Захаров, В.Г. Шуметов, Э.А. Иванов, В.А. Скатерной // Оборудование для легкой промышленности. Сборник трудов ВНИИЛтекмаш. М.: ЦНИИТЭИЛегпищемаш, 1985. – С.43-56.

4. SPSS Base 8.0 для Windows. Руководство по применению. Перевод. Copyright СПСС Русь. М.: СПСС Русь, 1998. 398 с.

5. Венецкий И.Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: Справочник. / И.Г. Венецкий, В.И. Венецкая. М.: Статистика, 1979. 447 с.

6. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. М.: Горячая линия. Телеком, 2001. – 182 с.

7. Neural Connection 2.0 Application Guide. Chicago, SPSS Inc. and Recognition Systems Inc., 1997. 94 p.

УДК 621.9

Д-р техн. наук, проф. Ю. С. Степанов, канд. техн. наук Г. В. Барсуков,
канд. техн. наук Е. А. Белкин
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (0862)419818, e-mail: upk@ostu.ru

ВЕРОЯТНОСТНО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МАТЕРИАЛА

In paper the probability - mathematical sample piece of the quantitative performances of contact interaction of an abrasive particle with a surface of a material is featured in view of hardening and plastic displacement of a material, erasing and скола an abrasive grain that has allowed to optimize the dimensional entrainment of a material from unit contact to consequent superposition.

В связи со сложностью и многофакторностью процесса микроразрушения материала под воздействием гидроабразивной струи, в математической модели процесса микроэрозии следует выделить ряд упрощенных схем:

1. Процесс эрозионного разрушения материала происходит под действием импульсной нагрузки при ударе единичного абразивного зерна.

2. Фрикционно-контактно-усталостное разрушение материала обусловлено тем, что при бомбардировке поверхности каплями и абразивными зернами, напряжения и деформации, возникающие при этом, не достигают разрушающих значений.

3. Микрорезание осуществляется при однократном приложении силы летящей абразивной частицы, достаточной по величине для отрыва микрочастицы обрабатываемого материала и имеющей более высокую твердость по сравнению с ним.

4. Проникающее действие жидкости при ударе капель о поверхность с уже образовавшимися трещинами и эрозионными раковинами приводит к локальному разрушению материала.

5. Гидродинамическая кавитация – образование в струе пузырьков, схлопывание их при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью материала, приводит к его кавитационной эрозии.

6. Разрушение струей действием изгиба и сжатия микронеровностей обрабатываемой поверхности.

7. Металл представляет собой поликристаллическую структуру. Следствием этого, является наличие внутри металла микропор. По известной топографии микропор металла и по известному смещению вершин модулей, которое происходит под действием упругой волны, на основе прикладной теории упругости, определено какой модуль оболочки микропоры отделится от соседней. Согласно волновой теории при мгновенном приложении нагрузки от струи к материалу (упругая среда) в нем будет распространяться возмущение, волны которого допустимо рассматривать как плоские. Это

позволило, аналитически описать процесс возникновения и развитие микротрещин в зависимости от выше указанных факторов.

Формирование топографии в процессе микрорезания материала, моделируется на основе векторного поля внешней нагрузки на поверхность абразивного зерна. Полагается, что точки приложения сил взаимодействия и сопротивления находятся в вершинах модулей. По данной векторной модели, можно определить движение зерна в процессе взаимодействия с материалом.

Корректировка топографии микрорельефа с учетом упрочнения материала абразивным зерном проводится на основе расчета действия ударной волны, образованной в результате удара зерна о поверхность.

Реальные особенности процесса, указывают на необходимость и возможность представления взаимодействия гидроабразивной струи с поверхностью материала в виде последовательности единичных актов конкретного взаимодействия на элементарном участке [1].

Поверхность царапины оставляемой единичным зерном является поверхностью кинематической. Она образуется максимальным по площади сечением абразивного зерна плоскостью, перпендикулярным к вектору скорости. Вектор скорости приложен в центре масс абразивного зерна. При определении модуля и направления вектора скорости абразивного зерна следует учесть ее траекторию движения (рис. 1).

Предлагаемая модель образования поверхности царапины соответствует идеальному случаю, когда пластическое отсечение материала по краям режущих кромок абразивного зерна не учитывается. Не учитываются в рамках этой модели и ряд других существенных технологических факторов.

Действительно, в реально происходящем процессе формирования царапины, происходит упроч-

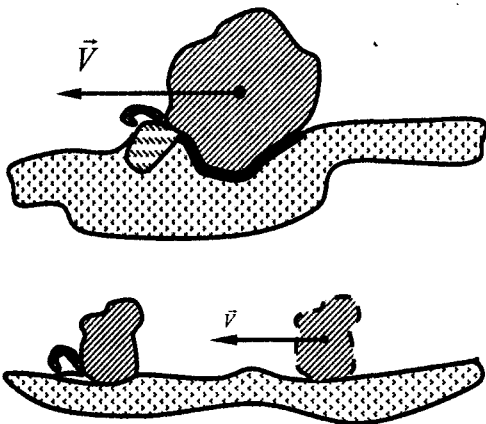
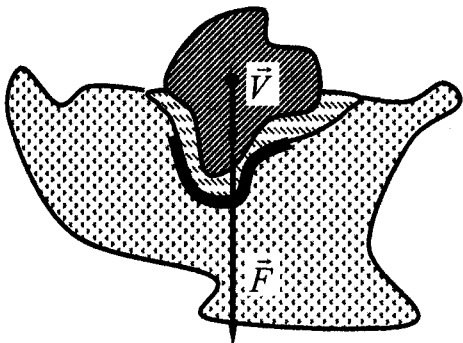


Рис. 1. – Схемы контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью

нение материала, его пластическое оттеснение по краям режущих кромок, микрорезание – микростружкообразование, а также стирание режущих кромок, скол зерна [2]. Свой вклад вносят и силы молекулярного и ионного взаимодействия, имеющие электромагнитную природу.

1. Вероятность образования поверхности царапины с учетом упрочнения материала.

В рамках идеальной модели, сечение, формирующее поверхность царапины – переменная величина. Ее площадь будет зависеть от векторного

поля сил взаимодействия микрорельефа обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Под действием этих сил, абразивное зерно непрерывным образом будет менять свою ориентацию по отношению к выбранной системе координат. Поэтому, чтобы определить вероятность формообразования царапины следует фиксировать площадь сечения зерна, участвующего в этом процессе, задаваясь определенным шагом ΔS .

Пусть зафиксированные площади сечений зерна S_1, S_2, \dots, S_n для царапины формообразованной без учета технологических факторов.

Площади сечений данного зерна, через данный шаг, для данной царапины с учетом упрочнения материала S'_1, S'_2, \dots, S'_n .

Тогда искомая вероятность:

$$P_1 = P_{11}P_{12} \dots P_{1n},$$

где

$$P_{11} = \frac{S'_{11}}{S_1}, P_{12} = \frac{S'_{12}}{S_2}, \dots, P_{1n} = \frac{S'_{1n}}{S_n},$$

причем

$$S'_{11} < S_1, S'_{12} < S_2, \dots, S'_{1n} < S_n.$$

$P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}$ – вероятности формообразования сечений царапины $S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1n}$ с учетом упрочнения материала.

2. Вероятность образования поверхности царапины с учетом пластического оттеснения материала.

$$P_2 = P_{21}P_{22} \dots P_{2n},$$

где

$$P_{21} = \frac{S_1}{S_{21}}, P_{22} = \frac{S_2}{S_{22}}, \dots, P_{2n} = \frac{S_n}{S_{2n}},$$

причем

$$S_{21} > S_1, S_{22} > S_2, \dots, S_{2n} > S_n,$$

$P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2n}$ – вероятности формообразования сечений царапины $S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2n}$ с учетом пластического оттеснения материала.

3. Вероятность образования поверхности царапины с учетом стирания зерен.

$$P_3 = P_{31}P_{32} \dots P_{3n},$$

где

$$P_{31} = \frac{S_{31}}{S_1}, P_{32} = \frac{S_{32}}{S_2}, \dots, P_{3n} = \frac{S_{3n}}{S_n},$$

причем

$$S_{31} < S_1, S_{32} < S_2, \dots, S_{3n} < S_n,$$

$P_{31}, P_{32}, \dots, P_{3n}$ – вероятности формообразования сечений царапины $S_{31}, S_{32}, \dots, S_{3n}$ с учетом пластического оттеснения материала.

4. Вероятность образования поверхности царапины с учетом скола зерна.

$$P_4 = P_{41}P_{42} \dots P_{4n},$$

где

$$P_{41} = \frac{S_{41}}{S_1} P'_1, P_{42} = \frac{S_{42}}{S_2} P'_2, \dots, P_{4n} = \frac{S_{4n}}{S_n} P'_n,$$

причем

$$S_{41} < S_1, S_{42} < S_2, \dots, S_{4n} < S_n,$$

$P_{41}, P_{42}, \dots, P_{4n}$ – вероятности формообразования сечений царапины $S_{41}, S_{42}, \dots, S_{4n}$ с учетом того, что зерно в процессе обработки может подвергаться скалыванию.

P'_1, P'_2, \dots, P'_n – вероятность того, что в результате скалывания зерна, образуются сечения $S_{41}, S_{42}, \dots, S_{4n}$.

$$P'_1 = \frac{V_1}{V}, P'_2 = \frac{V_2}{V_{01}} \cdot \frac{V_{01}}{V}, \dots, P'_n = \frac{V_n}{V_{0(n-1)}} \cdot \frac{V_{0(n-1)}}{V_{0(n-2)}} \dots \frac{V_{01}}{V},$$

где V – объем зерна;

V_1, V_2, \dots, V_n – объемы скалываемой части зерна, в результате чего образовывались сечения $S_{41}, S_{42}, \dots, S_{4n}$.

$$V_{01} = V - V_1, V_{02} = V_{01} - V_2 = V - V_1 - V_2,$$

$$V_{0(n-1)} = V_{01} - V_2 \dots - V_{n-1}.$$

Здесь имеется в виду многократный скол зерна.

Если скола зерна не происходит, тогда:

$$P_4 = 1, S_{41} = S_1, S_{42} = S_2, \dots, S_{4n} = S_n,$$

и

$$P'_1 = P'_2 = \dots = P'_n, \text{ т.к. } V_1 = V_2 = \dots = V_n = V.$$

Реальные процессы формирования микрорельефа позволяют представить его в виде последовательности единичных актов контактного взаимодействия на элементарном участке обрабатываемой поверхности. Такой подход дает возможность определять геометрические параметры поверхности после резания гидроабразивной струей на основе имитационного моделирования процесса формирования микрорельефа поверхностного слоя.

Основной математической модели является разработанный подход к описанию реальной макро- и микрогеометрии поверхности, позволяющий построить топографию полученного микрорельефа в результате взаимодействия гидроабразивной струи с поверхностью детали. В численной реализации указанной модели, профиль будет менять свой вид с течением времени в зависимости от числа абразивных зерен, а шероховатость поверхности детали оценивается не только по высоте микронеровностей на базовой длине в выбранном направлении (т.е. в сечении микрорельефа плоскостью), в соответствии с традиционным представлением, но и по кривизне, в смысле Римана-Кристоффеля, микрорельефа поверхности детали.

Модель позволит представить микрорельеф в аналитической форме, удобной для дальнейших технических расчетов. Развивая модульный принцип в описании процесса формирования микрорельефа можно, учитывая основные технологические факторы, влияющие на шероховатость поверхности, построить геометрическую и кинематическую модель процесса, со всей совокупностью факторов, влияющих на него.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта ЦЧР 03-01-96466.

Литература:

1. Победря Б.Е. Математическая модель для расчета эрозионной стойкости материала при кавитации / Б.Е. Победря, А.В. Ерошин // Вестник московского университета, 1995. № 2. сер.1. С. 120-123.
2. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. 526с.

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9

Д-р техн. наук, проф. А. В. Киричек,
(Орловский государственный технический университет),
Орел, тел. (0862) 419877, fax (0862) 416684, E-mail: tmsi@ostu.ru,
канд. техн. наук, проф. О. М. Щебров,
(Московская государственная академия приборостроения и информатики)
Москва, ул. Строминка, 20,
канд. техн. наук И. А. Телков
(Муромский институт Владимирского государственного университета),
Муром, тел. (09234) 32022, fax (09234) 22885 E-mail: murstin@yandex.ru

ВИБРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

In article are considered questions, connected with vibration when processing the non-ferrous metals. In article is presented liquid model of the vibration and dependency of the appearance of vibration from technological factors when processing surface plastic deforming.

При обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД) закаленных сталей, вследствие их высокой твердости и малой пластичности, глубина внедрения инструмента и объем деформированного металла перед ним остаются практически постоянными, а вибрации не наблюдаются. При ППД цветных металлов, способность которых к пластической деформации выше, возникают интенсивные автоколебания, которые зависят от жесткости технологической системы и режимов обработки. Для обеспечения однородной шероховатости поверхности необходимо выявлять такое сочетание технологических факторов ППД, обеспечивающее устойчивое, стабильное продвижение инструмента без "скачков" и вибраций.

В процессе обкатывания или выглаживания, особенно при работе устройством с упругим контактом между инструментом и деталью, геометрическая точность поверхности практически не изменяется. Инструмент совершает возвратно-поступательные движения, копируя профиль, полученный на предшествующей операции.

После достижения определенного значения скорости (при прочих равных условиях) возникают колебания [1]. Для обеспечения высокой производительности, необходимо вести обработку при максимально возможной скорости, обеспечивающей устойчивое протекание процесса. Поэтому при проектировании технологии ППД очень важно знать скорость начала вибраций.

Большое влияние на процесс ППД при обработке на интенсивных режимах оказывают характеристики точности станков (радиальное биение шпинделя, биение конического отверстия в шпинделе,

торцовое биение шпинделя и др.). Даже детали, обрабатываемые за один установ на станке, после чистовой обработки имеют отклонения формы и расположения поверхностей, влияющие на результаты обработки ППД. В технической литературе приводятся ограничения по частоте вращения детали [2]. Однако на практике диапазон скоростей, обеспечивающий работу без вибраций, существенно уже (в среднем 3...4 раза).

Осциллограммы радиального перемещения деформирующего инструмента имеют гармонический характер их допустимо описать синусоидой с амплитудой, равной максимальному радиальному биению. Тогда, из расчета по формуле для скорости отрыва тела от поверхности при движении по синусоиде и параболе [3], скорость разрыва контакта инструмента и детали равна:

$$v_{кр} = \frac{l_0}{2\pi\sqrt{A}} \sqrt{\frac{P_{cm}}{m}} \quad \text{или} \quad v_{кр} = \frac{r}{\sqrt{A}} \sqrt{\frac{P_{cm}}{m}}, \quad (1)$$

где l_0 – длина волны, равная длине дуги окружности цилиндра, м;

A – амплитуда волны, равная величине максимального радиального биения, м;

P_{cm} – нормальная нагрузка, равная усилию выглаживания, Н;

m – масса подвижных частей выглаживателя, кг;

r – радиус заготовки, м.

При расчетах по приведенным формулам ($r = 15$ мм, радиальное биение 0,01 мм, $P_{cm} = 90$ Н, $m = 0,4$ кг) получаем $V_{кр} \approx 4000$ м/мин. Однако эксперименталь-

но установлено, что при этих условиях скорость возбуждения колебаний значительно ниже и составляет $V_{кр} \approx 60..80$ м/мин, в зависимости от технологических факторов обработки. Значительное расхождение в скоростях свидетельствует о том, что в приведенной формуле не учитывается влияние других факторов обработки.

Выявление других причин, влияющих на вибрации индентора, проводилось на жидкостной модели (рис. 1). При этом цилиндрическая деталь Ø200 мм устанавливалась на токарном станке. На наружную поверхность в радиальном направлении подавалась струя жидкости круглого сечения. Линии течения жидкости фактически моделируют линии искажения поверхностного слоя в очаге деформирования [4]. В процессе экспериментальных исследований при неподвижном цилиндре жидкость принимала форму, аналогичную форме выпуклой волны пластически деформированного металла при статическом

внедрении твердого индентора (рис. 1, а).

Когда цилиндр приводился во вращение, наблюдалось изменение волны. Волна принимала форму дуги с вершиной 2 и шлейфом 3 (аналогично волне, движущейся перед индентором при выглаживании без перекрытия следов обработки) (рис. 1, б).

При увеличении скорости вращения цилиндра высота волны увеличивалась, а ее длина во фронтальном направлении уменьшалась с одновременным увеличением длины шлейфа (рис. 1, в). После достижения критической скорости V_3 (рис. 1, г) происходил разрыв волны, сопровождающийся вибрированием струи жидкости. Следовательно, на автоколебания оказывает влияние перемещение индентора не только в радиальном направлении, как считалось ранее, но и в направлении скорости.

Логично предположить, что при обработке металла происходят аналогичные явления. При достижении определенного уровня пластической де-

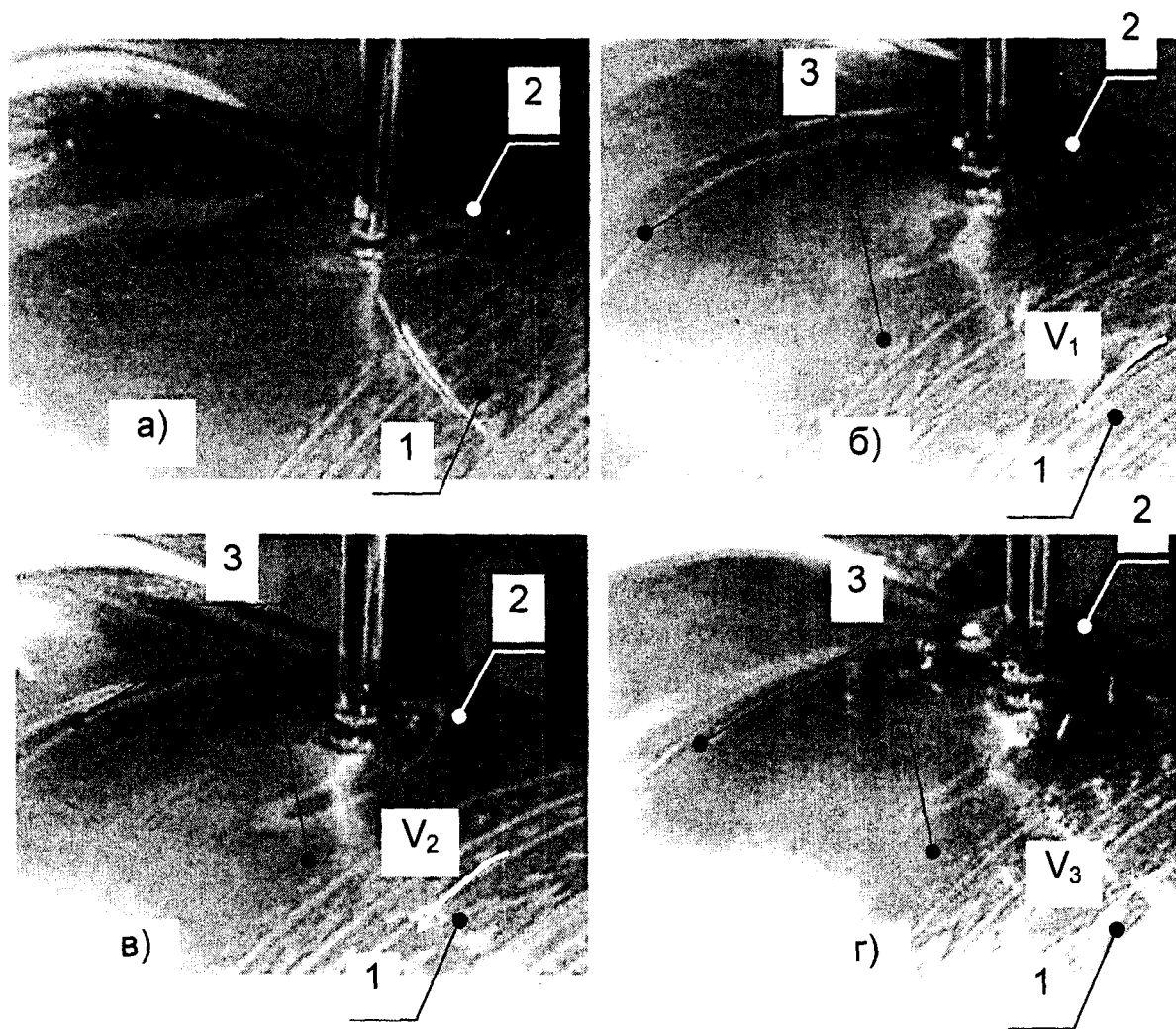


Рис. 1. – Жидкостная модель формирования волны деформированного металла перед движущимся индентором:

а – стационарная модель;

б, в, г – последовательные стадии развития процесса при увеличении скорости;

V_1, V_2, V_3 – скорости вращения цилиндра ($V_1 \leq V_2 \leq V_3$);

1 – поверхность цилиндра; 2 – вершина волны жидкости; 3 – шлейф волны

формации сдвига (особенно при повышенных скоростях обработки) на гладкой поверхности появляются волны разной формы, которые в дальнейшем могут раздваиваться или задираются и отслаиваются взаимно перемещающимися поверхностями с образованием трещин. При увеличении скорости обработки увеличивается высота волны и уменьшается ее длина во фронтальном направлении (с уменьшением толщины верхней части волны). При этом увеличиваются напряжения в волне. В работе [5] это объясняется потерей устойчивости формы вершины волны из-за неравномерного течения материала в процессе локального волнообразования.

Вершина волны может прогибаться в направлении скорости, в ряде случаев наблюдается ее завихрение. При увеличении скорости деформирования происходит дальнейший перегиб вершины к передней стенке волны с образованием заката деформируемого материала, на вершине волны появляются микротрещины. Образованные закаты отделяются и отслаиваются от поверхности. Микротрещины, развиваясь, способствуют разрыву волны. При этом индентор совершает скачок – резкое поступательное движение в направлении разорванной волны. Величина этого перемещения зависит от характеристик деформирующего устройства (люфт штока относительно корпуса и жесткость в поперечном направлении). При недостаточной жесткости устройства в поперечном направлении величина перемещений индентора максимальна. Индентор может совершать несколько скачков до затухания процесса.

Жидкостная модель наглядно демонстрирует влияние жесткости упругой системы в поперечном направлении (направлении скорости обработки). Чем жестче устройство, тем менее ярко выражены автоколебательные процессы. В свою очередь жесткость определяет частоту собственных колебаний устройства. На интенсивность автоколебаний, таким образом, огромное влияние оказывает люфт штока деформирующего устройства относительно корпуса, который необходимо минимизировать.

Если учесть инерционные процессы при выглаживании, а так же вязкость, упругость, твердость обрабатываемого материала [6], то при расчете при тех же условиях обработки получаем $V_{кр} \approx 200$ м/мин, что значительно ближе к экспериментальным результатам.

С целью надежного определения диапазона скоростей, при которых происходит переход от устойчивой работы индентора при выглаживании к работе с вибрациями, а так же для определения факторов, влияющих на начало вибраций, выполнен комплекс экспериментальных исследований. Исследовалась зависимость скорости начала вибраций от технологических факторов выглаживания стальным шаром. Диапазон варьирования значений технологических факторов обработки:

- скорости обработки 26...84, м/мин;
- подачи 0,016...0,08, мм/об;
- силы выглаживания 80...100;
- диаметра индентора \varnothing 5...12,5 мм

Визуально определить и точно зафиксировать точку начала вибраций достаточно сложно, поэтому регистрировались скорости обработки, при которых наблюдались устойчивые вибрации, и максимальные предельные скорости, при которых вибраций еще не наблюдалось. Получены диапазоны скоростей:

- 1 – без вибраций;
- 2 – с вибрациями;
- 3 – зона переходных процессов от устойчивой работы индентора к работе с вибрациями (рис. 2, а – алюминий 99,999 %, рис. 2, б – Д16Т, рис. 2, в – медь М1).

Для описания скоростей начала вибраций использована функция знака вида:

$$A = \text{sign}[y(V, S, d)], \quad (2)$$

где: V – скорость выглаживания, м/мин;
 S – подача, мм/об,
 d – диаметр индентора.

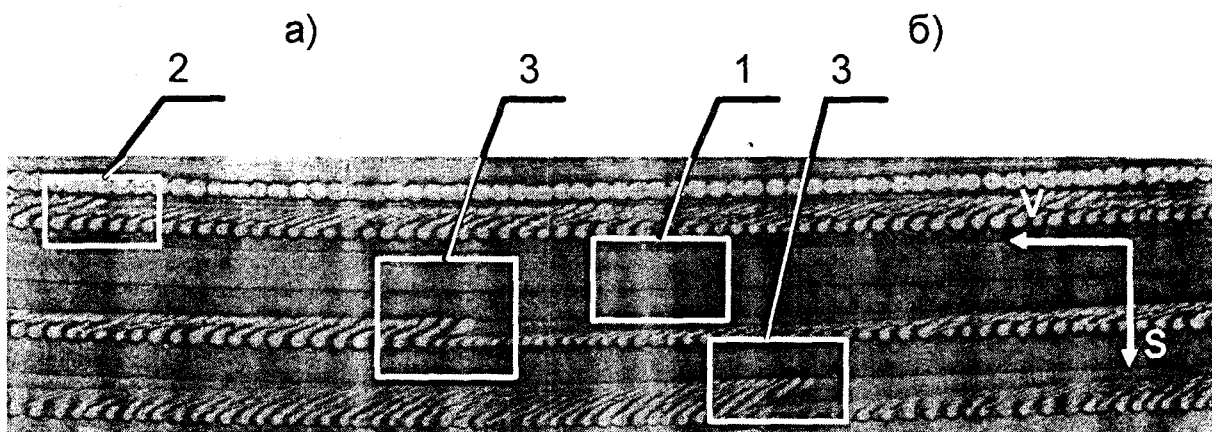
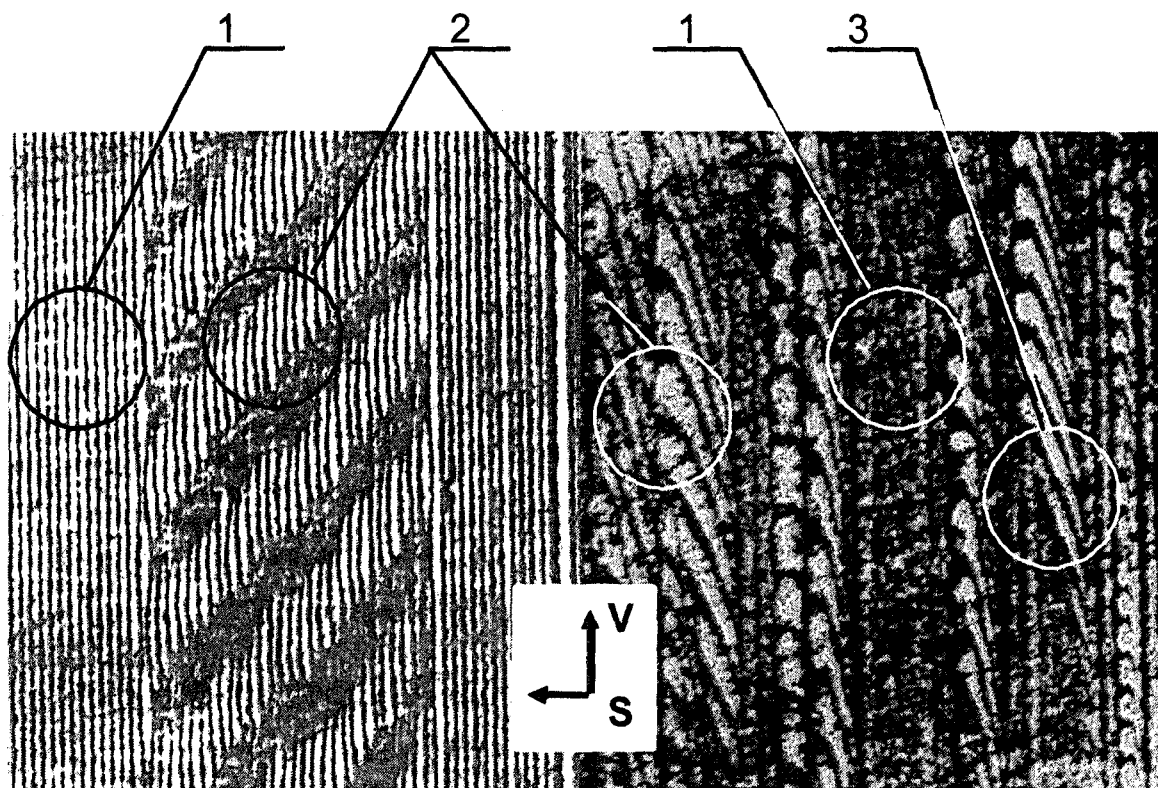
Функция такого вида принимает значение -1 , если вибрации отсутствуют, и значение $+1$, если обработка проходит с вибрациями. Зависимости начала вибраций индентора от скорости, диаметра индентора и подачи при выглаживании представлены на рис. 3. Зависимости имеют по три зоны: стационарная (устойчивая) зона, в которой гарантировано отсутствие вибраций (значения регрессионного уравнения -1 , зона 1); вибрационная зона, в которой гарантировано наличие вибраций (значения регрессионного уравнения $+1$, зона 2); переходная зона, в которой происходят переходные процессы от устойчивого движения индентора к вибрирующему (зона 3).

Из зависимостей видно, что с увеличением диаметра индентора точка смещается в безвибрационную зону, а с увеличением усилия обработки – наоборот, в зону вибраций. Для скорости влияние однозначно: с повышением скорости точка смещается в сторону зоны вибраций. С увеличением подачи точка сдвигается в безвибрационную зону.

Рассмотренные закономерности справедливы для алюминия и его сплавов, меди М1, мягких сталей.

В результате выполнения комплекса экспериментальных исследований установлено, что частота вибраций не зависит от технологических факторов обработки и остается практически постоянной при изменении материала заготовки. Частота колебаний при обработке деталей из меди, АL 99,999 %, сплава Д16Т составляет 1700 ... 1800 Гц.

На фотографии (рис. 4) показана торцовая поверхность заготовки из сплава Д16Т, выглаживание которой осуществлялось стальным шаром при постоянном усилии. Инструмент при обработке перемещался от центра детали к наружной поверхности. На участке 1 коэффициент перекрытия следов об-



В)

Рис. 2. – Зоны вибраций индентора:

1 – стационарная зона; 2 – вибрационная зона; 3 – переходная зона;

а – AL 99,999%, коэффициент перекрытия – 1;

б – Д16Т, коэффициент перекрытия >> 1;

в – Медь М1, коэффициент перекрытия >> 1

работки больше 1, на участке 2 коэффициент перекрытия следов обработки равен 1. По мере удаления индентора от центра заготовки, скорость скольжения в контакте увеличивается, однако число рифлей на обработанной поверхности остается постоянным, увеличивается лишь их шаг. Частота рифлей зависит от частоты собственных колебаний деформирующего устройства, рассчитанной по [7].

Расчеты показали, что частота собственных колебаний деформирующего устройства составила:

– в осевом направлении ~ 90 Гц (при массе колеблющихся частей 4 Н и жесткости пружины 30000 Н/м);

– в поперечном направлении (скорости подачи) ~ 1800 Гц (при массе колеблющихся частей 0,6 Н и жесткости упругой системы 1800000 Н/м).

Следовательно, в расчетах необходимо учитывать частоту колебаний в направлении скорости перемещения индентора, что обеспечивает возможность подсчета более точных значений величины скорости начала колебаний (100 м/мин).

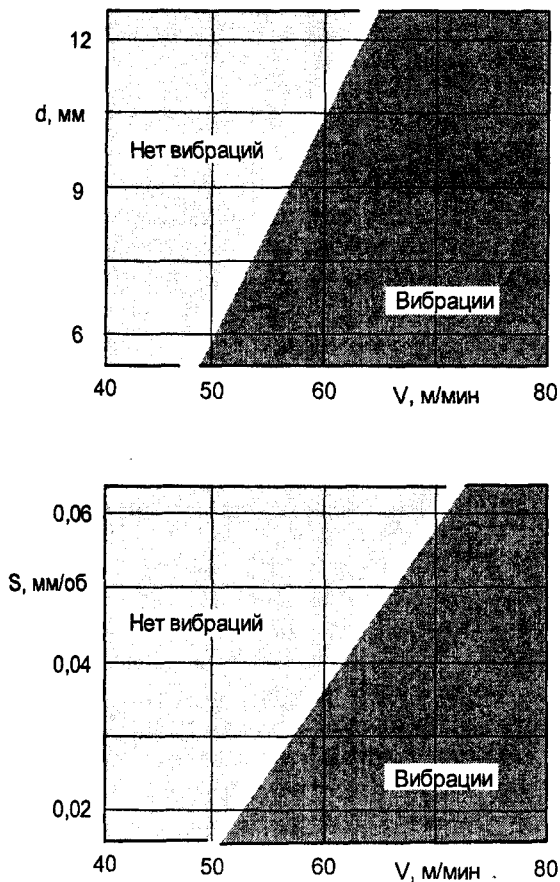


Рис. 3. – Зависимость наличия вибраций индентора от скорости (V), диаметра индентора (d) и подачи (S) при выглаживании

Таким образом, при выглаживании деталей из вязких пластичных металлов, основное влияние на вибрации индентора оказывает люфт и жесткость деформирующего устройства в направлении скорости обработки.

На основе проведенного анализа и экспериментальных исследований разработаны оригинальные конструкции деформирующих устройств, отличающиеся тем, что контакт подвижного штока и корпуса в них осуществляется только посредством тел качения [8, 9]. Предусмотрена возможность регулирования натяга и компенсации его по мере износа дорожек качения. Использование устройств при финишной отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием позволило достичь высоких результатов. При обработке дисков из меди М1 и бронзы БрХ стабильно обеспечивается однородная шероховатость $Ra \leq 0,1$ мкм, на поверхности электрофотографических цилиндров из Д16Т – $Ra \leq 0,05$ мкм [10, 11].

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ РК ЦЧР № 03-01-96481.

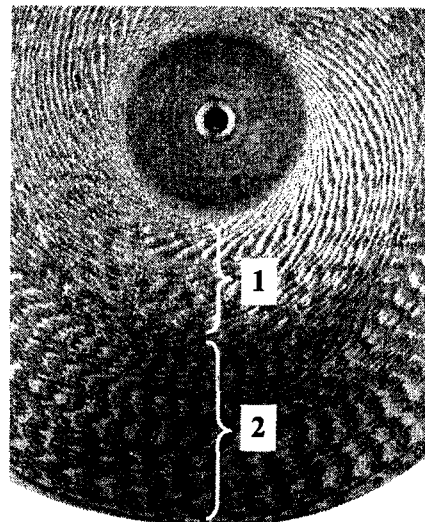


Рис. 4. – Торцовая поверхность, выглаженная стальным шаром

Литература:

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104 с.
3. Балакин В.А. Трение при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1982. 193 с.
4. Смелянский В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования. М.: Объединение "МАШМИР", 1992. 60 с.
5. Чена П.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. / П.А. Чена, В.А. Андрияшин. Мн.: Наука и техника, 1988. 192 с.
6. Киричек А.В. Повышение качества аморфной ленты технологическими методами обработки литейных дисков из сплавов меди: Дис. канд. техн. наук. М., 1992. 203 с.
7. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. / 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Политехника, 1990. 272 с.
8. Киричек А.В. Деформирующее устройство. А.В. Киричек, И.А. Телков, И.Б. Кульков // Свидетельство на полезную модель РФ №2533., МКИ В 24 В 39/04. 1996.
9. Киричек А.В. Роликковое обкатное устройство. / А.В. Киричек, И.А. Телков, И.Б. Кульков // Свидетельство на полезную модель РФ №2098., МКИ В 24 В 39/04. 1996.
10. Телков И.А. Ресурсосберегающая технология восстановления подложки деталей из цветных сплавов / И.А. Телков, А.В. Киричек // Ресурсосберегающие технологии машиностроения. М.: МГААТМ, 1995. С. 240-245.
11. Щебров О.М. Исследование процесса алмазного выглаживания деталей из сплавов меди / О.М. Щебров, А.В. Киричек, Ю.А. Сергеев // Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий. Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. М., 1-4 октября 1990. С. 161-163.

УДК 669.715:621.35

Д-р. техн. наук, проф. А. Н. Новиков
Орловский государственный технический университет
г.Орел, тел. (0862) 419805
канд. ф-м. наук, доц. О. А. Иващук
Орловский государственный аграрный университет
г.Орел, тел. (0862) 97050
инж. Е. В. Дворнов
Орловский государственный аграрный университет
г.Орел, тел. (0862)431981

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

In this article the authors pays attention to developing methods of computer simulation of technological processes of restoration of worn-out machine details. The authors propose mathematics models, corresponding program means and introduction recommendation in repair production.

В данной статье говорится о разработанных методах компьютерного моделирования технологических процессов восстановления изношенных деталей машин. Предложены математические модели, соответствующие программные средства и рекомендации к их внедрению в ремонтное производство.

Перспективным направлением в повышении эффективности управления технологическими процессами является его компьютеризация, т.е. применение блока компьютерных программных средств, позволяющих проводить имитационный эксперимент: прогнозировать выходные характеристики процесса - показатели, определяющие качество восстановления деталей, обрабатывать и оптимизировать режимы ТП.

С помощью компьютерного эксперимента также возможно осуществлять исследование технологии восстановления на стадии ее разработки и внедрения в ремонтное производство.

Основными преимуществами эксперимента, осуществляемого на ЭВМ, являются:

- лёгкость повторения и воспроизведения условий проведения эксперимента;
- лёгкость прерывания и возобновления эксперимента;
- управление условиями проведения эксперимента.

Все это позволит сократить затраты материально-сырьевых, энергетических и временных ресурсов, снизить брак, снизить влияние «человеческого фактора», повысить экологичность процесса и, в конечном счете - повысить качество восстановления.

Разработке и внедрению компьютерной программы, позволяющей осуществлять имитационный ТП восстановления детали, предшествует построение математической модели, адекватной реальному процессу.

При анализе различных методов моделирования был сделан вывод, что наиболее перспективным для реализации точной и эффективной модели технологического процесса восстановления является эмпирический подход.

Теоретические модели, построенные на основе физико-химических законов, дают точное понимание внутренней физики процесса, обеспечивают возможность прогнозирования вне диапазона реальных измерений, проверяющих модель. В научных и теоретических исследованиях их приоритет неоспорим и очевиден, доказан многочисленными исследованиями, публикациями и т.д. Однако в случае сложных, еще до конца не исследованных процессов точность и адекватность физических моделей ограничена, даже при рассмотрении их в пределах экспериментального диапазона.

Для практических целей наиболее эффективными являются эмпирические модели, так называемые модели "черного ящика". Эмпирические модели получают на основе экспериментальных данных, их адекватность можно гарантировать только для тех условий, в которых они строились, и они используются только для практических целей, а не в теоретических исследованиях. Их основное достоинство - это быстрота построения, универсальность и возможность построения моделей сложных процессов, физико-математические модели которых неизвестны или очень сложные.

Мы рассмотрели два подхода к построению эмпирических моделей технологии восстановления деталей машин.

В первом случае реализуется построение полиномиальной модели (ПМ). Результатом моделирования является аналитическое уравнение - полином некоторой степени и соответствующая графическая визуализация — трехмерная поверхность или контурный график на плоскости, отражающие реальную зависимость выбранного показателя качества восстановления от технологических параметров процесса.

Во втором случае для реализации модели, позволяющей работать с большим числом входных и выходных параметров, был рассмотрен нейросетевой подход. Основными преимуществами моделей ПП, основанных на построении искусственных нейронных сетей, являются:

- высокая точность прогнозирования значений выходных параметров процесса - показателей качества восстановления;

- возможность определять и оптимизировать необходимые режимы процесса восстановления по требуемым значениям показателей качества. Это очень важный момент, на который необходимо обратить внимание при выборе метода моделирования, особенно, когда по технологическим или производственным требованиям необходимо обеспечить значение показателей, определяющих физико-механические свойства восстановленных деталей, в строго определенном диапазоне.

Работа нейронной сети происходит в три стадии: обучение, проверка (тестирование) и непосредственно функционирование. Если имеется базис экспериментальных данных - матрица, содержащая различные варианты значений технологических параметров процесса и соответствующий выходной вектор значений показателей качества, то для настройки сети удобно выбрать алгоритм обратного распространения ошибки. В этом случае часть экспериментальных данных является эталоном для настройки сети. После достаточно большого числа обучающих циклов алгоритм сходится к решению, которое минимизирует разность между требуемым и полученным выходами. На оставшихся экспериментальных данных сеть тестируется. Если на вход полностью настроенной сети подать входной вектор, не входящий в обучающую выборку, то выходной вектор с достаточной степенью точности будет приближен к действительному. Таким образом, обученная с помощью алгоритма обратного распространения нейронная сеть представляет собой адекватную модель процесса, применительно к которому она была обучена. Основная плата за адекватность - время, затраченное на организацию и проведение обучения.

Нами были реализованы полиномиальная и нейросетевая модели примере одного из самых перспективных способов восстановления и проч-

нения деталей из алюминиевых сплавов - микродугового оксидирования (МДО). Сущность МДО заключается в том, что на деталь из алюминиевого сплава, расположенную в электролитической ванне, через специальный источник питания подается ток, приводящий к образованию на поверхности детали микроплазменных разрядов, под воздействием которых поверхностный слой детали перерабатывается в оксид алюминия. На поверхности детали образуется прочный, практически беспористый слой керамики толщиной до 300 мкм. МДО позволяет получить высококачественные износостойкие покрытия. Электрохимические микродуговые процессы включают в себя обычный электролиз, транспорт вещества электролита в разряд из растворов, высокотемпературные химические реакции в разряде и в зоне электродов, прилегающих к разряду, с участием (или без участия) вещества электродов. Механизм микродуговых процессов на электродах в электролитах изучен недостаточно, что затрудняет построение точной физико-математической модели процесса МДО. С другой стороны, технологические параметры процесса МДО легко поддаются настройке и регулированию, что делает очень привлекательным данный процесс для эмпирического моделирования и последующей автоматизации.

Моделируемыми показателями качества были выбраны: микротвердость (H_n) покрытия и его толщина (h). К основным показателям, определяющим качество восстановления деталей покрытиями, нанесенными электрохимическими способами, относятся: прочность сцепления покрытия с основным металлом; твердость покрытия; внутренние напряжения; износостойкость; усталостная прочность и др. Следует отметить, что между названными показателями и микротвердостью покрытия либо уже существует непосредственная функциональная зависимость, либо возможно установление зависимостей хотя бы корреляционного типа. Кроме того, ни одна существующая методика для определения названных показателей не может соперничать с испытаниями на твердость по своей простоте и универсальности. Поэтому микротвердость была выбрана в качестве моделируемого универсального показателя, характеризующего физико-механические свойства восстановленной детали. В качестве входных параметров модели были выбраны величины задающие режим процесса МДО - технологические параметры: плотность тока D_t , состав электролита и время оксидирования T . Другие параметры процесса МДО, такие как объем электролита, межэлектродное расстояние в электролитической ванне, материал и температура электродов и т.д., поддерживались постоянными.

Результаты построения и анализа полиномиальных моделей показывают, что истинную зависимость эксплуатационных характеристик восстановленной детали от технологических параметров

процесса МДО наиболее адекватно отражают квадратичные полиномы.

При нейросетевом моделировании процесса МДО входной слой нейронов соответствует входным параметрам модели, выходной слой - устанавливает отклики. Были построены и обучены многослойные нейронные сети двух видов. В одной входными параметрами являлись технологические параметры МДО, а выходными - микротвердость и толщина восстановленного покрытия. В другой сети входной вектор отражает требуемые значения показателей качества, а выходной - необходимые для обеспечения этих значений режимы МДО.

Для проверки качества построенных моделей была проведена серия натуральных экспериментов. Расхождение прогнозируемых по моделям значений с результатами эксперимента не превышает 5%. Установлено, что наиболее высокую точность обеспечивают нейронные сети: уменьшение экспериментальной ошибки при переходе от полиномиальной к нейросетевой модели для микротвердости H_m , толщины внутреннего h_1 и толщины h_2 внешне-

го упрочненного слоев составляет соответственно 92,7%, 20,6%, 23%.

На основе построенных и проверенных на адекватность моделей были разработаны компьютерные программы в удобном пользовательском интерфейсе, позволяющие:

- прогнозировать значения эксплуатационных характеристик восстановленной детали по заданным режимам МДО;

- определить необходимые значения технологических параметров МДО по требуемым значениям показателей качества.

Разработаны рекомендации по использованию компьютеризированного технологического процесса в ремонтном производстве.

Представленная методика разработки компьютеризированного технологического процесса восстановления изношенных деталей машин является универсальной и может быть использована для любого выбранного для исследования технологического процесса.

УДК 621.787.6.004

Канд. техн. наук Д. Л. Соловьев, д-р техн. наук, проф. А. В. Киричек
(Орловский государственный технический университет)
E-mail: ppsio@narod.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Modeling technological process of hardening of a new method of superficial plastic deformation (SPD) – statiko-pulse processing (SPP) is considered. As a result of a complex lead theoretical and experimental researches of hardening of flat surfaces SPP communications between modes of hardening and properties of the strengthened surface are determined. It made of algorithm of calculation of modes SPP.

Упрочняющая обработка занимает важное место в технологическом процессе изготовления деталей машин. Применение упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках в 1,5...3 раза и увеличить срок службы в десятки раз. В результате упрочнения ППД образуется поверхностный слой с остаточными напряжениями сжатия, повышенной твердостью и требуемой шероховатостью. Упрочненный слой после ППД определяется изменением твердости HV или микротвердости H_m . Полученная микрогеометрия

упрочненной поверхности оценивается параметрами шероховатости.

В зависимости от требований предъявляемых к поверхности детали используются различные способы упрочнения ППД [1]. При необходимости создания большой глубины и степени упрочнения (до 8...10 мм) целесообразно использование статико-импульсной обработки (СИО) [2, 3]. При СИО производится нагружение упрочняемой поверхности управляемым импульсным воздействием. Одной из характерных особенностей СИО является генерирование ударного импульса ударной системой состоящей из бойка и волновода. Переда-

ча энергии удара в очаг деформации производится в условиях предварительного статического поджатия инструмента к упрочняемой поверхности, тем самым обеспечивая наиболее полное использование энергии управляемого ударного импульса для упругопластической деформации.

Проведенными исследованиями СИО установлено, что форма ударного импульса генерируемого ударной системой боек-волновод зависит от геометрических параметров ударной системы боек-волновод и коэффициента сопротивления внедрению характеризуемого свойствами упрочняемой поверхности, а также кривизной инструмента и упрочняемой поверхности [4, 5]. В зависимости от формы деформируемой поверхности для СИО используются сферические (шары) и роликовые инструменты (стержневые, дисковые и профильные); в зависимости от количества одновременно формируемых очагов деформации одно- и многоконтактные инструменты. Для упрочнения плоских поверхностей целесообразно использовать шары и стержневые ролики. Обработка стержневым роликом позволяет значительно увеличить производительность СИО и способствует формированию более благоприятной микрогеометрии поверхности, так как глубина отпечатка, полученного при вдавливании ролика в 6...10 раз меньше, чем глубина отпечатка, полученного при вдавливании шара. При использовании стержневых роликов значение коэффициента сопротивления внедрению, как правило, достигает значительных величин, поэтому геометрические параметры ударной системы при упрочнении стержневым роликом должны выбираться таким образом, чтобы обеспечивать требуемую форму ударных импульсов обеспечивающих наибольшую передачу энергии удара в упрочняемую поверхность.

В результате выбраны рекомендации по проектированию ударной системы для нагружения плоской поверхности стержневыми роликами. Для применения СИО в промышленных условиях разработан гидропневматический генератор механических импульсов (ГМИ), использующий ударную систему боек-волновод рассчитанную по полученным рекомендациям. ГМИ обеспечивает управление энергетическими характеристиками: частотой и энергией ударов, в широком диапазоне [6].

В промышленных условиях при использовании ГМИ с определенной ударной системой боек-волновод основным технологическим фактором характеризующим ударный импульс будет энергия

ударов. Изменение энергии ударов, в отличие от изменения формы импульса, не требует изменения размеров элементов ударной системы. Энергия импульсов может регулироваться только за счет соответствующих настроек гидросистемы ГМИ.

Следовательно, для упрочнения СИО в данных условиях технологическими параметрами являются: энергия удара (A); динамическая составляющая нагрузки (P_d); статическая составляющая нагрузки (P_{cm}); частота ударов (f); скорость подачи заготовки относительно инструмента (s); диаметр (D_p) и ширина (b_p) стержневого ролика.

Для того чтобы успешно применять СИО на практике необходимо иметь возможность точно назначать технологические факторы в зависимости от требуемой глубины и степени упрочнения. Проведено ряд исследований, которые позволяют установить связь между технологическими параметрами СИО с одной стороны и глубиной, степенью упрочнения, получаемой шероховатостью с другой. Результаты исследований представлены в виде теоретических и экспериментальных (обработанных с помощью пакета Statistica 6.0) зависимостей. При упрочнении СИО, как и вообще динамическими способами ППД, упрочняемый слой формируется в результате наложения множества пластических отпечатков, получаемых под действием динамической нагрузки. Степень, глубина и равномерность наклепа поверхностного слоя будут зависеть от размеров пластических отпечатков и от степени (коэффициента) их перекрытия. Следовательно, размер единичной вмятины δ , скорость подачи заготовки относительно инструмента s и частота ударов f связаны между собой через коэффициент перекрытия:

$$K = 1 - \frac{s}{60\delta f} \quad (1)$$

Установлено влияние энергии ударов и размеров инструмента на размеры единичной пластической вмятины. При СИО стержневым роликом формируются отпечатки длиной, соответствующей ширине стержневого ролика, и характерным размером отпечатка δ в направлении подачи. При использовании для упрочнения стержневых роликов влияние энергии ударов на свойства упрочненной поверхности целесообразно учитывать через удельную энергию ударов $a = A / b_p$. Для частных случаев удельной энергии ударов $a = 10$ Дж/мм и диаметра ролика $D_p = 10$ мм после обработки экс-

периментальных данных в пакете Statistica 6.0 получены математические модели:

для $a = 10$ Дж/мм

$$\delta = 2,936997 - 0,001242D_p^2, \quad (2)$$

для $D_p = 10$ мм

$$\delta = 1,577356 + 0,13533a - 0,000508725a^2. \quad (3)$$

Определено влияние K на глубину h_v и степень упрочнения ΔHV .

$$HV = a_1 - a_2Kh_v - a_3 \ln h_v + a_4 \ln K, \quad (4)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – эмпирические коэффициенты.

$$\Delta HV = \frac{HV - HV_0}{HV_0} 100\%, \quad (5)$$

где HV_0 – исходная твердость упрочняемого металла

Одновременно с измерением глубины и степени упрочнения была проведена оценка параметров шероховатости:

$$R_a = c_1 + c_2e^{l-K}, \quad (6)$$

$$R_z = d_1 + d_2e^{K-1}, \quad (7)$$

$$R_{max} = g_1 + g_2e^{K-1}, \quad (8)$$

где $c_1, c_2, d_1, d_2, g_1, g_2$ – эмпирические коэффициенты.

Установлен характер влияния удельной энергии ударов a и диаметра стержневого ролика D_p на глубину и степень упрочнения [7]:

$$\begin{aligned} \Delta H_\mu = & b_1 + b_2h_\mu + b_3a + b_4D_p + \\ & + b_5h_\mu a + b_6h_\mu D_p + b_7D_p a + \\ & + b_8h_\mu^2 + b_9D_p^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ – эмпирические коэффициенты.

Модель разработана для условий, когда упрочнение производится с большим перекрытием отпечатков $K = 0,92$, при котором достигается высокая равномерность упрочненного слоя.

Проведена оценка энергетических параметров

ГМИ. В результате составлены модели отображающие влияние настроечных характеристик ГМИ: давления рабочей жидкости (p_n), давления газа в гидропневмоаккумуляторе ($p_{ак}$), расхода жидкости, поступающей на управление гидродвигателем, определяющим частоту ударов генератора механических импульсов (Q), на энергетические характеристики: энергию ударов (A), частоту ударов (f) [8].

$$A = -38,4075 + 1,8049p_{ак}p_n + 10,0929p_n - 0,7717Qp_{ак} + 51,7948 \lg Q - 4,1363Q, \quad (10)$$

$$f = 2,0886 + 1,164Q + 0,0369Qp_{ак} + 4,2234 \lg Q + 0,0207Q^2 - 0,1264p_{ак}^2 + 0,073p_{ак}p_n. \quad (11)$$

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено соотношение между статической и динамической составляющей нагрузки:

$$P_{ст} \geq 0,01P_u, \quad (12)$$

где

$$P_u = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} \sqrt{\frac{2A}{m_1}}, \quad A = \frac{m_1V^2}{2},$$

$$C_1 = \rho_1a_1 \frac{\pi d_1^2}{4}, \quad C_2 = \rho_2a_2 \frac{\pi d_2^2}{4},$$

$$m_1 = \rho_1L_1 \frac{\pi d_1^2}{4},$$

где a_1, a_2 – скорость распространения ударной волны в бойке и волноводе соответственно, м/с;

ρ_1, ρ_2 – плотность материала бойка и волновода соответственно, кг/м³;

C_1, C_2 – ударная жесткость бойка и волновода соответственно,

m_1 – масса бойка, кг.

Для осуществления обоснованного выбора технологических параметров процесса разработан специальный алгоритм (рис. 1).

Расчет режимов СИО по алгоритму производился по вышеперечисленным моделям. Степень упрочнения при расчетах может выражаться как через микротвердость ΔH_μ , так и через твердость по Виккерсу ΔHV . При осуществлении алгоритма, при необходимости, может быть произведен перевод чисел твердости из одних единиц в другие и обратно. Алгоритм разработан для расчета режимов СИО при использовании в качестве инстру-

мента стержневых роликов.

Алгоритм выполняется следующим образом.

1. Ввод исходных данных. Вводится марка упрочняемого материала. Вводятся требуемые характеристики поверхностного слоя: степень упрочнения ΔH_{μ} , глубина упрочнения h_{μ} , шероховатость поверхности R_z . Полученные в результате расчета по алгоритму режимы СИО должны обеспечивать глубину и степень упрочнения не менее заданных, а шероховатость не более заданной. Вводятся энергетические характеристики ГМИ и установки для упрочнения: диапазон регулирования энергии ударов $A_{\min} \dots A_{\max}$, частоты ударов $f_{\min} \dots f_{\max}$, максимальная скорость подачи заготовки относительно инструмента s_{\max} .

2. Определение коэффициента перекрытия обеспечивающего требуемую глубину и степень упрочнения. Для этого используется экспериментальная модель (4) отражающая зависимость твердости и глубины упрочнения от коэффициента перекрытия при упрочнении стержневым роликом.

2.1. Задается первое начальное условие – глубина упрочнения $h_V = 0$.

2.2. Задается шаг вычислений $h_V = h_V + 0,1$.

2.3. Задается второе начальное условие – коэффициент перекрытия, определяемый по твердости $K_{ms} = 0$.

2.4. Задается шаг вычислений $K_{ms} = K_{ms} + 0,1$.

2.5. По модели (4) определяется глубина и степень упрочнения h_V и ΔHV .

2.6. Значения ΔHV и h_V переводятся в единицы измерения микротвердости $\Delta H_{\mu K}$ и $h_{\mu K}$ и непрерывно сравниваются с заданными. Если $\Delta H_{\mu K} = \Delta H_{\mu}$ и $h_{\mu K} = h_{\mu}$, то переход к следующему блоку, если нет, то увеличивается h_V и K_{ms} .

2.7. Определяется значение коэффициента перекрытия отпечатков K_{ms} необходимого для обеспечения требуемой степени и глубины упрочнения ΔH_{μ} , h_{μ} .

3. Определение глубины и степени упрочнения по (4) при $K = 0,92$: $\Delta HV_{K=0,92}$, $h_{V K=0,92}$ ($\Delta H_{\mu K=0,92}$, $h_{\mu K=0,92}$)

4. Определение размеров инструмента D_p . По модели (9)

4.1. Для уменьшения числа проходов ширина стержневого ролика b_p принимается равной ширине упрочняемой поверхности B_0 .

4.2. Задается первое начальное условие вычислений – значение диаметра стержневого ролика $D_p = 0$.

4.3. Задается шаг вычислений $D_p = D_p + 1$.

4.4. Задается второе начальное условие вычислений – удельная энергия удара $a = A/b_p$.

4.5. Задается шаг вычислений $a = a + 0,1$.

4.6. Определяется степень и глубина упрочнения $\Delta H_{\mu D,a}$ и $h_{\mu D,a}$.

4.7. Сравнивается значение $\Delta H_{\mu D,a}$, $h_{\mu D,a}$ с заданным $\Delta H_{\mu K=0,92}$ и $h_{\mu K=0,92}$. Если $\Delta H_{\mu D,a} = \Delta H_{\mu K=0,92}$ и $h_{\mu D,a} = h_{\mu K=0,92}$, то переход к следующему блоку, если нет, то необходимо увеличивать a и D_p .

4.8. Определяется диаметр стержневого ролика D_p .

4.9. Определяется значение удельной энергии ударов a .

4.10. Определяется значение энергии ударов $A = a \cdot b_p$.

4.11. Сравниваются A и A_{\min} . Если $A \geq A_{\min}$ то переход к следующему блоку, если нет, то $A = A_{\min}$, что изменит значение диаметра инструмента D_p и, соответственно, глубину и степень упрочнения при $K = 0,98$: $h_{\mu K=0,92}$, $\Delta H_{\mu K=0,92}$.

4.12. Сравниваются A и A_{\max} . Если $A \leq A_{\max}$, то переход к следующему блоку, если нет, то необходимо уменьшать ширину ролика b_p . Это приведет к увеличению числа проходов для обеспечения требуемой ширины дорожки B_0 .

5. Исходя из значения A по (12) определяется сила удара P_u и минимальная сила предварительного статического поджатия инструмента к упрочняемой поверхности $P_{cm} \geq 0,01P_u$.

6. Определение частоты ударов f и соответствующих ей настроек ГМИ p_n и Q , обеспечивающих требуемую энергию удара A (10), (11).

7. Производится расчет характерного размера стержневого ролика измеряемого в направлении движения подачи δ по моделям (2) и (3).

8. Определение коэффициента перекрытия K_{us} , обеспечивающего требуемую шероховатость поверхности, из моделей (6), (7), (8).

8.1. Задается начальное условие вычислений $K_{us} = 0$.

8.2. Задается шаг вычислений $K_{us} = K_{us} + 0,1$.

8.3. Например, для случая когда шероховатость задана параметром R_z по модели (7) определяется значение коэффициента перекрытия обеспечивающего требуемую шероховатость K_{us} .

9. Сравнение значений K_{us} и K_{ms} . Если $K_{us} \leq K_{ms}$, то значение коэффициента перекрытия принимаются $K = K_{ms}$. Если $K_{us} > K_{ms}$, то $K = K_{us}$.

10. Расчет скорости подачи заготовки относительно инструмента s исходя из (1) $s_K = 60(1 - K)df$.

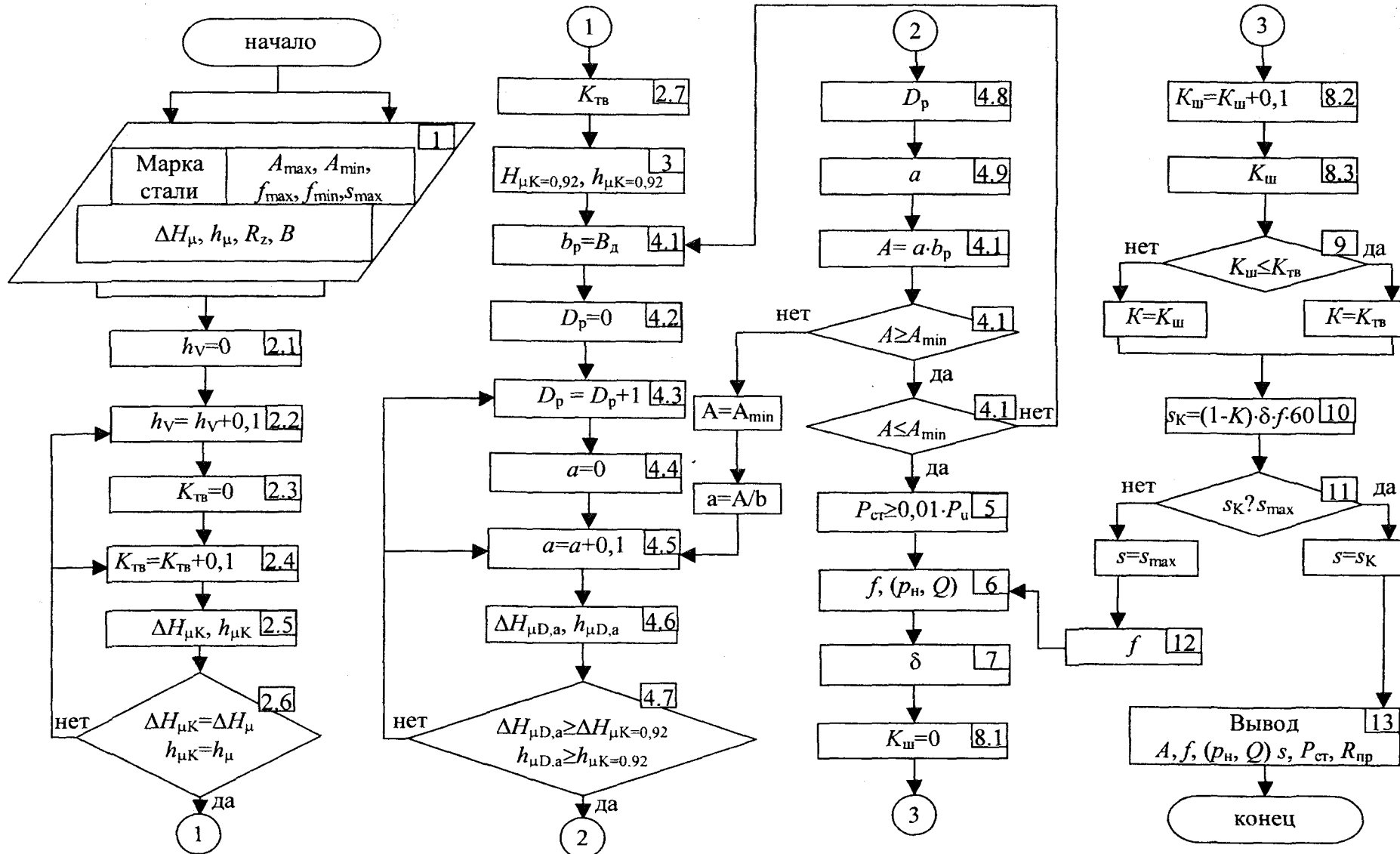


Рис. 1. – Алгоритм вычисления режимов статико-импульсной обработки стержневым роликом

11. Сравнение значения s_K с s_{max} . Если $s_K \leq s_{max}$, то рекомендуемая скорость подачи $s = s_K$, если нет то $s = s_{max}$.

12. Уточнение значения частоты ударов

$$f = \frac{s}{60(1-K)d}$$

и настроек ГМИ, обеспечивающих требуемую частоту ударов f по (10), (11).

13. Вывод значений $A, f, \rho_n, Q, s, P_{ст}, R_{дрл}$.

Полученный алгоритм реализован в пакете MathCAD7.0.

Пример использования алгоритма.

Дано: заготовка из стали 45, $H_{\rho 0} = 2200$ МПа (220 НВ); $L_1 = 480$ мм, $d_1 = d_2 = 48,5$ мм, $A_{max} = 70$ Дж, $A_{min} = 300$ Дж, $f_{min} = 3$ Гц, $f_{max} = 40$ Гц, $s_{max} = 2000$ мм/мин.

1. Необходимо определить режимы СИО для получения упрочненного поверхностного слоя с параметрами: $\Delta H_{\rho} = 40\%$, $h_{\rho} = 4,5$ мм, $R_z = 15$ мкм, $B_{\rho} = 30$ мм. В качестве инструмента используется стержневой ролик.

2. По п. 2 определяется значение $K_{ms} = 0,2$.

3. По п. 3 определяется глубина и степень упрочнения под отпечатками с коэффициентом перекрытия $K = 0,92$; $\Delta H_{\rho K=0,92} = 64\%$, $h_{\rho K=0,92} = 6,2$ мм.

4. По п. 4.1 ширина стержневого ролика принимается равной $B_{\rho} = 30$ мм.

5. По п. 4.8 определяется $D_p = 10$ мм.

6. По п. 4.9 определяется $a = 30,6$ Дж/мм.

7. По п. 4.10 определяется требуемая энергия ударов $A = 900$ Дж.

8. По п. 4.12 сравнивается значение A с A_{min} и устанавливается значение $A > A_{min}$, следовательно необходимо уменьшать ширину стержневого ролика. Принимаем $b_p = B_{\rho}/3 \approx 10$ мм, что и соответствует значению $A = 300$ Дж. Следовательно, обработку поверхности шириной $B_{\rho} = 30$ мм необходимо будет производить за три прохода.

9. По п. 5 определяется значение $P_{ст} = 3,5$ кН.

10. По п. 6 определяется частота ударов $f = 10$ Гц, обеспечивающая требуемую энергию ударов $A = 300$ Дж и осуществляемая при настройке ГМИ: $\rho_n = 16$ МПа, $Q = 3$ л/мин.

11. По п. 7 определяется характерный размер отпечатка $\delta = 3,9$ мм.

12. По п. 8 определяется коэффициент перекрытия $K_{ш} = 0,85$ позволяющий обеспечивать требуемую шероховатость.

13. По п. 9 сравниваются значения $K_{ш}$ и K_{ms} . $K_{ш} > K_{ms}$, следовательно $K = K_{ш} = 0,85$.

14. По п. 10 определяется значение подачи заготовки относительно инструмента $s_K = 346$ мм/мин.

15. По п. 11 сравнивается значение s_K с максимально возможной подачей осуществляемой на установке для СИО s_{max} . Так как $s_K < s_{max}$, то устанавливается значение подачи s .

16. Вывод значений режимов СИО: $A = 300$ Дж, $f = 10$ Гц, ($\rho_n = 16$ МПа, $Q = 3$ л/мин) $P_{ст} = 3,5$ кН, $s = 346$ мм/мин, $D_p = 10$ мм, $b_p = 10$ мм.

Полученный алгоритм объединяет в себе результаты теоретических и экспериментальных исследований СИО и позволяет выбирать технологические факторы предлагаемой упрочняющей обработки в зависимости от требуемых свойств упрочняемой поверхности.

Литература:

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справ. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

2. Упрочнение ответственных поверхностей статико-импульсной обработкой. / О.М. Щебров, А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев // Наука производству. М.: 1998. – № 11. С.20-23.

3. Упрочнение тяжело нагруженных деталей методом статико-импульсного ППД. / Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, С.А. Силантьев // СТИИ. 2002. № 5. С.13-15.

4. Киричек А.В. Способы динамического упрочнения поверхностным пластическим деформированием. / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Кузнечно-штамповочное производство. 2001. №7. С.28-32.

5. Киричек А.В. Управляемое ударное воздействие при упрочнении поверхностным пластическим деформированием. / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Серия «Машиностроение. Приборостроение». Орел, 2003. №1-2. С.30-36.

6. Киричек А.В. Статико-импульсная обработка и оснастка для ее реализации / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев // СТИИ. М.: 1999. №6. С. 20-24.

7. Киричек А.В. Технология и режимы упрочнения статико-импульсной обработкой. / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Справочник. Инженерный журнал. М.: 2003. №2. С. 17-19.

8. Киричек А.В. Ударное устройство для статико-импульсной деформационной обработки / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Кузнечно-штамповочное производство. 2002. №10. С.35-40.

УДК 621.9

*Д-р техн. наук, проф. А. В. Киричек, канд. техн. наук А. Н. Афонин
(Орловский государственный технический университет)
г. Орел, тел. (0862)419877; e-mail: tmsi@ostu.ru*

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕЗЬБОНАКАТЫВАНИЯ

In article the basic directions of development of a perspective way of forming grooves - threadrolling are considered. It is informed that for the further expansion of a scope of this method it is necessary to solve a problem of increase of resistance threadrolling tool, increases of a degree and depth of hardening, perfection of the circuit of deformation, reduction of the saved up error of a step of groove.

Известно, что наиболее перспективными способами формообразования и упрочнения резьб и профилей являются способы обработки пластическим деформированием – накатыванием. При накатывании резьб под влиянием пластической деформации создаются остаточные сжимающие напряжения с благоприятным распределением их по сечению резьбы [4, 10]. Форма и ориентация кристаллов видоизменяются: волокна располагаются по профилю резьбы. Повышение микротвердости поверхностного слоя составляет 30...40 %. Происходят и другие изменения, в результате которых увеличивается сопротивление резьбы пластической деформации и разрушению. Благодаря этому предел прочности при растяжении увеличивается на 10...30 %, сопротивление износу на 20...30 %, усталостная прочность на 50...70 % и более [4, 6, 10]. Производительность обработки резьб пластическим деформированием в несколько раз выше, чем обработки резанием и, тем более, шлифованием. При этом точность и шероховатость поверхности накатанных резьб как правило приближается к шлифованным.

Однако, обработка резьб накатыванием в настоящее время имеет достаточно жесткие ограничения по размерам винтовой поверхности и механическим свойствам обрабатываемого материала.

Глубина упрочнения при накатывании, как правило, не превышает 2...3 мм, что в большинстве случаев является недостаточным для тяжело нагруженных резьб и профилей [4, 6, 10]. Степень упрочнения при резьбонакатывании так же часто недостаточна (в особенности для ходовых резьб). Необходимая степень упрочнения поверхностного слоя при резьбонакатывании может быть достигнута сочетанием его с ТО и ХТО. Однако, накатывание резьб на предварительно упрочненной ТО или ХТО заготовке приводит к значительному снижению стойкости инструмента, что делает ее экономически нецелесообразной.

При накатывании крупных, в особенности трапециевидальных резьб возникают значительные силы, что требует применения энергоемкого и дорогостоящего оборудования. Накатывание некоторых видов резьб, например прямоугольных, вообще не производится из-за особенностей формы их профиля, препятствующих свободному течению металла при накатывании.

Существуют серьезные ограничения также по механическим свойствам материала заготовки. Он должен обладать достаточно высокой пластичностью. При накатывании заготовок из малопластичных материалов из-за исчерпания ресурса пластичности возникают трещины и происходит разрушение витков накатываемой резьбы. Аналогичные явления возникают и при накатывании резьб большого шага (порядка 10 мм и более).

При накатывании резьб большой длины с осевой подачей может возникать значительная накопленная погрешность шага, что ограничивает применение резьбонакатывания для получения длинных точных ходовых резьб.

Особенно значительные сложности возникают при накатывании внутренних резьб. Это связано с большей площадью пятна контакта инструмента и заготовки при накатывании внутренних резьб, особенностями течения металла (не от центра вращения заготовки, как при накатывании наружных резьб, а наоборот к нему) и необходимостью вписывать резьбонакатной инструмент в ограниченный объем отверстия, в котором накатывается резьба, что накладывает серьезные ограничения на его конструкцию. В связи с этим в настоящее время накатывание внутренних резьб не нашло достаточно широкого распространения в машиностроении и используется как правило только для получения резьб небольшого диаметра (до 10 мм) в заготовках из пластичных материалов (цветные металлы и сплавы, реже конструкционные углеродистые стали).

Таким образом, для расширения области применения резбонакатывания необходимо решить следующие задачи:

1. Повысить стойкость резбонакатного инструмента с целью обеспечения экономической целесообразности накатывания резьб на заготовках из труднообрабатываемых и предварительно упрочняемых материалов.

2. Разработать новые способы резбонакатывания, позволяющие достигать значительной глубины упрочнения.

3. Усовершенствовать схему деформации металла при резбонакатывании с целью снижения сил деформирования, недопущения возникновения дефектов (трещин и закатов) и обеспечения возможности накатывания крупных резьб и резьб имеющих труднонакатываемый профиль.

4. Уменьшить накопленную погрешность шага при накатывании длинных резьб с осевой подачей.

Стойкость резбонакатного инструмента зависит от большого количества факторов (рис. 1). Факторы, влияющие на стойкость можно условно разбить на 3 группы:

1. Характеристики материала резбонакатного инструмента.

2. Нагруженность витков.

3. Условия трения резбонакатного инструмента с заготовкой.

К характеристикам материала роликов относятся предел прочности, относительное удлинение, твердость, вязкость, предел выносливости и т.д. К механическим свойствам материала резбонакатного инструмента так же следует отнести такие характеристики его поверхностного слоя, как микротвердость и остаточные напряжения. Механические характеристики материала резбонакатного инструмента зависят от его химического состава, микроструктуры, балла карбидной неоднородности и т.д.

Основными направлениями повышения механических свойств материала резбонакатного инструмента являются:

1) Применение новых инструментальных материалов. В настоящее время резбонакатной инструмент в странах СНГ изготавливается в основном из сталей X12M, X12Ф1, X12MФ, X6BФ, реже из стали 6X6B3MФC. В промышленно развитых зарубежных странах резбонакатной инструмент чаще всего делается из сталей, близких по химическому составу к быстрорежущим сталям [4]. Для повышения стойкости резбонакатного инструмента в будущем очевидно все более широкое применение найдут стали, полученные методом порошковой металлургии из-за низкого балла карбидной неоднородности [4]. Значительного повышения стойко-

сти можно добиться использованием в качестве инструментального материала твердых сплавов, применение которых пока сдерживается из-за их высокой стоимости.

Нанесение упрочняющих покрытий на витки резбонакатного инструмента вряд ли может способствовать значительному повышению его стойкости, так как основной причиной износа резбонакатного инструмента является усталостный, а не абразивный износ.

2) Совершенствование технологииковки и термической обработки. Применяющаяся в настоящее время технологияковки заготовок резбонакатного инструмента не всегда позволяет получать требуемую структуру и балл карбидной неоднородности, в особенности для крупногабаритных инструментов. Дальнейшее совершенствование данной технологии позволит значительно повысить стойкость резбонакатного инструмента. Значительные резервы повышения стойкости резбонакатного инструмента лежат также в совершенствовании технологии его термической обработки. Выявлено, например, значительное повышение стойкости резбонакатных роликов из стали X12M при термической обработке с получением повышенного на 15-20% по сравнению с традиционной технологией содержания остаточного аустенита [10].

3) Совершенствование технологии механической обработки резьбы. В настоящее время наибольшее распространение нашли 3 способа формообразования резьб на резбонакатном инструменте: накатывание с помощью мастер-винта, нарезание лезвийным инструментом (резцом или фрезой) и резьбошлифование.

Накатывание является высокопроизводительным способом, но, поскольку оно производится до закалки, то может применяться только при изготовлении инструмента для накатывания резьб низкой точности. Кроме того, при накатывании часто возникают дефекты на вершинах резьбы - закаты, что не оказывает влияния на качество ходовых и крепежных резьб, но важно для резбонакатного инструмента. Однако, при накатывании происходят положительные изменения в структуре металла, например снижается балл карбидной неоднородности, что повышает стойкость инструмента с накатанной резьбой.

Нарезание резьбы резцом (для плоских плашек - резьбофрезерование) до закалки не имеет перспективы из-за низкого качества получаемого профиля. Более перспективным представляется нарезание резьбы на термически упрочненной заготовке

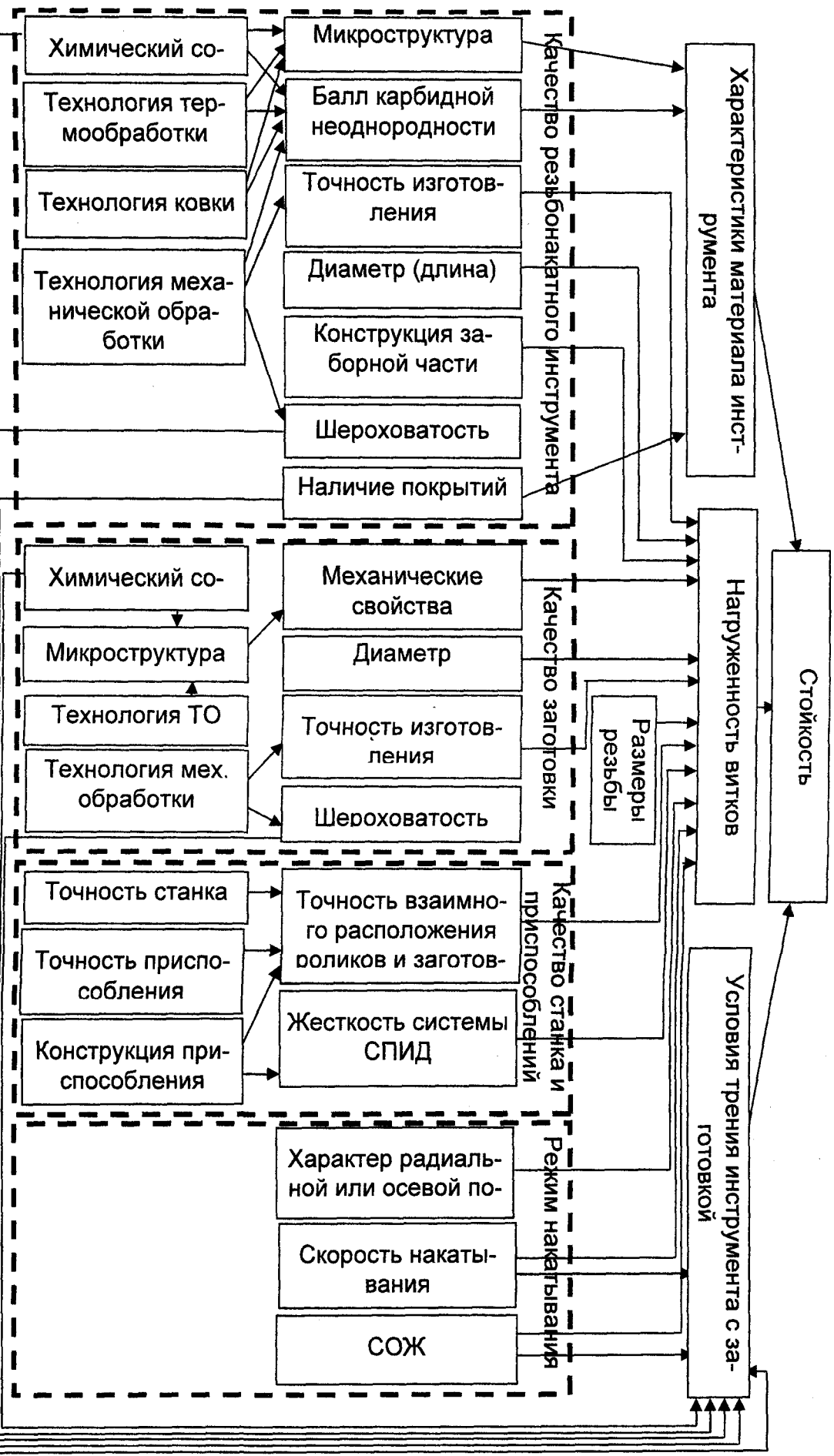


Рис. 1. – Схема основных факторов, влияющих на стойкость резьбонакатного инструмента

лезвийным инструментом из сверхтвердых материалов, так как оно обеспечивает более высокое качество поверхностного слоя, чем резбошлифование, и, тем самым, способствует повышению стойкости.

Резбошлифование позволяет получать резьбы высокой точности, но может привести к снижению стойкости резбокатного инструмента из-за ухудшения структуры поверхностного слоя вследствие шаржирования и прижогов. Изготовление шлифовальных кругов из кубического нитрида бора, применение кругов с прерывистым контактом, использование СОЖ с ПАВ позволит свести негативное влияние резбошлифования на стойкость к минимуму.

Наиболее перспективной с точки зрения повышения стойкости резбокатного инструмента представляется комбинированная технология формирования на нем резьбы, включающая в себя предварительное накатывание резьбы на незакаленную заготовку с последующим окончательным формированием резьбы после термообработки с помощью резбошлифования или лезвийной обработки инструментом из сверхтвердых материалов. После формирования резьбы для повышения стойкости целесообразно проводить упрочняющую обработку ППД – дробеструйную, выглаживание, иглофрезами и т.д. [9]. Однако технологические параметры подобной комбинированной обработки (режимы, распределение припуска между резбообразующими операциями и т.д.) в настоящее время еще практически не исследованы, что сдерживает ее практическое применение.

Основными факторами, влияющими на нагруженность витков резбокатного инструмента являются:

- 1) Размеры накатываемой резьбы.
- 2) Механические свойства материала заготовки.
- 3) Геометрические размеры заготовки (диаметр, величина фаски).
- 4) Режимы накатывания.
- 5) Схема протекания пластической деформации.
- 6) Равномерность распределения нагрузки на инструмент на всех этапах формирования профиля резьбы.
- 7) Точность и жесткость резбокатного оборудования.

При условии соблюдения существующих рекомендаций по размерам заготовки, режимам накатывания,

точности и жесткости резбокатного оборудования, дальнейшего повышения стойкости резбокатного инструмента можно добиться совершенствованием схемы пластического деформирования и достижением равномерного распределения нагрузки на инструмент на всех этапах формирования профиля резьбы. Перспективы совершенствования схемы пластической деформации рассмотрены ниже.

Добиться равномерного распределения нагрузки на инструмент на всех этапах формирования профиля резьбы можно путем кинематической адаптации мгновенной площади пятна контакта инструмента и заготовки (МПК) [1]. Для инструмента, имеющего заборную и калибрующую части (ролики для накатывания с осевой подачей, бесстружечные метчики, плоские плашки, затылованные ролики), кинематическая адаптация МПК может быть достигнута путем соответствующего профилирования заборной части. При этом, для обеспечения необходимой равномерности нагружения всех витков, должна учитываться и погрешность изготовления резбокатного инструмента путем назначения соответствующих полей допусков. Для резбокатных роликов, работающих с радиальной подачей, кинематическая адаптация МПК может быть достигнута путем задания соответствующего закона радиальной подачи инструмента.

Основными факторами, влияющими на условия трения инструмента и заготовки, являются:

- 1) Форма и геометрические размеры контактирующих поверхностей.
- 2) Химический состав и структура контактирующих поверхностей.
- 3) Шероховатость витков резьбы инструмента и поверхности заготовки.
- 4) Скорость накатывания.
- 5) Применяемая СОЖ.

Основные пути повышения стойкости резбокатного инструмента за счет снижения сил трения между инструментом и заготовкой лежат в направлении применения новых СОЖ с поверхностно активными веществами.

Значительная глубина упрочнения при резбокатывании может быть достигнута применением динамических способов упрочнения и формообразования пластическим деформированием, в частности нового перспективного способа обработки пластическим деформированием: статико-импульсной обработки.

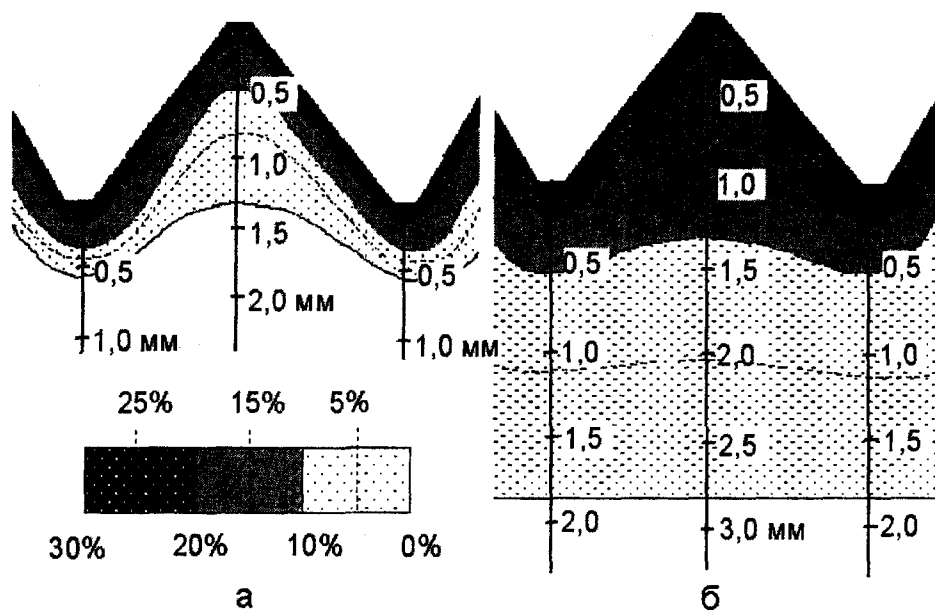


Рис. 2. – Степень упрочнения поверхностного слоя витков резьбы ($S = 2,5$ мм):
 а – накатанной аксиальной резьбонакатной головкой; б – полученной СИО

Статико-импульсная обработка (СИО) [2] производится при постоянном статическом и периодическом динамическом воздействии инструмента на обрабатываемую поверхность. Ударное нагружение позволяет создать большие напряжения в пятне контакта инструмента с заготовкой при сравнительно небольшой затраченной мощности. Предварительное статическое нагружение способствует более эффективной передаче энергии импульса в обрабатываемую среду. Возможность формирования импульсов заданной формы позволяет регулировать степень упрочнения и глубину упрочненного слоя в широких пределах. Максимальная степень упрочнения при СИО может достигать более 100 %, а глубина упрочненного слоя 8...10 мм и более [2]. При использовании для СИО гидравлического генератора механических импульсов [2] при частоте ударов до 40 Гц энергия удара может достигать 400 Дж, что достаточно для формирования крупных резьбовых профилей (шагом более 5 мм) даже в труднообрабатываемых высоколегированных сталях. Сравнение микротвердости резьбовых профилей, полученных накатыванием 3-х роликовой аксиальной резьбонакатной головкой и СИО (рис. 2) [8] показывает, что глубина упрочненного слоя при СИО в 3...4 раза выше, чем при традиционном накатывании. СИО могут подвергаться как наружные, так и внутренние резьбы.

Сравнение эксплуатационных характеристик резьб, полученных традиционным накатыванием и СИО, показывает, что резьбы, полученные СИО, имеют в 1,7 раз большую контактную усталостную

прочность [3] и в 1,3 раза большую объемную усталостную прочность [9].

Совершенствование схемы деформации при резьбонакатывании является серьезной научной проблемой. В настоящее время напряженно-деформированное состояние при резьбонакатывании изучено еще недостаточно. Исследования проводились, как правило, для плоского деформированного состояния в осевом сечении заготовки методом линий скольжения [4]. При этом схема процесса сводилась к внедрению пуансона в плоскую поверхность. Упрочнение металла при пластическом деформировании не учитывалось. Такие допущения позволяют лишь приблизительно оценивать максимальную степень деформации и силы, возникающие при накатывании резьб. Рекомендации по схеме деформации, которые при этом даются, носят самый общий характер, например, рекомендуется выполнять вершины витков резьбы на инструменте закругленными, чтобы избежать образования застойных зон [4].

Для дальнейшего усовершенствования схемы деформации необходимо определить форму и размеры очага деформации, тензор скоростей деформации и степень деформации во всех участках резьбового профиля на всех этапах его формирования. Решение подобной задачи аналитическим способом, например, с использованием теории пластического течения, представляется весьма затруднительным в связи со сложностью процесса пластической деформации при резьбонакатывании. В настоящее время подобная задача окончательно не решена даже для более простого случая обработки ППД роликом цилиндри-

ческой заготовки [7]. В связи с этим наиболее перспективным представляется использование для исследования напряженно-деформированного состояния при резбонакатывании численных методов, например получившего в последнее время широкое распространение метода конечных элементов, с последующей проверкой полученных результатов экспериментальным путем.

Определение скоростей пластического течения металла и накопленной степени деформации (и, следовательно, степени упрочнения) на разных этапах формирования резьбового профиля позволит выбирать более рациональные схемы деформирования, например за счет изменения геометрии заборной части резбонакатного инструмента (для роликов аксиальных резбонакатных головок, бесстружечных метчиков, плоских плашек и т.д.); выбора рационального закона радиальной подачи (для роликов станков с радиальной подачей, затылованных роликов и т.д.); подбора распределения припуска при накатывании за несколько проходов (для накатывания крупных резьб) и при накатывании по предварительно нарезанному профилю (для накатывания резьб на заготовках из малопластичных материалов).

Повысить пластичность металла при деформировании можно наложением на деформирующий инструмент ультразвуковых колебаний различной направленности (радиальных, осевых или крутильных). При воздействии ультразвука в поверхностных слоях металла увеличивается подвижность дислокаций в кристаллических зернах, что способствует более интенсивному течению пластической деформации.

Уменьшение накопленной погрешности шага при накатывании длинных резьб с осевой подачей может быть достигнуто применением адаптивных резбонакатных устройств, позволяющих автоматически корректировать шаг накатываемой резьбы в процессе резбоформообразования. Существующие в настоящее время адаптивные устройства (например, [5]) пока не нашли широкого применения, в частности из-за сложности своей конструкции. Однако в дальнейшем очевидно подобные конструкции будут применяться более широко.

Важным направлением совершенствования резбонакатывания является применение резбонакатных станков с числовым программным управлением. Использование интерактивных систем адаптивного числового управления позволит эффектив-

но управлять процессом формирования резьбы с целью решения перечисленных выше проблем.

Таким образом, резбонакатывание имеет значительные перспективы дальнейшего развития с целью расширения области своего применения для обработки внутренних резьб, тяжело нагруженных ходовых и крепежных резьб, резьб на заготовках из труднообрабатываемых материалов, повышения точности накатываемых резьб.

Литература:

1. Киричек А. В. Расчет профиля заборной части резбонакатного инструмента / А.В. Киричек, И.Б. Кульков, А.Н. Афонин // СТИН, 2000 №8. С.20-25.
2. Киричек А. В. Статико-импульсная обработка и оснастка для ее реализации / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев // СТИН, 1999. №6. С.20-24.
3. Контактная усталостная прочность резьбовых профилей, полученных различными методами. / А.В. Киричек, А.Н. Афонин, И.Б. Кульков, А.Н. Швецов, А.В. Пятунин – Сб. трудов 4-й междунар. научно-техн. конф. «Качество машин». Т.2. Брянск: БГТУ, 2001. С.152-154.
4. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев. / В.В. Лапин, М.И. Писаревский, В.В. Самсонов, Ю.И. Сизов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 228 с.
5. Патент № 2098213 (РФ). Резбонакатная головка / А.В. Киричек, И.Б. Кульков. Бюл., 1997, № 34.
6. Проскураков Ю. Г. Раскатывание внутренних резьб бесстружечными метчиками. / Ю.Г. Проскураков, В.А. Кохановский. Ростов: Изд-во ростовского университета, 1980. 104 с.
7. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
8. Сравнение твердости резьбовых профилей, полученных пластическим деформированием различными методами. / Д.В. Бушенин, А.В. Киричек, А.Н. Афонин, И.Б. Кульков // Вестник машиностроения, 1999. №10. С.40-43.
9. Усталостная прочность деталей, имеющих концентратор напряжений, сформированный различными способами. / А.В. Киричек, А.Н. Афонин, И.Б. Кульков, А.Н. Зайцев. Сб. материалов IV научно-практич. конф. «Современные технологии в машиностроении» Пенза: «Приволжский дом знаний», 2001. С.72-74.
10. Якухин В. Г. Оптимальная технология изготовления резьб. М.: Машиностроение, 1985. 184 с.

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ

УДК 62-181.001.24

Канд. техн. наук, доцент В. Ф. Начвай
(Орловский государственный институт экономики и торговли)
г. Орёл, тел. (0862)95066

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ СБОРОЧНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ (СРЦ) МЕТОДОМ ПРИГОНКИ

The essence of a method of adjustment consists that on all non-standard parts SRTS economically comprehensible admissions establish, and the set accuracy of a closing link is provided due to change of the size of the equaliser by removal from him of an allowance.

В статье [1] В. Н. Емельянов усовершенствовал изложенную в [2] методику расчёта СРЦ методом пригонки. Однако и предложенная В.Н. Емельяновым методика не является рациональной и универсальной. К недостаткам известных методик относятся следующее:

- расчёт СРЦ методом пригонки приводится только на основе метода «макс-мин», в то время как метод пригонки используют, как правило, для многозвенных СРЦ, для которых более адекватным является вероятностный расчёт, объективнее раскрывающий размерные связи при сборке узлов машин;

- не рассмотрены возможные схемы перекрытия поля допуска замыкающего звена, заданного конструктором TA_{Δ}^K , и поля рассеивания замыкающего звена СРЦ $\omega A_{\Delta} = TA_{\Delta}$, которое имеет место быть при установленных экономически приемлемых допусках на все нестандартные звенья СРЦ;

- не рассмотрены вопросы организации сборки узлов методом пригонки, в частности, не устанавливают какой припуск нужно снимать с конкретного компенсатора или какой размер компенсатора должен быть для измеренного разрыва цепи конкретного узла.

К общим недостаткам методик расчёта СРЦ является отсутствие единой символики расчётных параметров, что затрудняет подбор идентификаторов при расчёте на ПЭВМ.

В основу предлагаемой автором универсальной методики решения СРЦ методом пригонки положена рациональная схема перекрытия TA_{Δ}^K и $\omega A_{\Delta} = TA_{\Delta}$ (рис.1, б), позволяющая рассчитывать зоны разрывов цепи U_1 ; U_2 ; U_3 и для каждой зоны – размеры компенсатора, что обеспечивает получение наибольшего процента количества узлов, собираемых без пригонок компенсатора, и наименьшие припуски, подлежащие снятию с компенсатора, для узлов, собираемых с пригонкой компенсатора.

Приведенные в табл. 1 зависимости приняты для закона нормального распределения, методика же мо-

жет быть использована и для других законов распределения вероятностей. Из-за ограниченности объёма статьи рассмотрены уравнения СРЦ только с параллельными звеньями, т.е. для передаточных отношений $\varepsilon = \pm 1$, для случая, когда компенсатор является уменьшающим звеном. Расчёт в данной статье проведён только на основе метода «макс-мин».

Универсальная методика, в том числе и на основе вероятностного расчёта, апробирована автором статьи в течение многих лет преподавания курса «Технология машиностроения» и при решении практических задач по обеспечению точности аксиально-плунжерного насоса НП-90 [3].

Рекомендуется следующая последовательность решения СРЦ методом пригонки (табл. 1):

1. Исходя из сборочного чертежа и поставленной задачи по обеспечению точности исходно-замыкающего звена A_{Δ}^K , выявляют (графически и аналитически) наикратчайшее уравнение номиналов СРЦ (рис. 2). При выявлении наикратчайшей СРЦ необходимо руководствоваться следующими правилами:

- а) вначале выявляют СРЦ графически. Для получения наикратчайшей СРЦ необходимо, чтобы от каждой детали, входящей в сборку и участвующей в решении поставленной задачи, входило по одному размеру;

- б) для графически выявленной СРЦ записывают уравнение номиналов СРЦ вначале в исходной форме (1);

- в) записывают уравнение СРЦ в форме замыкающего звена A_{Δ} , группируя в начале уравнения увеличивающие звенья (звенья со знаком «плюс»), а затем – уменьшающие (звенья со знаком «минус») (2). Группирование рекомендуется выполнять для упрощения расчётов.

2. Выбирают компенсатор из наиболее простых звеньев СРЦ. В случае отсутствия таковых, в сборку вводят специальную деталь-компенсатор. Устанавливают, к какой группе звеньев (увеличивающих или уменьшающих) относится компенсатор.

3. Устанавливают номинальные размеры на все нестандартные составляющие звенья, кроме компенсатора. Размеры устанавливают по сборочному чертежу в соответствии с его масштабом, либо по рабочим чертежам деталей, если они имеются. Номинальные размеры и допуски (отклонения) стан-

дартных звеньев находят по соответствующим стандартам.

4. Находят номинальное значение компенсатора A_K из уравнения (2) по формуле (3) (табл. 1).

5. Назначают экономически приемлемые стандартные допуски и отклонения на все нестандарт-

1. Последовательность решения СРЦ методом пригонки на основе расчёта методом «макс-мин», если компенсатор уменьшающее звено

Уравнения, используемые для расчёта	
по схеме "а" (рис. 1, а)	по схеме "б" (рис. 1, б)
1. $\sum_1^n A_i - \sum_{n+1}^{m-1} A_i - A_\Delta = 0$	(1)
2. $A_\Delta = \sum_1^n A_i - \sum_{n+1}^{m-1} A_i$	(2)
3. $A_K = \sum_1^n A_i - \sum_{n+1}^{m-2} A_i - A_\Delta = Y - A_\Delta$	(3)
4. $A_\Delta = Y - A_K$	(4)
5. $Y = \sum_1^n A_i - \sum_{n+1}^{m-2} A_i = A_\Delta + A_K$	(5)
6. $\Delta Y = \sum_1^n \Delta A_i - \sum_{n+1}^{m-2} \Delta A_i = \Delta A_\Delta + \Delta A_K$	(6)
7. $T_Y = \sum_{n+1}^{m-2} T A_i$	(7)
8. $\frac{B}{H} Y = \Delta Y \pm T_Y/2$	(8)
9. $T A_\Delta = \sum_1^{m-1} T A_i = T_Y + T A_K$	(9)
10. $\delta_{КНБ} = T A_\Delta - T A_\Delta^K$	(10, а)
11. $\Delta A_\Delta = \Delta A_\Delta^K - 0,5 \delta_{КНБ}$	(11, а)
12. $\Delta A_K = \Delta Y - \Delta A_\Delta^K + 0,5 \delta_{КНБ}$	(12, а)
10. $\delta_{КНБ} = 0,5(T A_\Delta - T A_\Delta^K)$	(10, б)
11. $\Delta A_\Delta = \Delta A_\Delta^K$	(11, б)
12. $\Delta A_K = \Delta Y - \Delta A_\Delta^K$	(12, б)
13. $\frac{B}{H} A_K = \Delta A_K \pm T A_K/2$	
14. $Y_1 = A_\Delta^K + A_K$	(14, а)
15. $B Y_2 = H Y_1; H Y_2 = H Y$	(15, а)
16. $F_2 = 0,5 - \Phi(Z = X/\sigma)$	(16, а)
17. $X = 0,5 T A_\Delta - T A_\Delta^K$	(17, а)
14. $Y_2 = A_\Delta^K + A_K$	(14, б)
15. $H Y_1 = B Y_2; B Y_1 = B Y;$	(15, б)
16. $F_2 = 2 \Phi(Z = X/\sigma)$	(16, б)
17. $X = T A_\Delta^K/2$	(17, б)
18. $\sigma = T A_\Delta/6 = \omega A_\Delta/6$	
19. $F_1 = 100 - F_2$	(19, а)
19. $F_1 = F_3 = (100 - F_2)/2$	(19, б)
Проверка правильности решения СРЦ	
20. $A_\Delta = Y_1 - A_K = A_\Delta^K$	20. $A_\Delta = Y_2 - A_K = A_\Delta^K$
21. $\Delta A_\Delta = \Delta Y_1 - \Delta A_K = \Delta A_\Delta^K$	21. $\Delta A_\Delta = \Delta Y_2 - \Delta A_K = \Delta A_\Delta^K$
22. $B A_\Delta = B Y_1 - H A_K = B A_\Delta^K$	22. $B A_\Delta = B Y_2 - H A_K = B A_\Delta^K$
$H A_\Delta = H Y_1 - B A_K = H A_\Delta^K$	$H A_\Delta = H Y_2 - B A_K = H A_\Delta^K$
23. $\delta_{КНБ} = H A_\Delta^K - H A_\Delta = T A_\Delta - T A_\Delta^K$	23. $\delta_{КНБ} = H A_\Delta^K - H A_\Delta = 0,5(T A_\Delta - T A_\Delta^K)$

ные составляющие звенья в зависимости от их характера (охватывающие, охватываемые, прочие). На компенсатор устанавливают только экономически приемлемый допуск TA_K .

6. Находят параметры разрыва цепи $У$:

- номинальное значение $У(5)$;
- координату середины поля допуска $\Delta У(6)$;
- допуск разрыва цепи $ТУ(7)$;
- верхнее $ВУ$ и нижнее $НУ$ отклонения $У(8)$.

7. Находят допуск замыкающего звена TA_{Δ} , который имеет место быть при установленных экономически приемлемых допусках на все составляющие звенья, включая компенсатор (9).

8. Находят максимальную величину компенсации $\delta_{КНБ}$, т.е. максимальную величину припуска, который может быть снят с компенсатора при его пригонке, по формуле (10, а), если использовать схему перекрытия, показанную на рис. 1, а, и по формуле (10, б), если использовать схему, показанную на рис. 1, б.

9. Находят параметры компенсатора A_K : ΔA_K ; BA_K ; HA_K (номинальное значение A_K и допуск на компенсатор TA_K установлены в п. 4 и п. 5). Это наиболее важный этап в решении СРЦ. Установление размера компенсатора предопределяет величину снимаемого с него припуска, следовательно, трудоёмкость пригоночных работ, а также процентное количество узлов, собираемых без пригонки компенсатора. Расчёт требуемого размера компенсатора зависит от:

- принятой схемы перекрытия TA_{Δ}^K и ωA_{Δ} (рис. 1);
- того, какой метод («мак-мин» или вероятностный) положен в основу расчёта СРЦ.

Для схемы перекрытия, используемой в известных методиках (рис. 1, а) [1, 2] при расчётах СРЦ методом пригонки, исходным условием является $BA_{\Delta} = BA_{\Delta}^K$ или через координаты середин полей допусков:

$$\Delta A_{\Delta} + TA_{\Delta} / 2 = \Delta A_{\Delta}^K + TA_{\Delta}^K / 2.$$

Используя формулу (10, а), находят ΔA_{Δ} (11, а), подставляя ΔA_{Δ} в усечённую формулу (6), получим:

$$\Delta У = \Delta A_{\Delta}^K - 0,5 \delta_{КНБ} + \Delta A_K,$$

откуда следует, что:

$$\Delta A_K = \Delta У - \Delta A_{\Delta}^K + 0,5 \delta_{КНБ}. \quad (12, а)$$

Зная ΔA_K , находят предельные отклонения компенсатора по формуле (13).

Для предлагаемой схемы перекрытия (рис. 1, б) исходным условием является $\Delta A_{\Delta} = \Delta A_{\Delta}^K$. Под-

ставляя значение ΔA_{Δ} в усечённое уравнение (6) получим:

$$\Delta У = \Delta A_{\Delta}^K + \Delta A_K,$$

откуда найдём $\Delta A_K = \Delta У - \Delta A_{\Delta}^K$ (12, б).

Найдя ΔA_K и зная TA_K , находят предельные отклонения компенсатора по формуле (13).

10. Находят зоны разрыва цепи: $У_1$ и $У_2$ для схемы, показанной на рис. 1, а, по формулам (14, а) и (15, а), а для предлагаемой схемы (рис. 1, б) находим $У_2$ по формуле (14, б). Предельные отклонения зон $У_1$ и $У_3$ находим по формулам (15, б).

11. Находят процентное соотношение количества узлов, собираемых без пригонки компенсатора (площадь F_2) и с пригонкой (площадь F_1 для схемы на рис. 1, а и площади F_2 и F_3 для схемы на рис. 1, б), соответственно, по формулам (16, а), (19, а) и (16, б), (19, б).

Для закона нормального распределения вероятностей, как видно из рис. 1, предлагаемая схема перекрытия TA_{Δ}^K и ωA_{Δ} (рис. 1, б) рациональнее по сравнению с известной схемой (рис. 1, а), т.к. обеспечивает значительно большее процентное количество узлов, собираемых без пригонки (площадь F_2 на рис. 1, б).

12. Проверка правильности решения СРЦ методом пригонки сводится к удовлетворению уравнений:

- СРЦ (номиналов, координат середин полей допусков, предельных отклонений) для зоны F_2 , для которой точность сборки обеспечивается без пригонки компенсатора, т.е. автоматически (рис. 1);
- максимальных величин компенсаций, которые не должны превышать расчётной величины $\delta_{КНБ}$.

Организация сборки узлов методом пригонки

К недостаткам метода пригонки относится то, что величина компенсации δ_K в зонах, где нет перекрытия допусков (зоны F_1 и F_3 на рис. 1), меняется в пределах от 0 до $\delta_{КНБ}$. Для упрощения организации сборки узлов методом пригонки предлагается следующая последовательность выполнения переходов:

- 1) собирают узел без установки компенсатора;
- 2) замеряют разрыв цепи $У_{ИЗМ}$ и устанавливают к какой зоне расчётных разрывов цепи ($У_1$; $У_2$; $У_3$) $У_{ИЗМ}$ относится. Если $У_{ИЗМ}$ будет соответствовать разрыву цепи $У_1$ (табл. 2, рис. 1, а) или $У_2$ (табл. 2, рис. 1, б), то точность сборки узла при установке компенсатора A_K будет обеспечиваться автоматически, т.е. без пригонки компенсатора;

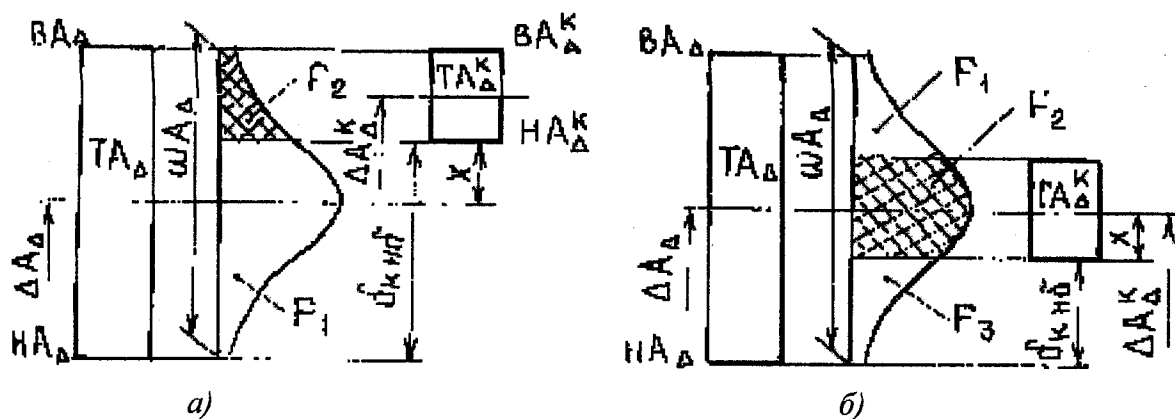


Рис. 1. – Схема перекрытия поля рассеивания замыкающего звена ωA_Δ и поля допуска TA_Δ^K замыкающего звена, заданного конструктором:
а – известная схема; б – предлагаемая схема

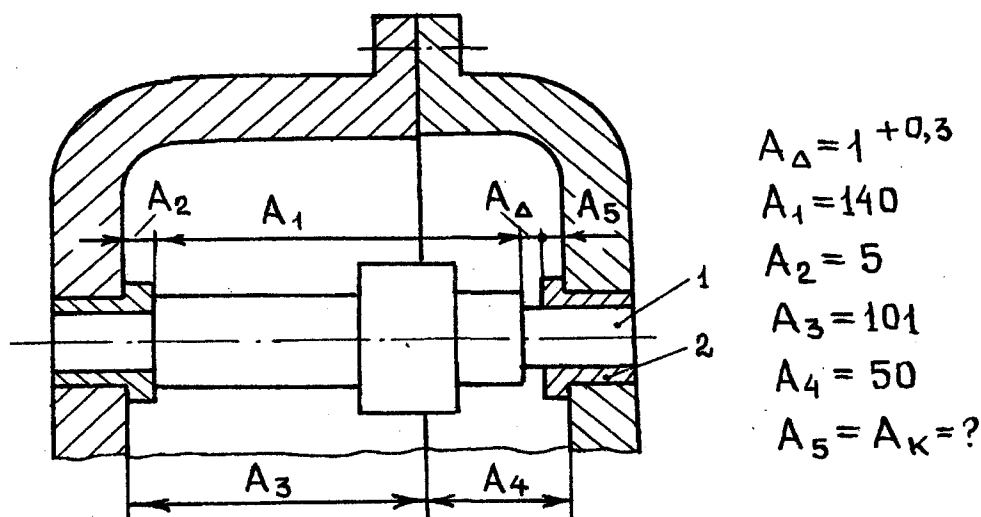


Рис. 2. – Эскиз узла для решения СРЦ методом пригонки

3) если $U_{ИЗМ}$ попадает в зоны, для которых требуется пригонка компенсатора, то находят требуемый размер компенсатора $A_{КТР}$, исходя из условия обеспечения требуемого размера замыкающего звена в пределах установленного конструктором допуска, например, $A_{\Delta}^{КСР}$:

$$A_{\Delta}^{КСР} = U_{ИЗМ} - A_{КТР},$$

откуда находят требуемый размер компенсатора $A_{КТР}$:

$$A_{КТР} = U_{ИЗМ} - A_{\Delta}^{КСР}.$$

Измерив размер конкретного компенсатора $A_{КИЗМ}$, находят припуск ZA_K , который необходимо снять с компенсатора для обеспечения точности замыкающего звена:

$$ZA_K = A_{КИЗМ} - A_{КТР}$$

Величина ZA_K должна находиться в пределах от 0 до $\delta_{КНБ}$;

4) выполнив размер компенсатора $A_{КТР}$, или сняв с компенсатора припуск ZA_K , данный компенсатор устанавливают в узел с измеренным значением $U_{ИЗМ}$, при этом точность замыкающего звена должна быть обеспечена автоматически.

Пример решения СРЦ методом пригонки на основе расчётов методом «макс-мин»

Решим задачу, предложенную в статье [1], двумя способами: по известной схеме перекрытия (рис. 1, а) и предлагаемой (рис. 1, б).

Для выполнения служебного назначения узла необходимо обеспечить зазор (замыкающее звено СРЦ) $A_\Delta = 1^{+0,3}$ между торцами валика 1 и втулки 2 (рис. 2).

1. В соответствии с поставленной задачей выявляем графически и аналитически уравнение номиналов СРЦ в исходной форме (рис. 2):

$$A_{\Delta} + A_5 - A_4 - A_3 + A_2 + A_1 = 0, \quad (1)$$

а потом – в форме замыкающего звена, группируя в начале уравнения увеличивающие звенья, а затем – уменьшающие:

$$A_{\Delta} = A_4 + A_3 - A_5 - A_2 - A_1. \quad (2)$$

2. Выбираем звено-компенсатор $A_5 = A_K$ – толщину буртика втулки 2 (рис. 2), относящееся к группе уменьшающих звеньев.

3. Устанавливаем номинальные размеры на все составляющие звенья, кроме компенсатора. Для рассматриваемого примера и заданной точности замыкающего звена $A_{\Delta}^K = 1^{+0,3}$ примем: $A_1 = 140$; $A_2 = 5$; $A_3 = 101$; $A_4 = 50$.

4. Из уравнения номиналов (2) находим номинальное значение компенсатора A_K :

$$A_K = A_4 + A_3 - A_2 - A_1 - A_{\Delta} = 50 + 101 - 5 - 140 - 1 = 5, A_K = 5. \quad (3)$$

5. На все нестандартные звенья СРЦ устанавливаем экономически приемлемые допуски и предельные отклонения. На компенсатор устанавливаем только экономически приемлемый допуск. Примем значения звеньев из примера [1]:

$$A_1 = 140 \text{ d}11 \left(\begin{smallmatrix} -0,145 \\ -0,395 \end{smallmatrix} \right), \quad A_2 = 5 \text{ d}11 \left(\begin{smallmatrix} -0,030 \\ -0,105 \end{smallmatrix} \right),$$

$$A_3 = 101 \text{ J}_5 (\pm 0,11), \quad A_4 = 50 \text{ h}11 (-0,16),$$

$$TA_K (11 \text{ кв}) = 0,075.$$

6. Определяем параметры разрыва цепи (Y ; ΔY ; TU ; VU ; HU):

$$Y = A_4 + A_3 - A_2 - A_1 = 50 + 101 - 5 - 140 = 6, \quad (5)$$

$$\Delta Y = \Delta A_4 + \Delta A_3 - \Delta A_2 - \Delta A_1 = (-0,08) + 0 - (-0,0675) - (-0,27) = 0,2575, \quad (6)$$

$$TU = TA_4 + TA_3 + TA_2 + TA_1 = 0,16 + 0,22 + 0,075 + 0,25 = 0,705, \quad (7)$$

$$VU = \Delta Y + TU/2 = 0,2575 + 0,705/2 = +0,61, \quad (8)$$

$$HU = \Delta Y - TU/2 = 0,2575 - 0,705/2 = -0,095. \quad (8)$$

В принятой форме записи Y составит

$$Y = 6 \begin{smallmatrix} +0,61 \\ -0,095 \end{smallmatrix}.$$

7. Найдём допуск замыкающего звена TA_{Δ} при установленных экономически приемлемых допус-

ках на все составляющие звенья, включая компенсатор:

$$TA_{\Delta} = TA_4 + TA_3 + TA_K + TA_2 + TA_1 = 0,22 + 0,16 + 0,075 + 0,075 + 0,25 = 0,78, \quad (9)$$

или для усечённой формы уравнения СРЦ:

$$TA_{\Delta} = TV + TA_K = 0,705 + 0,075 = 0,78. \quad (9)$$

8. Найдём наибольшую величину компенсации

$\delta_{КНБ}$:

для схемы на рис. 1, а

$$\delta_{КНБ} = TA_{\Delta} - TA_{\Delta}^K = 0,78 - 0,3 = 0,48, \quad (10, а)$$

для схемы на рис. 1, б

$$\delta_{КНБ} = 0,5 (TA_{\Delta} - TA_{\Delta}^K) = 0,5 (0,78 - 0,3) = 0,24. \quad (10, б)$$

9. Находим значение компенсатора A_K для схемы на рис. 1, а по формулам (11, а; 12, а; 13):

$$\Delta A_K = \Delta Y - \Delta A_{\Delta}^K + 0,5 \delta_{КНБ} = 0,2575 - 0,15 + 0,5 * 0,48 = 0,3475, \quad (12, а)$$

$$BA_K = \Delta A_K + TA_K / 2 = 0,3475 + 0,075 / 2 = +0,385, \quad (13)$$

$$HA_K = \Delta A_K + TA_K / 2 = 0,3475 - 0,075 / 2 = +0,310, \quad (13)$$

$$A_K = 5 \begin{smallmatrix} +0,385 \\ +0,310 \end{smallmatrix}.$$

Найдём значения компенсатора A_K для предлагаемой схемы на рис. 1, б по формулам (11, б; 12, б; 13):

$$\Delta A_K = \Delta Y - \Delta A_{\Delta}^K = 0,2575 - 0,15 = 0,1075, \quad (12, б)$$

$$BA_K = \Delta A_K + TA_K / 2 = 0,1075 + 0,075 / 2 = +0,145, \quad (13)$$

$$HA_K = \Delta A_K + TA_K / 2 = 0,1075 - 0,075 / 2 = +0,07, \quad (13)$$

$$A_K = 5 \begin{smallmatrix} +0,145 \\ +0,07 \end{smallmatrix}.$$

10, а. Установим две зоны разрыва цепи Y_1 и Y_2 для схемы на рис. 1, а из усечённого уравнения (4) для A_{Δ}^K :

$$A_{\Delta}^K = Y_1 - A_K, \quad 1^{+0,3} = Y_1 \begin{smallmatrix} BY1 \\ HV1 \end{smallmatrix} - 5 \begin{smallmatrix} +0,385 \\ +0,31 \end{smallmatrix},$$

$$+0,3 = BY1 - 0,31, \quad BY1 = +0,61,$$

2. Расчётные параметры СРЦ $A_{\Delta} = A_1 + A_3 - A_1 - A_2 - A_K$ ($A_{\Delta} = Y - A_K$) при её решении методом пригонки на основе расчёта методом «макс-мин»

Параметры СРЦ	Квалитет	$\Delta A_i, \Delta Y$	TA_i
1. $A_{\Delta}^K = I^{+0,3}$	-	+0,15	0,3
2. $A_1 = 140 \begin{smallmatrix} -0,145 \\ -0,395 \end{smallmatrix}$	d 11	-0,27	0,25
3. $A_2 = 5 \begin{smallmatrix} -0,03 \\ -0,105 \end{smallmatrix}$	d 11	-0,0675	0,075
4. $A_3 = 101 \pm 0,11$	J _S 11	0	0,22
5. $A_4 = 50 \begin{smallmatrix} -0,16 \end{smallmatrix}$	h 11	-0,08	0,16
Решение при исходном условии $BA_{\Delta} = BA_{\Delta}^K$ (рис. 1, а)			
6. $A_5 = A_K = 5 \begin{smallmatrix} +0,385 \\ +0,310 \end{smallmatrix}$	11	+0,3475	0,075
7. $A_{\Delta} = I \begin{smallmatrix} +0,3 \\ -0,48 \end{smallmatrix}$			
8. $Y = 6 \begin{smallmatrix} +0,61 \\ -0,095 \end{smallmatrix}$	-	-0,09	0,78
9. $Y_1 = 6 \begin{smallmatrix} +0,61 \\ +0,385 \end{smallmatrix}$	-	+0,2575	0,705
10. $Y_2 = 6 \begin{smallmatrix} +0,385 \\ -0,095 \end{smallmatrix}$	-		
11. $\delta_K = 0 \dots 0,48$	-	+0,4975	0,225
12. $F_2 = 24,51 \%$	-	+0,145	0,48
13. $F_3 = 75,49 \%$	-	0,24	0,48
Решение при исходном условии $\Delta A_{\Delta} = \Delta A_{\Delta}^K$ (рис. 1, б)			
14. $A_5 = A_K = 5 \begin{smallmatrix} +0,145 \\ +0,076 \end{smallmatrix}$	11	+0,1077	0,075
15. $A_{\Delta} = I \begin{smallmatrix} +0,54 \\ -0,24 \end{smallmatrix}$			
16. $Y = 6 \begin{smallmatrix} +0,61 \\ -0,095 \end{smallmatrix}$	-	+0,15	0,78
17. $Y_1 = 6 \begin{smallmatrix} +0,61 \\ +0,37 \end{smallmatrix}$	-	+0,2575	0,705
18. $Y_2 = 6 \begin{smallmatrix} +0,37 \\ +0,145 \end{smallmatrix}$	-	+0,49	0,24
19. $Y_3 = 6 \begin{smallmatrix} +0,145 \\ -0,095 \end{smallmatrix}$	-		
20. $\delta_K = 0 \dots 0,24$	-	+0,2575	0,225
21. $F_2 = 74,98 \%$	-	+0,025	0,24
22. $F_3 = F_1 = 12,51 \%$	-	0,12	0,24

$$0 = NY_1 - 0,385, NY_1 = +0,385,$$

$$Y_1 = 6 \begin{smallmatrix} +0,61 \\ +0,385 \end{smallmatrix}$$

Для второй зоны разрыва цепи Y_2 найдём:

$$BY_2 = NY_1; NY_2 = NY,$$

тогда $Y_2 = 6 \begin{smallmatrix} +0,385 \\ -0,095 \end{smallmatrix}$

10, б. Установим три зоны разрыва цепи $Y_1; Y_2; Y_3$ для предлагаемой схемы на рис.1, б. Найдём Y_2 из уравнения (4) для A_{Δ}^K :

$$A_{\Delta}^K = Y_2 - A_K,$$

$$I + 0,3 = Y_2 \begin{smallmatrix} BY_2 \\ NY_2 \end{smallmatrix} - 5 \begin{smallmatrix} +0,145 \\ +0,07 \end{smallmatrix},$$

$$0,3 = BY_2 - 0,07, BY_2 = + 0,37,$$

$$0 = NY_2 - 0,145, NY_2 = + 0,145,$$

тогда $Y_2 = 6 \begin{matrix} +0,37 \\ +0,145 \end{matrix}$.

По известному $Y = 6 \begin{matrix} +0,61 \\ -0,095 \end{matrix}$ найдём Y_1 и Y_3 :

$$Y_1 = 6 \begin{matrix} +0,61 \\ +0,37 \end{matrix}, Y_3 = 6 \begin{matrix} +0,145 \\ -0,095 \end{matrix}.$$

11. Находим процентное количество узлов, собираемых без пригонки компенсатора по формуле (16, а) для схемы на рис. 1, а:

$$F_2 = 0,5 - \Phi(z),$$

для $Z = X/\sigma = 0,09/0,13 = 0,692$,

где $X = TA_{\Delta} / 2 - TA_{\Delta}^K = 0,78 / 2 - 0,3 = 0,09$ (рис. 1, а);

$$\sigma = TA_{\Delta} / 6 = 0,78 / 6 = 0,13.$$

По таблице функции Лапласа [4] для закона нормального распределения:

$$\Phi(z=0,692) = 0,2549,$$

тогда

$$F_2 = 0,5 - \Phi(z=0,692) = 0,5 - 0,2549 = 0,2451,$$

или в процентах $F_2 = 24,51\%$.

Процентное количество узлов, собираемых с пригонкой компенсатора, соответствующее площади F_1 , найдём по формуле (19, а):

$$F_1 = 0,5 + \Phi(z=0,692) = 100 - F_2 = 0,5 + 0,2549 = 0,7549,$$

или в процентах $F_1 = 75,49\%$.

Найдём процентное количество узлов, собираемых без пригонки компенсатора для предлагаемой схемы (рис. 1, б) по формуле (16, б)

$$F_2 = 2\Phi(z=1,15),$$

для $Z = X/\sigma = 0,15/0,13 = 1,15$,

где $X = TA_{\Delta}^K / 2 = 0,3 / 2 = 0,15$,

$$\sigma = TA_{\Delta} / 6 = 0,78 / 6 = 0,13.$$

Тогда

$$\Phi(z=1,15) = 0,3749, \\ F_2 = 2\Phi(z=1,15) = 2 * 0,3749 = 0,7498,$$

или в процентах $F_2 = 74,98\%$.

При одинаковых значениях и симметричном расположении F_1 и F_3 около F_2 процентное количество узлов в зонах F_1 и F_3 , в соответствии с формулой (19, б), составит:

$$(100 - F_2) / 2 = (100 - 74,98) / 2 = 12,51\%,$$

т.е. $F_1 = F_3 = 12,51\%$.

Решение СРЦ методом пригонки для наглядности и систематизации результатов рекомендуется представлять таблицей (табл. 2).

Г2. Проверка. Проверка при решении задачи на основе метода «макс-мин» сводится к удовлетворению уравнений СРЦ (номиналов, допусков, координат середин полей допусков, предельных отклонений) для зоны перекрытия допусков.

1. Для схемы на рис.1, а:

$$A_{\Delta} = Y_1 - A_K \\ I^{+0,3} = 6 \begin{matrix} +0,610 \\ +0,385 \end{matrix} - 5 \begin{matrix} +0,385 \\ +0,310 \end{matrix} = I \begin{matrix} +0,3 \\ 0 \end{matrix},$$

$$TA_{\Delta} = TV1 + TAK, \\ 0,3 = 0,225 + 0,075 = 0,3.$$

Все перечисленные уравнения удовлетворяются, следовательно, задача решена верно.

Установим величину компенсации для зоны Y_2 :

$$A_{\Delta} = Y_2 - A_K = 6 \begin{matrix} +0,385 \\ -0,095 \end{matrix} - 5 \begin{matrix} +0,385 \\ +0,310 \end{matrix} = I \begin{matrix} +0,075 \\ -0,48 \end{matrix}$$

$$A_{\Delta}^K = I^{+0,3}; A_{\Delta} = I \begin{matrix} +0,075 \\ -0,48 \end{matrix}.$$

Из сравнения A_{Δ}^K и A_{Δ} нетрудно установить, что значения необходимых компенсаций при пригонке компенсатора составят от 0 до 0,48 мм, что соответствует найденному при решении СРЦ значению δ_K .

2. Для схемы на рис.1, б

$$A_{\Delta} = Y_2 - A_K \\ I^{+0,3} = 6 \begin{matrix} +0,37 \\ +0,145 \end{matrix} - 5 \begin{matrix} +0,145 \\ +0,070 \end{matrix} = I + 0,3,$$

$$TA_{\Delta} = TV2 + TAK, \\ 0,3 = 0,225 + 0,075 = 0,3.$$

Уравнения удовлетворяются, следовательно, задача решена верно.

Установим величины компенсаций для зоны Y_3 .

$$A_{\Delta} = Y_3 - A_K = 6 \begin{matrix} +0,145 \\ -0,095 \end{matrix} - 5 \begin{matrix} +0,145 \\ +0,070 \end{matrix} = I \begin{matrix} +0,075 \\ -0,24 \end{matrix}$$

$$A_{\Delta}^K = I^{+0,3}; A_{\Delta} = I \begin{matrix} +0,075 \\ -0,24 \end{matrix}$$

Нетрудно установить, что величина компенсации δ_K также соответствует найденной при расчёте СРЦ и изменяется в установленных пределах от 0 до 0,24 мм.

Для зоны U_1 , для которой получается отрицательный припуск, используем компенсатор с найденным размером по схеме рис. 1, а, т.е. $A_K = 5 \begin{matrix} +0,385 \\ +0,310 \end{matrix}$,

$$A_{\Delta} = U_1 - A_K = 6 \begin{matrix} +0,61 \\ +0,37 \end{matrix} - 5 \begin{matrix} +0,385 \\ +0,310 \end{matrix} = 1 \begin{matrix} +0,3 \\ -0,015 \end{matrix}$$

$$A_{\Delta}^K = I^{+0,3}; A_{\Delta} = I \begin{matrix} +0,3 \\ -0,015 \end{matrix}$$

При сравнении A_{Δ}^K с A_{Δ} нетрудно установить, что для зоны U_1 максимальная величина компенсации составит всего лишь $\delta_{K \text{ нб}} = 0,015$ мм.

Выполненная проверка правильности решения СРЦ методом пригонки ещё раз показывает преимущество проведенного расчёта по предлагаемой схеме (рис. 1, б) по сравнению с общепринятой схемой (рис. 1, а).

Рассмотрим вопрос организации сборки для приведенного примера. При сборке узлов рассмотренным методом необходимо выполнить следующие переходы:

1) измеряем разрыв цепи $U_{\text{ИЗМ}}$, например, для схемы на рис. 1, б. Пусть он окажется в зоне U_3 и составит $U_{3 \text{ ИЗМ}} = 6,1$ мм;

2) измеряем размер компенсатора из партии изготовленных $A_K = 5 \begin{matrix} +0,145 \\ +0,070 \end{matrix}$, например, пусть он составит $A_{K \text{ ИЗМ}} = 5,12$ мм;

3) устанавливаем, какой размер замыкающего звена желательно получить, например, $A_{\Delta}^K = 1,15$;

4) пользуясь уравнением $A_{\Delta}^K = U - A_K$, найдём требуемый размер компенсатора $A_{K \text{ ТР}}$, $A_{\Delta}^K = U_{\text{ИЗМ}} - A_{K \text{ ТР}}$, $1,15 = 6,1 - A_{K \text{ ТР}}$, откуда $A_{K \text{ ТР}} = 6,1 - 1,15 = 4,95$ мм. Измеренное значение $A_{K \text{ ИЗМ}} = 5,12$ мм, следовательно, припуск, который потребуется снять с компенсатора, составит $Z_K = A_{K \text{ ИЗМ}} - A_{K \text{ ТР}} = 5,12 - 4,95 = 0,17$ мм;

5) сняв припуск $Z_K = 0,17$ мм с компенсатора размером $A_{K \text{ ИЗМ}} = 5,12$ мм и поставив компенсатор в сборочный узел с измеренным разрывом цепи $U_{\text{ИЗМ}} = 6,1$ мм, точность сборки должна обеспечиваться автоматически с зазором, равным $A_{\Delta} = 1,15$ мм.

Если при измерении разрыва цепи U его измеренное значение будет находиться в зоне U_1 для схемы на рис. 1, а или в зоне U_2 для схемы на рис. 1, б, то заданная конструктором точность замыкающего звена $A_{\Delta} = I^{+0,3}$ должна обеспечиваться автоматически при установке любого компенсатора из изготовленных в пределах расчётного допуска.

Таким образом, из сравнения примеров решения СРЦ методом пригонки при различных схемах перекрытия ωA_{Δ} и TA_{Δ}^K видно, что:

1) предлагаемая симметричная схема перекрытия является более рациональной с точки зрения уменьшения пригоночных работ при сборке узлов, поскольку позволяет увеличить процентное количество узлов, собираемых без каких-либо пригонок, с 24,51 % для принятой в известных методиках [1, 2] асимметричной схемы перекрытия, до 74,98 % для предлагаемой симметричной схемы перекрытия (табл. 2);

2) вторичный эффект по уменьшению пригоночных работ при сборке узлов, точность которых обеспечивается путём пригонки компенсатора, и процентное количество которых уменьшается с 75,49 % до 25,02 %, достигается за счёт уменьшения припусков δ_K , подлежащих снятию с компенсатора, в среднем вдвое, вследствие оптимизации расчётных размеров компенсатора для предлагаемой симметричной схемы перекрытия (табл. 2).

Литература:

1. Емельянов В.Н. Совершенствование методики расчёта размерных цепей методом пригонки / Вестник машиностроения, 1992. № 6-7. С.32-35.
2. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчёта линейных и угловых цепей. М.: Изд-во стандартов, 1987. 44 с.
3. Начвай В.Ф. Совершенствование конструкции и технологии производства аксиально-плунжерного насоса НП-90 на основе размерного анализа. Отчёт по НИР / КИСМ, рук. В.Ф. Начвай / № рег. 089.0031066, инв. № 02900045917, Кировоград, 1990. 328 с.
4. Гаврилов А.Н. Основы технологии приборостроения. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1976. 328 с.

ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Д-р техн. наук, проф. К. В. Подмастерьев,
канд. техн. наук, доц. В. В. Мишин,
асп. В. В. Марков
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, (0862)419876, e-mail: pms35@ostu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСЦЕНТРИЧНОСТИ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА НА СОСТОЯНИЕ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В ЗОНАХ ТРЕНИЯ

The results of theoretical researches of influence eccentricity the tracks of rolling the ring of the bearing on a condition a layer of lubricant in the zone of friction his elements is offered. The character of influence eccentricity is determine on a function of probability of destruction a layer of lubricant. The principles of receipt the information by control of eccentricity is offered.

Постановка задачи и теоретическая база исследования

Состояние смазочной пленки в зонах трения является одним из важнейших критериев технического состояния трибосопряжения, в частности его надежности и долговечности. Разработанная в [1] обобщенная модель вероятности разрушения смазочного слоя в зонах трения подшипника качения (вероятности микроконтактирования – P_k) указывает, что на состояние смазки в данном узле существенное влияние оказывают регулярные отклонения макрогеометрии рабочих поверхностей, в частности, отклонения от круглости дорожек качения колец.

Анализируя механизм этого влияния (схема взаимосвязей параметров применительно к одному из тел качения представлена на рис. 1), отметим, что отклонения от круглости дорожки качения $Q_{n(a)k}$ и $\varphi_{n(a)k}$ приводят, прежде всего, к изменению действительных значений радиуса кривизны $R_{n(a)i}$ траектории, по которой тело качения перемещается по кольцу:

$$R_{n(a)}(\varphi) = R_{n(a)0} + \sum_1^p Q_{n(a)k} \sin(k\varphi + \varphi_{n(a)k}), \quad (1)$$

где $R_{n(a)0}$ – средний радиус дорожки качения;

Q_k , φ_k – амплитуда и фазовый угол k -й гармоники отклонения;

k – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трехвершинную огранку и т.п.);

p – предельный номер учитываемой гармоники.

Указанные изменения непосредственно или опосредованно влияют на целый ряд определяющих P_k параметров, в частности: на сумму главных кривизн поверхностей в точке касания $\Sigma\rho_{n(a)i}$ и распределение нагрузки между телами качения $F_{n(a)i}$; на сближение поверхностей $\delta_{n(a)i}$; гидродинамическое давление $k_{0n(a)i}$; число микронеровностей в зоне контакта $n_{шн(a)i}$ и толщину смазочной пленки в зонах трения $h_{n(a)i}$; на вероятность микроконтактирования наружного P_{ni} , внутреннего P_{ni} колец с i -ым телом качения и вероятность микроконтактирования в подшипнике P_k .

С учетом установленной сложности и неоднозначности влияния регулярных макроотклонений рабочих поверхностей на параметр состояния смазочного слоя в зонах трения (P_k) возникла необходимость более детального изучения характера указанного влияния, что важно как для решения ряда фундаментальных проблем машиноведения, так и для решения задач синтеза диагностических параметров и алгоритмов диагностирования, обеспечивающих контроль реальной макрогеометрии рабочих поверхностей деталей подшипника при изготовлении и ремонте машин и механизмов.

Проведенные ранее исследования [2] показали, что наличие регулярных макроотклонений от круглости в виде овальности или огранки различного

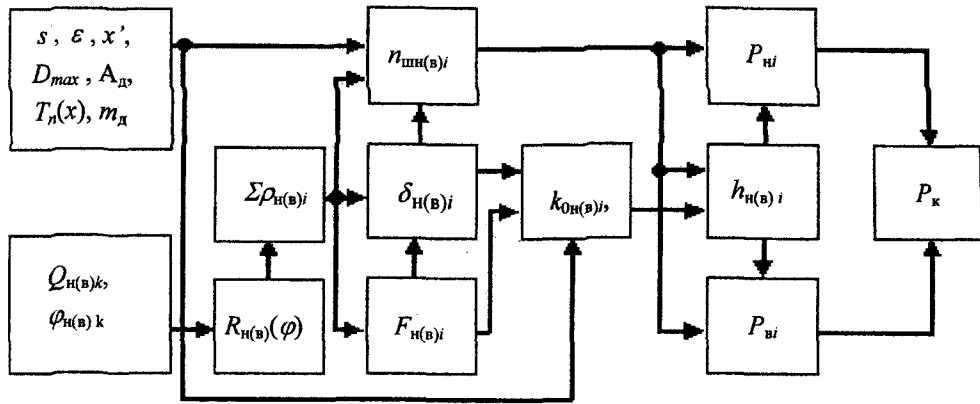


Рис. 1. – Схема влияния параметров регулярных макроотклонений и локальных дефектов поверхностей деталей подшипника на P_k

порядка приводят к характерной трансформации детерминированной составляющей функции вероятности микроконтактирования в подшипнике от угла поворота вращающегося кольца или сепаратора и, соответственно, времени. Это явление позволило разработать электрорезистивные методы контроля овальности и огранки, обеспечивающие идентификацию доминирующего вида, оценку ориентации и значений отклонений макрогеометрии дорожек качения обоих колец, как отдельного подшипника, так и опоры качения в условиях рабочего и тестового контроля [3].

В то же время, вопрос влияния эксцентricности дорожек качения колец подшипника на вероятность разрушения смазочной пленки в зонах трения его деталей до настоящего времени не изучен, что затрудняет решение задачи разработки методов и средств контроля этого весьма важного параметра технического состояния подшипника, влияющего на уровень его шума и вибрации, на интенсивность изнашивания рабочих поверхностей.

Настоящая работа посвящена теоретическим исследованиям влияния эксцентricности дорожек качения колец подшипника на процессы формирования и разрушения смазочной пленки в зонах трения его деталей.

Методика исследования

Для исследования указанных процессов в соответствии с обобщенной моделью вероятности микроконтактирования в подшипнике [1] и известными уравнениями его кинематики разработаны алгоритм и программа расчета P_k в зависимости от углового положения сепаратора ψ , позволяющие моделировать работу подшипника с отклонениями от круглости дорожек качения колец при вращении любого из них или обоих колец одновременно. Согласно алгоритму, для каждого из значений ψ (задается с требуемым шагом) рассчитываются поло-

жение вращающегося кольца $\varphi_{n(в)}$ и $R_{n(в)i}$, на основе которых определяются $F_{n(в)i}$, $h_{нi}$, $h_{ви}$, $n_{шн(в)i}$, $P_{н(в)i}$ и $P_k(\psi)$. При этом для равномерного вращения без учета проскальзывания функция $P_k(\psi)$ интерпретируется как функция времени $P_k(t)$ с масштабным коэффициентом при аргументе:

$$P_k(t) = P_k\left(\psi \frac{1}{\omega_c}\right) = P_k\left(\psi \frac{1}{\omega_{n(в)}k_{2(1)}}\right), \quad (2)$$

где $k_{2(1)}$ – конструктивные коэффициенты подшипника [4];

ω_c – угловая скорость вращения сепаратора.

Исследования проводились в три этапа. Первый этап заключался в исследовании характера функции вероятности микроконтактирования $P_k(\psi)$ для подшипника, дорожки качения колец которого не имеют регулярных макроотклонений (идеализированный случай). На втором этапе изучалось влияние на характер функции $P_k(\psi)$ эксцентricности дорожки качения местно нагруженного кольца, а на третьем этапе – влияние эксцентricности дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца. Эксцентricность исследуемого кольца моделировалась путем введения в выражение (1) расчетной модели отклонений от круглости его дорожки качения с параметрами $Q = Q_1$ и $\varphi = \varphi_1$ (первая гармоника).

В качестве объектов теоретических исследований использовались различные типы шариковых подшипников, в частности, подшипники 1000900, 113, 208 и 306 при различных режимах работы (скорость, нагрузка) и смазочных материалах различного состава. Характер полученных результатов оказался идентичным, что позволило в даль-

нейшем ограничиться примерами зависимостей только для подшипников типа 306.

Функция вероятности микроконтактирования в подшипнике при отсутствии регулярных макроотклонений дорожек качения колец

На рис. 2 представлены графики расчетных функций $P_k(\psi)$ при различных значениях радиальной нагрузки F_r для подшипника 306 без макроотклонений дорожек качения. Анализ показывает, что для подшипника с идеально круглыми дорожками качения и Z телами качения функция $P_k(\psi)$ имеет ярко выраженный периодический характер. Гармонический анализ кривых (рис. 3) подтверждает наличие в функции только одной информационной составляющей с частотой $\omega_c Z$, равной частоте

прохождения тел качения относительно вектора \bar{F}_r (коэффициент гармоник $Kg = 17,2\%$). Наличие этой составляющей объясняется периодическим попаданием очередного тела качения в зону наибольшего нагружения и соответствующим перераспределением нагрузки между телами качения.

Функция вероятности микроконтактирования в подшипнике при эксцентриситете дорожки качения местно нагруженного кольца

Местно нагруженное кольцо – это кольцо, по отношению к которому вектор нагружения в процессе работы подшипника не изменяет своего положения. В зависимости от схемы нагружения таким кольцом может быть внутреннее или наружное, вращающееся или неподвижное кольцо. Так, например, при неизменном направлении радиальной нагрузки по отношению к подшипнику, установленному на вращающемся валу и в неподвижном корпусе, местно нагруженным кольцом будет неподвижное наружное кольцо подшипника. Именно такой случай моделировался в данном исследовании.

На рис. 4 представлены фрагменты графиков типичных зависимостей $P_k(\psi)$, рассчитанных для подшипника 306 при $F_r = 3000$ Н и фиксированных, монотонно возрастающих значениях эксцентриситета дорожки качения наружного кольца от 0 до 30 мкм. При этом зависимости исследовались при различных углах (ϕ) между направлениями векторов радиальной нагрузки и эксцентриситета кольца.

Установлено, что наличие эксцентриситета и увеличение ее значения приводят к незначительному монотонному изменению постоянной составляющей $P_{k\text{ ср}}$ функции $P_k(\psi)$, не вызывая каких-либо характерных изменений ее переменной составляющей (спектральный состав функции практически не изменяется). При этом выявлено, что характер влияния Q на постоянную составляющую $P_{k\text{ ср}}$ зависит от направления действия \bar{F}_r по отношению к эксцентриситету местно нагруженного кольца (от угла ϕ). При $\phi = \pi$ с ростом Q значение $P_{k\text{ ср}}$ также монотонно возрастает, а при $\phi = 0$ имеет место характерный минимум $P_{k\text{ ср}}$, что свидетельствует о благоприятном влиянии таких отклонений макрогеометрии на состояние подшипника.

На основе установленного вида зависимостей $P_{k\text{ ср}}(Q)$ для рассмотренных значений ϕ выдвинута гипотеза о периодичности функции $P_{k\text{ ср}}(\phi)$ при $Q = \text{const}$. Вид и результаты гармонического анализа полученной теоретической зависимости $P_{k\text{ ср}}(\phi)$ для эксцентриситета при $Q = 30$ мкм (рис. 5, 6) однозначно подтверждают эту гипотезу. Полученная зависимость $P_{k\text{ ср}}(\phi)$ имеет практически только одну информационную составляющую, характерную для исследуемого вида макроотклонений дорожки качения – это первая гармоника.

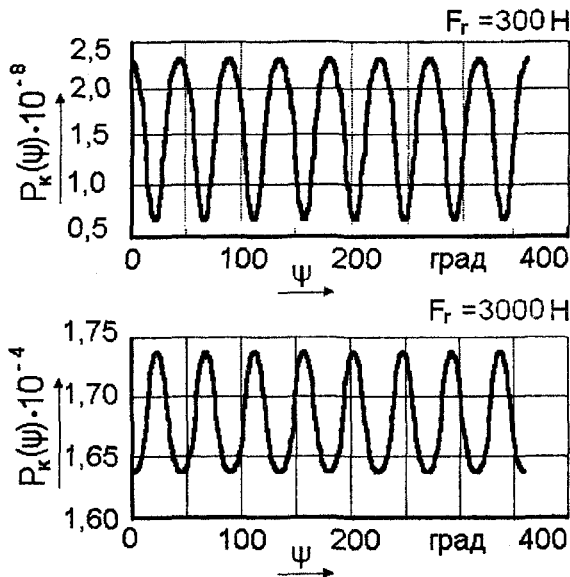


Рис. 2. – Расчетные функции $P_k(\psi)$

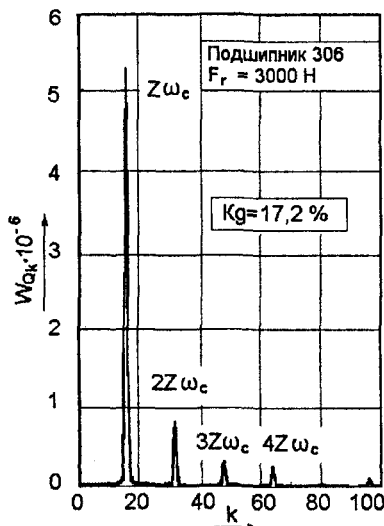


Рис. 3. – Результаты гармонического анализа функции $P_k(\psi)$

Характерно, что полученный результат хорошо согласуется с ранее проведенными аналогичными исследованиями для овальности и огранки [2], что свидетельствует о возможности формулирования обобщенного вывода о том, что регулярные макроотклонения дорожки качения местно нагруженного кольца формируют функцию $P_{кр}(\phi)$, содержащую практически только одну информационную составляющую, характерную для вида макроотклонения дорожки качения (для эксцентricности первая гармоника, для овальности – вторая, а для трехвершинной огранки – третья). При этом фаза характерной гармоники несет информацию об ориентации соответствующего ей вида отклонения относительно вектора радиальной нагрузки.

Установленный эффект влияния регулярных отклонений от круглости дорожки качения местно нагруженного кольца на функцию $P_{кр}(\phi)$ составляет основу принципа выделения информации о виде и ориентации доминирующего макроотклонения соответствующих дорожек качения. Для реализации на его базе метода диагностирования необходимо получить функцию $P_{кр}(\phi)$ и на основе ее гармонического анализа определить амплитуды и фазовые углы информационных для различных видов макроотклонений составляющих.

Функция вероятности микроконтактирования в подшипнике при эксцентricности дорожки качения местно нагруженного кольца

Циркуляционно нагруженное кольцо – это кольцо, по отношению к которому вектор нагружения в процессе работы подшипника циклически изменяет свое положение. В зависимости от схемы нагружения таким кольцом также может быть внутреннее или наружное, вращающееся или неподвижное кольцо. Так, например, при неизменном направлении радиальной нагрузки по отношению к подшипнику, установленному на вращающемся валу и в неподвижном корпусе, циркуляционно

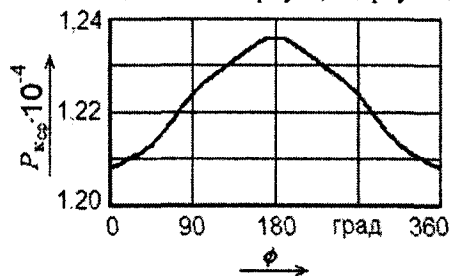


Рис. 5. – График теоретической зависимости $P_{кр}(\phi)$ для эксцентricности при $Q = 30$ мкм

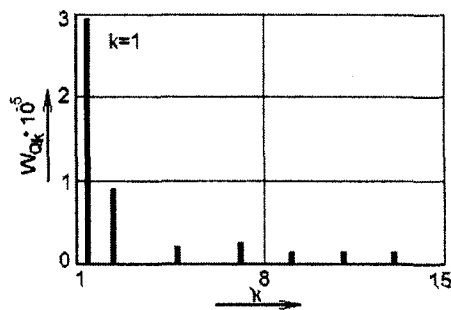


Рис. 6. – Результаты гармонического анализа функции $P_{кр}(\phi)$ для эксцентricности при $Q = 30$ мкм

нагруженным кольцом будет вращающееся внутреннее кольцо подшипника. Именно такой случай моделировался в данном исследовании.

На рис. 7 представлен график функции $P_{кр}(\psi)$ при наличии эксцентricности внутреннего кольца. Установлен принципиально иной характер влияния этого вида макроотклонений – наряду с изменением интегральных характеристик происходит существенное изменение характера функции $P_{кр}(\psi)$, в которой формируются гармонические составляющие с частотами, отличными от частоты $\omega_c Z$. Полученный результат в условиях пренебрежения отклонениями от правильной геометрической формы тел качения объясняется появлением дополнительного источника гармонических изменений $P_{кр}(\psi)$ – вращающегося относительно \bar{F}_r эксцентricного кольца, периодически изменяющего условия контактирования тел качения с кольцами. Функция содержит низкочастотные составляющие и носит почти периодический характер, а отсутствие точного периода объясняется не кратностью частот вращения кольца и сепаратора.

На рис. 8 представлен пример результатов исследования влияния значений эксцентricности дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца подшипника типа 306 на $P_{кр}(\psi)$. Фрагменты графиков функции при различных фиксированных значениях Q показывают, что увеличение Q приводит к однозначному росту ее переменной составляющей при практически неизменной постоянной составляющей. Проведенный гармонический анализ функций (на рис. 9 в качестве примера представлены характерные амплитудные спектры функций при эксцентricности дорожек качения, полученные обработкой реализаций за пять периодов вращения кольца) позволил установить, что эксцентricность приводит к формированию характерного только для нее набора гармонических составляющих. При этом изменение значения отклонения практически не изменяет спектральный состав функции, а лишь перераспределяет весомость отдельных составляющих.

Анализ спектрограмм для различных типов подшипников при различных режимах работы позволил установить информационную частоту f_n в функциях $P_{кр}(\psi)$, характеризующую эксцентricность дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца. Эта частота f_n равна частоте враще-

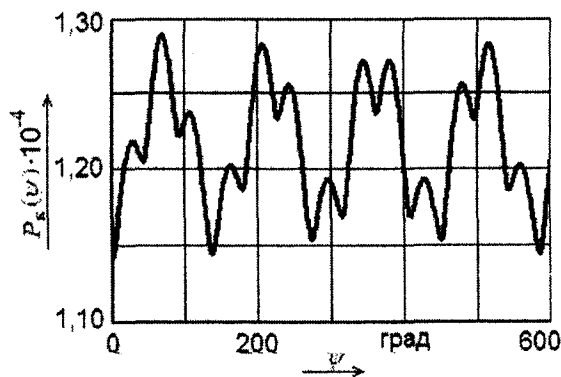


Рис. 7. – График функции $P_{кр}(\psi)$ при наличии эксцентricности циркуляционно нагруженного кольца

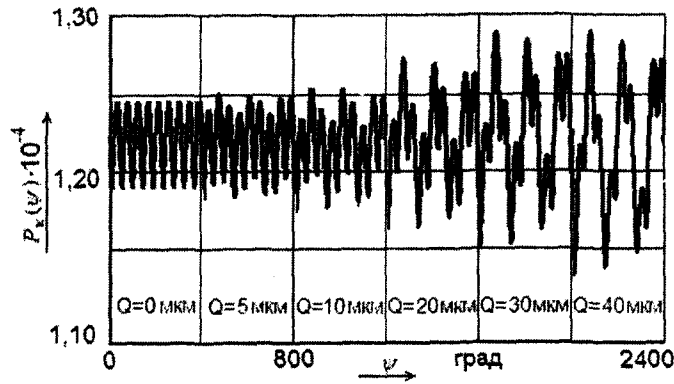


Рис. 8. – Зависимости $P_k(\psi)$ для различных значений эксцентricности циркуляционно нагруженного кольца

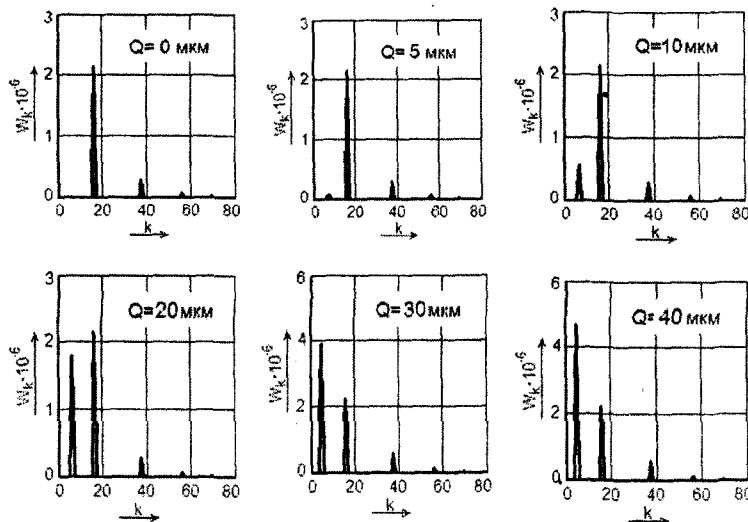


Рис. 9. – Характерные амплитудные спектры W_k функции вероятности микроконтактирования $P_k(\psi)$ при различных значениях эксцентricности циркуляционно нагруженного внутреннего кольца подшипника

ния подвижного кольца подшипника (в рассмотренном на рис. 8 примере $f_{и}$ соответствует частоте вращения внутреннего кольца).

Характерно, что полученный результат также хорошо согласуется с ранее проведенными аналогичными исследованиями для овальности и огранки [2], что свидетельствует о возможности формулирования обобщенного вывода о том, что регулярные макроотклонения дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца трансформируют спектральный состав функции $P_k(\psi)$ и, соответственно, $P_k(t)$, причем каждому виду макроотклонений соответствует характерный только для него набор информационных составляющих на частотах $f_{и} = f_{н(в)}M$, где $f_{н(в)}$ – частота вращения соответствующего кольца; M – коэффициент, равный 1 для эксцентricности, 2 для овальности и 3, 4, ... для огранки соответствующего порядка. При этом изменение значений отклонений от круглости не изменяет спектрального состава функции а лишь перераспределяет весовую составляющих.

Данный эффект влияния регулярных отклонений от круглости дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца на функцию $P_k(t)$ составляет основу принципа выделения информации при реше-

нии задачи идентификации вида и оценки значения доминирующего макроотклонения соответствующих дорожек качения. Для реализации на его базе метода диагностирования необходимо определить спектр функции $P_k(t)$ и проанализировать весовую составляющих на информационных для различных видов макроотклонений частотах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-01-96471).

Литература:

1. Подмастерьев К.В. Обобщенная модель вероятности разрушения смазочного слоя в зонах трения подшипника качения // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. Орел: ОрелГТУ, 2003. № 3. С. 65-70.
2. Подмастерьев К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
4. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / Л.Я. Перель, А.А. Филатов. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.

УДК 519.615.5:532.62:621.822.6

Ст. преп. М. Г. Захаров
(Орловский государственный технический университет)
г. Орел, (0862)419876, e-mail: pms35@ostu.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ В ЗОНАХ ТРЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

The mathematical model of the ball-bearing is offered. The design procedure of thickness of a lubricant film in zones of friction and distribution of loading under the complete set of balls is considered in view of deformation of surfaces and centrifugal forces. Dependence of a peak spectrum of function of thickness of a lubricant film on influencing factors is shown at ideal geometry of working surfaces of the ball-bearing.

Подшипники качения (ПК) находят широкое применение в качестве элементов различных механических систем и в значительной степени определяют их показатели надежности. Поэтому при техническом обслуживании и эксплуатации особенно ответственных систем выполняют диагностирование ПК.

При работе смазанного ПК между его телами качения и кольцами при благоприятных условиях образуется устойчивая пленка смазочного материала, состояние которой в значительной степени определяет техническое состояние опоры. При этом параметры, характеризующие состояние пленки часто используют в качестве диагностических. Формирование смазочной пленки в зонах трения, кроме прочего, с одной стороны зависит от характера распределения внешней нагрузки воспринимаемой ПК, а с другой стороны смазочная пленка оказывает влияние на распределение нагрузки. Следовательно, выявление характера распределения нагрузки и факторов, влияющих на это распределение, позволяет выявить как изменение состояния смазочной пленки, так и изменение характеризующих ее диагностические параметры.

Известно, что распределение нагрузки носит сложный характер и зависит кроме прочего от изменения углового положения тел качения относительно линии действия нагрузки, макрогеометрии рабочих и посадочных поверхностей, характеристик смазочного материала, условий эксплуатации и конструктивных особенностей подшипника [1-3].

Толщина смазочной пленки может быть определена при рассмотрении контактно-гидродинамической проблемы [4]. Результатом ее решение с учетом ряда допущений в предположении идеальной кинематики, является формула, рекомендуемая для определения центральной толщины пленки в эллиптическом контакте [1, 5]:

$$h_m = (1,82 - 0,68 R_{2m}/R_{1m}) \times (\mu_0 \alpha_p v_m / R_{2m})^{0,75} (E'_m / p_{0m})^{0,25} \quad (1)$$

где $R_{1(2)m}$ – радиусы кривизны контактирующих поверхностей m -го кольца, индекс $m = 1$ соответствует наружному, $m = 2$ внутреннему кольцам;

μ_0, α_p – динамическая вязкость и пьезокоэффициент смазочного материала при нулевом давлении [1, 4];

v_m – скорость качения шарика по дорожке m -го кольца;

p_{0m} – максимальное давление в контакте;

E'_m – приведенный модуль упругости контактирующих тел.

Используя результаты представленные в работах [1-3] можно записать:

$$R_{11} = R_{12} = \left(\frac{2}{Dw} - \frac{1}{r_n} \right)^{-1}, \quad (2)$$

$$R_{2m} = \left(\frac{2}{Dw} \pm \frac{\cos \alpha_0}{R_{n(\sigma)} \pm r_{n(\sigma)} (1 - \cos \alpha_0)} \right)^{-1},$$

скорость качения шарика по дорожке наружного (внутреннего) кольца при вращающемся внутреннем и неподвижном наружном кольцах определяется формулой (3), а при вращающемся наружном и неподвижном внутреннем формулой (4):

$$v_H = \omega_c [R_H - r_n (1 - \cos \alpha_{0H})],$$

$$v_B = (\omega_B - \omega_c) [R_B + r_B (1 - \cos \alpha_{0B})], \quad (3)$$

$$v_H = \omega_c [R_B + r_B (1 - \cos \alpha_{0B})],$$

$$v_B = (\omega_H - \omega_c) [R_H - r_n (1 - \cos \alpha_{0H})], \quad (4)$$

где $r_{n(\sigma)}$ – радиусы поперечного сечения желоба наружного (внутреннего) кольца;

$R_{n(\sigma)}$ – радиус дорожки качения наружного (внутреннего) кольца;

α_0 – угол контакта (для радиального подшипника $\alpha_0 = 0$);

D_w – диаметр тела качения (шарика);

$\omega_{n(a)}$, ω_c – соответственно, частоты вращения наружного (внутреннего) кольца и сепаратора.

Приведенный модуль упругости определяется выражением [1]:

$$E'_m = 2 \left(\frac{1 - \nu_T^2}{E_T} + \frac{1 - \nu_m^2}{E_m} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где E_T , E_m , ν_T , ν_m – соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов тела качения и колец подшипника;

T – индекс соответствует телу качения, m – кольцу наружному (внутреннему).

Контакт шарика с дорожкой качения подшипника, представляющей собой, обычно тороидальную или цилиндрическую поверхность, имеет форму эллипса с большой a и малой b полуосями, наибольшим давлением в центре контакта p_{0m} и сближением δ_m [1-3]:

$$a_m = k_{am} \sqrt[3]{\frac{N_m}{E'_m \sum \rho_m}}, \quad (6)$$

$$b_m = k_{bm} \sqrt[3]{\frac{N_m}{E'_m \sum \rho_m}},$$

$$p_{0m} = k_{pm} \sqrt[3]{N_m (E'_m \sum \rho_m)^2}, \quad (7)$$

$$\delta_m = k_{\delta m} \sqrt[3]{\left(\frac{N_m}{E'_m}\right)^2 \sum \rho_m},$$

где $\sum \rho_m$ – сумма главных кривизн соприкасающихся тел в начальной точке контакта m -го кольца подшипника,

$$\sum \rho_m = 1/R_{1m} + 1/R_{2m} \quad (8);$$

N_m – нормально действующие силы на контактирующие тела;

k_{am} , k_{bm} , k_{pm} , $k_{\delta m}$ – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров подшипника и определяются расчетным путем согласно рекомендациям [1]:

$$\tilde{k}_{am} = \frac{1,4664}{Y_m^{0,0945}} \left(\frac{R_{1m}}{R_{2m}} \right)^{0,318}, \quad (9)$$

$$\tilde{k}_{bm} = \frac{1,4184}{Y_m^{0,0945}} \left(\frac{R_{2m}}{R_{1m}} \right)^{0,318},$$

$$\tilde{k}_{\delta m} = 1,04 Y_m^{0,2},$$

$$\tilde{k}_{pm} = 0,2295 Y_m^{0,189}, \quad (10)$$

$$Y_m = 1 - (1 - R_{2m}/R_{1m})^3,$$

Выражения (1) показывает, что толщина пленки в зонах трения смазанного подшипника в рабочих условиях зависит от ряда факторов, в том числе и от максимального давления p_{0m} на площадке контакта зависящего от силы N_m сжимающей контактирующие поверхности.

Подставляя в (1) выражение (7) с учетом (8) и выполнив ряд преобразований, выразим нормально действующую силу на контактирующие тела при наличии смазочной пленки при установившемся режиме работы подшипника в следующем виде:

$$N_m = KH_m^{12} h_m^{-12}, \quad (11)$$

$$KH_m = \left(1,82 - 0,68 \frac{R_{2m}}{R_{1m}} \right) (\mu_0 \alpha_p \nu_m)^{3/4} \times \left(\frac{R_{2m}}{k_{pm}} \right)^{1/4} E_m^{1/12} \left(\frac{1}{R_{1m}} + \frac{1}{R_{2m}} \right)^{-1/6}, \quad (12)$$

где KH_m – коэффициент, учитывающий условия и характеристики контакта.

Предположим, что подшипник качения с радиальным зазором Gr при произвольном расположении комплекта тел качения и вращающемся внутреннем кольце нагружен, например радиальной силой Fr . За счет выбора зазора и деформаций деталей происходит смещение свободного кольца подшипника на величину \bar{W} приводящее к перераспределению нагрузки между шариками. Причем вращение свободного кольца, а вместе с ним и комплекта тел качения вызывает появление центробежных сил приводящих к дополнительному смещению тел качения вдоль линии радиусов колец [1, 6]:

$$F_c = \rho \frac{\pi^3 D_{pw} D_w^3}{43200} \left(1 - \frac{D_w}{D_{pw}} \cos \alpha_0 \right)^2 n_g^2, \quad (13)$$

где D_{pw} – диаметр окружности, проходящей через центры тел качения;

ρ – плотность материала тел качения;

n_g – частота вращения внутреннего кольца.

Рассматривая распределение нагрузки между телами качения подшипника для указанных условий, представим уравнение равновесия для i -п шарика:

$$N_{1i} - N_{2i} - F_c = 0, \quad (14)$$

где $N_{1(2)i}$ – нагрузки, определяемые согласно выражению (11).

Заменяя в равенстве (14) нагрузки $N_{1(2)i}$ их выражениями из (11), после соответствующих преобразований получим:

$$h_{1i} - (KH_1/KH_2)h_{2i} - KH_1/F_c^{1/12} = 0. \quad (15)$$

Если считать, что до приложения нагрузки кольца подшипника расположены концентрично, в плоскости перпендикулярной оси вращения, то диаметрально распределение радиального зазора между ними составляет $0,5Gr$. Тогда общее смещение внутреннего кольца относительно наружного при наличии пленки смазочного материала

$$W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) = 0,5Gr - h_{1i} - h_{2i}, \quad (16)$$

откуда толщина смазочной пленки между i -ым телом качения и наружным кольцом

$$h_{1i} = 0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - h_{2i}, \quad (17)$$

где α – угловая координата ближайшего к линии действия нагрузки тела качения;

W, β – соответственно модуль и аргумент вектора смещения;

$i = 0 \dots (z - 1)$ – номер тела качения;

$\gamma = 2\pi/z$ – угловое расстояние между телами качения;

z – число тел качения.

Подставив (17) в (15) получим выражение для толщины пленки между внутренним кольцом подшипника и телом качения:

$$h_{2i} = \left[0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - KH_1/F_c^{1/12} \right] \times (1 + KH_1/KH_2)^{-1}. \quad (18)$$

Условия равновесия свободного (внутреннего) кольца подшипника в проекциях на направление действия радиальной нагрузки и на перпендикулярное ему направление, принимая во внимание выражения (11) и (18), могут быть записаны в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} Fr - (KH_1 + KH_2)^{1/2} \times \\ \times \sum_{i=0}^{z-1} \left[0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - \frac{KH_1}{F_c^{1/12}} \right]^{-1/2} \times \\ \times \cos(\alpha + i\gamma) = 0, \\ \\ (KH_1 + KH_2)^{1/2} \times \\ \times \sum_{i=0}^{z-1} \left[0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - \frac{KH_1}{F_c^{1/12}} \right]^{-1/2} \times \\ \times \sin(\alpha + i\gamma) = 0, \end{array} \right. \quad (19)$$

и распространяются на те значения i , для которых выполняется условие:

$$0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - KH_1/F_c^{1/12} > 0. \quad (20)$$

Аналитическое решение в общем, виде системы (19) из двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными W и β невозможно, что предопределяет использование численных методов, например Ньютона, Левенберга-Маркардта и т.п. [7].

Толщина пленки h_{2i} между внутренним кольцом и i -ым телом качения определяется из (18), а нормально действующая сила N_{2i} в тех же контактах выражением (11). Тогда преобразовав уравнение (14) сила, действующая между наружным кольцом подшипника и i -ым телом качения, а также толщина смазочной пленки исходя из (11) разделяющей поверхности трения определяются выражениями:

$$N_{1i} = N_{2i} + F_c, \quad (22)$$

$$h_{1i} = KH_1 N_{1i}^{-1/12}.$$

В рабочем режиме элементы подшипника испытывают деформации, которые оказывают влияние на толщину смазочной пленки в контакте а, следовательно, и распределение нагрузки. В связи, с чем приведенные выше выражения требуют уточнения.

Деформации колец и тел качения подшипника определяются согласно (7):

$$\delta_{mi} = (N_{mi}/K_m)^{2/3}, \quad (23)$$

где $K_m = E_m' / (k_{\delta m}^3 \sum \rho_m)^{1/2}$ – конструктивный параметр подшипника [1].

Основываясь на ранее полученных результатах вектор смещения свободного кольца при наличии пленки смазочного материала с учетом деформаций контактирующих тел можно записать в следующем виде:

$$W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) = 0,5Gr - h_{1i} - h_{2i} + \delta_{1i} + \delta_{2i}, \quad (24)$$

где $\delta_{1(2)i}$ – деформация i -го тела качения при контакте с наружным (внутренним) кольцом подшипника.

Преобразовав формулу (24) определим толщину смазочной пленки между i -ым телом качения и наружным кольцом подшипника

$$h_{1i} = 0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - h_{2i} + \Delta_{12i}, \quad (25)$$

где Δ_{12i} – суммарная деформация, $\Delta_{12i} = \delta_{1i} + \delta_{2i}$.

Тогда система (19) с учетом выражения (25) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & F_r - (KH_1 + KH_2)^{1/2} \times \\ & \times \sum_{i=0}^{z-1} \left[0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - \frac{KH_1}{F_c^{1/12}} + \Delta_{12i} \right]^{-1/2} \times \\ & \quad \times \cos(\alpha + i\gamma) = 0, \\ & (KH_1 + KH_2)^{1/2} \times \\ & \times \sum_{i=0}^{z-1} \left[0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - \frac{KH_1}{F_c^{1/12}} + \Delta_{12i} \right]^{-1/2} \times \\ & \quad \times \sin(\alpha + i\gamma) = 0, \end{aligned} \right. \quad (26)$$

причем, условием выполнения равенств в последнем случае, является:

$$0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) - KH_1 / F_c^{1/12} + \Delta_{12i} > 0. \quad (27)$$

Результатом решения системы (26) тем же методом, что и ранее является определение новых значений модуля и аргумента вектора смещения \bar{W} с учетом деформаций.

Далее расчет выполняется по ранее изложенной методике, но исходя из вновь определенных значений вектора смещения и приведении формулы (18) к следующему виду:

$$h_{2i} = \left[\begin{aligned} & 0,5Gr - W \cos(\alpha - \beta + i\gamma) + \\ & + \Delta_{12i} - KH_1 / F_c^{1/12} \end{aligned} \right] \times (1 + KH_1 / KH_2)^{-1}. \quad (28)$$

Таким образом, после окончания расчетов являются непосредственно определенными: параметры вектора сближения \bar{W} колец подшипника; толщина пленки между телами качения и поверхностью колец (h_{1i}, h_{2i}); деформации в контактах (δ_{1i}, δ_{2i}); центробежная сила F_c ; распределение нагрузки между телами качения подшипника (N_{1i}, N_{2i}). Перечисленного набора параметров в большинстве случаев достаточно не только для решения указанной, но и ряда других задач. Заметим также, что все перечисленные параметры определяются при произвольных угловых положениях комплекта тел качения относительно направления действия приложенной к подшипнику нагрузки.

Характерный вид изменения толщины смазочной пленки в функции от углового положения комплекта тел качения для радиального однорядного шарикоподшипника №306 [6], с радиальным зазором 26 мкм, при частоте вращения внутреннего кольца 418 с⁻¹ и действующей радиальной нагрузке Fr представлен на рис. 1, а-в.

Анализ показывает, что толщина смазочной пленки вне зоны нагружения ($\varphi > |90^\circ|$) практически определяется действием только центробежных сил. Их влияние на толщину пленки определяется

соотношением с внешней приложенной нагрузкой и проявляется наиболее значительно при рассмотрении высокоскоростных опор.

Подобный вид изменения толщины пленки при изменении нагрузки связан с ее перераспределением вызванным увеличивающимися деформациями колец и тел качения. При этом форма кольца изменяется и с увеличением нагрузки все более значительно отличается от идеальной окружности. У

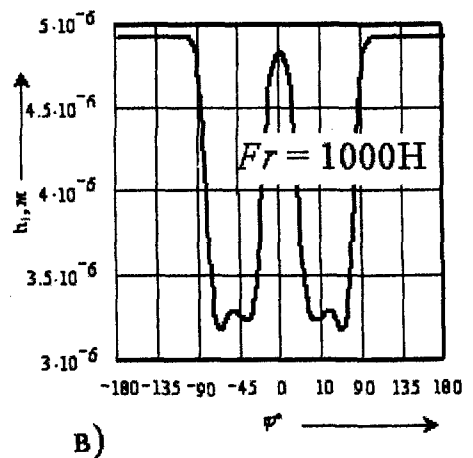
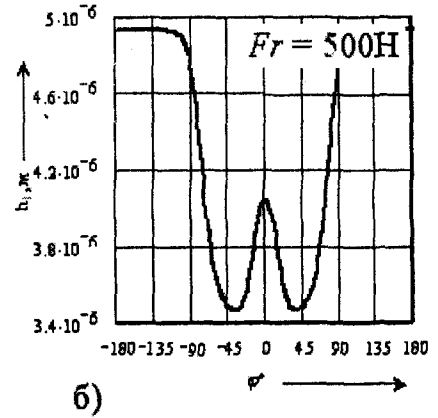
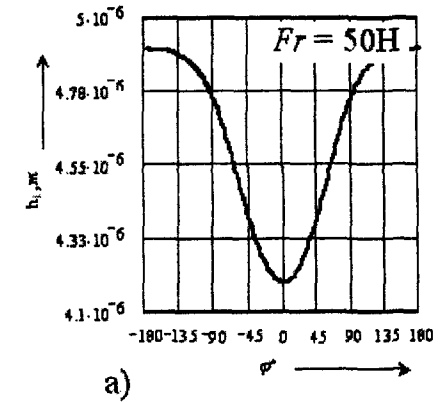


Рис. 1. – Функция толщины смазочной пленки между поверхностью наружного кольца и комплектом тел качения от их углового положения

кольца, в зависимости от нагрузки, появляется овальность, огранка и т.п. изменения формы. Спектральный анализ (рис. 2, а – в) представленных на рис. 1, а – в функциональных зависимостей позволяет наглядно проиллюстрировать выдвинутое положение.

Постоянная составляющая для рассмотренных зависимостей значительно больше амплитуды первой гармоники, что ухудшает масштабирование высших гармоник в связи, с чем постоянная составляющая на графиках не показана.

Полученные амплитудные спектры показывают увеличение, как числа высших гармоник, так и рост их амплитуды при возрастании нагрузки на подшипник, причем названные изменения являются монотонными и однозначными. Подобные теоретические исследования были выполнены также при изменении радиального зазора и частоты вращения подшипника. Они также указывают на зависимость спектра функции распределения толщины смазочной пленки от названных факторов. Это позволяет сделать вывод о необходимости предварительного расчета спектрального состава (эталонного спектра) функции толщины смазочной пленки при идеальной макрогеометрии тел и дорожек качения шарикоподшипника и сравнении его с реальным спектром, полученным при диагностировании. Отклонение реального спектра от эталонного позволяет выявить дефекты колец подшипника, а при несущественном усложнении приведенной модели и различные дефекты тел качения.

Литература:

1. Галахов М.А. Расчет подшипниковых узлов / М.А. Галахов, А.Н. Бурмистров. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.: ил.
2. Приборные шариковые подшипники. Справочник под ред. К.Н. Явленского и др. М.: Машиностроение, 1981. 351 с., ил.
3. Подмастерьев К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения. М.: Машиностроение-1, 2001. 376 с.: ил.
4. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 304 с.: ил.
5. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алипина. М.: Машиностроение, 1979. 358 с., ил.
6. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор / Л.Я. Перель,

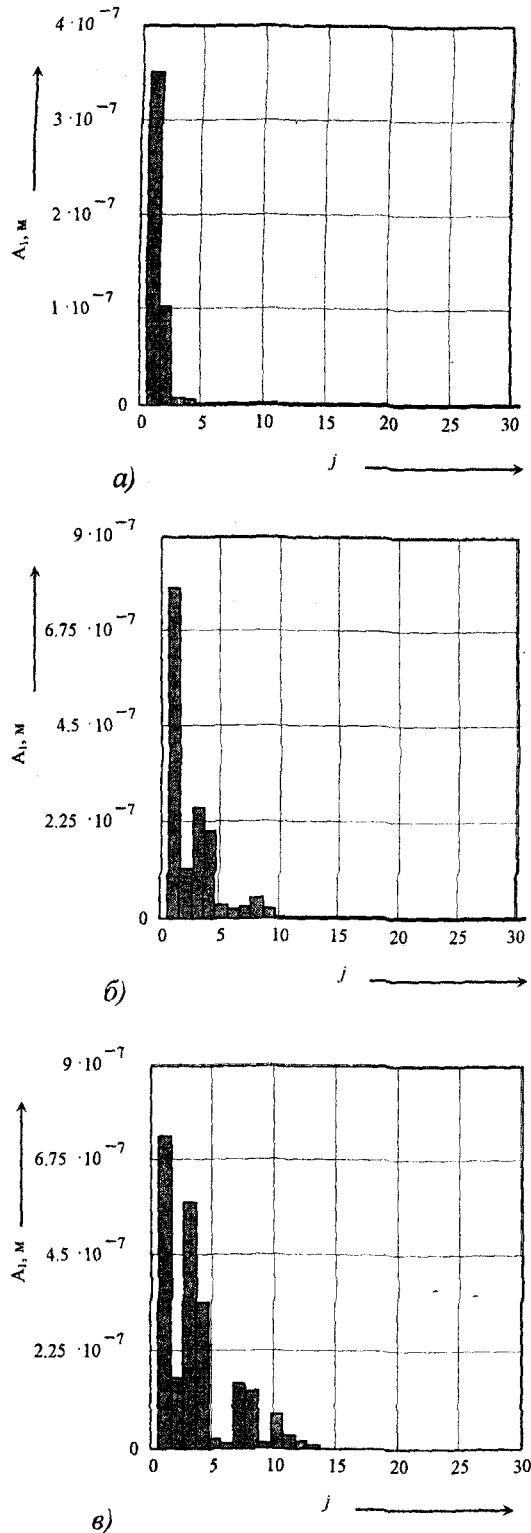


Рис. 2. – Амплитудный спектр функции толщины смазочной пленки

- А.А. Филатов // Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.: ил.
7. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн М.: Наука, 1977. 832 с.: ил.

ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

УДК 621.36

Канд. техн. наук, доц. Т. И. Ногачева, асп. Н. В. Углова
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (0862)419874; e-mail: pms@ostu.ru

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ

The article deals with the basic sources of the errors in thermoelectric method of checking the conducting coats thickness; to be exact: the fluctuations of the thermoelectric responsivity of the materials, the coat and the substrate are made of; the temperatures of the hot electrode, the resistance of the chain and the resistance of the radius of the landing surface of the thermal clearance gauge. The formulae drawn allow to estimate the total error of the coat thickness measuring and its constituents.

Термоэлектрический метод широко используется в толщинометрии проводящих покрытий на проводящей основе. Однако измерение толщины покрытий с использованием этого метода характеризуется низкой точностью. Несмотря на большое разнообразие способов и устройств его реализации, эта погрешность составляет 10-15% и более. Поэтому первоочередной задачей является разработка способов повышения точности измерения. С целью выявления основных причин, обуславливающих указанную выше низкую точность, необходимо проанализировать основные источники погрешностей и рассмотреть возможности исключения или уменьшения их влияния на результаты измерения.

Наиболее удобно провести анализ этих погрешностей на основе работы Суворова Л.М. [1], в которой подробно описаны методика измерения и математический аппарат для расчета толщины покрытия. Согласно этой методике на покрытие 2 устанавливают два термошупа, как это показано на рис. 1.

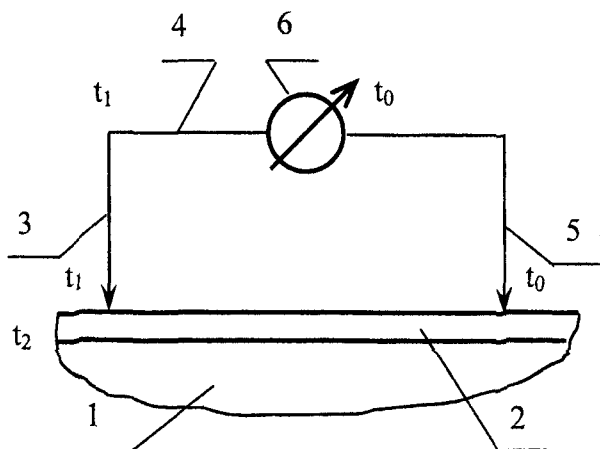


Рис. 1. – Схема контроля гальванических покрытий

Термошуп 3 нагревают до температуры t_1 , а термошуп 5, расположенный на значительном расстоянии от вышеуказанного, имеет температуру t_0 , условно принятую за «нуль». К нерабочему торцу горячего термошупа приварено звено 4, представляющее собой хромель-копелевую термопару, являющуюся источником термоЭДС для настройки прибора на «нуль» с помощью регулирования сопротивления, установленного между рабочими электродами термопары.

Между нерабочими торцами термошупов включен измерительный прибор 6, по которому проходит ток, обусловленный термоЭДС, возникающей в цепи и равной:

$$E = E_{12} + E_{23} + E_{34} = E_{12} + E_{24}, \quad (1)$$

где E_{12} , E_{23} , E_{34} и E_{24} – термоЭДС, создаваемые в контактах пар: покрытие 2–подложка 1; термошуп 3 – покрытие 2; термошуп 3 – звено 4; покрытие 2 – звено 4.

Или выражение (1) можно представить в виде:

$$E = \alpha_{12}(t_2 - t_0) + \alpha_{23}(t_1 - t_0) + \alpha_{34}(t_1 - t_0) = \alpha_{12}(t_2 - t_0) + \alpha_{24}(t_1 - t_0), \quad (2)$$

где α_{12} , α_{23} , α_{34} , α_{24} – термоэлектрические способности пар материалов, участвующих в создании вышеназванных термоЭДС соответственно.

По величине тока $I = E/R$, регистрируемого прибором 6, судят о толщине покрытия.

В случае если подложка 1 и звено 4 изготовлены из одинакового материала, то термоЭДС в цепи определяется выражением:

$$E = -\alpha_{21}t_2 + \alpha_{21}t_1, \quad (3)$$

где $E_{12} = -\alpha_{21}t_2$ и $E_{24} = \alpha_{21}t_1$.

Перед измерением толщины покрытия следует провести тарировку прибора. Для этого необходимо иметь два рабочих участка на исследуемой поверхности: подложку без покрытия и подложку с покрытием. Сначала горячий термошуп устанавливают на подложку без покрытия ($\delta = 0$) и регистрируют с помощью прибора возникновение тока I_1 . Этот ток обусловлен ЭДС, возникающей при контакте термошупа 3 с подложкой. Затем устанавливают горячий термошуп на участок контролируемой поверхности с «толстым» (большим) покрытием ($\delta \gg r$) и фиксируют ток I_2 . После этого термошуп устанавливают на контролируемую поверхность и фиксируют ток I_3 . Разность токов $I_3 - I_1$ описывается выражением:

$$I_3 - I_1 = \frac{\alpha_{21}t_1}{R} \left(1 - \frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)} \right), \quad (4)$$

где t_1 – температура горячего термошупа;

R – сопротивление измерительной цепи;

$k = \delta/r$, отношение толщины покрытия δ к радиусу посадочной площадки термошупа r .

При $\delta = 0$ ток I_1 должен быть равен нулю, в случае если подложка 1 и звено 4 изготовлены из одинакового материала.

При «толстом» покрытии множитель в скобках равен единице и разность токов $I_2 - I_1$, соответствует верхнему пределу измерения прибора и определяется выражением:

$$I_2 - I_1 = \frac{\alpha_{21}t_1}{R}. \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в выражение (4), получим:

$$I_3 - I_1 = (I_2 - I_1) \left(1 - \frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)} \right). \quad (6)$$

или

$$\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_1} = \left(1 - \frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)} \right). \quad (7)$$

Однако, как было отмечено выше, ток I_1 можно компенсировать с помощью хромель-копелевой термопары путем доведения показания прибора до нулевого значения. При равенстве $I_1 = 0$ отношение (7) примет вид:

$$\frac{I_3}{I_2} = 1 - \frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)}. \quad (8)$$

Выражения (8) позволяет рассчитать коэффициенты k_i для каждой i -ой точки измерения, а затем по известному значению радиуса посадочной площадки термошупа и расчетному значению k_i определяют толщину покрытия $\delta_i = k_i r$.

При такой методике погрешность определения толщины покрытия, прежде всего, обусловлена тем, что измерение токов I_1 , I_2 и I_i осуществляется в различных условиях и на различных участках из-за случайных флуктуаций значений α_{21} , t_1 , R и r . Кроме того, при измерении тока I_2 коэффициент k не равен бесконечности, а потому равенство (5) является приближенным. Свою долю в суммарную погрешность вносят погрешности измерения токов, зависящие от погрешности измерительного прибора.

Расчитать погрешности определения толщины покрытия можно, исходя из следующих соображений. Ток I_1 измеряется в точке 1 при значениях:

$$\alpha_{31(1)} = \alpha_{31(0)} + \Delta_1(\alpha_{31}),$$

$$t_{1(1)} = t_{1(0)} + \Delta_1(t_1),$$

$$R_{(1)} = R_0 + \Delta_1(R);$$

а ток I_2 имеет в точке 2 другие значения:

$$\alpha_{21(2)} = \alpha_{21(0)} + \Delta_2(\alpha_{21}),$$

$$t_{1(2)} = t_{1(0)} + \Delta_2(t_1),$$

$$R_{(2)} = R_0 + \Delta_2(R),$$

току I_i в точке i соответствуют:

$$\alpha_{21(i)} = \alpha_{21(0)} + \Delta_i(\alpha_{21}),$$

$$t_{1(i)} = t_{1(0)} + \Delta_i(t_1),$$

$$R_{(i)} = R_0 + \Delta_i(R),$$

где $\alpha_{(31)1}$ – термоэлектрическая чувствительность пары материалов горячий термошуп 3–подложка 1; $\alpha_{31(0)}$, $\alpha_{21(0)}$, $t_{1(0)}$ и R_0 – средние значения соответствующих величин; Δ_{ij} – отклонения указанных величин в точках измерения от их средних значений.

Приведа измеренные значения токов к услови-

$$I_{2\Pi} = I_2 \frac{\alpha_{31(1)} t_{1(1)} R_{(1)}}{\alpha_{21(2)} t_{1(2)} R_{(2)}}, \quad (9)$$

$$I_{i\Pi} = I_i \frac{\alpha_{31(1)} t_{1(1)} R_{(1)}}{\alpha_{21(i)} t_{1(i)} R_{(i)}} \left(1 + \frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)} \right)^{-1}. \quad (10)$$

ям измерения тока I_1 , получим:

Так как флуктуации термоэлектрической чувствительности α_{21} , температуры t_1 и сопротивления цепи R вдоль контролируемой поверхности являются случайными, то целесообразно использовать вероятностные, т.е. среднеквадратические отклонения этих величин в каждой точке от среднего значения $\alpha_{21(0)}$, $t_{1(0)}$, $R(0)$, которые можно представить в виде:

$$S\left(\frac{\alpha_{31(i)}}{\alpha_{21(i)}}\right) \approx \frac{\alpha_{31(0)}\left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}}\right)}{\alpha_{21(0)}\left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}}\right)}, \quad (11)$$

$$S\left(\frac{t_{1(i)}}{t_{1(0)}}\right) \approx \sqrt{2} \frac{S(t_1)}{t_{1(0)}}, \quad S\left(\frac{R(i)}{R(0)}\right) \approx \sqrt{2} \frac{S(R)}{R(0)},$$

Относительная погрешность измерения тока I_2 составляет: $\frac{S(I_2)}{I_{2П}}$.

Суммарная абсолютная среднеквадратическая погрешность определения тока I_2 равна сумме квадратов погрешностей, вызванных флуктуациями α_{21} , t_1 , R и I_2 :

$$S_{\Sigma(I_2)} = I_2 \sqrt{\left(\frac{\alpha_{31(0)}\left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}}\right)}{\alpha_{21(0)}\left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}}\right)}\right)^2 + 2\left(\left(\frac{S(t_1)}{t_{1(0)}}\right)^2 + \left(\frac{S(R)}{R(0)}\right)^2\right) + \left(\frac{S(I_2)}{I_{2П}}\right)^2}, \quad (12)$$

или

$$S_{\Sigma(I_2)} = I_2 \sqrt{D + \left(\frac{S(I_2)}{I_{2П}}\right)^2}, \quad (13)$$

где

$$D = \left(\frac{\alpha_{31(0)}\left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}}\right)}{\alpha_{21(0)}\left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}}\right)}\right)^2 + 2\left(\left(\frac{S(t_1)}{t_{1(0)}}\right)^2 + \left(\frac{S(R)}{R(0)}\right)^2\right).$$

Аналогично суммарная абсолютная среднеквадратическая погрешность измерения токов I_i :

$$S_{\Sigma(I_i)} = I_i \sqrt{D + \left(\frac{S(I_i)}{I_{iП}}\right)^2}. \quad (14)$$

В соответствии с полученными значениями погрешностей ток I_2 , приведенный к условиям измерения тока I_1 , можно представить в виде:

$$I_{2П} = I_2 + I_2 \sqrt{D + \left(\frac{S(I_2)}{I_{2П}}\right)^2}, \quad (15)$$

а ток в каждой i -ой точке определится выражением:

$$I_{iП} = I_i + I_i \sqrt{D + \left(\frac{S(I_i)}{I_{iП}}\right)^2}. \quad (16)$$

При этом отношение приведенных токов $I_{iП} / I_{2П}$ равно:

$$\frac{I_{iП}}{I_{2П}} = \frac{I_i \left(1 + \sqrt{D + \left(\frac{S(I_i)}{I_{iП}}\right)^2}\right)}{I_2 \left(1 + \sqrt{D + \left(\frac{S(I_2)}{I_{2П}}\right)^2}\right)}. \quad (17)$$

Или после несложных преобразований имеем:

$$\frac{I_{iП}}{I_{2П}} \approx \frac{I_i}{I_2} \left(1 + \sqrt{D + \left(\frac{S(I_i)}{I_{iП}}\right)^2} + \sqrt{D + \left(\frac{S(I_2)}{I_{2П}}\right)^2}\right). \quad (18)$$

Среднеквадратическая погрешность отношения токов согласно уравнению (18) равна:

$$S\left(\frac{I_i}{I_2}\right) \approx \frac{I_i}{I_2} \left(\sqrt{D + \left(\frac{S(I_i)}{I_{iП}}\right)^2} + \sqrt{D + \left(\frac{S(I_2)}{I_{2П}}\right)^2}\right). \quad (19)$$

Примем отношение токов по выражению (3) равным некоторой величине $\frac{I_i}{I_2} = M$, при этом среднеквадратическая погрешность определения M (скобки) будет равна среднеквадратической погрешности отношения токов, т.е. $S(M) = S\left(\frac{I_i}{I_2}\right)$.

Среднеквадратическая погрешность определения коэффициента k по отношению токов в этом случае определяется из выражения:

$$S(M) = \frac{\partial M}{\partial k} S_k, \quad (20)$$

откуда $S(k) = S(M) / \left(\frac{\partial M}{\partial k}\right)$,

или

$$\frac{S(k)}{S(M)} = \left(\frac{\partial M}{\partial k} \right)^{-1} = \left(\frac{\partial \left(\frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)} \right)}{\partial k} \right)^{-1} \quad (21)$$

При толщине покрытия $\delta = kr$, ее абсолютная среднеквадратическая погрешность определится как:

$$S(\delta) = \sqrt{(rS(k))^2 + (kS(r))^2} \quad (22)$$

а относительная:

$$\frac{S(\delta)}{\delta} = \sqrt{\left(\frac{S(k)}{k} \right)^2 + \left(\frac{S(r)}{r} \right)^2} \quad (23)$$

где $S(r)$ – среднеквадратическая погрешность радиуса посадочной площадки термошупа.

Анализ этих источников погрешностей позволил получить формулу для расчета суммарной погрешности измерения толщины покрытия:

$$\frac{S(\delta)}{\delta} = \sqrt{\left(\frac{I_1}{I_2} A(B+C) \right)^2 + \left(\frac{S(r)}{r} \right)^2} \quad (24)$$

где

$$A = \left(\frac{\partial M}{\partial k} \right)^{-1} \frac{1}{k} = \left(\frac{\partial \left(\frac{1}{(1+1,5k)(1+0,5k^2)} \right)}{\partial k} \right)^{-1} \cdot \frac{1}{k}$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{31(0)} \left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}} \right) \right)^2 + 2 \left(\frac{S(I_1)}{I_1(0)} \right)^2 + \left(\frac{S(R)}{R(0)} \right)^2} + \left(\frac{S(I_2)}{I_2\Pi} \right)^2$$

$$C = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{31(0)} \left(\frac{S(\alpha_{31})}{\alpha_{31(0)}} - \frac{S(\alpha_{21})}{\alpha_{21(0)}} \right) \right)^2 + 2 \left(\frac{S(I_1)}{I_1(0)} \right)^2 + \left(\frac{S(R)}{R(0)} \right)^2} + \left(\frac{S(I_1)}{I_{1\Pi}} \right)^2$$

$\alpha_{21(0)}, I_1(0), R(0)$ – средние значения соответствующих величин;

S_j – среднеквадратические отклонения величин от их средних значений.

При измерении малых толщин покрытий $\delta \ll r$ основную роль в создании погрешностей играют флуктуации α_{21}, I_1 и R , а при измерении больших толщин покрытий $\delta > r$ основной вклад в погрешность вносят флуктуации радиуса r .

На основании проведенного анализа погрешностей можно сделать вывод о том, что с целью повышения точности измерения толщины проводящих покрытий, необходимо одновременно с измерениями токов также измерять величины термоэлектрической чувствительности, температуры сопротивления цепи и радиуса посадочной площадки термошупа.

Литература:

1. Суворов Л.М. Термоэлектрический метод измерения толщины гальванических покрытий // Заводская лаборатория, 1964. №8. Т.30. С.959-962.

УДК 531.7.08:634-27

И. Н. Никулина

(Орловский государственный технический университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ЭКЗОКАРПИЯ ПРИ СЖАТИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПЛОДОВ

By the mechanical tests, fruits are subjected to the compressing loading, for what a fruit is placed between horizontal compressing planes, as a result it extends in horizontal direction. By the transportation the fruit is also clamped between other fruits located above and below it and extends, similarly to previous. However, distinction consists in the fact that in the first case the coat of a fruit in the field of a contact of plates doesn't stretch, and in the second case in the field of a contact of other fruits it stretches. Therefore the conditions of the test between plates are a little bit heavier, than by the transportation with the same compression.

Для хранения и транспортировки плоды засыпают в различного рода ящики, корзины и контейнеры. При этом они располагаются в таре довольно хаотично, однако все они (за исключением лежащих на поверхности и на дне) испытывают воздей-

ствия от вышележащих и нижележащих плодов. Поскольку большинство плодов с физической точки зрения представляет собой оболочки, заполненные твердой или жидкой, практически несжимаемой фазой, то при сжатии в каком-либо направле-

нии их объём практически не изменяется - они расширяются в другом направлении, где сжимающие нагрузки не действуют. Указанное расширение происходит за счет растяжения экзокарпия (оболочки) плода, обладающего эластичными свойствами. Именно благодаря им плод остаётся целым при значительно больших нагрузках, чем это могло бы иметь место в случае малой эластичности оболочки, когда подобные воздействия влекли бы за собой практически моментальное разрушение плода.

Для определения сопротивления плодов сжимающим нагрузкам обычно проводят ряд опытов, заключающихся в помещении каждого единичного плода между двумя сжимающими его с определённой силой пластинами (рис. 1).

Данный способ нагружения плодов должен имитировать частный случай их расположения в насыпи, как представлено на рис. 2, когда один плод испытывает воздействия только двух соседних, лежащих строго сверху и снизу испытуемого плода. При этом на него оказывают воздействие силы, направленные строго вертикально.

Однако, такая имитация не является строгой. Если до деформации плод имел форму шара радиусом R_1 объёмом $V_1 = \frac{4}{3}\pi R_1^3$, то после деформации он приобретает форму круговой бочки объёмом $V_6 = 0,262h_6(2D + d^2)$, где высота бочки $h_6 = 2(R_1 - h_{сегм})$, $h_{сегм}$ - высота сегмента, потерянного шаром радиусом R_1 за счёт деформации сжатия, диаметр бочки $D = 2R_2$, радиус основания бочки $d = 2a_{сегм}$, $a_{сегм}$ - радиус основания упомянутого сегмента.

После соответствующих преобразований получаем:

$$V_6 = 2,096(R_1 - h_{сегм})(2R_2^2 + a_{сегм}^2).$$

Так как объём плода при деформации остаётся неизменным, то $V_1 = V_6$, то есть:

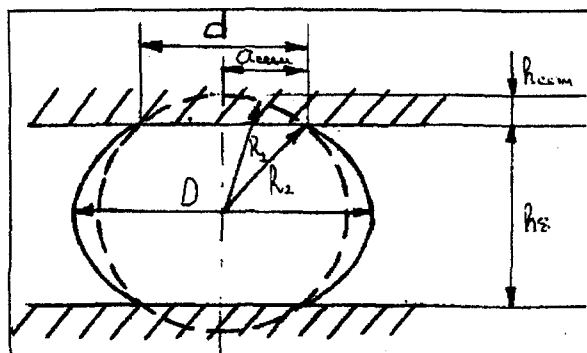


Рис. 1. - Испытание плодов на сжатие посредством пластин

$$\frac{4}{3}\pi R_1^3 = 2,096 \cdot (R_1 - h_{сегм}) \cdot (2R_2^2 + a^2).$$

Значение $a_{сегм}$ можно найти из формул, определяющих объём:

$$V_{сегм} = \frac{1}{6}\pi h_{сегм}(3a_{сегм} + h_{сегм}^2),$$

или

$$V_{сегм} = \frac{1}{3}\pi h_{сегм}^2(3R_1 - h_{сегм}),$$

откуда

$$a_{сегм} = \sqrt{2h_{сегм}R_1 - h_{сегм}^2}.$$

В результате подстановок получаем:

$$R_1^3 = 1,5715 \cdot ((2R_1R_2^2 + R_1\sqrt{2h_{сегм}R_1 - h_{сегм}^2})^2 - 2h_{сегм}R_2^2 - h_{сегм}\sqrt{2h_{сегм}R_1 - h_{сегм}^2})^2,$$

и

$$R_2 = \sqrt{R_1^2 + h_{сегм}^2 \frac{3R_1 - h_{сегм}}{2(R_1 - h_{сегм})}}.$$

Отношение $\frac{h_{сегм}}{R_1}$ выражает относительное сжатие плода, которое обозначим ρ , тогда:

$$R_2 = R_1 \sqrt{1 + \rho^2 \frac{3 - \rho}{2(1 - \rho)}}.$$

Относительное удлинение экзокарпия при этом составляет:

$$\varepsilon = \frac{R_2}{R_1} - 1 = \sqrt{1 + \rho^2 \frac{3 - \rho}{2(1 - \rho)}} - 1.$$

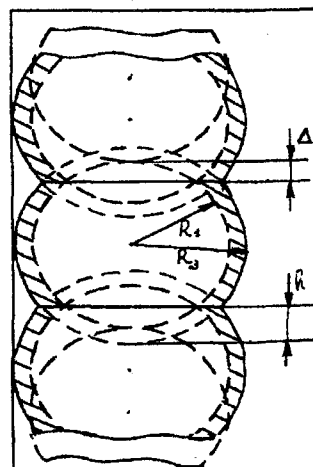


Рис.2. - Сжатие плодов в насыпи

Зависимость относительного удлинения экзокарпия плода ε от его относительного сжатия ρ при использовании сжимающих пластин показана на рис. 3 (линия 1).

$$\Delta V = \frac{1}{3}\pi(R_3 - h)^2(2R_3 + h),$$

где h – высота рассматриваемого сегмента.

Поскольку объём плода остаётся неизменным, то $V_1 = V_3$ и:

$$\frac{4}{3}\pi R_1^3 = \frac{4}{3}\pi R_3^3 - 2\frac{1}{3}\pi(R_3 - h)^2(2R_3 + h).$$

Так как $h = R_1 - \Delta$, то относительное сжатие плода:

$$\rho = \frac{\Delta}{R_1} = 1 - \frac{h}{R_1}.$$

Относительное растяжение экзокарпия плода:

$$\varepsilon = \frac{R_3 - R_1}{R_1}.$$

Решая совместно приведённые выражения, получаем:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{3 - \rho}{1 - \rho} \rho^2} - 1.$$

Зависимость относительного удлинения экзокарпия ε от относительного сжатия плода ρ при сдавливании двумя соседними плодами показана на рис. 3 (линия 2).

На основании полученных графиков можно сделать вывод, что при проведении испытаний на устойчивость к сжимающим нагрузкам традиционным методом посредством сжимающих пластин плоды испытывают несколько большие нагрузки, чем при взаимодействии друг с другом. Это даёт основание полагать, что на практике значения критических нагрузок для плодов должны быть несколько больше, чем это устанавливается экспериментально.

При транспортировке плоды сдавливаются выше и ниже лежащими плодами. В идеализированном случае можно считать, что плод сдавливается только в вертикальном направлении. Вследствие того, что выше и ниже лежащие плоды имеют аналогичные упругие свойства, их деформация выглядит так, как это показано на рис. 2 (плод, находящийся посередине). Штриховкой обозначен объём, на который происходит приращение в горизонтальном направлении плода при сжатии его двумя другими, Δ – высота сегмента, условно отсекаемого от шара радиусом R_1 . Поскольку сжатие плода происходит за счет его взаимодействия с соседними плодами, то как на испытываемый, так и на соседние плоды, действуют практически одинаковые силы сжатия, в результате чего они деформируются приблизительно одинаково.

Площади соприкосновения плодов увеличиваются примерно одинаково, так как в результате возникающего трения почти полностью отсутствует эффект проскальзывания экзокарпиев друг по другу. Налицо приращение радиусов сегментов, которые условно отсекаются от шаровидного плода при сжатии его соседними плодами, чего не наблюдается при использовании общепринятого метода сжатия между пластинами.

Объём плода до деформации по-прежнему равен:

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi R_1^3.$$

Объём плода после сжатия его двумя другими, как это показано на рис. 2, равен:

$$V_3 = \frac{4}{3}\pi R_3^3 - 2\Delta V,$$

где ΔV – объём сегмента, отсечённого от шара радиусом R_3 с одной стороны:

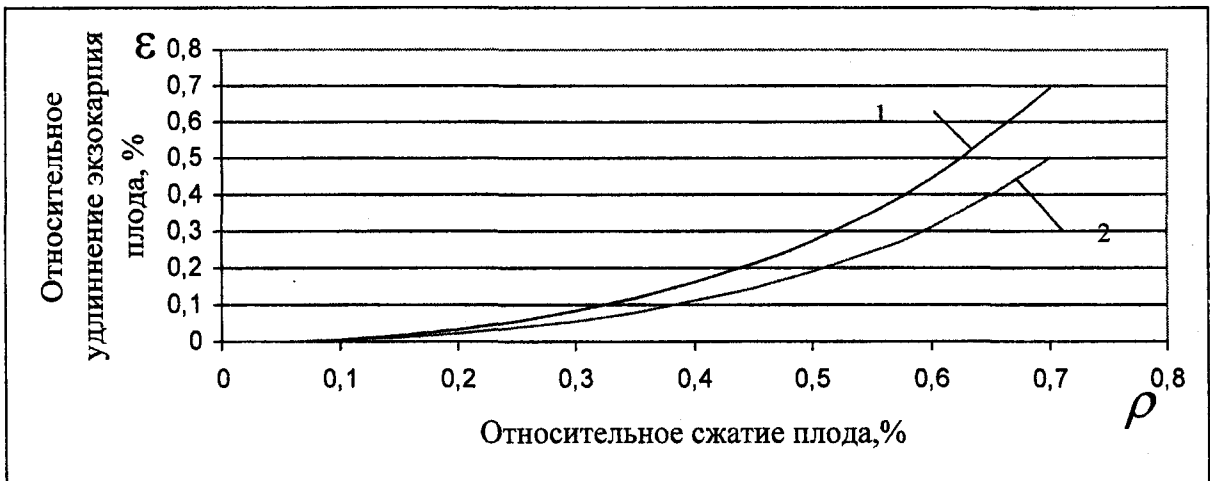


Рис. 3. – График зависимости растяжения экзокарпия плода от его относительного сжатия при сдавливании сжимающими пластинами (линия 1) и двумя соседними плодами (линия 2)

УДК 004.891:620.179.18:691

Д. В. Меркулов

(Воронежский государственный архитектурно-строительный университет)

Россия, г. Воронеж, (0732)715270, e-mail: merculov@newmail.ru

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАДИОВОЛНОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

The model of building the expert system "Radiocontrol" designed for automation of radiowave non-destructive quality control of building materials and products is considered. It includes the structure, working regimes, decision-making rules, etc. The expert system's output data obtained by using ceramic tiles as a controlled materials is described. The results reveal that expert system "Radiocontrol" can be used in industry, for example, in manufacturing of building materials for defining final product quality.

Вопросы дефектоскопии и неразрушающего контроля качества (НKK) строительных материалов и изделий (СМИИ) напрямую связаны с вопросами повышения производительности труда и качества продукции. Надёжное, достоверное и быстрое определение качества производимой продукции, степени изношенности эксплуатируемых СМИИ позволяет в первом случае с большой степенью точности относить изделия к тому или иному сорту или к браку, а во втором – своевременно сигнализировать о необходимости замены или ремонта износившейся конструкции, детали.

Очень важным представляется определение не только сорта изготовленного образца, но и типа и характеристик дефекта, что позволит вносить коррективы в производственный процесс, а также в режим эксплуатации изделий.

При современном развитии компьютерной техники и информационных технологий и повсеместном их внедрении в науку и производство всё большую актуальность приобретает разработка различного программного обеспечения для нужд НKK. Главной задачей такого программного обеспечения является освобождение человека от рутинной, сложной или вредной для здоровья работы.

Кроме того, работы, связанные с контролем качества продукции, характеризуются высоким уровнем интеллектуализации. В связи с этим при разработке программного обеспечения необходимо применение адекватных методов, которыми являются методы искусственного интеллекта, в частности, экспертные системы (ЭС), интенсивно развивающиеся в последнее время.

Актуальность разработки программного обеспечения для осуществления автоматического экспресс-контроля качества продукции на промышленных предприятиях вызвана двумя факторами. Во-первых, в настоящее время в отечественной промышленности качество готовой продукции контролируется, в основном, человеком. Это вносит долю субъективности в принимаемые им решения. Кроме того, человек не застрахован от

ошибок, вызванных неопытностью, усталостью, различными внешними факторами. И самое главное, условия производства могут быть опасными для здоровья: запылённость помещения, плохая освещённость, шумы от работающих машин, наличие вредных веществ, радиоактивность. Во-вторых, экспресс-контроль качества позволяет уменьшить процент брака выпускаемых СМИИ.

Существует множество методов [1] НKK изделий и материалов. Одним из них является радиоволновый метод, при котором о качестве исследуемого объекта судят по параметрам взаимодействующего с ним электромагнитного поля. В пользу радиоволнового метода контроля качества СМИИ говорят следующие доводы. Во-первых, длины волн радиодиапазона соизмеримы с размерами специфических для СМИИ дефектов. Во-вторых, радиоволны способны проникать внутрь изделия, позволяя выявлять скрытые дефекты. В-третьих, радиоволновый метод легко реализовать на практике, и, в отличие, например, от радиационного, при малых уровнях мощности он безвреден для здоровья людей.

Поскольку связь между показателями качества СМИИ и параметрами электромагнитного поля носит сложный характер, для радиоволнового НKK нужно привлекать методы распознавания образов, которые лучше всего реализовать в виде экспертной системы (ЭС).

Такая система, названная «Радиоконтроль» [2], была разработана на кафедре Математического моделирования и вычислительной техники Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.

Известно, что наиболее полную информацию об исследуемом объекте при радиоволновом методе контроля можно получить, измерив его матрицу

рассеяния $\dot{S} = \begin{pmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{pmatrix}$, которая представляет

собой набор прямых и кроссовых коэффициентов отражения.

В зависимости от положения объекта контроля в пространстве его матрица рассеяния, в общем случае, будет меняться. Измеряя матрицы рассеяния объекта в разных положениях, можно получить о нём и о его дефектах дополнительную информацию. Для СМИИ, обладающих квадратной формой, исключив положения объекта, при которых его грани не совпадают с гранями рупорной приёмопередающей антенны, используемой при измерениях, ему в соответствие можно поставить четыре, в общем случае, различных матрицы рассеяния. Схематично это показано на рис. 1.

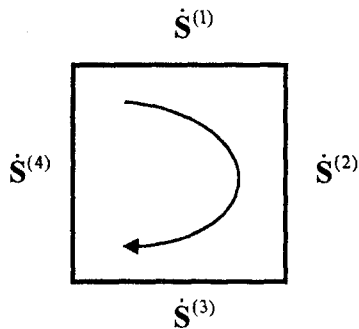


Рис. 1. – Матрицы рассеяния, соответствующие разным положениям объекта контроля

Во избежание неопределённости элементы матриц рассеяния, измеренные во всех четырёх положениях объекта, необходимо преобразовывать в так называемые информативные параметры (ИП) трёх типов по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_{1j} &= (S_j^{(1)} + S_j^{(2)} + S_j^{(3)} + S_j^{(4)}) \\ P_{2j} &= \frac{1}{2} |S_j^{(1)} - S_j^{(2)} + S_j^{(3)} - S_j^{(4)}|, \\ P_{3j} &= \frac{1}{2} |S_j^{(1)} - S_j^{(3)}| + \frac{1}{2} |S_j^{(2)} - S_j^{(4)}|, \end{aligned} \quad (1)$$

где $S_j^{(k)}$, $k = \overline{1,4}$, $j = \overline{1,8}$ – модули и аргументы элементов матриц рассеяния $\dot{S}^{(1)}, \dot{S}^{(2)}, \dot{S}^{(3)}, \dot{S}^{(4)}$; первые четыре значения индекса j относятся к модулям указанных матриц, а остальные четыре – к их аргументам;

P_{1j} – ИП, представляющие средние по четырём матрицам значения соответствующих элементов матриц рассеяния;

P_{2j} – ИП, определяющие степень несимметричности дефектов объекта при повороте его на 90° (т.к. элементы соседних матриц рассеяния входят в выражения с противоположными знаками);

P_{3j} – ИП, определяющие степень несимметричности дефектов при повороте объекта на 180° (т.к. элементы «противоположных» матриц рассея-

ния входят в выражения с противоположными знаками).

Т.о., из 32-х элементов МР получается 24 ИП. Видно, что при циклической перестановке элементов матриц рассеяния, что соответствует изменению начального положения объекта при измерениях, значения ИП не меняются.

Для численного описания дефектов объекта контроля служат так называемые характеристики качества (ХК). Например, для керамической плитки, которая использовалась для экспериментальных исследований работы ЭС «Радиоконтроль», наиболее характерны три типа дефекта: скол, трещина и деформация. Каждый из них описывался двумя ХК (рис. 2 – 4).

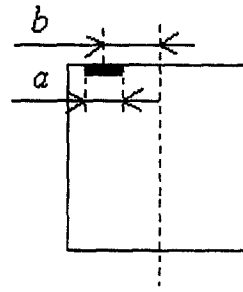


Рис. 2. – ХК дефекта типа «скол»

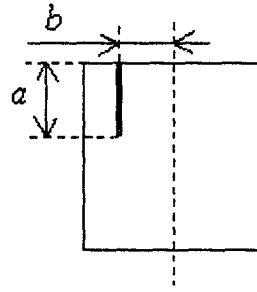


Рис. 3. – ХК дефекта типа «трещина»

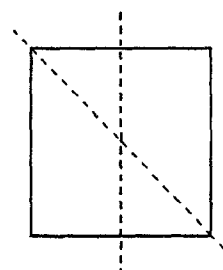


Рис. 4. – ХК дефекта типа «деформация»

Для дефекта типа «деформация» введено понятие центральной оси изгиба, крайние положения которой показаны на рис. 4 пунктиром, а ХК являются величина и направление изгиба.

Количество ХК, в принципе, может быть и другим.

Указанные ХК сведены в табл. 1. Эталонные значения ХК, обозначаемых символом a , определяют отсутствие на объекте дефекта соответствующего типа. ХК, обозначаемые символом b , имеют неопределённые эталонные значения. Одна-

ко, для однозначности они принимаются равными нулю.

Необходимо отметить, что все ХК, как и ИП, инвариантны относительно поворота плитки. Это видно непосредственно из их определений.

Для решения задач контроля качества необходимо установить связь между ХК объекта контроля и измеряемыми ИП. Эта связь ищется в виде добавочных функций – полиномов определённой степени. Для двух ХК они имеют следующий вид:

$$P = f(a, b) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} c_{ij} a^i b^j. \quad (2)$$

Неизвестные коэффициенты полиномов c_{ij} рассчитываются методом полиномиальной регрессии.

Обратимся к структурной схеме ЭС «Радиоконтроль», представленной на рис. 5. Она состоит из двух блоков: «Радио» и «Контроль». Первый блок осуществляет пересчёт данных измерений объекта контроля в матрицы рассеяния [3] (если матрицы рассеяния объекта контроля получены каким-либо другим способом, этот этап можно пропустить), а затем в ИП (1). Блок «Контроль» решает две главные задачи ЭС – обучение, когда по известным ИП и ХК строятся добавочные функции (2), и принятие решения, когда по известным ИП с помощью добавочных функций ищутся ХК. Эти задачи условно показаны на рис. 5, соответственно, цифрами «1» и «2».

Прямая задача ЭС (её обучение) сводится к построению областей ИП, соответствующих различным классам качества плитки, в 24-мерном пространстве ИП, и к нахождению коэффициентов добавочных функций c_{ij} (2). Области строятся исходя

из равномерного распределения значений ИП. Эти области представляют собой 24-мерные параллелепипеды, каждая грань которых есть доверительный интервал $[P_k - zS_k, P_k + zS_k]$, где $k = 0, 3$ – индекс, соответствующий номеру класса качества (0 – «эталон», 1 – «скол», 2 – «трещина», 3 – «деформация»), P_k – средние значения ИП, S_k – их среднеквадратические отклонения, z – аналог квантиля (для равномерного закона распределения $z = 1,73$) (рис. 6). Коэффициенты добавочных функций c_{ij} (2) рассчитываются методом полиномиальной регрессии, с использованием для решения систем линейных уравнений метода вращения.

При изменении обучающего множества объектов: добавлении новых измерений или удалении ошибочных, происходит переобучение ЭС, которое заключается в полном пересчёте всех добавочных функций и построении новых областей.

Знание точных значений ХК объекта не всегда необходимо. В связи с этим возможны три варианта постановки и решения обратной задачи ЭС (принятие решения):

- 1) Определение годности объекта (брак или норма).
- 2) Определение типа дефекта объекта контроля (скол, трещина, деформация, эталон).
- 3) Определение численных значений ХК объекта контроля, например, длина трещины, величина изгиба плитки и т.д.).

Основными правилами принятия решений (ППР) для всех вариантов обратной задачи являются следующие:

- 1) Определение годности объекта.

Для этого каждый из ИП (примем один из них за P) сравнивается с соответствующим эталонным

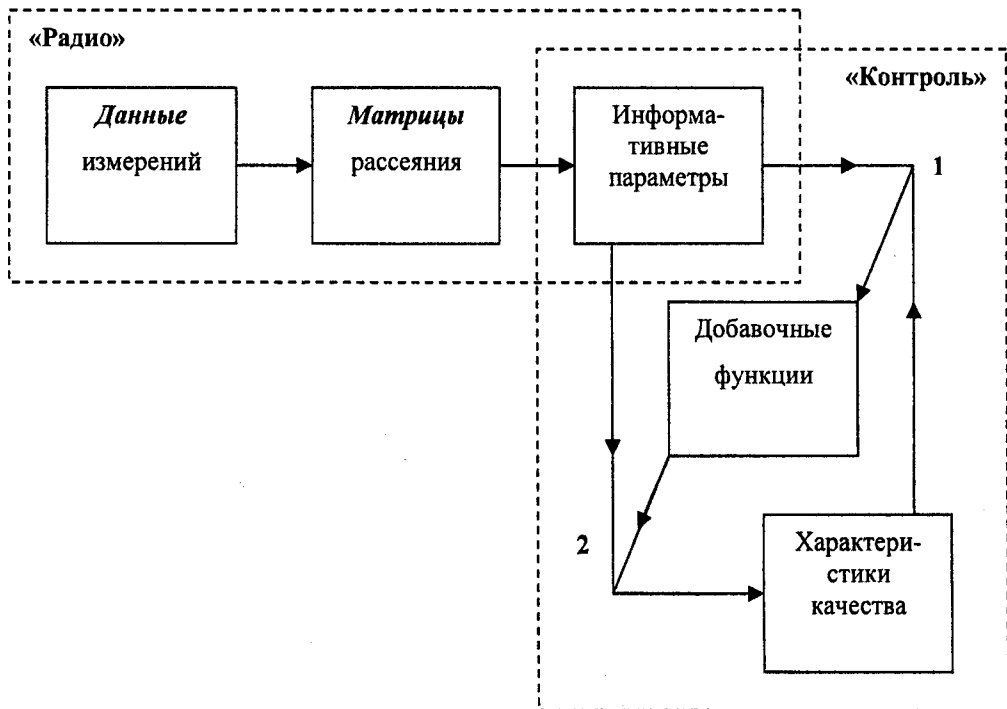


Рис. 5. – Структура ЭС «Радиоконтроль»

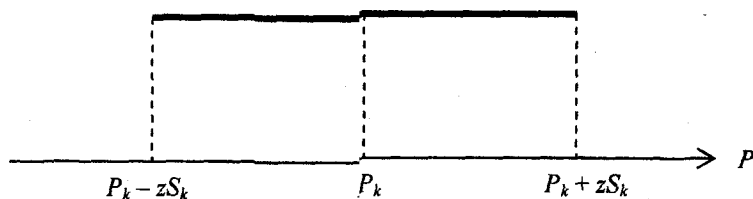


Рис. 6. – Плотность равномерного распределения вероятностей

значением P_0 . Если P попадает в эталонный интервал $[P_0 - zS_0, P_0 + zS_0]$, где S_0 – среднеквадратическое отклонение эталонного ИП, то по данному ИП выносится решение «норма». Если – нет, то по данному ИП выносится решение «брак». Если количество ИП, выдавших решение «брак», превышает некоторый порог, который определяется экспериментально на этапе обучения ЭС (для случая контроля керамической плитки он составил 33%), то объект относится к категории «брак».

2) Определение типа дефекта.

В этом случае каждый ИП по аналогии с предыдущим пунктом сравнивается не только со своим эталонным значением P_0 , но и с соответствующими средними значениями ИП всех типов дефектов P_k . При попадании значения P в какой-либо интервал $[P_k - zS_k, P_k + zS_k]$, по данному ИП выносится соответствующее решение. При попадании P в несколько интервалов (если интервалы пересекаются) проверяется, к центру какого интервала он ближе. Этот интервал принимается во внимание, остальные игнорируются. Если же P не попал ни в один из интервалов – никакого решения по данному ИП не выносится.

После проверки всех ИП подсчитывается, какое решение выносилось наибольшее количество раз. Это решение и является окончательным для данного объекта.

3) Расчёт ХК.

При решении этой задачи тип дефекта считается известным. Он либо выбирается пользователем ЭС, либо находится путём решения задачи предыдущего варианта.

Для случая двух ХК имеем 24 уравнения типа (2):

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} c_{ij} a^i b^j - P = 0,$$

где P – известный ИП;

c_{ij} – известные коэффициенты полинома;

a, b – неизвестные ХК, которые необходимо найти.

Для нахождения ХК достаточно двух уравнений. Используя различные пары уравнений, можно найти $C_{24}^2 = 276$ различных решений (число сочетаний из 24-х по 2).

Решение систем нелинейных уравнений осуществляется методом Ньютона-Рафсона. Этот метод требует задания вектора начальных приближений ХК (a_0, b_0). Начальные значения ХК задаются случайным образом из интервалов допустимых значений, определённых для каждой ХК (табл. 1). Очевидно, что при задании различных начальных приближений можно получить различные решения. Их число зависит от степени полинома n . Предполагается, что только одно из них по всем координатам (ХК) попадает в интервалы допустимых значений. Такое решение называется приемлемым. Если при решении системы уравнений результат получается неприемлемым, т. е. не попадает в область допустимых значений или расходится, производится другая попытка решить систему уравнений с другим вектором начальных приближений. И так до тех пор, пока приемлемое решение не будет найдено или до достижения определённого числа попыток (на практике использовалось 50 попыток).

Таким образом, число приемлемых решений оказывается меньшим (или равным) числа возможных. Разница между ними определяет степень «доверия» к найденным решениям.

По совокупности приемлемых решений строятся гистограммы распределения значений ХК (для каждой ХК отдельно). Искомое значение ХК находится в середине основания самого «высокого» столбца гистограммы, т. е. равно значению середины интервала группировки гистограммы, в кото-

1. Интервалы допустимых значений ХК

№	Наименование ХК	Тип дефекта	Эталонное значение ХК	Интервал допустимых значений ХК
1.	Ширина скола (a)	Скол	0	[0;1]
2.	Расстояние до скола (b)		[0,5;0,5]	
3.	Длина трещины (a)	Трещина	0	[0;1]
4.	Расстояние до трещины (b)		0	[-0,5;0,5]
5.	Величина изгиба (a)	Деформация	0	[-1;1]
6.	Направление изгиба (b)		0	[-0,5;0,5]

рый попало наибольшее число решений.

Описанные ППР использовались наряду с другими, в том числе, общепринятыми, такими, как принятие решения по минимальному евклидовому расстоянию в пространстве ИП $d = \sqrt{\sum (P - P_k)^2}$.

Однако, именно описанные ППР показали наилучший результат. В частности, ППР по минимальному евклидовому расстоянию оказалось малоэффективно из-за специфики областей ИП. Во-первых, они имеют различные размеры, а во-вторых – очень сильно пересекаются. Особенно это касается дефекта типа «скол».

Для принятия решения в любом из вариантов обратной задачи ЭС возможно использование не всех ИП, а только их части. При этом выбранный набор ИП можно характеризовать таким понятием, как его эффективность, т. е. процент правильных решений, принятых ЭС с использованием этого набора ИП. Тогда под эффективностью самой ЭС будем понимать наилучшую (максимально возможную) эффективность среди всех наборов ИП. Для нахождения наборов ИП с максимальной эффективностью служит процедура оптимизации, реализованная в виде программы [4], которая пере-

бирает все возможные наборы ИП, рассчитывая их эффективность. Стоит отметить, что таких наборов из 24-х ИП можно составить около 5 млрд.

Различные категории ИП обладают разной эффективностью. Это видно из диаграммы на рис. 7, где показаны эффективности различных категорий ИП для задачи «определение типа дефекта» до оптимизации.

Видно, что наибольшей эффективностью обладают фазовые ИП (86 %). Однако, заранее отбрасывать какую-либо категорию ИП нельзя. На второй диаграмме (рис. 8) показаны эффективности тех же категорий ИП для той же задачи после оптимизации.

Видно, что оптимизация, проведенная только по фазовым ИП даёт меньший эффект (89 %), чем оптимизация, проведенная по всем 24-м ИП (94 %).

На рис. 9, 10 продемонстрирована эффективность ЭС после оптимизации в зависимости от количества ИП в наборе для двух задач ЭС – определение годности изделия, и определение типа дефекта изделия.

Видно, что с первой задачей ЭС справляется с эффективностью, близкой к достоверной, при количестве ИП в наборе от 2-х до 15. Во втором слу-

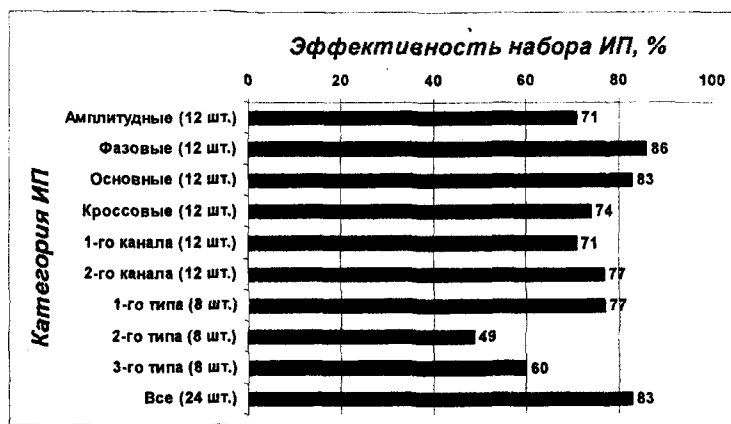


Рис. 7. – Эффективность различных категорий ИП до оптимизации (определение типа дефекта)



Рис. 8. – Эффективность различных категорий ИП после оптимизации (определение типа дефекта)

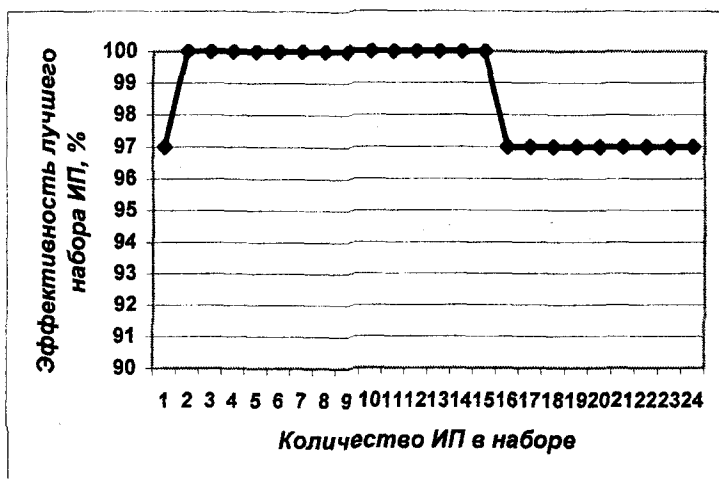


Рис. 9. – Эффективность ЭС после оптимизации в зависимости от количества ИП в наборе (определение годности объекта)

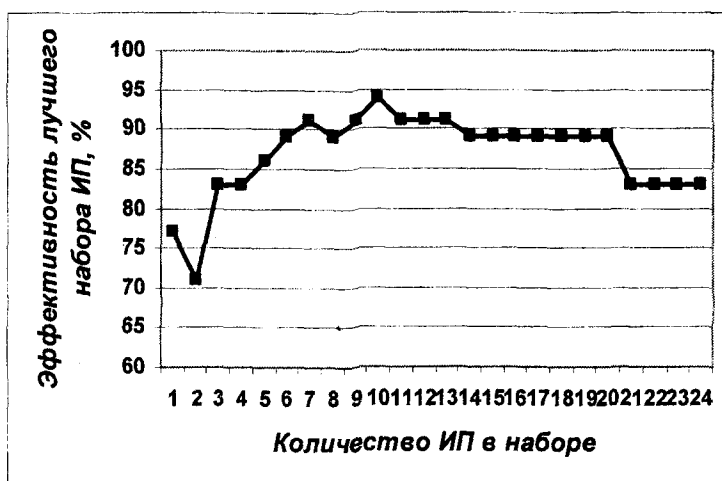


Рис. 10. – Эффективность ЭС после оптимизации в зависимости от количества ИП в наборе (определение типа дефекта)

чае наивысшую эффективность (94 %) дал набор из 10 ИП, который и был оставлен в качестве окончательного.

Что касается третьего варианта обратной задачи ЭС – определение ХК объекта контроля; то оценка погрешностей расчётов ХК позволяет говорить об удовлетворительной точности решения этой задачи.

По мере усложнения решаемой задачи качество работы ЭС, очевидно, снижается. Однако, на практике, например, при производстве керамической плитки или других СМИИ достаточно использовать самый простой режим работы ЭС (определение годности объекта), позволяющий с эффективностью, близкой к достоверной, отличать качественную продукцию от бракованной.

Литература:

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2-х книгах. Кн.1 / Под ред. В. В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 488 с.
2. Меркулов Д. В. Экспертная система «Радиоконтроль» / В. П. Авдеев, Д. В. Меркулов, А. В. Распопов. – М.: ВНИИЦ, 2002 – № 50200200079.
3. Меркулов Д. В. Измерение элементов матрицы рассеяния для радиоволнового контроля качества строительных материалов и изделий / В. П. Авдеев, А. В. Распопов, Д. В. Меркулов // Измерительная техника. 2001. №3. С.65–68. Библиогр.: с.68 (4 назв.).
4. Меркулов Д. В. Оптимизация информативных параметров экспертных систем / В. П. Авдеев, Д. В. Меркулов, А. В. Распопов. М.: ВНИИЦ, 2002 – № 50200200398.

УДК 691.433 - 431:620.179.18

А. В. Распопов

(Воронежский государственный архитектурно-строительный университет)
Россия, г. Воронеж, (0732)763972, e-mail: raspopov@newmail.ru

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ ПО ПАРАМЕТРАМ СВЧ ПОЛЯ

The model of non-destructive control of defects of a ceramic tile based on microwave field parameters is considered. The method of pattern's scattering matrix elements measurement is proposed. The basic relations between measurands and values allowing make some conclusions about presence of defects on the ceramic tile are presented. The block diagram of the radiowave control complex is shown. The software interface developed for supporting measurement results processing, for obtaining, registration and storing the sets of ceramic tile parameters is described. The basic results of experimental investigation are represented, and the conclusions about appropriateness of their applying for gauging of ceramic tiles are made.

На заводах строительной индустрии по производству строительных материалов и изделий контроль дефектов осуществляется в основном средствами визуального, разрушающего и контактного способов. В частности, на заводах керамической промышленности такой контроль осуществляется визуально на различных этапах производства. В ГОСТе [1] на данный контроль записано, что «... контроль внешнего вида плитки осуществляют визуально на расстоянии не более 1 м от глаза наблюдателя при рассеянном искусственном свете... Наличие невидимых трещин определяют на слух путем простукивания... показатели внешнего вида плиток контролируют штангенциркулем...». Естественно, что при поточном производстве визуальный контроль требует больших затрат ручного труда, малопроизводителен и неэффективен. Кроме того, достоверность его результатов субъективна, так как зависит от самочувствия, опыта и добросовестности контроллеров.

В данной работе рассматривается метод неразрушающего контроля дефектов керамической плитки по параметрам СВЧ поля.

Для описания взаимодействия СВЧ поля и объекта контроля (керамической плитки) считаем, что объект контроля является нагрузкой длиной линии. Поэтому при выводе основных соотношений для получения информации об объекте контроля использовалась следующая математическая модель взаимодействия объекта и поля.

Электромагнитная волна (ЭМВ) вторичного излучения от объекта контроля (рис. 1) и падающая на него зондирующая волна суммируются в приемном канале. В результате с учетом поляризации этот процесс можем представить в виде:

$$\begin{aligned} \vec{\varepsilon}^C(x, t) &= \sum_{m=1}^2 \vec{e}_m \varepsilon_m^C(x, t) = \\ &= \sum_{m=1}^2 \vec{e}_m \left[\dot{\varepsilon}_m^\Pi(x, t) + \dot{\varepsilon}_m^O(x, t) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{e}_m ($m=1,2$) – единичные орты базиса разложения ЭМВ, соответствующие двум поляризационно-ортогональным приемным каналам;

$\dot{\varepsilon}_m^C(x, t)$, $\dot{\varepsilon}_m^\Pi(x, t)$, $\dot{\varepsilon}_m^O(x, t)$ – ортогональные составляющие суммарной, падающей и отраженной ЭМВ соответственно;
 x – путь, пройденный ЭМВ;
 t – время.

При отсутствии затухания ЭМВ в каналах, падающую и отраженную волны с учетом их направлений распространения представим соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_m^\Pi(x, t) = \dot{E}_{m0}^\Pi e^{j(\alpha x + \beta t)} = E_{m0}^\Pi e^{j(\alpha x + \varphi_{m0}^\Pi + \beta t)}, \\ \dot{\varepsilon}_m^O(x, t) = \dot{E}_{m0}^O e^{j(\alpha x - \beta t)} = E_{m0}^O e^{j(\alpha x + \varphi_{m0}^O - \beta t)}, \end{cases} \quad (2)$$

где φ_{m0}^Π , φ_{m0}^O – фазы;

E_{m0}^Π , E_{m0}^O – амплитуды соответственно падающей и отраженной волн в месте расположения объекта контроля;

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – коэффициент фазы на заданной частоте ω ;

λ – длина волны;

$j = \sqrt{-1}$.

Связь между составляющими комплексных амплитуд падающей \dot{E}_{m0}^Π и отраженной \dot{E}_{m0}^O ЭМВ определяется матричным соотношением:

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_{10}^O \\ \dot{E}_{20}^O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{E}_{10}^\Pi \\ \dot{E}_{20}^\Pi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\dot{S}_{lm} = S_{lm} e^{j\varphi_{lm}}$ – комплексные элементы матрицы рассеяния;
 $l, m = 1, 2$.

Поляризационный параметр ортогонального разложения падающей на объект контроля ЭМВ соответственно имеет следующий вид:

$$\dot{P}_m^\Pi = P_m^\Pi e^{j\varphi_m^\Pi} = \frac{\dot{E}_{10}^\Pi}{\dot{E}_{20}^\Pi}, \quad (4)$$

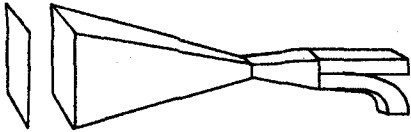


Рис. 1. – Зондирование объекта контроля с использованием рупорной двуполяризованной антенны

где $l, m = 1, 2, l \neq m$.

Амплитудно-фазовые соотношения в (1) зависят от координаты x , т. е. от расстояния от точки приема до объекта контроля. Их можно записать с учетом (2), (3), (4) в виде:

$$A_m(x_m) = A_m(x_m) e^{j\alpha_m(x_m)} = l + (\dot{S}_{mm} + \dot{S}_{ml} \dot{P}_m^{\Pi}) e^{-j2\beta x_m}, \quad (5)$$

где $\alpha_m(x_m) = \varphi_m^C(x_m) - \varphi_m^{C'}(x_m)$;

$$A_m(x_m) = \frac{E_m^C(x_m)}{E_m^{C'}(x_m)};$$

$E_m^C(x_m), \varphi_m^C(x_m)$ – амплитуда и фаза ортогональной составляющей суммарной ЭМВ в точке x_m подключения измерительного прибора в соответствующем поляризации-ортогональном канале (здесь и в дальнейшем штрих над какой-либо величиной показывает, что она рассматривается в режиме холостого хода, когда измерения проводятся в отсутствие объекта контроля).

В (5) координата x записана с индексом « m ». Тем самым учитывается представление суммарной волны в виде двух поляризации-ортогональных компонент.

Для краткости в дальнейших выражениях опустим аргумент x_m , стоящий в скобках. Разделяя вещественные и мнимые части в (5) и используя две различные поляризации зондирующей ЭМВ, получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} A_{ml} \sin \alpha_{ml} &= S_{mm} \sin(\varphi_{mm} - 2\beta x_m) + \\ &+ S_{ml} P_{ml}^{\Pi} \sin(\varphi_{ml} + \varphi_{ml}^{\Pi} - 2\beta x_m), \\ A_{ml} \cos \alpha_{ml} &= l + S_{mm} \cos(\varphi_{mm} - 2\beta x_m) + \\ &+ S_{ml} P_{ml}^{\Pi} \cos(\varphi_{ml} + \varphi_{ml}^{\Pi} - 2\beta x_m), \\ A_{mII} \sin \alpha_{mII} &= S_{mm} \sin(\varphi_{mm} - 2\beta x_m) + \\ &+ S_{ml} P_{mII}^{\Pi} \sin(\varphi_{ml} + \varphi_{mII}^{\Pi} - 2\beta x_m), \\ A_{mII} \cos \alpha_{mII} &= l + S_{mm} \cos(\varphi_{mm} - 2\beta x_m) + \\ &+ S_{ml} P_{mII}^{\Pi} \cos(\varphi_{ml} + \varphi_{mII}^{\Pi} - 2\beta x_m). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где индекс « I » относится к случаю измерения ЭМВ с параметром \dot{P}_{mI}^{Π} ;

индекс « II » – к случаю измерения ЭМВ с параметром \dot{P}_{mII}^{Π} .

После математических преобразований получено следующее аналитическое решение системы (6):

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{ml} &= 2\beta x_m + \arctg \frac{A_{ml} \sin \alpha_{ml} - A_{mII} \sin \alpha_{mII}}{A_{ml} \cos \alpha_{ml} - A_{mII} \cos \alpha_{mII}} - \\ &- \arctg \frac{P_{ml}^{\Pi} \sin \varphi_{ml}^{\Pi} - P_{mII}^{\Pi} \sin \varphi_{mII}^{\Pi}}{P_{ml}^{\Pi} \cos \varphi_{ml}^{\Pi} - P_{mII}^{\Pi} \cos \varphi_{mII}^{\Pi}} \pm \pi h_{m1}, \\ S_{ml} &= \frac{A_{ml} \cos \alpha_{ml} - A_{mII} \cos \alpha_{mII}}{P_{ml}^{\Pi} \cos(\varphi_{ml} + \varphi_{ml}^{\Pi} - 2\beta x_m) - P_{mII}^{\Pi} \cos(\varphi_{ml} + \varphi_{mII}^{\Pi} - 2\beta x_m)}, \\ \varphi_{mm} &= 2\beta x_m + \arctg \frac{A_{ml} \sin \alpha_{ml} - S_{ml} P_{ml}^{\Pi} \sin(\varphi_{ml} + \varphi_{ml}^{\Pi} - 2\beta x_m)}{A_{ml} \cos \alpha_{ml} - S_{ml} P_{ml}^{\Pi} \cos(\varphi_{ml} + \varphi_{ml}^{\Pi} - 2\beta x_m)} - 1 \pm \pi h_{m2}, \\ S_{mm} &= \frac{A_{ml} \sin \alpha_{ml} - S_{ml} P_{ml}^{\Pi} \sin(\varphi_{ml} + \varphi_{ml}^{\Pi} - 2\beta x_m)}{\sin(\varphi_{mm} - 2\beta x_m)}, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где $l, m = 1, 2, l \neq m; h = 0, 1, 2, \dots$

Полученные соотношения позволяют измерять амплитудно-фазовые значения элементов матрицы рассеяния. Основное отличие предложенного способа измерения элементов матрицы рассеяния от классических [2] – расчет элементов ведется по результатам измерения амплитуд и фаз суммарной ЭМВ в двух взаимно-ортогональных каналах радиоволновой установки. Основное преимущество – данный способ учитывает набег фаз из-за неодинаковости расстояний от точек подключения измерительных приборов до объекта контроля, тем самым, давая возможность иметь точное представление о поляризации зондирующей ЭМВ. Нахождение координат x_1 и x_2 этих точек является задачей калибровки. Калибровку необходимо осуществлять в двух режимах – в режиме холостого хода (когда нет нагрузки в линии) и в режиме короткого замыкания, когда вместо керамической плитки используется лист металла.

При практической реализации рассматриваемого способа измерения элементов матрицы рассеяния целесообразно выбирать зондирующие ЭМВ с ортогонально-круговыми поляризациями. Расчетные выражения для этого частного случая представлены в [3].

Для контроля дефектов керамической плитки представляет интерес также измерение электрофизических и импедансных параметров, несущих информацию о свойствах материала. Известно, что определение электрофизических параметров часто сводится к нахождению взаимосвязи между ними и коэффициентом отражения (КО), который затем определяется экспериментально тем или иным способом.

В [4] были получены следующие расчетные выражения для нахождения КО керамической плитки:

$$\begin{cases} \varphi^H = 2\beta x + \arctg\left(\frac{A(x) \sin \alpha(x)}{A(x) \cos \alpha(x) - 1}\right) \pm \pi h_3, \\ \Gamma^H = \frac{A(x) \sin \alpha(x)}{\sin(\varphi^H - 2\beta x)}, \end{cases} \quad (8)$$

где φ^H и Γ^H – соответственно, фаза и модуль КО на нагрузке (объект контроля);

$$A(x) = \frac{U^C(x)}{U^{C'}(x)}, \alpha(x) = \varphi^C(x) - \varphi^{C'}(x);$$

$U^C(x), \varphi^C(x)$ – амплитуда и фаза суммарной ЭМВ.

Используя формулы Френеля для поглощающей излучение среды при нормальном падении [5], были получены [4] следующие зависимости между электрофизическими, импедансными параметрами керамической плитки и найденным КО:

$$\begin{aligned} n &= \frac{1 - (\Gamma^H)^2}{1 + (\Gamma^H)^2 + 2\Gamma^H \cos \varphi^H}, \\ k &= \frac{-2\Gamma^H \sin \varphi^H}{1 - (\Gamma^H)^2}, \\ \varepsilon &= \frac{[1 - (\Gamma^H)^2]^2 - 4(\Gamma^H)^2 \sin^2 \varphi^H}{[1 + (\Gamma^H)^2 + 2\Gamma^H \cos \varphi^H]^2}, \\ \sigma &= \omega \frac{4\Gamma^H \sin \varphi^H [1 - (\Gamma^H)^2]}{[1 + (\Gamma^H)^2 + 2\Gamma^H \cos \varphi^H]^2}, \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{4\Gamma^H \sin \varphi^H [1 - (\Gamma^H)^2]}{[1 - (\Gamma^H)^2]^2 - 4(\Gamma^H)^2 \sin^2 \varphi^H}, \\ \psi^H &= \arctg\left(\frac{2\Gamma^H \sin \varphi^H}{1 - (\Gamma^H)^2}\right) \pm \pi h_4, \\ z^H &= \frac{\Gamma^H \sin \varphi^H}{\sin \psi^H - \Gamma^H \sin(\psi^H + \varphi^H)}, \end{aligned}$$

где n – показатель преломления;
 k – коэффициент поглощения;
 ε – диэлектрическая проницаемость;
 σ – проводимость среды;
 $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 ψ^H, z^H – модуль и фаза полного нормированного сопротивления на нагрузке.

Используя также классические зависимости, можно получить дополнительно коэффициент бегущей волны, поляризационный параметр ортогонального разложения отраженной ЭМВ, ее геометрические параметры (коэффициент эллиптичности, угол ориентации) и др. величины.

Измерительный комплекс, позволяющий вести обработку сигнала по найденным формулам (7), (8), (9), должен:

- иметь совмещенные приемный и передающий каналы, т. е. поддерживать режим однопозиционной локации;

- иметь возможность изменения поляризации зондирующей ЭМВ;

- измерять в прямо-передающих каналах амплитудно-фазовые параметры суммарной ЭМВ.

Автором данной статьи был создан такой измерительный комплекс, работающий в СВЧ диапазоне. В структуру комплекса (рис. 2) входят: 1 – генератор СВЧ излучения с источником питания; 2,3 – ортогональные линейно-поляризованные волноводные каналы; 4 – опорный канал; 5 – скрутка; 6 – аттенюатор; 7 – фазовращатель; 8 – автоматический фазовращатель; 9 – вентиль; 10 – тройник; 11 – поляризационный расщепитель; 12 – рупорная прямо-передающая антенна; 13 – амплифазометр; 14 – ЭВМ.

СВЧ генератор 1 (длина волны – 3 см) выполнен на диоде Ганна и имеет габаритные размеры 55*33*20 мм. Ортогональные линейно-поляризованные каналы 2, 3 представляют волноводные тракты сечением 23*10 мм. Ортогональность поляризаций излучаемых и принимаемых ЭМВ достигается в них за счет поворота волновода одного из каналов (скрутка 5) в Н-плоскость. Для изменения параметров поляризации зондирующей ЭМВ в передающих каналах 2, 3 установлены стандартные механические аттенюаторы 6 и фазовращатель 7, позволяющие настраивать комплекс на заданную поляризацию излучения, а также проводить его калибровку. Для переключения поляризации излучения на ортогональную в канал 3 включен автоматический фазовращатель 8 с электронным переключением. Работа фазовращателя засинхронизирована с работой ЭВМ 14. Интерфейс связи фазовращателя 8 с ЭВМ аппаратно представляет собой стандартный цифро-аналоговый преобразователь, сигнал которого передается в соответствии с программой переключения поляризации излучения. Для разделения ЭМВ в поляризационно-ортогональных и опорном каналах используются Е и Н тройники 10. Для суммирования излучаемых ортогонально-поляризованных волн и разделения принимаемой ЭМВ на две ортогонально-поляризованные волны используется поляризационный расщепитель 11. Он представляет собой два волновода, соответственно развернутых в плоскостях Е и Н, и переходящих в квадратный волновод сечением 18 мм. Прямо-передающие СВЧ тракты заканчиваются рупорной антенной 12. Апертура рупорной антенны выбрана в соответствии с геометрическими размерами исследуемой керамической плитки. Для измерения амплитуд и фаз в каналах используются амплифазометры типа ФК2-19. Обработка результатов измерения и выдача необходимой информации осуществляется персональ-

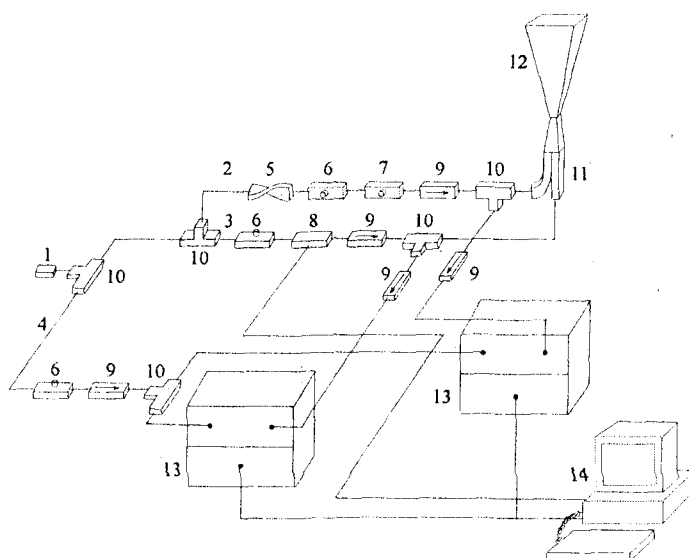


Рис. 2. – Структурная схема измерительного комплекса

ной ЭВМ, на порты которой подаются сигналы от амплифазометров. Для сопряжения ЭВМ и амплифазометров использован интерфейс, разработанный и изготовленный в 5-м ЦНИИ МО РФ (г. Воронеж). С целью уменьшения влияния на работу генератора СВЧ и амплифазометров переотражений от элементов тракта применяются однонаправленные вентили 9.

Методика измерений в радиоволновом комплексе сводится к следующему:

- с учетом неидентичности длин каналов, выявленной при калибровке, проводится расчет поляризационных параметров \dot{P}_{ml}^{Π} и \dot{P}_{mll}^{Π} ортогонального разложения для получения двух заданных поляризаций падающей на объект контроля ЭМВ;

- с помощью аттенуаторов и фазовращателя в измерительных каналах выставляется рассчитанная в предыдущем пункте первая поляризация падающей ЭМВ;

- проводится измерение падающей ЭМВ в режиме холостого хода;

- проводятся измерения в рабочем режиме для данного объекта контроля;

- с помощью автоматического фазовращателя выставляется вторая рассчитанная поляризация падающей ЭМВ;

- проводится измерение падающей ЭМВ в режиме холостого хода;

- проводятся измерения в рабочем режиме для данного объекта контроля;

- используя измеренные величины, по формулам (7), (8), (9) определяются остальные параметры, характеризующие объект контроля.

Управление работой измерительного комплекса, процесс обработки, визуализации и хранения информации обеспечивается персональной ЭВМ с соответствующим набором периферийных устройств. Для связи приемно-передающей части измерительного комплекса с ЭВМ разработан специ-

альный программный интерфейс. Он включает набор следующих программ:

- программа «Experiment» обеспечивает программно-логическую связь амплифазометров ФК2-19 и ЭВМ, а также организует интерфейс пользователя при проведении экспериментов с помощью измерительного комплекса;

- в качестве алгоритма расчетов в программе «Raschet» (рис. 3) используются соотношения (7), (8), (9) параметров СВЧ поля, по которым принимается решение о наличии или отсутствии дефектов контролируемой плитки;

- программы «ProgKalibr» и «ProgIzmer» находят, соответственно, погрешности калибровки и величин, рассчитанных с помощью программы «Raschet»;

- программа «Stat» предназначена для вывода на экран графических изображений величин, рассчитанных с помощью программы «Raschet». Прямоугольные области, изображенные на рис 4, предназначены для удобства восприятия. Их центрами являются точки с координатами, равными средним значениям соответствующих величин. Стороны прямоугольников – удвоенные произведения коэффициента 1,73 на среднеквадратические отклонения этих величин.

Как видно из рис. 4 существует проблема перекрытия зон значений поляризационных параметров отраженной волны плиток различного качества. Для ее решения необходимо использовать методы распознавания образов, которые лучше всего реализуются в виде экспертной системы или самообучающейся системы основанной на нейросетевых принципах.

Обработка результатов двух экспериментальных исследований «March02» и «June02» работы радиоволнового комплекса, была проведена с использованием экспертной системы «Радиоконтроль» [6] и программы «Оптимизация информативных параметров экспертных систем» [7]. Более

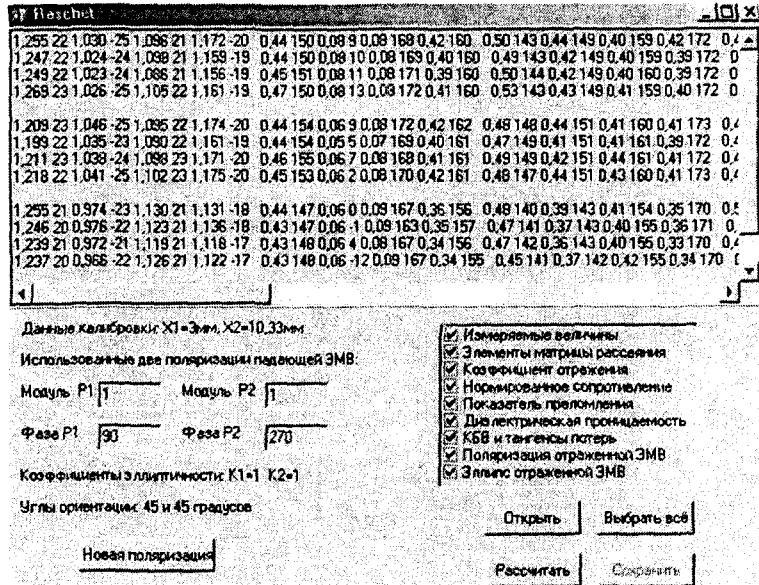


Рис. 3. – Экранный интерфейс пользователя программы «Raschet»

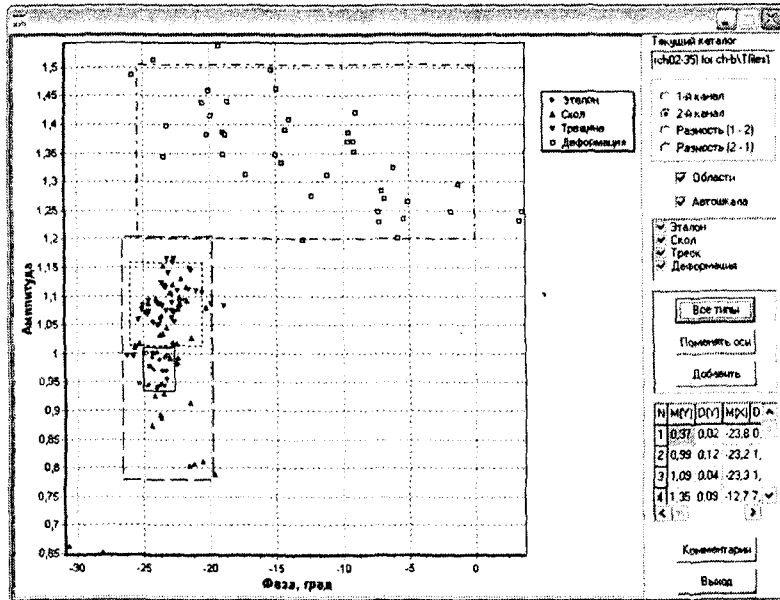


Рис. 4. – Экранный интерфейс пользователя программы «Stat» на примере эксперимента «March02» для первой поляризации зондирующей электромагнитной волны

ранние эксперименты, проведенные в одноканальном режиме, рассмотрены в [8].

Результаты экспериментальных исследований показали следующее:

- наибольшее отличие от параметров эталонных плиток имеется у параметров деформированных плиток, а наименьшее – у плиток со сколами;
- важны как фазовые, так и амплитудные параметры, при этом для оптимального контроля дефектов керамической плитки необходимо зондировать объект контроля поочередно ЭМВ с двумя различными поляризациями и получать двухканальную (поляризационную) информацию об объекте;
- используя результаты экспериментальных исследований, экспертная система «Радиоконтроль»

позволяет с высокой эффективностью отличать бракованные плитки от годных, что особенно актуально для заводов по производству керамических плиток, а также определять тип дефекта бракованной плитки.

Предлагаемый радиоволновый способ контроля дефектов может быть применен в реальном производстве керамической плитки для определения качества готовой продукции. Кроме того, с его помощью возможно внесение корректив в производственный процесс с целью уменьшения процента бракованных изделий, путем установления взаимосвязи между различными параметрами производства и качеством готовой продукции. Методология, изложенная в данной статье, может быть примени-

ма для контроля дефектов строительных материалов и изделий различного характера и назначения.

Литература:

1 Плитки керамические. Методы испытаний: ГОСТ 27180-86.

2 Канарейкин Д. Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.

3 Авдеев В. П. Измерение элементов матрицы рассеяния для радиоволнового контроля качества строительных материалов и изделий / В. П. Авдеев, А. В. Распопов, Д. В. Меркулов // Измерительная техника. 2001. №3. С.65-68. Библиогр.: с.68 (4 назв.).

4 Авдеев В. П. О возможности использования длинных линий для контроля качества строительных материалов и изделий / В. П. Авдеев, А. В. Распопов, Д. В. Меркулов // Информационная

среда вуза: Сб. статей / VII Международная научно-техническая конференция, Иванов. гос. архит.-строит. акад. Иваново, 2000. Вып. 7. С.100-104. Библиогр.: с.103-104 (3 назв.).

5 Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: ГИФМЛ, 1963. 404 с.

6 Экспертная система «Радиоконтроль» / В. П. Авдеев, Д. В. Меркулов, А. В. Распопов // Инвентарный номер ФАП – 1866. Инвентарный номер ВНТИЦ – 50200200079.

7. Оптимизация информативных параметров экспертных систем / В. П. Авдеев, Д. В. Меркулов, А. В. Распопов // Инвентарный номер ФАП – 2064. Инвентарный номер ВНТИЦ – 50200200398.

8 Авдеев В. П. Исследования качества керамической плитки радиоволновым методом / В. П. Авдеев, А. В. Распопов, Д. В. Меркулов // Строительные материалы. 2000. №8. С.38-39. Библиогр.: с.39 (6 назв.).

УДК 624.012.35:524.1

Асп. В. И. Поляков

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (0862) 763992.

КОНТРОЛЬ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ, ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВИБРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

In this paper problems of control through a vibrating method of quality parameters for prestressed reinforced concrete plates are considered.

Современные методы контроля качества железобетонных конструкций широко применяются для исследования их физико-механических характеристик как при изготовлении, так и в период эксплуатации. Из всего объема продукции, выпускаемой предприятиями строительной индустрии, сборные железобетонные конструкции являются наиболее распространенными. Поэтому проблема контроля качества и надежности выпускаемой продукции остается актуальной. Регламентируемые ГОСТ 8829-94 статические испытания железобетонных конструкций проводятся в заводских условиях с целью установления их основных параметров качества: прочности, жесткости и трещиностойкости. Такие испытания проводятся на определенной выборке из партии изделий, по результатам которых судят о качестве всей партии. Основными недостатками этого метода являются: отсутствие гарантии надежности и качества всех неиспытанных изделий из контрольной партии, нетехнологичность и неэкономичность

метода, требующего разрушения большого количества изделий.

Неразрушающие методы контроля, в частности вибрационные, позволяют избавиться от недостатков, присущих разрушающим методам контроля. Но, несмотря на очевидные преимущества и определенные достижения в развитие этих методов, в настоящее время они не находят должного применения на предприятиях строительной индустрии. Кроме того, в нашей стране отсутствует стандарт на применение вибрационных методов для контроля физико-механических характеристик и оценки качества строительных конструкций. Одной из основных причин такого положения является отсутствие надежной методологической базы, основанной на фундаментальных закономерностях строительной механики. Также установлено, что на характеристики прочности, жесткости и трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных конструкций существенное влияние оказывает величина предварительного напряжения арма-

туры. Хотя это не единственный фактор, в той или иной степени влияющий на качество готовой продукции, его можно рассматривать как важнейший. Однако до настоящего времени не разработаны эффективные экспериментальные методы определения величины преднапряжения арматуры в готовом изделии. Метод прямого тензометрирования арматуры не может быть использован в массовом производстве ввиду его большой сложности и трудоемкости. Магнитометрический способ позволяет определить напряжение в свободной (не забетонированной) арматуре. Поэтому совершенствование и применение вибрационных методов для контроля прочностных и деформативных показателей и интегральной оценки величины предварительного напряжения арматуры железобетонных конструкций, изучение и уточнение взаимосвязей контролируемых параметров качества с вибрационными характеристиками конструкций является актуальной задачей, имеющей важное хозяйственное значение.

В работах В.И. Коробко [1] была установлена закономерность, связывающая величину максимального прогиба w_0 с основной частотой колебаний упругой однопролётной балки ω :

$$w_0 \omega^2 = i,279q / m \approx 4 / \pi \times q / m, \quad (1)$$

где q – распределенная нагрузка;
 m – погонная масса балки.

Произведение $w_0 \omega^2$ в выражении (1) не зависит от изгибной жёсткости балки и поэтому применимо для железобетонных плит, изготовленных с различной степенью натяжения арматуры и работающих в упругой стадии под действием кратковременной нагрузки.

Используя эту закономерность, методами строительной механики и сопротивления материалов было получено функциональное соотношение для определения основной частоты колебаний балочной конструкции в случае действия на нее продольной равномерно распределённой нагрузки q_{np} , приложенной с эксцентриситетом e (в виде интенсивности усилий, передаваемых на бетон от арматуры):

$$\omega = \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^2 \sqrt{\frac{(EI)^*}{m}} = \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \times \sqrt{\frac{1 - q_{np}\ell / (2P_3)}{1 - q_{np}/q \times 3,2e/\ell}}, \quad (2)$$

где $P = q_{np}\ell / 2$;

$P_{кр} = (q_{np}\ell / 2)_{кр} = \pi^2 EI / (0,56\ell)^2$ – критическая сила при потере устойчивости балки;

$(EI)^*$ – изгибная жёсткости балки с учётом влияния на них силы предварительного сжатия P и

включения в работу напрягаемой арматуры; остальные обозначения общеприняты в строительной механике.

Переходя к величине предварительного напряжения, получим:

$$\sigma_0 = \frac{q_{np}\ell}{\sum A_a} = 2P_3 \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right) / \sum A_a = \frac{8m\ell^2}{\sum A_a} (f_0^2 - f^2), \quad (3)$$

где $\sum A_a$ – сумма площадей всех напрягаемых стержней арматуры;

f – техническая частота свободных колебаний плиты.

Выражение (3) является по существу математической моделью для определения преднапряжения в предварительно напряженных конструкциях.

С учетом полученных теоретических результатов разработаны два способа оценки прочности, жёсткости и трещиностойкости железобетонных конструкций балочного типа.

Сущность первого из них состоит в том, что изготавливается эталонная конструкция, которая испытывается тремя степенями нагрузки, соответствующим контрольным нагрузкам по жесткости $[P_w]$, трещиностойкости $[P_{тр}]$ и прочности $[P_{пр}]$. Для конструкции в ненагруженном состоянии и для каждой степени нагружения определяются основные частоты колебаний: $f_0, f_w, f_{пр}, f_{тр}$. По полученным результатам строится аппроксимирующая функция $f - P$ в виде полинома третьей степени. Пригодность контролируемого изделия к эксплуатации устанавливаются путем сопоставления его резонансной частоты колебаний с резонансной частотой колебаний эталонного изделия, определяемой по аппроксимирующей кривой при действии $P \leq [P_{тр}]$.

Недостаток рассмотренного способа заключается в том, что с его помощью производится отбраковка всех изделий, которые были изготовлены по минимально возможному допускам.

С целью преодоления указанного недостатка разработан другой способ испытания. Отличие его от первого состоит в построении двух эталонных аппроксимирующих кривых по данным испытаний. При этом одна кривая соответствует плите, изготовленной с учётом минимально допустимых требований по жёсткости, трещиностойкости и прочности (плита П1-4), другая (эталонная конструкция) – с учётом средние допустимых требований (плита П1-3) (см. рис. 1).

Методика контроля плит по второму способу аналогична приведённой выше. Отбраковка изделий осуществляется в том случае, если по результатам испытаний плит серийного изготовления их частоты колебаний окажутся ниже кривой, соот-

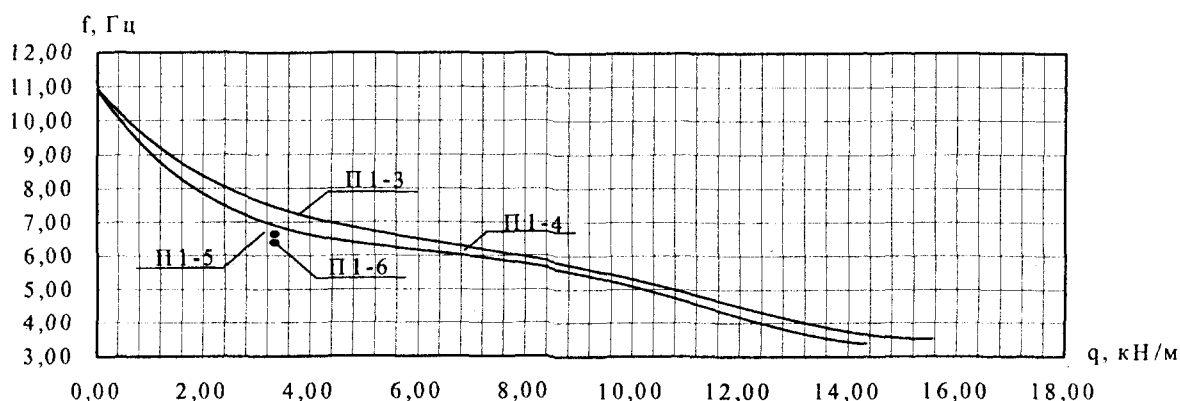


Рис. 1. – Аппроксимирующие кривые, связывающие основную частоту колебаний f и поперечную нагрузку q плит пустотного настила

ветствующей плите, выполненной по минимальным допускам.

В качестве примера рассмотрим реализацию метода на примере плит серии ПК8-58-12. Эталонные кривые были построены по экспериментальным данным для плит П1-3 (изготовлена в соответствии с требованиями к данному типу конструкций) и П1-4 (изготовлена с учетом минимально-допустимых требований к данному типу конструкций). Эталонная кривая для первой и второй плиты описывается соответственно уравнениями:

$$f = 0,0006P^4 - 0,0224P^3 + 0,2808P^2 - 1,7488P + 10,92 \text{ (Гц)},$$

$$f = 0,001P^4 - 0,0336P^3 + 0,4023P^2 - 2,1979P + 10,89 \text{ (Гц)}.$$

На графике (рис. 1) изображены эталонные кривые, точками обозначены частоты колебаний плит П1-5 и П1-6. Значение частот колебаний плит П1-5 и П1-6, которые были изготовлены с меньшим преднапряжением, не попадают в область, ограниченную двумя эталонными кривыми. Следовательно, они не соответствуют требованиям жёсткости,

трещиностойкости и прочности, предъявляемым к данному типу конструкций, и не пригодны к эксплуатации.

Принципиальная схема для проведения вибрационных испытаний конструкций и стенд представлены на рис. 2. Испытание конструкций осуществлялось в следующей последовательности:

- контролируемая конструкция устанавливается на опоры;
- подключаются устройства возбуждения и регистрации колебаний;
- возбуждаются вынужденные поперечные колебания и регистрируется резонансная частота колебаний.

Результаты испытаний плит пустотного настила представлены на рис. 3 и 4. Как видно из графика (рис. 3), увеличение предварительного напряжения арматуры в пределах от $0,8\sigma_0$ до $1,2\sigma_0$ приводит к увеличению основной частоты колебаний конструкций при всех ступенях нагружения.

На графике (рис. 4) представлены три наиболее характерные кривые: 1 – для эталонной плиты, 2 – для плиты № 2, у которой $\sigma_{sp} = 0,9\sigma_0$, 3 – для плиты

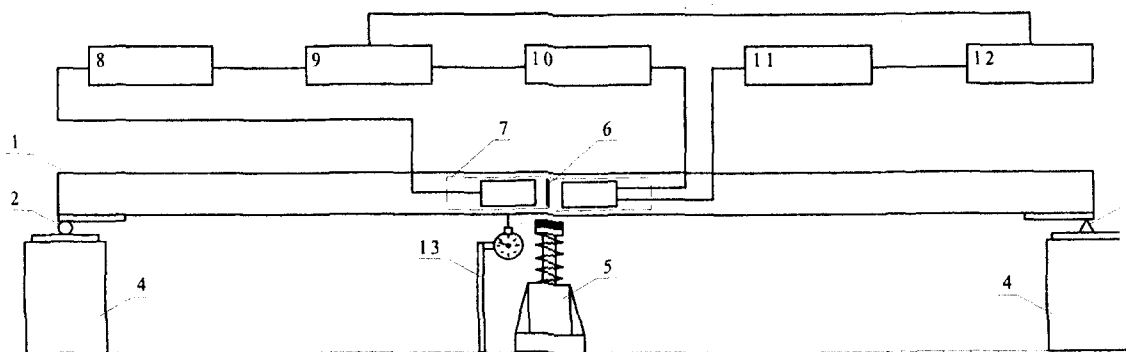


Рис. 2. – Схема испытаний конструкций в режиме поперечных колебаний:

- 1 – испытываемое изделие; 2, 3 – подвижная и неподвижная шарнирные опоры; 4 – силовая опора; 5 – ударное устройство; 6 – модулирующий элемент; 7 – преобразователь виброперемещений; 8 – устройство для формирования тока накачки излучателя; 9 – устройство синхронизации; 10 – источник обратного напряжения фотоприёмника; 11 – согласующий усилитель; 12 – регистрирующее устройство; 13 – прогибомер часового типа

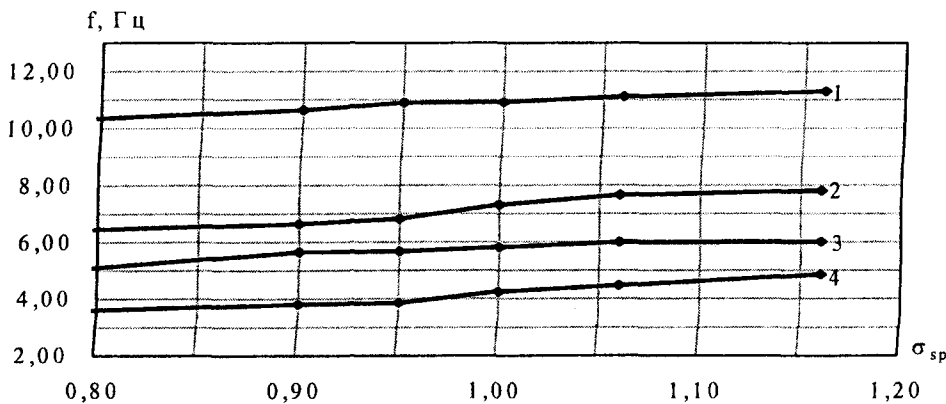


Рис. 3. – График зависимости основной частоты колебаний от степени напряжения арматуры

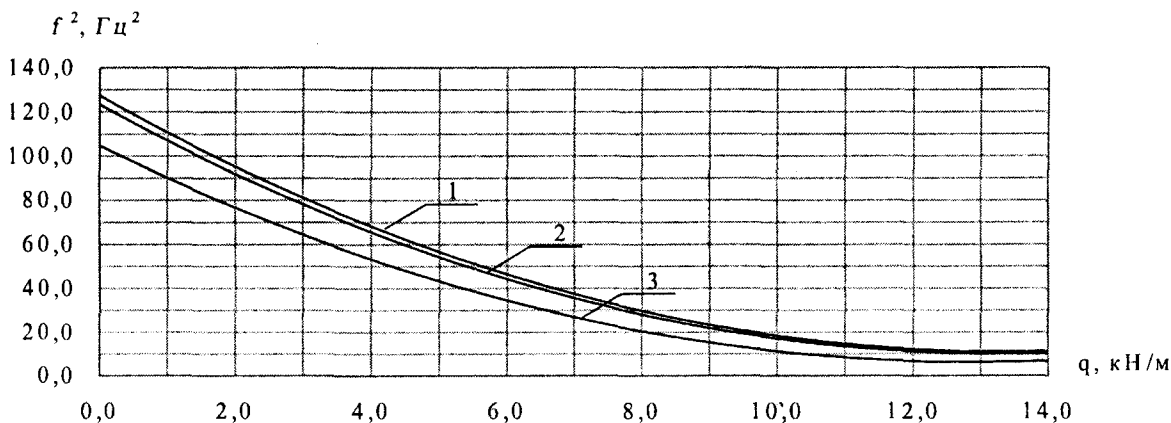


Рис. 4. – График зависимости квадрата резонансной частоты колебаний плит перекрытий от действующих на них нагрузок

№ 6, у которой $\sigma_{sp} = 0,8\sigma_0$. Как видно из графика, в диапазоне нагрузок от 0 до 10 кН/м характер изменения кривых приблизительно одинаков, однако градиент изменения частоты колебаний для менее напряженных плит оказывается меньшим.

В связи с полученными результатами можно дать следующие рекомендации для проведения испытаний рассматриваемыми способами. При контроле качества конструкций, в которых не допускается появление трещин, пригрузку нужно производить нагрузкой близкой (но не превосходящей) к контрольной нагрузке по трещиностойкости. При контроле конструкций, в которых допускается кратковременное раскрытие трещин, величина пригруза может быть примерно равна величине контрольной нагрузки по раскрытию трещин.

Ранее в работах Г.Н. Слюсарева и А.А. Павленко [2, 3] рассматривалось использование продольных колебаний для диагностики железобетонных конструкций. Однако не приводилось никаких функциональных зависимостей, а испытания проводились на моделях – железобетонных балках.

Используя известные из технической литерату-

ры зависимостями для определения основной частоты колебаний балок при продольных и поперечных колебаниях и закономерность (1), были получены выражение, связывающее частоту продольных и поперечных колебаний:

$$\omega_{np} = \omega_{из} \frac{\ell}{\pi} \sqrt{\frac{A}{I}}, \quad (4)$$

где ω_{np} и $\omega_{из}$ — резонансные частоты продольных и изгибных колебаний;

I – момент инерции сечения;

A – площадь сечения.

Используя закономерность (1) было получено выражение для определения максимального прогиба балочных конструкций по частоте продольных колебаний:

$$w_0 = 1,268 \frac{q}{m} \left(\frac{l}{\pi}\right)^2 \frac{EA}{EI} \frac{1}{\omega_{np}^2}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости.

Это выражение позволяет судить о жесткости конструкции.

Для проверки этих положений проводились испытания плиты дорожного покрытия в режиме

продольных колебаний. При этом пригодность серийной конструкции к эксплуатации осуществлялась также путём сравнения значений её параметров (частоты f и декремента колебаний δ) с соответствующими параметрами для эталонной железобетонной плиты.

Графическое представление результатов испытаний плит дорожного покрытия в режиме продольных колебаний показано на рис. 5 и 6. На графиках цифрами 1, 2 и 3 обозначены соответственно характеристики плит №1, №2 и №3.

превышающей эту величину. В связи с этим не рекомендуется использовать декремент колебаний в качестве критерия, для контроля качества дорожного покрытия.

Предложенные методы вибрационного контроля по сравнению с существующими в настоящее время методами статических испытаний позволяют не только снизить трудоёмкость контроля в целом, но и повысить достоверность результатов при распространении их на всю контролируемую партию.

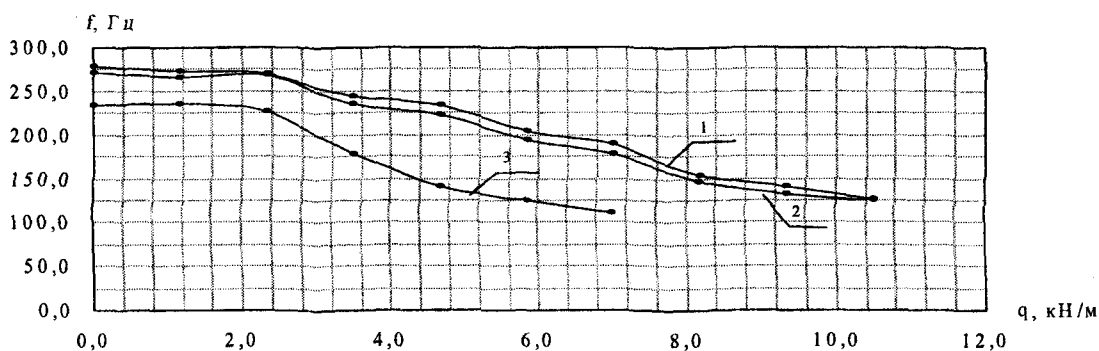


Рис. 5. – График зависимости резонансной частоты продольных колебаний от интенсивности поперечной нагрузки

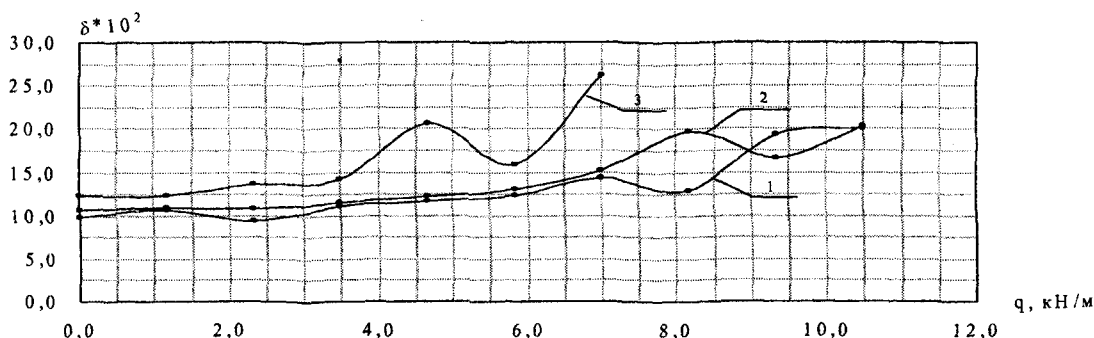


Рис. 6. – График зависимости декремента затухания продольных колебаний от интенсивности поперечной нагрузки

Анализируя эти графики, можно заключить, что из трёх рассматриваемых конструкций наименее добротной является дорожная плита №3, изготовленная с натяжением 50 % арматурных стержней. У неё для всех ступеней прикладываемой нагрузки q резонансная частота f ниже, а декремент колебаний δ выше аналогичных параметров других плит, применяемых в качестве эталонных образцов (плиты №1 и №2). Плиты №1 и №2 по своим характеристикам отличаются друг от друга незначительно.

Также необходимо отметить, что достаточно монотонный рост декремента колебаний при действии на плиту распределённой нагрузки, не превышающей контрольную нагрузку по трещиностойкости, нарушается при действии нагрузки,

Литература:

1. Коробко В. И., Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода. Т.1. М.: АСВ, 1997. 396 с.
2. Слюсарев Г.Н. Модифицированный вибрационный метод интегральной оценки качества железобетонных изделий с применением продольных колебаний // Изв. Вузов. Строительство, 1995. № 5-6. С.122 – 125.
3. Павленко А.А. Развитие и совершенствование вибрационного метода контроля качества предварительно напряженных изгибаемых железобетонных конструкций в виде плит. Диссертация канд. техн. наук, Орел, 2000.

УДК 666.972.031.1-52

Д-р техн. наук, проф. А. И. Суздальцев,
асп. Д. В. Лихачев
(Орловский государственный технический университет)
г. Орел, тел. (0862)770154; e-mail: likhachevdi@yandex.ru

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ПРОГНОЗИРУЕМОЙ МОДЕЛЬЮ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

The method of concrete mix design with final product quality forecasting model based on fuzzy logic models is given in this article.

Технологический процесс приготовления бетонной смеси, включая подбор состава и лабораторные испытания, занимает около 30 суток. Его можно условно разделить на 2 части (фазы): подготовительную и производственную [1].

Подготовительная фаза включает в себя: подбор состава смеси с учетом полученных опытным путем характеристик ее компонент, с последующим изготовлением опытных образцов, по которым принимается решение о принятии данного состава в промышленное производство. В случае отрицательного результата испытаний подготовительная фаза повторяется, с учетом полученных данных в количественный или качественный состав смеси вносятся изменения и далее изготовленные образцы вновь испытываются. Факторы, влияющие на отрицательный результат на первом этапе: ошибки при расчете состава бетонной смеси и некорректно проведенные измерения параметров компонент бетонной смеси.

В случае положительного результата испытаний образцов принимается решение о промышленном производстве бетонной смеси согласно полученной карте подбора. Далее испытывают готовую бетонную смесь и при положительных результатах испытаний передают ее на объект. На этом этапе на результат испытаний в большей степени оказывает влияние точность дозирующего оборудования. Факторы, оказывающие отрицательное влияние на процесс, можно разделить на две группы: назовем их условно «технические» и «человеческие». Исходя из производственных условий, на предприятиях зачастую не имеется средств для обновления производственного оборудования и приборов контроля. Таким образом, большинство предприятий, производящих бетон, вынуждены использовать устаревшее оборудование и приборы контроля, так как решение «технических» проблем является для

них «дорогим удовольствием». Улучшить ситуацию можно, постаравшись сократить влияние «человеческого» фактора на технологический процесс приготовления бетонной смеси. Наиболее сложным участком технологического процесса является – подбор состава бетонной смеси [2], так как он требует большого количества времени для осуществления расчетов и наличия определенных навыков и опыта у сотрудника строительной лаборатории. Только на одни испытания образцов требуется 28 суток. Помимо этого возникают ситуации, требующие внесения корректив в подобранный состав бетона; что в свою очередь приводит к повтору всего процесса подбора.

С целью сокращения сроков и повышения эффективности процесса подбора и, как следствие, повышение качества бетона при его промышленном производстве на предприятиях строительной индустрии предлагается следующий подход с использованием нечеткой модели проектирования составов бетонных смесей и нечеткой модели прогнозирования их качества. Структурная схема модели представлена на рис. 1.

В общую модель входят 2 нечеткие модели: НМ1 и НМ2, где НМ1 – нечеткая модель проектирования составов бетонных смесей, а НМ2 – нечеткая модель прогнозирования качества готового изделия. Первоначально на вход блока фаззификации (fuz 1) поступают данные о параметрах компонент смеси и требований к качеству смеси вида – $V_{ij} = \{A, P, O, W\}$, где A – активность цемента, $\text{кг}/\text{см}^2$; P – требуемая прочность конечного продукта (бетона), $\text{кг}/\text{см}^2$; O – осадка конуса готовой бетонной смеси, см; W – влажность песка, %. На первом этапе четкие данные диапазонов входных переменных под воздействием правила $f1$ представляются в виде лингвистических переменных – терм-множеств вида [3]:

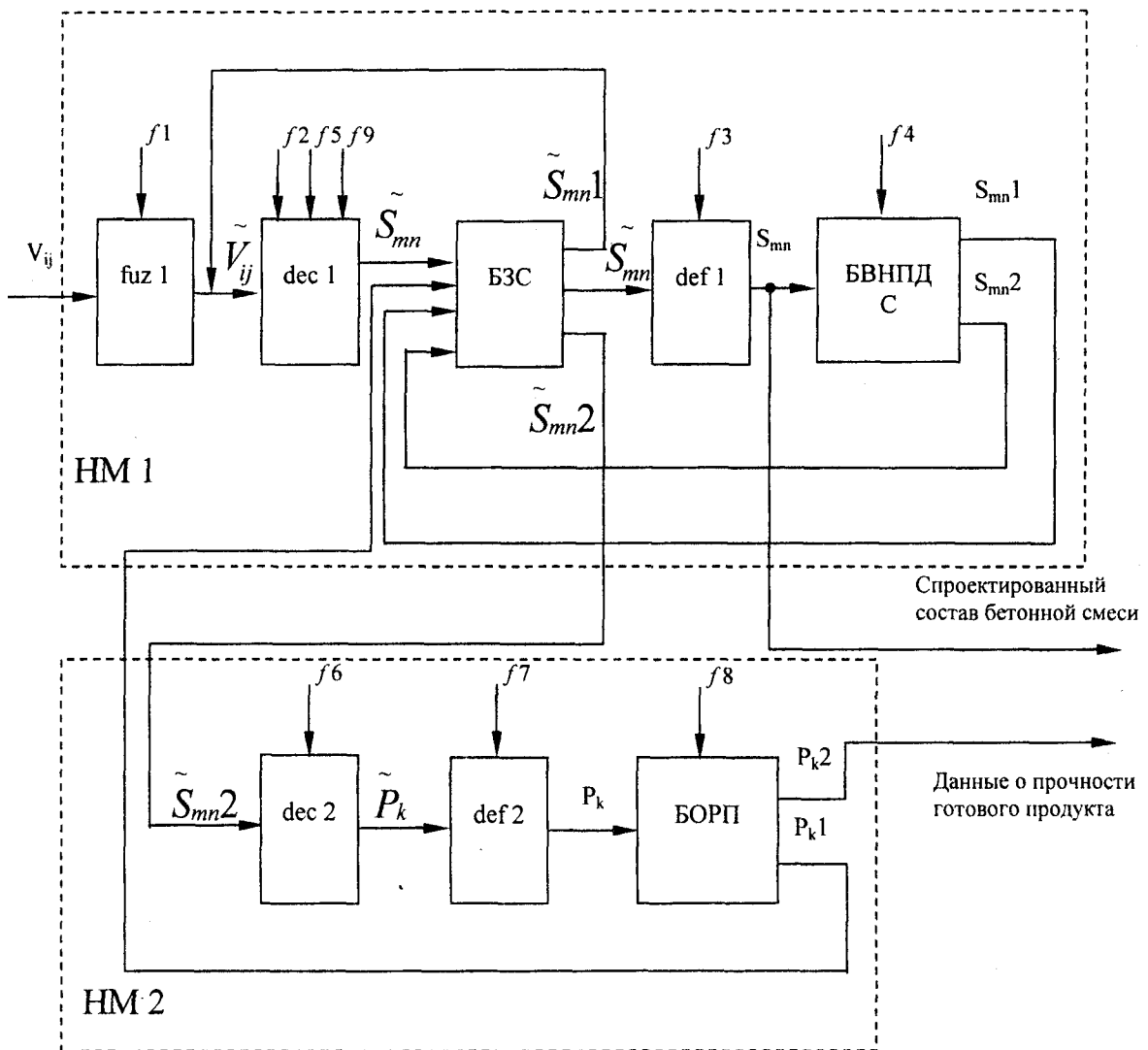


Рис. 1. – Структура модели проектирования составов бетонных смесей

$$T(V_{ij}) = \{NB, NM, ZE, PM, PB\} \quad (1)$$

Термы определяются с помощью функций принадлежности $\mu(x)$ вида:

$$\mu(v_{ij}) = e^{-a(v_{ij} - b)^2} \quad (2)$$

где a – коэффициент квантования;

b – пиковое значение каждого диапазона из множества $T(V_{ij})$, v_{ij} – значение переменной из множества значений V_{ij} .

Граничными условиями для данной функции являются:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1(v_{ij}) = e^{-a(v_{ij} - b_1)^2}, \\ \mu_2(v_{ij}) = e^{-a(v_{ij} - b_2)^2}, \\ \text{если } \mu_1(v_{ij}) \geq \mu_2(v_{ij}), \text{ то } v_{ij} \in \mu_1(v_{ij}), \\ \text{иначе } v_{ij} \in \mu_2(v_{ij}), \end{array} \right. \quad (3)$$

В результате на выходе блока *fuz1* имеем нечеткие входные данные вида V_{ij} , которые под воздействием правила f_2 преобразуются в нечеткое множество данных о составе бетонной смеси – S_{mn} . Правило f_2 имеет вид «если ..., то ...» и определяется следующим выражением:

$$R_1 = V_{ij} \rightarrow S_{mn} \quad (4)$$

После чего полученный нечеткий вариант состава бетонной смеси сохраняется в блоке запоминания состава (БЗС). Далее в блоке def1 осуществляется дефаззификация нечеткого состава по методу медианы – правило f_3 . В результате мы имеем четкие данные о составе бетонной смеси вида S_{mn} , где $S_{mn} = F(\tilde{S}_{mn}, f_3)$. В блоке выбора направления передачи данных о составе бетонной смеси (БВНПДС) осуществляется сравнение суммы количественных данных о полученном составе с критерием оценки качества подбора состава Q_s [4] согласно правилу f_4 , которое имеет следующий вид:

$$S_{mn} = \begin{cases} S_{mn1}, & \text{если } S_{mn} \neq \min F(S_{mn}, S_{зад}, Q_s), \\ S_{mn2}, & \text{если } S_{mn} = \min F(S_{mn}, S_{зад}, Q_s). \end{cases} \quad (5)$$

Если выполняется первое условие, то данные о составе \tilde{S}_{mn1} из БЗС возвращаются на вход блока декомпозиции (dec1), где согласно набору правил f_5 осуществляется корректировка нечеткого состава до тех пор пока не будет выполняться второе условие. В этом случае нечеткие данные из блока запоминания составов вида \tilde{S}_{mn2} поступают на вход блока декомпозиции (dec2) второй нечеткой модели - НМ2. Далее осуществляется преобразование нечеткого состава, согласно правила f_6 , которое имеет вид «если ..., то...» и определяется выражением:

$$R_2 = \tilde{S}_{mn2} \rightarrow \tilde{P}_k \quad (6)$$

где \tilde{P}_k - множество нечетких значений прочности. Используя правило минимакса (f_7), осуществляется дефаззификация нечеткого значения прочности. Полученные в результате дефаззификации четкие данные поступают на вход блока оценки результатов прогноза прочности (БОРП). Выбор данных о прочности готового продукта зависит от результатов преобразования внутри данного блока, которые осуществляются согласно правила f_8 вида:

$$P_k = \begin{cases} P_k1, & \text{если } P_k \neq \min F(P_k, P_{зад}, Q_P) \\ P_k2, & \text{если } P_k = \min F(P_k, P_{зад}, Q_P) \end{cases} \quad (7)$$

где P_k – четкое значение прочности;

Q_P – критерий оценки прочности [4];

$P_{зад}$ – заданное (требуемое) значение прочности.

В случае выполнения первого условия осуществляется возврат на вход блока БЗС, откуда данные о нечетком составе возвращаются к повторной декомпозиции (dec1), согласно набора правил f_9 . Цепь преобразований осуществляется до тех пор пока не начнет выполняться второе условие из выражения (7), т.е. прочность будет находиться в допустимых пределах согласно критерия оценки прочности. В этом случае принимается решение о пригодности спроектированного состава S_{mn} с представлением результата прогноза P_k .

Авторами ведется разработка имитационной компьютерной модели, в основу которой положены описанные в данной статье нечеткие модели НМ1 и НМ2. При получении положительных результатов исследований на разрабатываемой модели можно будет говорить об автоматизации высокого уровня проектирования составов бетонных смесей, позволяющей исключить процедуры подготовки и проведения испытаний экспериментальных образцов, т.е. значительно сократить время проектирования составов бетонных смесей, материальные и людские ресурсы.

Литература:

1. Шестоперов С.В. *Технология бетона. Учебное пособие для вузов.* М.: Высшая школа, 1977. 432 с.
2. *Руководство по подбору составов тяжелого бетона.* / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. М.: Стройиздат., 1979. 103 с.
3. *Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон./К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно.* М.: Мир, 1993. 368 с., ил.
4. *Контроль качества на строительстве мостов. Пособие для инженерно-технических работников мостостроительных организаций.* / Сост. Е.А. Варшавский, Б.В. Милованов, Е.П. Глушков. М.: Недра, 1994. 302 с.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 531.383

Канд. техн. наук В. А. Смирнов
(Тульский государственный университет)
г. Тула

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ПРИ УЧЕТЕ КИНЕМАТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Features of kinematic and dynamic of system of stabilization u promptings of a line of vising in which the optical element is connected to a sensitive gyroscopic element in the ratio 2:1 are considered. The analysis ' exactitudes of system will be carried out(spent) at the account of the given factor.

Системы стабилизации и наведения линии визирования (ССиН) широко применяются при проведении наблюдений с подвижных объектов. Одной из распространенных конструкций является система, показанная на рис. 1, в которой гироскоп и стабилизируемый оптический элемент, связаны кинематической передачей в соотношении 1:2.

Известные исследования подобных систем [1, 2] не учитывают того факта, что при качке основания гироскоп и оптический элемент имеют различные угловые скорости по осям вращения относительно наружной рамки. Если пренебречь составляющими второго порядка малости и выше, то, опираясь на результаты работ [2 - 4] и учитывая указанный фактор, математическую модель ССиН, построенной на трехстепенном гироскопе, можно представить в виде:

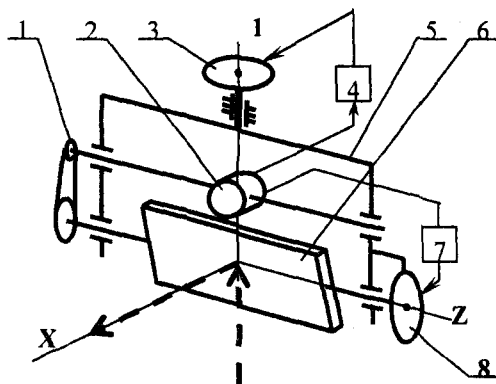


Рис. 1. - Схема системы стабилизации и наведения линии визирования:

- 1 - кинематическая передача; 2 - гироскоп;
- 3, 8 - исполнительные двигатели; 4, 7 - блоки управления двигателями;
- 5 - наружная рамка;
- 6 - стабилизируемый оптический элемент (зеркало)

$$\left. \begin{aligned}
 & \left[J_{y1} + J_{y2} \cos^2 \varphi_z + J_{x2} \sin^2 \varphi_z + J_{y3} \cos^2 \varphi'_z + J_{x3} \sin^2 \varphi'_z \right] (\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_{ly}) / \\
 & \quad / \cos \varphi_z + b_1 (\dot{\alpha} + \omega_{ly}) / \cos \varphi_z - M_{\text{уд1}} = b_1 (\omega_{0y} - \omega_{\xi} \sin \varphi_z) + \\
 & \quad + M_{\text{дм1}} \cos \varphi_z + \left[J_{y1} + J_{x2} + J_{y3} \cos^2 \varphi'_z + J_{x3} \sin^2 \varphi'_z + (J_{y3} - J_{x3}) \times \right. \\
 & \quad \times \sin \varphi'_z \cos \varphi'_z \operatorname{ctg} \varphi_z \left. \right] \left[-\dot{\omega}_{\xi} \sin \varphi_z + (\omega_{0x} \sin \varphi_y + \omega_{0z} \cos \varphi_y - \omega_{lz}) \omega_{ly} \times \right. \\
 & \quad \times \operatorname{tg} \varphi_z / \cos \varphi_z \left. \right] - \left[J_{x2} + J_{y1} - J_{z2} + (J_{x3} + J_{y3} - J_{z3}) / 2 \right] \times \omega_{\xi} \omega_{lz} \cos \varphi_z + \\
 & \quad + \left[J_{y2} - J_{x2} + (J_{y3} - J_{x3}) \sin 2\varphi'_z / \sin 2\varphi_z \right] \omega_{ly} \omega_{lz} \times \sin \varphi_z - \left[J_{x1} - J_{y1} - \right. \\
 & \quad - J_{z1} - J_{z3} / 2 + (J_{x3} - J_{y3}) \cos 2\varphi' / 2 \left. \right] \omega_{\xi} \times (\omega_{0x} \sin \varphi_y + \omega_{0z} \cos \varphi_y) \cos \varphi_z + \\
 & \quad + \left[J_{y3} - J_{x3} \right] \omega_{ly} (\omega_{0x} \sin \varphi_y + \omega_{0z} \cos \varphi_y) \sin \varphi_z + \left[J_{x2} - J_{y2} - J_{y3} \right] (\omega_{\xi} + \omega_{ly} \times \operatorname{tg} \varphi_z) \omega_{ly} - \\
 & \quad - M_{\text{дм2}} - J_{z3} (\dot{\omega}_{0x} \sin \varphi_y + \dot{\omega}_{0z} \cos \varphi_y + 2\ddot{\Delta}_3 + \omega_{\xi} (\omega_{ly} - 0.5 \omega_{\xi} \sin 2\varphi_z - \\
 & \quad - \omega_{0y} \cos \varphi_{zz})) / 4 + \left[J_{x3} - J_{y3} \right] 0.5 \omega_{ly}^2 (\sin 2\Delta_z + \cos 2\Delta_z \operatorname{tg} \varphi_z) + \omega_{\xi} \omega_{lz} \times \\
 & \quad \times \cos 2\Delta_z + 0.5 \omega_{\xi}^2 (\sin \varphi_z \cos 2\Delta_z - \cos \varphi_z \sin 2\Delta_z) + b'_2 \dot{\Delta}_3 / 2 + M_{m2},
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & J_H (\ddot{\tau} + \dot{\omega}_{\text{лy}} + \ddot{\alpha}) + H (\dot{\sigma} + \omega_{\text{лz}} + \dot{\beta}) + b_3 \dot{\tau} = M_{\partial m1} - H (\omega_{\xi} + (\omega_{\text{лy}} + \dot{\alpha}) g \varphi_z) \\
 & \quad (\tau + \alpha) - J_c \omega_{\text{лz}} (\omega_{\xi} + (\omega_{\text{лy}} + \dot{\alpha}) g \varphi_z) + M_{m3}; \\
 & J_B (\ddot{\sigma} + \omega_{\text{лz}} + \ddot{\beta}) - H (\dot{\tau} + \omega_{\text{лy}} + \dot{\alpha}) + b_4 \dot{\sigma} = M_{\partial m2} - H (\omega_{\xi} + (\omega_{\xi} + \dot{\alpha}) g \varphi_z) \\
 & \quad (\sigma + \beta) - J_d \omega_{\text{лy}} (\omega_{\xi} + (\omega_{\text{лy}} + \dot{\alpha}) g \varphi_z) + M_{m4}; \\
 & T_{\text{ud}1} \dot{M}_{\text{ud}1} + M_{\text{ud}1} = K_{\text{ud}1} \tau; \quad T_{\text{ud}2} \dot{M}_{\text{ud}2} + M_{\text{ud}2} = K_{\text{ud}2} \sigma; \\
 & T_{\partial m1} \dot{M}_{\partial m1} + M_{\partial m1} = -K_{\partial m1} \beta; \quad T_{\partial m2} \dot{M}_{\partial m2} + M_{\partial m2} = K_{\partial m2} \alpha;
 \end{aligned} \right\} (2)$$

где $\varphi_x, \varphi_y, \varphi'_z = \varphi_z/2 + \Delta_z$ – углы поворота наружной рамки относительно основания, гироскопа относительно наружной рамки и оптического элемента относительно наружной рамки;

Δ_z – разность между углами поворота блока, чувствительных элементов и оптического элемента в начальном положении (при $\varphi_z = 0^\circ, \Delta_z = 45^\circ$);

α и β – углы рассогласования между линией визирования и задающей линией визирования ЗЛВ (ошибки ССиН);

τ, σ – углы прецессии гироскопа – абсолютные угловые скорости основания; угловые скорости задающей линии визирования;

$$\omega_{\xi} = (\omega_{x0} \cos \varphi_z - \omega_{z0} \sin \varphi_y) / \cos \varphi_z; \quad J_{x1}, J_{y1}, J_{z1},$$

– главные центральные моменты инерции элементов ССиН относительно соответствующих осей (для основания $i = 0$; для наружной рамки $i = 1$; для гироскопа $i = 2$; для оптического элемента $i = 3$);

J_u, J_b, J_d, J_c – соответствующие моменты инерции гироскопа;

b_1, b_2 и M_{m1}, M_{m2} – коэффициенты демпфирования и возмущающие моменты, действующие относительно осей карданова подвеса платформы, вызванные сухим трением и другими неучтенными факторами;

$M_{\text{ud}1}, M_{\text{ud}2}$ – моменты, создаваемые исполнительными двигателями;

b_3, b_4 – коэффициенты демпфирования в осях гироскопа;

H – кинетический момент гироскопа;

M_{m3}, M_{m4} – моменты трения и другие возмущающие моменты, действующие на гироскоп;

$T_{\partial m1}, T_{\partial m2}$ – электромагнитные постоянные времени датчиков момента гироскопа;

$T_{\text{ud}1}, T_{\text{ud}2}$ – электромагнитные постоянные времени исполнительных двигателей.

Анализ уравнений (1) показывает, что различие угловых скоростей вращения гироскопа и оптического элемента приводит к появлению дополнительных составляющих возмущающего момента от качки основания и угловых скоростей наведения по сравнению с обычными двухосными гироскопическими стабилизаторами. Это вызывает ухудшение точности ССиН рассматриваемого класса, особенно по оси вращения оптического элемента. Появление дополнительных возмущающих моментов обусловлено тем, что в режиме стабилизации на качающемся основании, когда гироскоп неподвижен относительно плоскости стабилизации в инерциальном пространстве, оптический элемент совершает сложное пространственное движение.

Уравнения также показывают, что установка оптического элемента (зеркала) под углом 45° к оси стабилизации гироскопа приводит к появлению дополнительных составляющих возмущающего момента вида:

$$\begin{aligned}
 & [J_{x3} - J_{y3}] 0,5 \omega_{\text{лy}}^2 (\sin 2\Delta_z + \cos 2\Delta_z \text{tg} \varphi_z) + \\
 & \quad + \omega_{\xi} \omega_{\text{лz}} \cos 2\Delta_z - \\
 & \quad - (0,5 \omega_{\xi}^2 (\sin \varphi_z \cos 2\Delta_z - \cos \varphi_z \sin 2\Delta_z)).
 \end{aligned}$$

С точки зрения компенсации данных моментов более выгодным является: использование вместо зеркала куб-призмы. В этом случае за счет равенства соответствующих моментов инерции данные составляющие возникать не будут. в качестве недостатка можно отметить меньшее быстродействие в режиме: управления за счет большей инерционности.

Для оценки вклада дополнительных составляющих возмущающего момента было проведено математическое моделирование динамики рассматриваемой: системы в режиме стабилизации при учете особенностей кинематики и при: обычном подходе, когда моменты, действующие по оси зеркала, просто приводятся к оси гироскопа. При этом использовались следующие параметры:

$$\begin{aligned}
 & J_{x1} = 450 \cdot 10^{-4}, \quad J_{y1} = 500 \cdot 10^{-4}, \quad J_{z1} = 350 \cdot 10^{-4}, \\
 & J_{x2} = 8 \cdot 10^{-4}, \quad J_{y2} = 10 \cdot 10^{-4}, \quad J_{z2} = 1 \cdot 10^{-4}, \\
 & J_{x3} = 178 \cdot 10^{-4}, \quad J_{y3} = 50 \cdot 10^{-4}, \quad J_{z3} = 76 \cdot 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{м}^2, \\
 & b_1 = 0,02, \quad b_2 + b_2/4 = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, \\
 & T_{\text{уд}1} = T_{\text{уд}2} = 0,005 \text{ с}.
 \end{aligned}$$

Входные воздействия задавались в виде гармонической качки основания с частотами $\omega_x = 5$ 1/с, $\omega_y = 1,5$ 1/с, $\omega_z = 3$ 1/с, и амплитудами $a_x = 10^\circ$ /с, $a_y = 3,3^\circ$ /с, $a_z = 19^\circ$ /с.

Результаты моделирования ошибок системы приведены на рис. 2 – 5.

Расчеты показывают, что по оси наружной рамки ошибки в режиме стабилизации изменяются незначительно и составляют в обоих случаях около $0,016$ угл. град. В то же время учет дополнительных составляющих, действующих по оси гироскопа приводит к увеличению ошибки почти в два раза – с $0,016$ до $0,028$ угл. град. Таким образом, при исследовании динамики ССиН с подобной кинематикой обязательно следует учитывать разницу в угловой скорости движения блока гироскопических чувствительных элементов и оптического элемента.

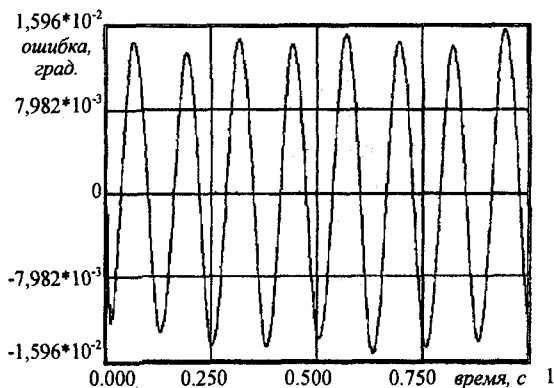


Рис. 2. – Ошибки ССиН по оси наружной рамки для "приведенной" систем

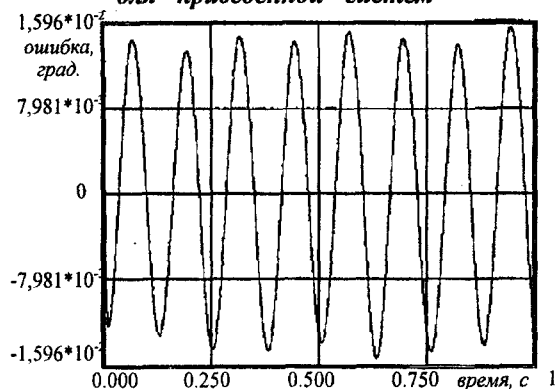


Рис. 3. – Ошибки ССиН по оси наружной рамки при учете особенностей кинематики

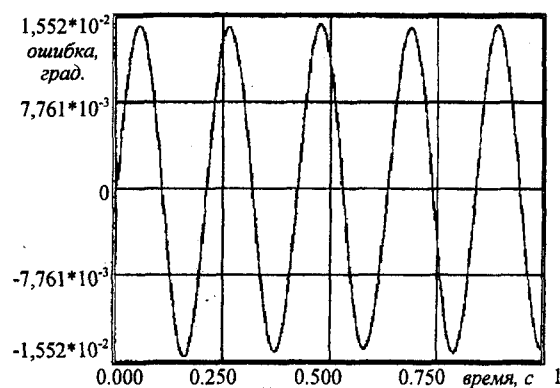


Рис. 4. – Ошибки ССиН по оси платформы для приведенной системы

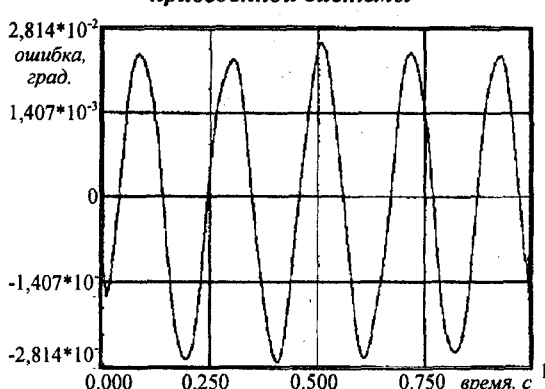


Рис. 5. – Ошибки ССиН по оси платформы при учете особенностей кинематики

Литература:

1. Пельтор Д.С. Расчет и проектирование: гироскопических стабилизаторов. / Д.С. Пельтор, Ю.А. Колосов, Е.Р. Рахтеенко. М.: Машиностроение, 1972. 325 с.
2. Неусытин А.К. Гироскопические приводы. М.: Машиностроение, 1978. 192 с.
3. Родионов В.И. Геометрия и кинематика

- двухосных совмещенных систем стабилизации и управления // Оборонная техника. 1993. № 3. С. 22-24.
4. Родионов В.И. Динамика индикаторных гиросtabilизаторов прицельных устройств / В.И. Родионов, В.А. Смирнов // Оборонная техника, 1999. № 3-4. С. 13-15.

УДК 621.397.6

В. Ф. Матасов, О. В. Моржов
(Тульский государственный университет)
г. Тула

ОБОСНОВАНИЕ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ АМ

The installation developed in clause for definition of movings of elements is not sensitive to a level of sound pressure and to presence of vertical movings that proves wide experience of application of optical systems of the given sort.

При регистрации перемещений элементов АМ в процессе выстрела возникает проблема минимизации влияния датчиков перемещения (или скоростей перемещения) на измеряемые параметры.

В применяемых реохордах в силу физических особенностей метода регистрации величина силы трения не может быть ниже необходимой для получения надёжного контакта и достоверного сигнала.

Существующие в настоящее время образцы регистрирующих систем бесконтактного измерения перемещения поверхностей, такие как лазерные и ультразвуковые в условиях сильной задымлённости, высокочастотных колебаний отражающих поверхностей, значительного уровня звукового давления низко-, средне- и высокочастотных шумов истекающих газов требуют создания специальных условий для проведения испытаний.

Однако, специфика ряда этих условий такова, что их выполнение может в ряде случаев не только потребовать значительных материальных вложений, но и снизить достоверность результатов эксперимента.

В проведенных экспериментальных исследованиях была установлена возможность регистрации перемещений элементов АМ в процессе выстрела с использованием электронно – оптической системы [1], основанной на дискретной бесконтактной регистрации перемещения поверхности с чередующимися прозрачными (в оптическом диапазоне) и непрозрачными участками, рис. 1, 2.

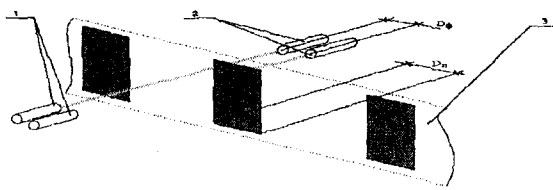


Рис. 1. – Электронно – оптическая система: 1 – фотодиод, 2 – светодиод, 3 – преграда с чередующимися прозрачными (в оптическом диапазоне диодов) и непрозрачными участками, $D_{\phi} < D_n$

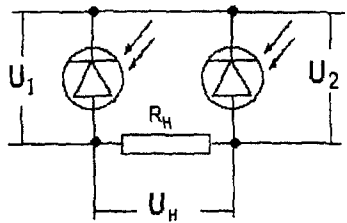


Рис. 2. – Принципиальная схема приёмного узла фотодиодов

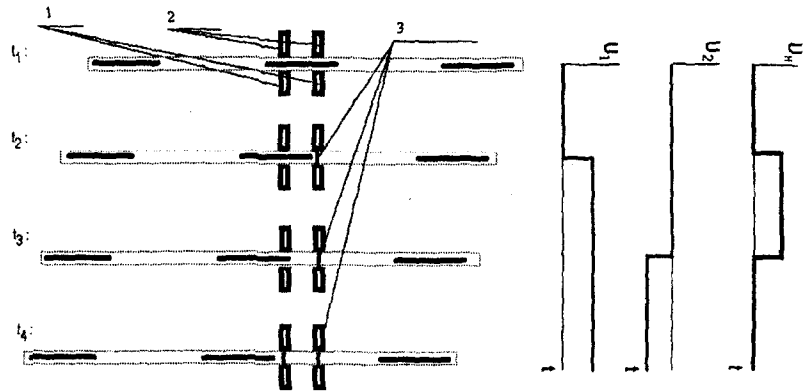


Рис. 3. – Перемещение преграды и напряжения в точках приёмного узла: 1 – приёмный узел фотодиодов; 2 – светодиоды, 3 – световой поток t_i – моменты времени движения преграды

Так, при движении преграды (рис. 3) прохождение каждого оптически непрозрачного участка характеризуется наличием U_n . Типичная осциллограмма U_n при равномерном перемещении преграды имеет вид (рис. 4).

Наличие двух инверсных импульсов соответствует прохождению одного непрозрачного участка через фотоузел в прямом и обратном направлениях, что фиксируется блоком программно - аппаратного управления.

На приведённых выше принципах основано функционирование ряда следящих приводов СПВ, а также электронно - оптического узла манипулятора компьютера.

Указанный выше принцип регистрации перемещений был применён при проведении экспериментальных исследований движения образца СОО при выстреле.

Используемая в процессе работы функциональная схема представлена на рис. 5.

Модифицированная в плане расположения оптического узла электронно - оптическая часть манипулятора типа "мышь" является датчиком движения преграды с чередующимися прозрачно - непрозрачно участками.

Использование стандартного устройства ПК позволило (без ущерба для качества эксперимента) миновать этапы разработки и отладки устройств регистрации и обработки импульсов, сопряжения с портами ввода-вывода ПК а также разработки драйвера устройства.

Полученная в ходе разработки установка не чувствительна (при условии изоляции процессорного блока и видеомонитора) к уровню звукового давления; к наличию вертикальных перемещений; в силу конечного расстояния между непрозрачными участками преграды равного 0,5 мм требуемая точность измерения перемещений ($\approx 5-10\%$) сохраняется в широких ($\approx 15-20^\circ$) диапазонах значения углов отклонения от начального положения продольной оси ствола СОО.

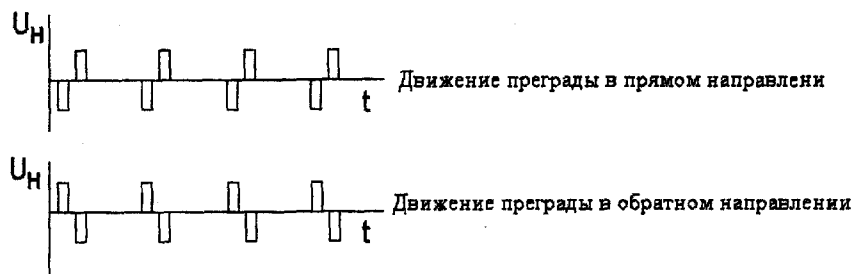


Рис. 4. – Осциллограммы U_n при движении преграды

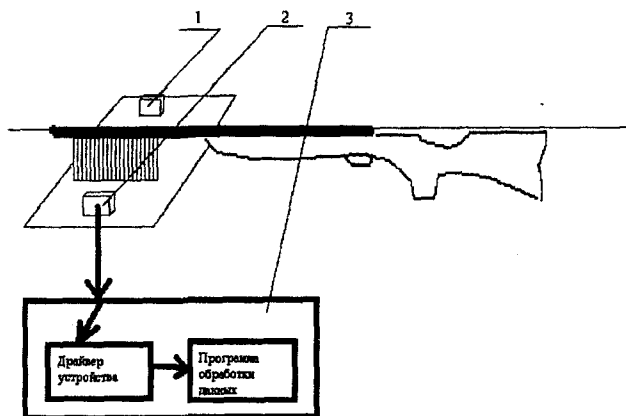


Рис. 5. – Схема экспериментальной установки:

1 – светодиоды; 2 – фотодиодный узел;

3 – программно - аппаратный комплекс (компьютер, драйвер устройства, программа обработки данных)

Отличия в реализации опыта с участием АМ состоят в необходимости применения узконаправленных длиннофокусных светодиодов.

Литература:

1. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико - электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977.

УДК 621.9

М. Б. Богданов, А. В. Прохорцов, В. В. Савельев

О КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ЭФФЕКТОМ НЕКОММУТАТИВНОСТИ КОНЕЧНЫХ ПОВОРОТОВ

In clause the analysis of errors of GAS caused by effect incompatibility of final turns is lead, and also the way of indemnification of errors of made measurements is offered.

Измерение угловых скоростей рысканья, тангажа и крена подвижных объектов осуществляется с помощью датчиков угловых скоростей (ДУС) с взаимноперпендикулярными измерительными осями, направленными вдоль осей связанной с объектом системы координат.

Но ДУС измеряют угловые скорости объекта относительно связанной системы координат. Рассмотрим, как отличаются угловые скорости измеренные ДУС от угловых скоростей рысканья, тангажа и крена.

Пусть при движении объекта углы курса, тангажа и крена изменяются по законам:

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_m \sin(\nu_\psi t + \varphi_\psi), \\ \nu &= \nu_m \sin(\nu_\nu t + \varphi_\nu), \\ \gamma &= \gamma_m \sin(\nu_\gamma t + \varphi_\gamma), \end{aligned} \tag{1}$$

где $\psi_m, \nu_m, \gamma_m, \nu_\psi, \nu_\nu, \nu_\gamma, \varphi_\psi, \varphi_\nu, \varphi_\gamma$ – амплитуды, частоты и фазы качки объекта по курсу, тангажу и крену соответственно.

Пусть имеет место синхронная качка, т.е. $\nu_\psi = \nu_\nu = \nu_\gamma = \nu$. Тогда угловые скорости подвижного объекта в базовой системе координат:

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \psi_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\psi), \\ \dot{\nu} &= \nu_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\nu), \\ \dot{\gamma} &= \gamma_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\gamma). \end{aligned} \quad (2)$$

Угловые скорости объекта в связанной системе координат, то есть скорости измеренные ДУС [1]:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \dot{\psi} \cos(\nu) \cos(\gamma) + \dot{\nu} \sin(\gamma), \\ \omega_2 &= \dot{\nu} \cos(\gamma) - \dot{\psi} \cos(\nu) \sin(\gamma), \\ \omega_3 &= \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin(\nu). \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя, (1) и (2) в (3), с учетом малости углов ψ, ν, γ , после тригонометрических преобразований, получим:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \nu_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\psi) + \\ &+ \nu_m \gamma_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\nu) \sin(\nu t + \varphi_\gamma), \\ \omega_2 &= \psi_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\nu) - \\ &- \psi_m \gamma_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\psi) \sin(\nu t + \varphi_\gamma), \\ \omega_3 &= \psi_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\psi) + \\ &+ \psi_m \nu_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\nu) \sin(\nu t + \varphi_\nu). \end{aligned} \quad (4)$$

Сравнивая выражения (2) и (4) видно, что при измерении угловых скоростей рыскания тангажа и крена с помощью ДУС в их показаниях будут присутствовать погрешности, которые после преобразования можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_1 &= \frac{\gamma_m \nu_m \nu}{2} \sin(2\nu t + \varphi_\nu + \varphi_\gamma) + \\ &+ \frac{\gamma_m \nu_m \nu}{2} \sin(\varphi_\gamma - \varphi_\nu), \\ \Delta\omega_2 &= -\frac{\psi_m \gamma_m \nu}{2} \sin(2\nu t + \varphi_\gamma + \varphi_\psi) + \\ &+ \frac{\psi_m \gamma_m \nu}{2} \sin(\varphi_\psi - \varphi_\gamma), \\ \Delta\omega_3 &= \frac{\psi_m \nu_m \nu}{2} \sin(2\nu t + \varphi_\nu + \varphi_\psi) + \\ &+ \frac{\psi_m \nu_m \nu}{2} \sin(\varphi_\nu - \varphi_\psi) \end{aligned} \quad (5)$$

Данная погрешность носит название погрешности обусловленная эффектом некоммутативности конечных поворотов.

Следовательно, при синхронной качке объекта, ввиду эффекта некоммутативности конечных поворотов в показаниях трехкомпонентного измерителя угловой скорости будут присутствовать постоянная и периодическая (с двойной частотой) погрешности. Эти погрешности могут достигать значительных величин, следовательно, их необходимо компенсировать.

Уравнения (5) получены при допущении о малости углов ψ, ν, γ . Для оценки достоверности выражений (5) были проведены дополнительные расчеты на ПЭВМ при амплитудах качки ψ, ν, γ , равными 15° и 30° . Результаты показали, что при амплитудах качки 15° выражения (5) имеют погрешность $\approx 4\%$, а при амплитудах $30^\circ - \approx 9\%$.

Для того, что бы устранить из показаний ДУС погрешности, обусловленные эффектом некоммутативности конечных поворотов, можно воспользоваться информацией, полученной с самих ДУС трехстепенного измерителя угловой скорости. Перепишем выражение (4) в виде:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \psi_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\psi) + \omega_2 \int_0^t \omega_3 dt, \\ \omega_2 &= \nu_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\nu) - \omega_1 \int_0^t \omega_3 dt, \\ \omega_3 &= \gamma_m \nu \cos(\nu t + \varphi_\gamma) + \omega_1 \int_0^t \omega_2 dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, можно ввести коррекцию:

$$\begin{aligned} \omega_1^{кор} &= \omega_1 - \omega_2 \int_0^t \omega_3 dt, \\ \omega_2^{кор} &= \omega_2 + \omega_1 \int_0^t \omega_3 dt, \\ \omega_3^{кор} &= \omega_3 - \omega_1 \int_0^t \omega_2 dt. \end{aligned} \quad (7)$$

О аппаратной реализации выражений (7) была предложена схема [2] в состав которой помимо трех ДУС входят три двухвходовых сумматора, два интегратора, три двухвходовых умножителя (рис. 1). При наличии на борту объекта вычислительной машины компенсацию можно реализовать в программном обеспечении и тем самым избавиться от влияния погрешностей дополнительных элементов.

Погрешности указанного способа имеют вид:

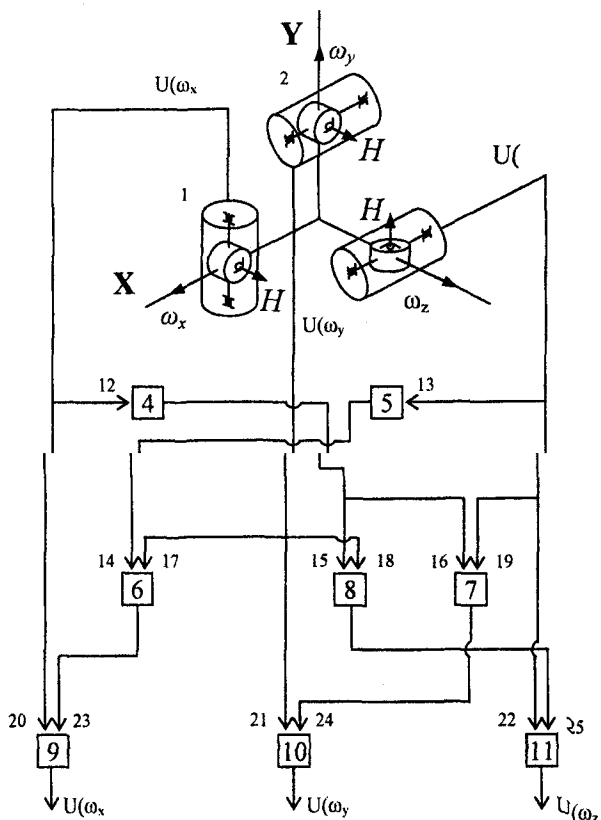


Рис. 1. – Принципиальная схема ТИУС с блоком компенсации:

- 1, 2 и 3 – гироскопические датчики угловой скорости;
- 4, 5 – интеграторы;
- 6, 7 и 8 – двухвходовые умножители;
- 9, 10 и 11 – двухвходовые сумматоры

$$\begin{aligned} \Delta\omega_1 &= \omega_1^{кор} - \psi, \\ \Delta\omega_2 &= \omega_2^{кор} - \nu, \\ \Delta\omega_3 &= \omega_3^{кор} - \gamma. \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ выражений для погрешностей (7) показывает, что в них присутствует постоянные и переменные составляющие, а также составляющие, возрастающие со временем. Анализ приведенных погрешностей позволяет сделать следующие выводы:

- предлагаемую коррекцию можно использовать в течении ограниченного времени;
- предлагаемая коррекция более эффективна для небольших амплитуд.

Для оценки эффективности вводимой коррекции было проведено моделирование с использованием Mathcad 2000 под следующими условиями эксплуатации: $\psi'_m = \omega'_m = \gamma'_m = \beta, \Omega_1 \ll \omega_1, \Omega_2 \ll \omega_2, \Omega_3 \ll \omega_3, \varphi_\psi = 0, \varphi_\nu = \pi/2, \varphi_\gamma = \pi$. Результаты моделирования для угловой скорости ω_1 представлены на рис. 2.

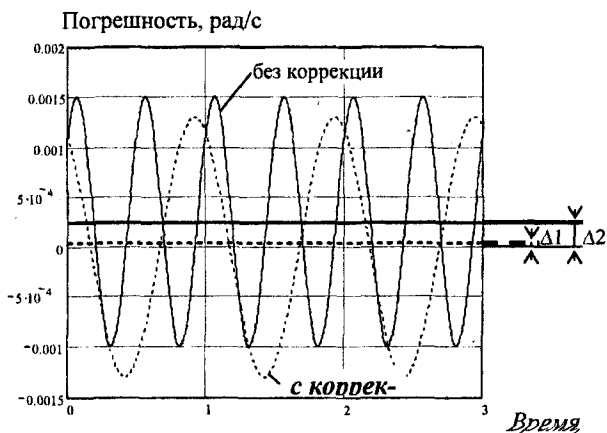


Рис. 2. – Графики погрешностей в измерении угловой скорости ω_1 , обусловленных эффектом некоммутируемости конечных поворотов: $\Delta 1$ – постоянная составляющая погрешности с использованием коррекции, $\Delta 2$ – постоянная составляющая погрешности без использования коррекции

На рисунке приведены зависимости погрешностей с коррекцией и без коррекции в измерении угловой скорости ω_1 от времени. Для ω_2 и ω_3 характер погрешностей аналогичен. Из рисунка видно что использование коррекции позволяет уменьшить постоянную составляющую в 5 раз.

Следовательно предлагаемая коррекция эффективна. Как показали результаты моделирования (рис. 2), а также анализ формул (7), амплитудное значение погрешности при использования данного способа коррекции возрастает со временем, а это накладывает ограничение на время его использования.

Приведенные результаты и выводы относятся для различных типов ДУС, например, лазерные и волоконнооптические, микромеханические гироскопы.

Таким образом, проведен анализ погрешностей ТИУС, обусловленных эффектом некоммутируемости конечных поворотов. Показано, что в случае пространственной круговой синхронной качки объекта погрешности ТИУС имеют постоянную и периодическую составляющие. Предложен способ компенсации указанных погрешностей.

Литература:

1. Гироскопические системы. Гироскопические приборы и системы. Ч. II. / Под ред. Д.С. Пельпора. М: Высшая школа, 1988. 424 с.
2. Савельев В.В., Богданов М.Б., Прохорцов А.В. // Положительное решение о выдачи патента РФ "Трехкомпонентный измеритель угловой скорости". №2001111342/28 (0011791). Приоритет от 24.04.2001.

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2.08:615.849.19

Канд. техн. наук Е. В. Шалобаев, Г. Н. Юркова, Ю. С. Монахов
(Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики
(технический университет))

г. Санкт-Петербург, тел. (812)2323150; e-mail: shalobaev47@mail.ru

В. Т. Ефименко, А. В. Ефименко

(НПО «СКАЛА»)

г. Санкт-Петербург – Ломоносов, тел. (812)4224666

Д-р техн. наук, проф. С. Ф. Корндорф, канд. техн. наук А. В. Дунаев

(Орловский государственный технический университет)

г. Орел, тел. (0862)419876; e-mail: pms35@ostu.ru

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СКАНИРУЮЩИХ ЛАЗЕРНЫХ МЕДИЦИНСКИХ УСТАНОВКАХ

The article considers problems of creation of biological feedback, and it's application in the medical scanning equipment used for physiotherapeutic action on biological tissue and organs.

Достоинством лазерной медицинской аппаратуры является возможность оперативного изменения параметров лазерного излучения для получения желаемого результата его воздействия, что достигается с помощью цепей биологической обратной связи (БОС) [1]. С их помощью осуществляется оптимизация лазерного воздействия на биоткань, при котором физиотерапевтическое воздействие на ткани и органы является наиболее эффективным и атравматичным [2 – 4].

Системы БОС обычно включают в себя средства регистрации аналоговой информации (датчики), блок перевода аналоговой информации в цифровой код, обработки данных и формирования управляющего сигнала (контроллер) и исполнительную подсистему (актюатор). При этом информационная система датчик – контроллер – актюатор – объект замкнута (рис. 1).

Используемые в лазерной медицинской технике системы БОС могут быть разделены на две группы: системы, предназначенные для контроля состояния

самой лазерной системы (оптических параметров КПД и т.д.) и стабилизации параметров на заданном уровне (подобные системы можно считать классическими); системы, предназначенные для коррекции параметров заданного излучения [5]. Последние системы вследствие их существенно большей сложности до начала 90-х годов практически отсутствовали. В настоящее время наибольшее развитие получили термооптические системы, основанные на появлении соответствующего вида сигнала, по взаимодействию лазерного излучения с биотканью.

Среди предприятий, разрабатывающих системы БОС, одним из ведущих является НПО «СКАЛА» где проводятся работы по созданию БОС на основе фиксации частоты пульса и дыхания, мышечных напряжений, давления и т. п. проявлений реакции человеческого организма на воздействие лазерного излучения. «НПО СКАЛА» изготавливает приборы, которые отличаются новизной и пользуются большим спросом и успешно зарекомендовали себя во многих известных медицинских учреждениях России, в че

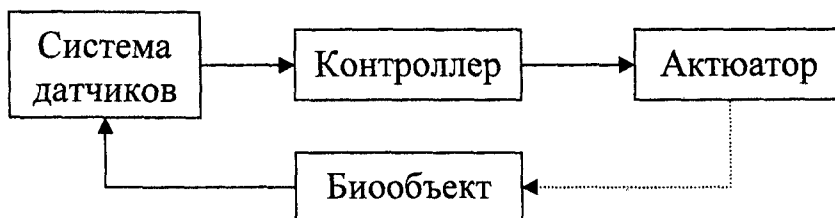


Рис. 1. – Замкнутая информационная система с БОС

ности, в клиниках и в Лазерном центре СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова, в Центральном военноклиническом госпитале им. акад. А.А. Вишневого (Москва), в Центральном военном санатории (г. Пятигорск), в госпитале ветеранов войны в г. Краснодаре, в областной клинической больнице г. Оренбурга.

Обобщенная структурная схема лазерного стимулятора с БОС приведена на рис. 2 [6 – 9].

В настоящей работе анализируются проблемы реализации БОС и представлены некоторые результаты работ по решению данных проблем. В качестве объекта анализа рассматриваются системы с БОС, основанные на создании блока управления, предназначенного для выработки сигналов для блока излучателя в соответствии с программой, учитывающей индивидуальные особенности пациента и данные, полученные от датчиков. К числу основных проблем, стоящих перед разработчиками таких систем, относятся следующее.

1. Нет точного и однозначного ответа на большинство вопросов, касающихся проявления результатов воздействия лазерного излучения не только на генном, клеточном и межклеточном уровнях, но даже на уровне органов человеческого организма. Поэтому до сих пор не утихает дискуссия о возможности замены лазера на светодиоды.

2. Проблема измерительных преобразователей для контроля за параметрами биообъектов. Используемые практически повсеместно контактные (накладные и вживляемые) электроды, основными преимуществами которых являются простота конструкции, надежность и относительно низкая стоимость, вытесняются бесконтактными датчиками, в основном фо-

тоэлектрическими. В то же время, основной недостаток контактных электродов (изменение условий контактирования из-за механических перемещений сопряженных поверхностей и происходящих там же физико-химических процессов) может быть практически устранен, а бесконтактные датчики достаточно сложны в расчете, эксплуатации и относительно дороги.

3. При наличии гелий-неоновых лазеров регулировка мощности может осуществляться довольно грубо и дискретно (в пределах 100, 75, 50 и 25 %), в то время, как полупроводниковые лазеры имеют возможность плавной регулировки мощности.

4. Датчики температуры, по сравнению с датчиками артериального давления и пульса обладают значительной инерционностью.

5. Крайне разнообразные индивидуальные особенности пациентов, что видно на примере поглощения и отражения лазерного излучения кожей. Как показывают работы [10, 11], полезная для профилактики лечения мощность низкоинтенсивного лазерного излучения существенно уменьшается после прохождения кожного покрова, и степень этого снижения зависит от места на теле человека, направления кожных борозд, состояния здоровья кожного покрова, возраста пациента, пигментации кожи и т.п. Так, например, при длинах волн излучения от 0,67 до 0,83 мкм (красное и инфракрасное излучение) в худшем случае проходит 5 % энергии, а в лучшем до 20 %.

Слабое коррелирование факторов лазерного излучения и их многозначность порождают сложную схему взаимодействия лазерного излучения с биологической тканью [11] (рис. 3).

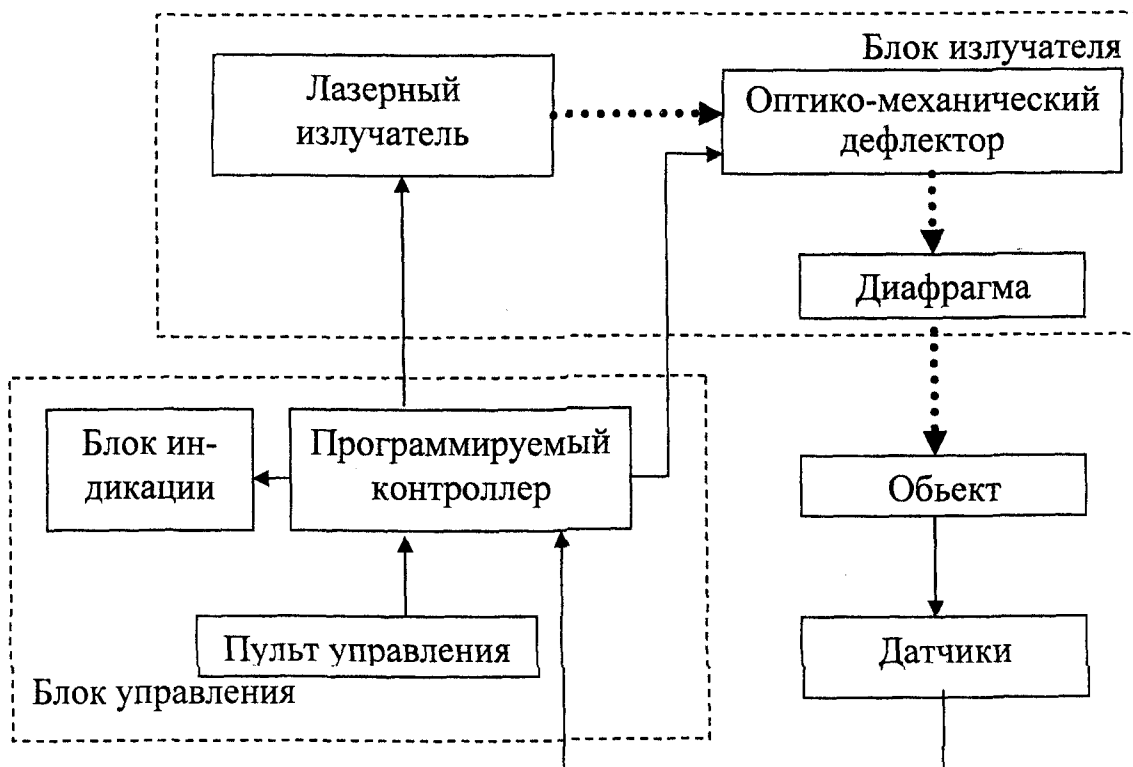


Рис. 2. – Структурная схема лазерного стимулятора с БОС



Рис. 3. – Схема взаимодействия лазерного излучения с биологической тканью

Одним из направлений решения проблемы индивидуализации является реализация соответствующего сканирования при излучении. Специальные сканирующие устройства обеспечивают возможность изменения площади поверхности сканирования и проведения лечения пациентов по индивидуальной программе [8, 9]. При непрерывном излучении лазера создается импульсный режим облучения за счет пространственного перемещения луча для каждой отдельной точки поверхности. Это обеспечивает благоприятные условия лечения, так как импульсный режим не дает возможности облучаемой клетке адаптироваться к излучению. Благодаря сканирующему устройству можно подобрать соответствующую форму сканирования в соответствии с площадью и состоянием поверхности, подлежащей лечению, т.е. проводить лечение пациентов по индивидуальной программе.

Сканирующие лазеры подразделяются на физиотерапевтические приборы общего назначения и офтальмологические приборы (рис. 4, 5) [12, 15]. Базовый принцип действия этих устройств одинаков, но при сохранении характера воздействия офтальмологические приборы имеют специфику, которая заключается в следующем: мощность излучения на порядок меньше (вызвано особенностью глаза по сравнению с другими участками тела); БОС используют только оптические методы контроля парамет-

ров реакции организма на воздействие лазерного излучения (используемые в физиотерапевтических установках термооптические методы контроля не применяются).

Разработанные «НПО СКАЛА» приборы прошли клинические испытания в трех авторитетных медицинских учреждениях страны: Российском научном центре реабилитации и физиотерапии МЗиМП РФ, Центральном военно-клиническом госпитале имени П.В. Мандрика а также в Московском медико-санитарном институт имени Н.А. Семашко. Технические испытания установок были проведены во ВНИИИ медицинской техники. По результатам этих испытаний получены разрешительные документы от МЗиМП РФ на их выпуск, а также сертификаты соответствия Госстандарта РФ на установки. Технические характеристики сканирующих лазеров приведены в табл. 1.

Следует отметить, что на базе указанных лазерных установок защищено около 30 диссертаций по медицинской тематике, в том числе 8 докторских. Таким образом, создана целая школа отечественной сканирующей лазерной терапии.

В настоящее время в государственный реестр медицинских методик РФ внесена методика, базирующаяся на данных установках [13, 14]. Однако указанная методика не учитывает индивидуальных

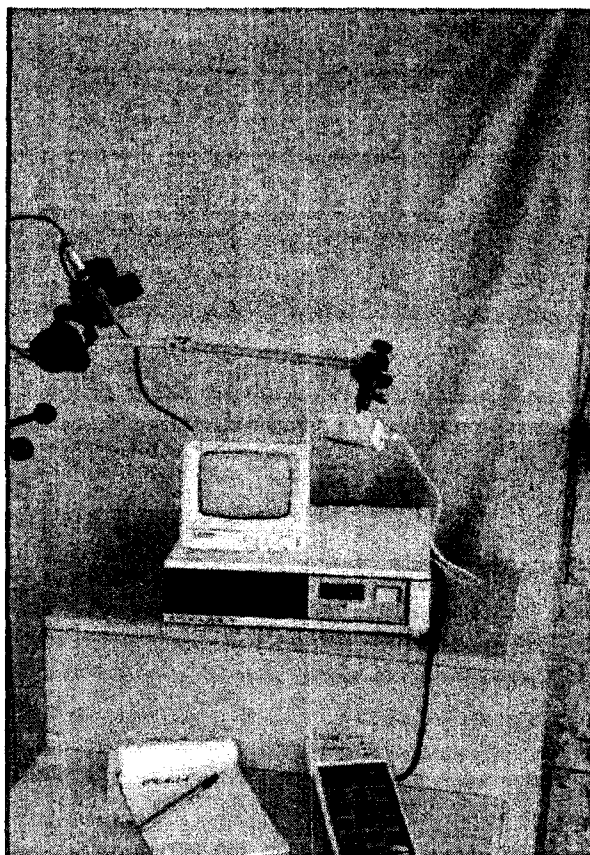


Рис. 4. – Стимулятор лазерный сканирующий физиотерапевтический СЛСФ-03.2ИК

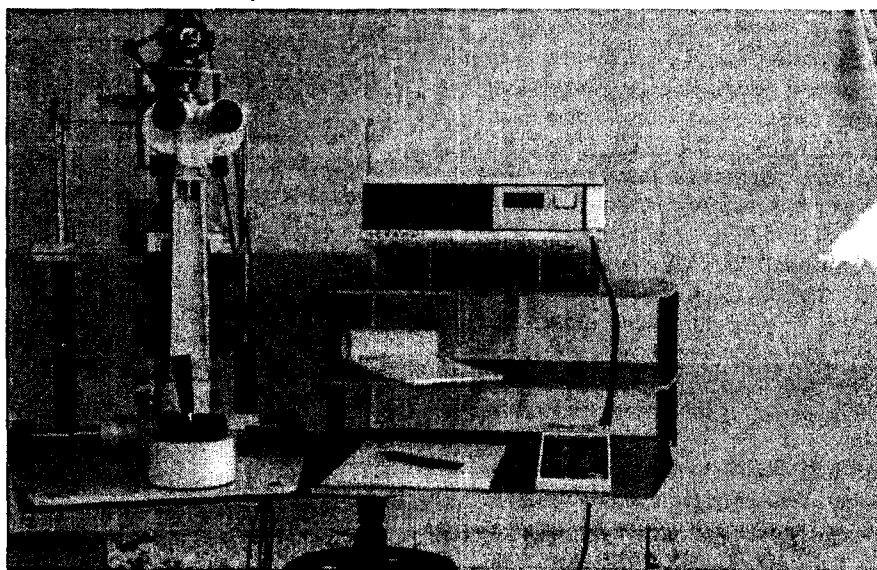


Рис. 5. – Стимулятор лазерный сканирующий офтальмологический СЛСО-02П/ПК

особенностей пациента. В этой связи ведутся интенсивные работы по созданию биоуправления на основе обратной связи по многоканальному принципу.

Решение поставленных проблем требует объединения усилий и комплексных исследований специалистов в смежных областях. Поэтому «НПО СКАЛА», будучи базовой организацией, сотрудничает с учеными Орловского государственного технического университета (ОрелГТУ), где ведутся работы по изучению температурных характеристик

для изучения отражения и поглощения лазерной энергии кожным слоем. Использование этой информации позволяет откорректировать величину потребляемой пациентом энергии. Работа «НПО СКАЛА» осуществляется в тесном сотрудничестве с лазерным центром при СПбГМУ (ГУ) им. акад. И.П. Павлова (директор центра проф. Н.Н. Петрищев), а в 2002 году установлен контакт с белорусскими коллегами из Гомельского государственного медицинского института. В перспективе привлечение специалистов СПбГИТМО(ГУ), занимающихся

1. Технические характеристики сканеров

Характеристика	СЛСФ-01.20К	СЛСФ-03.2ИК
Мощность лазерного излучения, мВт	18±3	0...20 (плавно регулируемая)
Длина волны, мкм	0,632	0,83
Частота сканирования, Гц	0...320	0...320
Амплитуда сканирования на расстоянии 1 м от дефлектора, мм	3...300	3...300
Диапазон автоматической установки время проведения процедуры, с	0...3599	0...3599
Потребляемая мощность, Вт	400	150

исследованием оптических характеристик биотканей, в частности, тканей глаза [12].

Часть материалов статьи выполнена в рамках гранта РАН и Правительства Санкт-Петербурга 2003 года № М03-3.5Д-301.

Литература:

1. Шалобаев Е.В. Управление в биотехнической системе / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, В.Т. Ефименко и др. // *Материалы 3-й Международной конференции: Управление в технических системах*. 13-15 ноября 2000г. Ковров: КГТА, 2000. С. 89-91.
2. Леонтьева Н.В. Лазеротерапия в комплексном лечении сосудистой патологии нижних конечностей / Н.В. Леонтьева, В.П. Золотницкая, Я.В. Дмитриева, А.В. Ефименко // *Медицинский академический журнал*, 2001. №1. С. 39-40.
3. Ефименко В.Т. Сканирующие лазерные датчики в системе диагностики и лечения заболеваний / В.Т. Ефименко, Е.В. Шалобаев, А.В. Ефименко, Г.Н. Юркова // *Датчики и системы*, 2001. №11. С.47-49.
4. Леонтьева Н.В. Рекомендации для медицинского персонала по практическому применению стимулятора лазерного сканирующего физиотерапевтического СЛСФ-01.20К / Под редакцией Н.Н. Петрищева и В.Т. Ефименко.-СПб.: ГМУ-НПО СКАЛА, 1999. 36 с.
5. Беликов А.В. Основные направления развития лазерных медицинских систем с обратной связью / А.В. Беликов, К.В. Приходько // *Известия вузов. Приборостроение*, 2001. №6. С. 36-41.
6. Ефименко В.Т. Сканирующие лазерные датчики в системе диагностики и лечения заболеваний / В.Т. Ефименко, Е.В. Шалобаев, А.В. Ефименко, Г.Н. Юркова // *Датчики и системы*. 2001. №10. С. 48-49.
7. Шалобаев Е.В. Лазерные стимуляторы / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, В.Т. Ефименко, А.В. Ефименко // *Датчики и системы*, 2001. №8. С.58-59.
8. Леонтьева Н.В. Сканирующие лазерные установки в медицине / Н.В. Леонтьева, А.В. Ефименко // *Тезисы докладов конференции: лазеры для медицины, биологии и экологии* // Под редакцией В.Е. Привалова. СПб.: БГТУ, 2002. С. 11-13.
9. Сканирующие лазерные установки в медицине / Е.В. Шалобаев, Г.Н. Юркова, В.Т. Ефименко и др. // *Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ) Выпуск 4. Квантовая электроника, волновая оптика и лазерные технологии*. СПб.: ИТМО, 2001. С. 147-150.
10. Корндорф С.Ф. Метод и средство контроля поглощенной дозы при низкоинтенсивной лазерной терапии / С.Ф. Корндорф, К.В. Подмастерьев, А.В. Дунаев // *Контроль. Диагностика*, 2002. №10. С.18-21.
11. Дунаев А.В. Метод контроля поглощаемой в эпидермисе мощности излучения при низкоинтенсивной лазерной терапии. –Автореферат. дисс. кан. техн. наук. Орел.: ОрелГТУ, 2002. 16 с.
12. Кирилловский В.К. Инверсный теневой метод и его применение в эксцентрической рефрактометрии глаза / В.К. Кирилловский, А.В. Матюшенко // *Материалы международного оптического конгресса*. СПб.: ИТМО. 2000. С. 40-42.
13. Государственный реестр новых медицинских технологий / С.Б. Ткаченко и др. М.: Медицина, 2001. 350 с.
14. Клиническое применение стимулятора лазерного сканирующего физиотерапевтического СЛСФ-03.2ИК // В.Е. Илларионов, Н.В. Бочаров. СПб.: ЗАО НПО «СКАЛА», 1994. 60 с.
15. Туманова А.Л. Клинико-патогенетические аспекты в лечении сосудисто-эндокринных заболеваний глаз с применением новых лазерных технологий. Методическое пособие для врачей. Краснодар: КГМА, 2000. 54 с.

ДАТЧИКИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ

УДК 681.586

Асп. А. В. Есипов
(Орловский государственный технический университет)
г. Орел, (0862)419876, e-mail: esipov@mail.ru

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ДАТЧИК НЕГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ

Functional principles of hydroacoustic differential non-horizontality sensors are considered.

В работе [1] показано, что дальнейшее улучшение характеристик приборов с прямым методом измерения углов негоризонтальности в динамическом режиме возможно на основе перехода от механических маятников к жидкостным.

В этом случае маятник образован двумя несмещающимися жидкостями с различной плотностью, размещенных в замкнутой полости. Проблема съема информации решается применением ультразвуковых методов измерений.

В датчиках с ультразвуковым съемом информации граница раздела жидкостей используется в качестве отражателя ультразвука, который излучается и принимается с помощью двух пьезопреобразователей [2]. При наличии негоризонтальности появляются угловые рассогласования между корпусом (пьезопреобразователями) и поверхностью раздела жидкостей. Данное решение позволяет создавать двухкоординатные датчики, измеряющие негоризонтальность одновременно относительно двух осей [3]. Информативным параметром является амплитуда сигнала.

Однако, указанные датчики, обладают существенным недостатком – они являются, по сути, измерителями модуля угла негоризонтальности, т.е. не позволяют определять направление угла негоризонтальности. Указанный недостаток возможно устранить использованием дифференциального съема.

Дифференциальный съем строится следующим образом (рис. 1). При излучении фронт волны движется прямолинейно и падает на границу раздела жидкостей, затем отразившись от нее попадает на приемники излучения П1 и П2. При таком построении съема информации при отсутствии угловых рассогласований фронт волны перекрывает пьезопластины с начальным смещением h_0 (рис. 2). Т.к. площади перекрытия пьезоприемников фронт

том волны, при этом, равны, то в них возбуждаются электрические сигналы равных амплитуд. В случае появления угловых рассогласований, т.е. при отклонении корпуса датчика на угол φ , фронт волны смещается относительно пьезоприемников на некоторое расстояние $\Delta h = L \operatorname{tg} 2\varphi / 2 \approx L\varphi$. При этом для пьезопластины П1 это смещение будет определяться как $h_0 - \Delta h$, а для пьезопластины П2 соответственно – $h_0 + \Delta h$ (рис. 2). Следовательно, площадь перекрытия пьезопластины П1 увели-

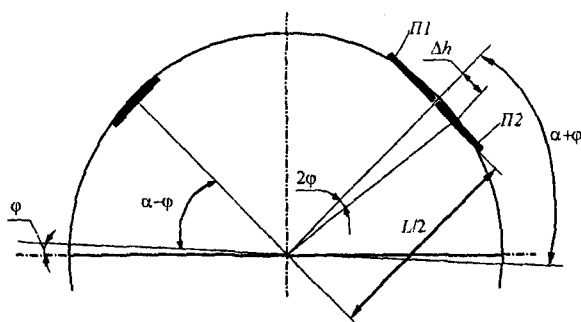


Рис. 1. – Схема падения и отражения ультразвуковой волны

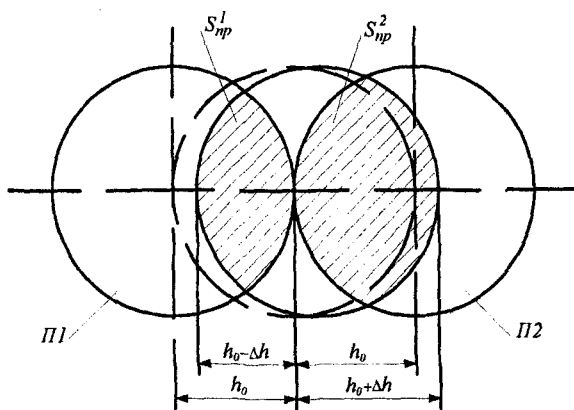


Рис. 2. — Схема перекрытия пьезоприемников фронтом волны

читься, а пьезопластины П2 – уменьшится. Таким образом, амплитуда электрического сигнала на пьезопластине П1 увеличится, а на пьезопластине П2 – уменьшится. При этом, разность амплитуд этих сигналов несет информацию как об угле негоризонтальности, так и о направлении отклонения от горизонта.

Принципиальная схема ультразвукового дифференциального датчика изображена на рис. 3. Датчик содержит корпус 1 с цилиндрической камерой, заполненной в равных частях двумя несмешивающимися жидкостями 2 и 3 с различной плотностью, имеющих границу раздела 4. Под одинаковыми углами к плоскости основания корпуса располагаются излучатель 5 и приемники 6 и 7 ультразвука. Излучатель 5 соединен с выходом генератора 8, а приемники 6 и 7 подключены к амплитудным детекторам 9 и 10. Амплитудные детекторы в свою очередь подключены к дифференциальному усилителю 11.

Определим зависимость разности амплитуд сигналов пьезоприемников от угла негоризонтальности φ . Напряжение на пьезоприемнике определяется следующим выражением [4]:

$$U_{np} = \frac{2e_{33}^2 U_0 e^{-\beta L}}{\pi f_0 \rho c \epsilon_{33} t} \eta_0^2 \frac{S_{np}}{\pi r^2}, \quad (1)$$

где e_{33} – пьезоэлектрическая постоянная кристалла;

U_0 – напряжение, подаваемое на излучатель;

β – пространственный коэффициент затухания по амплитуде;

L – длина акустического пути;

f_0 – частота ультразвуковых колебаний;

ρ – плотность среды, в которой распространяется ультразвук;

c – скорость звука в среде;

ϵ_{33} – диэлектрическая проницаемость материала пьезопластины;

t – толщина пьезопластины;

η_0 – акустико-механический коэффициент полезного действия;

S_{np} – площадь перекрытия пьезоприемника фронтом волны;

r – радиус пьезопластины.

Далее необходимо учесть коэффициент отражения от границы двух сред. Известно, что коэффициент отражения ультразвука от границы двух сред зависит от угла падения и от свойств самих сред [5]. Указанная зависимость выражается формулой Френеля для наклонного падения. С учетом указанной зависимости выражение (1) примет вид:

$$U_{np} = \frac{2e_{33}^2 U_0 e^{-\beta L}}{\pi f_0 \rho c \epsilon_{33} t} \eta_0^2 \frac{S_{np}}{\pi r^2} \frac{m \sin \alpha - \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}{m \sin \alpha + \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}, \quad (2)$$

где α – угол падения;

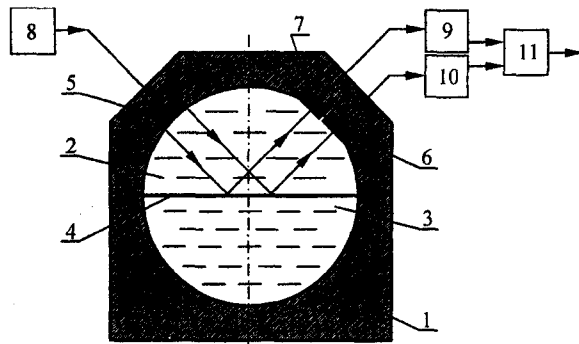


Рис. 3. – Принципиальная схема дифференциального ультразвукового жидкостного датчика негоризонтальности

n – коэффициент преломления второй среды относительно первой;

m – отношение плотностей сред.

Площади перекрытия S_{np}^1 и S_{np}^2 определяются как:

$$\begin{aligned} S_{np}^1 &= \pi r^2 - 2r(h_0 - \Delta h), \\ S_{np}^2 &= \pi r^2 - 2r(h_0 + \Delta h). \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), считая угол φ малым и, соответственно, $\varphi \ll \alpha$, получаем выражения для амплитуд на пьезоприемниках:

$$\begin{aligned} U_{np}^1 &= K_{дат} - \frac{2K_{дат}}{\pi r} h_0 + \frac{2K_{дат}}{\pi r} \Delta h, \\ U_{np}^2 &= K_{дат} - \frac{2K_{дат}}{\pi r} h_0 - \frac{2K_{дат}}{\pi r} \Delta h, \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_{дат} = \frac{2e_{33}^2 U_0 e^{-\beta L}}{\pi f_0 \rho c \epsilon_{33} t} \eta_0^2 \frac{m \sin \alpha - \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}{m \sin \alpha + \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}}$ –

постоянная, определяемая конструктивными параметрами датчика.

Следовательно разность амплитуд напряжений на пьезоприемниках, в зависимости от угла негоризонтальности φ , равна:

$$\Delta U_{np} = U_{np}^1 - U_{np}^2 = K_{дат} \frac{4L\varphi}{\pi r}. \quad (5)$$

Таким образом, функция преобразования является линейной. Необходимо отметить, что диапа-

зон измерения определяется смещением фронта волны относительно пьезопластины. При неизменном угле негоризонтальности смещение определяется длиной акустического пути. Кроме того, максимальное смещение фронта волны относительно пьезопластины определяется радиусом r пластины, так как при смещениях Δh больших r выражение для функции преобразования теряет смысл. Следовательно диапазон измерения зависит от длины акустического пути, т.е. радиуса полости, и радиуса пьезопластины.

Чувствительность датчика равна:

$$S = K_{\text{дат}} \frac{4L}{\pi r}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что определяется длиной акустического пути, радиусом пьезопластины, и постоянной, определяемой конструктивными параметрами датчика. Следует отметить, что в этом случае чувствительность в два раза больше, чем при использовании жидкостного датчика с амплитудным съемом.

Определим диапазон преобразования и порог чувствительности исходя из условия, что напряжение преобразователя должно быть больше напряжения шума, т.е.:

$$U_{\text{min}} = K_{\text{дат}} \left(1 - \frac{2h_0}{\pi r} - \frac{2L\varphi_{\text{max}}}{\pi r} \right) > U_{\text{ш}}, \quad (7)$$

$$\Delta U_{\text{min}} = K_{\text{дат}} \frac{4L\Delta\varphi_{\text{min}}}{\pi} > U_{\text{ш}}.$$

Шумовое напряжение пьезопреобразователя определяется как [6]:

$$U_{\text{ш}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-10}}{2\pi f_0 (C_{\phi} + C_{\delta})} \sqrt{\Delta f}. \quad (8)$$

где C_{ϕ} – емкость заторможенной пластины;

C_{δ} – емкость, включающая в себя входную емкость усилительного каскада, емкость соединительных проводов между преобразователем и усилительным каскадом, емкость монтажа;

R_{δ} – активная составляющая сопротивления на выходе преобразователя, включающая сопротивление электрических потерь в диэлектрике преобразователя и соединительных проводов, входное сопротивление усилителя (порядка $10^5 \div 10^6$ Ом);

Δf – полоса частот сигнала.

Емкость C_{δ} составляет значение порядка 10^{-10} Ф [6], при этом емкость заторможенной пластины из пьезокерамики ЦТС-19 составляет единицы наноФарад. Т.о. емкостью C_{δ} можно пренебречь. Тогда подставляя (8) в (7) получаем выражения для диапазона измерения:

$$\varphi_{\text{max}} < \frac{\pi r}{2L} - \frac{h_0}{L} - \frac{1,25 \cdot 10^{-10} \pi}{4\pi f_0 C_{\phi} L K_{\text{дат}}} \sqrt{\frac{\Delta f}{R_{\delta}}}, \quad (9)$$

и, соответственно, для порога чувствительности:

$$\Delta\varphi_{\text{min}} > \frac{1,25 \cdot 10^{-10} \pi}{8\pi f_0 C_{\phi} L K_{\text{дат}}} \sqrt{\frac{\Delta f}{R_{\delta}}}. \quad (10)$$

Следует отметить, что формула (10) определяет порог чувствительности только гидроакустического преобразователя, т.к. не учитывает разрешающую способность последующих электронных преобразователей. Расчеты по формулам (9) и (10) дают значения для диапазона измерения порядка $\pm 4,5^\circ$ и порога чувствительности порядка долей угловой секунды для датчика с полостью радиусом 30 мм, и пьезокерамикой ЦТС-19 радиуса 9 мм.

Литература:

1. Есинов А.В. Динамические характеристики ультразвуковых датчиков негоризонтальности // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 20 сент. 2002 г.: В 4 ч./ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ООО НПО «Темп», 2002. Ч.1. С.53-56.
2. Патент 2093791 РФ. Датчик угла отклонения от вертикали / В.Н. Есинов // Изобретения. 1997. №29.
3. Патент 2175755 РФ. Двухкоординатный датчик угла отклонения от вертикали / В.Н. Есинов, А.В. Есинов // Изобретения, 2001. № 31.
4. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1976.
5. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973.
6. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во стандартов, 1982.

УДК 621.396.08

М. А. Дубовицкий
(Тульский государственный университет)
г. Тула

УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЧАСТОТНЫХ ДАТЧИКОВ

In a paper the scheme of the device of interface of transmitters of the initial information having a frequent exit, from PC is considered. The device of interface allows to measure the period of an output signal with the given exactitude with consequent lead of the obtained information in the PC.

Известен [1] целый ряд датчиков первичной информации: имеющих частотный выход (т.е. частота выходного сигнала пропорциональна измеряемой величине). Такие датчики, изготовленные из кварцевого стекла, обеспечивают высокую точность и стабильность измерений, наряду с малыми размерами и энергопотреблением.

В некоторых случаях для повышения точности и стабильности работы датчиков широко используется дифференциальное включение двух идентичных чувствительных элементов (ЧЭ). Выходной сигнал в этом случае представляет собой разность частот двух ЧЭ [1].

Появление высокопроизводительных ЭВМ с большим объемом памяти позволяет строить различные информационные и управляющие системы. Использование ЭВМ позволяет не только накапливать большие объемы данных, но и обрабатывать их в реальном масштабе времени, что является актуальным при управлении различными подвижными объектами.

Наибольшие трудности при построении таких комплексов возникают при сопряжении сигналов с датчиков первичной информации с ЭВМ. Для этих целей широко используются различные АЦП, устройства выборки-хранения и т.д. Оцифрованная информация поступает либо на порты ввода/вывода ЭВМ (последовательный или параллельный), либо непосредственно на шину данных процессора. Выбор способа ввода информации определяется конкретными целями и задачами, решаемыми комплексом.

Существующие промышленные образцы приборов для измерения частоты (периода) сигналов не позволяют производить измерения в реальном масштабе времени [2], кроме того, при их использовании возникают определенные трудности со вводом показаний в ЭВМ (поразрядный ввод отсчета и т.д.). Кроме того, предложенные в работах [3, 4] измерительные устройства так же не удовлетворяют одному из основных требований - работе в реальном масштабе времени, у них отсутствует блок сопряжения с ЭВМ.

В связи с этим возникла необходимость разработки устройства сопряжения частотных датчиков

с ЭВМ, позволяющего вводить в ЭВМ в реальном масштабе времени сигналы либо с разностного выхода ЧЭ, либо с выходов каждого ЧЭ.

Остановимся кратко на способах ввода информации в ЭВМ. Современная ЭВМ типа IBM PC 486 и выше имеет в своем составе, как правило, один параллельный (Centronics) и два последовательных порта ввода/вывода. Кроме того, на системной (материнской) плате имеются слоты расширения, предназначенные для подключения внешних устройств к системной шине ISA (на компьютерах типа Pentium II и выше данная шина выполнена в формате PCI). Использование системной шины компьютера для получения данных извне сопряжено с определенными трудностями (значительная сложность устройства сопряжения, необходимость вскрывать компьютер, риск вывести из строя системную плату в случае сбоя в исследуемом устройстве и т.д.). Последовательный порт, используемый, в основном, для подключения мыши, требует специального "кодирования" информации (представления ее в виде последовательной цепочки информационных и служебных битов), что при наличии обширных объемов экспериментальных данных и ограничения скорости работы последовательного порта может привести к существенным временным задержкам.

Значительный интерес с точки зрения ввода информации в ЭВМ представляет параллельный порт, работающий в режиме ECP.

Протокол ECP в обоих направлениях обеспечивает два вида циклов [5]:

- циклы записи и чтения данных;
- командные циклы записи и чтения.

В качестве метода измерения частоты сигналов ЧЭ выбран цифровой метод измерения частоты [2]. Сущность данного метода заключается в том, что импульсы заполнения за время одного периода исследуемого сигнала накапливаются в счетчике. При этом разрядность счетчика и частота импульсов заполнения определяют диапазон измеряемых частот и точность измерения.

Структурная схема устройства сопряжения показана на рис. 1.

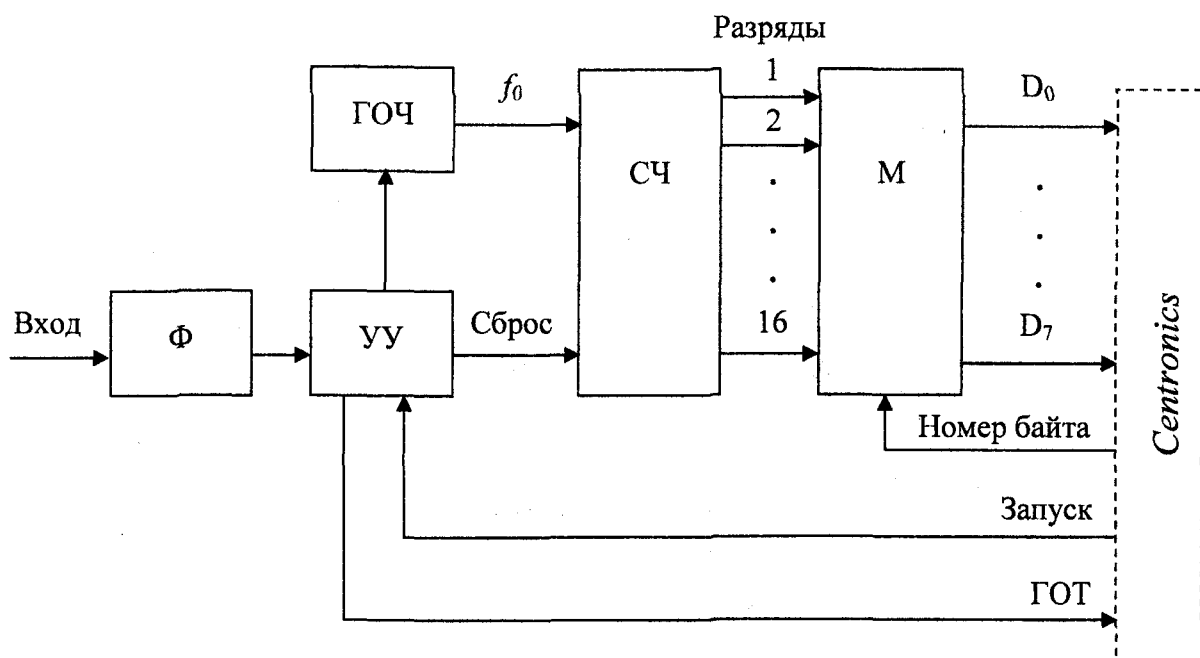


Рис. 1. – Структурная схема устройства сопряжения:
 Ф – входной формирователь, УУ – устройство управления,
 ГОЧ – генератор опорной частоты, СЧ – счетчик, М – мультиплексор

Генератор опорной частоты вырабатывает импульсы заполнения заданной частоты f_0 , которые поступают на шестнадцатиразрядный счетчик. Входной сигнал поступает на формирователь, ограничивающий его по амплитуде. С формирователя сигнал поступает на устройство управления, которое вырабатывает необходимые для работы схемы управляющие сигналы. Схема находится в режиме ожидания до тех пор, пока из ЭВМ не придет сигнал "Запуск". Данный сигнал разрешает работу всей схемы. Устройство управления (при наличии сигнала "Запуск") выделяет один период входного сигнала, за время которого на вход счетчика поступают импульсы заполнения.

По окончании периода прохождения импульсов заполнения на вход счетчика запрещается и формируется сигнал "ГОТ" окончания измерения. ЭВМ, получив сигнал "ГОТ", формирует сигнал "Номер байта" для выбора номера считываемого байта (младший или старший) и считывает выбранный байт. После ввода обоих байтов ЭВМ снимает сигнал "Запуск", что приводит к обнулению счетчиков. Система приходит в состояние ожидания. Как только придет сигнал "Запуск", алгоритм работы устройства повторится.

В соответствии с данной структурной схемой разработана принципиальная схема устройства сопряжения (рис. 2).

Генератор опорной частоты с кварцевой стабилизацией выполнен на микросхеме DD1. Частота импульсов заполнения, в зависимости от режима работы, составляет 10 МГц при измерении периода сигналов с каждого ЧЭ или 1 МГц при измерении периода разностного сигнала. Переключение режима работы осуществляется двойной переключкой JP1, которая так же коммутирует и входы устройства. Делитель частоты импульсов заполнения выполнен на микросхеме DD4.

Входной сигнал поступает на формирователь, выполненный на транзисторе VT1. С коллектора данного транзистора ограниченный по амплитуде входной сигнал через элемент DD3.1 поступает на устройство управления, выполненное на микросхеме DD2. Устройство управления работает следующим образом. В начальный момент сигнал на линии INIT (сигнал "Запуск") имеет уровень логического "0", на прямых выходах триггеров DD2.1 и DD2.2 так же поддерживается уровень логического "0", на инверсных выходах этих триггеров поддерживается уровень логической "1". Это состояние триггеров не зависит от сигналов на их входах C и D, поэтому, хотя входные импульсы и проходят через элемент DD3.1 (т.к. на выходе элемента DD3.2 присутствует логическая "1"), устройство находится в режиме ожидания. Кроме того, с выхода элемента DD3.4 сигнал сброса поступает на счетчики

DD5 - DD8 и делитель DD4 и обнуляет их. Как только на линии INIT появится логическая "1", устройство перейдет в режим измерения.

При этом (допустим, что в данный момент транзистор VT1 открыт) состояние триггеров DD2.1 и DD2.2 не изменится. Уровень логического "0" на прямом выходе триггера DD2.1 запрещает прохождение (через элемент DD3.3) импульсов заполнения на вход счетчика DD5. Как только положительное напряжение на базе транзистора VT1 исчезнет, с его коллектора уровень логической "1" через элемент DD3.1 (т.к. на выходе элемента DD3.2 присутствует логическая "1") поступит на вход C триггера DD2.1 и переключит его. Одновременно переключится и триггер DD2.2, т.к. уровень логической "1" с прямого выхода триггера DD2.1 поступит на его вход C.

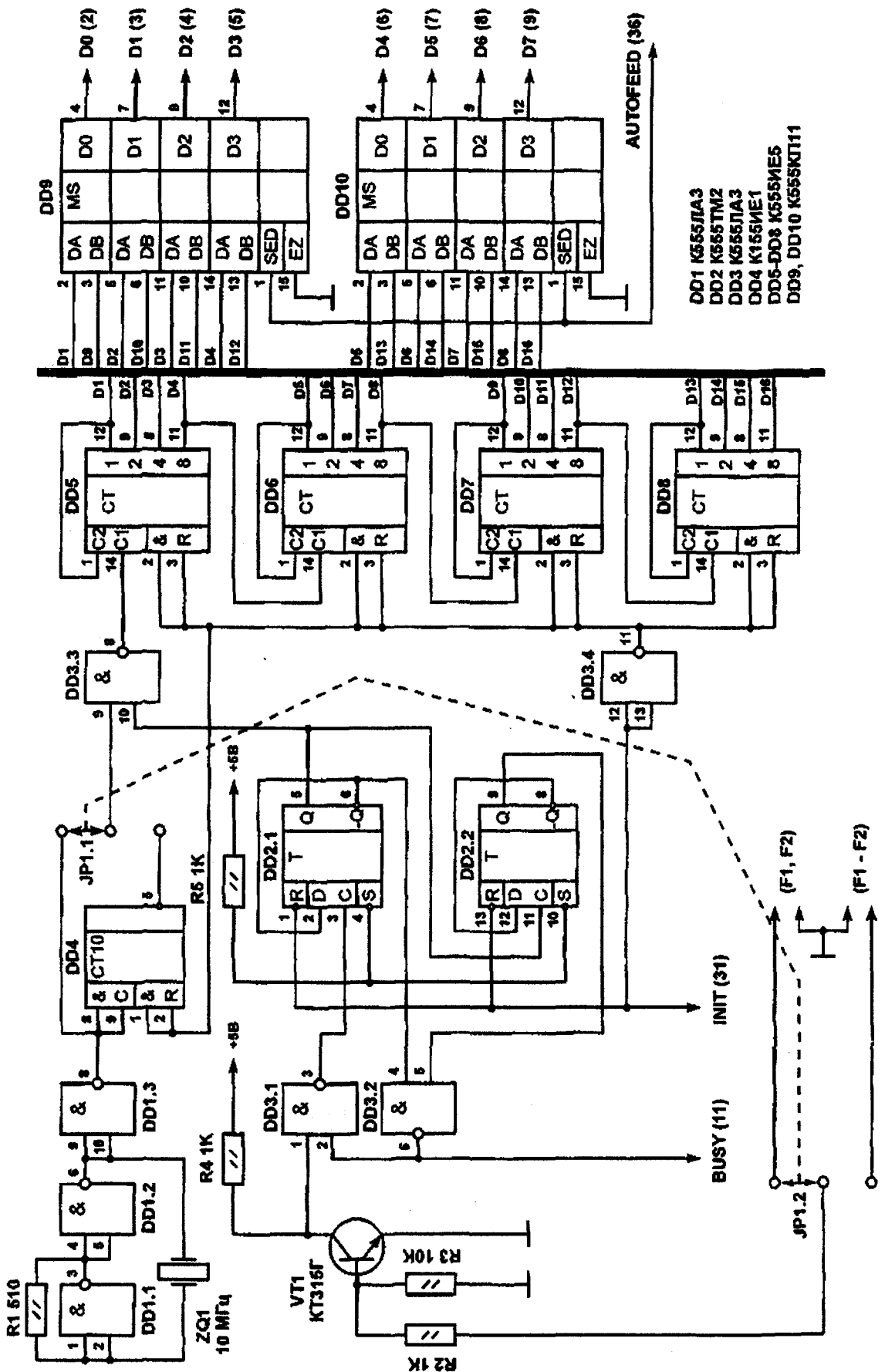


Рис. 2. – Принципиальная схема устройства сопряжения

Состояние элемента DD3.2 при этом не изменится.

Одновременно импульсы заполнения через элемент DD3.3 начнут поступать на вход счетчика DD5. Данное состояние схемы будет сохраняться до тех пор, пока с коллектора транзистора VT1 опять не поступит на вход С триггера DD2.1 логическая "1" (начало следующего периода входного сигнала) и не переключит его в нулевое состояние. Логический "0" на его прямом выходе запретит поступление импульсов заполнения на вход счетчика DD5. Состояние же триггера DD2.2 не изменится. На выходе элемента DD3.2 будет логический "0" (сигнал "ГОТ"), запрещающий прохождение входного сигнала через элемент DD3.1. Низкий уровень на линии BUSY (сигнал "ГОТ") свидетельствует о завершении цикла измерения. Накопленное счетчиками DD5 – DD8 число будет пропорционально длительности периода входного сигнала.

ЭВМ после установки в "1" сигнала INIT непрерывно проверяет состояние сигнала BUSY. Как только этот сигнал сбрасывается, ЭВМ устанавливает уровень логического "0" на линии "Номер байта" (Autofeed). Мультиплексоры DD9, DD10 посылают младшие 8 разрядов шестнадцатиразрядного счетчика на линии D₀ – D₇ порта Centronics. ЭВМ считывает эти разряды и устанавливает уровень логической "1" на линии "Номер байта" (Autofeed).

Мультиплексоры DD9, DD10 посылают старшие 8 разрядов шестнадцатиразрядного счетчика

на линии D₀ – D₇ порта Centronics. ЭВМ считывает эти разряды. После этого сбросом сигнала INIT устройство приводится в исходное состояние.

Таким образом, разработанное устройство позволяет:

- измерять период разностного выходного сигнала ЧЭ с точностью 1 мкс (0,01%);
- измерять период выходного сигнала каждого ЧЭ с точностью 0,1 мкс (0,1%);
- вводить результаты измерения в ЭВМ через параллельный порт Centronics.

Необходимо отметить, что разработанное устройство можно применять совместно с любым прибором, имеющим частотный выход, подобрав частоту импульсов заполнения и емкость счетчика.

Литература:

1. Карцев Е.А. Унифицированные струнные измерительные преобразователи. / Е.А. Карцев, В.П. Короткое. М.: Машиностроение, 1982.
2. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. Пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1993.
3. Грязнов М.И. Измерение параметров импульсов. М.: Радио и связь, 1991.
4. Суэтин В.Я. Цифровые измерительные приборы. М.: Радио и связь, 1984.
5. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. СПб: Изд-во "Питер", 2000.

СООБЩЕНИЯ

УДК 621.9

Д-р. техн. наук С. А. Добротин, И. Л. Зубков
(Дзержинский филиал Нижегородского государственного
технического университета)

ОПТИЧЕСКИЕ ХИМИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Optical chemical sensor controls due to an opportunity of inclusion in интегрально-optical schemes, and also creations on their basis of touch platforms for multitouch systems, are one of most roughly progressing kinds of chemical sensor controls.

Газоаналитические методы наиболее распространены в технике течеискания. Нередки случаи, когда, использование в изделиях машиностроения различных технологических газов влечет за собой необходимость контроля их утечек. Использование для этих целей оптических сенсоров является наиболее предпочтительным.

Широкое распространение оптические сенсоры получили в последние годы. Основными их достоинствами являются химическая и коррозионная стойкость, а также взрывобезопасность. Последние два свойства делают оптические сенсоры привлекательными для использования в химическом машиностроении.

В большинстве конструкций оптических химических сенсоров применяется оптическое волокно. Такие сенсоры называются оптоволоконными или волоконно-оптическими. Волоконно-оптические сенсоры, в которых реагентная фаза находится на торце оптического волокна, по аналогии с микроэлектродами, называют оптрдами или волоконно-оптическими зондами.

Существующие оптические химические сенсоры можно разделить на три основные группы:

- оптосенсорные устройства (оптическое волокно генетически не связано с реагентной фазой, а используется для подвода и отвода света);
- волоконнооптические химические сенсоры (в качестве волновода используется оптическое волокно);
- плоскостоволноводные химические сенсоры (в качестве волновода используются тонкие прозрачные слои).

Последние две группы относятся к сенсорам волноводного типа. К оптосенсорным устройствам относят ленточные анализаторы, в которых используются цветные реакции аналитических реагентов, нанесенных на ленту или пористый носитель, с газовыми компонентами. Это направление

газоаналитического приборостроения успешно развивается и в настоящее время [1].

В волноводных сенсорах используется эффект полного внутреннего отражения, которое происходит на границе волноводного сердцевинного стержня с оболочкой, имеющей коэффициент преломления меньше, чем коэффициент преломления материала сердцевины. В настоящее время на этом принципе разработан сенсор NH₃ обратимого действия с 600 отражениями [2].

Все большее значение приобретает метод получения аналитического сигнала с помощью волоконных интерферометров. Такие приборы способны детектировать вещества на уровне ppb [3]. Разработан мультиэлементный волноводный оптический химический сенсор, в котором, на поверхность восьми оптических волноводов, представляющих собой капилляры, нанесены химические селективные покрытия, которые изменяют окраску в присутствии анализируемых компонентов [4].

В плоскостоволноводных оптических химических сенсорах, работающих на принципе полного внутреннего отражения, в качестве волноводов используются либо sol-gel материалы [5], либо полимерные пленки. Применение этих материалов связано с уменьшением толщины волновода (1 мкм) и увеличением количества полного внутреннего отражения (порядка 10000) и как следствие – с увеличением чувствительности. Ввод света в таких сенсорах осуществляется при помощи призмы [6], дифракционной решетки [5] или посредника [7].

Оптические сенсоры – это единственный вид химических сенсоров, в которых аналитический сигнал формируется непосредственно из химического взаимодействия контролируемых сенсором молекул с молекулами аналитических реагентов чувствительного слоя сенсора, на чем основаны современные оптические химические сенсоры, позволяющие контролировать индивидуальные молекулы в медико-биологических задачах.

Плосковолноводные оптические химические сенсоры благодаря возможности включения в интегрально-оптические схемы, а также создания на их основе сенсорных платформ для мультисенсорных систем, являются одними из наиболее бурно прогрессирующих видов химических сенсоров.

Литература:

1. Аналитическое приборостроение // Экспресс-информация: Приборы и средства автоматизации и системы управления. 1990. Вып.1.
 2. Guilianni J.F. Optical waveguide chemical sensor / J.F. Guilianni, P.P. Bey, J.H. Wohltjen // "Transducers 85": Int. Conf. Solid-State Sens. And actuat., N.Y. 1985. V.1. P. 74-6.
 3. Пат. 4650329 США. Трехпараметрический оптический прибор для детектирования химических веществ // РЖХ, 1987. Реф. 23. Г 148 П.

4. Smardzevski R.R. Multi-element optical waveguide sensor: general concept and design // *Talanta*, 1988. V.35. № 2. P. 95-101.
 5. Yang L. Sol-gel-based, planar waveguide sensor for gaseous iodine / L. Yang, S.S. Saavedra, N.R. Armstrong // *Anal. Chem.* 1996. V. 68. P. 1834-41.
 6. Yang L. Chemical sensing using sol-gel derived planar waveguide and indicator phases / L. Yang, S.S. Saavedra, N.R. Armstrong // *Anal. Chem.* 1995. V.67. P. 1307-14.
 7. Соборовер Э.И. Исследование сенсорного эффекта в плосковолноводном оптическом химическом газовом сенсоре трехслойной конструкции / Э.И. Соборовер, В.В. Гундорин // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 23-28.

УДК 62.762

Асп. А. М. Анохин

(Орловский государственный технический университет)

г. Орел, (0862)419849, e-mail: pmp1@ostu.ru

К ПРОБЛЕМЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УПЛОТНЕНИЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Some types of pumps seals are considered in this paper. The special attention is given on non-contact seal, operating under of high-speed rotation. One of the lines of research is consideration of the combined operation of radial fluid-film bearings and seals.

Уплотнительные устройства относят к одним из ответственных элементов гидравлических систем и в частности насосных агрегатов. От них зависят надежность и долговечность гидравлических машин. Выход из строя уплотнения ведут к дефектам в работе гидравлического оборудования. Утечки жидкости, преждевременное изнашивание, потеря мощности приводят к большим экономическим потерям.

Нормальная работа гидрооборудования осуществляется только при надежном уплотнении (герметизации) всех аппаратов и их элементов, обеспечивающих минимальные утечки. Как показывает практика, максимальные утечки, из всех гидравлических устройств происходят именно в насосах и гидромоторах.

Уплотнением называют такое устройство, которое обеспечивает минимальное (или полностью исключает) проникновение жидкостей, газов или пыли, грязи через подвижные или неподвижные соединения деталей. Из самого определения уплотнений следует, что все средства уплотнения

соединений деталей можно разделить на два класса: подвижные и неподвижные. По эффекту уплотнения их можно подразделить на контактные и бесконтактные. Контактное уплотнение обеспечивает герметизацию за счет промежуточного элемента, находящегося в зазоре между соединениями деталями и контактирующего с ними.

Бесконтактным называют уплотнение, в котором герметизация достигается за счет создания малых зазоров или других эффектов, при которых нет взаимного контакта уплотняемых деталей.

Существует следующая классификация средств уплотнений по их конструктивному наполнению:

- 1) уплотнения пригонкой;
- 2) уплотнения металлическими кольцами;
- 3) уплотнения набивками (наполнителями);
- 4) манжетные уплотнения;
- 5) лабиринтное уплотнение;
- 6) уплотнение магнитными жидкостями;
- 7) динамическое уплотнение.

Из всех конструктивных способов уплотнения и бесконтактным уплотнениям относят лабиринтное и динамическое, а к контактным – остальные.

Традиционным видом контактных уплотнений являются уплотнения набивкой, уплотнителем в которых является антифрикционная, вязкоупругая набивка (рис. 1). Данный вид уплотнений характеризуется постоянным не компенсируемым износом уплотнителя, и, следовательно, увеличением утечек, что приводит к необходимости их постоянного обслуживания.

В центробежных насосах проблемой является обеспечение работоспособности конструкция стальной пяты и резинотехнического подшипника (рис. 2), при работе которой наблюдается интенсивный износ подпятника. Материал подпятника смесь резиновая Ш – 3в – 12 3825 тв. 80 – 95 ТУ 381051082 – 86.

Иностранные фирмы, в частности Болгарские конструкторы предложили вариант подпятника, в котором пята опирается на подпятник, состоящий из шести цилиндрических сегментов, каждый из которых свободно посажен на две опоры по радиу-

су подпятника и шарик, позволяющий сегменту располагаться под определенным углом к пяте при работе насоса (рис. 3). Однако стоимость Болгарского подпятника 30-50 долларов США, что сильно отразится на стоимости самого насоса.

В конструкциях винтовых насосов отечественные и иностранные фирмы работают над конструкцией торцового уплотнения (рис. 4). Уплотнительный узел, состоящий из неподвижной опоры и вращающего диска, должен обрабатываться с высоким классом чистоты. Материал колец – релит, изготовленный спеканием. В динамике происходит отход одного кольца от другого, в результате чего возникают утечки, возрастающие с увеличением давления.

В представленном материале проведены наиболее распространенные варианты уплотнительных узлов насосных агрегатов, разрабатываемых отечественными и зарубежными машиностроительными предприятиями.

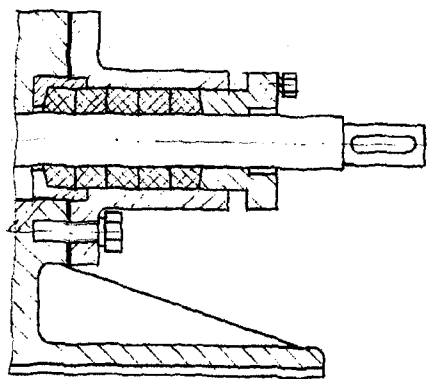


Рис. 1. – Уплотнительный узел шестеренного насоса

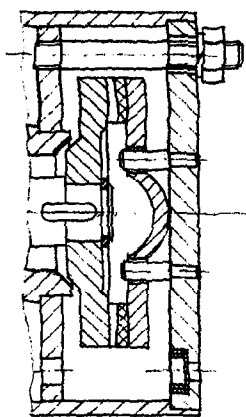


Рис. 2. – Уплотнительный узел центробежного насоса

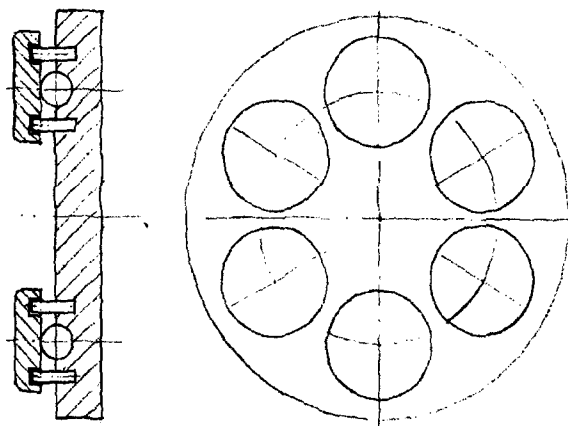


Рис. 3 – Подпятник

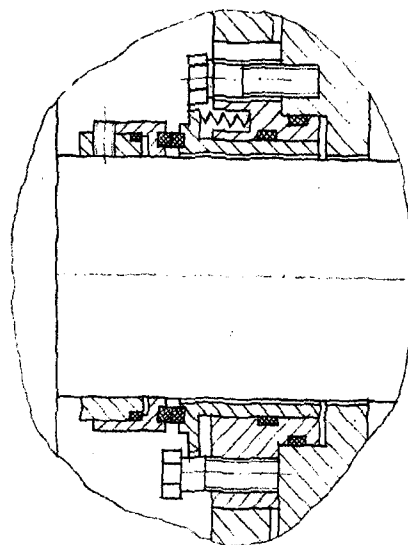


Рис. 4. – Уплотнительный узел винтового насоса

УДК 621.787

Асп. Е. А. Звягина
 (Орловский государственный технический университет)
 г. Орел, тел. (0862)419877; e-mail: avk@ostu.ru

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МУЛЬТИФАЗНЫХ НАСОСОВ

The principle of work and technological receptions of increase of durability of multiphase pumps is considered.

Насосы А32ВВ 63/25А52, А52ВВ63/25, А52 ВВ50/25 и А52ВВ 160/25 разработанные и выпускаемые ОАО Ливгидромаш, относятся к мультифазным (многофазным) насосам, применяемым для транспортировки газожидкостной смеси нефть - вода - газ по одному трубопроводу в системе сбора продукции нефтяного пласта, и относятся к винтовым негерметичным насосам, которые входят в общую классификацию винтовых насосов.

Основными элементами винтового негерметичного насоса являются: 1) статор – корпус насоса с полостью, примыкающей по концам к камере всасывания и к камере нагнетания; 2) рабочие органы (РО) – винты (роторы), которые помещены в обойму, установленную в корпусе насоса.

Винтовые насосы относятся к типу роторных насосов, т.е. к объемным насосам, у которых подача осуществляется путем вытеснения жидкости рабочими органами - винтами, совершающими только вращательное движение. При вращении винтов, их нарезки, взаимозаменяясь, отсекают некоторый объем жидкости в камере всасывания и перемещают его поступательно вдоль оси, постепенно вытесняя в камеру нагнетания. По принципу действия винтовые насосы относят к объемным, а по способу сообщения энергии жидкости - к ротационным. Отличительной чертой винтовых негерметичных насосов от герметичных, является наличие зазоров в проточной части насоса δ_1 между цилиндрическими поверхностями выступов винтов и цилиндрической поверхностью расточки обоймы (δ_1), цилиндрической поверхностью выступов одного винта и цилиндрической поверхностью впадин соседнего винта (δ_2), винтовыми поверхностями двух взаимодействующих винтов (δ_3) через которые осуществляется утечка смеси.

Величинами, дающими количественную характеристику мультифазных насосов, являются: час-

тота вращения n ; создаваемый напор (перепад давления) $H(\Delta p)$; содержание газа a ; степень повышения давления k ; подача теоретическая $Q_{теор}$ и действительная $Q_{ф}$; потребляемая мощность смеси НСМ; объемный КПД насоса η_0 ; механическо-гидравлический КПД η_m ; КПД учитывающий влияние изотермического сжатия газа в камерах рабочих органов насоса; кинематическая вязкость ν и плотность $\rho_{ж}$ перекачиваемой жидкости.

Отличиями мультифазных насосов от винтовых негерметичных насосов являются: большой диаметр вершин винтов D_e , малый ход t винтов для создания большого числа замкнутых камер с целью получения высокой степени сжатия газа и уменьшения действующей на винт радиальной силы; укороченная конструкция насоса за счет максимального приближения опор к нарезкам винтов; винты выполнены цельными, т.е. жесткими для уменьшения прогиба при высоком давлении; минимальные зазоры между рабочими органами для исключения прорыва газа через жидкостное уплотнение щелей; специально разработанный профиль винтов, который обеспечивает высокую герметичность РО и их надежную работу при возможном касании винтов из-за прогиба при высоких давлениях.

Для эффективной работы мультифазных насосов зазоры между рабочими органами необходимо уменьшать и выдерживать постоянными при эксплуатации для исключения прорыва газа через жидкостное уплотнение щелей, если газ прорывается через щели, подача падает и происходит срыв потока, поэтому для каждого типа насоса четко регламентируется величина зазоров δ_1 , δ_2 , δ_3 . Однако в процессе эксплуатации насосов, величина зазоров постепенно увеличивается и при анализе причин вызывающих их увеличение, главной является поверхностный износ винтовой нарезки роторов и обоймы. Наибольшему износу подвержены выступы винтовой нарезки, ведущие к

увеличению зазора δ , при визуальном анализе выступов можно увидеть царапины, углубления небольшого диаметра, сколы, которые являются результатом воздействия примесей на рабочую поверхность. Мультифазные насосы предназначены для транспортировки газожидкостной смеси нефтяного пласта вязкостью $0,76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (до 100 ВУ) с оговоренным содержанием примесей до 0,02 % по массе размером не более 0,1 мм. Перекачиваемая нефть содержит примеси разного рода: частицы песка, глины, кристаллы солей, сероводород и воду. Износ деталей насосов, перекачивающих жидкости со взвесью представляет собой сложное явление и зависит от условий эксплуатации, конструкции насосов, применяемых материалов, технологии изготовления его рабочих органов. При анализе наработки многофазных насосов за период от начала выпуска (1999г.) до 2002г. средняя наработка до капитального ремонта, связанного со сменой рабочих органов насоса, составляет 6349 ч, при этом наработка колеблется в пределах 5000-8854 ч.. Критерием выработки заданного ресурса является снижение подачи более чем на 20 % от номинального значения за счет износа рабочих органов.

Рабочие органы-винты можно рассматривать как совокупность бесконечно большого числа бесконечно тонких (плоских) одинаковых шестерен, повернутых одна относительно другой «а бесконечно малый угол и жестко скрепленных друг с другом. В винтовом насосе винты расположены таким образом, что выступы винтовой нарезки одного винта входят во впадины соседнего, при этом пара взаимодействующих винтов имеет соответственно правую и левую нарезки. Элементами винтовой нарезки винтов являются: наружный и внутренний диаметры Винтовой нарезки D_e , D_i , шаг S , профиль нарезки, размеры, которых устанавливаются на основе расчетов в соответствии с заданными техническими параметрами насоса и требуют точного исполнения. Высокие требования по точности и качеству рабочих поверхностей (диаметр выступов нарезки – h 7-8, диаметр впадин – h 8-9, шероховатость поверхностей – 6-7 класс чистоты, твердость не менее 560 HV) требует выполнение совокупности условий: правильного построения технологического процесса, точного расчета и изготовления профиля режущего и измерительного инструмента для нарезки и контроля винтовой поверхности, наличие точного оборудования, применение современных методов упрочнения рабочих поверхностей для предотвращения износа.

Машиностроение.
Приборостроение 2003

Технологический процесс изготовления роторов разработан на предприятии на основе типового технологического процесса и сортоит из формообразующих, отделочных, и упрочняющих операций. Проведение упрочняющей операции обусловлено повышением эксплуатационных показателей (твердости, износостойкости, сопротивление усталостному разрушению) рабочих поверхностей, для противостояния абразивному, водородному изнашиванию, коррозии. Процессы абразивного изнашивания зависят от формы и размеров абразивных частиц, возможности их закрепления в материале, соотношения твердости материала H_M и абразива H_a , состава и структуры поверхностных слоев металлов.[4] Водородное изнашивание также на прямую зависит от состава и структуры материала, наличия микродефектов на рабочих поверхностях деталей.

Для повышения стойкости рабочих поверхностей деталей абразивному изнашиванию рекомендуется применять: химикотермическую обработку (цементация, азотирование, нитроцементация); упрочнение поверхностным легированием (ионная имплантация, электроискровое легирование); термическую обработку (поверхностная закалка ТВЧ, лазерное упрочнение); деформационное упрочнение; комбинированные методы.

На предприятии в качестве упрочняющей обработки винтовых поверхностей применяют химикотермическую обработку –, газовое азотирование – («твердостное» азотирование, $500^\circ - 600^\circ\text{C}$). Азотирование осуществляется при температуре $t=570^\circ \pm 10^\circ\text{C}$, продолжительность - 30ч, толщина азотированного слоя составляет 0,2 – 0,4 мм, твердость - не менее 580HV. Основным преимуществом азотирования является возможность получения высокой износостойкости и сопротивления усталости изделий при их минимальном корблении и деформации; создание в азотированном слое остаточных напряжений сжатия, повышающих предел выносливости изделия; малая чувствительность к конструктивным и технологическим концентраторам напряжений, коррозионная стойкость.

Однако, азотирование имеет и недостатки: большая длительность процесса насыщения поверхности азотом; зависимость толщины нитридной зоны от состава стали и режимов азотирования. Перечисленные недостатки требуют от разработчика и исполнителя правильного подбора режимов азотирования. Кроме того, азотирование не в полной мере удовлетворяет требованиям по износостойкости в связи с недоста-

точной толщиной упрочнённого поверхностного слоя ($h = 0,2-0,4$ мм).

На предприятии разрабатываются и внедряются новые способы повышения долговечности насосов за счет улучшения Конструкции насоса, внедрения новых методов упрочнения, в частности, наплавки специального сплава ротекса Н60 в заранее нарезанные пазы на поверхности выступов винтовой нарезки с последующей термической, механической обработкой и азотированием. Технология наплавки также имеет ряд недостатков, связанных с изменением структуры материала и размеров детали вследствие интенсивных газовых потоков.

Альтернативным методом упрочнения является цементация, которая предполагает последующую термическую обработку и шлифование. Припуск на механическую обработку требует увеличение толщины цементованного слоя, что приводит к увеличению длительности процесса насыщения, возрастанию энергетических и организационно-технических затрат. После шлифования работоспособность цементованного слоя снижается [5].

Применение нитроцементации ограничивается химическим составом материала деталей. Роторы изготавливаются из легированной стали, содержащей хром, марганец (18ХГТ), нитроцементация которой часто сопровождается внутренним окислением диффузионного слоя материала. Это ведет к снижению твердости и предела выносливости винтовой поверхности.

Поверхностная закалка ТВЧ вследствие сложности рабочего профиля винта имеет ограниченное применение. Сложная форма индукторов, высокая стоимость индукционных установок и индукторов, высокая энергоёмкость процесса препятствует применению этого метода при выпуске мультифазных насосов.

Деформационные методы упрочнения имеют наибольшие перспективы применения. ППД обработка способствует увеличению износостойкости, коррозионной стойкости, сопротивления усталостному разрушению, при этом отсутствуют термические дефекты, не требуется проведения последующая механическая обработка, возможна обработка сложного профиля винтовой нарезки с использованием профильного инструмента на имеющемся оборудовании. При этом обеспечивается минимальная шероховатость поверхности с благоприятной формой микронеровностей и

большой долей опорной площади; создаются сжимающие остаточные напряжения, плавно и стабильно повышается микротвердость поверхностного слоя на глубине 1...3 мм. Повышение микротвердости поверхностного слоя достигает 150 %. Глубина напряженного слоя на 10...50 % превышает глубину наклепанного слоя [5]. Методы поверхностно пластического деформирования являются менее трудоемкими и относятся к энергосберегающим,

Эффективно обработка ППД совместно с другими методами упрочнения. Так проведение предварительного поверхностно пластического Деформирования перед ХТО позволяет увеличить диффузную зону, толщину карбидного, нитридного, карбонитридного слоя, получить мелкозернистую структуру, что в целом повышает эксплуатационные свойства поверхностного, слоя. Обработка поверхностей после ХТО приводит к повышению сопротивления усталости, предела выносливости, снижению шероховатости, дополнительному упрочнению поверхностного слоя [6].

Анализ способов упрочнения винтовых поверхностей показывает, что повышение долговечности рабочих органов мультифазных насосов наиболее эффективно производить методами ППД, особенно в сочетании с ХТО.

Литература:

1. Женовак Н.Г. Судовые винтовые негерметичные насосы. Л.: Судостроение, 1972. 144 с.
2. Рязанцев В.М. Двухвинтовой насос для перекачивания многофазной жидкости нефть-вода-газ. / В.М. Рязанцев, В.В. Лихман, В.А. Яхонтов – Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2000. №7. С.29–31.
3. Рязанцев В.М. Радиальные силы и жесткость винтов мультифазных двухвинтовых насосов. Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2001. №12. С.27–29.
4. Чичинадзе А.В. Трибология. М: Машиностроение, 2002.
5. Киричек А.В. Технологические возможности упрочняющих технологий.
6. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. М.: Машиностроение, 1991. 144 с., ил.
7. Буцнин Ю.А. Технология термической обработки сталей Учеб. для вузов. / Ю.А. Буцнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. М.: Металлургия, 1986. 424с.

Ответственные за выпуск:

Степанов Ю. С., Киричек А. В., Подмастерьев К. В.

Черепенько А. А., Барсуков Г. В., Подзолков М. Г.

Гончаров А. В.

Известия ОрелГТУ.

Серия "Машиностроение. Приборостроение".

2003. № 4. 97 с.

Статьи публикуются в авторской редакции

Лицензия № ИД 00670 от 05.01.2000

Подписано в печать 30.09.2003

Формат. 69×90/8 Бумага офсетная. Печать ризография.

Гарнитура «Таймс». Уч. изд. л. 6,88. Тираж 500 экз.

Заказ № 59/0411

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии

ОрелГТУ

302030, г.Орёл, ул. Московская, 65.