

## УПРАВЛЕНИЕ «УМНОЙ» МАШИНОЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ КАТЕГОРИЙНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СИТУАЦИИ: ПОДХОД ГРАНУЛЯРНОГО КОМПЬЮТИНГА

УДК 004.81:004.383.8

### **КАРГИН Анатолий Алексеевич**

д.т.н., проф., зав. кафедрой информационных технологий, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, a\_kargin@yahoo.com

**Научные интересы:** интеллектуальные информационные технологии.

### **ПЕТРЕНКО Татьяна Григорьевна**

к.т.н., доцент, доцент кафедры компьютерных технологий, Донецкий национальный университет им. Василя Стуса, t.petrenko@donnu.edu.ua

**Научные интересы:** интеллектуальные информационные технологии.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При проектировании умных систем [1], начиная от «умного» дома, «умного» автомобиля и заканчивая бытовыми приборами, закладываются интеллектуальные информационные технологии для обработки сенсорной информации. Для большинства задач, решаемых «умными» машинами (Smart Machine, SM), обработка сенсорной информации сводится к извлечению знаний из сенсорных данных, а затем принятию управляющих решений в реальном времени. Основной проблемой, на решение которой сегодня сконцентрировано внимание, по-прежнему, остаётся механизм обобщения для принятия управляющих решений в ситуациях, которые не были заложены при проектировании системы [2, 3, 4]. Один из возможных путей решения этой проблемы рассмотрим на примере управления «умной» машиной на перекрёстке, который она должна проехать. Информацию о ситуации на перекрёстке SM получает от ультразвукового или лазерного сканирующего устройства, видеокамеры, направленного микрофона, инфракрасного датчика и, возможно ещё некоторых сенсоров [5]. SM непрерывно сканирует пространство вокруг себя и на основании сенсорных данных, полученных от перечисленных датчиков, по правилам принимает управляющие решения: остановиться, повернуть направо, повернуть налево, быстро проехать

прямо и другие. Получить управляющее решение непосредственно на основании первичных сенсорных данных не всегда возможно. Затруднения вызваны необходимостью анализа большого числа прототипов ситуаций, которые должны быть построены в виде конкретных наборов сенсорных данных [6]. Размерность задачи существенно сокращается благодаря использованию нечётких правил [7, 8]. Кроме нечётких моделей, решение указанной проблемы возможно с помощью абстрагирования и обобщения сенсорных данных [9-10]. Абстрагирование и категоризация существенно сокращают количество возможных прототипов ситуаций (иерархических классов) и, соответственно, решающих правил. Примером представления прототипа ситуации на перекрёстке, определённого на некотором абстрактном уровне, может быть: «слева на большом расстоянии медленно приближается объект, прямо отсутствуют какие-либо объекты, а справа совсем недалеко находится объект, который постоит». Когда SM хранит конечный набор таких прототипов, то выполнить классификацию текущей ситуации, представленной непосредственно множеством сенсорных данных, по-прежнему, невозможно. Необходим механизм предварительной обработки (абстрагирования) сенсорных данных с целью представления ситуации набором абстрактных категорий.

Модель формирования управляющих решений «умной» машиной, основанная на механизме абстрагирования сенсорной информации, должна учитывать следующие особенности.

Во-первых, абстрагирование и обобщение сенсорных данных есть распределённый во времени процесс, напрямую связанный с такими характеристиками информации, как *полнота* и *старение*. Поэтапное во времени формирование отдельных фрагментов абстрактного описания ситуации и её динамических характеристик (изменения ситуации, скорость её изменения, ускорение) постепенно уменьшает неполноту описания ситуации и, вместе с этим, уменьшается актуальность ранее полученных фрагментов описания ситуации за счёт старения информации. Обе указанные характеристики – *полнота* и *старение* – влияют на формирование управляющих решений.

Во-вторых, задача является гетерогенной: некоторые управления – дискретные (остановиться, повернуть направо, повернуть налево), другие – непрерывные (двигаться прямо с заданной скоростью или ускорением, тормозить с требуемым замедлением). Наряду с непрерывными сенсорными данными имеются дискретные.

Гетерогенность задачи управления «умной» машиной преодолевается при использовании гранулярного подхода [11-14]. Информационная гранула (Information Granular, IG) в приложениях искусственного интеллекта есть порция знаний. В работе [15] обсуждается подход представления традиционных нечётких систем, основанных на лингвистических переменных [16], в виде однородной гранулярной структуры. Гранулами представлены отдельные термы полей *if* и *then* каждого правила, а также само нечёткое правило представляется отдельной гранулой. Такой подход указывает путь к однородной структуризации нечётких знаний, но не даёт механизма использования разного уровня обобщения знаний. Принципиальное отличие, предлагаемого в настоящей статье гранулярного подхода, от работы [12] состоит в том, что рассматривается не одноуровневое обобщение данных в виде термов лингвистических переменных, а многоуровневая категоризация данных.

В настоящей статье рассматривается модель, базирующаяся на следующей идее: для представления ситуации в системе управления используются знания разного уровня абстрагирования и обобщения. Порции знаний (категории)

представлены IG. На разных уровнях описания ситуации находятся гранулы, представляющие знания разного уровня абстрагирования. Знания о всех возможных ситуациях, например, для рассматриваемого примера на перекрёстке, представлены многоуровневой гранулярной структурой (Granularly Structure, GS). Гранулярная структура, интегрированная с правилами принятия управляющих решений, в том числе с нечёткими [16], является однородной нечёткой моделью, в которой управляющие решения принимаются на основе знаний разного уровня абстрагирования.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 приведен пример гранулярной структуры. В обозначении гранул, например,  $ig_n^{s_0}$  первый символ верхнего индекса указывает, какие знания она представляет ( $s$  – сенсорные данные,  $u$  – управляющие решения,  $r$  – правила), цифра за этим символом указывает на уровень гранулярной структуры, которому принадлежит гранула. Уровень структуры соответствует уровню абстрагирования. Нижний индекс в обозначении гранулы указывает номер гранулы на уровне. На рисунке сенсорные данные изображены треугольниками и обозначены  $s_1, \dots, s_n$ ; знания, описывающие сенсорные данные на разных уровнях абстрагирования, обозначены гранулами  $ig_1^{s_0}, ig_1^{s_1}, ig_1^{s_2}, \dots$ . Например, на первом уровне данные от ультразвукового датчика расстояния представлены тремя гранулами, смысл которых – *близко* ( $ig_3^{s_1}$ ), *среднее расстояние* ( $ig_2^{s_1}$ ) и *далеко* ( $ig_1^{s_1}$ ) до препятствия. Аналогично представлены знания, обобщающие данные от других датчиков (скорости, направления движения, видеокамеры). Они определены на конкретных числовых интервалах возможных показаний сенсоров. Видно, что на первом уровне обобщения сенсорных данных ситуация на перекрёстке описывается такими категориями как *близко*, *быстро*, *движется* объект. На следующем втором уровне обобщения ситуация представляется категориями *близко быстро приближается* объект, *близко быстро удаляется* объект и так далее. Таким образом, многоуровневая гранулярная структура описывает ситуацию на перекрёстке на разных уровнях детализации: чем выше уровень, тем более высокого уровня обобщения используются категории. Эти категории, затем, используются в поле *if* нечётких правил, которые

также представлены информационными гранулами. Например, гранула  $ig_1^R$  представляет знания о правиле *if*  $ig_j^{s3}$  *then*  $ig_i^u$ , которое нечётко рекомендует в ситуации, представленной гранулой  $ig_j^{s3}$ , принимать управление  $u_1$ , так как с ним связана гранула  $ig_i^u$ . Видно, что иерархическое гранулярное представление знаний, описывающих конкретный набор сенсорных данных, существенно сокращает размерность задачи (количество решающих правил).

Формально задача управления принимает следующий вид. В дискретные моменты времени сенсорные данные от датчиков гранулируются. Ситуация на этом нулевом уровне представляется множеством нечётких

характеристик IG нулевого уровня  $\{ig_i^{so}\}$ . Затем на основе этих нечётких характеристик с использованием знаний, представленных гранулярной структурой, находится описание сенсорных данных в виде набора разного уровня категорий  $\{ig_i^{sl}, l = 1, 2, \dots\}$ . Представление ситуации в таком виде, используется при обработке гранул, выполняющих функции нечётких правил  $\{ig_i^R\}$ . В результате получаем отображение множества IG нулевого уровня в множество гранул управления  $\{ig_i^u\}$ . Дефаззификация нечётких характеристик информационных гранул  $\{ig_i^u\}$  даёт конкретные управляющие решения на рассматриваемом такте обработки сенсорных данных.

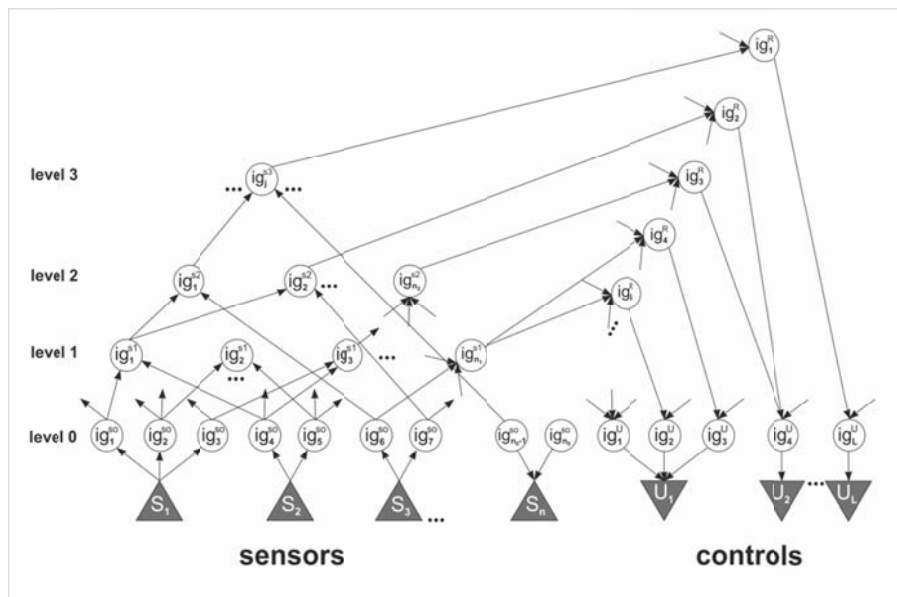


Рис. 1. Пример многоуровневой гранулярной структуры

Цель настоящей статьи – показать возможности новой модели интеллектуального управления в реальном времени на основе сенсорных данных, основанного на гранулярных вычислениях. Рассматривается модель представления знаний в виде многоуровневой гранулярной структуры для описания сенсорных данных (ситуаций) абстрактными категориями разного уровня обобщения.

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ. НЕЧЁТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ГРАНУЛЫ**

Гранулярную структуру на рис. 1 нужно рассматривать с двух точек зрения.

Во-первых, как модель представления знаний о ситуации. В этом случае стрелки, идущие от IG нижних уровней к грануле, например,  $ig_j^{sl}$ , показывают, какие категории более низкого уровня обобщения используются в определении категории, которую представляет гранула  $ig_j^{sl}$ . Исходящие стрелки от  $ig_j^{sl}$  показывают, в определении каких более общих категорий используется категория, представленная  $ig_j^{sl}$ .

Во-вторых, гранулярная структура есть информационная модель обработки сенсорных данных. В этом случае входные стрелки отражают входы  $ig_j^{sl}$ , по которым к грануле поступают нечёткие характеристики

інформаційних гранул, из которых исходят стрелки. Из  $ig_j^{sl}$  исходит одна стрелка, выполняющая роль выхода гранулы, по которому передаётся нечёткая характеристика этой IG к другим гранулам более высокого уровня.

С этих точек зрения отдельно рассматриваются две модели: представления знаний в гранулярной структуре и гранулярных вычислений. В основе обеих моделей лежит формальная характеристика гранулы – нечёткая характеристика гранулы (Fuzzy Granular Characteristic, FGC). Смысл этой характеристики – оценка степени соответствия ситуации (набора сенсорных данных) категории, которую представляет гранула.

Нечёткая характеристика гранулы – нечёткое множество, заданное на универсальном множестве  $\theta \in [-1, +1]$ , представляющем шкалу возможных значений уверенности (чёткий фактор уверенности)

$$\Theta : \{\theta | \mu_{\Theta}(\theta), \forall \theta \in [-1, +1]\}. \quad (1)$$

В качестве функции принадлежности предлагается симметричная гауссова функция с тремя параметрами

$$\mu_{\Theta}(\theta) = \gamma \cdot e^{-\frac{(\theta - \alpha)^2}{2\beta^2}}, \quad (2)$$

$$\alpha \in [-1, +1], \gamma \in [0, +1], \beta \in (0, \infty].$$

Параметр  $\alpha$  есть численная оценка уверенности в том, что сенсорные данные описывают ситуацию, которая представлена категорией, связанной с рассматриваемой гранулой. Высокая уверенность оценивается числом близким к единице  $\alpha = +1$ , а низкая уверенность – числом близким к  $\alpha = -1$ . Когда с равной уверенностью можно сказать, что ситуация и относится к категории и нет  $\alpha = 0$  («безразличное» значение). Таким образом, уверенность в том, что набор сенсорных данных (ситуация) соответствует категории, которую представляет IG, задаётся параметром  $\alpha = \theta$  гауссовой функции (2) на шкале  $\theta \in [-1, +1]$ .

Параметр  $\gamma$  функции принадлежности (2) указывает на полноту информации: насколько информативны сенсорные данные для категоризации ситуации. Пусть в определении категории, например,  $ig_3^{sl}$ , ис-

пользуется три набора сенсорных данных, как показано на рис. 1. Если сравнить два случая: в первом доступна информация только об одном наборе данных, например,  $ig_3^{s0}$ , а сенсорные данные остальных наборов отсутствуют и во втором случае доступны значения двух наборов данных, то параметр полноты  $\gamma$  для второго случая будет больше, чем для первого. Очевидно, что чем больше значение  $\gamma$ , тем выше информативность IG. В предельных случаях, когда  $\gamma = 0$  функция принадлежности вырождается в константу, равную нулю на всей области определения, что соответствует полному отсутствию данных, а при  $\gamma = 1$  функция принадлежности имеет один максимум равный единице, что говорит о полной информации для категоризации ситуации. Значение параметра  $0 < \gamma < 1$  характеризует степень неполноты данных.

Динамические характеристики сенсорных данных (инерционность или динамичность ситуации) оцениваются параметром динамичности  $\beta$  – интервалом времени с момента, когда появилась ситуация, описываемая категорией. Чем больше значение параметра  $\beta$ , тем менее динамична ситуация (давно не было изменений) и, наоборот, чем меньше значение  $\beta$ , тем более динамична ситуация (недавно изменилось ситуация). Свойство динамичности связано со старением информации и также влияет на информативность гранулы. Информативность уменьшаться при старении информации.

Непосредственно на основании FGC сделать заключение о том, какая из IG гранулярной структуры в наибольшей степени соответствует ситуации, затруднительно. В качестве интегральной характеристики IG в работе предлагается информативность  $I$ . Она показывает, насколько информативны знания, представленные гранулой. Для обоснования формального определения  $I$  рассмотрим несколько вариантов FGC (рис. 2). Каждый из трёх параметров функции принадлежности влияет на  $I$ . На рис. 2(a) и 2(b) FGC отличаются значением параметра  $\alpha$ : в первом случае ситуация с большей уверенностью относится к категории, чем во втором. Очевидно, информативность FGC, приведенной на рис. 2(a), выше, чем FGC на рис. 2(b). Если сравнить FGC 1 и FGC 2, показанные на рис. 2(b), то первая более чётко

задаёт уверенность, чем вторая. Для  $\beta_1 < \beta_2$  информативность FGC 1 выше, чем FGC 2. На рис. 2(c) и 2(d) приведены FGC для двух значений полноты информации  $\gamma_d < \gamma_c < 1$ . Очевидно, что на рис. 2(c) обе FGC заметно хуже характеризуют уверенность, чем на рис 2(a) и

такой же вывод можно сделать, сравнивая FGC на рис. 2(b) и 2(c). Нечёткие характеристики на рис. 2(c) имеют меньшую информативность по сравнению с FGC рис. 2(b).

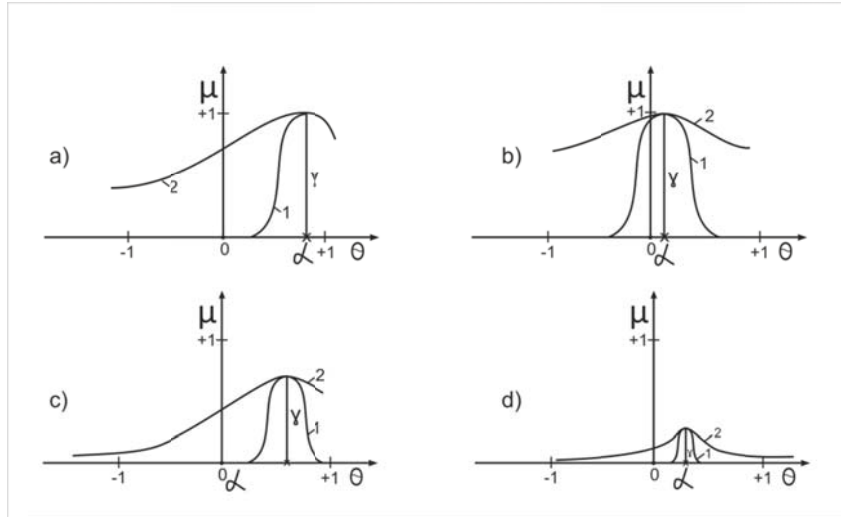


Рис. 2. Примеры FGC для разных значений параметров  $\alpha, \beta, \gamma$

На основании приведенного качественного анализа влияния параметров FGC получено для

$$I = |\alpha| \cdot \gamma \cdot \kappa_\beta, \text{ где } \kappa_\beta = \frac{\sum_{\forall \theta \in [-1, +1]} \mu_\theta(\theta)}{\gamma \cdot \text{Card}([-1, +1])}, \quad (3)$$

$I \in [0, 1], \kappa_\beta \in [0, 1]$

В (3) влияние параметра динамичности  $\beta \in (0, \infty]$  на информативность представлено нормированным коэффициентом  $\kappa_\beta \in [0, 1]$ .

### МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ВИДЕ КАТЕГОРИЙ СИТУАЦИЙ

В модели представления знаний IG рассматривается как порция знаний (концепт) в виде абстрактной категории, описывающей фрагмент ситуации. Система знаний о возможных ситуациях, в том числе и динамиче-

ских, представлена многоуровневой гранулярной структурой. На разных уровнях структуры находятся IG, представляющие знания разного уровня абстрагирования и обобщения. Знания гранулы  $i$ -го уровня структуры задаются путём обобщения знаний, представленных гранулами нижних  $j < i$  уровнях. Знания IG представляют собой фрагмент гранулярной структуры, который включает множество вершин (гранул), с которыми связана рассматриваемая IG, и дуги, связывающие эти вершины с IG. Характеристикой дуги является прототип в форме FGC. Возьмём  $i$ -ю гранулу  $l$ -го уровня  $ig_i^l$ . В общем виде она определена посредством обобщения знаний, представленных  $n$  IG более нижних уровней  $\{ig_j^g\}, g < l$ . Знания в виде некоторой категории, которые представляет гранула  $ig_i^l$ , будем записывать в виде

$$\langle N, (G\{ig_i^l\} = \{ig_j^g\}), (\{\hat{\alpha}_{ig_j^g}, \hat{\gamma}_{ig_j^g}, \hat{\beta}_{ig_j^g}\}), \forall ig_j^g \in \Omega_{ig_i^l} \rangle, \quad (4)$$



где  $N$  – идентификатор категории;

$G : \forall (ig_j^g, ig_i^l) \in E \times E$  – отображение, заданное на пересечении множеств  $E$  всех IG гранулярной структуры;

$G\{ig_i^l\} = \Omega_{ig_i^l} = \{ig_j^g\}$  – фрагмент отображения  $G$ , представляющий подмножество гранул  $\{ig_j^g\}$  с которыми имеются связи у гранулы  $ig_i^l$ .

Дуге, связывающей рассматриваемую гранулу  $ig_i^l$  с гранулой  $ig_j^g$  в (4), ставится в соответствие образец (прототип) в виде FGC:  $(\hat{\alpha}_{ig_j^g}, \hat{\gamma}_{ig_j^g}, \hat{\beta}_{ig_j^g})$ , в котором символ «шляпка» означает конкретное значение параметра.

Главную роль в определении категории играет вид отношения. Предлагается следующий набор n-арных отношений: «is a», «consist of», «before» и «part of». Оставляя за рамками настоящей статьи философию этого вопроса, отметим, что первые два отношения «is

a» (является представителем) и «consist of» (состоит из) заимствованы из моделей представления знаний с помощью семантических сетей. Временное отношение «before» (раньше) лежит в основе временной логики, без чего невозможно представление знаний о динамических свойствах ситуаций. И отношение «part of» (части целого) – формализация основной философской категории, служащая механизмом обобщений. Все четыре отношения рассматриваются в дальнейшем как нечёткие. Будем обозначать тип n-арного отношения  $G$  в (4) с помощью верхнего индекса *isa*, *cof*, *bef* и *pof*.

Отношения «is a» и «consist of» являются статическими (отсутствует параметр времени  $\beta$ ) моделями абстрагирования, которые рассматривают статические фрагменты ситуации – значения FGC на текущий момент времени (сенсорные данные для текущего такта обработки).

$$\langle N, (G^{isa} \{ig_i^l\} = \{ig_j^g\}), (\{\hat{\alpha}_{ig_j^g}, \hat{\gamma}_{ig_j^g} = 1\}, \forall ig_j^g \in \Omega_{ig_i^l}) \rangle ; \quad (5)$$

$$\langle N, (G^{cof} \{ig_i^l\} = \{ig_j^g\}), (\{\hat{\alpha}_{ig_j^g}, \hat{\gamma}_{ig_j^g} = \frac{1}{n}\}, \forall ig_j^g \in \Omega_{ig_i^l}) \rangle ; \quad (6)$$

Отношение «is a» (является представителем) даёт описание категории путём перечисления представителей, принадлежащих этой категории. Достаточно одного представителя для описания категории. Информация об одном любом представителе является полной для описания и, поэтому, параметр полноты информации в (5)  $\hat{\gamma}_{ig_j^g} = 1$ . Если в отношении «consist of» (состоит из)

будет отсутствовать информация хотя бы по одному фрагменту данных, описание категории будет непол-

$$\langle N, (G^{bef} \{ig_i^l\} = \{ig_j^g\}), (\{\hat{\alpha}_{ig_j^g}, \hat{\gamma}_{ig_j^g}, \hat{\beta}_{ig_j^g} = \Delta \tau_j\}, \forall ig_j^g \in \Omega_{ig_i^l}) \rangle ; \quad (7)$$

Например, в бинарном отношении  $\langle N, (G^{bef} \{ig_i^l\} = \{ig_j^g\}), (\{\hat{\alpha}_{ig_{j_1}^g}, \hat{\gamma}_{ig_{j_1}^g}, \hat{\beta}_{ig_{j_1}^g} = 5\}, \{\hat{\alpha}_{ig_{j_2}^g}, \hat{\gamma}_{ig_{j_2}^g}, \hat{\beta}_{ig_{j_2}^g} = 5\}) \rangle$ , которое описывает модель следующего временного события «в текущий момент времени изменился фрагмент ситуации (FGC гранулы  $ig_{j_2}^g$ ), а раньше на пять

ним. Эти рассуждения являются обоснованием для значения параметра полноты в (6)  $\hat{\gamma}_{ig_j^g} = \frac{1}{n}$ . В общем

случая не обязательно, чтобы параметр полноты был одинаков для всех фрагментов, важно, чтобы выполнялось условие  $\sum_{\forall ig_j^g \in \Omega_{ig_i^l}} \hat{\gamma}_{ig_j^g} = 1$ . Отношение «before»

задаётся на упорядоченном множестве гранул. Параметр  $\beta$  указывает на интервал времени между двумя следующими друг за другом изменениями значений FGC.

единиц времени ( $\hat{\beta}_{ig_{j_1}^g} = 5$ ) произошло изменение другого фрагмента ситуации (FGC гранулы  $ig_{j_1}^g$ ). Отношение «part of» (части целого) описывает когнитивную модель восприятия целостного объекта по его отдельным фрагментам. Модель восприятия динамическая:

информация об отдельных фрагментах ситуации может поступать неупорядочено и распределенно во времени. Поэтому, в прототипе (4) значение параметра динамичности записывается в виде  $\hat{\beta}_{ig^s} = t$  для обозначения текущего (на момент обработки сенсорных данных) момента времени. Информация о некотором фрагменте, полученная ранее, частично теряет актуальность из-

за старения на момент получения информации о следующем фрагменте. Каждый отдельно взятый фрагмент может иметь значение параметра полноты  $0 < \hat{\gamma}_{ig^s} \leq 1$  в зависимости от того, сколько информации несёт этот фрагмент для того, чтобы идентифицировать ситуацию в целом по этому фрагменту.

$$\langle N, (G^{prof} \{ig_i^l\} = \{ig_j^s\}), (\{\hat{\alpha}_{ig^s}, \hat{\gamma}_{ig^s}, t\}, \forall ig_j^s \in \Omega_{ig_i^l}) \rangle. \quad (8)$$

### ПРИМЕР ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ О СИТУАЦИИ НА ПЕРЕКРЁСТКЕ

На основании введенных четырёх типов отношений представим систему знаний, необходимую для того, чтобы SM безопасно пересекла нерегулируемый перекрёсток. Знания о ситуации на перекрёстке структури-

рованы на следующие категории: «опасно для поворота направо», «безопасно для поворота направо», «опасно для поворота налево», «безопасно для поворота направо», «опасно для проезда прямо», «безопасно для проезда прямо».

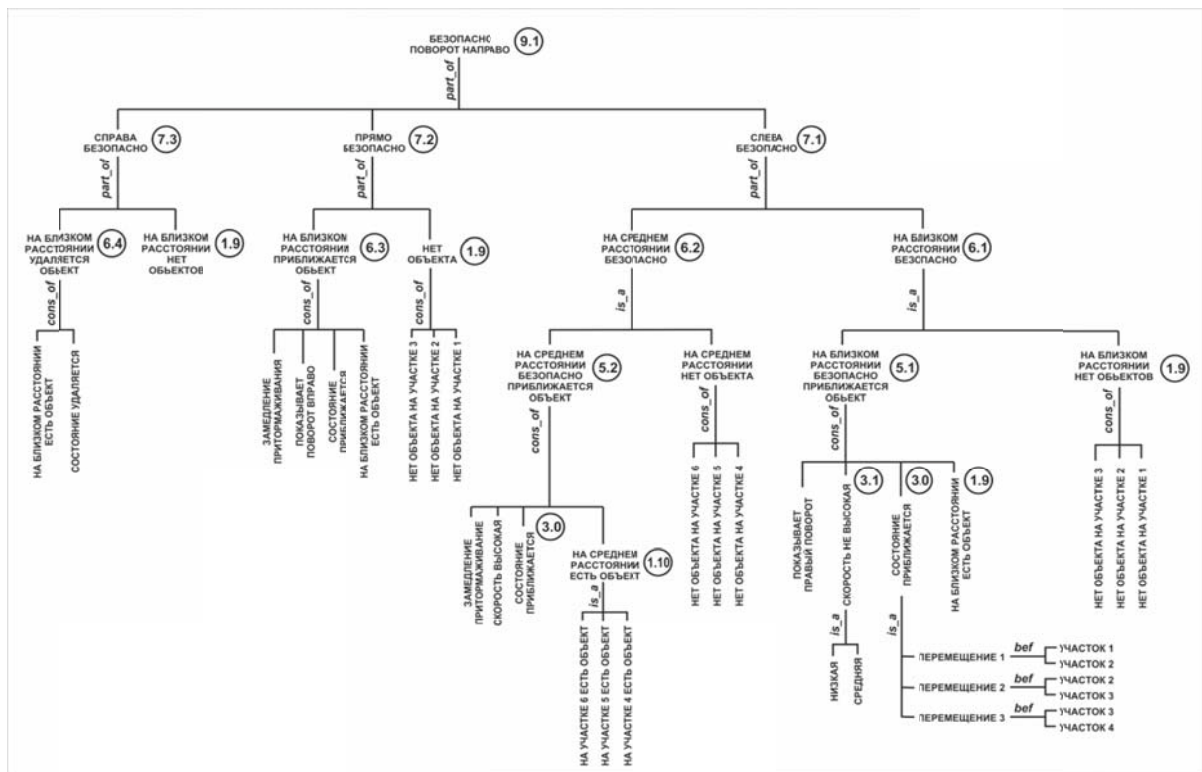


Рис. 3. Семантическая сеть представления знаний о категории «безопасно для поворота направо»

Изначально знания о каждой из этих категорий представлены в виде семантических (концептуальных) сетей с использованием введенных отношений. На нижнем уровне – гранулированное представление

сенсорных данных; расстояния до объекта (интервалы от 1 до 9), полученное от ультразвукового сенсора (UZS); направление, куда «смотрит» УЗ сенсор (left – (l), forward – (f), right – (r)) от датчика положения пово-

ротной платформы; освещённость поворотных фонарей движущихся объектов (*left* – (*lt*), *right* – (*rt*)). В качестве примера на рис. 3 графически показана семантическая сеть, описывающая на основе сенсорных данных категорию «опасно для поворота направо». На рисунке в вершинах изображены категории разного уровня обобщения; дуги – отношения (тип отношения изображён рядом с дугой), с помощью которых даётся определение категории. Например, категория «слева безопасно» (ей сопоставляется IG с номером 7.1 на рис.4) определена через отношение *part of* на основании двух категорий более низкого уровня обобщения «на близ-

ком расстоянии безопасно» и «на среднем расстоянии безопасно».

На основании семантической сети строится формальное представление знаний о категориях в виде гранулярной структуры. Каждому концепту семантической сети ставится в соответствие гранула. Знания о концепте задаются рассмотренными ранее отношениями (4)-(8). Ниже приводится пример гранулярной структуры для определения категории «безопасно для поворота направо». Идентификаторы некоторых гранул, используемых в гранулярном представлении (9), указаны на рис.3 в виде цифры в кружочках. Значения параметров  $\mathcal{U}$  выбраны исходя из здравого смысла.

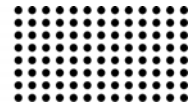
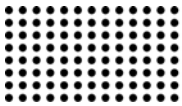
$$\begin{aligned}
 & \langle \mathbf{9.1}, (G^{prof} \{8.1\} = \{8.1, 8.2, 8.3\}), ((\hat{\alpha}_{8.1} = 1, \hat{\gamma}_{8.1} = 0.8, t), (\hat{\alpha}_{8.2} = 1, \hat{\gamma}_{8.2} = 0.6, t), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{8.3} = 1, \hat{\gamma}_{8.3} = 0.5, t)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{8.1}, (G^{cof} \{8.1\} = \{7.1, 0.l\}), ((\hat{\alpha}_{7.1} = 1, \hat{\gamma}_{7.1} = 0.5), (\hat{\alpha}_{0.l} = 1, \hat{\gamma}_{0.l} = 0.5)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{8.2}, (G^{cof} \{8.2\} = \{7.2, 0.f\}), ((\hat{\alpha}_{7.2} = 1, \hat{\gamma}_{7.2} = 0.5), (\hat{\alpha}_{0.f} = 1, \hat{\gamma}_{0.f} = 0.5)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{8.3}, (G^{cof} \{8.3\} = \{7.3, 0.r\}), ((\hat{\alpha}_{7.3} = 1, \hat{\gamma}_{7.3} = 0.5), (\hat{\alpha}_{0.r} = 1, \hat{\gamma}_{0.r} = 0.5)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{7.1}, (G^{prof} \{7.1\} = \{6.1, 6.2\}), ((\hat{\alpha}_{6.1} = 1, \hat{\gamma}_{6.1} = 0.9, t), (\hat{\alpha}_{6.2} = 1, \hat{\gamma}_{6.2} = 0.6, t)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{7.2}, (G^{prof} \{7.2\} = \{6.3, 1.9\}), ((\hat{\alpha}_{6.1} = 1, \hat{\gamma}_{6.1} = 1, t), (\hat{\alpha}_{6.2} = 1, \hat{\gamma}_{3.2} = 1, t)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{7.3}, (G^{prof} \{7.3\} = \{6.4, 1.9\}), ((\hat{\alpha}_{6.4} = 1, \hat{\gamma}_{6.1} = 0.7, t), (\hat{\alpha}_{6.2} = 1, \hat{\gamma}_{3.2} = 0.9, t)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{6.1}, (G^{isa} \{6.1\} = \{5.1, 1.9\}), ((\hat{\alpha}_{6.1} = 1, \hat{\gamma}_{6.1} = 1), (\hat{\alpha}_{1.9} = 1, \hat{\gamma}_{1.9} = 1)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{6.2}, (G^{isa} \{6.2\} = \{5.2, 1.10\}), ((\hat{\alpha}_{5.2} = 1, \hat{\gamma}_{5.2} = 1), (\hat{\alpha}_{1.10} = 1, \hat{\gamma}_{1.10} = 1)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{6.3}, (G^{cof} \{6.3\} = \{4.1, 3.0, 1.9, 0.rt\}), ((\hat{\alpha}_{4.1} = 1, \hat{\gamma}_{4.1} = 0.25), (\hat{\alpha}_{3.0} = 1, \hat{\gamma}_{3.0} = 0.25), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{1.9} = 1, \hat{\gamma}_{1.9} = 0.25), (\hat{\alpha}_{0.rt} = 1, \hat{\gamma}_{0.rt} = 0.25)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{6.4}, (G^{cof} \{6.4\} = \{2.2, 1.9\}), ((\hat{\alpha}_{2.2} = 1, \hat{\gamma}_{2.2} = 0.5), (\hat{\alpha}_{1.9} = 1, \hat{\gamma}_{1.9} = 0.5)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{5.1}, (G^{cof} \{5.1\} = \{3.0, 3.1, 1.9, 0.rt\}), ((\hat{\alpha}_{3.0} = 1, \hat{\gamma}_{3.0} = 0.25), (\hat{\alpha}_{3.1} = 1, \hat{\gamma}_{3.1} = 0.25), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{1.9} = 1, \hat{\gamma}_{1.9} = 0.25), (\hat{\alpha}_{0.rt} = 1, \hat{\gamma}_{0.rt} = 0.25)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{5.2}, (G^{cof} \{5.2\} = \{4.1, 3.0, 3.1, 1.10\}), ((\hat{\alpha}_{4.1} = 1, \hat{\gamma}_{4.1} = 0.25), (\hat{\alpha}_{3.0} = 1, \hat{\gamma}_{3.0} = 0.25), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{3.1} = 1, \hat{\gamma}_{3.1} = 0.25), (\hat{\alpha}_{1.10} = 1, \hat{\gamma}_{1.10} = 0.25)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{4.1}, (G^{isa} \{4.1\} = \{3.2, 3.3\}), ((\hat{\alpha}_{3.2} = 1, \hat{\gamma}_{3.2} = 1), (\hat{\alpha}_{3.3} = 1, \hat{\gamma}_{3.3} = 1)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{3.0}, (G^{isa} \{3.0\} = \{2.1^l, 2.1^m, 2.1^h\}), ((\hat{\alpha}_{2.1^l} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^l} = 1), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{2.1^m} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^m} = 1), (\hat{\alpha}_{2.1^h} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^h} = 1)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{3.1}, (G^{isa} \{3.0\} = \{2.1^m, 2.1^h\}), ((\hat{\alpha}_{2.1^m} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^m} = 1), (\hat{\alpha}_{2.1^h} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^h} = 1)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{3.2}, (G^{bef} \{3.2\} = \{2.1^m, 2.1^h\}), ((\hat{\alpha}_{2.1^m} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^m} = 1, \hat{\beta}_{2.1^m} = 0), (\hat{\alpha}_{2.1^h} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^h} = \hat{\beta}_{2.1^h} = 5)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{3.3}, (G^{bef} \{3.2\} = \{2.1^l, 2.1^m\}), ((\hat{\alpha}_{2.1^l} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^l} = 1, \hat{\beta}_{2.1^l} = 0), (\hat{\alpha}_{2.1^m} = 1, \hat{\gamma}_{2.1^m} = \hat{\beta}_{2.1^m} = 5)) \rangle; \\
 & \langle \mathbf{2.1^l}, (G^{isa} \{2.1^l\} = \{1.1^l, 1.2^l, 1.3^l, 1.4^l, 1.5^l, 1.6^l, 1.7^l, 1.8^l\}), ((\hat{\alpha}_{1.1^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.1^l} = 1), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{1.2^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.2^l} = 1), (\hat{\alpha}_{1.3^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.3^l} = 1), (\hat{\alpha}_{1.4^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.4^l} = 1), (\hat{\alpha}_{1.5^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.5^l} = 1), \\
 & \qquad \qquad \qquad (\hat{\alpha}_{1.6^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.6^l} = 1), (\hat{\alpha}_{1.7^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.7^l} = 1), (\hat{\alpha}_{1.8^l} = 1, \hat{\gamma}_{1.8^l} = 1)) \rangle;
 \end{aligned}
 \tag{9}$$



- $\langle 2.1^m, (G^{isa} \{2.1^m\} = \{1.1^m, 1.2^m, 1.3^m, 1.4^m, 1.5^m, 1.6^m, 1.7^m, 1.8^m\}), ((\hat{\alpha}_{1.1^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.1^m} = 1),$   
 $(\hat{\alpha}_{1.2^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.2^m} = 1), (\hat{\alpha}_{1.3^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.3^m} = 1), (\hat{\alpha}_{1.4^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.4^m} = 1), (\hat{\alpha}_{1.5^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.5^m} = 1),$   
 $(\hat{\alpha}_{1.6^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.6^m} = 1), (\hat{\alpha}_{1.7^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.7^m} = 1), (\hat{\alpha}_{1.8^m} = 1, \hat{\gamma}_{1.8^m} = 1)) \rangle;$   
 $\langle 2.1^h, (G^{isa} \{2.1^h\} = \{1.1^h, 1.2^h, 1.3^h, 1.4^h, 1.5^h, 1.6^h, 1.7^h, 1.8^h\}), ((\hat{\alpha}_{1.1^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.1^h} = 1),$   
 $(\hat{\alpha}_{1.2^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.2^h} = 1), (\hat{\alpha}_{1.3^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.3^h} = 1), (\hat{\alpha}_{1.4^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.4^h} = 1), (\hat{\alpha}_{1.5^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.5^h} = 1),$   
 $(\hat{\alpha}_{1.6^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.6^h} = 1), (\hat{\alpha}_{1.7^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.7^h} = 1), (\hat{\alpha}_{1.8^h} = 1, \hat{\gamma}_{1.8^h} = 1)) \rangle;$   
 $\langle 2.2, (G^{isa} \{2.2\} = \{1.1^*, 1.2^*, 1.3^*, 1.4^*, 1.5^*, 1.6^*, 1.7^*, 1.8^*, 1.9^*\}), ((\hat{\alpha}_{1.1^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.1^*} = 1),$   
 $(\hat{\alpha}_{1.2^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.2^*} = 1), (\hat{\alpha}_{1.3^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.3^*} = 1), (\hat{\alpha}_{1.4^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.4^*} = 1), (\hat{\alpha}_{1.5^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.5^*} = 1),$   
 $(\hat{\alpha}_{1.6^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.6^*} = 1), (\hat{\alpha}_{1.7^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.7^*} = 1), (\hat{\alpha}_{1.8^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.8^*} = 1), (\hat{\alpha}_{1.9^*} = 1, \hat{\gamma}_{1.9^*} = 1)) \rangle;$   
 $\langle 1.1^l, (G^{bef} \{1.1^l\} = \{0.1, 0.2\}), ((\hat{\alpha}_{0.1} = 1, \hat{\gamma}_{0.1} = 1, \hat{\beta}_{0.1} = 0), (\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.2^l, (G^{bef} \{1.2^l\} = \{0.2, 0.3\}), ((\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 0), (\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.3^l, (G^{bef} \{1.3^l\} = \{0.3, 0.4\}), ((\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 0), (\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1, \hat{\beta}_{0.4} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.4^l, (G^{bef} \{1.4^l\} = \{0.4, 0.5\}), ((\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1, \hat{\beta}_{0.4} = 0), (\hat{\alpha}_{0.5} = 1, \hat{\gamma}_{0.5} = 1, \hat{\beta}_{0.5} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.5^l, (G^{bef} \{1.5^l\} = \{0.5, 0.6\}), ((\hat{\alpha}_{0.5} = 1, \hat{\gamma}_{0.5} = 1, \hat{\beta}_{0.5} = 0), (\hat{\alpha}_{0.6} = 1, \hat{\gamma}_{0.6} = 1, \hat{\beta}_{0.6} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.6^l, (G^{bef} \{1.6^l\} = \{0.6, 0.7\}), ((\hat{\alpha}_{0.6} = 1, \hat{\gamma}_{0.6} = 1, \hat{\beta}_{0.6} = 0), (\hat{\alpha}_{0.7} = 1, \hat{\gamma}_{0.7} = 1, \hat{\beta}_{0.7} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.7^l, (G^{bef} \{1.7^l\} = \{0.7, 0.8\}), ((\hat{\alpha}_{0.7} = 1, \hat{\gamma}_{0.7} = 1, \hat{\beta}_{0.7} = 0), (\hat{\alpha}_{0.8} = 1, \hat{\gamma}_{0.8} = 1, \hat{\beta}_{0.8} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.8^l, (G^{bef} \{1.8^l\} = \{0.8, 0.9\}), ((\hat{\alpha}_{0.8} = 1, \hat{\gamma}_{0.8} = 1, \hat{\beta}_{0.8} = 0), (\hat{\alpha}_{0.9} = 1, \hat{\gamma}_{0.9} = 1, \hat{\beta}_{0.9} = 10)) \rangle;$   
 $\langle 1.1^m, (G^{bef} \{1.1^m\} = \{0.1, 0.2\}), ((\hat{\alpha}_{0.1} = 1, \hat{\gamma}_{0.1} = 1, \hat{\beta}_{0.1} = 0), (\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 30)) \rangle;$   
 $\langle 1.2^m, (G^{bef} \{1.2^m\} = \{0.2, 0.3\}), ((\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 0), (\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 30)) \rangle;$   
 $\langle 1.3^m, (G^{bef} \{1.3^m\} = \{0.3, 0.4\}), ((\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 0), (\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1, \hat{\beta}_{0.4} = 30)) \rangle;$   
 $\dots$   
 $\langle 1.8^m, (G^{bef} \{1.8^m\} = \{0.8, 0.9\}), ((\hat{\alpha}_{0.8} = 1, \hat{\gamma}_{0.8} = 1, \hat{\beta}_{0.8} = 0), (\hat{\alpha}_{0.9} = 1, \hat{\gamma}_{0.9} = 1, \hat{\beta}_{0.9} = 30)) \rangle;$   
 $\langle 1.1^h, (G^{bef} \{1.1^h\} = \{0.1, 0.2\}), ((\hat{\alpha}_{0.1} = 1, \hat{\gamma}_{0.1} = 1, \hat{\beta}_{0.1} = 0), (\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 45)) \rangle;$   
 $\langle 1.2^h, (G^{bef} \{1.2^h\} = \{0.2, 0.3\}), ((\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 0), (\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 45)) \rangle;$   
 $\dots$   
 $\langle 1.8^h, (G^{bef} \{1.8^h\} = \{0.8, 0.9\}), ((\hat{\alpha}_{0.8} = 1, \hat{\gamma}_{0.8} = 1, \hat{\beta}_{0.8} = 0), (\hat{\alpha}_{0.9} = 1, \hat{\gamma}_{0.9} = 1, \hat{\beta}_{0.9} = 45)) \rangle;$   
 $\langle 1.9, (G^{isa} \{1.9\} = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}), ((\hat{\alpha}_{0.1} = 1, \hat{\gamma}_{0.1} = 1.0), (\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1.0),$   
 $(\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1.0), (\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1.0)) \rangle;$   
 $\langle 1.10, (G^{isa} \{1.10\} = \{0.4, 0.5, 0.6, 0.7\}), ((\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1.0), (\hat{\alpha}_{0.5} = 1, \hat{\gamma}_{0.5} = 1.0),$   
 $(\hat{\alpha}_{0.6} = 1, \hat{\gamma}_{0.6} = 1.0), (\hat{\alpha}_{0.7} = 1, \hat{\gamma}_{0.7} = 1.0)) \rangle;$   
 $\langle 1.11, (G^{isa} \{1.10\} = \{0.7, 0.8, 0.9\}), ((\hat{\alpha}_{0.7} = 1, \hat{\gamma}_{0.7} = 1.0), (\hat{\alpha}_{0.8} = 1, \hat{\gamma}_{0.8} = 1.0),$   
 $(\hat{\alpha}_{0.9} = 1, \hat{\gamma}_{0.9} = 1.0)) \rangle;$   
 $\langle 1.1^*, (G^{bef} \{1.1^*\} = \{0.0, 0.1\}), ((\hat{\alpha}_{0.0} = 1, \hat{\gamma}_{0.0} = 1, \hat{\beta}_{0.0} = 10), (\hat{\alpha}_{0.1} = 1, \hat{\gamma}_{0.1} = 1, \hat{\beta}_{0.1} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.2^*, (G^{bef} \{1.2^*\} = \{0.1, 0.2\}), ((\hat{\alpha}_{0.1} = 1, \hat{\gamma}_{0.1} = 1, \hat{\beta}_{0.1} = 10), (\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.3^*, (G^{bef} \{1.3^*\} = \{0.2, 0.3\}), ((\hat{\alpha}_{0.2} = 1, \hat{\gamma}_{0.2} = 1, \hat{\beta}_{0.2} = 10), (\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.4^*, (G^{bef} \{1.4^*\} = \{0.3, 0.4\}), ((\hat{\alpha}_{0.3} = 1, \hat{\gamma}_{0.3} = 1, \hat{\beta}_{0.3} = 10), (\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1, \hat{\beta}_{0.4} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.5^*, (G^{bef} \{1.5^*\} = \{0.4, 0.5\}), ((\hat{\alpha}_{0.4} = 1, \hat{\gamma}_{0.4} = 1, \hat{\beta}_{0.4} = 10), (\hat{\alpha}_{0.5} = 1, \hat{\gamma}_{0.5} = 1, \hat{\beta}_{0.5} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.6^*, (G^{bef} \{1.6^*\} = \{0.5, 0.6\}), ((\hat{\alpha}_{0.5} = 1, \hat{\gamma}_{0.5} = 1, \hat{\beta}_{0.5} = 10), (\hat{\alpha}_{0.6} = 1, \hat{\gamma}_{0.6} = 1, \hat{\beta}_{0.6} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.7^*, (G^{bef} \{1.7^*\} = \{0.6, 0.7\}), ((\hat{\alpha}_{0.6} = 1, \hat{\gamma}_{0.6} = 1, \hat{\beta}_{0.6} = 10), (\hat{\alpha}_{0.7} = 1, \hat{\gamma}_{0.7} = 1, \hat{\beta}_{0.7} = 0)) \rangle;$   
 $\langle 1.8^*, (G^{bef} \{1.8^*\} = \{0.7, 0.8\}), ((\hat{\alpha}_{0.7} = 1, \hat{\gamma}_{0.7} = 1, \hat{\beta}_{0.7} = 10), (\hat{\alpha}_{0.8} = 1, \hat{\gamma}_{0.8} = 1, \hat{\beta}_{0.8} = 0)) \rangle.$

Знания о категории ситуации «безопасно для поворота направо» в виде гранулярной структуры (9) показаны в графическом виде на рис. 4. Эти знания допол-

няются отношениями, устанавливающими связь между категориями и управляющими решениями. На рис. 4 управляющие решения также представлены гранулами



нулевого уровня с именами  $0.r, 0.l, 0.f, 0.s$ , соответственно, «поворот направо», «поворот налево», «двигаться прямо» и «стоп». Ниже приводится описа-

ние связей между категориями и управляющими решениями на примере управления «поворот вправо».

$$\begin{aligned} < \mathbf{0.u}_r, (G^{prof} \{1.u_r\} = \{9.1, 9.2\}), ((\hat{\alpha}_{9.1} = 1, \hat{\gamma}_{9.1} = 1, t), (\hat{\alpha}_{9.2} = -1, \hat{\gamma}_{9.1} = 1, t)) > ; \\ < \mathbf{0.u}_s, (G^{prof} \{1.u_s\} = \{9.1, 9.2\}), ((\hat{\alpha}_{9.1} = -1, \hat{\gamma}_{9.1} = 1, t), (\hat{\alpha}_{9.2} = 1, \hat{\gamma}_{9.1} = 1, t)) > \end{aligned} \quad (10)$$

Отношения (10) в гранулярном подходе есть, по существу, реализация фазы сопоставления традиционно нечёткого вывода, на что было обращено внимание в постановке задачи при обсуждении роли гранулы  $ig_1^R$ , моделирующей знания о правиле *if  $ig_j^{s3}$  then  $ig_i^u$* .

### МОДЕЛЬ ГРАНУЛЯРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Гранулярный компьютеринг есть пошаговая процедура вычисления FGC выхода гранул по известным нечётким характеристикам входов IG, разворачивающаяся снизу-вверх: от сенсорных данных до категорийного описания ситуации и, завершая, управляющими решениями. На первом шаге – гранулирование сенсорных данных – каждому сенсору ставится в соответствие  $n$  FGC нулевого уровня, где  $n$  – количество IG, покрывающих диапазон возможных значений сенсора. В результате формируется модель текущей ситуации в виде множества FGC IG нулевого уровня GS. Вопросы гранулирования сенсорных данных приведены в [6, 16]. На втором шаге – обобщение и категоризация сенсорных данных – вычисляются FGC выходов гранул, лежащих на следующих верхних за нулевым уровнях. Используются четыре типа вычислительных процедур в соответствии с четырьмя типами отношений, используемыми при категорийном описании ситуаций. Вычисления, благодаря древовидной структуре GS, выполняются последовательно, начиная с первого, затем второго и так далее до самого верхнего уровня. На третьем шаге – эвристическое сопоставление категорий управляющим решениям – вычислительная процедура ничем не отличается от предыдущего шага: находятся FGC гранул, связанных с управляющими решениями (10). И, наконец на четвёртом шаге – дегранулирование – на

основании значения характеристики информативность (3) гранул выбирается подмножество управляющих решений для реализации на текущем такте обработки сенсорных данных. Вышеприведенную процедуру гранулярного компьютеринга можно сравнить с процедурой нечёткого вывода в системах, основанных на лингвистических переменных, например, процедурой Э. Мамдани [7, 16]. Шагу гранулирования рассматриваемой модели соответствует шаг фазификация модели Э. Мамдани. Шаг обобщения и категоризации рассматриваемой модели отсутствует в модели Э. Мамдани. Шагу эвристического сопоставления рассматриваемой модели соответствует два шага модели Э. Мамдани: сопоставления и аккумуляции. И, наконец шагу дегранулирования соответствует шаг дефазификации модели Э. Мамдани.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Принятие управляющих решений на основе дополнительной обработки сенсорной информации на шаге обобщения и категоризации, формализованного в виде гранулярного компьютеринга в многоуровневой гранулярной структуре, имеет преимущества по сравнению с классическими моделями нечёткого вывода. Этот механизм позволяет реализовать свойственную для человека процедуру принятия решения на основании обобщения и категоризации сенсорных данных. Кроме повышения адекватности моделей представления знаний, используемых в рассуждениях экспертов при обработке сенсорных данных, предложенная модель уменьшает размерность решаемой задачи: уменьшается количество правил сопоставления образцов ситуаций с управляющими решениями.

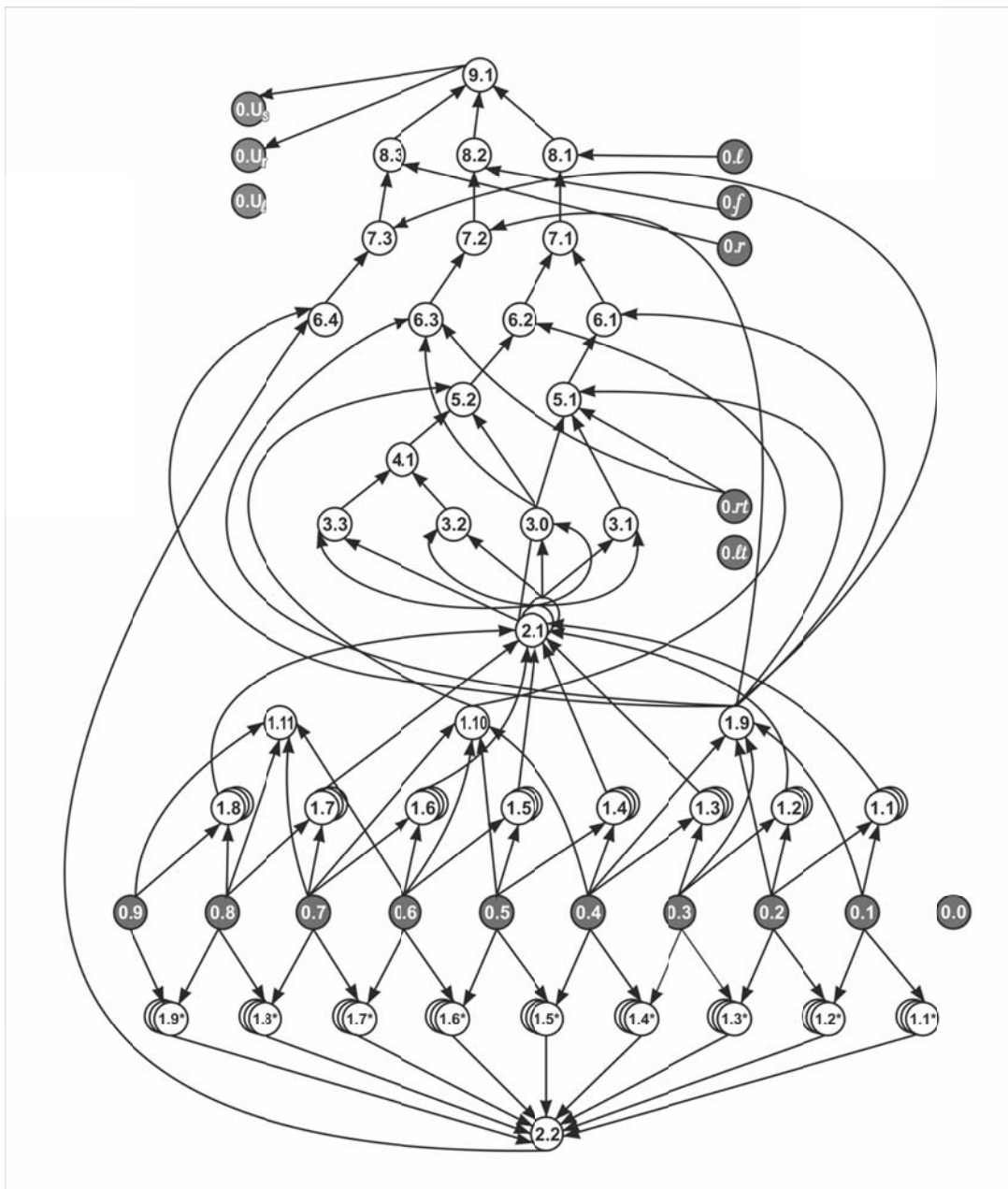


Рис. 4. Гранулярная структура, представляющая знания о категории «безопасно для поворота направо»

Рассмотренная в статье модель верифицирована с помощью разработанной программной среды, поддерживающей представление гранулярной структуры (знания в виде категорий ситуаций) и гранулярный компьютеринг.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ashton K. Making sense of IoT. How the Internet of Things became humanity's nervous system [Elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: [http://www.arubanetworks.com/assets/eo/HPE\\_Aruba\\_IoT\\_eBook.pdf](http://www.arubanetworks.com/assets/eo/HPE_Aruba_IoT_eBook.pdf)
2. Davenport T., Kirby J. Just How smart are smart machines [Elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: [http://ilp.mit.edu/media/news\\_articles/smr/2016/57306.pdf](http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2016/57306.pdf)
3. Elmenreich W. Intelligent Methods for Embedded Systems [Elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: [https://www.researchgate.net/publication/2915435\\_Intelligent\\_Methods\\_for\\_Embedded\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/2915435_Intelligent_Methods_for_Embedded_Systems)



4. Alippi C. Intelligence for Embedded Systems: a Methodological approach, Springer, - 2014, pp. 283
5. Liu D. Design and control of intelligent robotic systems [Текст] / Dikai Liu, Lingfeng Wang, Kay Chen Tan et al. – 1st edition. – Berlin, [etc.] : Springer, 2009. – 480 p. – (Studies in Computational Intelligence).
6. Kargin A.O. / Kargin A.O., Tymchuk O.S., Isaenkov K.O., Galich G.B. Model sensoroji pamjati intelektualnoji mashini z mehanizmom uzagalnennja ta abstraguvannja // Sistemi ozbroennja ta vijskova tehnika / HUPS im. I. Kosheduba MOU, Kharkiv, – 2015. – №3(43). – S.85-88.
7. Pigat A. Fuzzy modelling and control. Physica-Verlag Heidelberg, – 2001. – 798 s
8. Petrenko T. Adaptive Behavior Control Model of Non Player Character [Текст] / T. Petrenko, O. Tymchuk // Proceedings of the 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim-AMSS), Cambridge, United Kingdom. – 10-12 Apr. 2013. – P. 39-44.
9. Clancey W.J. Heuristic classification / W.J. Clancey // Artificial Intelligence – 1985 – №27 – P. 289-350.
10. Chandrasekaran B. Generic tasks in knowledge-based reasoning: high-level building blocks for expert systems design / B. Chandrasekaran // IEEE Expert – 1986 – №1(3) – P. 23-30.
11. Zadeh L.A. Fuzzy sets and information granularity / L. Zadeh // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications – Amsterdam: North-Holland, 1979 – pp.3–18.
12. Yao Y.Y. A unified framework of granular computing / W. Pedrycz, A. Skowron, V. Kreinovich (eds) // Handbook of granular computing – Wiley, Hoboken, 2008 – pp. 401-410.
13. Skowron A, Jankowski A, Dutta S. (2015) Toward problem solving support based on big data and domain knowledge: Interactive granular computing and adaptive judgement / Japkowicz N, Stefanowski J (eds) // Big Data Analysis. Studies in Big Data – Springer, Heidelberg, 2015.
14. Skowron A. Interactive granular computing / A. Skowron, A. Jankowski, S. Dutta // Granular Computing – 2016 – Vol. 1, Issue 2 – pp 95–113.
15. H. Liu, A. Rule-based systems: a granular computing perspective / H. Liu, A. Gegov, M. Cocea // Granular Computing. – 2016 – Vol. 1, – pp. 259–274.
16. Kargin A. A. Vvedeniye v intelektual'nyye mashiny. Kniga 1. Intelektual'nyye regulatory [Tekst] / A. A. Kargin. – Donetsk: Nord-Press, DonNU, 2010. – 526 s.

**Рецензент:** *д.т.н., проф. Соколова Н.А.,  
Херсонский национальный технический университет*