

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ,
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 004.891.2 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.24.34 EDN QIANCG

**Методика технологической подготовки производства
изделий приборостроения
с использованием цифрового двойника**

А. Ю. Денисов, аспирант, *denisov.ay@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. Ю. Потюпкин, д. т. н., проф., *potyupkin_in@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается система технологической подготовки производства (ТПП) изделий ракетно-космического приборостроения для оборудования с ЧПУ. Предметом рассмотрения является информационное обеспечение процесса ТПП. Цель исследования — повышение качества процесса ТПП в условиях неопределенности. Совершенствование системы ТПП возможно путем автоматизации процесса разработки управляющих программ (УП) для оборудования с ЧПУ с использованием специализированной базы знаний (БЗ), отражающей опыт специалистов — операторов и наладчиков технологического оборудования и позволяющей учесть отличие реальных производственных условий (РПУ) от номинальных путем коррекции цифрового двойника производства (ЦДП). Разработана структура базы знаний, включающая правила нечеткого условного вывода, рассмотрен пример ее применения для разработки УП. Предложен облик системы информационно-методического обеспечения процесса ТПП с учетом необходимости оперативной коррекции УП на основе оценки РПУ.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, автоматизация, цифровой двойник, база знаний, нечеткая логика

**Pre-Production Engineering Methodology
for Device Building Products Using a Digital Twin**

A. Yu. Denisov, postgraduate student, *denisov.ay@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
A. Yu. Potyupkin, Dr. Sci. (Engineering), Prof., *potyupkin_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers the pre-production engineering (PPE) system of rocket and space device engineering products for CNC equipment. The subject of the research is information support of the PPE process. The aim of the research is to improve the quality of the PPE process under conditions of uncertainty. Improvement of the PPE system is possible through automation of the development process of control programs (CP) for CNC equipment using the specialized knowledge base (KB) reflecting the experience of specialists-operators and adjusters of technological equipment, and allowing one to take into account the difference of real production conditions (RPC) from nominal ones by correcting a production digital twin (PDT). The paper presents the developed structure of a KB including the rules of fuzzy conditional inference. The example of its application for the development of CP is considered. The appearance of the system for information and methodological support of the PPE process considering the need for rapid correction of CP based on the RPC evaluation is proposed.

Keywords: pre-production engineering, automation, digital twin, knowledge base, fuzzy logic

Введение

Производство сложной наукоемкой продукции требует организации процессов, сопровождающих как само изготовление, так и проведение подготовительных работ, предшествующих началу обработки заготовок и сборки комплектующих. Ключевым фактором организации эффективного производства является информационное взаимодействие участников процесса. Такие аспекты процессов разработки и производства, как появление, систематизация, обмен, накопление, использование, хранение информации являются предметом информационного обеспечения этих процессов.

Особое значение информационное обеспечение приобретает в свете новых задач, поставленных Главой Роскосмоса Ю. Борисовым, о переходе к конвейерному способу производства космических аппаратов (КА) и с темпом выпуска один КА в день, что потребует автоматизации процесса технологической подготовки производства, в том числе и с использованием концепции «цифровых двойников» [1].

В случае когда исходные данные для технологического проектирования представлены в виде цифровой модели, а процессы разработки изделий, планирования поставок и диспетчеризации производства осуществляются с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) в рамках единого информационного пространства предприятия (ЕИП), появляются новые возможности автоматизации и совершенствования как процесса ТПП, так и производственного процесса в целом.

ТПП — вид производственной деятельности предприятия (группы предприятий), обеспечивающей технологическую готовность производства к изготовлению изделий, отвечающих требованиям заказчика или рынка данного класса изделий¹.

Система [2] ТПП представляет собой комплекс мероприятий, обеспечивающих функционирование подсистем ТПП с целью оптимального по срокам и ресурсам обеспечения технологической готовности производства к изготовлению изделий в соответствии с требованиями заказчика.

¹ГОСТ Р 50995.3.1-96 Технологическая подготовка производства.

Качество функционирования системы ТПП определяется следующими показателями:

– срок изготовления продукции (детали, изделия); продукция, изготавливаемая в соответствии с полученной в результате выполненного процесса ТПП информацией, должна быть представлена не позже установленного срока, $T_{изгот.} \leq T_{уст.}$;

– число единиц готовой продукции, не соответствующей заданным требованиям качества (то есть количество бракованных изделий), не должно превышать допустимого значения, $N_{брак.} \leq N_{доп.}$.

В системе ТПП реализуется соответствующий процесс ТПП, структура которого с указанием классов используемых программных продуктов приведена на рис. 1. Условно процесс ТПП можно разделить на два этапа:

1. Разработка управляющей программы для станков с ЧПУ, учитывающей цифровую модель изделия, требования по качеству изготовления, технологическое оснащение процесса изготовления, режимы обработки изделия на станке с ЧПУ и ряд других факторов.

2. Изготовление изделия на оборудовании с ЧПУ согласно управляющей программе.

В современной терминологии процесс ТПП можно представить как взаимодействие двух цифровых двойников: цифрового двойника изделия (ЦДИ) и цифрового двойника производства (ЦДП). Результат процесса ТПП — комплект УП, являющийся цифровым двойником процесса обработки. Как правило, ЦДИ задается конструктором-разработчиком при проектировании, а ЦДП определяется исходя из номинальных условий производства, определяемых состоянием оборудования с ЧПУ, средствами технологического оснащения, уровнем квалификации оператора оборудования.

Несмотря на наличие соответствующих программных комплексов, на практике качество реализации процесса ТПП во многом требует совершенства. Как показывает анализ причин невыполнения требований по срокам изготовления продукции и бракованным изделиям, к числу основных таких причин можно отнести несоответствие реальных производственных условий их номинальным значениям. Так, считается, что оборудование с ЧПУ технически полностью исправно, точность соответствует паспортной, средства



Рис. 1. Структура системы ТПП

технологического оснащения (режущий и вспомогательный инструмент, станочные приспособления и т. д.) позволяют реализовать процесс обработки с выбранными параметрами (режимами резания, числом проходов и т. д.), оператор достаточно квалифицирован и не совершает ошибок. Однако на практике оборудование зачастую имеет износ, сборка режущего и вспомогательного инструмента не всегда обеспечивает максимальную жесткость, средства технологического оснащения доступны не в полной мере, что в совокупности требует от оператора не просто безошибочной работы, но и принятия решений на подстройку процесса обработки исходя из реально сложившихся производственных условий. Поэтому следует различать ЦДП^Н — номинальный ЦДП и ЦДП^Р — реальный ЦДП, при этом адекватность первого обеспе-

чивается учетом номинальных значений производственных условий, а адекватность второго требует подтверждения исходя из реальной ситуации.

В связи с этим разработка подходов, обеспечивающих формирование адекватных ЦДП^Р, представляется несомненно актуальной и способствующей повышению качества изготавливаемой продукции.

Важным фактором с учетом требований по конвейерному производству изделий РКТ становится автоматизация процесса, что требует разработки соответствующих алгоритмов принятия решений на подстройку процесса обработки исходя из полученного ЦДП^Р.

Цель проводимого исследования — разработка методики технологической подготовки производства изделий приборостроения с использованием

цифрового двойника, обеспечивающей повышение качества процесса ТПП в условиях неопределенности.

Постановка задачи исследования. Структура ЦДП определяется его цифровой моделью и параметрами модели, настраиваемыми с помощью двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и(или) его составными частями. В связи с этим формирование адекватных ЦДП^Р возможно путем использования информации о текущих значениях параметров реальных производственных условий и их отличии от номинальных. Определение поправок в значениях параметров ЦДП позволит внести коррективы в управляющую программу и тем самым согласовать цифровые двойники изделия и производственных условий.

В общем виде постановка задачи совершенствования системы ТПП выглядит следующим образом.

Дано:

1. S — система ТПП изделий ракетно-космического приборостроения (РКП) для оборудования с ЧПУ, приведенная на рис. 1.

2. Цифровой двойник изделия ЦДИ = $\{\Pi_i^{КД}\}$, определяемый структурой изделия и совокупностью параметров $\{\Pi_i^{КД}\}$, представленной конструкторской документацией на изделие.

3. Цифровой двойник номинальных производственных условий ЦДП^Н = $\{\Pi_j^{ПУ}\}$, определяемый структурой условий и совокупностью параметров $\{\Pi_j^{ПУ}\}$ производственных условий

4. Цифровой двойник процесса ТПП как результат взаимодействия цифровых двойников изделия и производства ЦД ТПП = ЦДИ \Leftrightarrow ЦДП, определяемый согласованием $\{\Pi_i^{КД}\}$ и $\{\Pi_j^{ПУ}\}$.

5. Совокупность влияющих факторов W , приводящих к отклонению реальных производственных условий от номинальных, где $\{\Pi_j^{ПУР}\}$ — совокупность параметров, характеризующих производственные условия, представленная цифровым двойником реальных производственных условий; $\{\Pi_j^{ПУН}\}$ — совокупность параметров, характеризующих производственные условия, представленная цифровым двойником номинальных (идеальных, расчетных) производственных условий.

6. Показатели и критерии качества ТПП, определяемые степенью согласованности параметров

изделия и производственных условий при воздействии влияющих факторов

$$T_{\text{изгот.}} = T[S, \{\Delta\Pi_j^{\text{ПУР}}\}/W] \leq T_{\text{уст.}},$$

$$N_{\text{брак.}} = N[S, \{\Delta\Pi_j^{\text{ПУР}}\}/W] \leq N_{\text{доп.}},$$

где $T_{\text{изгот.}}$ и $T_{\text{уст.}}$ — время изготовления и установленное время изготовления; т. е. время изготовления не должно превышать установленного времени;

$N_{\text{брак.}}$ и $N_{\text{доп.}}$ — число единиц бракованной продукции; т. е. число единиц бракованной продукции не должно превышать допустимого числа брака.

Требуется: разработать методику совершенствования системы ТПП с целью обеспечения выпуска продукции требуемого уровня качества в заданный срок путем учета реальных производственных условий для обеспечения согласованности взаимодействия цифровых двойников изделия и производства.

Решение задачи будет заключаться в определении отклонения реальных производственных условий от номинальных $\{\Delta\Pi_j^{\text{ПУР}}\}$ с последующей коррекцией ЦД ТПП. При этом отклонение не будет считаться значимым в случае если $\{\Delta\Pi_j^{\text{ПУР}}\} \leq \{\Delta\Pi_j^{\text{ПУдоп}}\}$. Выполнение требований критериев качества ТПП в таком случае будет обеспечено:

– $T_{\text{изгот.}}$ — за счет сокращения времени ТПП путем автоматизации процесса ТПП в результате использования специализированной базы знаний (БЗ), построенной на системе управляющих правил, позволяющей корректировать ЦДП;

– $N_{\text{брак.}}$ — за счет использования адекватной модели ЦДП^Р, построенной по результатам коррекции ЦДП, что позволит использовать информацию о реальных производственных условиях и скорректировать ЦДП уже на стадии выполнения технологического проектирования.

Представляется, что общая структура комплекса правил БЗ будет иметь два уровня — на верхнем уровне общее правило всей системы, отвечающее за адекватность ЦДП, на нижних уровнях — частные правила, позволяющие определить конкретные поправки в параметры $\{\Pi_i^{КД}\}$. Правило верхнего уровня будет обобщающим, показывая полноту компенсации погрешностей $\Delta\Pi$, и в итоге будет характеризовать результативность предложенной методики.

Ключевым вопросом является оценка отклонений $\{\Delta\Pi_j^{\text{ПУР}}\}$, качество которой в значительной степени будет определяться учетом следующих влияющих факторов:

1. Высокая практическая сложность полноценного оперативного учета физических параметров используемого оборудования и средств оснащения.

2. Малый объем партии изготавливаемых изделий одного типоразмера, что затрудняет накопление статистических данных.

3. Необходимость участия опытных специалистов в процессе принятия решений по вопросам ТПП, в том числе по вопросам детального проектирования технологических процессов изготовления.

4. Низкий уровень формализации профессиональной деятельности специалистов-экспертов.

Учитывая высокую нестохастическую неопределенность решаемой задачи и необходимость реализации экспертных оценок, в качестве аппарата формализации предлагается нечеткая логика, позволяющая математически оперировать со смысловым содержанием слов человека и описывать нестохастическую неопределенность в виде функций принадлежности. Понятие нечеткого множества основывается на предположении, что любой элемент принадлежит данному множеству лишь в некоторой степени [3]. Степень принадлежности определяется нечеткой мерой — функцией принадлежности (ФП) — $\mu(\bullet) \in [0, 1]$. При этом $\mu(\bullet) = 1$ — элемент принадлежит множеству, $\mu(\bullet) = 0$ — не принадлежит, $0 < \mu(\bullet) < 1$ — принадлежит в некоторой степени. ФП могут являться результатом экспертной оценки, где оценка является степенью уверенности лица, принимающего решение (ЛПР) [4]. Элементами нечетких множеств могут быть как числа, так и вербальные высказывания, представляемые в виде лингвистических переменных (ЛП), выраженных на естественном языке, например «маленький», «большой», «уменьшить», «увеличить». На основе ЛП можно синтезировать правило нечеткого условного вывода в виде ЕСЛИ...ТО. Результат применения нечеткого правила — действие, которое также можно описать ЛП.

В любой модели преобразования нечеткой информации, разработанной к настоящему времени, присутствуют следующие процедуры.

1. Преобразование текущих значений входных переменных в значения ЛП — фаззификация.

2. Нечеткий вывод значений выходных ЛП.

3. Преобразование выведенных значений выходных ЛП в четкие значения выходных переменных — дефаззификация.

Общая схема обработки нечеткой информации выглядит следующим образом (рис. 2).

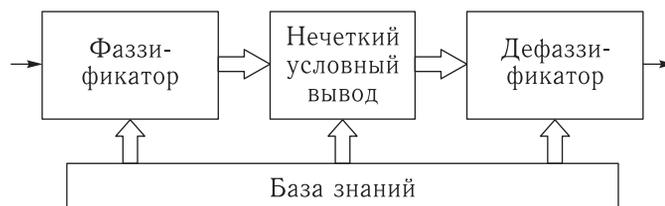


Рис. 2. Схема обработки нечеткой информации

Точные исходные данные с датчиков сведений переводятся в значения ЛП в специальном блоке «Фаззификатор». Далее реализуются процедуры нечеткого вывода на множестве правил из состава БЗ системы обработки информации, в результате чего формируются выходные лингвистические значения. Выходные значения переводятся в точные значения результатов вычислений в специальном блоке «Дефаззификатор». На выходе формируются точные заключения о результатах вывода [5].

В основе функционирования такой нечеткой системы лежит правило условного логического вывода вида:

ЕСЛИ X есть A , ТО Y есть B .

Методологической основой формализации является композиционное правило, предложенное Л. Заде [6]. Рассмотрим пример нечеткого условного вывода следующей формы.

Предпосылка 1: ЕСЛИ x есть A , ТО y есть B .

Предпосылка 2: x есть A^* .

Следствие: y есть B^* , где A^* — нечеткое множество, заданное в пространстве входных параметров U , B^* — нечеткое множество, заданное в пространстве выходных параметров V . Например, пусть Предпосылка 2 известна в виде нечеткого множества $A^* = \sum \mu(\alpha)/\alpha$, где $\mu(\alpha)$ — функция принадлежности элемента α нечеткому множеству A^* . Предпосылка 1 есть нечеткое причинное

отношение $R = A \rightarrow B$ Предпосылки 2 и Следствия в виде матрицы нечеткого отношения $R = \mu(\alpha, \beta)$. Тогда процесс получения нечеткого вывода $B^* = \sum \mu(\beta)/\beta$ можно представить в виде нечеткого уравнения в отношениях:

$$B^* = A^* \circ R = A^* \circ (A \rightarrow B).$$

Здесь \circ — получившее на практике наибольшее распространение максиминное правило композиции, \rightarrow — нечеткая импликация.

На языке функций принадлежности для максиминной композиции такое уравнение записывается следующим образом:

$$\mu(\beta) = \max_{\alpha} \min\{\mu(\alpha), \mu(\alpha, \beta)\}.$$

Примеры успешного применения методов нечеткой логики для решения широкого спектра производственных задач [7], в том числе повышения эффективности ТПП [8], дают основание предполагать результативность выбранного направления действий. В этом случае в процесс разработки управляющих программ на уровне САМ-системы будет встроено набор нечетких правил вида ЕСЛИ...ТО, в которых на основе анализа отклонений $\{\Delta P_j^{Пур}\}$ будут предложены варианты модификации структуры либо отдельных параметров ЦДП с целью обеспечения согласования ЦДИ и ЦДП. Набор правил после его формирования может быть представлен в виде специализированной БЗ, построенной на базе ЦД РПУ с целью компенсации погрешностей ΔP .

Сформулируем комплекс правил нечеткого условного вывода ЕСЛИ ... ТО применительно к вопросам технологического проектирования.

Учитывая предложенную двухуровневую структуру БЗ, общее правило для ТПП может выглядеть следующим образом:

ЕСЛИ реальные параметры технологической системы в достаточной степени соответствуют номинальным значениям (то есть число отклонений параметров невелико), ТО требуемое число изменений технологического процесса незначительно.

Другими словами, чем выше число отклонений по каждому из параметров технологической системы от своего номинального значения, тем большее количество изменений требуется внести в технологический процесс с целью компенсации погрешностей ΔP . Здесь Предпосылка 2 правила ЕСЛИ...ТО... представлена значением функции принадлежности $\mu(\alpha)$ ЛП «число отклонений» (ЛП1) в виде нечеткого множества $A^* = \sum \mu(\alpha)/\alpha$. Заключением (Следствием) логического правила является значение функции принадлежности $\mu(\beta)$ (ЛП2) нечеткой функции ЛП «число изменений незначительное».

Проиллюстрируем механизм функционирования приведенного нечеткого правила для экспоненциальных ФП ЛП1 и ЛП2. (см. рис. 3). Согласно заданной ФП для ЛП1 число отклонений $\alpha = 2$ соответствует терму «НЕВЕЛИКО» со значением ФП $\mu(\alpha) = 0,7$. Тогда, исходя из схемы нечеткого условного вывода, согласно графику ФП для ЛП2 значению $\mu(\beta) = 0,7$ соответствует число изменений $\beta = 3$.

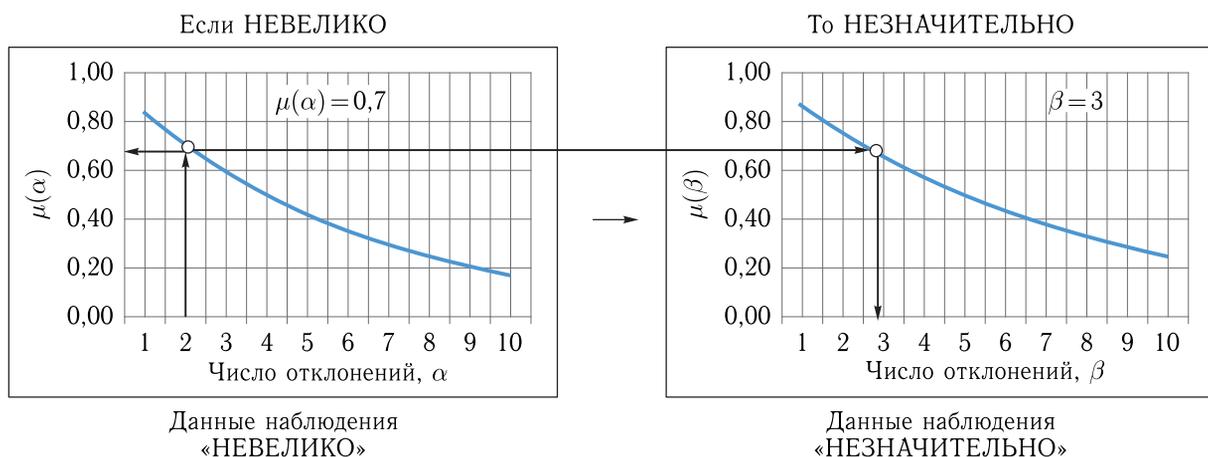


Рис. 3. Графики функций принадлежности для ЛП

Частные правила нижнего уровня, позволяющие определить число отклонений, будут определяться конкретными параметрами ЦДП.

Приведем пример разработки одного из частных нечетких правил нижнего уровня для оборудования с ЧПУ. Параметры, используемые при разработке УП, представлены в табл. 1. Примеры нечетких правил принятия решений приведены в табл. 2.

Таблица 1. Примеры параметров, используемых в процессе проектирования УП ЧПУ

№	Обозначение	Наименование параметров
1	k подачи	Коэффициент величины подачи режущего инструмента. Отражает скорость перемещения инструмента в процессе резания материала
2	s	Чистота поверхности. Параметр, характеризующий высоту микронеровностей, мкм. Для типовой фрезерной обработки изменяется от 0,8 (низкая шероховатость — высокая чистота поверхности) до 6,3 (высокая шероховатость — низкая чистота)
3	k съема материала	Величина съема материала при обработке
4	it	Класс точности получаемого размера

Таблица 2. Примеры нечетких правил принятия решений

№	Нечеткое правило принятия решения	Показатель	
		«ЕСЛИ»	«ТО»
1	Если требуется получить поверхность высокой чистоты, то скорость перемещения инструмента следует снизить (установить с коэффициентом k подачи)	s ВЫСОКАЯ	k подачи СНИЗИТЬ
2	Если в результате обработки требуется получить точный размер, число дополнительных проходов следует увеличить	it ТОЧНЫЙ	n доп. проходов ПОВЫСИТЬ

Рассмотрим подробнее пример применения нечеткого правила № 1 из табл. 2. Здесь несоответствие параметров выглядит следующим образом:

$$F_n \neq F_p,$$

где F_n — так называемое номинальное значение подачи инструмента в процессе резания, взятое из каталога производителя инструмента; F_p — так называемое реальное значение подачи инструмента в процессе резания, полученное из БЗ (то есть в результате коррекции параметра F_n оператором станка исходя из собственного опыта),

или

$$F_p = F_n \cdot k_{\text{подачи}},$$

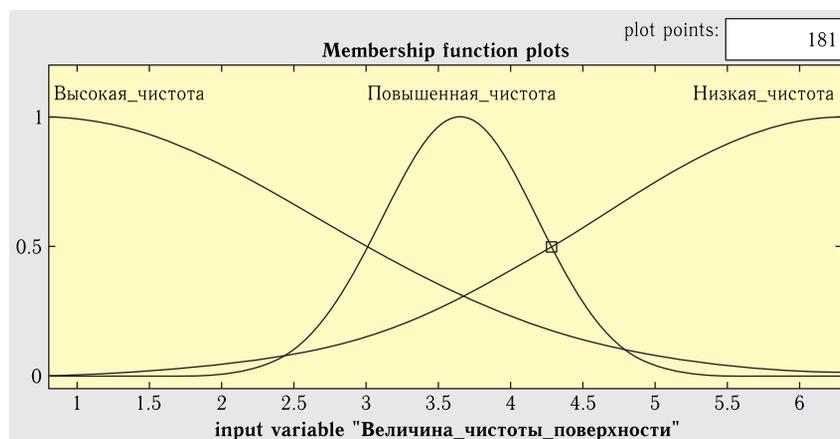
где $k_{\text{подачи}}$ — поправочный коэффициент, величина которого выбирается согласно значению функции принадлежности ЛП «СНИЗИТЬ». Таким образом, значение подачи F_n корректируется на величину ΔF , где $\Delta F = F_n - F_p = F_n(1 - k_{\text{подачи}})$.

Рассмотренный пример можно проиллюстрировать [6] с помощью приложения Fuzzy Logic Designer программного пакета MATLAB. Для обозначения чистоты поверхности введем соответствующие ЛП для термина *Чистота*: *Низкая*, *Повышенная*, *Высокая*. Для обозначения коэффициента снижения подачи введем следующие ЛП для термина *Снижение*: *Небольшое*, *Существенное*, *Очень большое*.

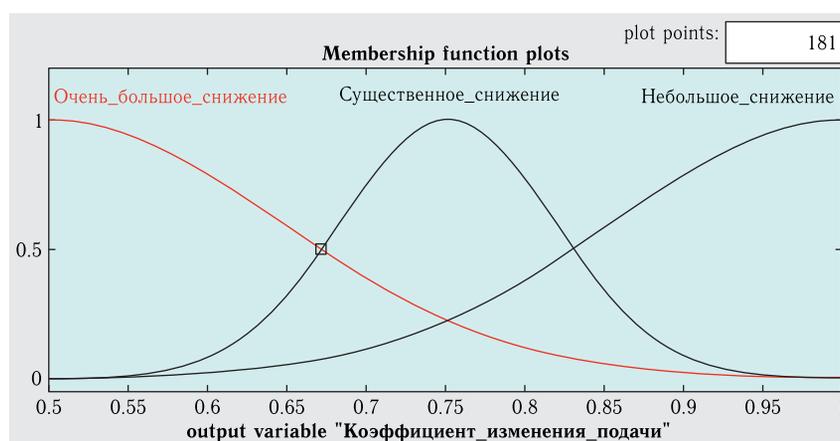
На рис. 4 приведены иллюстрации примера применения ЛП, описание правил принятия решения и результат выполнения данных правил. Как видно, для получения чистоты поверхности $Ra = 1,6$ мкм подачу выбранного инструмента следует изменить с учетом предложенного коэффициента, равного в данном случае 0,6. Сравнивая номинальное значение $k_{\text{подачи}}$, например 1, с полученным, можно вычислить изменение ΔF и внести соответствующие поправки в ЦДИ.

Представляется, что структура методики, позволяющей учесть несоответствие реальных и номинальных производственных условий в УП для оборудования с ЧПУ, основанной на использовании положений теории нечетких множеств, будет включать следующие этапы:

1. Задание номинального ЦДП^Н = { $\Pi_j^{\text{ПУ}}$ }, определение номинальных значений { $\Pi_j^{\text{ПУН}}$ }.
2. Определение текущих параметров системы ТПП, выявление влияющих факторов.



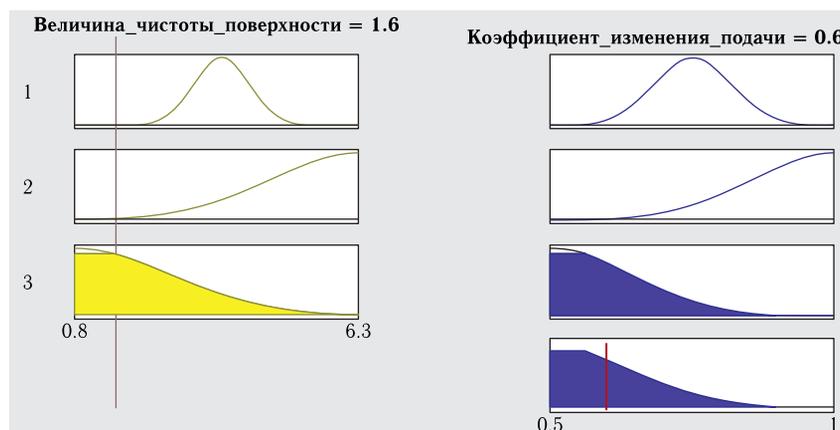
Чистота поверхности



«СНИЗИТЬ ПОДАЧУ», коэффициент

1. If (Величина_чистоты_поверхности is Повышенная_чистота) then (Коэффициент_изменения_подачи is Существенное_снижение) (1)
2. If (Величина_чистоты_поверхности is Высокая_чистота) then (Коэффициент_изменения_подачи is Небольшое_снижение) (1)
3. If (Величина_чистоты_поверхности is Низкая_чистота) then (Коэффициент_изменения_подачи is Очень_большое_снижение) (1)

Правила принятия решения



Рекомендуемый коэффициент изменения подачи при заданных условиях

Рис. 4. Иллюстрация применения нечеткого правила

3. Запрос из БЗ предварительно сформулированных нечетких управляющих правил, построенных на основании учета опыта специалистов-экспертов (наладчиков оборудования с ЧПУ) при исполнении рабочих обязанностей и характеризующих систему ТПП и объекты подсистем ТПП.

4. Определение терм — множеств [9] ЛП и их интерпретация, т. е. фаззификация текущих параметров системы ТПП. Полученные на этом этапе

правила в виде функций принадлежности для каждой ЛП будут накапливаться в базе знаний.

5. Анализ РПУ без эксперта-наладчика согласно ФП соответствующих ЛП. Получение нечеткого вывода согласно композиционного правила из БЗ на основе так называемых «РПУ-значений» термов ЛП.

6. Выполнение процедуры дефаззификации методом максиминного преобразования. В результате

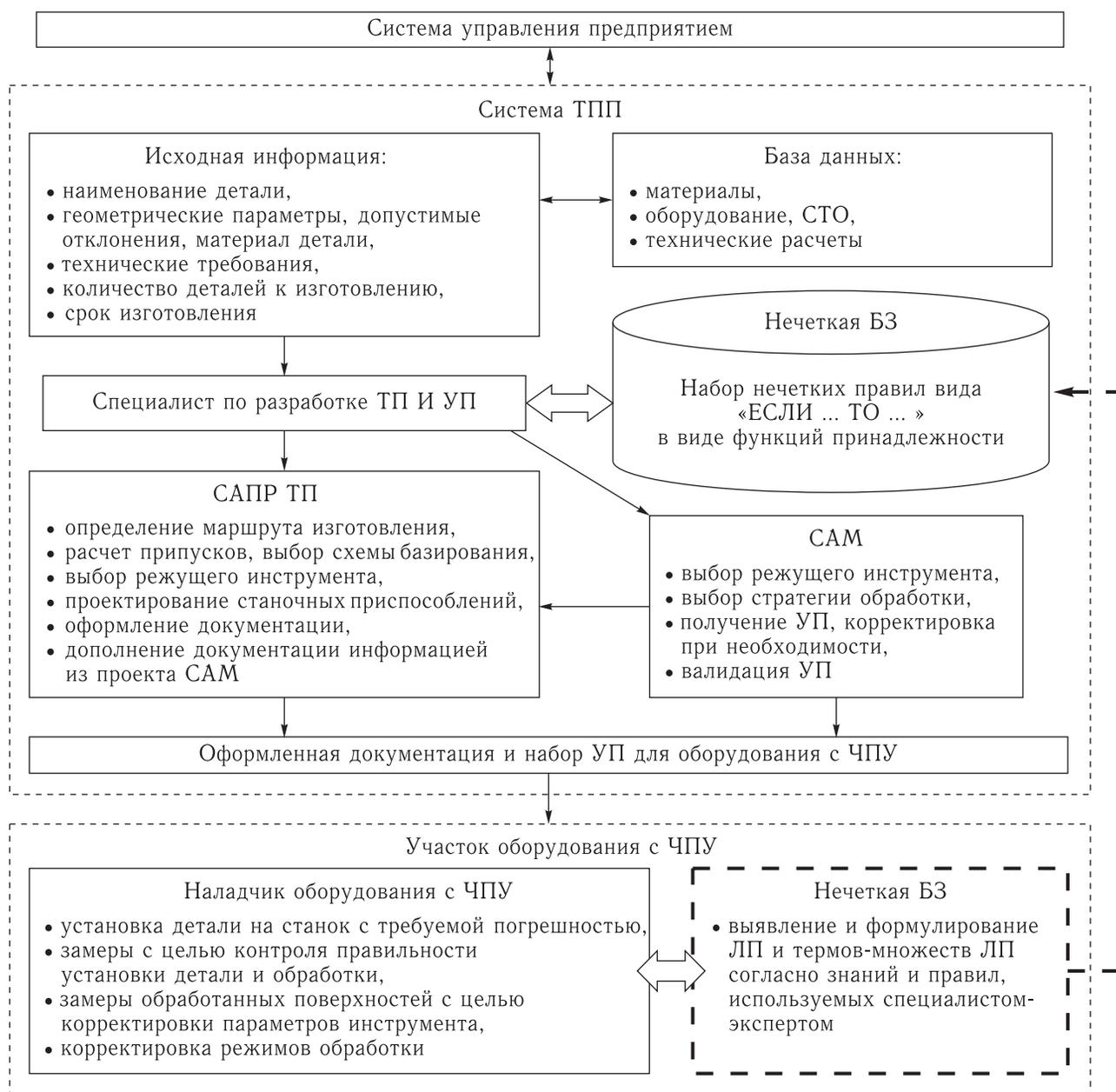


Рис. 5. Дополнительная база знаний в составе системы ТПП

получен набор четких значений $\{P_j^{ПУР}\}$ как следствие выполнения правила «ЕСЛИ ... ТО ...» для каждого полученного «РПУ-значения».

7. Проверка выполнения требования $\{P_j^{ПУР}\} \leq \{\Delta P_j^{ПУдоп}\}$, определение необходимости изменений.

8. Коррекция ЦДП согласно выполненным расчетам.

9. Подсчет количества скорректированных отклонений ЦДП с целью реализации правила общего уровня предлагаемой методики.

10. Проверка результатов коррекции.

Реализация методики возможна путем совершенствования методического обеспечения процесса ТПП и дополнения существующей информационной структуры введением дополнительной нечеткой БЗ, позволяющей уточнить ЦДП^Р и скорректировать весь ЦД ТПП [10] (см. рис. 5). Представляется, что предлагаемые подходы позволят автоматизировать реальный процесс ТПП и сократить время, затрачиваемое на разработку и коррекцию УП, а также снизить количество бракованных изделий за счет повышения адекватности модели ТПП реальным условиям.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены вопросы совершенствования процесса ТПП изделий РКП. Проведен системный анализ объекта исследований — процесса ТПП и ряда подпроцессов. Сформулирована цель и выполнена постановка задачи на совершенствование процесса ТПП в условиях нестохастической неопределенности. Предложена методика совершенствования системы ТПП с целью обеспечения выпуска продукции требуемого уровня качества в заданный срок путем учета реальных производственных условий для обеспечения согласованности взаимодействия цифровых двойников изделия и производства. Основу предлагаемой методики составляют методы нечеткого условного вывода, позволяющие математически оперировать со смысловым содержанием информации, полученной от специалистов — операторов и разработчиков программ ЧПУ. Методика предполагает разработку двухуровневого комплекса нечетких правил, позво-

ляющих уточнить реальные условия производства для реализации процесса ТПП. Решение по одному из логических правил процесса разработки УП для станков с ЧПУ проиллюстрировано графически с помощью общедоступного ПО. Показано, что использование методов нечеткой логики для разрешения неопределенности и составления ЦД оптимальной адекватности РПУ позволяет получить практически применимый результат процесса ТПП. Реализация методики возможна путем разработки, специализированной БЗ, дополняющей систему информационного обеспечения процесса ТПП.

Материалы данной статьи предполагают возможность дальнейшего развития в виде обобщения правил формулировки и решения частных задач информационного обеспечения процесса ТПП и подпроцессов с целью совершенствования системы ТПП для обеспечения выпуска продукции требуемого уровня качества в заданный срок.

Список литературы

1. Выступление генерального директора Госкорпорации «Роскосмос» Ю.И. Борисова. 24.01.2023 на XLVII Академических чтениях по космонавтике («Королевские чтения-2023»), <https://www.roscosmos.ru/38730> (Дата обращения 17.03.2023).
2. Потюпкин А.Ю., Макаренко Д.М. Системный подход в решении проблем информационного обеспечения управления космическими системами. М: Ваш формат, 2021. 452 с.
3. Потюпкин А.Ю., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Алгоритм формирования рабочих структур при управлении многоспутниковой орбитальной группировкой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2022, т. 9, вып. 2. С. 3–12.
4. Тэрано Т. Прикладные нечеткие системы. Пер. с яп. к. т. н. Ю.Н. Чернышова. М.: Мир, 1993. 368 с.
5. Кафиев И.Р., Романов П.С., Романова И.П. К вопросу нечеткого управления электроприводами сельскохозяйственных интеллектуальных роботов // Российский электронный научный журнал, 2017, № 4 (26). С. 174–187.
6. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. 288 с.

7. *Аверченков А.В.* Автоматизация технологической подготовки производства для малых инновационных предприятий в машиностроении. Автореферат дисс.... д-ра техн. наук. Саратов: СГТУ, 2012. 36 с.
8. *Кашанова Л.Р.* Повышение эффективности технологической подготовки производства листовой штамповки на основе нечеткой логики. Автореферат дисс.... канд. техн. наук: 05.13.06; Казанский (Приволжский) федеральный ун-т. Казань, 2020. 20 с.
9. Интернет-проект «Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ»». Информационные материалы. <https://intuit.ru/studies/courses/87/87/lecture/20515> (Дата обращения 17.03.2023).
10. *Денисов А.Ю.* Совершенствование технологической подготовки производства изделий ракетно-космического приборостроения с использованием цифрового двойника реальных производственных условий // 57-е Научные чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (Циолковские чтения-2022): Материалы чтений. Калуга: ИП Стрельцов И. А. (Изд-во «Эйдос»), 2022. Ч. 1. С. 34–36.

Дата поступления рукописи
в редакцию 10.04.2023
Дата принятия рукописи
в печать 26.05.2023