

**На правах рукописи**



**Шарапов Юрий Альбертович**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ РОБОТОВ,  
СПОСОБНЫХ ЗАБЫВАТЬ ИНФОРМАЦИЮ**

**05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ**

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор Пенский Олег Геннадьевич

**Официальные оппоненты:** Кулаков Феликс Михайлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (г. Санкт-Петербург), профессор кафедры механики управляемого движения;

Шека Андрей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), программист 1 категории Отдела интеллектуальных систем и робототехники.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «30» января 2019 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.25 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, зал заседаний диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», по адресу <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=285903>.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



*В. Г. Пименов*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время одними из актуальных направлений исследований в робототехнике является создание персональных роботов. В 2018-2020 годах их продажи по прогнозам Международной федерации робототехники будут составлять 10,5 миллионов единиц, что оценивается в 7,5 миллиардов долларов США. Таким образом, объем продаж вырастет на 40% по сравнению с 2017 годом. Ожидается, что этот рынок будет значительно расти в течение следующих 20 лет.

Создание персональных роботов идет по пути моделирования различных психических процессов человека, основными из которых на данный момент являются память и эмоции. Для того чтобы взаимодействовать с человеком, роботу необходимо накапливать информацию из окружающего мира. Такие ученые, как *P. Baxter*, *W. Browne*<sup>[1]</sup>, отмечают, что память является необходимым условием для любой формы обучения. Однако если робот будет запоминать каждую деталь происходящих событий, со временем произойдет переполнение его памяти. Одно из решений, которое предлагают ученые – математическое моделирование механизмов забывания и обобщения информации.

*L. Correia* и *A. Abreu*<sup>[2]</sup> моделируют в работе такие психические процессы, как утомление (пресыщение) и забывание. *Z. Kira* и *R. Arkin*<sup>[3]</sup> используют механизм рассуждения на основе прецедентов (Case-Based Reasoning system), описывают несколько стратегий определения прецедента, который удаляется при переполнении памяти. *S. Freedman* и *J. Adams*<sup>[4]</sup> предлагают алгоритм забывания ActSimple, который с некоторыми модификациями объединяет в себе алгоритм ACT-R<sup>[5]</sup>, имитирующий стирание информации из памяти с течением времени, и алгоритм SIMPLE<sup>[6]</sup>, имитирующий интерференцию памяти человека, т.е. обобщение информации.

Ряд зарубежных ученых (*F. Alnajjar*, *A.A. Freitas*, *W.C. Ho*, *M.Y. Lim*, *P.A. Vargas* и др.<sup>[7,8,9,10,11,12]</sup>) моделируют процесс забывания на основе пред-

---

<sup>1</sup> *Baxter P., Browne W.* Memory as the substrate of cognition: A developmental cognitive robotics perspective. In: Johansson, B., Sahin, E., Balkenius, C. (eds.) // proceedings of the International Conference on Epigenetic Robotics (EpiRob). 2010. pp. 19-26.

<sup>2</sup> *Correia L., Abreu A.* Forgetting and Fatigue in Mobile Robot Navigation // Advances in Artificial Intelligence – SBIA 2004 Lecture Notes in Computer Science. 2004. С. 434–443.

<sup>3</sup> *Kira Z., Arkin R.* Forgetting bad behavior: memory for case-based navigation // 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566).

<sup>4</sup> *Freedman S.T., Adams J.A.* Filtering Data Based on Human-Inspired Forgetting // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). 2011. № 6 (41). С. 1544–1555.

<sup>5</sup> *Anderson J.R., Lebiere C.* The atomic components of thought // Psychology Press, Taylor et Francis Group, 2012.

<sup>6</sup> *Brown G.D.A., Chater N., Neath I.* A temporal ratio model of memory // Psychol. Rev., vol. 114, no. 3, pp. 539–576, Jul. 2007.

<sup>7</sup> *Alnajjar F., Zin I.B.M., Murase K.A.* Hierarchical Autonomous Robot Controller for Learning and Memory: Adaptation in a Dynamic Environment // Adaptive Behavior. 2009. № 3 (17). С. 179–196.

<sup>8</sup> *Freitas A.A., de Carvalho A.A.* Tutorial on Hierarchical Classification with Applications in Bioinformatics // In: D. Taniar (Ed.) Research and Trends in Data Mining Technologies and Applications. 2007. pp. 175-208.

<sup>9</sup> *Ho W.C., Lim M., Vargas P.A., Enz S., Dautenhahn K., Aylett R.* An Initial Memory Model for Virtual and Robot Companions Supporting Migration and Long-term Interaction, ROMAN. 2009.

<sup>10</sup> *Lim M., Ho W.C., Vargas P.A., Enz S., Aylett R.* A Socially-Aware Memory for Companion Agents // materials of 9th International Conference on Intelligent Virtual Agents. Amsterdam. 2009.

ставления информации в виде иерархических структур данных. В течение жизни робота в иерархической памяти создаются вершины, отражающие события окружающего мира. Авторы работ задают метрики, которые определяют важность таких вершин и возможность их удаления при переполнении памяти.

Еще одним перспективным направлением развития современной робототехники является создание эмоциональных роботов. На основе представленного в диссертации обзора литературы можно выделить три основные ветви эмоциональной робототехники:

1. роботы, которые могут распознавать эмоции и эмоциональные реакции человека или других роботов;
2. роботы, которые могут генерировать эмоции на своем «лице»;
3. роботы, которые используют принципы функционирования эмоций человека для решения прикладных задач.

Исследования данной диссертации можно отнести к третьей ветви эмоциональной робототехники. Следующие работы предшественников также относятся к третьей ветви.

*D. Dorner* и *K. Hille* отразили в модели робота<sup>[13]</sup> три составляющие: мотивацию, эмоции и когнитивные процессы. Мотивация робота представлена его потребностью выживания. Эмоции отвечают за механизм управления когнитивными процессами для удовлетворения потребностей. *M. Lim* в диссертации<sup>[14]</sup> приводит практическую реализацию робота-экскурсовода, основанную на модели *D. Dorner* и *K. Hille*. Потребностью робота-экскурсовода является поддержание производительности и взаимодействие с пользователем.

Авторы перечисленных выше работ говорят о том, что принципы функционирования памяти робота должны быть заимствованы у человека. Однако не объясняют, почему это будет «полезным» приобретением для робота.

В теории эмоциональных роботов *Пенского-Черникова*<sup>[15]</sup> другой взгляд на «заимствование» роботом биологических особенностей человека. Главный акцент делается на выполнении роботом своей задачи. Для этого роботу необязательно обладать особенностями, присущими человеку. Также *О.Г. Пенский* и *К.В. Черников* применяют психологические теории в некоторых случаях для того, чтобы решить концептуальные проблемы таким способом, чтобы математическая модель поведения робота была понятна для интерпретации человеком.

В приведенных выше работах можно выделить несколько недостатков. Например, *L. Correia* и *A. Abreu* моделируют утомление (пресыщение) изолированно от памяти и забывания в частности, хотя в психологии человека эти по-

---

<sup>11</sup> *Vargas P.A., Freitas A.A., Lim M., Enz S., Ho W., Aylett R.* Forgetting and Generalisation in Memory Modelling for Robot Companions: a Data Mining Approach // materials of Human Memory for Artificial Agents Symposium at the AISB 2010 convention. De Montfort University, Leicester, UK. 2010.

<sup>12</sup> *Vargas P.A., Ho W., Lim M., Enz S., Aylett R.* To forget or not to forget: towards a roboethical memory control // Google Scholar. 2009.

<sup>13</sup> *Dorner D., Hille K.* Artificial souls: motivated emotional robots // 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. 1995. С. 3828–3832.

<sup>14</sup> *Lim M.Y.* Emotions, Behaviour and Belief Regulation in An Intelligent Guide with Attitude // Ph.D. thesis, School of Mathematical and Computer Sciences, Heriot-Watt University. Edinburg. 2007.

<sup>15</sup> *Пенский О.Г., Черников К.В.* Основы математической теории эмоциональных роботов: монография. – Пермь: Перм.гос.ун-т. – 2010. – 256с.

нения взаимосвязаны. Уровень реакции робота на раздражитель в период утомления остается постоянным, хотя у человека снижается. В модели иерархической памяти робота *F. Alnajjar, I. Zin* и *K. Murase* присутствуют ограничения на количество вершин в иерархической структуре памяти, возможно появление проблем в случае необходимости привязать к нескольким конечным вершинам древовидной структуры новую вершину-событие.

Алгоритм АСТ-R, который использует модель *S. Freedman* и *J. Adams*, в некотором смысле похож на принципы забывания информации в модели *Пенского-Черникова*. И та, и другая модель основана на забывании информации с течением времени. Модель АСТ-R и модель *Пенского-Черникова* вводят коэффициенты «забывания», которые определяют, как быстро наступит тот момент, когда информацию можно считать забытой. Однако в модели *S. Freedman* и *J. Adams* активационный уровень привязан к клеткам карты, по которой перемещается робот. Можно считать, что состояние памяти робота отражают характеристики самих клеток. Если такую модель предложить для робота, который не использует клеточное поле, то она не всегда будет работать. В этом смысле модель *Пенского-Черникова* является более универсальной.

Приведенные в обзоре диссертационной работы математические модели эмоций решают либо частную прикладную задачу (например, *В.Л. Розалиев* моделирует эмоциональные реакции пользователя автоматизированной системы, *Е.В. Вишневетская* диагностирует структуры эмоциональной компетентности ребенка), либо описывают не все виды эмоций (теория *П.В. Симонова*<sup>[16]</sup>, теория *Дорнера-Хилла*, модели *Ю.Т. Глазунова*<sup>[17]</sup> и *В.Э. Карпова*<sup>[18]</sup> описывают только эмоции базирующиеся на потребности), либо для создания каждой конкретной эмоции необходимо создать свою функцию (модель *Фоминых-Леонтьева*<sup>[19]</sup>), либо нестрого вводят математическое понятие эмоции. В моделях *Ю.Т. Глазунова* и *В.Э. Карпова* не учитывается эмоциональная память (забывание предыдущих эмоций). В работах *D. Dorner, K. Hille* и *M. Lim* память робота – аналог хранилища данных. Механизм забывания не моделируется.

Тем не менее *D. Dorner* и *K. Hille* показали, что моделирование эмоций в работе играет важную роль для управления его когнитивными процессами и принятия роботом решений. Теория *D. Dorner* и *K. Hille* уникальна тем, что эмоции не заданы явно. Они выражаются через управление информационными процессами и выбор действий робота. Эта идея является основополагающей и в теории *Пенского-Черникова*. Однако в теории *Пенского-Черникова* есть математическое определение функции эмоции робота.

---

<sup>16</sup> *Симонов П.В.* Двигательный стереотип и физиология эмоций/ П.В. Симонов // XVIII Международный психологический конгресс. Симпозиум 3 – М., 1966 – с.97-99.

<sup>17</sup> *Глазунов Ю.Т.* Эмоциональное переживание в системе целеполагания человека // Вестник МГТУ. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/emotsionalnoe-perezzhivanie-v-sisteme-tselepolaganiya-cheloveka> (дата обращения: 14.05.2018).

<sup>18</sup> *Карпов В.Э.* Эмоции роботов // XII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010 (20-24 сентября 2010 г., Тверь): Труды конференции, 3, М.: Физматлит, 2010, с. 354-368.

<sup>19</sup> *Леонтьев В.О.* Формулы эмоций. Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ –2008. Труды конференции. Т.1.

Функция эмоции робота  $M(t)$  не задана аналитически, она должна удовлетворять следующим свойствам:

1. Область определения  $M(t)$ :  $t \in [t_0, T_0]$ ,  $0 \leq t_0 < T_0 < \infty$ .
2.  $M(t)$  – дифференцируемая на  $(t_0, T_0)$ , непрерывная и знакопостоянная функция на  $[t_0, T_0]$ .
3.  $M(t_0) = 0$  и  $M(T_0) = 0$ .
4. В области определения существует единственная точка  $z$ , такая, что:  
 $z \neq t_0, z \neq T_0$  и  $\frac{dM(z)}{dt} = 0$ .

В теории *Пенского-Черникова* моделируются не только эмоции роботов, но и процесс накопления информации, которая появляется в результате «возникновения» эмоций в работе. Накопление такой информации (элементарного псевдовоспитания) включает в себя механизм забывания информации с течением времени. Такое проявление эмоций в виде элементарного псевдовоспитания может влиять на поведение робота. В теории *Пенского-Черникова* введены принципы функционирования роботов, которые в общем случае напрямую не зависят от биологической структуры памяти человека и его потребностей. Однако в частном случае в рамках заданных принципов возможно использование математических функций, описывающих психологию человека.

В работе *К.В. Черникова*<sup>[20]</sup> логическая сторона информации, получаемой роботом, не затронута, хотя созданы предпосылки развития моделей в этом направлении. В связи с этим, **актуальным** и целесообразным является разработка логической составляющей накопления информации на базе существующей теории эмоциональных роботов и создание математической теории, которая на основе единого математического аппарата описывает поведение робота с точки зрения логического опыта и эмоций в условиях забывания части полученной информации.

В рамках данной диссертации мы рассматриваем широкую тему, но на текущем этапе развития научной работы ее наиболее естественно сузить и рассмотреть следующее определение робота.

Под *роботом, способным принимать решения*, будем понимать автомат, который определяется следующими характеристиками:

1.  $T$  – максимальное количество тактов функционирования автомата;
2. множество входных сигналов  $s = \{s_0, \dots, s_T\}$ ,  $s_i \in \square$ ,  $s_i > 0$ ;
3. множество состояний  $V = \{v_0, \dots, v_T\}$ , где  $v_i = \{\Omega_i, R_i\}$ ,  $\Omega_i, R_i \in \square$ ,  $\Omega_i$  – логическая составляющая состояний  $v_i$ ,  $R_i$  – эмоциональная составляющая состояний  $v_i$ ,  $v_0 = \{0, 0\}$ ;

---

<sup>20</sup> Черников К.В. Математические модели роботов с неабсолютной памятью // диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Пермь. 2013.

4. множество выходных сигналов  $B = \{b_0, \dots, b_T\}$ , где  $b_i \in \{L, E, D\}$ ,  $L$  – логическое решение,  $E$  – эмоциональное решение,  $D$  – ступор (отсутствие логического или эмоционального решения);
5. функция переходов автомата –  $g$ , которая каждой паре  $(s_i, v_{i-1})$ , где  $s_i \in s$ ,  $v_{i-1} \in V$ , ставит в соответствие состояние  $g(s_i, v_{i-1}) \in V$ ;
6. функция выходов автомата –  $f$ , которая каждой паре  $(s_i, v_{i-1})$ , где  $s_i \in s$ ,  $v_{i-1} \in V$ , ставит в соответствие выходной сигнал  $f(s_i, v_{i-1}) \in B$ .

Таким образом, функция переходов автомата  $g$  на каждом такте  $i$  вычисляет значение логической составляющей  $\Omega_i$  состояния  $v_i$  и эмоциональной составляющей  $R_i$  состояния  $v_i$  для входного сигнала  $s_i$  и состояния  $v_{i-1} = \{\Omega_{i-1}, R_{i-1}\}$ . Множество состояний  $V$  назовем множеством *состояний робота*. Функцию переходов автомата  $g$  назовем *функцией переходов робота*. Функция выходов  $f$  каждому состоянию  $v_i = \{\Omega_i, R_i\}$ , полученному на выходе функции  $g$ , ставит в соответствие выходной сигнал  $b_i \in \{L, E, D\}$ . Поэтому функцию выходов автомата  $f$  назовем *функцией принятия решений роботом*.

**Объектом исследования** предлагаемой диссертационной работы являются робототехнические программные системы.

**Предметом исследования** является поведение робота, способного забывать информацию, в зависимости от накопленного им логического опыта и эмоционального псевдовоспитания.

**Цель** диссертационного исследования заключается в разработке математических моделей принятия решений роботом для построения функции переходов *робота* и функции принятия решений *роботом*.

Для достижения цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Разработать математическую модель накопления логического опыта *роботом* для построения логической составляющей *состояния робота*, которое является выходным значением *функции переходов робота*.
2. Разработать математическую модель эмоционального псевдовоспитания *робота* для построения эмоциональной составляющей *состояния робота*, которое является выходным значением *функции переходов робота*.
3. Разработать математическую модель принятия решений *роботом* для построения *функции принятия решений роботом*.
4. Разработать компьютерные программы, реализующие предложенные математические модели.
5. Провести верификацию построенных математических моделей с помощью натуральных экспериментов на основе психологии человека.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. В рамках теории эмоциональных роботов построены математические модели накопления роботом информации, полученной от его рецепторов, накопления логического опыта и его псевдовоспитания для нескольких уровней накопления. Таким образом, построена *функция переходов робо-*

*та* согласно введенному выше определению *робота, способного принимать решения*.

2. Предложена математическая модель принятия альтернативных решений роботом в зависимости от его эмоционального псевдовоспитания и логического опыта. Таким образом построена *функция принятия решений роботом* согласно введенному выше определению *робота, способного принимать решения*.
3. Решена задача идентификации параметров равномерного многоуровневого процесса накопления информации, который аппроксимирует процесс накопления информации роботом.
4. Разработаны программа определения коэффициентов кратковременной памяти человека и программа для решения задачи идентификации параметров равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в создании математических моделей для решения задач седьмого технологического уклада, в основе которого лежат приборо- и роботостроение, биокомпьютерные системы и биомедицина, т.е. связь искусственных и органических «живых» систем.

**Практическая значимость** исследования заключается в следующем:

1. Разработанная математическая модель принятия решений роботом в зависимости от эмоционального псевдовоспитания и логического опыта может быть применена при создании программного обеспечения коботов (collaborative robots), которые физически взаимодействуют с людьми в совместной рабочей зоне на производстве.
2. Предложенные математические модели, которые в качестве входных параметров имеют значения, соответствующие психологическим характеристикам человека, могут использоваться при проектировании и создании персональных роботов для этого человека.
3. Предложенные математические модели могут использоваться при проектировании компьютерных игр с имитацией персонажами психологического поведения человека.
4. Разработанные математические модели коэффициентов кратковременной памяти роботов могут быть использованы для подбора людей для выполнения различных задач, требующих оценки их памяти.

В процессе исследования использовались **методы** математического моделирования, математического анализа, линейной алгебры, методы оптимизации, численные методы и методы проектирования программных комплексов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель накопления логического опыта *роботом* для построения логической составляющей *состояния робота*, которое является выходным значением *функции переходов робота*.
2. Математическая модель эмоционального псевдовоспитания *робота* для построения эмоциональной составляющей *состояния робота*, которое является выходным значением *функции переходов робота*.



3. Решение задачи идентификации параметров равномерного многоуровневого процесса накопления информации, который аппроксимирует процесс накопления информации роботом.
4. Математическая модель принятия решений роботом для построения *функции принятия решений роботом*, которая на основе значений *функции переходов робота* определяет, множество выходных сигналов  $B = \{b_0, \dots, b_T\}$ , где  $b_i \in \{L, E, D\}$ ,  $L$  – логическое решение,  $E$  – эмоциональное решение,  $D$  – ступор (отсутствие логического или эмоционального решения).
5. Алгоритмы накопления роботом логического опыта, эмоционального псевдовоспитания для нескольких уровней накопления.
6. Программы определения коэффициентов кратковременной памяти человека и решения задачи идентификации параметров равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом.

**Научные положения и достоверность результатов** проиллюстрированы натурными экспериментами.

**Основные результаты научного исследования** прошли апробацию и докладывались на научно-практических конференциях: Международная конференция «Информационные технологии в науке, образовании и управлении» (г. Гурзуф, 22 мая - 01 июня 2015 г.); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Фундаментальные и прикладные проблемы математики, механики, информатики – 2015» (г. Пермь, 26-28 мая 2015 г.); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Современные проблемы математики и её прикладные аспекты – 2013» (г. Пермь, 29-31 октября 2013 г.).

Диссертационная работа обсуждалась на научных семинарах кафедр Пермского государственного национального исследовательского университета: кафедра механики сплошных сред и вычислительных технологий (руководитель – к.ф.-м.н, доцент В.М. Пестренин); кафедра информационных систем и математических методов в экономике (руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.П. Максимов), кафедра процессов управления и информационной безопасности (руководитель – д.т.н, профессор О.Г. Пенский); кафедра математического обеспечения вычислительных систем (руководитель к.ф.-м.н., доцент С.И. Чуприна).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 15 публикациях, в том числе в 5 публикациях в изданиях из перечня ВАК, 1 монографии. Получены 2 свидетельства Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка из 142 наименований и 4 приложений. Объем работы: 187 страниц текста, включающего 33 рисунка, 14 таблиц и 4 приложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Автор выражает благодарность за консультации и рекомендации при подборе психологических методик для верификации математической модели долговременной памяти, зависящей от кратковременной, сотрудникам кафедры общей и клинической психологии ПГНИУ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** представлена ретроспектива развития робототехники, раскрыта проблема, обоснована актуальность темы диссертации, введено математическое понятие робота, сформулированы цель и задачи исследований.

В **первой главе** приведены общие свойства памяти роботов, основные определения и свойства коэффициентов эмоциональной памяти роботов, способных забывать информацию. Эти математические модели для одного уровня псевдовоспитания описаны в работах *О.Г. Пенского* и *К.В. Черникова*. Автором диссертационной работы введены основные понятия и математические модели накопления роботами информации, полученной от их рецепторов, для одного уровня накопления информации.

Далее автор предлагает обобщение математической модели эмоциональной памяти, предложенной в работах *О.Г. Пенского* и *К.В. Черникова*<sup>[21,22,23]</sup>, и строит математическую модель накопления информации роботом для нескольких уровней накопления. Модель информационной памяти робота в диссертационной работе использует идеи советского психолога *Д.Н. Узнадзе* о существовании у человека установок. Так, по *Д.Н. Узнадзе*, внешние воздействия на человека отражаются в его реакции не напрямую, а опосредованно через установку. Установка определяет комплексную реакцию всех психологических и физиологических подсистем человека на внешний раздражитель.

В теории эмоциональных роботов эта реакция выражается в генерации роботом порций информации в ответ на внешний раздражитель. Такая порция информации называется эмоциональной псевдоустановкой. «Накопление» эмоциональных псевдоустановок в условиях забывания ранее накопленной информации описывается процессом эмоционального псевдовоспитания робота.

Согласно исследованиям *Д.Н. Узнадзе*, с одной стороны, установка достаточно устойчива и не меняется в течение длительного периода жизни человека. С другой стороны, некоторое серьезное воздействие на человека может изменить его установку. Изменяется реакция человека на внешние раздражители и, можно считать, что это означает начало нового периода его жизни.

Будем считать, что как только эмоциональная псевдоустановка изменилась, робот переходит на следующий уровень эмоционального псевдовоспитания. Построим модель эмоционального псевдовоспитания для нескольких уровней.

---

<sup>21</sup> *Пенский О.Г., Черников К.В.* Гипотеза о психологических установках в аспекте математического моделирования процесса воспитания эмоциональных роботов // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – №3. – С. 129-132.

<sup>22</sup> *Пенский О.Г., Черников К.В.* Основы математической теории эмоциональных роботов: монография. – Пермь: Перм.гос.ун-т. – 2010. – 256с.

<sup>23</sup> *Черников К.В.* Математические модели роботов с неабсолютной памятью // диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2013.

Будем считать, что в рамках каждого уровня процесс псевдовоспитания проходит по модели, описанной в работах *О.Г. Пенского* и *К.В. Черникова*.

В диссертационной работе предлагается рассматривать процесс накопления информации роботом аналогично процессу эмоционального псевдовоспитания. Псевдоустановкой в этом случае будем считать порцию информации, полученную от рецепторов робота.

*Определение 1.* Информационной псевдоустановкой  $h$  назовем фиксированную порцию информации, одинаковую для некоторой последовательности сменяющих друг друга тактов.

*Определение 2.* Уровнем  $l$  накопления информации роботом назовем количество смен значений информационной псевдоустановки  $h$  до текущего такта процесса накопления информации.

Обозначим порцию информации  $s_i^{[l]}$  как величину информации, которую запоминает робот на такте  $i$  уровня накопления  $l$ . Отметим, что порция информации  $s_i^{[l]}$  удовлетворяет неравенству  $0 < s_i^{[l]} < \infty$  и измеряется в битах.

Принимается гипотеза о том, что многоуровневый процесс накопления информации роботом для нескольких уровней накопления информации описывается рекуррентным соотношением

$$\begin{cases} S_{i+1}^{[l]} = h^{[l]} + \lambda^{[l]} \cdot S_i^{[l]} \\ S_0^{[l]} = h^{[l]} \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad l = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $i$  – номер информационного такта;  $h^{[l]}$  – информационная псевдоустановка для всех тактов на уровне  $l$ , т.е.  $h^{[l]} = s_0^{[l]} = s_1^{[l]} = \dots$  и  $0 < h^{[l]} < \infty$ ;  $S_{i+1}^{[l]}$  – количество информации, которую запомнил робот в результате  $i + 1$  информационных тактов;  $\lambda^{[l]}$  – коэффициент кратковременной информационной памяти для всех тактов на уровне  $l$ ,  $0 < \lambda^{[l]} \leq 1 - \delta$ , где  $\delta \in (0;1)$ ,  $\delta = const$ .

Предельное значение накопленной информации на уровне  $l$  обозначим следующими равенствами:

$$U^{[l]} = \lim_{i \rightarrow \infty} S_i^{[l]} = \frac{h^{[l]}}{1 - \lambda^{[l]}}.$$

Введем следующее условие. Будем считать, что накопление информации на уровне  $l$  заканчивается при выполнении неравенства  $|U^{[l]} - S_i^{[l]}| < \sigma^{[l]}$  и продолжается на уровне  $l+1$  ( $\sigma^{[l]}$  – величина отклонения текущего значения величины накопленной информации от предельной величины информации на уровне  $l$ ).

Вводится алгоритм накопления роботом информации на нескольких уровнях, который назван именем советского психолога *Д.Н. Узнадзе*. В основе алгоритма лежит формула накопления информации на нескольких уровнях и критерий для перехода с уровня  $l$  на уровень  $l + 1$ .

*Определение 3.* Равномерным многоуровневым процессом накопления информации роботом назовем процесс накопления информации с равными коэффициентами кратковременной информационной памяти  $\lambda^{[l]}$  ( $0 < \lambda^{[l]} \leq 1 - \delta$ ,

$0 < \delta < 1$ ,  $\delta = const$ ) и равными величинами отклонения текущего значения величины накопленной информации от предельной величины информации на каждом уровне  $l$ , т.е.  $\lambda = \lambda^{[1]} = \lambda^{[2]} = \dots$  и  $\sigma = \sigma^{[1]} = \sigma^{[2]} = \dots$  на протяжении всего процесса накопления информации роботом.

Равномерный многоуровневый процесс накопления информации можно представить в следующем виде:

$$S^{[l]} = \frac{h^{[1]}}{(1-\lambda)^{l-1}} - \sigma \frac{1-(1-\lambda)^{l-1}}{\lambda(1-\lambda)^{l-2}}, \quad (1)$$

где  $S^{[l]}$  – величина накопленной роботом информации на последнем такте уровня  $l$ .

*Определение 4.* Долю величины отклонения  $\sigma^{[l]}$  от предельной величины информации  $U^{[l]}$ , при которой осуществляется переход на новый уровень накопления информации, назовем относительной восприимчивостью робота к накоплению информации  $\beta^{[l]}$ . Таким образом,

$$\beta^{[l]} = \frac{\sigma^{[l]}}{U^{[l]}}.$$

Зафиксируем  $h = h^{[1]}$ . Преобразуем формулу (1) с учетом относительной восприимчивости робота к накоплению информации  $\beta$  ( $\beta = const$ ).

$$S^{[l]} = \frac{\beta \cdot h}{\lambda} + \frac{h}{(1-\lambda)^{l-1}} \left( 1 - \frac{\beta}{\lambda} \right). \quad (2)$$

Для равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом переход с одного уровня на другой отражает следующее равенство:

$$S^{[l]} \frac{1 - \lambda^{i^*+1}}{1 - \lambda} = S^{[l+1]},$$

где  $(i^* + 1)$  – такт уровня  $l$ , на котором происходит переход на уровень  $l + 1$ .

Из формулы (1) следует, что при заданном  $\sigma$  равномерный многоуровневый процесс накопления информации роботом на нескольких уровнях накопления информации, определяется следующими характеристиками:

1.  $\lambda$ , коэффициентом кратковременной информационной памяти;
2.  $h$ , информационной псевдоустановкой.

В диссертационной работе решена задача идентификации параметров  $h$  и  $\lambda$  равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом, если известна последовательность экспериментальных значений накопленной информации роботом  $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_n$ , где  $n$  – количество замеров, при заданном  $\sigma$ .

Минимизируем квадрат отклонения равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом в узловых точках от набора экспериментальных значений накопленной роботом информации  $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_n$ . Данную функцию будем называть целевой функцией.

Запишем целевую функцию в следующем виде:

$$J_{l,i}(\lambda, h) = \sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j - S_{i_j}^{[l_j]} \right)^2.$$

Разделим задачу идентификации параметров на следующие подзадачи:

1. Генерация всех возможных последовательностей  $\{l\} = l_1, l_2, \dots, l_n$  и  $\{i\} = i_1, i_2, \dots, i_n$ ;
2. Решение оптимизационной задачи нахождения минимума целевой функции  $J_{l,i}(\lambda, h)$  методом множителей Лагранжа для каждой сгенерированной пары последовательностей  $\{l\}$  и  $\{i\}$ .

Решением задачи идентификации параметров будет являться точка  $(\lambda^*, h^*) = \arg \min_{\lambda, h} \left\{ \min_{l, i} (J_{l,i}(\lambda, h)) \right\}$ .

Равномерный многоуровневый процесс накопления информации для нескольких уровней на основе формулы (1) представим следующим равенством:

$$S^{[l]} = \left( \frac{h}{(1-\lambda)^{l-1}} - \sigma \frac{1-(1-\lambda)^{l-1}}{\lambda(1-\lambda)^{l-2}} \right) \frac{1-\lambda^{l+1}}{1-\lambda}.$$

С учетом того, что метод множителей Лагранжа предполагает использование ограничений типа равенств или нестрогих неравенств, оптимизационная задача примет следующий вид:

$$J_{l,i}(\lambda, h) = \sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j - \left( \frac{h}{(1-\lambda)^{l_j-1}} - \sigma \frac{1-(1-\lambda)^{l_j-1}}{\lambda(1-\lambda)^{l_j-2}} \right) \frac{1-\lambda^{l_j+1}}{1-\lambda} \right)^2 \rightarrow \min,$$

$$-\lambda + \delta \leq 0, \quad \lambda + \delta - 1 \leq 0, \quad -h + \varepsilon \leq 0, \quad h - M \leq 0,$$

где  $0 < \delta \ll 1$ ,  $\delta = const$ ,  $0 < \varepsilon \ll 1$ ,  $\varepsilon = const$ ,  $M$  – фиксированное больше число.

Функция Лагранжа с учетом того, что множители Лагранжа будут обозначены, как  $\psi_i$  ( $i = \overline{0,4}$ ), будет выглядеть следующим образом:

$$L_{l,i}(\lambda, h) = \psi_0 \sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j - S_{i_j}^{[l_j]} \right)^2 + \psi_1(-\lambda + \delta) + \psi_2(\lambda + \delta - 1) + \psi_3(-h + \varepsilon) + \psi_4(h - M).$$

Условия стационарности в методе множителей Лагранжа описываются следующими цепочками равенств:

$$\frac{\partial L_{l,i}(\lambda, h)}{\partial h} = \psi_0 \left[ 2 \sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j - S_{i_j}^{[l_j]} \right) \left( -\frac{\partial S_{i_j}^{[l_j]}}{\partial h} \right) \right] - \psi_3 + \psi_4 = 0,$$

$$\frac{\partial L_{l,i}(\lambda, h)}{\partial \lambda} = \psi_0 \left[ 2 \sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j - S_{i_j}^{[l_j]} \right) \left( -\frac{\partial S_{i_j}^{[l_j]}}{\partial \lambda} \right) \right] - \psi_1 + \psi_2 = 0.$$

Перечислим соотношения неотрицательности:

$$\psi_0 \geq 0, \quad \psi_1 \geq 0, \quad \psi_2 \geq 0, \quad \psi_3 \geq 0, \quad \psi_4 \geq 0.$$

Соотношения дополняющей нежесткости выглядят следующим образом:

$$\psi_1(-\lambda + \delta) = 0, \psi_2(\lambda + \delta - 1) = 0, \psi_3(-h + \varepsilon) = 0, \psi_4(h - M) = 0.$$

Получаем систему уравнений для нахождения критических точек, в которых целевая функция может достигать минимума.

$$h = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \left( \bar{S}_j - \sigma \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{\lambda} \right) \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} \right)^2} + \frac{\sigma(1 - \lambda)}{\lambda};$$

$$\sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j \lambda - (h\lambda - \sigma(1 - \lambda)(1 - (1 - \lambda)^{l_{j-1}})) \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} \right) \times$$

$$\times \left( l_j h \lambda^2 \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j+1}} - \frac{(i_j + 1) \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} (h\lambda - \sigma(1 - \lambda)(1 - (1 - \lambda)^{l_{j-1}})) - \sigma \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} ((1 - \lambda)^{l_j} + l_j \lambda - 1) \right) = 0.$$

Еще одно множество критических точек, в которых целевая функция может достигать минимума, лежит на границе области определения целевой функции  $J_{l,i}(\lambda, h)$ . Это множество отражает следующее уравнение:

$$\sum_{j=1}^n \left( \bar{S}_j \lambda - (\varepsilon \lambda - \sigma(1 - \lambda)(1 - (1 - \lambda)^{l_{j-1}})) \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} \right) \times$$

$$\times \left( l_j h \lambda^2 \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j+1}} - \frac{(i_j + 1) \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} (\varepsilon \lambda - \sigma(1 - \lambda)(1 - (1 - \lambda)^{l_{j-1}})) - \sigma \frac{1 - \lambda^{i_j+1}}{(1 - \lambda)^{l_j}} ((1 - \lambda)^{l_j} + l_j \lambda - 1) \right) = 0.$$

По теореме Вейерштрасса непрерывная функция на непустом ограниченном замкнутом подмножестве конечномерного пространства достигает своего абсолютного минимума. По построению целевая функция  $J_{l,i}(\lambda, h)$  непрерывна на замкнутой области определения  $\delta \leq \lambda \leq 1 - \delta$ ,  $\varepsilon \leq h \leq M$ , поэтому оптимизационная задача для заданных последовательностей  $\{l\}$  и  $\{i\}$  имеет решение.

Далее приводится алгоритм генерации всех возможных последовательностей  $\{l\} = l_1, l_2, \dots, l_n$  и  $\{i\} = i_1, i_2, \dots, i_n$ , соответствующих последовательности экспериментальных величин накопленной роботом информации  $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_n$ .

Алгоритм генерации последовательности  $\{l\}$  удовлетворяет условиям:

1.  $l_j \in [1; L_{MAX}]$ , где  $j = \overline{1, n}$ ;
2.  $\sum_{d=1}^{L_{MAX}} p_d = n$ , где  $p_d$  – количество повторений каждого элемента из множества  $[1; L_{MAX}]$  в перестановке  $\{l\}$ , т.е. сумма повторений каждого элемента равна количеству элементов,  $p_d$  может быть равно нулю для некоторых элементов,  $d \in [1; L_{MAX}]$ ;
3.  $l_k \leq l_m$ , где  $1 \leq k < m \leq n$ , т.е. элементы перестановки отсортированы по возрастанию.

Алгоритм генерации последовательности  $\{i\}$  выполняется для каждой сгенерированной последовательности  $\{l\}$  и удовлетворяет следующим условиям:

1.  $i_j \in [0; J_{MAX}]$ , где  $j = \overline{1, n}$ ;
2.  $i = \tilde{i}^1 \oplus \tilde{i}^2 \oplus \dots \oplus \tilde{i}^{L_{MAX}}$ , где символ  $\oplus$  является знаком конкатенации  $\tilde{i}^d$ , перестановок без повторов,  $d \in [1; L_{MAX}]$ ;
3.  $\tilde{i}^d = \{i_1, \dots, i_{p_d}\}$ , где  $p_d$  – длина перестановки  $\tilde{i}^d$  и равна количеству повторов некоторого элемента  $d$  из множества  $[1; L_{MAX}]$  в перестановке  $\{l\}$  (см. п. 2 условий генерации последовательности  $\{l\}$ );
4. если  $p_d = 0$ , то  $\tilde{i}^d = \emptyset$ ;
5.  $\tilde{i}_u^d < \tilde{i}_v^d$ , где  $1 \leq u < v \leq p_d$  для каждой перестановки  $\tilde{i}^d$ , т.е. элементы каждой перестановки  $\tilde{i}^d$  отсортированы по возрастанию.

Приведен алгоритм определения точки  $(\lambda^*, h^*)$ , доставляющей минимум целевой функции  $J_{l,i}(\lambda, h)$ , которая на множестве последовательностей  $\{l\}$  и  $\{i\}$  имеет минимальное значение. Таким образом, задача идентификации параметров равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом решена.

Численные эксперименты, приведенные в диссертации, показали, что решение задачи устойчиво относительно входных параметров.

Приведены архитектура, основные возможности, визуальный интерфейс программы для решения задачи идентификации параметров.

Во **второй главе** обобщается алгоритм накопления роботом информации, вводится математическое понятие коэффициента долговременной памяти робота. Психологи не дают точного ответа, зависит ли долговременная память от кратковременной. Поэтому в диссертационной работе приведены две соответствующие математические модели долговременной памяти.

Первая математическая модель долговременной памяти устанавливает связь долговременной информационной памяти робота с его кратковременной информационной памятью, относительной восприимчивостью робота к накоплению информации. Такая модель основана на равномерном многоуровневом процессе накопления информации.

*Определение 5.* Коэффициентом долговременной информационной памяти робота  $\Lambda^{[l]}$  на уровне накопления информации  $l$ , назовем величину, удовлетворяющую соотношению

$$\Lambda^{[l]} = \frac{S_{i''}^{[l-2]}}{S_{i'}^{[l-1]}} ,$$

где  $l = 3, 4, 5, \dots$ ,  $S_{i''}^{[l-2]}$ ,  $S_{i'}^{[l-1]}$  являются величинами накопленной информации роботом на последних тактах уровней  $l-2$  и  $l-1$  соответственно.

Из равенства (2) при  $\beta = const$  следует соотношение:

$$\Lambda^{[l]} = (1-\lambda) \frac{\beta(1-\lambda)^{l-2} + \lambda - \beta}{\beta(1-\lambda)^{l-1} + \lambda - \beta}, \quad l = 3, 4, 5, \dots$$

Коэффициент долговременной памяти робота по определению, введенному в данной работе, удовлетворяет двойному неравенству  $0 \leq \Lambda^{[l]} < 1$ . Также необходимо выполнение следующих неравенств, ограничивающих область определения функции  $\Lambda^{[l]}$ :  $0 < \beta < 1$ ,  $l \in N$ ,  $0 < \lambda \leq 1 - \delta$ , где  $\delta \in (0;1)$ ,  $\delta = const$ .

Следующее условие показывает, при каких величинах  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $l$  из области допустимых значений, коэффициент долговременной памяти  $\Lambda^{[l]}$  принадлежит полуинтервалу  $[0,1)$ .

$$\forall l \in N, \forall \beta \in (0, \lambda) \cup \left( \frac{\lambda}{1 - (1-\lambda)^{l-2}}, 1 \right), \forall \lambda \in (0; 1 - \delta], \text{ где } \delta \in (0;1), \delta = const.$$

Вторая математическая модель долговременной памяти описывает ее как независимую от кратковременной. Сняты ограничения  $\lambda = \lambda^{[1]} = \lambda^{[2]} = \dots$  и  $\sigma = \sigma^{[1]} = \sigma^{[2]} = \dots$ , присущие равномерному многоуровневому процессу накопления информации роботом. Коэффициент долговременной памяти может задаваться вручную, так и вычисляться по некоторой формуле. Вторая математическая модель является более общей и включает в себя первую. Назовем вторую модель *математическая модель информационная память робота*.

Вводится условие перехода с уровня  $l$  на уровень  $l+1$  как выполнение неравенства  $|S_i^{[l]} - S_{i-1}^{[l]}| < \zeta$ , где  $0 < \zeta \ll 1$ ,  $\zeta = const$ ,  $\zeta$  – измеряется в битах. Таким образом, точка перехода процесса накопления информации с уровня  $l$  на уровень  $l+1$  достигается, когда изменение величины накопления роботом информации на уровне  $l$  становится меньше некоторой величины  $\zeta$ .

*Определение 6.* Локальной величиной накопления информации роботом на уровне  $l$  назовем величину  $\bar{S}_j^{[l]}$ , полученную без учета накопленной информации на предыдущих уровнях. Пусть  $j$  – номер такта в рамках уровня  $l$ .

Процесс накопления информации роботом на нескольких уровнях описывается следующей системой равенств:

$$\begin{cases} \bar{S}_0^{[l]} = h_0^{[l]}; \\ \bar{S}_j^{[l]} = h_j^{[l]} + \lambda_j^{[l]} \bar{S}_{j-1}^{[l]}, j > 0; \\ S_i^{[l]} = \bar{S}_j^{[l]}; \\ S_i^{[l]} = \bar{S}_j^{[l]} + \Lambda_i^{[l]} S^{[l-1]}, l > 1. \end{cases}$$

где  $S_i^{[l]}$  – величина накопления информации роботом на уровне  $l$  на такте  $i$ ;  $\bar{S}_j^{[l]}$  – локальная величина накопления информации на уровне  $l$  на такте  $j$ ;  $h_j^{[l]}$  – порция накопления информации роботом на уровне  $l$  на такте  $j$ ;  $\lambda_j^{[l]}$  – коэффициент кратковременной информационной памяти робота на уровне  $l$  на такте  $j$ ;



$\Lambda_i^{[l]}$  – коэффициент долговременной информационной памяти на уровне  $l$  на такте  $i$ ,  $\Lambda_i^{[l]} \in (0; 1 - \nu]$ ,  $\nu \in (0; 1)$ ,  $\nu = const$ .

Взаимосвязь между  $i$ , номером информационного такта на всех уровнях накопления информации  $l$ , и  $j$ , номером такта внутри уровня  $l$ , можно представить следующими соотношениями:  $i = j$  при  $l = 1$  и  $i = j + i_{l-1}^*$  при  $l > 1$ , где  $i_{l-1}^*$  – такт перехода с уровня  $l$  на  $l + 1$ .

Доказана **теорема 1** о том, что если все коэффициенты долговременной информационной памяти  $\Lambda_i^{[l]}$  постоянны на каждом уровне накопления информации  $l$ , т.е.  $\Lambda^{[l]} = \Lambda_0^{[l]} = \Lambda_1^{[l]} = \dots$ , и  $\Lambda_i^{[l]} \in (0; 1 - \nu]$ ,  $\nu \in (0; 1)$ ,  $\nu = const$ , то последовательность величин накопления информации  $S_i^{[l]}$  для каждого уровня имеет предел.

Доказана **теорема 2** о том, что при условиях теоремы 1 на каждом уровне накопления информации  $l$  существует такой такт  $i$ , для которого справедливо неравенство  $|S_i^{[l]} - S_{i-1}^{[l]}| < \zeta$ .

На основе теоремы 2 можно сделать вывод, что на любом уровне накопления информации  $l$  найдется номер такта  $i$ , при котором критерий перехода  $|S_i^{[l]} - S_{i-1}^{[l]}| < \zeta$  с уровня  $l$  на уровень  $l + 1$  выполняется для любого уровня накопления информации  $l$ .

Далее вводится **понятие логического опыта робота**, описывается математическая модель накопления логического опыта роботом. Для построения этой модели используются идеи советского психолога *Д.Н. Узнадзе* о том, что в течение жизни человека, установка может не просто изменяться, а меняться на противоположную.

В диссертационной работе рассматриваются следующие варианты смены знака псевдоустановки робота  $h$ :

1. В конце тактов внутри уровня накопления роботом логического опыта;
2. Между уровнями накопления роботом логического опыта (в конце последнего такта уровня).

*Определение 7.* Уровнем  $l$  накопления логического опыта роботом назовем количество смен значений псевдоустановки робота  $h$  до текущего такта процесса накопления опыта.

*Определение 8.* Элементарным логическим опытом робота назовем величину  $c_j^{[l]} = h^{[l]} \cdot I_j^{[l]}$ , где  $h^{[l]}$  – псевдоустановка робота на уровне  $l$ ,  $I_j^{[l]} \in \{-1; +1\}$  – индикатор смены знака на такте с номером  $j$  в рамках уровня  $l$ .

*Определение 9.* Локальным логическим опытом робота назовем величину  $\bar{\Omega}_j^{[l]} = c_j^{[l]} + \lambda_j^{[l]} \bar{\Omega}_{j-1}^{[l]}$ , где  $l$  – уровень накопления логического опыта,  $j$  – номер такта на уровне  $l$ ,  $\lambda_j^{[l]}$  – коэффициент кратковременной информационной памяти робота на такте с номером  $j$  в рамках уровня  $l$ ,  $\bar{\Omega}_{j-1}^{[l]}$  – локальный логический опыт, полученный за  $j - 1$  такт на уровне  $l$ .

*Определение 10.* Логическим опытом робота назовем величину  $\Omega_i^{[l]} = \overline{\Omega}_j^{[l]} + \Lambda^{[l]} J^{[l]} \Omega^{[l-1]}$ , где  $l$  – уровень накопления логического опыта роботом,  $\overline{\Omega}_j^{[l]}$  – локальный логический опыт робота, полученный на такте с номером  $j$  в рамках уровня  $l$ ,  $\Lambda^{[l]}$  – коэффициент долговременной информационной памяти робота на уровне  $l$  и  $\Lambda^{[l]} \in (0; 1 - \nu]$ ,  $\nu \in (0; 1)$ ,  $\nu = const$ ,  $J^{[l]} \in \{-1; +1\}$  – индикатор смены знака,  $\Omega^{[l-1]}$  – логический опыт робота, накопленный за все предыдущие уровни  $l$ .

Процесс накопления логического опыта роботом можно описать следующей системой уравнений

$$\begin{cases} \overline{\Omega}_0^{[l]} = c_0^{[l]}; \\ \overline{\Omega}_j^{[l]} = c_j^{[l]} + \lambda_j^{[l]} \overline{\Omega}_{j-1}^{[l]}, j > 0; \\ \Omega_i^{[1]} = \overline{\Omega}_j^{[1]}; \\ \Omega_i^{[l]} = \overline{\Omega}_j^{[l]} + \Lambda^{[l]} J^{[l]} \Omega^{[l-1]}, l > 1. \end{cases}$$

В качестве критерия перехода с одного уровня накопления роботом логического опыта на другой применяется неравенство:  $|\Omega_i^{[l]} - \Omega_{i-1}^{[l]}| < \xi$ , где  $\Omega_i^{[l]}$  и  $\Omega_{i-1}^{[l]}$  – логический опыт робота на уровне  $l$  тактах  $i$  и  $i-1$  соответственно,  $0 < \xi \ll 1$ ,  $\xi = const$ ,  $\xi$  – измеряется в битах.

Выведена формула, описывающая процесс накопления логического опыта роботом на нескольких уровнях накопления опыта:

$$\Omega_i^{[l]} = \overline{\Omega}_j^{[l]} + \sum_{m=1}^{l-1} \left( \left( \prod_{q=m+1}^l \Lambda^{[q]} J^{[q]} \right) \overline{\Omega}_{j^{[m]}}^{[m]} \right), \quad (3)$$

где  $i$  – текущий такт процесса накопления логического опыта,  $j$  – текущий такт на уровне  $l$ ,  $j^{[m]}$  – такт перехода процесса накопления логического опыта с уровня  $m$  на уровень  $m+1$ ,  $\Omega_i^{[l]}$  – логический опыт, накопленный за  $i$  тактов накопления логического опыта от начала процесса накопления логического опыта,  $\overline{\Omega}_j^{[l]}$  – локальный логический опыт, накопленный за  $j$  тактов текущего уровня  $l$ ,  $\Lambda^{[q]}$  – коэффициент долговременной информационной памяти на уровне накопления логического опыта  $q$ ,  $J^{[q]}$  – индикатор смены знака информационной псевдоустановки между уровнями накопления логического опыта  $q-1$  и  $q$ ,  $\overline{\Omega}_{j^{[m]}}^{[m]}$  – локальный логический опыт, накопленный к такту  $j^{[m]}$  уровня накопления логического опыта  $m$ .

Доказана **теорема 3** о том, что выполнение неравенства  $\left| h^{[l]} \cdot (\lambda^{[l]})^{j-m_f} \right| < \xi$  является достаточным условием того, что процесс накопления опыта перейдет с

уровня накопления информации  $l$  на уровень  $l + 1$ , где  $m_f$  – номер такта на уровне  $l$ , на котором последний раз изменился знак индикатора  $I_f^{[l]}$ .

Доказана **теорема 4** о том, что выполнение неравенства  $\left| h^{[l]} \cdot (\lambda^{[l]})^{j-m_f} \right| \geq \xi$  является достаточным условием того, что процесс накопления опыта не перейдет с уровня накопления информации  $l$  на уровень  $l + 1$ .

Аналогично процессу накопления логического опыта роботом выведена формула, описывающая процесс эмоционального псевдовоспитания робота на нескольких уровнях:

$$R_i^{[k]} = \bar{R}_j^{[k]} + \sum_{g=1}^{k-1} \left( \left( \prod_{h=g+1}^k \Theta^{[h]} W^{[h]} \right) \bar{R}_{j^{[g]}}^{[g]} \right), \quad (4)$$

где  $i$  – текущий такт процесса эмоционального псевдовоспитания робота,  $j$  – текущий такт на уровне  $k$ ,  $j^{[g]}$  – такт перехода процесса эмоционального псевдовоспитания с уровня  $g$  на уровень  $g+1$ ,  $R_i^{[k]}$  – величина эмоционального псевдовоспитания за  $i$  тактов процесса псевдовоспитания от начала этого процесса,  $\bar{R}_j^{[k]}$  – локальное эмоциональное псевдовоспитание, полученное за  $j$  тактов текущего уровня  $k$ ,  $\Theta^{[h]}$  – коэффициент долговременной эмоциональной памяти на уровне псевдовоспитания  $h$ ,  $W^{[h]}$  – индикатор смены знака эмоциональной псевдоустановки между уровнями псевдовоспитания  $h-1$  и  $h$ ,  $\bar{R}_{j^{[g]}}^{[g]}$  – локальное эмоциональное псевдовоспитание, полученное к такту  $j^{[g]}$  уровня псевдовоспитания  $g$ .

Аналогично теоремам 3 и 4 доказываются теоремы о выполнении достаточных условий, описывающих возможность или невозможность перехода процесса псевдовоспитания робота с одного уровня на другой.

Далее представлена математическая модель принятия решений в зависимости от эмоционального псевдовоспитания и логического опыта робота. Предложена схема работы эмоционально-логического робота (Рисунок 1).

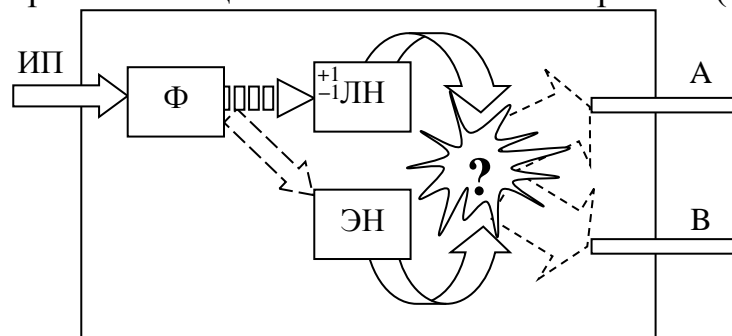


Рисунок 1 – Схема эмоционально-логического робота

На вход модели робота поступает некоторый информационный поток (ИП), который от рецепторов робота попадает в фильтр Ф. Фильтр Ф производит дискретизацию ИП и по некоторой заданной функции  $f$  определяет величину порции информации для каждого такта. Будем считать, что функция  $f$  филь-

тра  $\Phi$  имеет такие свойства, что значения этой функции являются информационными псевдоустановками.

Пусть робот имеет накопители, сохраняющие логическую и эмоциональную информацию, которые на схеме обозначены ЛН и ЭН, соответственно.

Информационная псевдоустановка на каждом такте попадает из фильтра  $\Phi$  в накопитель ЛН. Пусть для ЛН задана функция-индикатор  $I_i$ , которая по некоторому закону для каждого такта выдает значения  $+1$  или  $-1$  и используется для получения элементарного логического опыта на основе информационной псевдоустановки и индикатора. Пусть также в ЛН задана функция-индикатор  $J$ , которая необходима для управления сменой знака между уровнями накопления информации в многоуровневом процессе.

Будем считать, что в фильтре  $\Phi$  задана функция  $g$ , определяющая величину информации, которая поступает в ЭН на каждом такте в тот момент, когда ЛН робота получает информационную псевдоустановку. Будем считать, что функция  $g$  фильтра  $\Phi$  имеет такие свойства, что значения этой функции являются эмоциональными псевдоустановками. Другими словами, эмоциональная псевдоустановка – это эмоциональный «ответ» робота на информационную псевдоустановку. Пусть также задана функция-индикатор  $W$ , которая необходима для управления сменой знака между уровнями эмоционального псевдовоспитания в многоуровневом процессе.

Пусть робот уже имеет априори заданные действия: А – в случае, если его «поведение» определяют эмоции, и В – в случае, если его «поведение» определяет логический опыт.

Условием выполнения действия на основе эмоций, т.е. выполнение действия А на такте  $i$ , будем считать следующее неравенство:

$$|R_i^{[k]}| > |\Omega_i^{[l]}|.$$

Условием выполнения действия на основе логики, т.е. выполнение действия В на такте  $i$ , будем считать следующее неравенство:

$$|R_i^{[k]}| < |\Omega_i^{[l]}|.$$

*Определение 11.* Эмоционально-логическим ступором робота назовем состояние робота, при котором выполняется условие конфликта между эмоциональным псевдовоспитанием и логическим опытом:

$$R_i^{[k]} + \Omega_i^{[l]} = 0,$$

где  $i$  – текущий номер такта относительно начала процесса эмоционального псевдовоспитания и процесса накопления логического опыта роботом,  $k$  – уровень эмоционального псевдовоспитания,  $l$  – уровень накопления логического опыта робота.

В случае эмоционально-логического ступора робот на текущем такте не может выбрать, какое действие выполнить А или В.

В диссертационной работе были поставлены задачи построить функции переходов *робота* –  $g$ , и функцию принятия решений *робота* –  $f$ .

Зададим функцию переходов  $g$  в следующем виде:

$$g_i = \left\{ \Omega_i^{[l]}, R_i^{[k]} \right\},$$

где  $\Omega_i^{[l]}$  – функция (3),  $R_i^{[k]}$  – функция (4).

Функцию принятия решения роботом  $f$  зададим следующим образом:

$$f_i = \begin{cases} L, |R_i^{[k]}| < |\Omega_i^{[l]}| \\ E, |R_i^{[k]}| > |\Omega_i^{[l]}| \\ D, R_i^{[k]} + \Omega_i^{[l]} = 0 \end{cases},$$

где  $L$  – логическое решение,  $E$  – эмоциональное решение,  $D$  – ступор (отсутствие логического или эмоционального решения).

В **третьей главе** представлены результаты исследований соответствия математической теории роботов психологии человека. Предлагаются способы измерения кратковременной и долговременной памяти человека и его внимания.

Для вычисления коэффициентов кратковременной памяти в диссертационной работе адаптируется психологический метод *Джекобса*, который в классическом виде используется для вычисления объема кратковременной памяти.

Проводятся  $n$  испытаний. В каждом испытании испытуемому предъявляются  $r$  последовательностей цифр, начиная с минимальной длины  $l$  и заканчивая  $l + r \cdot k - 1$ , т.е. длина каждой очередной последовательности цифр отличается от предыдущей на  $k$ . В рамках одного испытания в каждой последовательности не должно быть повторяющихся цифр.

Объем кратковременной памяти человека определяется по формуле  $V = A + C / n + k / 2$ , где  $A$  – наименьшая длина последовательности, которую испытуемый во всех сериях воспроизвел правильно,  $C$  – количество правильно воспроизведенных последовательностей, длина которых больше, чем  $A$ .

В психологии существует правило: «объем кратковременной памяти не зависит от количества информации в отдельном элементе, определяется постоянным числом ячеек памяти, которые могут быть как богаты, так и бедны информацией». Поэтому автор диссертационной работы делает вывод, что целесообразно перейти к безразмерным величинам и измерению коэффициента кратковременной информационной памяти человека  $\lambda$ . Такой коэффициент может быть использован в качестве коэффициента кратковременной памяти робота.

Для получения коэффициента кратковременной памяти  $\lambda$  необходимо выполнить нормировку значения объема кратковременной памяти человека  $V$ :

$$\lambda = \left( V - V_{\min} \right) / \left( V_{\max} - V_{\min} \right).$$

В результате получаем следующую формулу, которая описывает коэффициент кратковременной памяти робота.

$$\lambda = \left( A + \frac{C}{n} \right) / \left( \left( 1 - \frac{n-1}{nk} \right) (l + (r-1)k) + \frac{n-1}{nk} l + \frac{(n-1)(r-1)}{n} \right)$$

Для практического определения коэффициентов визуальной и слуховой кратковременной памяти человека разработан демонстрационный прототип программы «*СMemory*», использующий метод *Джекобса*. Приводятся алгоритм

работы, архитектура программы, ее основные возможности и принципы функционирования, а также описание пользовательского интерфейса.

Далее приводится описание верификации применимости математической модели долговременной памяти робота, зависящей от кратковременной памяти, для создания робота-аналога человека.

Для проведения исследований математической модели используется модификация формулы вычисления долговременной памяти в рамках равномерного многоуровневого процесса накопления информации:

$$\beta = \frac{\lambda}{1 - \frac{(1-\lambda)^{l-1}(1-\Lambda^{[l]})}{1-\Lambda^{[l]}-\lambda}}$$

Для верификации зависимости относительной восприимчивости робота  $\beta$  к накоплению информации от кратковременной памяти  $\lambda$  и долговременной памяти  $\Lambda$  будем использовать значения внимания, кратковременной и долговременной памяти человека соответственно.

Целью проведения верификации является определение того, насколько отличается относительная восприимчивость робота к накоплению информации  $\beta_t$ , вычисленная на основе эмпирически полученных коэффициентов кратковременной  $\lambda$  и долговременной  $\Lambda$  памяти человека, от эмпирической относительной восприимчивости робота к накоплению информации  $\beta_p$ , полученной на основе тестирования внимания человека.

Приведены способы расчета коэффициентов кратковременной, долговременной памяти, внимания человека. Получены таблицы со значениями средней относительной погрешности и среднеквадратичного отклонения от средней относительной погрешности теоретических  $\beta_t$  и практических  $\beta_p$  коэффициентов относительной восприимчивости робота к накоплению информации.

При верификации расчетов натурными экспериментами средняя относительная погрешность составила 21%, а среднеквадратичное отклонение от средней относительной погрешности – 1%.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы. **Приложение 1** содержит копии свидетельств Роспатента о регистрации программ для ЭВМ. В **приложении 2** и **приложении 3** описан порядок проведения всех психологических методик, использованных при верификации математической модели. **Приложение 4** содержит попарное сравнение результатов психологических исследований видов памяти и внимания человека.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель принятия решений роботом (на основе *функции принятия решений роботом*) в зависимости от его эмоционального псевдовоспитания и накопленного логического опыта. Данная математическая модель обобщает предложенные в диссертационной работе такие математические модели, как накопление роботом информации, полученной от его рецепторов; накопление роботом логического опыта и эмоционального псевдовоспитания для нескольких уровней накопления с учетом забывания части

полученной ранее информации. Построены алгоритмы генерации значений процессов накопления информации, опыта робота и эмоционального псевдовоспитания.

2. Решена задача идентификации параметров равномерного многоуровневого процесса накопления информации роботом, который позволяет аппроксимировать процесс накопления информации роботом. Для решения этой задачи предложен алгоритм, основанный на сочетании подходов комбинаторики, метода множителей Лагранжа, численных методов для решения нелинейных алгебраических уравнений. Спроектирована и реализована программа для решения задачи идентификации параметров.
3. Спроектирована и реализована программа определения коэффициентов кратковременной памяти человека, которые позволяют моделировать робота, являющегося простейшим аналогом человека.
4. Предложена модель долговременной памяти робота. На основе психологических экспериментов подтверждена адекватность математической модели долговременной памяти робота, зависящей от его кратковременной памяти и относительной восприимчивости к накоплению информации, для создания компьютерного аналога человека в виде эмоционального робота.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России**

1. *Sharapov Yu.A.* Solution to the Problem on Identification of Parameters of Uniform Multi-Level Process of Information Accumulation by Robot // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2017. Vol. 4. No. 4. pp. 15–28 (1,6 п.л.), doi: 10.14529/jcem170402.
2. *Pensky O., Sharapov Y., Chernikov K.* Mathematical Models of Emotional Robots with a Non-Absolute Memory // *Intelligent Control and Automation*. 2013. vol. 4. No. 2, pp. 115-121 (0,8 п.л./0,1 п.л.), doi: 10.4236/ica.2013.42016 (Web of Knowledge).
3. *Шарапов Ю.А.* Модели смены знака псевдоустановки робота // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10 (часть 1). – С. 77-81 (0,6 п.л.).
4. *Шарапов Ю.А., Пенский О.Г.* Математические модели долговременной и кратковременной памяти роботов // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11 (часть 6). – С. 1509-1513 (0,6 п.л./0,5 п.л.).
5. *Шарапов Ю.А., Левченко Е.В., Яковлев В.И.* Алгоритм и программная реализация вычисления характеристик кратковременной памяти человека в аспекте моделирования роботов // *Современные проблемы науки и образования* (электронный журнал). – 2012. – № 5; URL: [www.science-education.ru/105-7006](http://www.science-education.ru/105-7006) (дата обращения 16.11.2012) (1 п.л./0,8 п.л.).

### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ**

6. *Шарапов Ю.А.* Программа определения параметров глобального эквивалентного процесса псевдовоспитания робота, аппроксимирующего процесс псевдовоспитания роботом, и визуализации аппроксимирующего процесса «Решение оптимизационной задачи псевдовоспитания робота» №2014660778. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.10.2014.

7. *Шарапов Ю.А.* Программа определения коэффициентов кратковременной памяти человека «СMemory» №2012616009. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2012.

### Монографии

8. *Пенский О.Г., Шарапов Ю.А., Ощепкова Н.В.* Математические модели роботов с неабсолютной памятью и приложения моделей: монография / О.Г. Пенский, Ю.А. Шарапов, Н.В. Ощепкова; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2018. – 309 с. (18,54 п.л./6,18 п.л.).

### Публикации в прочих изданиях

9. *Шарапов Ю.А.* Общая математическая модель принятия решений роботом в зависимости от его эмоционального псевдовоспитания и логического опыта // Современные наукоемкие технологии (электронный журнал). – 2016. – № 4-1. – С. 62-66; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35775> (дата обращения: 01.06.2016) (0,6 п.л.).
10. *Шарапов Ю.А.* Математическое моделирование процесса накопления роботом опыта на нескольких уровнях с учетом смены знака информационной псевдоустановки // Фундаментальные и прикладные проблемы механики, математики, информатики [Электронный ресурс]: сб. докл. всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 26–28 мая 2015 г.) / гл. ред. А. П. Шкарапута; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2015. С. 233-238 (0,7 п.л.).
11. *Шарапов Ю.А.* Решение оптимизационной задачи определения параметров эквивалентного процесса накопления информации роботом // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: труды международной конференции IT + S&E`15 (Гурзуф, 22 мая–01 июня 2015 г.) / под. ред. проф. Е.Л. Глориозова. М.: ИНИТ, 2015. Весенняя сессия. С. 234-240 (0,8 п.л.).
12. *Шарапов Ю.А.* Модель псевдовоспитания робота с учетом его кратковременной и долговременной памяти и смены знака псевдоустановки // Современные проблемы математики и её прикладные аспекты – 2013: сб. тез. науч.-практ. конф. (Пермь, 29 – 31 октября 2013 г.) / гл. ред. В.И. Яковлев; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2013. – С. 76 (0,06 п.л.).
13. *Михайлов В.О., Пенский О.Г., Черников К.В., Шарапов Ю.А.* Модели восприимчивости робота к псевдовоспитанию // Вестник Перм. ун-та. 2013. Математика. Механика. Информатика. Вып.3. С.63–67 (0,6 п.л./0,1 п.л.).
14. *Шарапов Ю.А.* Модификация алгоритма Узнадзе в аспекте кратковременной и долговременной памяти робота // Вестник Перм. ун-та. 2013. Математика. Механика. Информатика. Вып.1. С.50–53 (0,5 п.л.).
15. *Sharapov Y., Mialitsina I.* Mathematical modeling of robots' short-term and long-term memory // Innovations in Science and Humanities – V. Новое в естественных и гуманитарных науках: материалы науч.-практ. студ. конф., апр. – май. 2012 г./Перм. гос. нац. иссл. ун-т.-Пермь, 2012. – С. 113-119 – На англ. яз. (0,4 п.л./0,35 п.л.).