

# УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ<sup>1</sup>

В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов

**Аннотация.** Рассмотрены и решены основные проблемы, связанные с эффективной реализацией технологических процессов в машиностроении в условиях неопределенности. Предложен интегральный критерий оценки эффективности текущего состояния технологических процессов, позволяющий свести решение многокритериальной задачи выбора эффективных управляющих воздействий к однокритериальной оптимизационной задаче при наличии как максимизируемых, так и минимизируемых показателей эффективности. Приведен способ, основанный на применении нечеткой логики для обработки экспертных данных, позволяющий сформировать в виде графика лингвистической функции многофакторную аналитическую зависимость между показателями эффективности реализуемого технологического процесса и параметрами состояния, обеспечивающими требуемое его течение в изменяющихся условиях функционирования. Разработан метод выбора на альтернативной основе наиболее эффективных управляющих воздействий при возникновении проблемных ситуаций в процессе реализации сложного технологического процесса в результате влияния на него различных возмущающих факторов окружающей среды. Принятие решений в предложенном методе выбора базируется на композиции соответствий, позволяющих установить закономерную связь между возмущающими факторами нестабильной окружающей среды и управляющими воздействиями, обеспечивающими эффективное течение сложного технологического процесса. В целом получены инструментальные средства управления по отклонению и возмущению, позволяющие обеспечить эффективную реализацию сложных технологических процессов механической обработки деталей в машиностроении в нестабильных условиях окружающей среды.

**Ключевые слова:** технологический процесс, показатели эффективности, возмущающие факторы, параметры управления, эффективные управления.

## ВВЕДЕНИЕ

Выбор управляющих воздействий (УВ) на альтернативной основе по степени их влияния на эффективность текущего состояния сложного технологического процесса (ТП) механической обработки деталей и входящих в него технологических операций в условиях недоброкачественной неопределенности — одна из актуальных проблем машиностроения [1—3]. Например, когда коррелятор ситуационной системы управления ТП выявляет

для исполнения несколько логико-трансформационных правил вывода и возникает необходимость в выборе наилучшего из них на основе результатов предварительной обработки данных в экстраполяторе для принятия однозначного решения [4].

Отметим, что задача выбора в стабильных условиях функционирования, как правило, решается тривиально на основе заданных критериев оценки эффективности альтернативных УВ в тех или иных проблемных ситуациях на объекте управления (ОУ) при заданных ограничениях [5]. В условиях же с высокой динамикой и непредсказуемостью протекающих в окружающей среде (ОС) процессов, решение задачи альтернативного выбора сводится, как правило, к принятию непрограмми-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-29-12839 офи\_м.

руемых управленческих решений. Однако в настоящее время практически отсутствует общая эффективная теория принятия непрограммируемых решений в условиях недоброкачественной неопределенности [5—7]. Другими словами, в условиях, когда различные факторы, входящие в задачу, представляют собой случайные величины, вероятностные характеристики которых априори не известны и не могут быть найдены путем планирования эксперимента, а для получения сведений, необходимых для принятия решений, обрабатываются экспертные данные. По этой причине в настоящее время в процессе управления сложными ТП, выбор УВ в условиях неопределенности осуществляется автоматизированным образом и сводится к определению оператором-технологом эффективных управляющих воздействий, обеспечивающих заданный режим реализации технологического процесса [8, 9]. К эффективным отчетственным разработкам, связанным с построением автоматизированных систем управления производственными процессами, можно отнести исследования [8—10]. Помимо методов управления в работе [10] также предложены методы построения визуальных анализаторов, обеспечивающих возможность интеллектуальной поддержки принимаемых операторами технологических установок решений, и обоснован ряд перспективных подходов к созданию эффективных систем интеллектуального автоматического управления ТП, основанных на обработке экспертных данных. Однако решить все проблемы, связанные с организацией принятия решений в процессе выбора УВ в условиях недоброкачественной неопределенности, в перечисленных работах не удалось.

Отметим, что в последнее время для принятия решений в условиях недоброкачественной неопределенности широкое распространение получила обработка экспертных данных с помощью математического аппарата нечетких множеств, который в системах управления сложными объектами позволяет:

- получить на основе лингвистических переменных (ЛП) [11] качественные и количественные значения отдельных показателей текущего состояния ТП и сформировать на этой основе нечеткие алгоритмы управления процессом их регулирования [12];
- построить математические модели в виде нечетко или интервально заданной зависимости между отдельными показателями, определяющими состояние ТП с учетом их взаимного влияния друг на друга [13];
- сформировать математические модели в виде уравнений, в том числе и в виде эмпирических математических моделей ТП с нечетко заданными коэффициентами [14].

Отметим также, что математические модели с нечетко заданными коэффициентами, с одной стороны, вроде бы увеличивают свободу выбора, но, с другой стороны, при автоматическом выборе УВ не позволяют обеспечить однозначное решение задачи выбора. Другими словами, они не снимают полностью проблем, связанных с неопределенностью влияния ОС на сложные объекты управления. Кроме того, формируемые на их основе нечеткие алгоритмы часто не позволяют решать задачи управления ТП с требуемой точностью. В этой связи, для эффективного решения задачи автоматического выбора УВ на множестве заданных альтернатив в условиях недоброкачественной неопределенности, возникает необходимость в построении многопараметрических эмпирических моделей ОУ с четко заданными коэффициентами, опираясь на ту же обработку экспертных данных с помощью математического аппарата нечетких множеств. Такой подход позволяет обеспечить однозначный выбор эффективных управляющих воздействий на альтернативной основе, например, по степени их влияния на эффективность реализации ТП в нестабильных условиях ОС.

В общем случае эффективность сложных ТП, как правило, определяется множеством взаимосвязанных между собой технико-экономических показателей, зависящих от их параметров состояния, оцениваемых системой контроля технологических процессов в четком виде [15]. В этой связи для обеспечения высокой оперативности принимаемых решений также возникает необходимость в построении на основе экспертных данных математических моделей исследуемого процесса, с учетом происходящих в ОС изменений, в виде системы уравнений с четко заданными коэффициентами.

В настоящей работе предлагаются один из подходов к построению многофакторных эмпирических математических моделей для принятия непрограммируемых управленческих решений и метод выбора на альтернативной основе эффективных УВ в условиях недоброкачественной неопределенности, основанный на:

- обработке экспертных данных и накопленного опыта управления с помощью математического аппарата нечетких множеств;
- разработке многофакторной многокритериальной эмпирической математической модели эффективности состояния ТП в виде системы уравнений, состоящей из графиков лингвистических функций (ЛФ) [16], имеющих четко заданные коэффициенты при параметрах состояния ОУ;
- построении метода выбора на альтернативной основе наиболее эффективных УВ, с предварительной экстраполяцией их влияния на повышение эффективности процесса реализации ТП, например, с требуемой точностью обработки деталей.

Это позволяет эффективным образом реализовать автоматическое регулирование процесса реализации ТП на нижнем уровне многоуровневой ситуационной системы управления сложными технологическими процессами в машиностроении [17] на основе данных, поступающих на ее вход из системы контроля динамики протекающих на ОУ процессов [18].

### 1. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В нестабильной ОС, как отмечено выше, для оценки эффективности текущего состояния ТП целесообразно воспользоваться системой технико-экономических показателей, зависящих от ситуации, возникшей на ОУ. Кроме того, следует учитывать, что на каждый показатель эффективности ТП интегрально влияет достаточно большое число параметров его состояния и различных возмущающих факторов ОС. Поэтому определение степени дифференциального влияния различных УВ на каждый показатель эффективности в процессе принятия решений представляет собой достаточно сложную задачу, требующую предварительного анализа поведения различных параметров состояния ТП при их взаимном влиянии друг на друга и под воздействием различного вида возмущений.

При этом следует учитывать, что УВ  $U = \{U_Z\}$ ,  $Z = 1, 2, \dots, m$ , например, проведение технического обслуживания оборудования, замена режущего инструмента, изменение технологического маршрута обработки деталей и др., как правило, опосредованно влияют на показатели эффективности ТП  $\Theta = \{\Theta_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , например, средняя выработка в отчетном периоде, точность обработки деталей и др., где  $m$  и  $n$  — соответственно общее число управленческих воздействий обрабатываемой системой управления и показателей эффективности, характеризующих ТП. Влияние УВ  $U_Z \in U$  на ТП проявляется путем изменения в результате их обработки параметров его состояния (управления)  $F = \{F_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m_1$ , например, уровня изношенности режущего инструмента, технического состояния оборудования и др., где  $m_1$  — общее число параметров состояния ТП, от которых зависят значения показателей его эффективности  $\Theta_k \in \Theta$ .

Помимо этого, в процессе выбора следует учитывать повторяемость  $m_z$  возникновения проблемных ситуаций по истечении времени после обработки каждого альтернативного УВ  $U_Z \in U$  в от-

четном периоде, а также затраты  $W_Z$  и время  $T_Z$ , связанные с подготовкой и реализацией альтернативных управленческих воздействий (мероприятий). Необходимо отметить, что время  $T_Z$ , связанное с подготовкой и реализацией альтернативных УВ, целесообразно учитывать при определении такого параметра состояния ТП, как время простоев по причине неисправности технологического оборудования.

Для оценки влияния различных параметров состояния ТП  $F_j \in F$  и такой характеристики обрабатываемых УВ, как стоимость их реализации  $F_Z = m_Z W_Z$ , на показатели эффективности  $\Theta_k \in \Theta$  отдельных технологических операций или технологического процесса в целом в нестабильных условиях ОС, возникает необходимость в разработке многофакторной многокритериальной регрессионной модели. Например, для линейных ОУ с учетом обрабатываемого УВ  $U_Z \in U$  такая модель будет иметь вид:

$$\begin{aligned}\Theta_1^Z &= a_1^1 F_1^1 + a_2^1 F_2^1 + \dots + a_{n_1}^1 F_{n_1}^1 - F_Z; \\ \Theta_2^Z &= a_1^2 F_1^2 + a_2^2 F_2^2 + \dots + a_{n_2}^2 F_{n_2}^2 - F_Z; \\ &\dots \\ \Theta_n^Z &= a_1^n F_1^n + a_2^n F_2^n + \dots + a_{n_n}^n F_{n_n}^n - F_Z, \quad (1)\end{aligned}$$

где, например,  $a_j^k, j = 1, 2, \dots, n_k$  — коэффициенты, определяющие влияние  $j$ -го параметра состояния  $F_j^k \in F$  ТП на показатель его эффективности  $\Theta_k^Z$ ;  $n_2, n_3, \dots, n_n$  — число параметров состояния соответственно влияющих на значения показателей эффективности  $\Theta_1^Z, \Theta_2^Z, \dots, \Theta_n^Z$ ;  $F_Z$  — стоимость реализации УВ  $U_Z$ .

В общем случае в модели (1) на различные показатели эффективности могут влиять как одни и те же, так и различные параметры состояния  $F_j \in F$  ТП. Так, например, выполнение условия  $F_1^1 = F_1^2$  необязательно.

Учитывая, что может потребоваться как снижение, стабилизация, так и рост значений анализируемых показателей эффективности  $\Theta_k \in \Theta$ , все основные параметры состояния  $F_j \in F$ , от которых зависят их значения, целесообразно разбить на три группы  $F_1, F_2$  и  $F_3$ ;  $F_1 \cup F_2 \cup F_3 = F$ :

— параметры состояния ТП  $F_1 = \{F_{j_1}\}$ ,  $j_1 = 1, 2, \dots, m_2$ , требующие реализации УВ  $U_1 = \{U_{Z_1}\}$ ,  $Z_1 = 1, 2, \dots, m_3$ , обеспечивающих максимально до-

пустимый рост их значений и соответствующий этому прирост оценок определенных показателей эффективности  $\Theta_k(\max) \in \Theta$  с учетом ограничений, например, средней выработки технологической линии;

— параметры состояния ТП  $F_2 = \{F_{j_2}\}$ ,  $j_2 = 1, 2, \dots, m_4$ , требующие реализации УВ  $U_2 = \{U_{Z_2}\}$ ,  $Z_2 = 1, 2, \dots, m_5$ , обеспечивающих стабилизацию заданных значений  $C_k$  определенных показателей эффективности  $\Theta_k(\text{cons}) \in \Theta$  с учетом ограничений и допущений, например, точность обработки деталей. Другими словами, для заданных значений  $\Theta_k(\text{zad})$  данного вида показателей по абсолютной величине должно выполняться условие  $|\Theta_k(\text{zad}) - \Theta_k(\text{fak})| \leq \varepsilon_k$ , где  $\Theta_k(\text{fak})$  — фактическое значение показателя эффективности  $\Theta_k$ ;  $\varepsilon_k$  — допустимая погрешность изменения  $k$  показателя эффективности;

— параметры состояния ТП  $F_3 = \{F_{j_3}\}$ ,  $j_3 = 1, 2, \dots, m_6$ , требующие выполнения УВ  $U_3 = \{U_{Z_3}\}$ ,  $Z_3 = 1, 2, \dots, m_7$ , обеспечивающих максимально допустимое снижение их значений, которое сопровождается снижением определенных показателей эффективности  $\Theta_k(\min) \in \Theta$  с учетом ограничений, например, себестоимость обработки одной детали на технологической линии без потери качества.

Таким образом, возникает необходимость в интегральном критерии оценки эффективности  $\Theta^*$  текущих состояний ТП, переход которых от одного состояния к другому осуществляется под воздействием различных УВ. В общем случае такой критерий имеет вид:

$$\Theta^* = \left( \sum_{k=1}^b \gamma_k \Theta_k(\max) - \sum_{k=d+1}^n \gamma_k \Theta_{k_1}(\min) \right) \Rightarrow \max, \quad (2)$$

при ограничениях в виде равенств:  $\Theta_k(\text{cons}) = C_k \pm \varepsilon$ ,  $k = b+1, b+2, \dots, d$ , где  $\Theta_k(\max)$ ,  $\Theta_k(\min)$ ,  $\Theta_k(\text{cons})$  — показатели эффективности ТП, подлежащие соответственно максимизации, минимизации и стабилизации;  $\gamma_k$  — коэффициенты значимости показателей эффективности ТП, определяемые экспертным путем;  $b$  — число показателей эффективности ТП, подлежащих максимизации;  $b+1, b+2, \dots, d$  — число показателей ТП, требующих стабилизации их заданных значений  $C_k$ ;  $d+1, d+2, \dots, n$  — число показателей эффективности ТП, подлежащих минимизации. Как правило, коэффициенты значимости  $\gamma_k$  должны удовлетворять условиям:  $0 \leq \gamma_k \leq 1$ ,  $\sum_{k=1}^n \gamma_k = 1$ , [6].

В общем случае ЛФ, позволяющие формализовать как в нечеткой форме, так и аналитическом четком виде характер влияния параметров состояния на показатели эффективности ТП, определяются пятеркой

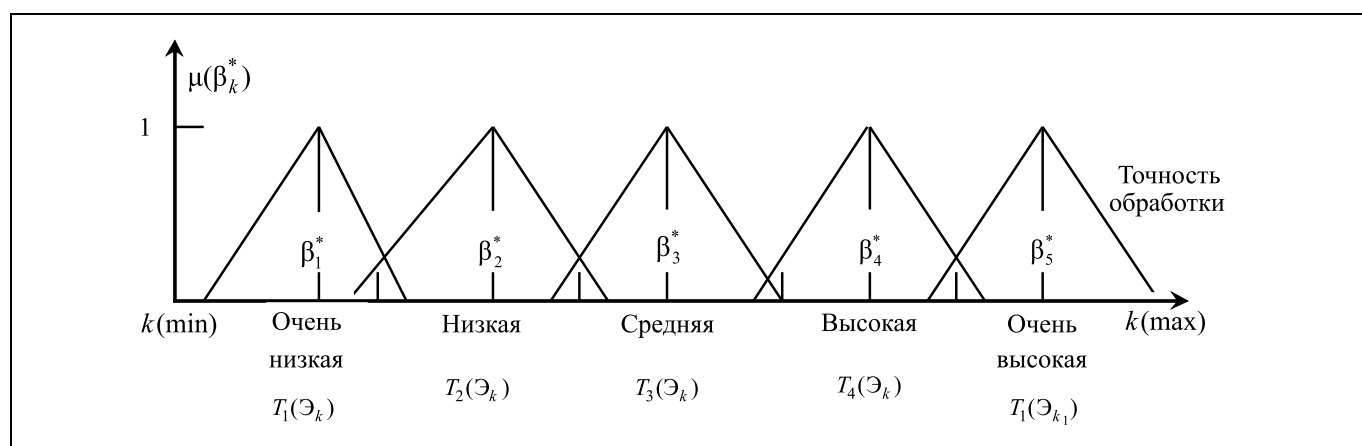
$$\text{ЛФ} = (\text{Н}, \text{ЛП}_3, \{\text{ЛП}_{j_4 \text{HЗ}}, j_4 = 1, 2, \dots, m_8\}, M, \Psi),$$

где Н — название ЛФ;  $\text{ЛП}_3$  — зависимая лингвистическая переменная, которая определяется соответствующим ЛФ показателем эффективности  $\Theta_k \in \Theta$ ;  $\text{ЛП}_{j_4 \text{HЗ}}$  — независимая ЛП, определяемая параметром  $j_4$  состояния ТП;  $M$  — матрица ЛФ, которая описывает соответствие между нечеткими значениями показателя эффективности и влияющих на него параметрами состояния ТП, найденными путем опроса экспертов;  $\Psi$  — график ЛФ или аналитическая зависимость между значениями соответствующего этой функции показателя эффективности  $\Theta_k$  и параметрами состояния ТП  $F_{j_4} \in F$ .

Для построения ЛФ вначале формируются лингвистические переменные с соответствующими названиями. Например,  $\text{ЛП}_k$  для показателя эффективности  $\Theta_k$ , характеризующего точность механической обработки деталей, будет представлять собой четверку

$$\text{ЛП}_k = (H_k, T_k, K_k, \beta_k^*),$$

где  $H_k$  — название  $\text{ЛП}_k$  «Точность механической обработки деталей»;  $T_k$  — терм «множество  $\text{ЛП}_k$ » или множество ее нечетких значений, которым соответствуют термы  $T_k = \{\text{«Очень низкая} - T_1(\Theta_k)\text{», «Низкая} - T_2(\Theta_k)\text{», «Средняя} - T_3(\Theta_k)\text{», «Высокая} - T_4(\Theta_k)\text{», «Очень высокая точность механической обработки деталей} - T_5(\Theta_k)\text{»}\}$ ;  $K_k$  — множество базовых значений  $\text{ЛП}_k$ ,  $K_k \in [k_k(\min), k_k(\max)]$ , которое, как правило, ограничено снизу и сверху (см. рисунок). Например, для  $\text{ЛП}_k$ , соответствующей показателю эффективности  $\Theta_k$  «Точность механической обработки деталей», данные ограничения соответственно определяются заданными допусками на механическую обработку деталей и износом режущего инструмента. По значениям базовых множеств формируются шкалы нечетких и количественных значений соответствующих им ЛП, на которых по экспертным данным определяются граничные значения термов и образующие их нечеткие множества (см. рисунок);  $\beta_k^*$  — базовая переменная  $\text{ЛП}_k$  или количественное текущее значение точности механической обработки изготавливаемой детали.



**Шкала лингвистической переменной «Точность механической обработки деталей»:**  $\mu(\beta_k^*)$  — степень принадлежности значения  $\beta_k^*$  базовой переменной ЛП $_k$  к нечеткому множеству, определяемому термом, в интервал численных значений которого оно попадает

Приведем метод, позволяющий сформировать эмпирическую модель (1) показателей эффективности ТП в виде графиков соответствующих им лингвистических функций.

**Входные переменные:** множество используемых в формируемой модели показателей эффективности  $\Theta_k \in \Theta$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , и параметров состояния  $F_{j_4}(k) \in F$ ,  $j_4 = 1, 2, \dots, m_8(k)$ .

**Промежуточные переменные:** соответствия нечетких и количественных значений заданных показателей эффективности  $\Theta_k \in \Theta$  и параметров состояния  $F_j \in F$ , полученные экспертным путем.

**Выходные переменные:** количественные, четкие значения коэффициентов  $a_{j_4}^k$  и аналитические выражения графиков  $\Psi_k$  ЛФ $_k$  биективно соответствующих показателям эффективности  $\Theta_k \in \Theta$  ТП.

**Метод**

**Шаг 1.** Начало: принять  $k = 1$ .

**Шаг 2.** Установить параметры состояния ТП  $F_{j_4}(k) \in F$ , влияющие на показатель эффективности  $\Theta_k \in \Theta$  и структуру связи между ними. Пусть структура данной связи определяется структурой уравнений линейной многофакторной модели (1).

**Шаг 3.** Построить для каждого установленного параметра состояния ТП  $F_{j_4}(k) \in F$  шкалу значений соответствующей ему ЛП $_{j_4}(k)$  с названием «Параметр состояния ТП  $F_{j_4}(k_1)$ ».

**Шаг 4.** Сформировать для показателя эффективности  $\Theta_k \in \Theta$  шкалу значений соответствующей ему ЛП $_k$  с названием «Показатель эффективности  $\Theta_k$ ».

**Шаг 5.** Построить по данным, полученным экспертным путем, матрицу ЛФ $_k$ , для которой роль зависимой лингвистической переменной играет ЛП $_{k_1}$ , а роль независимых лингвистических переменных исполняют ЛП $_{j_4}(k)$ , соответствующие влияющим на показатель эффективности  $\Theta_k$  параметрам состояния ТП  $F_{j_4}(k) \in F$ .

Пусть, например, для показателя эффективности  $\Theta_k$  «Точность механической обработки деталей» по экспертным данным построена матрица  $M_k$ , отражающая влияние на него параметров состояния  $F_{j_4}(k) \in F$ : состояние режущего инструмента, скорость вращения заготовки, материал, форма, размеры заготовки и др. (табл. 1), где  $m_8(k)$  — число параметров состояния ТП, влияющих на показатель эффективности  $\Theta_k$ .

В табл. 1, например, столбец, соответствующий терму  $T_3(\Theta_k)$  означает, что среднему значению показателя эффективности  $\Theta_k$  эксперты в соответствие поставили большое значение  $T_5(F_1)$  параметра состояния  $F_1$ , среднее значение  $T_3(F_1)$  параметра состояния  $F_2, \dots$ , среднее значение  $T_3(F_{m_8(k)})$  параметра состояния  $F_{m_8(k)}$ .

**Шаг 6.** Определить значения базовой переменной  $\beta_k(T_i(\Theta_k))$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ , ЛП $_k$  и базовых переменных  $x(T_i(F_{j_4}(k)))$  ЛП $_{j_4}(k)$  по проекциям из максимумов функций принадлежности нечетких множеств, соответствующих термам зависимой  $\Theta_k \in \Theta$  и независимых  $F_{j_4}(k) \in F$  переменных ЛФ $_k$ , на базовую шкалу их численных значений (см. рису-

**Соответствие между нечеткими значениями показателя эффективности  $\mathcal{E}_k$  и параметрами состояния  $F_{j_4} \in F$ , установленное экспертным путем**

$T_i(F_{j_4})/T_i(\mathcal{E}_k)$	$T_1(\mathcal{E}_k)$	$T_2(\mathcal{E}_k)$	$T_3(\mathcal{E}_k)$	$T_4(\mathcal{E}_k)$	$T_5(\mathcal{E}_k)$
$T_i(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$
$T_i(F_2)$	$T_2(F_2)$	$T_2(F_2)$	$T_3(F_2)$	$T_3(F_2)$	$T_4(F_2)$
	...				
$T_i(F_{m_8(k)})$	$T_5(F_{m_8(k)})$	$T_4(F_{m_8(k)})$	$T_3(F_{m_8(k)})$	$T_3(F_{m_8(k)})$	$T_2(F_{m_8(k)})$

нок). Используя полученные таким образом данные, построить таблицу соответствий между численными значениями зависимой и независимых лингвистических переменных ЛФ<sub>k</sub>. Например, для показателя эффективности  $\mathcal{E}_k$  «Точность механической обработки деталей» справедлива табл. 2, определяющая соответствие между его количественными значениями  $\beta_k^*(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ , и количественными значениями  $x_{j_4 i}^*$ ,  $j_4 = 1, 2, \dots, m_8(k)$ , параметров состояния  $F_{j_4}(k) \in F$ ТП, найденными по нечетким их значениям, приведенным в табл. 1.

В табл. 2:  $\beta_i^*$  — количественная оценка показателя эффективности  $\mathcal{E}_k$ , найденная по терму  $T_i(\mathcal{E}_k)$  соответствующей ему ЛП<sub>k</sub>;  $x_{j_4 i}^*$  — количественная оценка показателя состояния ТП  $F_{j_4}(k)$ , найденная по терму  $T_i(F_{j_4}(k))$  соответствующей ему ЛП<sub>j\_4(k)</sub>. Например, количественному значению показателя эффективности  $\mathcal{E}_k$ , найденному по максимуму функции принадлежности нечеткого множества, определяющего интервал численных значений терма  $T_i(\mathcal{E}_k)$ , соответствуют численные значения параметров состояния ТП  $x_{13}^*$ ,  $x_{22}^*$ , ...,  $x_{n_2(k)5}^*$ , найденные по соответствующим им термам ЛП<sub>j\_4(k)</sub> (см. табл. 1).

**Шаг 7.** Обработать данные, полученные в таблице соответствий количественных значений зависимых и независимых ЛП (см. табл. 2), посредством многофакторного регрессионного анализа [19, 20], и таким образом определить коэффициенты  $a_{j_4}^k$  графика  $\Psi_k$  ЛФ<sub>k</sub>, биективно соответствующего показателю эффективности  $\mathcal{E}_k \in \mathcal{E}$  ТП.

**Шаг 8.** Построить аналитическое выражение графика  $\Psi_k$  ЛФ<sub>k</sub>:  $\mathcal{E}_k = a_1^k F_1(k) + a_2^k F_2(k) + \dots + a_{m_8(k)}^k F_{m_8(k)}$ .

**Шаг 9.** Проверить условие  $k = n$ : если условие выполняется, то перейти к шагу 10; в противном случае,  $k = k + 1$ , перейти к шагу 2.

**Шаг 10.** Конец.

Получаемые таким способом аналитические зависимости графиков ЛФ<sub>k</sub> служат в качестве уравнений эмпирической модели (1) и позволяют на основе факторного анализа методом цепной подстановки [19, 20] установить характер автономного влияния различных параметров состояния  $F_{j_4}(k) \in F$  на показатели  $\mathcal{E}_k \in \mathcal{E}$ , определяющие эффективность текущего состояния ТП. В свою очередь, это позволяет для различных показателей эффективности определить наиболее чувствительные в смысле их регулирования параметры состояния ТП.

Корректировка же эмпирической модели (1) с учетом стоимостных характеристик  $F_z$  альтернативных управлений обеспечивает возможность выбора на альтернативной основе наиболее эффективных УВ, обеспечивающих необходимые изме-

Таблица 2

**Соответствие между количественными значениями  $\beta_k^*(T_i(\mathcal{E}_k))$  показателя эффективности  $\mathcal{E}_k$  и количественными значениями  $x(T_i(F_{j_4}(k)))$ , влияющих на него параметров состояния  $F_{j_4} \in F$**

$x(T_i(F_{j_4}(k)))/\beta_k^* T_i(\mathcal{E}_k)$	$\beta_1^*$	$\beta_2^*$	$\beta_3^*$	$\beta_4^*$	$\beta_5^*$
$x(T_i(F_1(k)))$	$x_{13}^*$	$x_{14}^*$	$x_{15}^*$	$x_{15}^*$	$x_{15}^*$
$x(T_i(F_2(k)))$	$x_{22}^*$	$x_{22}^*$	$x_{23}^*$	$x_{23}^*$	$x_{23}^*$
	...				
$x(T_i(F_{m_8(k)}(k)))$	$x_{m_8(k)5}^*$	$x_{m_8(k)4}^*$	$x_{m_8(k)3}^*$	$x_{m_8(k)3}^*$	$x_{m_8(k)2}^*$

нения параметров состояния  $F_j \in F$  для перевода ТП в требуемое состояние с учетом текущих условий ОС.

Отметим, что для каждого терма зависимых и независимых лингвистических переменных могут быть построены встроенные ЛП или нечеткие переменные второго порядка. Например, на основе терма «Очень низкая точность» зависимой ЛП с названием «Точность механической обработки деталей» строится встроенная лингвистическая переменная, определяемая термами: «самая низкая из очень низких точностей», «низкая из очень низких точностей», «средняя из очень низких точностей», «высокая из очень низких точностей» и «очень высокая точность из очень низких точностей механической обработки деталей». Это позволяет уточнить значения и повысить значимость коэффициентов эмпирической модели и на этой основе обеспечить достаточно высокую точность решаемых задач управления.

## 2. МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЕНИЙ НА СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для принятия эффективных решений в условиях неопределенности в первую очередь требуется сформировать множество альтернативных УВ, позволяющих устранить возникшую на ОУ проблемную ситуацию с различным уровнем эффективности. Для построения данного множества можно воспользоваться следующими инструментальными средствами.

В общем случае управление УТП складывается из следующих УВ:  $U = U_1 \cup U_2 \cup U_3$ , как правило, опосредованно влияющих на различные показатели эффективности  $\Theta_k \in \Theta$  путем регулирования текущих значений непосредственно влияющих на них параметров его состояния:  $F = F_1 \cup F_2 \cup F_3$ .

Для различных по назначению параметров состояния ТП может выполняться условие  $F_1 \cap F_2 \cap F_3 \neq \emptyset$ .

Опираясь на накопленный опыт операторов-технологов и данные, полученные экспертным путем, для построения множества альтернативных УВ определяются три отношения:  $G_1 \subseteq F_1 \times U_1$ ,  $G_2 \subseteq F_2 \times U_2$  и  $G_3 \subseteq F_3 \times U_3$ , где  $\times$  — декартово произведение множеств. Каждая пара  $\langle F_j, U_j \rangle \in G_j$  включает такое УВ  $U_{Z_j}$ , выполнение которого позволяет получить положительное приращение  $\Delta F_j$  параметра состояния ТП  $F_j \in F_j$  с учетом задан-

ных ограничений, рост значений которого позитивно влияет на эффективность его текущего состояния. В свою очередь, каждая пара  $\langle F_j, U_j \rangle \in G_j$  позволяет обеспечить требуемое значение параметра состояния  $F_j \pm \varepsilon$ ,  $F_j \in F_j$  при определенном его отклонении от этого значения. А каждая пара  $\langle F_j, U_j \rangle \in G_j$  включает такое УВ  $U_{Z_j}$ , реализация которого позволяет получить допустимое отрицательное приращение  $-\Delta F_j$  параметра состояния ТП  $F_j \in F_j$  с учетом имеющихся ограничений, снижение значений которого также позитивно влияет на эффективность его текущего состояния.

Элементы полученных выше отношений  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$  для принятия решений удобно представить соответственно в виде продукций:

$$\begin{aligned} D_{Z_1} &: (F_1 \otimes U_{Z_1}) \rightarrow (F_1 + \Delta F_1), \\ D_{Z_2} &: (F_2 \otimes U_{Z_2}) \rightarrow (F_2 \pm \Delta F_2), \\ D_{Z_3} &: (F_3 \otimes U_{Z_3}) \rightarrow (F_3 - \Delta F_3), \end{aligned} \quad (3)$$

означающих, например, что если обработать УВ  $U_{Z_1}$ , то параметр состояния ТП  $F_1$  получит положительное приращение, равное  $\Delta F_1$ , где знак  $\otimes$  означает обработку УВ  $U_{Z_1}$ .

Это позволяет по первым одинаковым проекциям отношений  $G_1 - G_3$  построить множества  $D_{j_1} = \{D_{Z_1}(j_1)\}$ ,  $j_1 = 1, 2, \dots, m_2$ ,  $D_{j_2} = \{D_{Z_2}(j_2)\}$ ,  $j_2 = 1, 2, \dots, m_4$ , и  $D_{j_3} = \{D_{Z_3}(j_3)\}$ ,  $j_3 = 1, 2, \dots, m_6$ , которые определяются УВ  $U_{Z_1}(j_1)$ ,  $U_{Z_2}(j_2)$ ,  $U_{Z_3}(j_3)$ , позволяющими регулировать значения отдельных параметров состояния ТП, соответственно  $F_{j_1} \in F_1$ ,  $F_{j_2} \in F_2$  и  $F_{j_3} \in F_3$ . Таким образом, для каждого отдельного параметра состояния  $F_{j_1}$ ,  $F_{j_2}$  и  $F_{j_3}$  на основе продукций (3), входящих соответственно во множества  $D_{j_1}$ ,  $D_{j_2}$  и  $D_{j_3}$ , можно сформировать определяющие их множества троек вида:

$$\begin{aligned} D_{Z_1}^* &= \{\langle U_{Z_1} : F_{j_1}, F_{j_1} + \Delta F_{j_1} \rangle\}, \quad j_1 = 1, 2, \dots, m_2; \\ D_{Z_2}^* &= \{\langle U_{Z_2} : F_{j_2}, F_{j_2} \pm \Delta F_{j_2} \rangle\}, \\ & \quad j_2 = 1, 2, \dots, m_4; \\ D_{Z_3}^* &= \{\langle U_{Z_3} : F_{j_3}, F_{j_3} - \Delta F_{j_3} \rangle\}, \quad j_3 = 1, 2, \dots, m_6, \end{aligned} \quad (4)$$

которые характеризуют значения отдельных параметров состояния ТП  $F_{j_1} \in D_{Z_1}^*$ ,  $F_{j_2} \in D_{Z_2}^*$  и  $F_{j_3} \in D_{Z_3}^*$  до и после отработки соответствующих им УВ  $U_{Z_1} \in D_{Z_1}^*$ ,  $U_{Z_2} \in D_{Z_2}^*$  и  $U_{Z_3} \in D_{Z_3}^*$ .

Сформированные на основе продукций (3) и троек (4) логико-трансформационные правила вывода обеспечивают возможность построения на ситуационной основе множества альтернативных управлений, позволяющих с различным уровнем эффективности устранить сложившуюся на ТП проблемную ситуацию. Под проблемной ситуацией в этом случае следует понимать вектор отклонений параметров состояния ТП  $F_{j_1}$ ,  $F_{j_2}$  и  $F_{j_3}$  от требуемых на текущий момент времени их значений. Это, в свою очередь, позволяет согласно критерию выбора (2) выявить наиболее эффективные УВ путем решения соответствующей оптимизационной задачи.

Необходимо отметить, что таким же способом можно выявить множество альтернативных УВ  $U^* = \{U_{j_5}(F_j)\}$ ,  $j_5 = 1, 2, \dots, m_9$ , которые обеспечивают возможность регулирования различных параметров состояния ТП  $F_j \in F$  при их отклонении, возникающем в результате влияния различных возмущающих факторов  $p_{j_6} \in P$ ,  $P = \{p_{j_6}\}$ ,  $j_6 = 1, 2, \dots, m_{10}$ , внешней составляющей ОС. Для этого строится соответствие  $G_4 \subseteq F \times U^*$ , первая проекция которого определяется различными параметрами состояния ТП  $F_j \in F$ , а вторая — биективно соответствующими им УВ  $U_{j_5}(F_j) \in U^*$ .

Далее, если на основе экспертных данных установить соответствие между возмущающими факторами ОС  $p_{j_6} \in P$  и соответствующими им эффективными УВ  $U_{j_5}(F_j) \in U^*$ , то можно определить согласно критерию (2) эффективность их реализации при наблюдении в окружающей среде различных возмущающих факторов до начала выполнения текущей технологической операции. Это позволяет организовать эффективное упреждающее регулирование процесса реализации ТП по возмущению. Для решения данной задачи, на основании экспертных данных и накопленного опыта управления, формируется соответствие  $G_5 \subseteq P \times F$ , каждый элемент которого определяется следующим образом. Если для пары  $\langle p_{j_6} \in P, D_j \in F \rangle$  выполняется условие  $F_j \& p_{j_6} \rightarrow F_j \pm \Delta F_j$  (эта запись означает, что появление в ОС возмущающего фактора  $p_{j_6} \in P$  сопровождается либо снижением значения параметра состояния ТП  $F_j$  на величину, равную

$-\Delta F_j$ , либо его ростом на величину, равную  $+\Delta F_j$ ), то пара  $\langle p_{j_6}, F_j \rangle \in G_5$ .

Выполнение же операции композиции  $\oplus$  соответствий  $G_4$  и  $G_5$  позволяет получить соответствие  $G_6 = G_4 \oplus G_5$ ,  $G_6 \subseteq P \times U^*$ , состоящее из множества пар  $\langle p_{j_6}, U_{j_5}(F_j) \rangle$ . На основе таких пар формируются логико-трансформационные решающие правила, обеспечивающие выбор УВ, позволяющих регулировать процесс реализации ТП по возмущению. В общем случае каждое такое решающее правило имеет следующее содержание: *если в окружающей среде ТП наблюдается возмущающий фактор  $p_{j_6} \in P$ , то в ответ на его влияние на параметр состояния  $F_j$  целесообразно выполнить УВ  $U_{j_5}(F_j) \in U^*$ , позволяющее либо полностью устранить, либо снизить последствия такого негативного воздействия этого фактора на технологический процесс.*

Таким образом, предложенные инструментальные средства позволяют выбирать наиболее эффективные УВ и переводить на этой основе ТП в требуемое состояние в нестабильных условиях ОС.

### 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим пример, показывающий, что предложенные инструментальные средства позволяют строить эмпирические зависимости показателей эффективности  $\mathcal{E}_k \in \mathcal{E}$  от различных параметров состояния ТП  $F_j \in F$  и выбирать на этой основе УВ  $U_Z \in U$ , обеспечивающие наиболее эффективную их реализацию в изменяющихся условиях ОС.

Пусть технологический процесс, связанный с механической обработкой деталей реализуется на гибкой автоматической линии, эффективность функционирования которой определяется показателями  $\mathcal{E}_1$  — выработкой в течение отчетного периода и  $\mathcal{E}_2$  — точностью механической обработки деталей. Первый показатель подлежит максимизации, а второй — стабилизации.

Шкала ЛП<sub>1</sub> показателя эффективности  $\mathcal{E}_1$  изменяется от 0 до  $m^*$ , где  $m^*$  — выработка, соответствующая идеальному состоянию технологического оборудования, а также режущего инструмента при очень высокой квалификации обслуживающего персонала. Данная шкала разбивается на интервалы, определяемые словесными значениями или термами: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая» и «очень высокая выработка», границы которых устанавливаются на основе экспертных данных.



В качестве основных параметров состояния ТП, влияющих на показатель эффективности  $\Theta_1$  могут выступать:

$F_1^1$  — показатель, определяющий техническое состояние технологического оборудования, который определяется ЛП с таким же названием; шкала данной ЛП изменяется от 0 до 1, что соответственно определяется неисправным и идеальным состояниями технологического оборудования, и разбивается на интервалы, определяемые термами: «очень сильный износ», «сильный износ», «средний износ», «слабый износ» и «очень слабый износ оборудования»;

$F_2^1$  — показатель, характеризующий износ режущего инструмента на различных станках с ЧПУ, от которого зависит число проходов необходимых для снятия определенного слоя металла с заготовки; этот показатель определяется одноименной с ним лингвистической переменной, шкала которой изменяется в пределах  $[0, 1]$  и разбивается на интервалы согласно термам: «очень сильный износ», «сильный износ», «средний износ», «слабый износ» и «износ инструмента практически отсутствует»;

$F_3^1$  — показатель, характеризующий среднюю выработку в денежном выражении технологической линии в единицу времени отчетного периода, который выражается термами одноименной лингвистической переменной: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая» и «очень высокая выработка»;

$F_4^1$  — показатель, определяющий квалификацию технического персонала, занимающегося ремонтом технологического оборудования, который определяется термами одноименной с ним лингвистической переменной: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая» и «очень высокая квалификация»; для данной ЛП определяется биективно соответствующая ей лингвистическая переменная с названием «Время ремонта оборудования», которая задается термами: «очень короткие сроки», «короткие сроки», «средние сроки», «длинные сроки» и «очень длинные сроки ремонта».

Полученные таким образом ЛП позволяют построить эмпирическую зависимость между значениями зависимой переменной  $\Theta_1$  соответствующей ЛФ и значениями ее независимых переменных  $F_{j_4}^1$ ,  $j_4 = 1, 2, \dots, 4$ , вида  $\Theta_1 = a_1^1 F_1^1 + a_2^1 F_2^1 + a_3^1 F_3^1 + a_4^1 F_4^1$ . Для этого на основе экспертных данных в соответствии с нечеткими значениями ЛП соответствующих показателям  $\Theta_1$  и  $F_{j_4}^1$  заполняется табл. 1. Затем по нечетким значениям перемен-

ных, приведенным в табл. 1, формируется табл. 2, определяющая соответствие между их количественными значениями. После этого путем решения матричного уравнения вида  $A = (M^T M)^{-1} (M^T \Theta_1^*)$ , полученного по данным табл. 2, определяются коэффициенты  $a_{j_4}^1$  строящейся регрессионной модели, где  $A$  — вектор-столбец коэффициентов регрессионной модели,  $M$  — матрица значений независимых переменных ЛФ,  $M^T$  — транспонированная матрица  $M$ ,  $(M^T M)^{-1}$  — обратная матрица произведения матриц  $M^T$  и  $M$ ;  $\Theta_1^*$  — вектор-столбец полученных значений анализируемого показателя эффективности  $\Theta_1$ .

После построения полученная линейная регрессионная модель  $\Theta_1 = f(F_1^1, \dots, F_4^1)$  проверяется на адекватность по критерию Фишера и на значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [19, 20]. Если в результате проверки модель оказывается неадекватной либо незначимой, то следует переход к построению модели нелинейного вида.

Шкала ЛП<sub>2</sub> для показателя эффективности  $\Theta_2$  изменяется в пределах от 0 до  $m^{**}$ , где  $m^{**}$  — максимальная точность механической обработки деталей, которую можно получить, исходя из технического состояния оборудования и режущего инструмента на исследуемой технологической линии. В общем случае в качестве основных параметров состояния  $F_{j_4}^2 \in F$ , влияющих на данный показатель

эффективности, целесообразно принять  $F_1^2$  — техническое состояние технологического оборудования,  $F_2^2$  — износ режущего инструмента и  $F_3^2$  — технологическая эффективность оснастки для закрепления и позиционирования деталей при обработке на технологическом оборудовании, для которой соответствующая ЛП определяется на интервале от 0 до 1. Нижняя граница данного интервала соответствует случаю, когда оснастка не приспособлена к требованиям технологического оборудования, а верхняя — полностью удовлетворяет его требованиям и параметрам выполняемых технологических операций.

После построения по описанному принципу эмпирической зависимости  $\Theta_2 = a_1^2 F_1^2 + a_2^2 F_2^2 + a_3^2 F_3^2$  интегральный критерий выбора  $\Theta^*$  на альтернативной основе наиболее эффективного УВ в текущей ситуации ОС будет иметь вид:  $\Theta^* = \Theta_1 = a_1^1 F_1 + a_2^1 F_2 + a_3^1 F_3 + a_4^1 F_4 - F_Z \Rightarrow \max$ , при ог-

раничении  $\Theta_2 = a_1^2 F_1^2 + a_2^2 F_2^2 + a_3^2 F_3^2 = C_2 \pm \varepsilon$ , где  $F_z$  — затраты связанные с обработкой  $Z$  альтернативного управления  $U_z$ ,  $C_2$  — требуемая точность обработки деталей.

Допустим, в ОС сложилась проблемная ситуация, характеризующаяся очень низкой выработкой на технологической линии из-за частых простоев, связанных с поломкой сильно изношенного технологического оборудования. Тогда, согласно данной проблемной ситуации, формируется множество альтернативных УВ, включающее в себя:  $U_1$  — провести ремонт вышедшего из строя технологического оборудования с общими затратами в течение отчетного периода, равными  $m_1^* W_1$ , где  $m_1^*$ ,  $W_1$  — соответственно среднее число выходов из строя технологической линии в течение отчетного периода и средняя стоимость одного ремонта;  $U_2$  — выполнить капитальный ремонт наиболее часто выходящего из строя оборудования технологической линии, требующий затрат  $W_2$ ;  $U_3$  — провести замену часто выходящего из строя технологического оборудования, приводящую к затратам  $W_3$ .

Наиболее эффективное УВ в полученном множестве альтернатив в сложившейся проблемной ситуации на ТП определяется по максимуму принятого критерия выбора. Для этого в данный критерий подставляются значения параметров состояния, которые можно получить в результате обработки различных управлений и стоимость их реализации. Например, обработка управления  $U_1$  позволяет обеспечить минимум параметра состояния ТП  $F_1$ , а обработка управления  $U_3$  — максимум этого параметра.

Таким образом, приведенный пример показывает работоспособность предложенных инструментальных средств, позволяющих определять на альтернативной основе наиболее эффективные УВ в различных проблемных ситуациях ОС в условиях неопределенности.

Отметим, что предложенные инструментальные средства без принципиальных изменений позволяют эффективным образом организовать принятие управленческих решений и выбор на альтернативной основе УВ в процессе управления различными сложными объектами. Например, для планирования целенаправленного поведения интеллектуального робота, когда на альтернативной основе возникает необходимость выбора наиболее эффективного действия с целью перевода определенного объекта ОС в требуемое состояние. Другими словами, когда возникает необходимость вы-

бора на альтернативной основе действия, обеспечивающего максимальный уровень достижения поставленной цели [21].

В качестве другого примера можно рассмотреть управление финансовой устойчивостью машиностроительных предприятий, требуемый уровень которой, как правило, достигается путем проведения организационно-технических и организационно-экономических мероприятий, обеспечивающих максимизацию, например, коэффициентов финансовой безопасности и прочности, играющих роль показателей эффективности [22], и др.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Перечислим основные выводы.

Предложен один из подходов к решению задачи выбора на альтернативной основе управляющих воздействий на процесс реализации технологического процесса в условиях недоброкачественной неопределенности. В качестве основного критерия выбора рассмотрено влияние управляющих воздействий на эффективность получаемого в результате их обработки состояния сложного технологического процесса. Данный критерий строится путем обработки экспертных данных на основе лингвистических функций, позволяющих сформировать многофакторную эмпирическую модель эффективности различных состояний технологического процесса с четко заданными коэффициентами и таким образом обеспечивающих требуемую точность и однозначность решения задачи выбора в различных проблемных ситуациях, возникающих на технологической линии в результате возмущений нестабильной окружающей среды.

Разработанные инструментальные средства управления текущим состоянием технологического процесса по отклонению и возмущению позволяют обеспечить эффективную реализацию сложных технологических процессов механической обработки деталей в машиностроении в нестабильных условиях окружающей среды при недоброкачественной неопределенности протекающих в ней случайных процессов.

Предложенные инструментальные средства, обеспечивающие эффективное управление технологическим процессом в нестабильных условиях функционирования, изложены в общем виде и достаточно действенны в различных предметных областях, что позволяет организовать эффективное управление поведением различных сложных объектов управления в нестабильных условиях недоброкачественной неопределенности.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев Г.А., Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д. Статистические методы управления технологическими процессами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2016. — № 12. — С. 58–63. [Timofeev, G.A., Barbashov, N.N., Terentyeva, A.D. Statistical Methods of Control of Technological Processes // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. — 2016. — No. 12. — P. 58–63. (In Russian)]
2. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Интеллектуальная система автоматического проектирования технологических маршрутов обработки деталей в машиностроении. // Автоматизация в промышленности. — 2018. — № 9. — С. 13–20. [Melekhin, V.B., Khachumov, V.M. Intellectuálnaya sistema avtomaticheskogo proektirovaniya tekhnologicheskikh marshrutov obrabotki detalei v mashinostroenii. // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. — 2018. — No. 9. — S. 13–20. (In Russian)]
3. Bogle, I.D.L., Zilinskas, J. Methods in Optimal Design and Operations. — World Scientific Pub Co Inc., 2006. — 236 p.
4. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 288 с. [Pospelov, D.A. Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika. — M.: Nauka, 1986. — 288 s. (In Russian)]
5. Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А., Соколов В.В. Теория выбора и принятия решений. — М.: Наука, 1982. — 328 с. [Makarov, I.M., Vinogradskaya, T.M., Rubchinskii, A.A., Sokolov, V.V. Teoriya vybora i prinyatiya reshenii. — M.: Nauka, 1982. — 328 s. (In Russian)]
6. Трофимов В.В., Трофимова А.А. Методы принятия управленческих решений. — М.: Юрайт, 2013. — 336 с. [Trofimov, V.V., Trofimova, A.A. Metody prinyatiya upravlencheskikh reshenii. — M.: Yurait, 2013. — 336 s. (In Russian)]
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. — М.: Наука, 1980. — 208 с. [Ventsel', E.S. Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya. — M.: Nauka, 1980. — 208 s. (In Russian)]
8. Ицкович Э.Л. Методы комплексной автоматизации производства предприятий технологических отраслей. — М.: КРАСАНД, 2013. — 232 с. [Itskovich, E.L. Metody kompleksnoi avtomatizatsii proizvodstva predpriyatii tekhnologicheskikh otraslei. — M.: KRASAND, 2013. — 232 s. (In Russian)]
9. Фельдштейн Е.Э., Корневич М.А. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. — Вологда: Инфра — Инженерия, 2016. — 246 с. [Fel'dshstein, E.E., Kornevich, M.A. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. — Vologda: Infra — Inzheneriya, 2016. — 246 s. (In Russian)]
10. Бахтадзе Н.Н., Лотоцкий В.А. Современные методы управления производственными процессами // Проблемы управления. — 2009. — № 3.1. — С. 56–63. [Bahtadze, N.N., Lototsky, V.A. Contemporary methods of production process control // Control Sciences. — 2009. — No. 3.1. — P. 56–63. (In Russian)]
11. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 168 с. [Zade, L. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie dlya prinyatiya priblizhennykh reshenii. — M.: Mir, 1976. — 168 s. (In Russian)]
12. Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. — М.: Радио и связь, 1989. — 304 с. [Borisov, A.N. Obrabotka nechetkoi informatsii v sistemakh prinyatiya reshenii. — M.: Radio i svyaz', 1989. — 304 s. (In Russian)]
13. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. 2-е изд. — М.: БИНОМ, 2013. — 798 с. [Piegat, A. Fuzzy Modeling and Control. — Heidelberg: Physica-Verlag, 2003. — 728 p.]
14. Darwish, A., Poleshchuk, O., Komarov, E. A New Fuzzy Linear Regression Model for a Special Case of Interval Type — 2 Fuzzy Sets Applied // Mathematics and Information Sciences. — 2016. — Vol. 10, iss. 3. — P. 1209–1214.
15. Технология технического контроля в машиностроении: справочное пособие / под общ. ред. В.Н. Чупырина. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 400 с. [Tekhnologiya tekhnicheskogo kontrolya v mashinostroenii: spravochnoe posobie / pod obshch. red. V.N. Chupyrina. — M.: Izd-vo standartov, 1990. — 400 s. (In Russian)]
16. Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского гос. техн. ун-та. Технические науки. — 2017. — Т. 44, № 1. — С. 48–60. [Abduragimov, T.T., Melekhin, V.B., Hachumov, V.M. Information-analytical model for a fuzzy proportionalintegral-derivative controller // Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. — 2017. — Vol. 44, — no. 1. — P. 48–60. (In Russian)]
17. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Многоуровневая ситуационная модель управления технологическими процессами обработки деталей в машиностроении // Проблемы управления. — 2019. — № 1. — С. 73–82. [Melekhin, V.B., Khachumov, V.M. Multi-level model of situational management of technological processes of machining // Control Sciences. — 2019. — No. 1. — P. 73–82. (In Russian)]
18. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Динамическая модель представления знаний в интеллектуальных системах контроля сложных технологических процессов // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2017. — № 2. — С. 31–43. [Melekhin, V.B., Khachumov, V.M. Dynamic model of knowledge representation in intelligent control systems of complex technological processes // Artificial Intelligence and Decision Making. — 2017. — No. 2. — P. 31–43. (In Russian)]
19. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. — М.: Книга по требованию, 2012. — 145 с. [Louli, D., Maksvell, A. Faktornyi analiz kak statisticheskii metod. — M.: Kniga po trebovaniyu, 2012. — 145 s. (In Russian)]
20. Овсянников Г.Н. Факторный анализ в доступном изложении. Изучение многопараметрических систем и процессов. — М.: Librokom, 2013. — 176 с. [Ovsyannikov, G.N. Faktornyi analiz v dostupnom izlozhenii. Izuchenie mnogoparametricheskikh sistem i protsessov. — M.: Librokom, 2013. — 176 s. (In Russian)]
21. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 240 с. [Bershtein, L.S., Melekhin, V.B. Planirovanie povedeniya intellektual'nogo robota. — M.: Energoatomizdat, 1994. — 240 s. (In Russian)]
22. Игнатов А.В. Анализ финансового состояния предприятия // Финансовый менеджмент. — 2015. — № 4. — С. 3–20. [Ignatov, A.V. Analiz finansovogo sostoyaniya predpriyatiya // Finansovyi menedzhment. — 2015. — No. 4. — S. 3–20. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Поступила в редакцию 14.01.2019, после доработки 12.08.2019.  
Принята к публикации 30.09.2019.

**Мелехин Владимир Борисович** — д-р техн. наук, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет народного хозяйства, г. Махачкала, ✉ pashka1602@rambler.ru,

**Хачумов Вячеслав Михайлович** — д-р техн. наук, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва; Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский, ✉ vmh48@mail.ru.

# CONTROL OF EFFECTIVE IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MECHANICAL PROCESSING OF PARTS IN MECHANICAL ENGINEERING

V.B. Melekhin<sup>1,2,#</sup>, V.M. Khachumov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia

<sup>2</sup> Daghestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

<sup>3</sup> Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

<sup>4</sup> Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Pereslavl-Zalessky, Russia

#✉ pashka1602@rambler.ru

**Abstract.** The main problems concerning effective implementation of technological processes in mechanical engineering under uncertainty are considered and solved. An integral criterion for efficiency estimation of the present state of technological processes is proposed, which allows reducing the solution of the multiobjective problem of choosing effective control actions to a single-objective optimization problem with both maximized and minimized efficiency indicators available. A method based on the use of fuzzy logic for processing expert data is presented, which makes it possible to form a multivariate analytical dependency between the efficiency indicators of the implemented technological process and the state parameters in the form of a linguistic function graph that ensures its required flow under changing operating conditions. A selection method is developed on an alternative basis of the most effective control actions in case of problem situations during the implementation of a complex technological process as a result of the influence of various disturbing environmental factors. In the selection method proposed, decision-making is based on a composition of correspondences that make it possible to relate disturbing factors of an unstable environment with control actions that ensure the efficient flow of a complex technological process. In general, control tools for deviation and disturbance compensation were obtained, which ensure the effective implementation of complex technological processes of machining parts in mechanical engineering in unstable environmental conditions.

**Keywords:** technological process, efficiency indicators, disturbing factors, control parameters, effective control.

**Funding.** The work is performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (grant No. 16-29-12839 of<sub>i</sub>\_m).



## XV КОНФЕРЕНЦИЯ ПЯТНИЦКОГО — 2020

*Глубокоуважаемые коллеги!*

**Приглашаем Вас принять участие в XV международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» («Конференция Пятницкого»), 3—5 июня 2020 г.**

Конференцию организует и проводит Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) при информационной поддержке IEEE (Russia section).

*Основные научные направления Конференции:*

- Общие вопросы теории устойчивости и стабилизации движения
- Общие вопросы и методы теории нелинейных колебаний
- Методы функций Ляпунова
- Гладкая и негладкая динамика
- Вопросы управляемости и наблюдаемости
- Проблемы робастного управления
- Управление в механических и электромеханических системах
- Управление роботами и мехатронными системами
- Колебания, устойчивость и стабилизация в сетевых и взаимосвязанных системах
- Устойчивость и управление гибридными системами и системами с переключениями

Подробная информация о конференции размещена на странице <https://stab20.ipu.ru/ru>