

# Построение сервисного автономного мобильного робота на основе управления, использующего логический анализ реализуемости операций

В.Е. Пряничников<sup>1-3</sup>, А.А. Арыскин<sup>3</sup>, А.Я. Ксензенко<sup>3</sup>, М.С. Петраков<sup>3</sup>,  
В.А. Игнатьев<sup>3</sup>, Р.В. Хелемендик<sup>1</sup>

*1 Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

*2 Международный институт новых образовательных технологий РГГУ;*

*3 МГТУ "СТАНКИН";*

*1-3 д.т.н., ген. директор МЛ "Сенсорика", зав.каф., Москва, Россия;*

**Аннотация.** В работе представлена методика логического анализа, применяемая, в частности, для создания интеллектуальных робототехнических комплексов и сети мехатронных устройств промышленной автоматизации. Рассмотрено построение сервисного робота и его системы управления. Разработанная для этого технология логического анализа реализуемости операций оказалась применимой и для создания интеллектуального управления производственным участком с сотнями мехатронных устройств.

**Ключевые слова:** интеллектуальная робототехника, технология IGEC, логическое управление по технологии "Индустрия 4.0", пенталогика, логический анализ

## Design of a service autonomous mobile robot, based on the control with logical analysis of operations feasibility

V.E. Pryanichnikov<sup>1-3</sup>, A.A. Ayskin<sup>3</sup>, A.Ya. Ksenzenko<sup>3</sup>, M.S. Petrakov<sup>3</sup>,  
V.A. Ignatiev<sup>3</sup>, R.V. Khelemendik<sup>1</sup>

*1 Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences),  
Moscow, Russia;*

*2 Institute for new educational technologies and informatization RSUH;*

*3 MSTU "STANKIN";*

*1-3 Grand PhD in Engineering sciences, general Director of International  
Laboratory "Sensorika", Head of the Department, Moscow, Russia;*

**Abstract.** This paper presents a method of logical analysis used, in particular, for creating intelligent robotic systems and the network of mechatronic devices in industrial automation. The construction of a service robot and its control system is

considered. The logical analysis technology of the operations feasibility developed for this purpose. And it's turned out to be applicable for the intelligent control creation of the production section with hundreds of mechatronic devices.

**Keywords:** intellectual robotronics, IGEC-technology, logical control by the technology "Industry 4.0", pentalogic, logical analysis

## 1. Введение

Одной из центральных проблем современной робототехники и автоматизированного производства является необходимость интеллектуализации управления. Это особенно актуально при реализации адаптивного поведения роботов, для исключения конфликтных и аварийных ситуаций, блокирования и обхода противоречий при совместной работе большого числа мехатронных устройств, транспортных роботов и операторов.

Для описания такого поведения мобильных технологических роботов существенным инструментом является конструирование экспертных схем, встраиваемых в систему управления, однако этого недостаточно. Необходима алгоритмическая надстройка, связывающая противоречивые экспертные схемы в единый алгоритм, устойчиво реализующая неоднозначные решения и знания экспертов-составителей программ поведения роботов, осуществляющая переключения управляющих синергий и обеспечивающая корректную обработку действий людей-операторов, вмешивающихся в процесс управления.

В ИПМ им. М.В.Келдыша РАН и организациях-партнерах проводились эксперименты по построению наборов экспертных схем для реализации адаптивного поведения мобильных роботов (МР), для обеспечения максимизации качества (по предложенным критериям) и восполнения пропущенных измерений за счет логических фильтров, приводящих разновременные данные к условно одномоментным [1-2]. Это позволяет МР оставаться работоспособным при любых комбинациях дальномерных и других данных и обеспечивать если не точные траекторные измерения, то оценки областей, в которых он находится, формируя поступление достаточных данных для решения локомоционных задач.

В настоящей работе мы предлагаем методику логического анализа применительно к задачам интеллектуальной роботоники, технологию и реализацию автономного мобильного робота, управления сложным промышленным производством, работающим по технологии «Индустрия 4.0».

## 2. Методика логического анализа

Методика логического анализа, рассматриваемая в настоящей статье, включает в себя специальный логический аппарат (см. [3-5]) и инструменты технологии IGEC (см. [1-2, 6-7]).

При логическом подходе к синтезу робототехнического устройства, замкнутого его фрагмента, программного обеспечения, вся совокупность параметров считается *задачей*. В зависимости от природы, степени детализации

эта задача записывается *формулой*  $\Theta$  в том или ином специальном логическом языке (см. ниже), после чего данная формула исследуется на *выполнимость* (см. рис.1, левая часть).

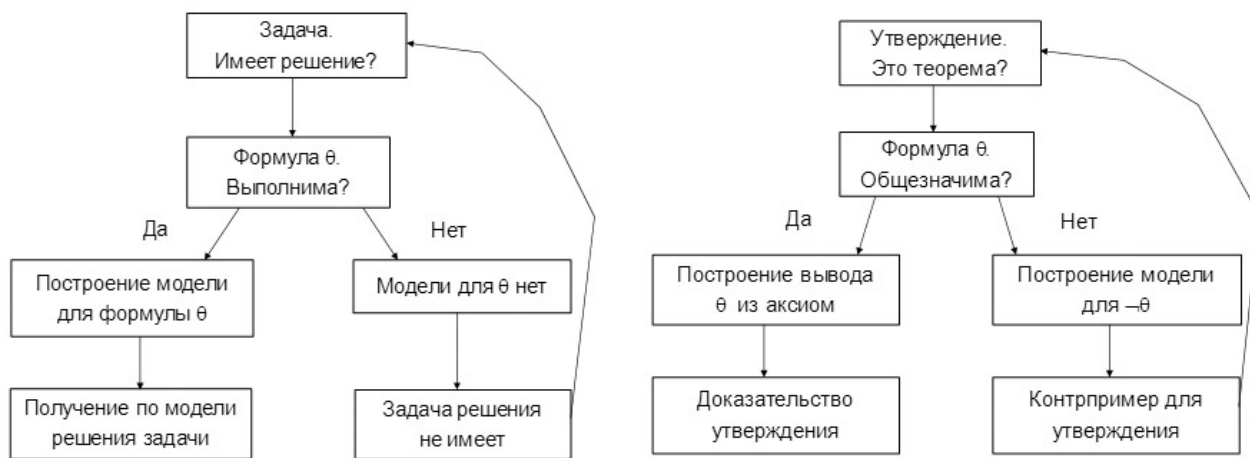


Рис. 1. Схемы построения рассуждений в рамках математической логики

При этом формула, записывающая задачу, является выполнимой тогда и только тогда, когда задача имеет *решение*; и в случае выполнимости решение получается по *модели* для формулы. Это решение в зависимости от типа задачи может представлять собой подходящий набор значений булевых переменных (переключателей), систему продукций, программу оптимального (согласно поставленной цели) функционирования автономного робота в условиях специфического взаимодействия с внешней средой и т.д.

В случае *невыполнимости* формулы  $\Theta$  возможны коррекция записи задачи и уточнение или ослабление её условий, что на рис.1 показано стрелкой (вверх) в виде обратной связи. Если же ответ остается отрицательным, то проделанная (в ходе исследования формулы  $\Theta$  на выполнимость) работа даёт полезный с двух точек зрения результат. С практической точки зрения он помогает понять, что при поставленных условиях задача решения не имеет, что зачастую позволяет найти причины ошибки, не вкладывать ресурсы в тупиковую реализацию, а сосредоточиться на более перспективном направлении. А с теоретической точки зрения невыполнимость формулы  $\Theta_1$ , где  $\Theta_1 = \neg\Theta$ , означает *общезначимость* формулы  $\Theta$ , что позволяет логическими средствами (через вывод *теоремы* из *аксиом* – см. рис.1, правая часть) получить наиболее надёжное *доказательство* истинного утверждения (в частности, закономерности в интеллектуальной робототронике). Отметим, что в общем случае проблема надёжности доказательств, подробно рассмотренная в работах [8-9], является весьма актуальной и нетривиальной.

Специальные логические языки, допускающие применение схемы рис.1, должны удовлетворять так называемому *критерию фундаментальности* (см. [5]). Этот критерий подразумевает существование алгоритма А распознавания выполнимости, удовлетворяющего свойствам *завершаемости*, *корректности* и

полноты, суть которых выражается теоремами 1-3 (см. [3]; эти теоремы верны для всех трёх логик, рассматриваемых ниже).

**Теорема 1 (о завершаемости).** *Для любой формулы  $\Theta$  за конечное число шагов  $A$  либо даёт ответ « $\Theta$  невыполнима», либо строит конечную модель  $M$  с ответом « $\Theta$  выполнима», « $\Theta$  истинна в  $M$ ».*

**Теорема 2 (о корректности).** *В построенной алгоритмом  $A$  для формулы  $\Theta$  модели  $M$  формула  $\Theta$  истинна.*

**Теорема 3 (о полноте).** *Если формула  $\Theta$  выполнима, то алгоритм  $A$  строит конечную модель  $M$  и даёт ответ « $\Theta$  выполнима,  $\Theta$  истинна в  $M$ ».*

Такими специальными языками являются логика высказываний (ЛВ), логика линейного времени (ЛЛВ), логика ветвящегося времени (ЛВВ). Модели для формул в этих логиках могут содержательно интерпретироваться так: ЛВ – картинка-снимок, статика; ЛЛВ – видео, динамика; ЛВВ – «интерактивная динамика», взаимодействие. Общий вид формулы, записывающей задачу, представляет собой конъюнкцию трёх компонент-подформул (см. [1-2]): Init (начальные условия), Rules (правила), Aim (цель), и может в некотором смысле рассматриваться как логический (дискретный) аналог записи задач в теориях дифференциальных уравнений и оптимального управления.

Вместе с критерием фундаментальности в работе [5] для языка решения задач рассматриваются и другие критерии эффективности: *выразительность, объёмность (BigData), безболезненное развитие* (см. [10]), *функциональность*. Там же описан один из специальных логических языков и рассмотрено его соответствие указанным критериям.

Одним из наиболее выразительных языков считается логика предикатов, но в силу этого свойства она алгоритмически неразрешима: в частности, позволяет выражать множество парадоксальных утверждений (см. [7]). Однако в интеллектуальной робототронике и без алгоритмической неразрешимости существует много практически важных задач, при решении которых на той или иной стадии возникают противоречивые ситуации. Такие противоречия, в которых согласно одному методу исследования и/или источнику информации (датчику, сенсору; с возможным указанием степени достоверности) имеет место утверждение  $p$ , а согласно другому –  $\neg p$ , назовём *методологическими противоречиями*.

Для выявления, классификации и преодоления этих противоречий применяется аппарат технологии IGEC (см. [1-2, 6-7]). Эта технология представляет собой соединение так называемых «древних индо-греко-египетско-китайских» традиций и методов исследования, построения доказательств. Совокупность перечисленных подходов (традиций) использованных в решении конкретной задачи может быть представлена в виде точки или области специального четырёхмерного куба (см. [7]). Таким образом, при выделении каждой пары традиционных подходов мы получаем 6 двумерных граней (плоскостей): *методологические плоскости* ИЕ, ИК, ГИ, ГК, ЕГ и ЕК. После того как методологическое противоречие локализовано на

соответствующей плоскости, применяется *пенталогика* (см. [1-2, 6-7]), что позволяет найти конкретную область противоречия и затем предложить возможные рекомендации для его устранения.

### 3. Технология, реализация и практическое применение

В этом разделе приведены результаты разработки логического анализатора для интеллектуальной системы управления, а также проблемы создания нежесткой конструкции автономного гусеничного сервисного робота с двуруким захватным устройством. Проведенное исследование математической модели мобильного робота с точки зрения динамической устойчивости и технологичности его изготовления привело к реализации «объекта управления», показанного на рис.2.

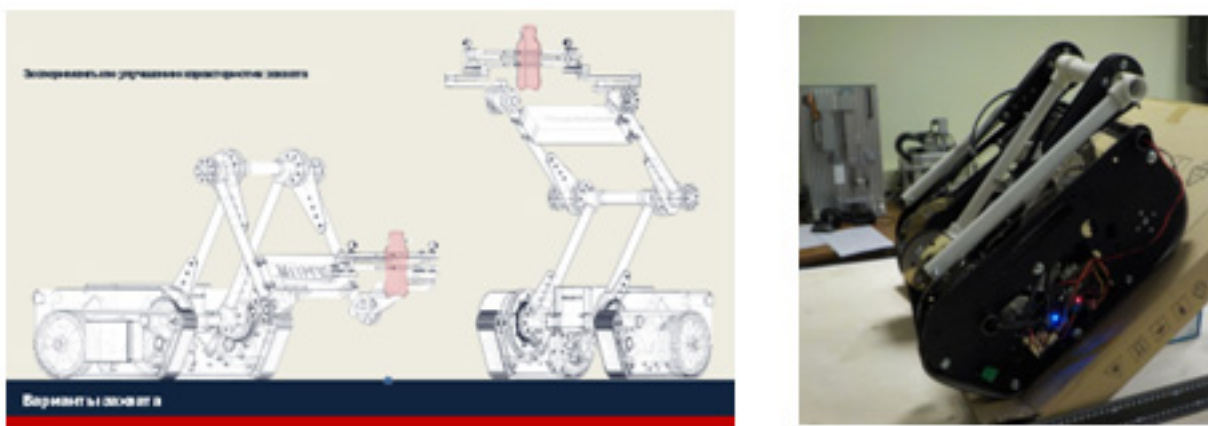


Рис. 2. Модель сервисного гусеничного робота - анализ динамики захвата объектов; преодоления склона 40 град, исследование технологичности изготовления гусеничной базы

Ещё одно применение разработанного и исследованного аппарата логического анализа нашлось при разработке комплексной системы промышленной автоматизации, представляющей собой совокупность децентрализованных элементов, объединенных в общую вычислительную сеть с удаленным доступом и с возможностью перехода от программного к ручному управлению с записью соответствующих технологических операций. Микропроцессоры обеспечивают управление исполнительными элементами, переключающими клапана, задвижками, смесителями, а также управляют двигателями для подачи, вывода, транспортировки/перемещения составляющих производственного процесса при изготовлении готовой продукции. Планирование и анализ хода производства выполняется диспетчерскими компьютерами, в том числе размещенными удаленно. В технологическом процессе задействована специализированная транспортная система, состоящая из индивидуальных роботизированных тележек, которые приводятся в

движение посредством двигателей, неподвижно размещенных на линейных и поворотных участках транспортных путей цеха (рис.3).

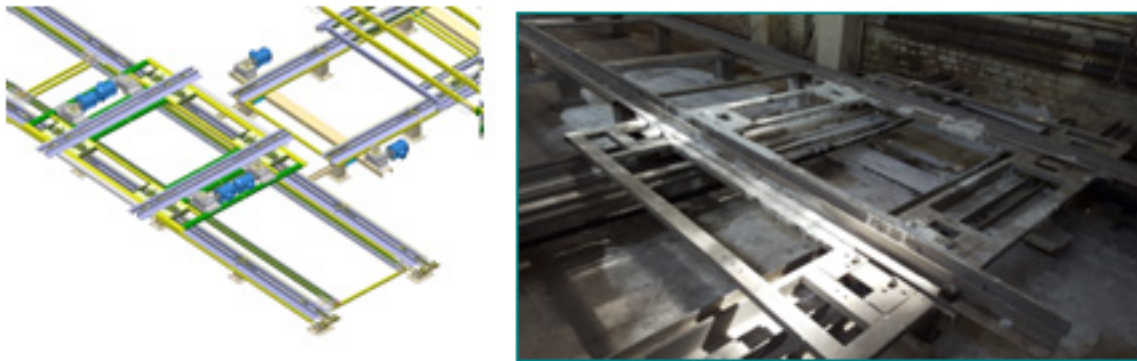


Рис. 3. Транспортная цеховая система с сенсорами точного позиционирования

Одна такая тележка способна перемещать по сложной траектории внутрипроизводственного пространства многотонную готовую продукцию под контролем соответствующих сенсорных устройств. В состав системы управления производственным циклом входят компьютеры дистанционного контроля, тестирования и модернизации технологического процесса (рис.4).

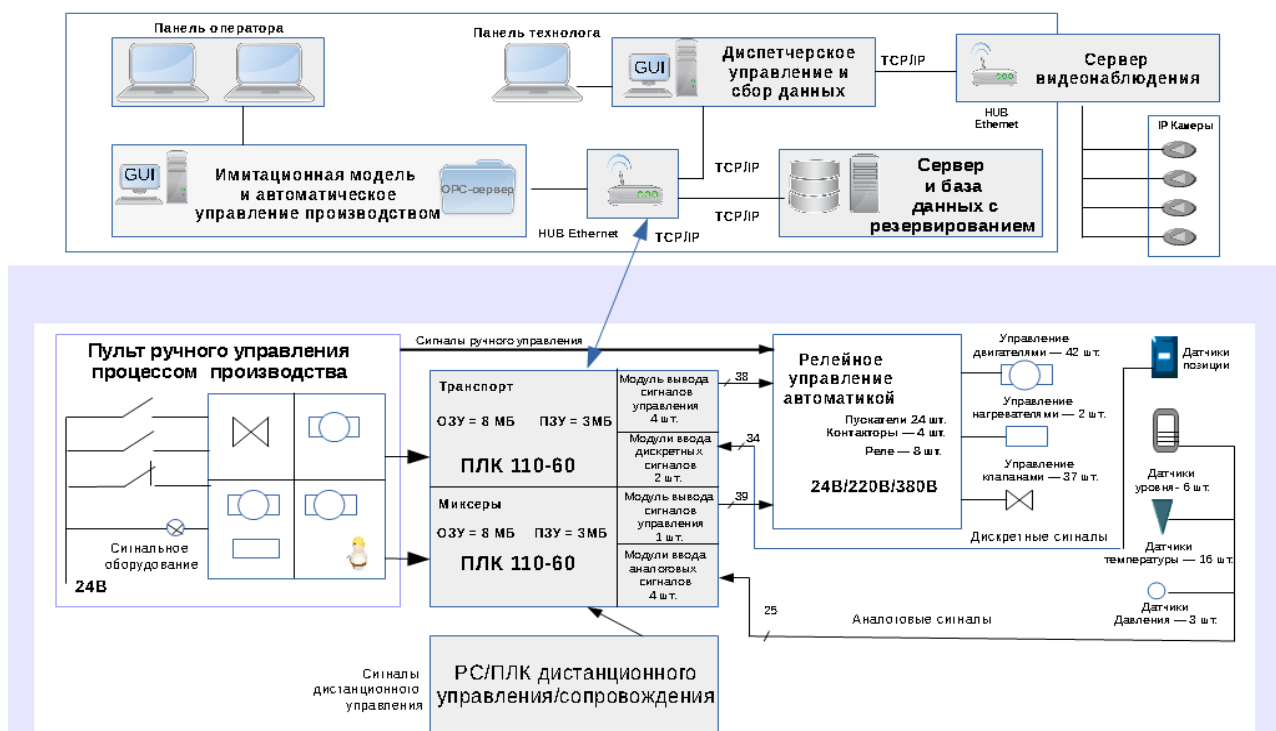


Рис. 4. Управление производственным циклом с дистанционным контролем, логическим тестированием и возможностью ручной модернизации технологического процесса технологом-оператором (запись и встраивание новых рецептов через кнопочный пульт и через диспетчерский РС)



При разработке фактически реализована технология концепции Индустрии 4.0, исследованы сенсорные и периферийные устройства, необходимые для обеспечения «интеллектуального ввода данных», построения обратных связей. Общий вид смонтированных шкафов с управляющей промышленной автоматикой и программируемыми логическими контроллерами показан на рис.5.

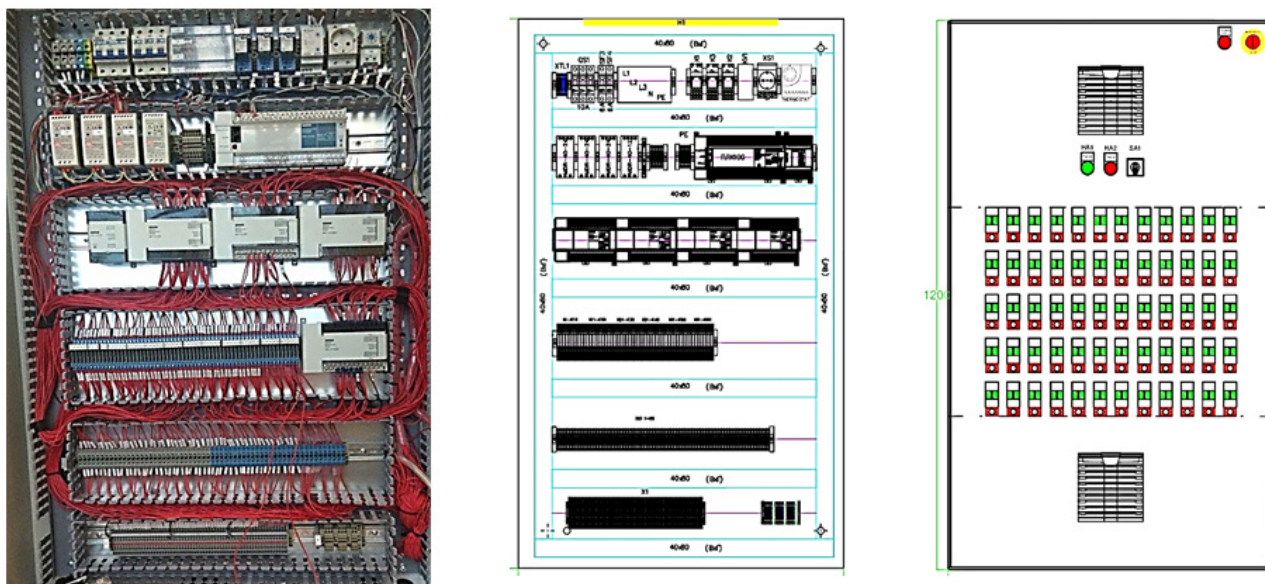


Рис. 5. Аппаратная реализация управления цехом – проектирование щитов управления и их монтаж

Компьютеры верхнего уровня обеспечивают логический анализ противоречий, выявление возможных нарушений технологического цикла, анализ действий операторов-технологов и коррекцию заготовленных рецептов или генерацию новых.

#### 4. Заключение

В работе представлена методика логического анализа применительно к задачам интеллектуальной роботоники, технология и реализация автономного мобильного робота, управления сложным промышленным производством, работающим по технологии «Индустрия 4.0».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты 16-07-00935, 16-07-01264, 16-07-00811.

#### Литература

1. Pryanichnikov V.E., Katalinic B., Kirilchenko A.A., Khelemendik R.V., Kuvshinov S.V., Vician D., Uglesic A. New Creative Educational Technologies for Inter-university Network // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2014. — Procedia Engineering. 2015.

2. Пряничников В.Е., Биелич Т., Вицан Д., Каталинич Б., Кирсанов К.Б., Кувшинов С.В., Марзанов Ю.С., Подураев Ю.В., Хелемендик Р.В., Прысев Е.А., Углешик А., Харин К.В. Разработка образовательных технологий и сети ассоциированных лабораторий-роботариумов // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2015. — Т. 13, № 7. — С.7-25.
3. Хелемендик Р.В. Алгоритм распознавания выполнимости формул логики ветвящегося времени и эффективный алгоритм построения выводов общезначимых формул из аксиом // Математические вопросы кибернетики. Вып. 15: Сборник статей / Под ред. О.Б. Лупанова. — М.: Физматлит, 2006. — С. 217-266.
4. Хелемендик Р.В. SFECalc: Программа построения по большим булевым формулам минимизированных схем из функциональных элементов, их анализа и синтеза с заданными параметрами / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013615516, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.06.2013.
5. Хелемендик Р.В., Пряничников В.Е. О построении специального логического языка для задач интеллектуальной роботоники и исследования больших формул // Компьютерные науки и информационные технологии: Материалы междунар. науч. конф. — Саратов: Издат. центр «Наука», 2018. — С. 425-428.
6. Хелемендик Р.В., Пряничников В.Е. О технологии IGEC и её применении в изучении шахматных окончаний // Научный сервис в сети Интернет: труды XIX Всероссийской научной конференции (19-24 сентября 2016 г., г. Новороссийск). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2017. — С. 446-455. — URL: <http://keldysh.ru/abrau/2017/proc.pdf>
7. Пряничников В.Е., Хелемендик Р.В. Информационная технология IGEC и пенталогика // Компьютерные науки и информационные технологии: Материалы междунар. науч. конф. — Саратов: Издат. центр «Наука», 2016. — С. 331-333.
8. Кирильченко А.А., Пряничников В.Е., Рогозин К.В. Пределы достоверности и надежность доказательств. Скептицизм в математике, функции, традиции // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2013. — Т. 11, № 4. — С. 57-65.
9. Кирильченко А.А., Рогозин К.В. Пределы достоверности и надёжность доказательств. Дилеммы, ошибки, компьютер // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2013. — Т. 11, № 4. — С.66-73.
10. Горбунов-Посадов М.М. Безболезненное развитие программы // Открытые системы. — 1996. — № 4. — С. 65-70. — URL: <http://www.keldysh.ru/gorbunov/evolution.htm>



## References

1. Pryanichnikov V.E., Katalinic B., Kirilchenko A.A., Khelemendik R.V., Kuvshinov S.V., Vician D., Uglesic A. New Creative Educational Technologies for Inter-university Network // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2014. — Procedia Engineering. 2015. — Vol. 100, — P.259-268. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815003938>
2. Pryanichnikov V.E., Bielich T., Vitsan D., Katalinich B., Kirsanov K.B., Kuvshinov S.V., Marzanov Iu.S., Poduraev Iu.V., Khelemendik R.V., Prysev E.A., Ugleshik A., Kharin K.V. Razrabotka obrazovatelnykh tekhnologii i seti assotsiirovannykh laboratorii-robotariumov // Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy. — 2015. — T. 13, № 7. — S.7-25.
3. Khelemendik R.V. Algoritm raspoznavaniia vypolnimosti formul logiki vetviashchegosia vremeni i effektivnyi algoritm postroeniia vyvodov obshcheznachimyykh formul iz aksiom // Matematicheskie voprosy kibernetiki. Vyp. 15: Sbornik statei / Pod red. O.B. Lupanova. — M.: Fizmatlit, 2006. — S. 217-266.
4. Khelemendik R.V. SFECalc: Programma postroeniia po bolshim bulevym formulam minimizirovannykh skhem iz funktsionalnykh elementov, ikh analiza i sinteza s zadannymi parametrami / Svidetelstvo ob ofitsialnoi registratsii programmy dlia EVM № 2013615516, zaregistrirovano v reestre programm dlia EVM 11.06.2013.
5. Khelemendik R.V., Pryanichnikov V.E. O postroenii spetsialnogo logicheskogo iazyka dlia zadach intellektualnoi robotroniki i issledovaniia bolshikh formul // Kompiuternye nauki i informatsionnye tekhnologii: Materialy mezhdunar. nauch. konf. — Saratov: Izdat. tsentr «Nauka», 2018. — S. 425-428.
6. Khelemendik R.V., Pryanichnikov V.E. O tekhnologii IGEC i ee primenenii v izuchenii shakhmatnykh okonchaniy // Nauchnyi servis v seti Internet: trudy XIX Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii (19-24 sentiabria 2016 g., g. Novorossiisk). — M.: IPM im. M.V.Keldysha, 2017. — S. 446-455. — URL: <http://keldysh.ru/abrau/2017/proc.pdf>
7. Pryanichnikov V.E., Khelemendik R.V. Informatsionnaia tekhnologiya IGEC i pentalogika // Kompiuternye nauki i informatsionnye tekhnologii: Materialy mezhdunar. nauch. konf. — Saratov: Izdat. tsentr «Nauka», 2016. — S. 331-333.
8. Kirilchenko A.A., Pryanichnikov V.E., Rogozin K.V. Predely dostovernosti i nadezhnost dokazatelstv. Skeptitsizm v matematike, funktsii, traditsii // Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy. — 2013. — T. 11, № 4. — S. 57-65.
9. Kirilchenko A.A., Rogozin K.V. Predely dostovernosti i nadezhnost dokazatelstv. Dilemmy, oshibki, kompiuter // Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy. — 2013. — T. 11, № 4. — S.66-73.

10. Gorbunov-Posadov M.M. Bezboleznennoe razvitie programmy // Otkrytye sistemy. — 1996. — № 4. — S. 65-70. — URL: <http://www.keldysh.ru/gorbunov/evolution.htm>