

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ¹

В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов

Предложен принцип организации многоуровневой ситуационной модели управления сложными технологическими процессами в недоопределенных условиях окружающей среды. Разработаны инструментальные средства представления и обработки технологических знаний, полученных экспертным путем, и накопленного опыта управления, базирующиеся на применении аппарата нечетких множеств, позволяющего обобщить представление эталонных ситуаций и на этой основе снизить число применяемых в ситуационной модели управления решающих правил. Определены основные условия, обеспечивающие возможность оперативного сравнения эталонных и проблемных ситуаций и выбора на этой основе результативных управлений.

Ключевые слова: технологический процесс, технологическое оборудование, многоуровневая модель, ситуационное управление, эталонная ситуация, проблемная ситуация, лингвистические переменные и функции.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных и сложных проблем управления производственной деятельностью в нестабильной окружающей среде (ОС) заключается в эффективном управлении как отдельными технологическими цепочками (ТЦ), так и организованным на их основе сложным технологическим процессом (ТП) производства, например, машиностроительной продукции, который, как правило, характеризуется большим числом технико-экономических показателей $Q = \{q_i\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$, определяющих его текущее состояние или технологический режим функционирования.

Отметим, что в настоящее время большое внимание уделяется в основном решению проблем нижнего уровня управления ТП в нестабильной ОС. Например, в работах [1—4] предложены методы эффективного управления технологическим оборудованием и указаны перспективы их развития на основе построения аналитической модели процессов его функционирования. В работах [5, 6] рассмотрены принципы интеллектуализации уп-

равления технологическим оборудованием для случаев, когда невозможно построить аналитические модели функционирования ТП. В этой связи особое значение приобретает подготовка высококвалифицированных технологов-операторов по управлению ТП в различных отраслях промышленного производства. В настоящее время ввиду высокой сложности объекта для управления ТП применяются автоматизированные системы, ведущую роль в которых играет высококвалифицированный оператор-технолог, на которого ложится основная нагрузка, связанная с принятием управленческих решений. Следовательно, к одной из основных проблем, ограничивающих сегодня широкое внедрение и эксплуатацию АСУТП на отечественных производственных предприятиях, следует отнести высокие требования к квалификации специалистов, способных распознать и проанализировать возникающие на объекте управления проблемные ситуации и на этой основе принять эффективные управленческие решения [7—9]. К одной из попыток обойти указанную проблему можно отнести применение в АСУТП экспертных советующих систем, позволяющих выдать технологу-оператору рекомендации, связанные с принятием решений в различных нестандартных проблемных ситуациях, возникающих на объекте управления [10, 11]. Однако и в этом случае прерогатива выбора оконча-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-29-12839 офи_м.

тельного наиболее эффективного решения остается за высококвалифицированным оператором-технологом.

В настоящей работе предлагается один из подходов, позволяющий обойти отмеченную выше проблему на основе реализации функций диспетчерского управления интеллектуальной автоматической системой принятия решений.

В общем случае сложный ТП представляет собой кортеж $\langle \text{ТЦ}_1, \text{ТЦ}_2, \dots, \text{ТЦ}_j, \dots, \text{ТЦ}_m \rangle$, состоящий из m технологических цепочек ТЦ_j , каждая из которых определяется упорядоченной последовательностью выполняемых в ней технологических операций $O_j = \{o_{i_2}^j\}$, $i_2 = \overline{1, n_2^j}$ связанных с реализацией определенного этапа изготовления заданных изделий. Каждая i_2 -я технологическая операция ТЦ_j реализуется на соответствующем ей технологическом оборудовании ($\text{ТО}_{i_2}^j$), например, токарном станке с ЧПУ, работающем по заданной программе функционирования ($\text{ПФ}_{i_2}^j$), определяющей, например, длину и число проходов режущего инструмента, а также толщину съема металла за один проход.

В общем виде технологические цепочки ТЦ_j , входящие в структуру сложного технологического процесса, можно представить в формате: $\text{ТЦ}_j = \langle \text{Вх}_j \rangle \langle P_j \rangle \langle \text{Вых}_j \rangle$, где $\langle \text{Вх}_j \rangle$ — вход ТЦ_j , который определяется, например, числом различного вида покупных изделий и заготовок, необходимых для производства, запланированного на выходе $\langle \text{Вых}_j \rangle$ объема производимой продукции требуемого качества; P_j — тело ТЦ_j , которое задается следующей четверкой $P_j = (\text{ТМ}_j, \text{ТО}_{i_2}^j, \text{ПФ}_{i_2}^j, Q_j)$, где ТМ_j — технологический маршрут или упорядоченное множество технологических операций, из которых складывается ТЦ_j ; Q_j — множество параметров состояния ТЦ_j .

Таким образом, для сбалансированного функционирования сложного ТП необходимо чтобы выполнялись следующие основные условия:

— показатели, определяющие состояние каждого выхода $\langle \text{Вых}_j \rangle$, $j = \overline{1, m_j - 1}$ предыдущей ТЦ_j , должны биективно соответствовать показателям состояния каждого входа $\langle \text{Вх}_j \rangle$, $j = \overline{2, m_j}$ следующей ТЦ_{j+1} ;

— сроки преобразования входа $\langle \text{Вх}_j \rangle$ в выход $\langle \text{Вых}_j \rangle$, т. е. сроки реализации отдельных ТЦ_j , входящих в структуру ТП, должны быть скоординированными между собой. Это достигается путем

подбора производительности и количества единиц технологического оборудования для каждой входящей в структуру ТП технологической операции.

Следовательно, задача организации ТП сводится к сбалансированию входящих в него технологических цепочек, а задача управления определяется регулированием процесса преобразования входа $\langle \text{Вх}_1 \rangle \text{ТЦ}_1$ в выход $\langle \text{Вых}_m \rangle \text{ТЦ}_m$ при случайно действующих в ОС возмущающих факторах $d_{i_3} \in D$,

$i_3 = \overline{1, n_3}$, например, выход из строя технологического оборудования, различной степени износ режущего инструмента, нарушение технологических режимов и возникновение брака, несвоевременная поставка заготовок и т. д. Данную задачу целесообразно разбить на следующие подзадачи.

1. Управление технологическими режимами выполнения отдельных операций $o_{i_2}^j \in O_j$ в каждой j -й технологической цепочке, входящей в структуру ТП при заданных целях, определяемых множеством требуемых значений показателей их состояния, исходя из установленных программ функционирования $\text{ПФ}_{i_2}^j$ соответствующего им технологического оборудования $\text{ТО}_{i_2}^j$.

2. Управление отдельными технологическими цепочками ТЦ_j , входящими в структуру ТП, при случайно действующих в ОС возмущающих факторах $d_{i_3} \in D$ с учетом заданных значений параметров их состояния Q_j .

3. Управление процессом программирования оборудования и реализации ТП в целом.

Учитывая большую размерность сформулированной задачи и связанные с этим проблемы [12], в работе для ее решения предлагается использовать многоуровневую модель ситуационного управления с нечеткой логикой представления и обработки знаний, полученных экспертным путем [13, 14]. При этом оценка текущего состояния ТП осуществляется на основе данных, поступающих от интеллектуальной системы контроля режимов его функционирования [15].

Первый уровень (нижний) данной модели предназначен для контроля и управления состоянием каждой отдельной технологической операции $o_{i_2}^j \in O_j$, входящей в структуру ТЦ_j . Задача ситуационного управления в этом случае сводится либо к автоматической смене технологических режимов работы, например, станков с ЧПУ, когда на вход ТЦ_j поступают заготовки для механической обработки, имеющие отклонения в размерах от заготовок предыдущей партии, либо к выбору метода управления, обеспечивающего требуемую точность



обработки заготовок, когда, например, произошел неполный износ режущего инструмента и др.

Второй уровень служит для контроля и управления либо процессом сбалансирования технологических режимов функционирования отдельных ТЦ_р, образующих ТП когда, например, выходит из строя технологическое оборудование, либо, когда возникает необходимость в смене параметров реализации для нескольких входящих в них взаимосвязанных между собой технологических операций.

Третий уровень предназначен для автоматического перепрограммирования оборудования, контроля и управления состоянием ТП в целом. Например, когда нарушены технологические режимы функционирования нескольких ТЦ_р, требующих одновременного устранения отклонений показателей их состояния от заданных значений в реальном времени при взаимном влиянии технологических цепочек друг на друга.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Сформулируем основные проблемы, которые необходимо решить в процессе построения многоуровневой модели ситуационного управления сложным ТП. В общем случае в основе организации ситуационной модели управления лежит гипотеза о том, что на основе полученных экспертным путем технологических данных, а также накопленного передового опыта управления можно сформировать множество полных ситуаций $S^* = \{s_{i_4}^*\}$, $i_4 = \overline{1, n_4}$ и поставить в соответствие каждой из них эффективное управление $u_{i_5} \in U$, $U = \{u_{i_5}\}$, $i_5 = \overline{1, n_5}$ [16], позволяющее обеспечить требуемое текущее состояние ТП. При этом каждая полная ситуация включает в себя описание текущего состояния ТП ситуационной системы управления и ОС.

Под эффективным управлением $u_{i_5} \in U$, как правило, следует понимать такое управление, которое позволяет выполнить необходимые для достижения требуемых режимов функционирования ТП преобразования проблемных текущих ситуаций $S = \{s_{i_6}\}$, $i_6 = \overline{1, n_6}$ на объекте управления (ОУ). Например, при непредвиденном изменении требуемого режима функционирования технологического оборудования. В общем случае каждая такая текущая проблемная ситуация $s_{i_6} \in S$ формальным образом представляется в виде мультиграфа $G_{i_6} = (V_{i_6}, E_{i_6})$, часть вершин которого V_{i_6}

помечается отклонениями фактических значений параметров состояния ОУ $q_{i_1} \in Q$ от заданных их значений $q_{i_1}^* \in Q$, а другая часть вершин определяется влияющими на них возмущающими факторами $d_{i_3} \in D$ ОС. В свою очередь множество ребер E_{i_6} графа G_{i_6} также разбивается на два подмножества. Элементы одного из них помечаются отношениями между смежными вершинами, которые определяют характер взаимного влияния отклонений одного параметра состояния на другой. Элементы другого подмножества представляют собой отношения, которые характеризуют влияние возмущающих факторов ОС на отклонения параметров состояния отдельного технологического оборудования, ТЦ_р и ТП в целом.

Отметим, что в качестве ОУ в соответствии с уровнем иерархии принятия решений в ситуационной модели управления рассматриваются: отдельные единицы технологического оборудования и реализуемые на нем технологические операции, различные ТЦ_р, входящие в структуру ТП и непосредственно сам технологический процесс в целом.

Целенаправленное преобразование текущих проблемных ситуаций на ОУ осуществляется путем отработки управлений $u_{i_5} \in U$, позволяющих получить такое его состояние, в котором все контролируемые параметры принимают необходимые на текущий момент времени значения согласно реализуемой программе обработки деталей. Это обеспечивается на основе управления процессом реализации ТП, направленного на компенсацию влияния всех действующих в ОС возмущающих факторов $d_{i_3} \in D$. Другими словами, ситуационное управление должно обеспечивать работу всех единиц технологического оборудования ТП в заданных на текущий момент времени режимах функционирования с целью реализации технологических операций, связанных с преобразованием входа $\langle Vx_1 \rangle$ первой ТЦ₁ в выход $\langle Vых_m \rangle$ последней ТЦ_m, входящей в структуру ТП.

Практика показывает, что, как правило, мощность множества заданных управлений U меньше мощности множества полных ситуаций S^* [16]. В этой связи множество S^* для построения модели ситуационного управления разбивается на классы аналогичных друг другу ситуаций $S_K = \{s_{j_2}^K\}$, $j_2 = \overline{1, m_2}$, такие, что все возникающие в ТП текущие ситуации можно отнести к одному из полученных таким образом классов полных ситуаций. При этом для каждого класса $S_K \subset S$ разбиения множества ситуаций на объекте управления опре-

деляется такое управление $u_{i_5} \in U$, которое позволяет во всех текущих ситуациях, относящихся к этому классу S_K , провести их эффективное преобразование в смысле достижения требуемого на текущий момент времени состояния ТП.

Отметим, что вместо описанного выше классического разбиения полных ситуаций S^* на классы SK целесообразно обобщить технологические знания, используемые в многоуровневой модели ситуационного управления для принятия решений и выбора результативных управлений. Это позволит сократить объем информации, хранящейся в базе знаний ситуационной системы управления, и благодаря этому повысить оперативность принимаемых решений. С этой целью для каждого класса разбиения $S_K \in S$ полных ситуаций формируется обобщенное описание входящих в него проблемных ситуаций в виде эталонной ситуации $S_K \in S_{\mathcal{E}}$, где $S_{\mathcal{E}}$ — множество эталонных ситуаций.

При этом множество эталонных ситуаций $S_{\mathcal{E}}$ в многоуровневой модели ситуационного управления будет состоять из подмножеств $S_{\mathcal{E}} = S_{\mathcal{E}}(o_{i_2}^j) \cup S_{\mathcal{E}}(\text{ТЦ}_j) \cup S_{\mathcal{E}}(\text{ТП})$, где $S_{\mathcal{E}}(o_{i_2}^j)$ — подмножество эталонных ситуаций, используемых для выбора управлений на уровне реализации отдельных технологических операций ТП; $S_{\mathcal{E}}(\text{ТЦ}_j)$ — подмножество эталонных ситуаций, позволяющих организовать выбор управлений на уровне управления j -ми технологическими цепочками, входящими в структуру ТП; $S_{\mathcal{E}}(\text{ТП})$ — подмножество эталонных ситуаций, используемых для выбора управлений на уровне регулирования текущего состояния ТП в целом.

Для обобщенного описания и сравнения между собой эталонных и текущих проблемных ситуаций на ОУ в процессе выбора управлений для представления входящих в них параметров и отношений целесообразно воспользоваться терминами соответствующих им лингвистических переменных (ЛП) [17]. В этом случае каждая нечетко заданная эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ должна представлять собой обобщенное описание множества нечетко представленных, аналогичных друг другу, проблемных ситуаций $s_{i_6} \in S$ на ОУ. Другими словами, каждая эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ должна быть сформирована таким образом, чтобы относящиеся к ней управление $u_{i_5} \in U$ было результативным во всех проблемных ситуациях $s_{i_6} \in S$ на ОУ, для которых она является обобщением.

Таким образом, основная проблема разработки эффективной модели ситуационного управления сводится к получению, обработке и структуризации

полученных экспертным путем технологических знаний, а также накопленного передового опыта управления ТП с целью формирования для каждого его уровня множества логико-трансформационных правил вывода, имеющих следующий формат описания.

1. Для уровня управления отдельными технологическими операциями $o_{i_2}^j \in O$ и реализующим эти операции технологическим оборудованием $\text{ТО}_{i_2}^j$ строятся логико-трансформационные правила вывода:

$$s_K(o_{i_2}^j) \in S_{\mathcal{E}}(o_{i_2}^j): s_{i_6}(o_{i_2}^j) \oplus u_{i_5}(o_{i_2}^j) \rightarrow s_{i_6}^*(o_{i_2}^j).$$

Эта запись означает, что если в процессе выполнения операции $o_{i_2}^j$ сложилась текущая проблемная ситуация $s_{i_6}(o_{i_2}^j)$, для которой обобщением является эталонная ситуация $s_K(o_{i_2}^j)$, предусматривающая отработку (обозначена знаком \oplus) управления $u_{i_5}(o_{i_2}^j)$, то реализация этого управления на ОУ приводит к преобразованию ситуации $s_{i_6}(o_{i_2}^j)$ в текущую ситуацию $s_{i_6}^*(o_{i_2}^j)$, которая определяет требуемый режим функционирования технологического оборудования, реализующего данную операцию.

2. На уровне управления отдельными технологическими цепочками ТЦ_j , входящими в структуру ТП, применяются следующие логико-трансформационные правила вывода:

$$s_K(\text{ТЦ}_j) \in S_{\mathcal{E}}(\text{ТЦ}_j): s_{i_6}(\text{ТЦ}_j) \oplus u_{i_5}(\text{ТЦ}_j) \rightarrow s_{i_6}^*(\text{ТЦ}_j).$$

Такого вида правила показывают, что если в процессе реализации технологической цепочки ТЦ_j возникла текущая проблемная ситуация $s_{i_6}(\text{ТЦ}_j)$, а эталонная ситуация $s_K(\text{ТЦ}_j)$ является ее обобщением, предусматривающим необходимость отработки управления $u_{i_5}(\text{ТЦ}_j)$, то реализация этого управления на ОУ приводит к преобразованию ситуации $s_{i_6}(\text{ТЦ}_j)$ в ситуацию $s_{i_6}^*(\text{ТЦ}_j)$, которая определяет требуемое на данный момент времени состояние технологической цепочки.

3. На уровне управления процессом реализации ТП в целом формируются логико-трансформационные правила выбора управлений вида:

$$s_K(\text{ТП}) \in S_{\mathcal{E}}(\text{ТП}): s_{i_6}(\text{ТП}) \oplus u_{i_5}(\text{ТП}) \rightarrow s_{i_6}^*(\text{ТП}).$$

Эта запись означает, что если в процессе реализации ТП возникает проблемная ситуация $s_{i_6}(\text{ТП})$,



а эталонная ситуация s_k (ТП) является ее обобщением и допускает обработку управления u_{i_5} (ТП), то реализация данного управления на ОУ приводит к преобразованию ситуации s_{i_6} (ТП) в требуемую на данный момент времени текущую ситуацию $s_{i_6}^*$ (ТП).

Следовательно, согласно назначению различных уровней ситуационного управления ТП каждая проблемная ситуация на первом его уровне определяется отклонениями фактического режима от заданного режима функционирования отдельного технологического оборудования и связанными с ними отклонениями параметров реализуемых технологических операций. Проблемные ситуации второго уровня ситуационного управления ТП включают в себя отклонения от заданных режимов функционирования нескольких единиц технологического оборудования, относящихся к одной и той же ТЦ, при их взаимном влиянии друг на друга. И, наконец, проблемные ситуации третьего уровня ситуационного управления определяются одновременно возникающими в нескольких ТЦ нарушениями режимов функционирования или необходимостью переналадки технологического оборудования.

Отметим, что на основе приведенных выше логико-трансформационных правил вывода фактически реализуется пропорциональный закон регулирования параметров состояния $q_{i_1} \in Q$ технологического оборудования ТП. В случае же, когда требуется более высокая точность регулирования отдельных параметров состояния ТП, т. е. необходимо устранить остающееся недопустимое отклонение $\Delta q_{i_1}^*$ после реализации на основе ситуационного управления пропорционального закона регулирования, управление $u_{i_5}^* \in U$ доопределяется, например, на основе функциональной зависимости:

$$u_{i_5}^* = f_{i_7}(\Delta q_{i_1}^*, d_{i_3}), \quad (1)$$

где $\Delta q_{i_1}^*$ — отклонение текущего значения параметра состояния ТП $q_{i_1} \in Q$ от требуемого значения, $d_{i_3} \in D$ — действующий на параметр $q_{i_1} \in Q$ состояния возмущающий фактор ОС.

Аналитическую форму функциональной зависимости (1) можно получить в виде эмпирической модели $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$ на основе построения соответствующей ей лингвистической функции (ЛФ) [18], где a_1, a_2 — коэффициенты, определяемые методом регрессионного анализа [19] на основе обработки знаний, полученных экспертным путем.

2. ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЗНАНИЙ В МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Как уже отмечалось, к одному из эффективных способов получения обобщенного описания различных эталонных ситуаций в многоуровневой модели ситуационного управления ТП следует отнести применение математического аппарата нечетких множеств. Основу прикладного применения аппарата нечетких множеств составляют ЛП и ЛФ, позволяющие формализовать и обобщить знания экспертов (высококвалифицированных технологов и обслуживающего ТП технического персонала) на основе языка их представления, близкого к естественному языку, с целью организации автоматического принятия решений в процессе реализации функций диспетчерского управления.

Применение ЛП для представления и обобщения знаний позволяет представить различные отклонения параметров состояния в проблемных ситуациях на различных уровнях ситуационного управления в виде пар: $\langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$, где T_{j_3} — терм ЛП с названием «Отклонение параметра q_{i_1} », в интервал численных значений которого попадает отклонение Δq_{i_1} параметра $q_{i_1} \in Q$ в текущем состоянии ТП; $\mu(\Delta q_{i_1})$ — степень принадлежности отклонения Δq_{i_1} к нечеткому множеству, определяющему терм ЛП T_{j_3} .

После оценки наблюдаемого на ОУ отклонения Δq_{i_1} показателя состояния $q_{i_1} \in Q$ с целью его представления в виде пары $\langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$, вначале определяется соответствующий ему терм T_{j_3} на основе следующего правила, позволяющего установить подинтервал численного значения базовой шкалы ЛП, в который оно попадает:

$$\Delta q_{i_1} \rightarrow \begin{cases} T_1, & \text{если } 0 \leq \Delta q_{i_1} < x_1^*, \\ \dots & \\ T_{j_3}, & \text{если } x_{j_3-1}^* \leq \Delta q_{i_1} < x_{j_3}^*, \\ \dots & \\ T_5, & \text{если } x_4^* \leq \Delta q_{i_1} \leq x_5^*, \end{cases}$$

где $x_{j_3-1}^*$ и $x_{j_3}^*$ — соответственно нижняя и верхняя граница числовых значений термина T_{j_3} .

Затем вычисляется степень принадлежности $\mu(\Delta q_{i_1})$ количественного значения или базовой пе-

ременной отклонения Δq_{i_1} интервалу $[x_{j_3-1}^*, x_{j_3}^*]$ численных значений терма T_{j_3} [20]: $\mu(\Delta q_{i_1}) = 1 - \Delta q_{i_1} / x_{j_3}^*$.

Пусть отклонения параметра состояния ТП $q_{i_1} \in Q$ в эталонной и проблемной ситуациях соответственно определяются парами $\Delta q_{i_1} = \langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$ и $\Delta q_{i_1}^* = \langle T_{j_3}^*, \mu(\Delta q_{i_1}^*) \rangle$. Тогда степень $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*)$ их нечеткого равенства между собой можно оценить согласно правилу:

$\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 1$, если выполняется условие

$$(|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)| \leq \mu_0) \otimes (T_{j_3} = T_{j_3}^*);$$

иначе $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = \mu(\Delta q_{i_1}) \leftrightarrow \mu(\Delta q_{i_1}^*)$,

если выполняется условие

$$(|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)| > \mu_0) \otimes (T_{j_3} = T_{j_3}^*);$$

иначе $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 0$,

если выполняется условие $T_{j_3} \neq T_{j_3}^*$,

где $|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)|$ — абсолютная величина разности; \leftrightarrow — операция нечеткой эквивалентности [11]: $\min(\max(\mu(\Delta q_{i_1}), 1 - \mu(\Delta q_{i_1}^*)), \max(\mu(\Delta q_{i_1}^*), 1 - \mu(\Delta q_{i_1})))$; μ_0 — допустимая погрешность сравнения; \otimes — операция, означающая необходимость одновременного выполнения правой и левой части проверяемого условия.

Приведенное выше правило сравнения позволяет установить, что сравниваемые на его основе отклонения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ равны между собой, т. е. $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 1$, когда оба отклонения попадают в заданную окрестность μ_0 одной и той же точки на базовой шкале значений, соответствующей им ЛП. Отклонения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ нечетко равны между собой при условии, что $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) > h$, т. е. степень их нечеткого равенства принимает значение больше заданного порога h , и они попадают в интервал численных значений одного и того же терма. Как правило, для выполнения условия нечеткого равенства сравниваемых величин порог сравнения h согласно требованиям операции нечеткой эквивалентности принимается равным не менее 0,5 [11]. Наконец, сравниваемые значения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ отклонения не равны между собой, когда степень их нечеткого равенства либо принимает значение, равное нулю, т. е. они попадают в интервалы численных значений различных термов, либо $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) \leq h$. Отметим, что чем больше порог h ,

тем выше точность сравнения нечетко заданных параметров состояния ОУ.

Основной недостаток приведенной оценки состоит в том, что получаемые в результате сравнения степени нечеткого равенства одноименных отклонений могут оказаться некорректными или не удовлетворяющими аксиомам метрики [21]. Это проявляется в том случае, когда сравниваемые значения одноименного отклонения попадают по разные стороны от центра тяжести функции принадлежности, что может привести к выполнению условия $(|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)| = 0) \otimes (T_{j_3} = T_{j_3}^*)$ при разнесенных их значениях на базовой шкале.

Обойти указанный недостаток можно, дополнив рассмотренное выше правило сравнения нечетко заданных значений отклонения подправилом, которое применяется в случае, когда сравниваемые значения одноименного отклонения расположены по разные стороны от центра тяжести функции принадлежности нечеткого множества, в интервал численных значений которого они попадают:

$$\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 1 - \frac{|\Delta q_{i_1} - \Delta q_{i_1}^*|}{x_{j_3-1}^* - x_{j_3}^*},$$

если $T_{j_3} = T_{j_3}^*$. (2)

Единица в оценке (2) позволяет обеспечить ей выполнение всех свойств метрики в метрическом пространстве $(\{\Delta q_{i_1}\}, \rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*))$ [21], так как в этом случае снижается оценка степени нечеткого равенства при росте расстояния между сравниваемыми значениями отклонений, равного $|\Delta q_{i_1} - \Delta q_{i_1}^*|$.

Таким образом, оценка (2) применяется в том случае, когда для сравниваемых значений $\Delta q_{i_1} = \langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$ и $\Delta q_{i_1}^* = \langle T_{j_3}^*, \mu(\Delta q_{i_1}^*) \rangle$ одноименного отклонения выполняется одно из условий:

$$((\mu(\Delta q_{i_1}) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1})) < \mu(\Delta q_{i_1})) \otimes ((\mu(\Delta q_{i_1}^*) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1}^*) > \mu(\Delta q_{i_1}^*));$$

$$((\mu(\Delta q_{i_1}) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1})) > \mu(\Delta q_{i_1})) \otimes ((\mu(\Delta q_{i_1}^*) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1}^*)) < \mu(\Delta q_{i_1}^*)),$$

т. е., когда при одном и том же приращении значения функций принадлежности для одного сравниваемого отклонения она растет, а для другого — уменьшается. В этом случае принимается решение, что сравниваемые значения одноименного отклонения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ нечетко равны между собой, если $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) \geq h$.

Отметим, что аналогичным образом вычисляется степень равенства двух нечетко представленных

значений степеней влияния одноименных возмущающих факторов на параметры состояния ОУ и степеней взаимного влияния отклонений параметров состояния ОУ друг на друга.

Пусть графы G_1^* и G_1 соответственно определяющие эталонную и проблемную ситуации на ОУ, являются структурно эквивалентными (нечетко изоморфными с точностью до одноименных пометок вершин и ребер [20]). Тогда для произвольной пары ситуаций $\langle s_K, s_{i_6} \rangle$ можно вычислить степень их нечеткого равенства $\rho(s_K, s_{i_6})$ между собой по самому «узкому» звену сравнения одноименных пометок вершин и ребер (звену, имеющему минимальное значение степени равенства) в биективно соответствующих им графах G_1^* и G_1 таким образом:

$$\rho(s_K, s_{i_6}) = \min_{j=1}^4 \left(\min_{i=1}^{V_1} \rho_j(v_i^{1*}, v_i^1), \min_{i=V_1+1}^{V_2} \rho(v_i^{2*}, v_i^2), \min_{k=1}^{E_1} \rho(e_k^{1*}, e_k^1), \min_{k=E_1+1}^{E_2} \rho(e_k^{2*}, e_k^2) \right), \quad (3)$$

где V_1 — число пар вершин $\langle v_i^{1*}, v_i^1 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 одноименными отклонениями параметров состояния ОУ; V_2 — число пар вершин $\langle v_i^{2*}, v_i^2 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 одноименными возмущающими факторами ОС; E_1 — число пар ребер $\langle e_k^{1*}, e_k^1 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 значениями одноименных степеней влияния различных отклонений друг на друга; E_2 — число пар ребер $\langle e_k^{2*}, e_k^2 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 значениями степеней влияния одноименных возмущений ОС на параметры состояния ОУ.

Для отношения нечеткого равенства между собой двух произвольных ситуаций s_K, s_{i_6} можно доказать

Утверждение 1. *Бинарное отношение нечеткого равенства $\rho(s_K, s_{i_6})$ между собой произвольных ситуаций s_K, s_{i_6} , является отношением эквивалентности. ♦*

Справедливость утверждения 1 вытекает из условия того, что отношение нечеткого равенства $\rho(s_K, s_{i_6})$ обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности.

Таким образом, отношение нечеткого равенства различных ситуаций между собой фактически разбивает на классы множество возникающих на ОУ нечетко равных друг другу ситуаций $s_{i_6} \in S$, для каждого из которых формируется эталонная

ситуация $s_K \in S_\Omega$, являющаяся обобщением всех относящихся к этому классу проблемных ситуаций. Это подтверждает эквивалентность и равные возможности применения в ситуационном управлении эталонных ситуаций для принятия решений с классическим разбиением множества полных ситуаций на ОУ на классы $S_K \subset S$ и выбору на этой основе эффективных управлений.

Как уже отмечалось, для определения управления, позволяющего повысить точность регулирования параметров состояния ТП, требуется на основе ЛФ построить аналитическую зависимость (1). В общем случае каждая используемая для этого ЛФ определяется пятеркой: ЛФ = (Н, ЛП₃, {ЛП_{НЗ}}, М, F), где Н — название ЛФ, например, «Управление $u_{i_5}^* \in U$ параметром состояния $q_{i_1} \in Q$ »; ЛП₃ — зависимая ЛП, которая определяет управление $u_{i_5}^* \in U$; {ЛП_{НЗ}} — множество независимых ЛП, в рассматриваемом случае это размер отклонений $\Delta q_{i_1}^*$ и степень влияния возмущающего фактора d_{i_3} на параметр состояния $q_{i_1} \in Q$; М — матрица ЛФ, которая представляет соответствие между словесными (нечеткими) значениями независимой переменной и различными сочетаниями нечетких значений зависимых переменных; F — график ЛФ или аналитическая зависимость $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$, связывающая между собой количественные значения зависимой и независимых переменных.

Для построения графика ЛФ, который совпадает с уравнением регрессии $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$, связывающим параметры управления $u_{i_5}^* \in U$ с отклонениями регулируемого параметра ТП и степенью влияния действующего на него возмущающего фактора ОС, вначале формируются соответствующие им ЛП. Затем проводится опрос экспертов, по результатам которого для разных сочетаний словесных (нечетких) значений отклонения $\Delta q_{i_1}^*$ и степени влияния возмущения d_{i_3} , определяемых терминами соответствующих им ЛП, в соответствие ставятся нечеткие значения параметров результирующего управления $u_{i_5}^* \in U$ и на этой основе формируется в табличной форме матрица ЛФ (см. таблицу).

В таблице, например, выделенный заливкой столбец означает, что при большом отклонении и высоком влиянии возмущения параметры результирующего управления должны иметь большие значения.

Полученная таким образом матрица ЛФ позволяет по проекциям на базовые шкалы из максимумов функций принадлежности нечетких множеств,

Матрица ЛФ, определяющая соответствие между нечеткими значениями параметров управления и нечеткими значениями отклонения и возмущающего фактора ОС

Размер отклонения Степень влияния возмущения Параметры результативного управления	Очень малый Малая Очень малые	Средний Средняя Малые	Большой Высокая Большие	Большой Очень высокая Большие	Очень большой Очень высокая Очень большие
---	-------------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-------------------------------------	---

определяющих термы зависимой и независимых ЛП (см. таблицу), выявить соответствующие им наиболее вероятные численные значения. Таким образом, матрица ЛФ позволяет построить таблицу соответствия между количественными значениями зависимой переменной и независимых переменных.

Используя полученные таким образом данные в качестве статистики, набранной экспертным путем и обработав ее методом множественного регрессионного анализа [18], можно определить коэффициенты эмпирической модели $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$, которая позволяет по измеренным значениям отклонений и оценкам степени влияния возмущения $d_{i_3} \in D$, аналитическим способом определить параметры результативного управления.

Отметим, что если управление характеризуется несколькими параметрами, то для каждого такого параметра формируется собственная эмпирическая модель (1).

3. ВЫБОР УПРАВЛЕНИЯ ПО НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СИТУАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Как обосновано выше, необходимым условием выбора результативного управления $u_{i_5} \in U$ на различных уровнях ситуационной системы, при возникновении в ТП соответствующей им проблемной ситуации $s_{i_6} (o_{i_2}), s_{i_6} (ТЦ_7), s_{i_6} (ТП) \in S$, является ее нечеткое равенство с эталонной ситуацией $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, по которой данное управление было выбрано. Однако выполнение только данного условия для результативной отработки управления $u_{i_5} \in U$ на ОУ необходимо, но не достаточно. В общем случае для результативной отработки управления $u_{i_5} \in U$ соответствующая ему эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ должна быть обобщением возникшей на ОУ проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$.

Для определения в общем виде необходимых и достаточных условий, при выполнении которых управление $u_{i_5} \in U$, определяемое по эталонной ситуации $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, является результативным в произвольной проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$ на ОУ, докажем

Утверждение 2. *Эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ является обобщением произвольной проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$ на ОУ тогда и только тогда, когда выполняются условия: 1) ситуации s_K и s_{i_6} являются нечетко равными между собой; 2) для всех количественных значений одноименных пометок вершин и ребер в ситуациях s_K и s_{i_6} выполняется одно из соответствующих их содержанию условий: $\Delta q_{i_1}^* \geq \Delta q_{i_1}$; $d_{i_3}^* \leq d_{i_3}$; $e_{i_8}^* \geq e_{i_8}$, $i_8 = \overline{1, m_8}$, где $\Delta q_{i_1}^*, \Delta q_{i_1}$ — значения одноименных отклонений, которыми помечены вершины в графах G^* и G , соответственно определяющих эталонную и проблемную ситуации; $d_{i_3}^*, d_{i_3}$ — значения базовой переменной одноименных возмущений, которыми помечены вершины в соответственно графах G^* и G ; $e_{i_8}^*, e_{i_8}$ — значения одноименных пометок ребер соответственно в графах G^* и G ; m_8 — число ребер в графах G^* и G . ♦*

Справедливость утверждения 2 вытекает из того, что при выполнении приведенных в нем условий п. 1 и 2, если управление $u_{i_5} \in U$ результативно в эталонной ситуации, то оно также будет результативно и в проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$, так как эти ситуации нечетко равны между собой, а ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ является нечетким обобщением ситуации $s_{i_6} \in S$.

Утверждение 3. *Пусть эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ является обобщением проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$, наблюдаемой на ОУ в текущий момент времени t . Тогда отработка управления $u_{i_5} \in U$, выбранного по эталонной ситуации $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, позволяет преобразовать наблюдаемую проблемную ситуацию $s_{i_6} \in S$ в такую текущую ситуацию $s_{i_6}^*$ на ОУ, которая нечетко равна целевой ситуации $s_{Ц}$, определяющей заданный режим его функционирования. ♦*

Справедливость утверждения 3 следует из условия, что по определению ситуационного управления, с одной стороны, управление $u_{i_5} \in U$, выбранное по эталонной ситуации $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, позволяет устранив все зафиксированные в ней отклонения параметров состояния ОУ, т. е. преобразовать ее в требуемую целевую ситуацию. С другой же стороны, в силу нечеткого равенства ситуаций s_K и s_{i_6}



между собой, управление $u_{i_5} \in U$ позволяет преобразовать проблемную ситуацию $s_{i_6} \in S$ в такую ситуацию $s_{i_6}^*$, которая согласно утверждению 1 будет нечетко равной целевой ситуации $s_{Ц}$.

Отметим, что если обработка управлений $u_{i_5} \in U$ не обеспечивает требуемой точности регулирования параметров состояния ОУ, то полученный результат, т. е. ситуация $s_{i_6}^*$, корректируется путем обработки дополнительных управлений, определяемых по эмпирической модели $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основная проблема практической реализации предложенной многоуровневой ситуационной модели связана с получением экспертных данных, позволяющих выполнить обобщенное описание эталонных проблемных ситуаций для различных уровней управления ТП и определить эффективные в них управления. При наличии такой информации создание базы знаний многоуровневой ситуационной системы управления и автоматическое принятие управленческих решений на основе предложенных в работе инструментальных средств тривиально и сводится к построению соответствующих ее различным уровням логико-трансформационных правил вывода.

Пусть, например, возникла проблемная ситуация, связанная с поступлением на вход ТЦ_г заготовок для изготовления многоступенчатых валов с «малым», но недопустимым отклонением от размеров, предусмотренных программой их обработки на токарном станке с ЧПУ, и одновременно с этим наблюдается «средний» износ режущего инструмента. В этом случае сформированное для данной проблемной ситуации логико-трансформационное правило вывода определяет управление, согласно которому необходимо в программе обработки заготовок соответствующим образом увеличить число проходов режущего инструмента при заданной толщине съема металла за один проход. Правила вывода данного вида позволяют повысить качество обработки деталей и минимизировать брак на выходе ТП в случае изменения условий его реализации.

Допустим, на втором уровне ситуационного управления ТП возникла проблемная ситуация, связанная с выходом из строя оборудования ТЦ_г, используемого для выполнения технологической операции $o_{j_i} \in O_j$, а технологический маршрут ТМ_г допускает изменение последовательности входящих в него операций. Для данного случая с целью снижения негативных последствий, связанных с

разбалансированием «Выхода» цепочки ТЦ_г с «Входом_{г+1}» цепочки ТЦ_{г+1} в ситуационной модели управления выбирается логико-трансформационное правило вывода, позволяющее реализовать управление, обеспечивающее допустимую перестановку технологических операций в технологическом маршруте ТМ_г таким образом, чтобы операция $o_{j_i} \in O_j$ выполнялась как можно позже. Такие правила вывода позволяют минимизировать суммарные потери времени ТП, возникающие в результате выхода из строя технологического оборудования.

Первый уровень ситуационного управления, например, решает задачи, связанные с автоматической переналадкой технологического оборудования при смене обрабатываемых деталей.

В настоящее время ведется разработка программного обеспечения многоуровневой ситуационной модели управления ТП изготовления многоступенчатых валов, состоящего из двух ТЦ: механической обработки заготовок и закалки получаемых изделий.

Предложенная многоуровневая ситуационная модель может быть эффективно применена не только для управления ТП, но и для управления поведением различных сложных ОУ в нестабильной среде. Например, для управления целенаправленным поведением автономного интеллектуального робота в процессе манипулирования объектами в недоопределенных условиях ОС. В этом случае управления $u_{i_5} \in U$ в логико-трансформационных правилах вывода заменяются на выполняемые роботом действия. Например, если объект ОС находится «рядом» и имеет «малый» вес и «малые» габариты, то он может быть захвачен рабочим органом манипулятора робота.

В общем случае эффективность практического применения предложенной многоуровневой модели ситуационного управления сложными объектами в нестабильной окружающей среде обусловлена решением в работе следующих основных подзадач:

- декомпозиции всей задачи управления, имеющей большую размерность, на подзадачи по уровню общности показателей состояния ОУ и параметров управления с последующим определением на этой основе различных уровней иерархии вывода решений;
- разбиения на основе накопленного опыта управления множества возникающих на различных уровнях ОУ проблемных ситуаций $s_{i_6} \in S$ на классы $S_K \subset S$ аналогичных или нечетко равных между собой ситуаций;
- построения с помощью ЛП эталонных ситуаций $s_K \in S_{\Sigma}$ для каждого полученного класса $S_K \subset S$ проблемных ситуаций на различных уровнях иерархии управления;

— формирования на основе накопленного опыта управления и данных, полученных экспертным путем, логико-трансформационных правил вывода для каждого уровня ситуационного управления поведением сложного объекта.

В совокупности решение перечисленных подзадач позволяет эффективным образом реализовать анализатор, классификатор, коррелятор и экстраполятор ситуационной системы управления [16] сложными объектами различной природы в нестабильной среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе модель представления и обработки знаний позволяет организовать многоуровневую систему ситуационного управления поведением сложных технологических процессов и других различных сложных объектов управления в нестабильных условиях окружающей среды.

Применение лингвистических переменных для представления отклонений параметров состояния технологического оборудования, входящего в структуру технологического процесса и действующих в окружающей среде возмущающих факторов, позволяет обобщить модель представления знаний и на этой основе реализовать эффективный принцип сравнения эталонных и проблемных ситуаций в процессе выбора результативных управлений.

Применение лингвистических функций для обработки экспертных данных позволяет формировать эмпирические модели, определяющие аналитическую связь между параметрами результативных управлений, показателями состояния технологического процесса и влияющими на него возмущениями, а затем обеспечить на этой основе требуемую точность регулирования его состояния в нестабильных условиях окружающей среды.

Сформулированные требования к эталонным ситуациям, которые являются обобщением проблемных ситуаций на объекте управления, обеспечивают возможность выбора результативных управлений, реализация которых позволяет поддержать заданное состояние технологического процесса в течение всего периода его реализации в нестабильной окружающей среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ицкович Э.Л.* Методы рациональной автоматизации производства. — М.: Инфра — Инженерия, 2009. — 256 с.
2. *Ицкович Э.Л.* Методы комплексной автоматизации производства предприятий технологических отраслей. — М.: КРАСАНД, 2013. — 232 с.
3. *Тимофеев Г.А., Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д.* Статистические методы управления технологическими процессами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2016. — № 12. — С. 58—63.

4. *Тогашов А.Ю., Гончаров А.А., Самотылова С.А.* Современные методы построения усовершенствованного управления технологическими процессами // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. — 2016. — № 4. — С. 102—108.
5. *Ицкович Э.Л.* Интеллектуальность средств и систем автоматизации Honeywell // Автоматизация в промышленности. — 2006. — № 6. — С. 3—8.
6. *Орешкин О., Спасивцев А., Дайманд И.* и др. Синтез интеллектуального автоматизированного управления сложными ТП // Автоматизация в промышленности. — 2013. — № 7. — С. 3—9.
7. *PL Copen.* Standartization in Industrial Control Programming. Profiles, Products & Services of PLCopen Members. April, 1996.
8. *Фельдштейн Е.Э., Корневич М.А.* Автоматизация производственных процессов в машиностроении. — Вологда: Инфра — Инженерия, 2016. — 246 с.
9. *Шшимарев В.Ю.* Автоматизация технологических процессов. — М.: Академия, 2016. — 352 с.
10. *Трофимов В.Б., Кулаков С.М.* Интеллектуальные АСУ технологическими объектами. — Вологда: Инфра — Инженерия, 2016. — 232 с.
11. *Мелухов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я.* Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
12. *Зубарев Ю.Я.* Автоматизация процессов управления в судостроении. — Л.: Судостроение, 1978. — 264 с.
13. *Мелехин В.Б., Хачумов В.М.* Модель ситуационного управления сложными технологическими процессами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2017. — № 5. — С. 25—30.
14. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация: методы получения и анализа. — М.: Радио и связь, 1982. — 184 с.
15. *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.
16. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
17. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 167 с.
18. *Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М.* Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 1. — Том 44. — С. 48—60.
19. *Драйнер М., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. Кн. 1. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.
20. *Берштейн Л.С., Мелехин В.Б.* Планирование поведения интеллектуального робота. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 240 с.
21. *Корицнов Ю.М.* Математические основы кибернетики. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 496 с.

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

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

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

*Поступила в редакцию 19.06.2018, после доработки 18.09.2018.
Принята к публикации 12.11.2018.*