

Интеллектуальные модели энергопреобразующих систем: построение и применение

Аннотация. Для динамического контроля сложных энергопреобразующих систем предложена интеллектуальная модель, реализованная путем представления схемы преобразования энергии в виде сетевого графа. Он является объединением нескольких древовидных графов и используется как основа последующего построения поведенческих производных правил четкой и нечеткой логики. Между рассматриваемой системой и узлами графа устанавливаются связи типа PART-OF, что, по сути, превращает сетевой граф в семантически ориентированную модель функционирования энергопреобразующей системы. Представлена также схема обхода вершин построенного сетевого графа и последовательность действий по динамическому контролю системы на различных уровнях моделирования. Для обеспечения возможности учета экспериментальных и экспертных оценок разработаны основные производные правила четкой и нечеткой логики, которые отражают сочетание и варьирование группы параметров, а также факты деградации системных характеристик с течением времени.

Ключевые слова: энергопреобразующая система; интеллектуальная модель; производные правила; сетевой граф; нечеткие множества.

Введение

К категории энергопреобразующих систем могут быть отнесены различные виды оборудования, агрегатов и узлов, в которых обеспечивается целенаправленное преобразование электрической, электромагнитной, тепловой, акустической или механической энергии (в том числе энергии вращения или поступательного перемещения рабочих органов) в ее иные виды. Термин «энергопреобразующие системы» введен, чтобы подчеркнуть специфику наиболее сложных с точки зрения моделирования энергетических параметров мехатронных, кибернетических, робототехнических и подобных им систем, в которых происходит многократное преобразование энергии, как по величине, так и по виду. Структурная сложность таких систем, различная физическая природа и многофакторность протекающих в них явлений приводят к практической невозможности построения адекватных аналитических соотношений между параметрами входных и выходных энергетических потоков.

При моделировании энергетических параметров указанных систем, по сути, не имеется основы выполнения в реальном масштабе времени оперативных расчетов и прогнозирования эталонных значений выходных параметров различных системных компонентов. Здесь речь идет о системных параметрах, с которыми можно было бы сопоставлять текущие значения и делать выводы о правильности работы систем. В такой ситуации системы рассматриваемой категории могут подвергаться эффективному контролю и диагностике преимущественно в тестовом режиме при их предварительном выводе из реальных процессов функционирования. В случае ответственных систем и продолжительных интервалов времени непрерывной работы для эффективно-го моделирования, как правило, этого бывает явно недостаточно.

Обращение к вероятностным методам моделирования сложных энергопреобразующих систем в большинстве случаев оказывается малопродуктивным, так как требует наличия достаточной устойчивости статистических закономерностей в процессах преобразования энер-

гии и адекватных статистических взаимосвязей энергетических параметров. Таким образом, возникает проблема организации оперативной комплексной оценки правильности функционирования энергопреобразующих систем, своевременного выявления возможных дефектов и сбоев в аппаратуре и в алгоритмах ее работы. Кроме того, в ряде случаев необходимо прогнозирование темпоральных тенденций в поведении систем как при варьировании тех или иных параметров, так и в течение достаточно продолжительных этапов функционирования.

Известные работы в области создания интеллектуальных моделей рассматриваемых систем чаще всего носят декларативный характер и отражают общие теоретические и методологические аспекты автоматизированной классификации работоспособных и неработоспособных состояний технических средств [1-4]. Основная направленность этих работ связана с оценкой функциональной пригодности системы и выбором минимального множества контролируемых признаков. В известных работах, в частности, обсуждаются возможные подходы к поиску зарождающихся дефектов, рассматриваются эскизные варианты построения схем реализации контроля, диагностики и наладки на основе сопоставления фактических значений измеряемых параметров с эталонными величинами. Однако вопрос оперативного построения эталонных значений контролируемых параметров остается открытым, так же как и проблема учета сетевой структуры процессов энергопреобразования.

Реальное повышение результативности разработки и практического внедрения моделей энергопреобразующих систем может быть получено при использовании современных сетевых математических технологий, дедуктивных приемов построения баз знаний и аппарата логических выводов [5-9].

1. Принципы построения интеллектуальных моделей сложных энергопреобразующих систем

В качестве ведущих принципов создания интеллектуальных моделей энергопреобразующих систем предлагается использовать представление схемы преобразования энергии в виде сетевого графа, который является

объединением нескольких древовидных орграфов, и последующее построение поведенческих продукционных правил четкой и нечеткой логики [10,11]. Каждая структурная схема преобразования энергии в системе, состоящей из k различных функциональных блоков, принципиально допускает отображение в виде сетевого ориентированного графа:

$$G = \langle X, S \rangle,$$

где X — множество вершин графа $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$, которые выступают в качестве сетевых узлов и отображают функциональные блоки моделируемой системы; S — множество дуг графа $\{s_j\}$, $j = 1, 2, \dots, l$, соответствующих каналам передачи потоков требуемых видов энергии, в том числе каналам управления и обратной связи.

Первичные источники определенных видов энергии в системе естественно интерпретировать, как висячие узлы сетевого графа. Блоки системы, обеспечивающие целенаправленные функциональные преобразования энергии (включая энергию сигналов управления) соответствуют внутренним узлам графа, а потребители энергии (например, рабочие органы системы) — тупиковым узлам. Между рассматриваемой энергопреобразующей системой и узлами $\{x_i\}$ устанавливаются семантические связи типа PART-OF (синоним — HasPart), которые соответствуют отношениям меронимии — целого и частей, при этом каждая часть не наследует свойства целого. Описанный граф, по сути, является семантически ориентированной сетевой моделью функционирования энергопреобразующей системы без наследования отдельными блоками свойств всей системы [2, 9].

В исходном виде граф G не обладает топологическими свойствами, позволяющими синтезировать рациональные процедуры контроля и диагностики, а также результативно выполнять наладку всей системы по следующим причинам [2]. Во-первых, реальные блоки системы $\{x_i\}$ могут содержать как одиночные выходы, так и группы системных выходов. Причем допускается различная физическая природа выходных энергетических потоков, которые характеризуются теми или иными индивидуальными параметрами. Это соответствует принципиальной возможности организации в каждом блоке системы различных трактов преобразования энергии, поступающей в блоки че-

рез входные каналы. Во-вторых, в энергопреобразующей системе, как правило, применяются обратные связи, затрудняющие или делающие невозможным проведение автономного контроля процесса преобразования энергии в отдельных блоках и в связи с этим последующей комплексной наладки всей системы.

С целью преодоления указанных трудностей множество узлов $X = \{x_i\}$ исходного сетевого графа целесообразно преобразовать методом расширения таким образом, чтобы каждая вершина из вновь создаваемого множества $U = \{u_\mu\}$, $\mu = 1, 2, \dots, m$ имела только один выход с некоторым назначенным системным номером $\nu(\mu)$. Для этого каждый из узлов x_i реальной системы, который содержит несколько различных исходящих дуг (т.е. выходных каналов), условно расщепляется и отображается с помощью группы вершин с единичными степенями полуисходов и некоторыми системными номерами $\nu(\mu)$. Узлы системы, содержащие по одному выходному каналу, не расщепляются и просто переносятся во множество U со значениями $\nu(\mu) = \mu$. При этом в создаваемый граф дополнительно вводятся фиктивные висячие вершины генерации потоков энергии обратных связей.

Между узлами x_i исходного графа системы и соответствующими вершинами u_μ устанавливаются семантические связи типа SUB (синоним — АКО, “A Kind of”), которые задают отношения между надмножествами (гиперонимами) и подмножеством (гипонимом). В данном случае свойства каждого надмножества наследуются подмножеством. Преобразованное

множество вершин $U = \{u_\mu\}$ оказывается избыточным: $m \geq k$.

В каждой вершине u_μ с помощью дуг полузахода должны отображаться только те входящие каналы, потоки энергии, в которых непосредственно используются рассматриваемым блоком системы для формирования определенного выхода. Реальные обратные связи разрываются и заменяются прямыми связями с соответствующими фиктивными висячими вершинами генерации потоков энергии обратных связей. Это сопровождается расширением множества дуг исходного графа $S = \{s_j\}$ и превращением его в новое множество $D = \{d_\nu\}$, $\nu = 1, 2, \dots, n$ ($n \geq l$).

Таким образом, на основе исходного сетевого графа G образуется сетевой граф Z , который в дальнейшем можно рассматривать как объединение нескольких древовидных орграфов:

$$Z = \langle U, D \rangle.$$

Корневыми вершинами отдельных древовидных орграфов являются соответствующие первичные источники энергии системы. Вершинам u_μ графа Z могут быть приписаны определенные ранги (уровни) относительно висячих вершин. Висячим вершинам назначается нулевой ранг, если они не относятся к фиктивным висячим вершинам генерации потоков энергии обратных связей; фиктивным висячим вершинам ранги не назначаются.

На Рис. 1 в качестве примера показан фрагмент схемы энергопреобразующей системы с блоками $i, i+1, i+2, i+3$, который может быть

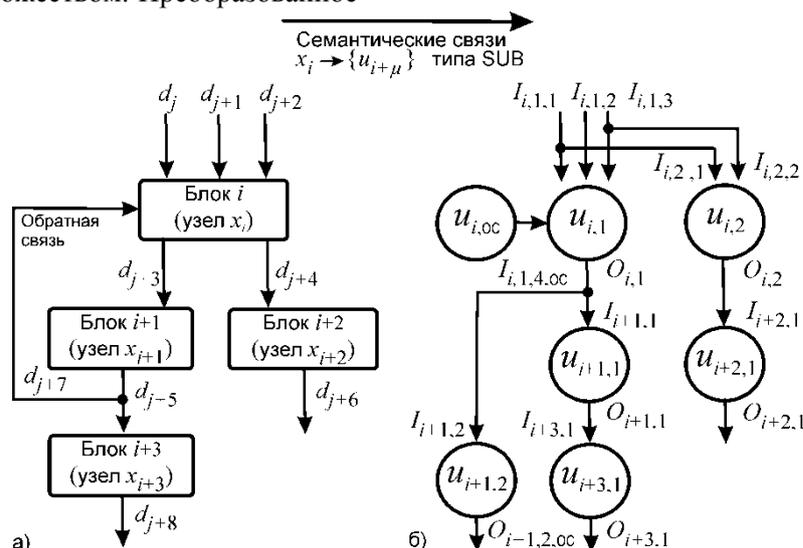


Рис. 1. Пример схемы с блоками (узлами графа G) $i, i+1, i+2, i+3$ (а) и фрагмент ориентированного древовидного графа Z (б): I — входящие каналы; O — исходящие каналы

отображен в виде фрагмента исходного сетевого графа G с соответствующими узлами. Кроме того, здесь представлен также фрагмент сетевого графа Z , образованного на основе исходного графа. Узел x_i исходного графа G представляется с помощью трех вершин графа Z : двух расщепленных вершин $u_{i,1}$, $u_{i,2}$ и одной фиктивной вершины $u_{i,oc}$. Безранговая фиктивная висячая вершина $u_{i,oc}$ отображает поступление в блок (узел) x_i потока энергии обратной связи. Генерация этого потока производится в вершине $u_{i+1,2}$ графа, которая соответствует второй вершине расщепления узла x_{i+1} .

Смыслоразличительные свойства процедур контроля и формирования адекватных выводов достигаются путем построения и обработки для каждого из функциональных блоков $\{x_i\}$ определенного количества фреймов $\{F_{i,\mu}\}$. Каждый построенный фрейм соответствует отдельной вершине древовидного графа Z .

Для вершинных фреймов используется следующий формат представления информации:

$$\langle F_{i,\mu};$$

$$\langle NFI_{i,\mu}, \text{integer}, M_{i,\mu};$$

$$PI_{i,\mu,r=1}, R, \text{integer},$$

$$RANGE_{i,\mu,r=1}(NI_{i,\mu,r=1}, NO_{j(1),v(1)});$$

$$PI_{i,\mu,r=2}, R, \text{integer},$$

$$RANGE_{i,\mu,r=2}(NI_{i,\mu,r=2}, NO_{j(2),v(2)}); \dots;$$

$$PI_{i,\mu,r=M_{i,\mu}}, R, \text{integer}, RANGE_{i,\mu,r=M_{i,\mu}}$$

$$(NI_{i,\mu,r=M_{i,\mu}}, NO_{j(r),v(r)}) \rangle$$

• • •

$$\langle NFO_{i,v(\mu)}, \text{integer}, NO_{i,v(\mu)};$$

$$PO_{i,v(\mu)}, R, \text{real},$$

$$RANGE_{i,v(\mu)}(NO_{i,v(\mu)}, \alpha_{i,v(\mu)н}, \alpha_{i,v(\mu)в}) \text{ или}$$

$$PO_{i,v(\mu)}, R, \text{list binary code},$$

$$RANGE_{i,v(\mu)}(NO_{i,v(\mu)},$$

$$\beta_{i,v(\mu)} = \{\beta_{i,v(\mu),1}, \beta_{i,v(\mu),2}, \dots\}) \rangle \rangle .$$

Здесь приняты обозначения: $F_{i,\mu}$ — имя фрейма одной из μ -х вершин графа Z ; $NFI_{i,\mu}$ — слот количества входящих (input) каналов для ввода энергии в вершину μ ; $M_{i,\mu}$ — количество входящих каналов; $\{PI_{i,\mu,r}\}$, $r = 1, 2, \dots, M_{i,\mu}$ — фасеты представления параметров процесса ввода энергии в вершины μ по входящим каналам; $RANGE_{i,\mu,r}(NI_{i,\mu,r}, NO_{j(r),v(r)})$ — фасеты системного конфигурирования, которые задают номера входящих каналов $NI_{i,\mu,r}$ μ -х вершин i -тых блоков — потребителей энергии и исходящих (output) каналов $NO_{j(r),v(r)}$ вершин $u_{j(r)}$ пер-

вичных или внутренних блоков — источников энергии (каждый канал $NO_{j(r),v(r)}$ применяется для передачи энергии на вход $NI_{i,\mu,r}$ в соответствии с системным алгоритмом функционирования моделируемой системы); $NFO_{i,v(\mu)}$ — слот исходящего канала $NO_{i,v(\mu)}$ вывода энергии из μ вершины блока i ; $PO_{i,v(\mu)}$ — слот отображения параметров процесса вывода энергии из μ вершины по исходящему каналу $NO_{i,v(\mu)}$; $RANGE_{i,v(\mu)}(NO_{i,v(\mu)}, \alpha_{i,v(\mu)н}, \alpha_{i,v(\mu)в})$, $RANGE_{i,v(\mu)}(NO_{i,v(\mu)}, \beta_{i,v(\mu)} = \{\beta_{i,v(\mu),1}, \beta_{i,v(\mu),2}, \dots\})$ — фасеты системных номеров исходящих каналов $NO_{i,v(\mu)}$ и диапазонов, задаваемых в виде нижних $\alpha_{i,v(\mu)н}$ и верхних $\alpha_{i,v(\mu)в}$ значений параметров процесса энергетического взаимодействия, или списков двоичных кодов $\beta_{i,v(\mu)} = \{\beta_{i,v(\mu),1}, \beta_{i,v(\mu),2}, \dots\}$ допустимых значений дискретных параметров указанного процесса.

Состояния первичных источников энергии, блоков функционального энергетического преобразования, потребителей энергии и системы в целом при контроле и диагностике технически возможно оценивать по результатам анализа и сопоставления текущих значений параметров входных и выходных потоков энергии. Эти параметры должны поступать в интеллектуальную систему от сенсорных компонентов и цифровых измерительных каналов; исключение составляют параметры источников энергии в каналах обратной связи, которые целесообразно искусственно задавать медианными или средними значениями.

Контроль, диагностику и наладку энергопреобразующей системы с использованием интеллектуальных моделей методологически целесообразно строить по традиционному иерархическому принципу [2]. На нижнем уровне объектами контроля и диагностики являются отдельные тракты функциональных блоков. Выполняются автономные проверки правильности реализации в каждом из блоков системы требуемых физико-технических процессов преобразования энергии. Для автономных проверок применяются сведения из фреймов соответствующих вершин отображения блоков структуры с учетом эмуляции потоков энергии в каналах обратной связи. На втором уровне объектами контроля и диагностики являются отдельные функциональные блоки системы. Осуществляются проверки их работоспособности при поблочной консолидации

отдельных физико-технических процессов преобразования энергии и эмуляции потоков энергии в каналах обратной связи. На верхнем уровне контроля производится системное комплексование функциональных блоков и замыкание каналов обратной связи с последующей проверкой работоспособности всей системы.

Обход вершин $U = \{u_\mu\}$ древовидного графа Z осуществляется поблочно в порядке возрастания ранга узлов, при этом в границах одного ранга выдерживается направление слева направо. Порядок обхода сетевых узлов $X = \{x_i\}$ исходного графа G устанавливается в соответствии с последовательностью их использования в алгоритме функционирования энергопреобразующей системы. При контроле и диагностике системы параметры потоков энергии на входах и выходах каждой вершины графа Z полагаются независимыми. Это соответствует наиболее сложным условиям оценки энтропии возможных системных состояний и вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах (границах) требуемых допусков или допустимых дискретных значений.

2. Методика контроля энергопреобразующих систем с использованием интеллектуальных моделей

Действия по контролю и диагностике на различных уровнях могут быть выполнены по общей схеме, этапы которой рассмотрим применительно к вершине $u_{i,\mu}$ графа Z (этой вершине соответствует фрейм $F_{i,\mu}$). Схема, отражающая содержание и последовательность

основных этапов интеллектуализации модели функционирования системы, представлена на Рис. 2.

Этап 1. С помощью наполнения слота $NFI_{i,\mu}$ фрейма $F_{i,\mu}$ задается количество $M_{i\mu}$ входящих каналов вершины μ блока i . Фасеты системного конфигурирования фрейма $F_{i,\mu}$ позволяют определить номера входящих каналов $\{NI_{i,\mu,r}\}$ для μ -й вершины i -го блока — потребителя энергии, а также номера исходящих каналов $NO_{j(r),v(r)}$ вершин $u_{j(r)}$ первичных или внутренних блоков — источников энергии.

Этап 2. По номерам исходящих каналов $NO_{j(r),v(r)}$ вершин $u_{j(r)}$ находятся фреймы $\{F_{i(r),v(r)}\}$ вершин — источников энергии для рассматриваемой вершины $u_{i\mu}$ и извлекаются из них фасеты нижних и верхних значений параметров или списков двоичных кодов их допустимых дискретных значений:

$$\{\alpha_{i(r),\mu(r),h(r)} \in (\alpha_{i(r),\mu(r),h(r)н}, \alpha_{i(r),\mu(r),h(r)в})\},$$

$$\{\beta_{i(r),\mu(r),h(r)} \in [\beta_{i(r),\mu(r),h(r),1}, \beta_{i(r),\mu(r),h(r),2}, \dots]\}.$$

Эти границы и дискретные значения в большинстве случаев не являются четкими и строгими, они устанавливаются экспериментальным путем или с использованием методов обработки экспертных оценок.

Этап 3. С помощью наполнения слота $NFO_{i,v(\mu)}$ фрейма $F_{i,\mu}$ находится системный номер $NO_{i,v(\mu)}$ исходящего канала $v(\mu)$ вывода энергии из μ вершины блока i .

Этап 4. Для формирования обоснованного вывода о выполнении функций в μ -вершине i -того блока системы в части выработки потока энергии на выходе $NO_{i,v(\mu)}$ можно использовать следующее производное правило:

$$IF \alpha_{i,\mu,1} \in (\alpha_{i(1),\mu(1),h(1)н}, \alpha_{i(1),\mu(1),h(1)в}) \& \alpha_{i,\mu,2} \in (\alpha_{i(2),\mu(2),h(2)н}, \alpha_{i(2),\mu(2),h(2)в}) \&$$

$$\alpha_{i,\mu,3} \in (\alpha_{i(3),\mu(3),h(3)н}, \alpha_{i(3),\mu(3),h(3)в}) \& \dots$$

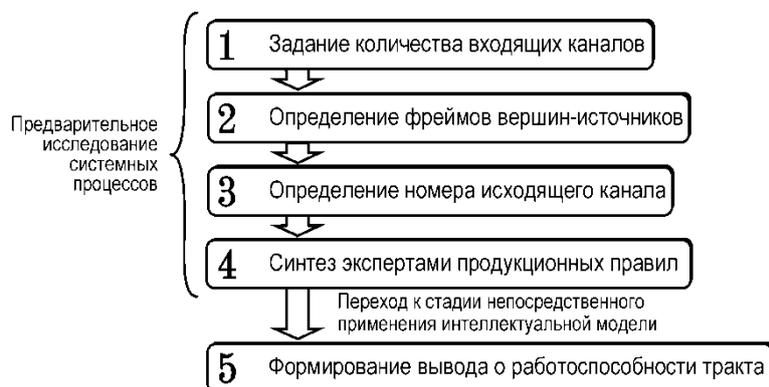


Рис. 2. Основные этапы интеллектуализации энергопреобразующей системы

OR $\beta_{i, \mu, K} \in$
 $[\beta_{i(K), \mu(K), h(K), L_1}, \beta_{i(K), \mu(K), h(K), L_2}, \dots)] \& \dots$
 THEN \langle ТРАКТ ФОРМИРОВАНИЯ
 ВЫХОДА $v(\mu)$ БЛОКА i $\rangle =$
 = «ТРАКТ РАБОТОСПОСОБЕН»,

где K и L_1, L_2, \dots — допустимые значения дискретной переменной.

Этап 5. Формирование обоснованного вывода о работоспособности тракта $v(\mu)$ блока i .

Количество подусловий в каждом из используемых правил определяется количеством входящих каналов $M_{i, \mu}$ в рассматриваемых вершинах отображения блоков системы. Общее количество правил зависит от числа блоков, выделенных в структуре системы.

Следует отметить, что в интеллектуальной модели с детерминированной технологией выводов результирующее решение о работоспособности объекта контроля является «жестким» и принимается на основе задания подусловий и исходов поведенческих правил с помощью предикатов четкой логики. При этом с функцией принадлежности $W = 1$ вырабатывается позитивное решение о функционировании тракта только в том случае, если консеквентное логическое выражение в правой части правила и абсолютно все antecedentes логические подусловия его левой части, которые формируются по результатам замеров фактических значений параметров преобразования энергии, оказываются истинными. Стоит подчеркнуть, что именно так принимается решение при использовании традиционного допускового метода интервальных оценок.

Реальные системы далеко не всегда позволяют эффективно применять жесткие технологии детерминированных выводов, особенно при необходимости учета варьирования тех или иных параметров или изменения параметров с течением времени в процессе функционирования системы. В таком случае достаточно продуктивным методом моделирования энергопреобразующей системы является внедрение аппарата нечеткой логики и механизмов нечетких («мягких») выводов.

С этой целью выходной переменной ТРАКТ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫХОДА $v(\mu)$ БЛОКА i , которая может принимать физически измеряемые непрерывные значения $\alpha^*_{i, v}$ или дискретные значения $\beta^*_{i, v}$, присваивается статус линг-

вистической переменной. Значениями лингвистической переменной будут являться не числа, а некоторые словесные предложения естественного или формализованного языка, совокупность которых образует терм-множество. Любой элемент терм-множества, как некоторое словесное значение лингвистической переменной, является термом. Формально терм задается с помощью функции его принадлежности к определенному нечеткому множеству [10, 11].

На основе экспериментальных данных или экспертных оценок целесообразно синтезировать функции принадлежности $W(\alpha_{i, v}, \beta_{i, v})$ значений введенной лингвистической переменной к соответствующим нечетким непрерывным множествам $(\alpha^*_{i(\mu)н}, \alpha^*_{i(\mu)в})$ или к нечетким дискретным множествам $\{\beta^*_{i, \mu, 1}, \beta^*_{i, \mu, 2}, \dots\}$. Здесь и в дальнейшем символ α^* используется для одновременного представления $\alpha_{од}$, $\alpha_{он}$ и $\alpha_{ов}$, а символ β^* — для одновременного представления $\beta_{од}$, $\beta_{он}$ и $\beta_{ов}$. В элементах функций принадлежности и в нечетких множествах используются следующие условные обозначения: «од» — область допустимых рабочих значений параметра; «он», «ов» — область в пределах, соответственно, нижних и верхних предупредительных границ параметров входных потоков энергии. Следует отметить, что указанные области могут иметь пересечения. Применяемые индексы «тн» и «сн» означают, соответственно, «тракт неработоспособен» и «состояние тракта не определено».

При формировании функций принадлежности к нечетким множествам имеются широкие возможности учета экспериментальных и экспертных оценок. Они могут отражать варьирование тех или иных параметров и их комбинаций, а также факты деградации системных характеристик с течением времени в процессе функционирования системы. Решение данной проблемы особенно актуально при создании адаптивных интеллектуальных систем контроля, диагностики и наладки.

Нечетким множествам соответствуют отдельные термы из базового состава терм-множества рассматриваемой лингвистической переменной. При этом могут быть специфицированы следующие словесные значения термов, которые являются консеквентными частями поведенческих правил четкой и нечеткой логики.

А.Тракт неработоспособен. В данном случае применяются правила четкой логики:

$$\begin{aligned} & \text{IF } \alpha^*_{i,v} < \alpha_{\text{он } i, v \text{ н}} \text{ OR } \alpha^*_{i,v} > \alpha_{\text{ов } i, v \text{ в}} \text{ OR} \\ & \{ \beta^*_{i,v} \neq [\beta_{\text{од } i, v, 1}, \beta_{\text{од } i, v, 2}, \dots] \} \& \\ & \beta^*_{i,v} \neq [\beta_{\text{он } i, v, 1}, \beta_{\text{он } i, v, 2}, \dots] \& \\ & \beta^*_{i,v} \neq [\beta_{\text{ов } i, v, 1}, \beta_{\text{ов } i, v, 2}, \dots] \} \\ & \text{THEN } W_{\text{тн}}(\alpha^*_{i,v}, \beta^*_{i,v}) = 1. \end{aligned}$$

Здесь и далее знаком * отмечены фактически измеренные величины параметров.

Б.Состояние тракта не определено. При определении данного состояния также используются правила четкой логики:

$$\begin{aligned} & \text{IF } \alpha^*_{i,v} = \langle \text{ЗНАЧЕНИЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНО} \rangle \& \\ & \beta^*_{i,v} = \langle \text{ЗНАЧЕНИЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНО} \rangle \text{ OR} \\ & \{ \alpha^*_{i,v} = \langle \text{ЗНАЧЕНИЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНО} \rangle \} \& \\ & \{ \beta^*_{i,v} = [\beta_{\text{од } i, v, 1}, \beta_{\text{од } i, v, 2}, \dots] \text{ OR} \\ & \beta_{i,v} = [\beta_{\text{он } i, v, 1}, \beta_{\text{он } i, v, 2}, \dots] \text{ OR} \\ & \beta_{i,v} = [\beta_{\text{ов } i, v, 1}, \beta_{\text{ов } i, v, 2}, \dots] \} \text{ OR} \\ & \alpha^*_{i,v} \in (\alpha_{\text{он } i, v \text{ н}}, \alpha_{\text{ов } i, v \text{ в}}) \& \\ & \beta^*_{i,v} = \langle \text{ЗНАЧЕНИЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНО} \rangle \\ & \text{THEN } W_{\text{сн}}(\alpha^*_{i,v}, \beta^*_{i,v}) = 1. \end{aligned}$$

В.Тракт работоспособен в рабочих областях (ОД, ОН, ОВ). При этом используются определяющие нечеткие множества и правила нечеткой логики:

$$\begin{aligned} & \text{IF } \alpha^*_{i,v} \in (\alpha^*_{i,v \text{ н}}, \alpha^*_{i,v \text{ в}}) \text{ OR } \beta^*_{i,v} \in [\beta^*_{i,v, 1}, \\ & \beta^*_{i,v, 2}, \dots] \\ & \text{THEN } W^*(\alpha^*_{i,v}, \beta^*_{i,v}) \leq 1. \end{aligned}$$

Здесь W^* представляет собой одновременно $W_{\text{од}}$, $W_{\text{он}}$ и $W_{\text{ов}}$.

Базовый состав терм-множества допускает его расширение в зависимости от потребностей конкретных задач контроля и диагностики с последующим экспериментальным или экспертным синтезом соответствующих нечетких множеств и функций принадлежности.

3. Определение работоспособности системы на основе правил нечеткой логики

Для практического применения поведенческих правил необходимо выбрать обоснованное пороговое значение $\Delta_{\text{п}}$ относительных взаимных отклонений планируемых и фактических значений выходных параметров, которое определяет границу формирования выводов о рабо-

тоспособности объекта контроля или о нарушениях процессов его функционирования.

В системах контроля и диагностики с допусковыми алгоритмами проверок в antecedentes левых частей правил Этапа 4 (то есть на входах блоков) для всех подусловий предварительно, с привлечением результатов экспериментов и экспертных сведений, необходимо синтезировать функции принадлежности $W^*_{\alpha, i, \mu}(\alpha_{i, \mu})$ текущих значений непрерывных параметров $\alpha^*_{i, \mu}$ входных энергетических потоков μ -х вершин i -х блоков к непрерывным нечетким множествам рабочих областей ОД, ОН и ОВ ($\alpha^*_{i, \mu \text{ н}}$, $\alpha^*_{i, \mu \text{ в}}$). Необходимо также синтезировать функции принадлежности $W^*_{\beta, i, \mu}(\beta_{i, \mu})$ текущих значений дискретных параметров $\beta^*_{i, \mu}$ входных энергетических потоков к дискретным нечетким множествам $\{\beta^*_{i, \mu, 1}, \beta^*_{i, \mu, 2}, \dots\}$.

Функции принадлежности, определенные в точках $W^*_{\alpha, i, \mu}(\alpha^*_{i, \mu})$, $W^*_{\beta, i, \mu}(\beta^*_{i, \mu})$, обеспечивают фаззификацию фактически измеренных четких значений входных параметров $\alpha^*_{i, \mu}$, $\beta^*_{i, \mu}$ в процедурах контроля. Возможны случаи потери значимости отдельными параметрами, которые должны выявляться с последующей блокировкой обработки этих измерений.

Алгоритм процедуры определения работоспособности системы на основе применения правил нечеткой логики представлен на Рис. 3. Допустим, что в результате фактического измерения параметров входных энергетических потоков в некоторой вершине μ блока i получены четкие значения $\{\alpha^*_{i, \mu, r}\}$, $r \neq h$; $\beta^*_{i, \mu, r=h}$ и четкие значения выходных параметров $\alpha^*_{i, v}$, $\beta^*_{i, v}$. По приведенным выше правилам А, Б четкой логики необходимо проверить возможность генерации результирующего вывода ТРАКТ НЕРАБОТОСПОСОБЕН или СОСТОЯНИЕ ТРАКТА НЕ ОПРЕДЕЛЕНО. Если один из указанных выводов правомерен, то процесс завершается с вышеуказанными значениями $W_{\text{тн}}(\alpha^*_{i, v}, \beta^*_{i, v}) = 1$ или $W_{\text{сн}}(\alpha^*_{i, v}, \beta^*_{i, v}) = 1$, соответственно.

Если ни один из выводов не принят, то производится фаззификация, позволяющая осуществить следующий переход:

- к значениям непрерывных функций $\{W^*_{\alpha, i, \mu, r}(\alpha^*_{i, \mu, r})\}$ принадлежности каждого из непрерывных входных параметров к нечетким множествам ($\alpha^*_{i, \mu \text{ н}}$, $\alpha^*_{i, \mu \text{ в}}$);

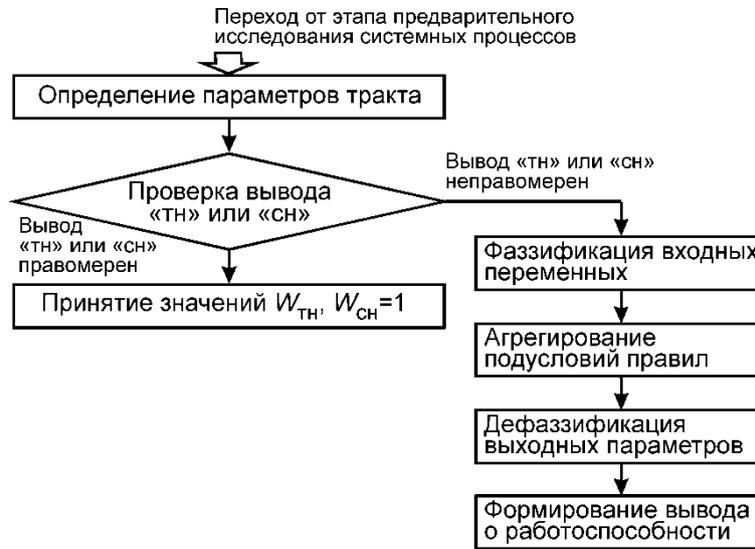


Рис. 3. Алгоритм определения работоспособности энергопреобразующей системы

• к значениям дискретных функций $W_{\beta, i, \mu, h}(\beta_{i, \mu, h}^*)$ принадлежности каждого из дискретных входных параметров к нечетким множествам $\{\beta_{i, \mu, 1}^*, \beta_{i, \mu, 2}^*, \dots\}$.

На основании этих функций принадлежности и правил **В** нечеткой логики вычисляются значения ожидаемых уровней истинности антецедентов поведенческих правил:

$$W_{i, \mu}^*(\alpha_{i, \mu}^*) = \min \{ \{ W_{\alpha, i, \mu, r}^*(\alpha_{i, \mu, r}^*) \}; W_{\beta, i, \mu, h}^*(\beta_{i, \mu, h}^*) \}.$$

При использовании допусковых алгоритмов проверок в консеквентах правых частей поведенческих правил Этапа 4 (т.е. в исходах) задаются логические выражения следующего вида:

$$\alpha_{i, v}^* \in (\alpha_{i, v \text{ н}}, \alpha_{i, v \text{ в}}) \text{ OR } \beta_{i, v}^* \in [\beta_{i, v, 1}, \beta_{i, v, 2}, \dots].$$

Правые части дизъюнкций применяются при наличии в узлах дискретных выходов.

В соответствии с алгоритмом Мамдани выполняется усечение ожидаемых уровней истинности консеквентов:

$$W_{i, \mu}^*(\alpha_{i, \mu}^*, \alpha_{i, v}, \beta_{i, v}) = \min \{ W_{i, \mu}^*(\alpha_{i, \mu}^*), W_{i, \mu}^*(\alpha_{i, v}, \beta_{i, v}) \}.$$

Скаляризация (дефаззификация) усеченных уровней истинности консеквентов (графически или путем расчета центров тяжести) позволяет оценить для рабочих областей (ОД, ОН, ОВ) наиболее правдоподобные планируемые (прогнозируемые) значения выходных параметров $\alpha_{i, v}^{**}, \beta_{i, v}^{**}$ для вершины μ блока i .

Вывод о работоспособности тракта или о нарушениях процессов его функционирования

производится на основании анализа относительных взаимных отклонений планируемых и фактических значений выходных параметров. Если выполняются условия:

$$|\alpha_{i, v}^{**} - \alpha_{i, v}^*| / \alpha_{i, v}^{**} \leq \Delta_{\text{п}}, \quad |\beta_{i, v}^{**} - \beta_{i, v}^*| / \beta_{i, v}^{**} \leq \Delta_{\text{п}},$$

то может быть сделан вывод о работоспособности вершины μ блока i в рабочих областях ОД, ОН, ОВ с ожидаемыми значениями уровней истинности вывода $W_{i, \mu}^*(\alpha_{i, \mu}^*, \alpha_{i, v}, \beta_{i, v})$.

При поблочной консолидации отдельных физико-технических процессов преобразования энергии и эмуляции потоков энергии в каналах обратной связи выводы о работоспособности отдельных блоков производятся с ожидаемыми значениями уровней истинности:

$$W_i^*(\alpha_{i, \mu}^*, \alpha_{i, v}, \beta_{i, v}) = \min \{ W_{i, \mu}^*(\alpha_{i, \mu}^*, \alpha_{i, v}, \beta_{i, v}) \}.$$

Ожидаемые значения уровней истинности выводов о работоспособности всей энергопреобразующей системы в рассматриваемых областях определяются выражением:

$$W^*(\alpha_{i, \mu}^*, \alpha_{i, v}, \beta_{i, v}) = \min \{ W_i^*(\alpha_{i, \mu}^*, \alpha_{i, v}, \beta_{i, v}) \}.$$

Самостоятельный практический интерес представляет прогнозирование поведения системы при задании значений параметров входных энергетических потоков «с перекосами», когда значения части входных энергетических параметров выбирается из области допустимых рабочих значений (в пределах нижних или верхних предупредительных границ), а значения другой части параметров — из иных рабочих областей. Кроме того, полезно прогнозировать

вание поведения энергопреобразующей системы при снижении с течением времени вероятности безотказной работы отдельных блоков. Такой прогноз может быть выполнен при соответствующей экспертной деформации функций принадлежности $W_{\text{тн (сн, од, он, ов)}}(\alpha_i, \nu, \beta_i, \nu)$.

Представляет интерес рассмотрение конкретного примера определения работоспособности отдельных блоков энергопреобразующей системы с использованием предложенного алгоритма. Допустим, что на функциональный блок системы поступают три входящих потока энергии, которые характеризуются лингвистическими переменными, указанными в Табл.1 (значения параметров приведены в относительных единицах). Здесь же представлены лингвистические переменные, характеризующие исходящий поток энергии, который вырабатывается функциональным блоком. Причем для первого входящего потока энергии характерна возрастающая S -образная функция принадлежности $W(\alpha_\mu)$ значений переменной указанным интервалам, для второго входящего потока — убывающая S -образная функция принадлежности, для третьего потока — трапецевидная функция, а для исходящего потока энергии задана U -образная функция принадлежности.

В результате измерения получены текущие значения параметров входящих потоков и ис-

ходящего потока, выполнена фаззификация параметров входящих потоков и для них получены значения функций принадлежности $W^\bullet(\alpha^*_\mu)$. При агрегировании по правилам нечеткой логики оценивается ожидаемый уровень истинности antecedентной части поведенческого правила $W^\bullet(\alpha^*_\mu) = \min \{0,35; 1; 0,165\} = 0,165$. Дефаззификация параметра исходящего потока по функции принадлежности консеквентной части поведенческого правила приводит к получению двух его наиболее ожидаемых экспертных значений $\alpha^{**}_\nu = W^{-1}[W^\bullet(\alpha^*_\mu)] = \{1163; 1879\}$. При оценке относительных отклонений имеем: $|\alpha^{**}_\nu - \alpha^*_\nu| / \alpha^{**}_\nu = \{63\%; 0,71\%\}$. Анализ полученных результатов позволяет сделать обоснованный вывод о правильности функционирования блока, поскольку для возрастающей ветви функции принадлежности характерно отклонение измеренного значения параметра исходящего потока от экспертной оценки этого параметра всего 0,71 %.

Интересен также другой случай оценки процесса функционирования системного блока, когда измеренное значение параметра исходящего потока энергии существенно отличается от его экспертного определения. Так, например, в результате измерений получены текущие значения параметров трех входящих потоков

Табл. 1. Параметры потоков энергии функционального блока

Потоки энергии		Параметры потоков энергии				
		α_μ, α_ν		$W(\alpha_\mu), W(\alpha_\nu)$	$\alpha^*_\mu, \alpha^*_\nu$	$W^\bullet(\alpha^*_\mu)$
Входящие	1	$\alpha_\mu \in (150; 800)$	$150 < \alpha_\mu < 300$	0	370	0,35
			$300 \leq \alpha_\mu \leq 500$	$0,005(\alpha - 300)$		
			$500 < \alpha_\mu < 800$	1		
	2	$\alpha_\mu \in (70; 190)$	$70 < \alpha_\mu < 90$	1	85	1
			$90 \leq \alpha_\mu \leq 140$	$1 - 0,02(\alpha - 90)$		
			$140 < \alpha_\mu < 190$	0		
	3	$\alpha_\mu \in (200; 2500)$	$200 < \alpha_\mu < 600$	0	750	0,165
			$600 \leq \alpha_\mu \leq 900$	$0,0033(\alpha - 600)$		
			$900 \leq \alpha_\mu \leq 1400$	1		
			$1400 \leq \alpha_\mu \leq 2100$	$1 - 0,00143(\alpha - 1400)$		
$2100 < \alpha_\mu < 2500$			0			
Исходящий	$\alpha_\nu \in (750; 3200)$	$750 < \alpha_\nu < 800$	1	1893	—	
		$800 \leq \alpha_\nu \leq 1200$	$1 - 0,0023(\alpha - 800)$			
		$1200 \leq \alpha_\nu \leq 1800$	0,1			
		$1800 \leq \alpha_\nu \leq 2900$	$0,1 + 0,00082(\alpha - 1800)$			
		$2900 < \alpha_\nu < 3200$	1			

$\alpha^*_{\mu} = 450; 110; 800$ и текущее значение исходящего потока $\alpha^*_{\nu} = 1570$. Фазсификация параметров входящих потоков дает следующие значения функций принадлежности: $W^{\bullet}(\alpha^*_{\mu}) = 0,75; 0,4; 0,66$. В результате агрегирования по правилам нечеткой логики оценивается ожидаемый уровень истинности антецедентной части поведенческого правила: $W^{\bullet}(\alpha^*_{\mu}) = \min \{0,75; 0,4; 0,66\} = 0,4$. Дефазсификация параметра исходящего потока по функции принадлежности консеквентной части поведенческого правила приводит к получению двух его наиболее ожидаемых экспертных значений $\alpha^{**}_{\nu} = W^{-1}[W^{\bullet}(\alpha^*_{\mu})] = \{1061; 2165\}$. Оценка относительных отклонений: $|\alpha^*_{\nu} - \alpha^{**}_{\nu}| / \alpha^{**}_{\nu} = \{48\%; 27\%\}$. В данном случае можно сделать вывод о возможном наличии ошибок в процессах функционирования блока, поскольку отклонение измеренного значения параметра исходящего потока существенно отклоняется от экспертной оценки этого значения (на 27 или 48 %).

Следует отметить, что техническое построение интеллектуальной модели энергопреобразующей системы предполагает применение компонентов вычислительной техники с достаточно большими объемами памяти для хранения базы данных, фреймов и правил базы знаний. Конструктивно в данном случае следует предусмотреть выделение и программное обслуживание достаточного количества каналов для подключения внешней цифровой аппаратуры по измерению фактических значений физических параметров потоков энергии. Кроме того, интеллектуальная модель должна иметь настраиваемые симуляторы первичных источников энергии и фиктивных источников генерации потоков энергии обратных связей при их размыкании. В состав программного обеспечения включаются средства настройки базы знаний, программы задания и обеспечения требуемых последовательностей функционирования, а также блоки реализации алгоритмов преобразований и пересчетов значений физических параметров, процедур контроля, диагностики и наладки системы.

Заключение

Интеллектуальная модель энергопреобразующей (например, мехатронной) системы реализуется путем представления исходной схемы

преобразования энергии в системе в виде сетевого графа, который является объединением нескольких древовидных орграфов. Сетевой граф используется в качестве основы последующего построения поведенческих продукционных правил четкой и нечеткой логики. Между рассматриваемой системой и узлами графа устанавливаются связи типа PART-OF, что, по сути, превращает сетевой граф в семантически ориентированную модель функционирования энергопреобразующей системы. Указанный прием моделирования обеспечивает построение и обработку для выделенных системных функциональных блоков определенного количества структурно ориентированных фреймов, каждый из которых соответствует отдельной вершине сетевого графа. За счет идентификации фреймов и входящих в них слотов достигаются смысловоразличительные свойства процедур контроля и диагностики рассматриваемой энергопреобразующей системы.

В работе предложена схема обхода вершин сетевого графа и последовательность действий по контролю и диагностике системы на различных уровнях моделирования. Для обеспечения возможности учета экспериментальных и экспертных оценок разработаны основные продукционные правила четкой и нечеткой логики, которые отражают сочетание и варьирование тех или иных параметров, а также процессы деградации системных характеристик с течением времени. Техническая реализация аппаратно-программного комплекса моделирования производится с использованием компонентов вычислительной техники с достаточно большими объемами памяти для хранения базы данных, фреймов и правил базы знаний. В состав программного обеспечения вводятся средства настройки базы знаний, программы задания и обеспечения требуемых последовательностей функционирования, блоки реализации алгоритмов преобразования и пересчета значений параметров, а также алгоритмов выполнения процедур контроля и диагностики энергопреобразующей системы.

Литература

1. Блинов А.В. Интеллектуальные системы диагностики и прогнозирования // Датчики и системы. 2005. №9. С. 65-70.

2. Карибский В.В., Пахоменко П.П., Согомонян Е.С., Халчев В.Ф. Основы технической диагностики. М.: Энергия. 1976. 464 с.
3. Гуляев В.А. Техническая диагностика управляющих систем. Киев: Наукова думка. 1983. 207 с.
4. Буравлев А.И., Доценко Б.И., Казаков И.Е. Управление техническим состоянием динамических систем. М.: Машиностроение. 1995. 240 с.
5. Сеньченков В.И. Математическая модель входа и выхода процессов системы как объекта контроля технического состояния // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2004. Т. 47. №5. С. 44-49.
6. Сеньченков В.И. Формирование множества контролируемых признаков системы на основе метрической теории и функционального анализа // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2005. Т. 48. №7. С. 13-19.
7. Гулай А.В., Зайцев В.М. Информационный кластерный подход в проектировании интеллектуальных мехатронных систем // Электроника-инфо. 2015. №7. С. 42-46.
8. Гулай А.В., Зайцев В.М. Анализ информационных факторов в проектировании интеллектуальных мехатронных систем // Наука и техника. 2016. Т. 15. №4. С. 335-344.
9. Гулай А.В., Зайцев В.М. Концептуальные схемы предметных областей в технологии построения интеллектуальных систем // Электроника-инфо. 2016. №10. С. 56-61.
10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Пер. с англ. М.: Мир. 1976. 165 с. (Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. N.Y.: Elsevier, 1973. 165 p.)
11. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия. 2007. 288 с.

Гулай Анатолий Владимирович. Доцент, заведующий кафедрой «Интеллектуальные системы» Белорусского национального технического университета. Окончил Минский радиотехнический институт в 1971 году. Кандидат технических наук, лауреат Государственной премии. Количество печатных работ: 190. Область научных интересов: методологические проблемы интеллектуальных технологий, интеллектуальные системы формирования знаний, построение интеллектуальных и сенсорных систем. E-mail: is@bntu.by

Зайцев Владимир Михайлович. Доцент кафедры «Интеллектуальные системы» Белорусского национального технического университета. Окончил Минский радиотехнический институт в 1971 году. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: 105. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов; проектирование интеллектуальных систем технического назначения. E-mail: is@bntu.by

Intelligent models of energy-converting systems: construction and application

A.V. Gulay, V.M. Zaitsev

Abstract. An intelligent model of the energy-converting system is proposed, which is implemented by means of provision of the energy conversion scheme in the form of a net graph along with subsequent building of behavioral rules of crisp and fuzzy logic. Links of the PART-OF type are established between the considered system and graph nodes, what pertinently turns the net graph to a semantically oriented model of energy-converting system functioning. This simulation method ensures formation of a certain quantity of structurally oriented frames for allocated system functional blocks, where each of them conforms to an individual top of the net graph. Distinctive features of control procedures and diagnostics of the considered energy-converting system are achieved due to the identification of frames and slot, included to them. A bypass circuit is also presented for tops of the built net graph, as well as a sequence of actions for system dynamical control at different simulation levels. In order to provide possible account of experimental and expert main production rules of crisp and fuzzy logic have been worked out, which reflect combination and variation of a group of parameters, as well as facts of system features degradation in the course of time.

Keywords: energy-converting system; intelligent model; production rules; net graph; fuzzy sets.

References

1. Blinov, A.V. 2005. Intellektual'nye sistemy diagnostiki i prognozirovaniya [Intelligent systems of diagnostics and forecasting]. Datchiki i sistemy [Sensors & Systems]. 9:65–70.
2. Karibskiy, V.V., P.P. Pakhomenko, E.S. Sogomonyan, and V.F. Khalchev. 1976. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Fundamentals of technical diagnostics]. Moscow: Energy Pubs. 464 p.
3. Gulyaev, V.A. 1983. Tekhnicheskaya diagnostika upravlyayushchikh sistem [Technical diagnostics of control systems]. Kyiv: Science thinking. 207 p.
4. Buravlyov A.I., B.I. Dotsenko, and I.E. Kazakov. 1995. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem dinamicheskikh sistem [The control of technical condition of a dynamic systems]. Moscow: Machine engineering. 240 p.

5. Sen`chenkov V.I. 2004. Matematicheskaya model` vhoda i vyhoda protsessov sistemy kak ob`ekta kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya [Mathematical model of the input and output of the system processes as an control object of technical condition]. Izvestiya VUZov. Priborostroenie [Proceedings of high schools. Instrument engineering] 47(5):44–49.
6. Sen`chenkov V.I. 2005. Formirovanie mnozhestva kontroliruemyykh priznakov sistemy na osnove metrisheskoy teorii i funktsional`nogo analiza [The set of system controlled features formation on the metric theory and functional analysis base]. Izvestiya VUZov. Priborostroenie [Proceedings of high schools. Instrument engineering] 48(7):13–19.
7. Gulay, A.V., and V.M. Zaytsev. 2015. Informatsionnyy klasternyy podhod v proektirovanii intellektual`nykh mekhatronnykh sistem [Information cluster approach in designing of intelligent mechatronic systems]. Elektronika-info [Electronics-info] 7:42–46.
8. Gulay, A.V., and V.M. Zaytsev. 2016. Analiz informatsionnykh faktorov v proektirovanii intellektual`nykh mekhatronnykh sistem [Analysis of information factors for designing intelligent mechatronic system]. Nauka i tekhnika [Science & Technique]. 4:335–344.
9. Gulay, A.V., and V.M. Zaytsev. 2016. Kontseptual`nye shemy predmetnykh oblastey v tekhnologii postroyeniya intellektual`nykh sistem [Analysis of information factors in designing of intelligent mechatronic systems]. Elektronika-info. [Electronics-info] 10:56–61.
10. Zadeh, L.A. 1973. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. N.Y.: Elsevier. 165 p.
11. Shtovba, S.D. 2007. Proektirovanie nechyotkikh sistem sredstvami MATLAB [Designing of fuzzy systems by means of MATLAB facilities]. Moscow: Goryachaya liniya Publ. 288 p.

Gulay A.V. The head of the “Intelligent systems” department of the Belarusian National Technical University. Ph. D. in Engineering Science. Amount of publication: 190. The fields of scientific interests: methodological problems of intelligent technologies, intelligent systems of knowledge formation; intelligent and sensor systems construction. E-mail: is@bntu.by

Zaitsev V.M. The assistant professor of the “Intelligent systems” department of the Belarusian National Technical University. Ph. D. in Engineering Science. Amount of publication: 105. The fields of scientific interests: digital procession signals; industrial-use intelligent systems construction. E-mail: is@bntu.by

Именной указатель №№ 1 – 4, 2017

А

Алхуссайн А.Х. – 3, 49;
Ахрем А.А. – 4, 53
Ашихмин И.В. – 3, 58

Б

Базенков Н.И. – 2, 55
Березкин Д.В. – 3, 3
Болгов М.В. – 1, 84
Борисов Р.В. – 3, 21
Брестер К.Ю. – 3, 82
Бубер А.Л. – 1, 84

В

Вагин В.Н. – 1, 3
Васильев В.И. – 3, 21
Вашевник Т.Л. – 4, 53
Виноградов Д.В. – 2, 9
Воронцов Д.Д. – 2, 55
Вохминцев А.В. – 1, 50

Г

Гарбук С.В. – 1, 59
Гулай А.В. – 4, 109
Гульятеева Т.А. – 2, 17
Гущин А.Н. – 3, 94

Д

Деревянко А.В. – 1, 3
Джабраилова З.Г. – 3, 69
Дивакова М.Н. – 3, 94
Дьяконова В.Е. – 2, 55

Ж

Жилякова Л.Ю. – 2, 55
Жихарев А.Г. – 3, 104
Жуковский А.Е. – 1, 43
Жумажанова С.С. – 3, 21

З

Зайцев В.М. – 4, 109
Захаров В.Н. – 1, 10
Захаров И.С. – 2, 55
Зимовец О.А. – 3, 104

К

Каменская М.А. – 4, 40
Кочетков П.В. – 1, 27
Кузнецов О.П. – 2, 55
Кузнецова Ю.М. – 2, 74
Куливец С.Г. – 2, 55
Кулинич А.А. – 3, 38
Кутепов В.П. – 1, 3

Л

Левашова Т.В. – 2, 90
Лотов А.В. – 1, 84
Лукашевич Н.В. – 2, 78

М

Мамедова М.Г. – 3, 69
Матвеев М.Г. – 4, 60
Маторин С.И. – 3, 104
Мелехин В.Б. – 2, 31

Н

Ногин В.Д. – 4, 69

О

Осипов Г.С. – 4, 5

П

Павлов А.В. – 1, 27
Панкратьев П.С. – 1, 69
Панов А.И. – 4, 5
Панченко М.В. – 4, 33
Петровский А.Б. – 4, 78
Пономарев А.В. – 2, 90
Попов А.А. – 2, 17

Р

Рахманкулов В.З. – 4, 53
Русначенко Н.Л. – 2, 78

С

Сахаров Д.А. – 2, 55
Семенкин Е.С. – 3, 82
Семенкина О.Э. – 3, 82
Синюк В.Г. – 4, 33
Смирнов А.В. – 2, 90
Смирнов В.А. – 4, 95
Смирнов В.В. – 4, 95
Смирнов И.В. – 4, 40
Соловьев Ф.Н. – 1, 21
Соченков И.В. – 1, 50
Соченкова А.С. – 1, 50
Становов В.В. – 3, 82
Стефанюк В.Л. – 3, 49
Суворов Р.Е. – 4, 40
Сулавко А.Е. – 3, 21

Т

Терехов В.И. – 3, 3
Тесля Н.Н. – 2, 90

У

Уваров В.Е. – 2, 17

Ф

Фараджев И.А. – 1, 43
Фраленко В.П. – 3, 10
Фуремс Е.М. – 3, 58

Х

Хачумов В.М. – 2, 31
Хачумов М.В. – 2, 44; 3, 10
Хорошилов Александр А. – 1, 10
Хорошилов Алексей А. – 1, 10

Ч

Чеповский А.М. – 1, 21
Чудова Н.В. – 4, 23

Ш

Шакиров В.А. – 1, 69
Шевляков А.О. – 4, 60
Шелманов А.О. – 4, 40
Шемякина Ю.А. – 1, 43
Шустова М.В. – 3, 10

Ю

Южанин К.В. – 4, 53

Author Index №№ 1 – 4, 2017

A

Akhrem F.F. – 4, 53
Allhussain A.H. – 3, 49
Ashikhmin I.V. – 3, 58

B

Bazenkov N.I. – 2, 55
Berezkin D.V. – 3, 3
Bolgov M.V. – 1, 84
Borisov R.V. – 3, 21
Brester Ch. Yu – 3, 82
Buber A.L. – 1, 84

C

Chepovskiy A.M. – 1, 21
Chudova N.V. – 4, 23

D

Derevyanko A.V. – 1, 3
Divakova M.N. – 3, 94
Dyakonova V.E. – 2, 55

F

Faradjev I.A. – 1, 43
Fralenko V.P. – 3, 10
Furems E.M. – 3, 58

G

Garbuk S.V. – 1, 59
Gulay A.V. – 4, 109
Gulyaeva T.A. – 2, 17
Gushchin A.N. – 3, 94

J

Jabrayilova Z.G. – 3, 69

K

Kamenskaya M.A. – 4, 40
Khachumov M. V. – 2, 44; 3, 10
Khachumov V.M. – 2, 31
Khoroshilov Aleksandr A. – 1, 10
Khoroshilov Alexey A. – 1, 10
Kochetkov P.V. – 1, 27
Kulinich A.A. – 3, 38
Kulivets S.G. – 2, 55
Kutepov V.P. – 1, 3
Kuznetsov – 2, 55
Kuznetsova J.M. – 2, 74

L

Levashova N.V. – 2, 90
Lotov A.V. – 1, 84
Loukachevitch N.V. – 2, 78

M

Mammadova M.G. – 3, 69
Matorin S.I. – 3, 104
Matveev M.G. – 4, 60
Melekhin V.B. – 2, 31

N

Noghin V.D. – 4, 69

O

Osipov G.S. – 4, 5

P

Panchenko M.V. – 4, 33
Pankrat'ev P.S. – 1, 69
Panov A.I. – 4, 5
Pavlov A.V. – 1, 27
Petrovsky A.B. – 4, 78
Ponomarev A.V. – 2, 90
Popov A.A. – 2, 17

R

Rakhmankulov V.Z. – 4, 53
Rusnachenko N.L. – 2, 78

S

Sakharov D.A. – 2, 55
Semenkin E.S. – 3, 82
Semenkina O.E. – 3, 82
Sgurev V. – 2, 3
Shakirov V.A. – 1, 69
Shelmanov A.O. – 4, 40
Shemiakina J.A. – 1, 43
Shevlyakov A.O. – 4, 60
Shustova M.V. – 3, 10
Sinyuk V.G. – 4, 33
Smirnov A.V. – 2, 90
Smirnov D.V. – 4, 95
Smirnov I.V. – 4, 40
Smirnov V.A. – 4, 95
Sochenkov I.V. – 1, 50
Sochenkova A.S. – 1, 50
Solovyev F.N. – 1, 21
Stanovov V.V. – 3, 82
Stefanuk V.L. – 3, 49
Sulavko F.E. – 3, 21
Suvorov R.E. – 4, 40

T

Terkhov V.I. – 3, 3
Teslya N.N. – 2, 90

U

Uvarov V.E. – 2, 17

V

Vagin V.N. – 1, 3
Vashevnik T.L. – 4, 53
Vasilyev V.I. – 3, 21
Vinogradov D.V. – 2, 9
Vokhmintsev A.V. – 1, 50
Vorontsov D.D. – 2, 55

Y

Yuzhanin K.V. – 4, 53

Z

Zaitsev V.M. – 4, 109
Zakharov I.S. – 2, 55
Zakharov V.N. – 1, 10
Zhikharev A.G. – 3, 104
Zhilyakova L.Y. – 2, 55
Zhukovsky A.E. – 1, 43
Zhumazhanova S.S. – 3, 21
Zimovets O.A. – 3, 104