

**SCIENTIFIC SCHOOL OF ACADEMICIAN E.V. ZOLOTOV  
AT THE CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF THE AEROSPACE FORCES  
OF THE MINISTRY OF DEFENSE OF RUSSIA:  
STAGES OF CREATION, ACHIEVEMENTS**

M.L. TSURKOV, Cand. Sc., G.A. LOPIN, Dr. Sc.

Central Research Institute of the Aerospace Forces  
of the Ministry of Defense of Russia, 32, Af. Nikitina emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: MLTS69@yandex.ru

The article is devoted to the analysis of the main results of the scientific work of the full member of the Academy of Sciences of the USSR Evgeny Vasilyevich Zolotov. The period 1942–1967 is considered his formation and military service in the NII-2 MO, now the Central Research Institute of the Aerospace Forces of the Ministry of Defense of Russia. The work is dedicated to the 100th anniversary of the researcher's birth. His main theoretical developments as the first doctor of science at NII-2 MO, the features of the scientific school he created at the Institute are presented. An analysis is given of the proposed research methodology and the basics of building in Tver (Kalinin) a firing simulation complex for an experimental study of the vulnerability of air targets to the damaging effect of anti-aircraft guided air defense missiles with a proximity fuse. The research directions of Zolotov E.V., the main achievements and the level of their development at the present time.

*Keywords:* air targets, anti-aircraft guided missiles, scientific school, air defense, systems analysis, firing simulation system, vulnerability characteristics.

Поступила в редакцию/received: 21.07.2022; после рецензирования/revised: 05.09.2022;  
принята/accepted: 15.09.2022

УДК 681.5

**ЭВОЛЮЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСТАДИЙНЫМИ  
НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Б.В. ПАЛЮХ, д-р техн. наук, А.Н. ВЕТРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: pboris@mail.ru

© Палюх Б.В., Ветров А.Н., 2022

Статья посвящена вопросам анализа основных научных направлений, связанных с деятельностью действительного члена АН СССР Е.В. Золотова в период его работы в Калининском политехническом институте. Рассмотрены вопросы гарантированного учета погрешностей и шумовых искажений, измеряемых и вычисляемых технологических переменных путем применения разработанного Е.В. Золотовым подхода, основанного на предложенном им понятии вариативных зон. Данный подход в настоящее время реализован в теории искусственного интеллекта на базе математического аппарата мягких измерений и вычислений. Обоснованы принципы эволюционного управления многостадийным непрерывным производством на основе теории свидетельств Демпстера – Шафера и методов интервального анализа. Сочетание

этих подходов позволяет создать более эффективную систему эволюционного управления многостадийным непрерывным производством по сравнению с традиционными методами и снизить чувствительность к шумовым помехам и задержкам в динамических каналах между входом и выходом непрерывного технологического процесса. Предлагаемые подходы проиллюстрированы постановкой конкретных задач с решениями контрольных примеров.

*Ключевые слова:* эволюционное управление, интервальный анализ, теория свидетельств Демпстера – Шафера.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-97-107**

## ВВЕДЕНИЕ

В 1970 году на факультете химического машиностроения Калининского политехнического института по инициативе доктора технических наук, профессора Евгения Васильевича Золотова была создана кафедра «Автоматизация процессов химической промышленности». В том же году Е.В. Золотов был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению математики (вычислительной техники), а в 1987 году – академиком АН СССР (отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации). В дальнейшем он стал директором вычислительного центра Дальневосточного научного центра Академии наук СССР (ДВНЦ АН СССР), вице-президентом, членом Президиума, председателем Совета по физико-математическим и техническим наукам ДВНЦ АН СССР, но до 1990 года продолжал курировать созданную им кафедру. На рис. 1 академик Е.В. Золотов в составе государственной аттестационной комиссии вручает дипломы инженера первым выпускникам кафедры (1971 год). В своих дипломных проектах первые выпускники использовали идею вариативных зон, предложенную Евгением Васильевичем.



Рис. 1. Первый выпуск специальности  
«Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов»

На рис. 2 представлены выпускники 1971 года, разработавшие комплексный дипломный проект по автоматизации ангарского нефтехимического комбината и использовавшие метод вариативных зон. В этом же году Золотов организовал межвузовскую научно-исследовательскую лабораторию кибернетики. Лаборатория в основном комплектовалась из выпускников кафедры.



Рис. 2. Выпускники, разработавшие комплексный дипломный проект для ангарского нефтехимического комбината

Большинство сотрудников лаборатории впоследствии защитили кандидатские и докторские диссертации, стали известными учеными. В результате развития научного наследия академика Е.В. Золотова в ТвГТУ в настоящее время работают такие кафедры, как «Информационные системы», «Электронно-вычислительные машины», «Автоматизация технологических процессов», «Программное обеспечение», «Информатика и прикладная математика», «Технология и автоматизация машиностроения», «Радиотехнические информационные системы».

#### **ОТ ВАРИАТИВНЫХ ЗОН К МЯГКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ВЫЧИСЛЕНИЯМ**

Применявшиеся ранее методы эволюционного управления многостадийным непрерывным производством в основном содержат математический аппарат, который малопригоден для обоснованной диагностики в условиях ненадежных измерений. Классические задачи параметрической диагностики решаются путем быстрого вычисления диагностических параметров на основе измеренных мгновенных значений измеряемых технологических переменных, таких как температура, давление, расход и т.п. Однако в данном случае вычисленные параметры могут иметь очень большую погрешность, поэтому система диагностики способна часто выдавать ложные сигналы тревоги или пропускать дефекты. Это связано со следующими факторами. Во-первых, мгновенные значения измеряемых переменных слишком чувствительны к шумовым помехам и могут случайным образом изменяться на значительную величину. Во-вторых, измеряемые переменные могут относиться как к входу, так и к выходу диагностического объекта, поэтому их значения будут отличаться на величину запаздывания динамического канала между входом и выходом. Снижение чувствительности к шумовым помехам достигается за счет использования вместо традиционной системы технической диагностики, основанной на анализе мгновенных значений диагностических параметров, такой диагностической системы, которая анализирует интервалы изменений диагностических параметров за заданный промежуток времени. При непрерывном производстве обычно области работоспособных состояний  $R$  и дефектных состояний  $D$  значительно перекрываются, поэтому принципиально невозможно избежать ошибочных решений. Вероятность ошибочных решений может быть снижена с помощью интервального анализа. Пусть существует интервал значений диагностического параметра

$$X = [\underline{x}; \bar{x}] = \{x \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}; \underline{x}; \bar{x} \in R\},$$

где  $R$  – набор действительных чисел и, соответственно, верхнее и нижнее значения диагностического параметра.

Обозначим указанный интервал времени, в течение которого измеряется диагностическая переменная:

$$T = [\underline{t}; \bar{t}] = \{t \mid \underline{t} \leq t \leq \bar{t}; [\underline{t}; \bar{t}] \in R\}.$$

Здесь приведены нижняя и верхняя границы диапазона измерения временного интервала.

Покажем, что если анализировать не мгновенные значения диагностического параметра, а интервалы его изменения за заданный интервал времени, то вероятности ложной тревоги и пропуска дефекта уменьшаются. Рассмотрим график функций плотности вероятности распределения диагностических параметров (рис. 3).

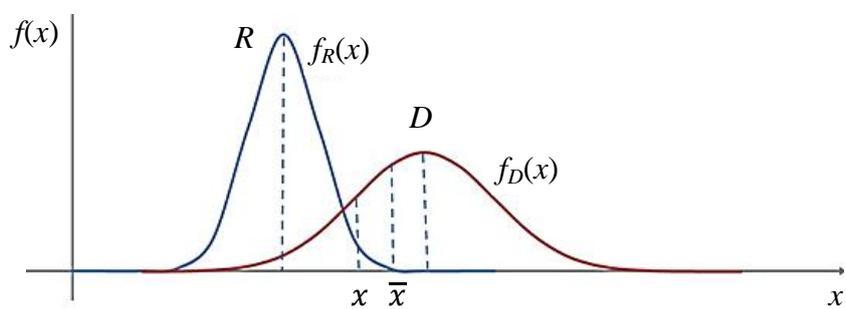


Рис. 3. Функции плотности вероятности распределения диагностических параметров:  $R$  – область функционального состояния;  $D$  – область дефектного состояния;  $f_R(x)$  и  $f_D(x)$  – функции плотности вероятности для областей  $R$  и  $D$  соответственно

Из рис. 3 следует, что вероятность ложной тревоги системы диагностики непрерывного производства, построенной на принципе анализа мгновенного значения диагностического параметра, больше, чем вероятность ложной тревоги системы диагностики, построенной на принципе анализа интервала значений диагностического параметра. Кроме того, вероятность пропуска дефекта в системе диагностики непрерывного производства, построенной на принципе анализа мгновенного значения диагностического параметра, больше, чем вероятность пропуска дефекта в системе диагностики, построенной на принципе анализа интервала значений диагностического параметра.

Таким образом, если анализировать не мгновенные значения диагностического параметра, а интервалы его изменения за заданный временной интервал, то вероятность ложной тревоги и пропуска дефекта снижается. Различия в значениях входных и выходных измеряемых переменных диагностического объекта, связанные с запаздыванием динамического канала между входом и выходом, могут быть преодолены путем выбора временного интервала  $T$  таким образом, чтобы  $\bar{t} = t_0 + \tau$  ( $\tau$  – время задержки динамического канала между входом и выходом объекта).

### ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Диагностические переменные делятся на наблюдаемые ( $z$ ) и вычисляемые ( $x$ ) переменные. В течение выбранного интервала времени измеряются интервалы наблюдаемых технологических переменных. Необходимо найти гарантированную

оценку рассчитанных диагностических показателей в виде интервалов. Математическая модель диагностического объекта обычно задается в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений. В нашем случае уравнения будут с интервальными переменными и коэффициентами. Рассмотрим решение этой задачи на примере производства слабой азотной кислоты.

В качестве примера построения параметрических моделей в виде интервальных обыкновенных дифференциальных уравнений возьмем модель превращения аммиака  $X_6$  в слое катализатора:

$$\frac{dX_6}{dt} = 6750 \left(\frac{Z_4}{4}\right)^{0,56} \left(\frac{Z_5}{4,5}\right)^{0,59} e^{-793\left(\frac{1}{Z_3} - \frac{1}{1123}\right)} (1 - X_6), \quad X_6(0) = 0.$$

Представлены значения измеренных переменных:

$Z_3 = [1123; 1133]$  – температура закисных газов, К;

$Z_4 = [1,9; 2,1]$  – скорость газа в каталитическом реакторе, м/с;

$Z_5 = [898; 902]$  – температура закисного газа под решетками каталитического реактора, К.

Решая уравнение двусторонними численными методами [1], получим зависимость общей степени превращения аммиака  $X_6$  в слое катализатора от времени  $t$ . Показанная на рис. 4 гарантированная оценка общей степени превращения аммиака представлена вариативной зоной. Она находится между линиями, определяющими верхнюю и нижнюю границы оценки общей степени превращения аммиака.

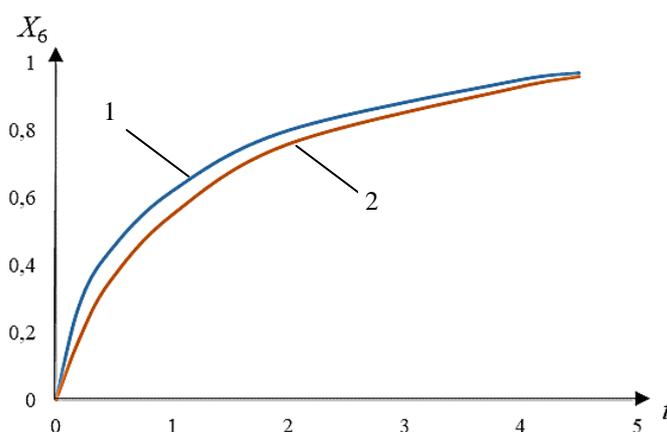


Рис. 4. Гарантированная оценка диагностического параметра:

1 – верхняя граница вариативной зоны; 2 – нижняя граница

Рассчитанные интервальные значения диагностических параметров позволяют эффективно решать задачу о состоянии отдельных узлов непрерывного производства. На базе проведенных исследований можно сделать вывод о необходимости построения диагностических систем для непрерывного производства не на основе традиционных принципов анализа мгновенных значений диагностических параметров, а на основе анализа интервалов изменения этих параметров за определенный временной интервал.

При использовании традиционных методов параметрической диагностики применяются специальные методики учета ошибок и сложные математические методы преобразования диагностических данных. Избавиться от этих недостатков можно, применив методы интервального анализа, позволяющие автоматически учитывать погрешность в измеренных исходных данных и облегчающие принятие решения о диагностике неисправности технологического оборудования.

## ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рассмотрим принципы использования интервального анализа для параметрической диагностики. Пусть  $x_i$  – значение  $i$ -го технологического изменения на исправном диагностическом объекте. За время эксплуатации рассматриваемого объекта переменная  $x_i$  будет отклоняться на некоторое небольшое значение  $\delta x_i$ . Чтобы диагностировать дефект на ранней стадии, необходимо измерить и проанализировать весь набор небольших отклонений переменных объекта. Значения  $x_i$  регистрируются измерительными приборами. Пусть погрешность измерения будет включена в значение  $\delta x_i$ . Для поиска дефекта анализируются соотношения между отклонениями этих переменных с использованием математических моделей объектов, в соответствии с которыми составляются линейные диагностические матрицы. Однако эту проблему можно решить и без использования диагностических матриц, если применить интервальный анализ непосредственно к математическим моделям объектов. Решение такой задачи возможно, если мы представим небольшие отклонения каждого  $i$ -го диагностического показателя в виде интервала  $X = [\underline{x}; \bar{x}]$ . Если значение  $i$ -й технологической переменной  $x_i$  увеличивается на величину  $\delta x_i$  во время работы оборудования, то границы интервала определяются как

$$\underline{x} = x_i; \quad \bar{x}_i = x_i + \delta x_i.$$

Если  $x_i$  уменьшается на  $\delta x_i$ , то

$$\underline{x} = x_i - \delta x_i; \quad \bar{x}_i = x_i.$$

Аналогичным образом можно учитывать временные интервалы (частоту) мониторинга. Если измерения технологической переменной выполняются периодически с периодом времени  $\tau$ , то любое измерение переменной характеризует диагностический объект на протяжении всего  $j$ -го временного интервала  $T_j = [\underline{t}_j; \bar{t}_j]$ .

Здесь указаны  $\underline{t}_j, \bar{t}_j$  – начало и конец временного интервала, в течение которого было выполнено  $j$ -е измерение:

$$\bar{t}_j = \underline{t}_j + \tau; \quad j = 1, 2, \dots$$

Наиболее важным при построении интервальных параметрических моделей является вопрос о методе нахождения минимальных интервальных расстояний. Он основан на определенных принципах:

1. Для ранней диагностики производства следует измерять и анализировать небольшие отклонения технологических переменных, присущие формам зарождающихся дефектов.

2. Использование метода малых отклонений предполагает анализ производственной операции в установившемся режиме.

3. В качестве параметрической диагностической модели рекомендуется использовать уравнения материального и теплового балансов технологического процесса, представленные в виде замкнутой системы нелинейных алгебраических уравнений с интервальными переменными и коэффициентами; эта система может быть дополнена уравнениями кинетики, гидро- и газодинамики.

4. Аналитическая форма каждого уравнения системы должна быть преобразована, чтобы уменьшить ширину естественного расширения интервала.

5. Чтобы строго гарантировать, что решение принадлежит полученным интервалам, необходимо учитывать ошибки компьютерного округления, но в практических расчетах эти ошибки невелики, поэтому ими можно пренебречь.

6. При использовании моделей на практике необходимо использовать одни и те же измерительные схемы для измерения наблюдаемых технологических переменных через разные промежутки времени, чтобы исключить систематические ошибки измерений.

7. Из-за задержки динамического канала между входом и выходом диагностического объекта временной интервал  $T_j = [t_j; \bar{t}_j]$  измерения технологических переменных должен быть установлен таким образом, чтобы  $t_j = t_0$  и  $\bar{t}_j = t_0 + \tau$ , где  $t_0$  – начало измерения интервала изменения технологической переменной;  $\tau$  – время задержки динамического канала между входом и выходом объекта.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ СВИДЕТЕЛЬСТВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Для принятия решений по управлению эксплуатационной надежностью в рамках поставленной задачи необходимо использовать методы искусственного интеллекта, позволяющие оценивать вероятность и учитывать неопределенности в исходной информации. Пусть существует набор объектов  $C$  и набор всех возможных свойств  $S$ , которыми они могут обладать. Необходимо определить объекты с заданными свойствами по известному набору признаков  $P$ . Затем (в соответствии с источником [2]) каждому  $k$ -му признаку  $P_k$  присваивается нечеткий набор объектов  $C_k$ :

$$C_k = \{c_i; \mu_k(c_i)\}; C_k \in C,$$

где  $c_i$  – объекты, которые могли бы обладать указанными свойствами в соответствии со значением  $k$ -го атрибута;  $\mu_k(c_i)$  – функция принадлежности элемента  $c_i$  множеству  $C_k$  (равна степени достоверности, уменьшенной до диапазона  $[0; 1]$ , при наличии указанного свойства по  $k$ -му атрибуту объекта  $c_i$ );  $C$  – полный набор объектов.

Пусть текущая ситуация соответствует набору зарегистрированных объектов:  $P^* = \{P_k | P_k = 1\}$ . Обозначим набор объектов, которые фактически содержат указанные свойства, как  $C^*$ . Процедура определения объектов с заданными свойствами сводится к решению логического уравнения

$$F: P^* \rightarrow C^*, \quad (1)$$

где  $F$  – функция-предикат вида

$$F = \bigwedge_{P_k=1} (\bigvee_{c_i \in C_k} c_i); C_k \in C. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) можно найти в виде

$$C^* = \bigcap_{P_k \in P^*} c_i | c_i \in C_k.$$

Если наличие свойства у объекта  $c_i$  является необходимым и достаточным условием для появления всех признаков  $P_k$ , то решение формулы (2) может быть найдено с использованием булевых или байесовских подходов. На практике это предполагает требования взаимной независимости и однозначности отношений между свойствами и объектами. В настоящее время существуют методы, позволяющие смягчить данные требования. При использовании метода нечетких множеств это достигается за счет расширения набора  $C_k$  путем включения в него маловероятных

гипотез на этапе экспертной классификации. Таким способом создается определенная информационная избыточность при решении задачи.

При нахождении решения уравнения (1) в виде (2) методом нечетких множеств степень принадлежности объекта  $c_N$  к набору заданных свойств определяется как

$$\mu^*(c_N) = \max\{\mu_i(c_N), \mu_j(c_N)\}, \quad i \neq j,$$

где  $\mu_i(c_N)$  – степень принадлежности объекта  $c_N$  к множеству  $C_i$ , активируемому появлением знака  $P_i = 1$ .

Однако ни булев, ни байесовский подходы, ни даже метод нечетких множеств не позволяют использовать процедуру (1) без учета требований взаимной независимости и однозначности отношений между свойствами и объектами для получения надежного и полного решения, поскольку неопределенность, связанная с принятием решения, не исчерпывается нечеткостью экспертных оценок. Это может быть вызвано стохастическим характером процессов, нестабильностью параметров, шумом измерений и т.д. Для решения таких задач наиболее перспективным является подход, основанный на использовании мер неопределенности, который включает интуитивно обоснованные минимальные свойства. Основная идея данного подхода заключается в том, что определенная мера вероятности может быть отнесена не только к отдельным элементам набора событий в предметной области, но и к подмножеству данного набора в целом. Таким образом, наиболее целесообразно принимать решения для этой задачи на основе теории свидетельств Демпстера – Шафера [3].

Рассмотрим применение теории Демпстера – Шафера на конкретном примере. Степень влияния  $k$ -й диагностической переменной на кризисное состояние  $i$ -й стадии процесса оценивается экспертами в диапазоне от 0 до 100. Например, если интервальное значение диагностической переменной  $X_1$  превысило диапазон нормативных значений, то в технологической цепи  $C_1$  имеются нарушения с вероятностной мерой, равной 20, в цепи  $C_2$  – с вероятностной мерой, равной 40, в цепи  $C_5$  – с вероятностной мерой, равной 60. Исходные экспертные данные для многостадийного непрерывного производства представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные экспертные данные

Диагностические переменные	Технологические цепи (стадии)				
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$X_1$	20	40			60
$X_2$	15		40		
$X_3$	90	30	30	20	

Предположим, что интервальные значения диагностических показателей  $X_1$  и  $X_3$  были получены на заданном интервале времени наблюдения и превысили допустимый диапазон изменений диагностических показателей. Исходные данные:  $X_1 = [42,8\%; 52,4\%]$ ;  $X_2 = [53,0\%; 58,0\%]$ . При допустимом диапазоне измерений 50–55 % мы рассчитываем вероятность нарушения технологического режима:

$$P_{x_1} = \frac{(50,0 - 42,8)}{(52,4 - 42,8)} = 0,75; \quad P_{x_2} = \frac{(58,0 - 55,0)}{(58,0 - 53,0)} = 0,6.$$

Выход диагностических показателей  $X_1$  и  $X_2$  за пределы нормативных значений указывает на вероятные нарушения технологического процесса. После нормализации и перераспределения вероятности в соответствии с процедурой, описанной в источнике [4], получаем два свидетельства:

$$m_1 = \langle C_1, C_2, C_5, A \rangle = \langle 0,13; 0,25; 0,48; 0,25 \rangle;$$

$$m_2 = \langle C_1, C_2, (C_3, C_4), A \rangle = \langle 0,32; 0,18; 0,10; 0,40 \rangle.$$

Согласно правилу Демпстера, комбинация различных свидетельств с распределениями вероятностей  $m_1$  и  $m_2$  выполняется следующим образом:

$$m(A_N) = \frac{1}{1 - m(\emptyset)} \sum_{C_i \cap C_j} m_1(C_i) * m_2(C_j),$$

где  $m(A_N)$  – функция объединения свидетельств  $m_1(C_i)$  и  $m_2(C_j)$ , соответствующих наличию свойства объекта  $A_N$ ;  $\emptyset$  – пустое множество.

Степень вероятности, которая выпадает на пустое множество:

$$m(\emptyset) = \sum_{C_i \cap C_j} m_1(C_i) * m_2(C_j).$$

Результаты расчетов с использованием традиционных методов и предложенной методологии представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов

Метод нечетких множеств	Метод Демпстера – Шафера
Результат: $A^* = \{(C_1; 0,2) (C_2; 0,4)\}$	Результат: $C_1[0,26; 0,41], C_2[0,28; 0,43], C_3[0,03; 0,18],$ $C_4[0,03; 0,18], C_5[0,29; 0,44], A[1,0; 1,0]$
Отказ от гипотезы о нарушении в цепи $C_5$ приводит к ошибке типа 2	Гипотезы о критическом состоянии цепи $C_5$ оставлены. Его причина установлена

Метод нечетких множеств, ввиду невыполнения условия необходимости, отвергает гипотезу о нарушении в цепочке  $C_5$ , что приводит к ошибке 2-го типа.

Подход к учету неопределенности при диагностике состояния сложных технических систем обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с байесовским подходом или подходом, основанным на использовании нечетких множеств. В частности, применение правила Демпстера позволяет преобразовать результаты многих оценок таким образом, чтобы сделать их непротиворечивыми и использовать для объединения с результатами математического моделирования. Кроме того, использование теории доказательств позволяет сократить условия необходимости и достаточности за счет перераспределения части уверенности по всему набору возможных гипотез.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать выводы:

1. Идеи академика Е.В. Золотова в области моделирования систем управления большими оборонными и производственными объектами значительно опережали свое время и впоследствии легли в основу конкретных разделов теории искусственного интеллекта. В частности, идеи ученого были реализованы в виде методов интервального анализа и мягких измерений и вычислений.

2. В настоящей статье рассмотрены теоретические и прикладные основы построения системы эволюционного управления многостадийным непрерывным производственным процессом.

3. Для снижения чувствительности системы к шумовым помехам и запаздываниям по динамическим каналам между входом и выходом каждой стадии непрерывного технологического процесса вместо традиционной диагностической системы, основанной на анализе мгновенных значений потоковых данных технологических переменных, поступающих от сенсоров работающего оборудования, предлагается система, которая обрабатывает интервалы изменения диагностических переменных на заданных интервалах времени.

4. В настоящей статье изучена процедура формирования гипотез для принятия решений с использованием функций доверия – основы теории свидетельств. Эти гипотезы характеризуются интервалом вероятности дефекта на анализируемой стадии производства.

5. Дальнейшие исследования предполагают разработку процедуры автоматического преобразования гипотез в нечеткие продукционные правила, что является предпосылкой к применению нечетких нейронных сетей для получения достоверной оценки степени уверенности в причине дефекта.

Данный проект выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-07-00199).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шарий Д.С. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ. 2019. 629 с.

2. Кафаров В.В., Палюх Б.В., Перов В.Л. Решение задачи технической диагностики непрерывного производства с помощью интервального анализа // *Доклад АН СССР*. 1990. Т. 311. № 3. С. 677–680.

3. Yager R.R., Liu L. Classic works of the Dempster – Shafer theory of belief functions. *Studies in fuzziness and soft computing*. 2008. V. 219. Berlin: Springer.

4. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Александрова Д.С. Идентификация критических состояний при управлении эволюцией многостадийного производства в условиях неопределенности // *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте*. Переславль-Залесский: РАИИ, 2019. С. 231–241.

**Для цитирования:** Палюх Б.В., Ветров А.Н. Эволюционное управление многостадийными непрерывными технологическими процессами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 97–107.

# MANAGEMENT OF MULTISTAGE MANUFACTURING BASED ON EVIDENCE THEORY AND METHODS OF INTERVAL ANALYSIS

B.V. PALYUKH, Dr. Sc., A.N. VETROV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: pboris@mail.ru

The article is devoted to the analysis of the main scientific directions related to the activities of the full member of the USSR Academy of Sciences E.V. Zolotov during his work at the Kalinin Polytechnic Institute. The issues of guaranteed accounting of errors and noise distortions, measured and calculated technological variables are considered by applying the approach developed by E.V. Zolotov, based on the concept of variable zones proposed by him. This approach is currently implemented in the theory of artificial intelligence based on the mathematical apparatus of soft measurements and calculations. The principles of evolutionary management of multistage continuous production are substantiated on the basis of the Dempster – Schafer evidence theory and interval analysis methods. The combination of these approaches makes it possible to create a more efficient system of evolutionary control of multistage continuous production compared to traditional methods and reduce sensitivity to noise interference and delays in dynamic channels between the input and output of a continuous technological process. The proposed approaches are illustrated by setting specific tasks with solutions of control examples.

*Keywords:* evolution management, interval analysis, Dempster – Schaefer evidence theory.

Поступила в редакцию/received: 07.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;  
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.942

## ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ В СОСТАВЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ЛОКАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Р.А. ЕГУЖОКОВ<sup>1</sup>, И.М. ХМАРОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Л.Ф. ШЕВЧЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.В. МЕШКОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
Г.Н. МАРКУШИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ЦНИИ ВКС Минобороны России,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32, e-mail: vse\_ki@mail.ru

<sup>2</sup>Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: common@tstu.tver.ru

<sup>3</sup>АО «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод”  
им. Э.С. Яламова», 620100, Екатеринбург, ул. Восточная, 33Б, e-mail: geo@uomz.com

© Егужоков Р.А., Хмаров И.М., Шевченко Л.Ф.,  
Мешков В.В., Маркушин Г.Н., 2022

Рассмотрены вопросы проведения испытаний лазерных дальномеров на открытых трассах при локации воздушных объектов в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах длин волн. Разработан и апробирован метод, при помощи

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*