

УДК 621.787

*М. Н. Миронова, Е. Н. Антонова*

## УПРАВЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ И ФОРМОЙ МИКРОРЕЛЬЕФА ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЕМАНТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

UDC 621.787

*M. N. Mironova, E. N. Antonova*

## CONTROL OF ROUGHNESS AND MICRORELIEF FORM DURING STRENGTHENING PNEUMOCENTRIFUGAL PROCESSING OF APERTURES USING FUNCTIONAL SEMANTIC NETWORKS

### Аннотация

В статье рассмотрены вопросы обеспечения шероховатости по параметру Ra и формы микрорельефа поверхности при пневмоцентробежной обработке отверстий двухрядным пневмоцентробежным раскатником. Использован подход, базирующийся на технологиях функциональных семантических сетей. Рассмотрена возможность применения функциональных семантических сетей для выбора рациональных параметров пневмоцентробежной обработки отверстий. Приведена семантическая сеть для управления пневмоцентробежной обработкой отверстий. Указаны пути управления формой микрорельефа поверхности и шероховатостью поверхности.

### Ключевые слова:

пневмоцентробежная обработка, искусственный интеллект, функциональные семантические сети.

### Abstract

The article investigates ensuring roughness according to the Ra parameter and the form of a surface microrelief during pneumocentrifugal processing of apertures by a two-row pneumocentrifugal burnisher. The approach based on technologies of functional semantic networks is used. The possibility is considered of using functional semantic networks for choosing rational parameters for pneumocentrifugal processing of apertures. The semantic network for controlling pneumocentrifugal processing of apertures is presented. The ways to control the form of a surface microrelief and surface roughness are specified.

### Keywords:

pneumocentrifugal processing, artificial intelligence, functional semantic networks.

### Введение

Задача обеспечения заданных параметров качества поверхности при пневмоцентробежной обработке отверстий представляет собой актуальную задачу технологии машиностроения, решение которой позволяет повысить надежность и долговечность деталей пар трения. Актуальность этой задачи объясняется и непрерывным повышением

требований к точности изготовления деталей машин, таких, например, как подшипники скольжения, гильзы цилиндров, шатуны, поршни, входящие в компрессоры, двигатели внутреннего сгорания и другие.

Достичь заданных параметров качества поверхности невозможно без совершенствования конструкции инструмента и оптимизации выбора режимов обработки.

© Миронова М. Н., Антонова Е. Н., 2020



В связи с этим создание более совершенных технологических процессов пневмоцентробежной обработки, позволяющих прогнозировать и достигать требуемую шероховатость и форму микрорельефа поверхности, является актуальной задачей.

### Постановка задачи

Управление процессом пневмоцентробежной обработки отверстий представляется наиболее эффективным методом обеспечения требуемых параметров качества поверхности. Для этого можно использовать методы, базирующиеся на технологиях искусственного интеллекта, в частности, на технологиях функциональных семантических сетей, учитывающих текущее состояние технологического оснащения, а также функциональные взаимосвязи между конструкторско-технологическими параметрами и позволяющие обеспечить заданное качество поверхности на основе решения задачи многофакторной оптимизации конструкции инструмента и режимов обработки.

Функциональные семантические сети представляют собой логическую схему, описывающую функциональные взаимосвязи между аргументами  $P_1, \dots, P_j, \dots, P_k$  совокупности математических зависимостей, имеющих вид [1]:

$$F(P_1, \dots, P_j, \dots, P_k) = 0. \quad (1)$$

### Результаты и их анализ

Для эффективного управления шероховатостью и формой микрорельефа поверхности на основе использования функциональных семантических сетей проведен энергетический анализ пневмоцентробежных раскатников, позволяющий учесть потери энергии при преобразовании энергии давления сжатого воздуха в энергию смятия микронеровностей, а также установить взаимосвязи основных конструктивных параметров инструмента и режимов обработки отверстий [2].

Кинематика потоков сжатого воздуха в раскатнике (распределение энергии) представлена на рис. 1 [3].

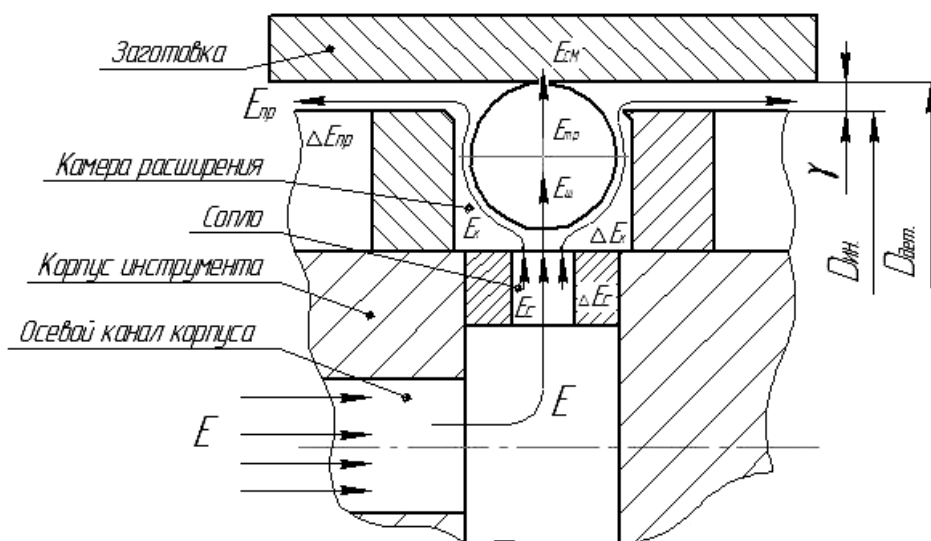


Рис. 1. Кинематика потока сжатого воздуха в пневмоцентробежном раскатнике:  $E$  – потенциальная энергия сжатого воздуха;  $E_c$  – кинетическая энергия струй;  $E_{ш}$  – кинетическая энергия шаров;  $E_{см}$  – энергия смятия микронеровностей;  $\Delta E_c$  – потери энергии в соплах;  $\Delta E_k$  – потери энергии в камере расширения;  $\Delta E_{пр}$  – потери энергии в зазоре между инструментом и заготовкой



Анализ физики процесса и энергетического баланса позволил представить процесс пневмоцентробежной обработки отверстий в аналитическом виде как математическую модель, включающую ряд зависимостей, учитывающих влияние конструктивных и технологических параметров инструмента на шероховатость и форму микрорельефа поверхности [4, 5].

Для построения функциональной

семантической сети полученные зависимости были преобразованы в отношении сети в форме выражения (1) и выделены их параметры.

Отношения и параметры функциональной семантической сети, учитывающие взаимосвязи конструктивных параметров инструмента и режимов пневмоцентробежной обработки отверстий, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Отношения и параметры семантической сети

Номер отношения	Отношения семантической сети	Параметры сети
$R_1$	$\frac{\pi \cdot d_c^2}{4} - f_c = 0$	$d_c, f_c$
$R_2$	$\frac{287 \cdot 293}{P_o + P_a} - v_o = 0$	$P_o, P_a, v_o$
$R_3$	$\frac{1}{v_o} - \rho_o = 0$	$v_o, \rho_o$
$R_4$	$\frac{287 \cdot 293}{0,5P_o + P_a} - v_k = 0$	$P_o, P_a, v_k$
$R_5$	$\frac{1}{v_k} - \rho_k = 0$	$v_k, \rho_k$
$R_6$	$\frac{287 \cdot 293}{P_a} - v_3 = 0$	$P_a, v_3$
$R_7$	$P_k - \frac{\mu_c^2 \cdot f_c^2 \cdot z_c^2 \cdot P_o \cdot \rho_o}{\mu_3^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{dem}^2 \cdot \gamma^2 \cdot \rho_3 + \mu_c^2 \cdot f_c^2 \cdot z_c^2 \cdot \rho_o} = 0$	$\mu_c, f_c, z_c, P_o, \rho_o, \mu_3, D_{dem}, \gamma, \rho_3, P_k$
$R_8$	$\frac{1}{v_3} - \rho_3 = 0$	$v_3, \rho_3$
$R_9$	$\mu_c f_c z_c \sqrt{0,065 \frac{2k}{k-1} P_o \rho_o} - Q_c = 0$	$\mu_c, f_c, z_c, k, P_o, \rho_o, Q_c$
$R_{10}$	$Q_c - Q_3 = 0$	$Q_c, Q_3$
$R_{11}$	$\sqrt{\frac{Q_c^2}{\mu_3^2 P_o \rho_3 \pi^2 D_{dem}^2}} - \gamma = 0$	$Q_c, \mu_3, P_o, \rho_3, D_{dem}^2, \gamma$
$R_{12}$	$\mu_c \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_o v_o \left(1 - \frac{P_k}{P_o}\right)^{\frac{k-1}{k}}} - V_{cmp} = 0$	$\mu_c, k, P_o, v_o, P_k, V_{cmp}$



Окончание табл. 1

Номер отношения	Отношения семантической сети	Параметры сети
$R_{13}$	$\frac{360}{2 \arcsin\left(\frac{d_{ш}}{D_{дет} - d_{ш}}\right)} - z_{ш} = 0$	$D_{дет}, d_{ш}, z_{ш}$
$R_{14}$	$K_V V_{cmp} - V_{ш1} = 0$	$K_V, V_{cmp}, V_{ш1}$
$R_{15}$	$\frac{k' HB(Ra_{ucx} - Ra_{к}) V_{y0}}{2(1 - 2\mu)^2 Ra_{ucx}} - A_{см} = 0$	$k', HB, Ra_{ucx}, Ra_{к}, V_{y0}, \mu, A_{см}$
$R_{16}$	$\pi D_{дет} n_{дет} - V_{дет} = 0$	$D_{дет}, n_{дет}, V_{дет}$
$R_{17}$	$V_{ш1} + V_{дет} - V_{ш.отн} = 0$	$V_{ш1}, V_{дет}, V_{ш.отн}$
$R_{18}$	$m_{ш} V_{ш.отн} - p = 0$	$m_{ш}, V_{ш.отн}, p$
$R_{19}$	$Ra_{ucx} - \frac{S_o^2}{4d_{ш}} - l = 0$	$Ra_{ucx}, S_o, d_{ш}, l$
$R_{20}$	$Ra_{ucx} - Ra_{к} - L = 0$	$Ra_{ucx}, Ra_{к}, L$
$R_{21}$	$\frac{p V_{ш1}}{2L} - F_{max y0} = 0$	$p, V_{ш1}, L, F_{max y0}$
$R_{22}$	$F_{max y0} l z_{ш} - \sum A_{ш.ист} = 0$	$F_{max y0}, l, z_{ш}, A_{ш.ист}$
$R_{23}$	$Ra_{ucx} - \frac{(1 - 2\mu)^2 Ra_{ucx} m_{ш} V_{ш.отн} V_{ш1} z_{ш}}{k' HB V_{y0}} - Ra_{к} = 0$	$Ra_{ucx}, \mu, Ra_{к}, m_{ш}, V_{ш.отн}, V_{ш1}, z_{ш}, k', HB, V_{y0}, Ra_{к}$

В качестве параметров функциональной семантической сети для расчета режимов обработки центробежной обработки отверстий можно рассматривать следующие:  $D_{дет}$  – диаметр заготовки, мм;  $d_{ш}$  – диаметр шаров, мм (выбирается в диапазоне 5...13 мм в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки, требуемой формы микро рельефа и шероховатости поверхности);  $z_{ш}$  – количество шаров;  $P_o$  – давление в осевой полости инструмента, МПа (выбирается в интервале значений 0,05...4 МПа);  $P_k$  – давление в камере расширения при условии критического истечения воздуха;  $f_c$  – площадь сопла;  $d_c$  – диаметр сопел, мм (выбирается в интервале значений 1,5...3,5 мм);  $v_o$  – удельный объем воздуха;  $P_a$  – дав-

ление атмосферное, МПа;  $\rho_o$  – плотность воздуха в осевой полости инструмента;  $\mu_c$  – коэффициент расхода воздуха через сопло (зависит от формы сопел: цилиндрической, конической или прямоугольного сечения);  $v_k$  – удельный объем воздуха в камере расширения инструмента;  $\rho_k$  – плотность воздуха в камере расширения инструмента;  $z_c$  – количество сопел (4...12);  $v_z$  – удельный объем воздуха в зазоре между деталью и инструментом;  $\rho_z$  – плотность воздуха в зазоре между деталью и инструментом;  $P_k$  – давление в камере расширения;  $\gamma$  – зазор между заготовкой и инструментом;  $\mu_z$  – коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом;



$Q_{c.онт}$  – массовый расход воздуха через сопла при условии критического истечения воздуха;  $k$  – показатель адиабаты для воздуха;  $Q_3$  – массовый расход воздуха через зазор между деталью и инструментом;  $V_{стр}$  – скорость струи воздуха, выходящего через сопло при критическом истечении воздуха;  $V_{ш1}$  – скорость шара до удара;  $K_V$  – поправочный коэффициент на скорость шаров;  $A_{см}$  – работа, необходимая для смятия микронеровностей с исходного значения; шероховатости до заданного конечного ее значения;  $k'$  – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала;  $Ra_{исх}$  – исходная шероховатость поверхности (до обработки), мкм;  $Ra_k$  – конечная шероховатость поверхности (требуемая), мкм;  $HB$  – твердость обрабатываемого материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $V_{уд}$  – сминаемый объем, м<sup>3</sup>;  $V_{дет}$  – скорость вращения заготовки при условии ее вращения;  $n_{дет}$  – частота вращения заготовки, мин<sup>-1</sup>;  $V_{ш.онт}$  – относительная скорость шара;  $p$  – импульс удара шара;  $m_{ш}$  – масса шара, кг;  $l$  – путь, который проходит шар при смятии микронеровностей;  $S_o$  – осевая подача инструмента, мм/об;  $L$  – максимально возможный путь, который проходит шар при смятии микронеровностей под действием максимальной ударной силы;  $F_{max\ уд}$  – максимальная ударная сила шара;  $\sum A_{ш\ инст}$  – работа, совершаемая инструментом для смятия микронеровностей с исходного значения шероховатости до ее конечного значения.

Таким образом, функциональная семантическая сеть для управления качеством поверхности при упрочня-

ющей пневмоцентробежной обработке отверстий включает 23 отношения и 42 параметра.

Для наглядности функциональную семантическую сеть можно представить в виде двудольного неориентированного графа, представленного на рис. 2.

Использование функциональных семантических сетей в программах в качестве инструмента для вычислений обеспечивает их интеллектуальность за счет того, что жесткий алгоритм действий у таких систем отсутствует, а последовательность выполняемых действий определяется самой системой в процессе решения отдельной поставленной задачи [1].

Это обеспечивается за счет того, что каждое из отношений функциональной сети имеет несколько разрешений. Так, например, из отношения  $R_1$  можно определить два параметра  $d_c$  и  $f_c$ . При этом отношение  $R_1$  в зависимости от известных данных будет преобразовываться в функции  $F_1$ , представленные на рис. 3.

Покажем принцип нахождения параметров на основе использования сети на примере. Рассмотрим решение задачи, определяющей шероховатость погрешности после упрочняющей пневмоцентробежной обработки. Исходными данными являются: диаметр заготовки  $D_{дет}$ , исходная шероховатость поверхности  $Ra_{исх}$ , твердость обрабатываемого материала  $HB$ , масса шара  $m_{ш}$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , сминаемый объем  $V_{уд}$ , давление в осевой полости инструмента  $P_o$ , показатель адиабаты для воздуха  $k$ , диаметр шаров  $d_{ш}$ , давление атмосферное  $P_a$ , коэффициент расхода воздуха через сопло  $\mu_c$ , диаметр сопел  $d_c$ , количество сопел  $z_c$ , коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом  $\mu_z$ .





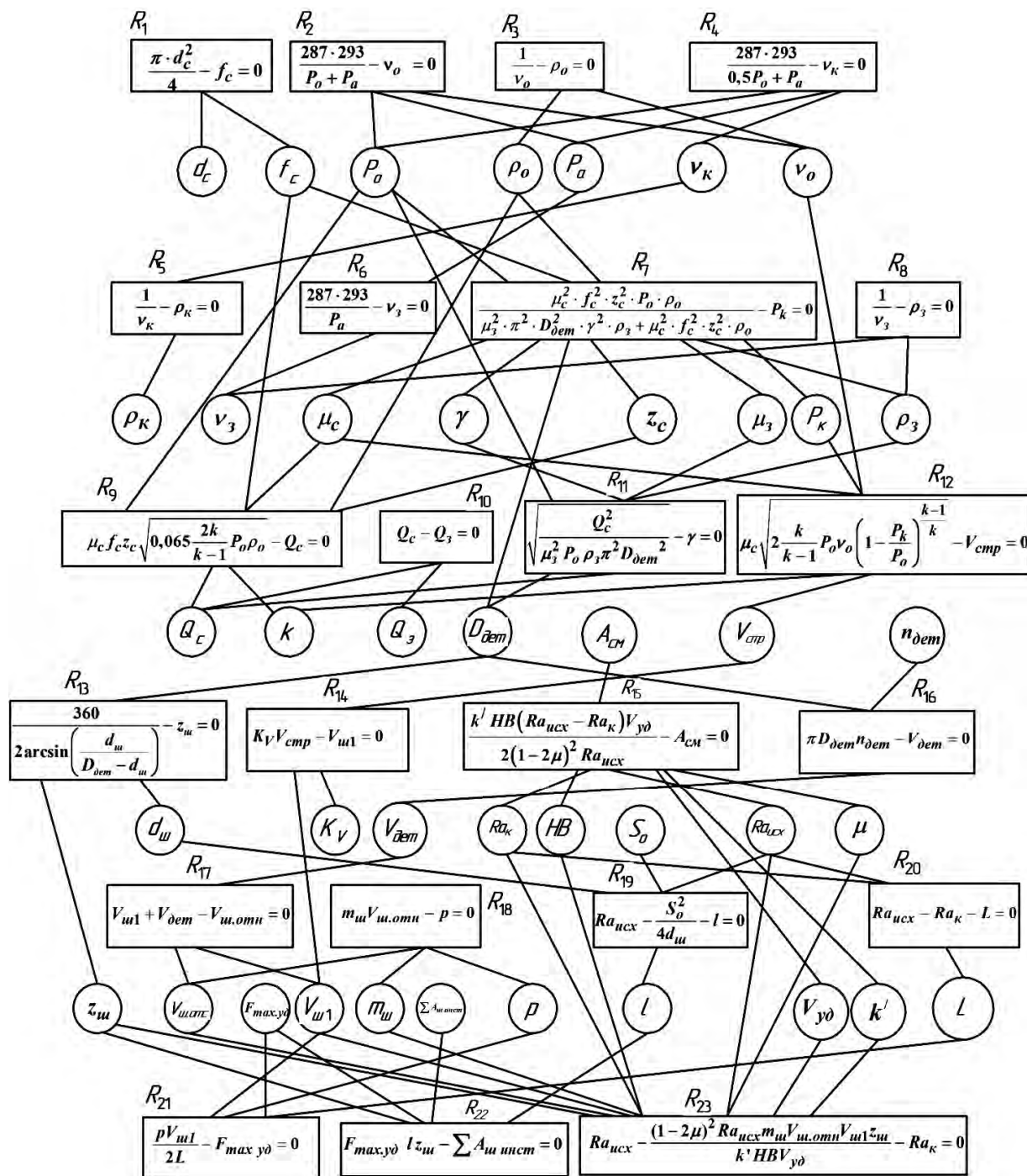
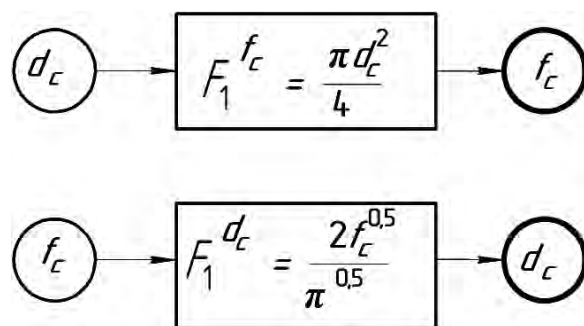


Рис. 2. Функциональная семантическая сеть



Рис. 3. Разрешения отношения  $R_1$ 

Поскольку в данном случае удельный объем  $v_k$ ; плотность воздуха в камере расширения инструмента  $\rho_k$ ; работу, необходимую для смятия микронеровностей  $A_{см}$ ; импульс удара шара  $p$ ; скорость вращения заготовки  $V_{дет}$ ; путь, который проходит шар при смятии микронеровностей  $l$ ; максимально возможный путь, который проходит шар при смятии микронеровностей под действием максимальной ударной силы  $L$ ; максимальную ударную силу шара  $F_{max уд}$ ; массовый расход воздуха через зазор между деталью и инструментом  $Q_3$ ; работу, совершаемую инструментом для смятия микронеровностей с исходного значения шероховатости до ее конечного значения  $\Sigma A_{инст}$  вычислять не требуется, то отношения  $R_4$ – $R_5$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{15}$ ,  $R_{16}$  и  $R_{18}$ – $R_{22}$  использоваться не будут.

А у отношений  $R_1$ – $R_3$ ,  $R_6$ – $R_9$ ,  $R_{11}$ – $R_{14}$ ,  $R_{17}$  и  $R_{23}$  определяются входные и выходные параметры. В результате чего происходит их преобразование в соответствующие функции  $F$ .

В результате интеллектуальная система построит цепочку функций для решения поставленной задачи (рис. 4). При этом отношение  $R_2$  будет преобразовано в функцию  $F_2$ , определяющую удельный объем воздуха  $v_o$ . Параметр  $v_o$  в данном случае будет являться выходным параметром для функции  $F_2$  и входным параметром для  $F_3$ . Аналогичным образом будут определены

входные и выходные параметры остальных отношений сети.

Таким образом, в зависимости от исходных данных и выбранных управляемых параметров для обеспечения качества поверхности отверстий будут сформированы свои цепочки функций.

Однако следует учитывать, что не всеми 42 параметрами сети можно управлять шероховатостью и формой микрорельефа отверстий. Поэтому был проведен анализ параметров сети и выделены два типа параметров технологического процесса пневмоцентробежной обработки отверстий – неуправляемые и управляемые. Неуправляемые в ходе решения поставленной задачи фиксируются на некотором неизменном уровне, т. е. являются исходными данными, а управляемые образуют пространство поиска.

Выбор управляемых параметров базировался на анализе общих технологических подходов к обеспечению заданных параметров качества поверхности при пневмоцентробежной обработке отверстий, выбору ее режимов, анализу конструктивных параметров инструмента и т. д. При таком выборе также учитывалась возможность экономической целесообразности управления параметрами сети.

Таким образом, в качестве управляемых выбраны диаметр, количество и масса шаров, давление в осевой полости инструмента, диаметр и количество со-



пел, зазор между заготовкой и инструментом, исходная шероховатость поверхности, скорость и частота вращения

заготовки (при условии ее вращения), осевая подача инструмента и др.

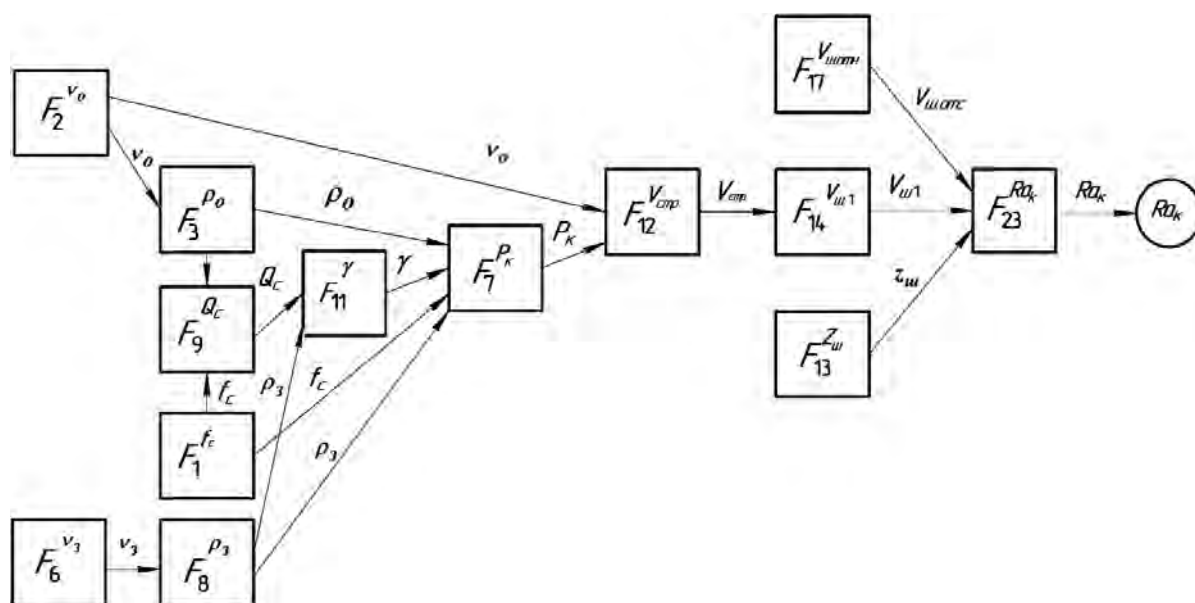


Рис. 4. Цепочка функций для решения задачи, определяющей конечную шероховатость

Неуправляемыми параметрами сети являются твердость обрабатываемого материала, диаметр заготовки, а также требуемая шероховатости и форма микрорельефа поверхности. Параметрами, определяющими форму микрорельефа, являются размеры, форма и расположение сопел в распорных втулках раскатника, глубина регулярной неровности рельефа.

На сформированной функциональной семантической сети (см. рис. 2) можно решать различные задачи по нахождению любых их параметров. При этом для каждого случая отношения будут иметь необходимые разрешения и будут сформированы свои цепочки функций.

Так, использование функциональной семантической сети, представленной в табл. 1 и на рис. 2, позволит не только прогнозировать шероховатость обработанной поверхности, но и определять конструкторско-технологические

параметры, обеспечивающие получение заданного уровня качества поверхности.

Так, при нахождении осевой подачи инструмента  $S_0$  при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий, обеспечивающей заданную шероховатость поверхности, будут использоваться отношения  $R_1-R_3$ ,  $R_6-R_9$ ,  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{17-R19}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$  и сформируется цепочка функций, представленная на рис. 5.

### Заключение

Применение функциональной семантической сети для управления упрочняющей пневмоцентробежной обработкой отверстий дает возможность решать задачи, связанные с прогнозированием качества поверхности, так и задачи, связанные с определением конструктивных параметров инструмента и режимов, обеспечивающих оптимальные условия обработки. При этом для



интеллектуальных систем, использующих функциональные семантические сети, четкого алгоритма не требуется, так как система в процессе решения по-

ставленной задачи анализирует отношения, выделяет входные и выходные параметры и формирует цепочку выполняемых функций.

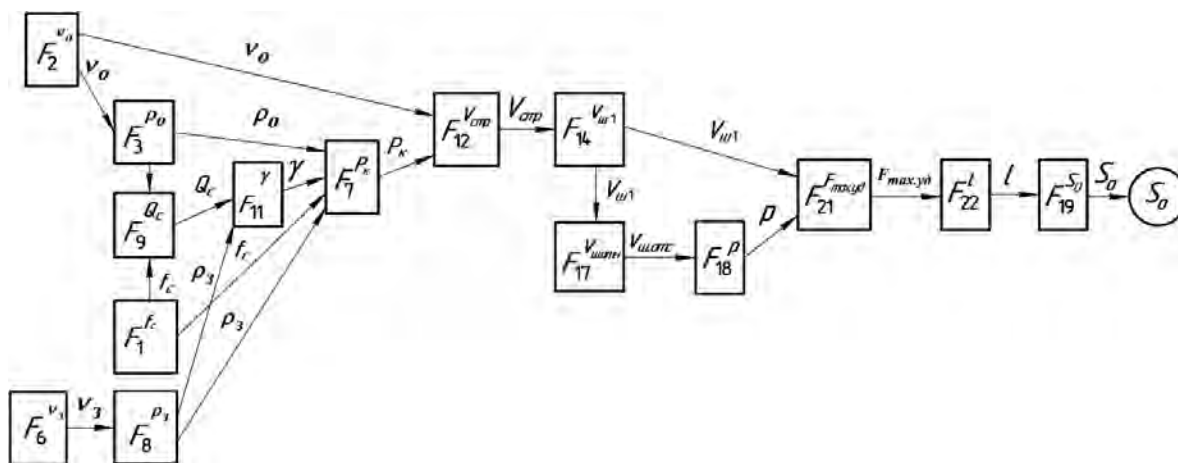


Рис. 5. Цепочка функций для решения задачи, определяющей осевую подачу инструмента

На основе анализа множества параметров математической модели, представленной в форме функциональной семантической сети, установлено, что число управляемых параметров при решении задач, связанных с управлением процессом упрочняющей пневмоцентробежной обработки отверстий, может достигать более 25, что существенно превышает число факторов, используемых принятыми методиками обеспече-

ния качества поверхности.

В связи с этим использование построенной функциональной семантической сети обеспечит более существенное повышение качества поверхности после упрочняющей пневмоцентробежной обработки отверстий по сравнению с принятыми в настоящее время методиками за счет управления большим количеством параметров и учета их функциональных взаимосвязей.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкевич, В. М. Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 200 с.
2. Гарлачов, Н. С. Влияние конструктивных и технологических факторов на частоту вращения шаров пневмоцентробежного раскатника / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 41–44.
3. Парахневич, В. Т. Энергетический анализ пневмоцентробежного шарикового раскатника / В. Т. Парахневич, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 188–192.
4. Гарлачов, Н. С. Методика определения работы, совершаемой пневмоцентробежным раскатником при обработке внутренних цилиндрических поверхностей / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 76–81.



5. **Антонова, Е. Н.** Обработка внутренних поверхностей тел вращения двухрядным пневмоцентробежным раскатником / Е. Н. Антонова // Сборник научных трудов членов Международной Балтийской Ассоциации машиностроителей. – Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2005. – № 5. – С. 59–61.

6. **Пашкевич, В. М.** Методология комплексного решения технологических задач на основе использования функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 95–105.

*Статья сдана в редакцию 01 июля 2020 года*

**Марина Николаевна Миронова**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.

**Елена Николаевна Антонова**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Marina Nikolaevna Mironova**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.

**Elena Nikolaevna Antonova**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

