

24. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1972, 768 p.
25. *Gayduk A.R.* Nепreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy [Nepрerывные и дискретные динамические системы]. Moscow: UM i ITS «Uchebnaya literatura», 2004, 252 p.
26. *Gantmakher F.R.* Teoriya matrits [Matrix theory]. 5<sup>th</sup> ed. Moscow: Fizmatlit, 2004, 560 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., в.н.с. С.Г. Капустян.

**Гайдук Анатолий Романович** – Южный федеральный университет; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

**Кабалан Али Эль Акбар** – e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

**Пшихопов Вячеслав Хасанович** – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: pshichop@rambler.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор; директор.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

**Гисцов Владислав Геннадьевич** – e-mail: gistsov@sfnedu.ru; инженер.

**Gaiduk Anatoly Romanovich** – Southern Federal University; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; dr. of eng. sc.; professor.

**Kabalan Ali El Akbar** – e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com; the department of automatic control systems; graduate student.

**Pshikhovov Viacheslav Khasanovich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: pshichop@rambler.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

**Medvedev Mikhail Yurjevich** – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

**Gissov Vladislav Gennadievich** – e-mail: gistsov@sfnedu.ru; engineer.

УДК 004.272.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-123-133

**А.А. Зеленский**

### **КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ РОССИИ**

*Целью исследования является рассмотрение возможности построения конкурентоспособных быстродействующих систем управления движением на основе имеющейся в России электронной компонентной базы. Предлагается авторская методика количественной оценки доверия к системе управления, согласно которой доверие определяется в соответствии с доверием ко всем ее элементам на всех технологических уровнях применительно к обеспечению функциональной надежности и информационной безопасности исходя из оценки доверия к результатам разработки и тестирования этих элементов. Рассматривается комплексная проблема обеспечения доверия к системам управления движением, обусловленная зависимостью страны от импорта оборудования с иностранными системами управления, малыми объемами и технологическим отставанием производства полупроводниковой продукции и оборудования для этого производства, а также невозможностью обеспечения доверия к интеллектуальным системам управления без полного доступа к их разработке. Для данной проблемы предлагается решение, не требующее доведения в России до мирового уровня всего спектра технологий, используемых для создания систем управления. Это решение основано на использовании предлагаемой автором комплексной методологии синтеза систем управления, в основе которой лежит известный подход построения системы управления в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки*

задачи до уровня электронного устройства, дополненный заданием промежуточного уровня – уровня архитектуры системы управления и конкретным выбором память-центрической архитектуры. С учетом определения выбранного промежуточного уровня системы управления движением комплексная методология системы управления позволяет, отталкиваясь от возможности формирования методологии программирования системы управления, а в соответствии с имеющейся в наличии электронной компонентной базы – определять методы синтеза подсистем управления движением. Предлагаемая комплексная методология также предполагает систематизацию подсистем интеллектуального блока, блока чувствления и исполнительного блока системы управления движением в виде ограниченных наборов подсистем, достаточных для построения всего разнообразия систем управления движением.

*Система управления движением; доверие; быстродействие; комплексная методология синтеза; память-центрическая архитектура; электронная компонентная база.*

**A.A. Zelensky**

### **THE CONCEPT OF BUILDING COMPETITIVE HIGH-SPEED CONTROL SYSTEMS FOR MACHINE TOOLS AND INDUSTRIAL ROBOTS UNDER THE TECHNOLOGICAL LIMITATIONS OF THE RUSSIA ELECTRONIC COMPONENT BASE**

*The aim of the study is to consider the possibility of building competitive fast-track traffic control systems on the basis of the electronic component base available in Russia. The author's methodology for quantitative assessment of confidence in the control system, according to which confidence is determined in accordance with the confidence in all its elements at all technological levels in relation to ensuring functional reliability and information security based on the assessment of confidence in the results of development and testing of these elements, is offered. The complex problem of providing confidence to the traffic control systems, caused by the country dependence on import of equipment with foreign control systems, small volumes and technological lag of semiconductor production and equipment for this production, and also impossibility of providing confidence to the intelligent control systems without full access to their development is considered. For this problem, a solution is proposed that does not require bringing the full range of technologies used to create control systems to the world level in Russia. This solution is based on the use of the complex methodology of synthesis of control systems, proposed by the author, which is based on the known approach of building a control system in the form of a sequential multi-level transformation from the problem statement to the electronic device level, supplemented by the definition of the intermediate level (the level of control system architecture) and a specific choice of memory-centric architecture. Taking into account the definition of the selected intermediate level of the motion control system, the complex methodology of the control system allows, starting from the possibilities of the memory-centric architecture, to form the methodology of the control system programming in accordance with the set control task, and in accordance with the available electronic component base - to determine the methods of synthesis of the motion control subsystems. The proposed integrated methodology also involves the systematization of subsystems of the intelligent block, sensing block and the executive block of the motion control system in the form of limited sets of subsystems, sufficient for the construction of the entire variety of motion control systems.*

*Motion control system; trust; performance; complex synthesis methodology; memory-centric architecture; electronic component base.*

**Введение.** Необходимым атрибутом глобальной конкурентоспособности и технологической независимости в настоящее время является наличие в стране собственного производства средств производства. К числу базовых отраслей – производителей средств производства относятся станкостроение, производство роботов и другого технологического оборудования.

Современное высокотехнологическое оборудование оснащается системами управления движением, конкурентоспособность которых определяется рядом факторов, наиболее значимыми из которых являются доверие и быстродействие.

**Постановка задачи.** Доверие к системе управления движением складывается из двух составляющих: функциональной надежности и информационной безопасности. Проведенные автором исследования позволили разработать методологию

количественного определения доверия  $D$  к системе управления движением. Согласно этой методологии, доверие к системе управления движением определяется в соответствии с доверием ко всем ее элементам на всех технологических уровнях (уровне электронной компонентной базы, приборов, системного и прикладного программного обеспечения) применительно к обеспечению функциональной надежности и информационной безопасности исходя из оценки доверия к результатам разработки и тестирования этих элементов:

$$D = \prod_{i=1}^4 \prod_{j=1}^2 \left( \sum_{p=1}^{p_{\max}} (D_{ijp}^P W_{ijp}^P) + \left( 1 - \sum_{p=1}^{p_{\max}} (D_{ijp}^P W_{ijp}^P) \right) \sum_{p=1}^{p_{\max}} (D_{ijp}^T W_{ijp}^T) \right), \quad (1)$$

где  $D_{ijp}^P, D_{ijp}^T$  – показатели доверия к результатам разработки и к результатам тестирования  $p$ -го элемента на  $i$ -ом технологическом уровне по  $j$ -му требованию (функциональной надежности или информационной безопасности);  $W_{ijp}^P, W_{ijp}^T$  – статистические веса  $p$ -го элемента на  $i$ -ом технологическом уровне при оценке показателя доверия по  $j$ -му требованию к результатам разработки и к результатам тестирования.

Быстродействие системы управления движением — величина, обратно пропорциональная длительности цикла управления. Необходимо разграничивать быстродействие и производительность. Быстродействие определяет способность системы выполнить все необходимые для управления оборудованием операции за заданный промежуток времени (за цикл управления), а производительность определяется количеством операций управления за единицу времени. Для управления движением в реальном времени наиболее жесткие требования предъявляются к быстродействию, поскольку погрешность воспроизведения движений управляемых рабочих органов ограничивает максимальную длительность цикла управления.

Проблема обеспечения доверия к системам управления движением в случае России обусловлена зависимостью страны от импорта оборудования с иностранными системами управления [1], малыми объемами и технологическим отставанием производства полупроводниковой продукции и оборудования для этого производства [2], а также невозможностью обеспечения доверия к интеллектуальным системам управления без полного доступа к их разработке [3]. Полное решение проблемы обеспечения доверия возможно только при освоении в России всего спектра технологий, используемых для создания систем управления. В среднесрочной перспективе это невозможно, поэтому необходимо искать альтернативные пути обеспечения доверия, основанные на более эффективном использовании имеющихся в России ограниченных технологических возможностей. Одним из наиболее перспективных направлений поиска указанных альтернативных путей обеспечения доверия является совершенствование архитектуры системы управления. Это направление хорошо коррелирует с направлением развития микроэлектронных технологий «Больше, чем Мур», в рамках которого повышение эффективности (в том числе быстродействия) обеспечивается не столько за счет совершенствования электронной компонентной базы (что является основой направления Больше Мура), а на уровне системы, в том числе на аппаратном уровне.

**Методология синтеза систем управления.** Одновременное решение проблемы доверия к системе управления и проблемы повышения быстродействия, ограниченное использованием имеющейся электронной компонентной базы с ограниченными функциональными возможностями (в частности, не самыми «тонкими» проектными нормами) представляется целесообразным искать с использованием предложенной автором комплексной методологии синтеза систем управления.

В основе данной методологии лежит известный подход построения системы управления в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства [4].

Примером практического построения системы управления на основе данного подхода являются многопроцессорные вычислительные комплексы «Эльбрус» и «Эльбрус-2», разработанные под руководством В.С. Бурцева. В табл. 1 представлено описание реализации модели решения проблемы синтеза для указанных вычислительных комплексов.

Таблица 1

**Реализация модели решения проблемы синтеза для вычислительных комплексов «Эльбрус» и «Эльбрус-2»**

Уровень преобразования	Описание реализации
Проблема	Решаемая проблема формулировалась как создание эффективной системы ПРО (противоракетной обороны) с производительностью не менее 100 млн операций в секунду.
Алгоритм	Используемый для решения поставленной проблемы алгоритм основан на создании многопроцессорного вычислительного комплекса.
Программа/Язык	Для реализации заданного алгоритма был сформирован специальный язык – система команд [5, с. 59]
Программная среда	Специально созданная операционная система МВК «Эльбрус» [5, с. 120]
Микроархитектура	Типовая ячейка МВК «Эльбрус-2», состоящая из сборок мультичипов и микросхем ИС-100
Логика/Схемы	Система управления (вычислительный комплекс) на задачах быстрого преобразования Фурье обеспечивала производительность порядка 600 млн. операций в секунду, а на задачах уравнений математической физики – производительность близкую к миллиарду операций в секунду. Для этого были разработаны спецпроцессоры, воспроизводящие команды БЭСМ-6 (процессор СВС), процессор быстрого преобразования Фурье (БПФ) и векторный процессор МВК «Эльбрус-2».

Более эффективно указанное многоуровневое преобразование реализуется в случае, когда наряду с уровнем постановки задачи (определяющем цель построения системы управления) и уровнем электронной компонентной базы (определяющим средства построения системы управления), также задается промежуточный уровень. При этом необходимо выбрать такой промежуточный уровень, определение которого минимизирует вариативность синтеза системы управления, а также на котором можно задать базовую установку на реализацию параллельности вычислений. Таким промежуточным уровнем является уровень архитектуры системы управления, а конкретным выбором архитектуры является память-центрическая архитектура [6], при которой данные в процессе вычислений не перемещаются между процессором и памятью (что требует затрат времени, энергии и ограничено пропускной способностью каналов связи), а остаются в памяти, в которую интегрируется процессор. Данные, перемещаемые между различными вычислительными устройствами системы управления, представляют собой результаты вычислений, имеющие незначительный объем.

Разработанная автором память-центрическая система управления движением промышленного робота включает в себя (рис. 1): ядро системы управления движением, имеющее техническую реализацию в виде микроконтроллера или компьютера; блок оцувствления, включающий систему технического зрения и модуль обработки аналоговых и дискретных входов, по которым в систему управления поступают данные с датчиков и информация от сенсоров; исполнительный блок, включающий в себя модули для кинематических, динамических и других вычислений, необходимых для управления движением в промышленном роботе, а также регуляторы исполнительных устройств; интеллектуальный блок, включающий в себя два модуля: человеко-машинный интерфейс, а также искусственный интеллект или систему машинного обучения, реализованные в виде искусственной нейронной сети; оперативную память системы управления (динамическую память с произвольным доступом, статическую память с произвольным доступом, а также дополнительную виртуальную память в виде RAM-диска); коммуникационную сеть, представляющую собой систему цифровых и аналоговых каналов связи, коммутационного оборудования и устройств для преобразования сигналов (цифро-аналоговых, аналогово-цифровых и др.).

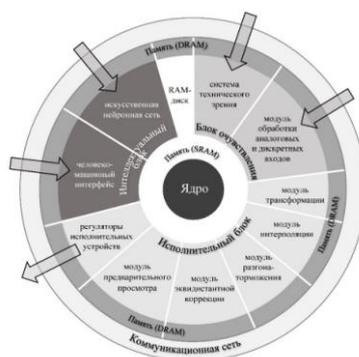


Рис. 1. Концептуальная модель системы управления движением с память-центрической архитектурой

С учетом определения выбранного промежуточного уровня системы управления движением комплексная методология системы управления приобретает специфическую последовательность (рис. 2). Отталкиваясь от возможностей память-центрической архитектуры в соответствии с поставленной задачей управления формируется методология программирования системы управления, а в соответствии с имеющейся в наличии электронной компонентной базы определяются методы синтеза подсистем управления движением.

Подсистемы интеллектуального блока доверенной системы управления реального времени являются инструментарием решения комплексной проблемы интеллектуализации управления.

К числу основных групп задач интеллектуализации управления, которые необходимо решать для повышения качества управления, относятся:

1. Повышение производительности объектов управления (промышленных роботов, станков и других мехатронных систем) за счет интеллектуализации подготовки производства. Это может быть достигнуто путем включения в состав интеллектуального блока автономных быстродействующих подсистем, управляющих позиционированием, установкой, межоперационными перемещениями и др. операциями подготовки производства. Важной частной задачей, относящейся к данной группе, является задача привязки базисных систем координат на основе технического зрения [6, 7].

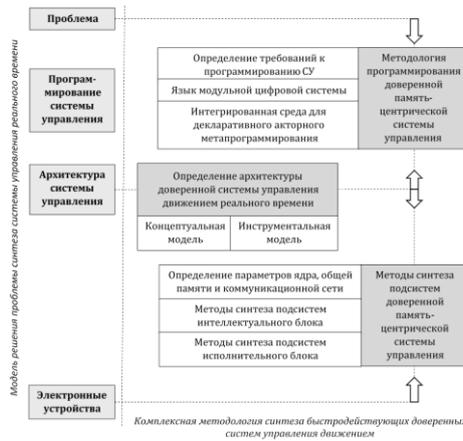


Рис. 2. Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением

2. Реализация управления на основе обработки больших объемов данных измерений состояния управляемого объекта. Частными задачами, относящимися к данной группе, являются задача мультиспектральной обработки и анализа характеристик одномерных данных с датчиков и сенсоров, задача комплексирования/слияния разнородных данных и др. [8, 9].

3. Повышение качества человеко-машинного взаимодействия, в частности, повышение скорости работы человека-оператора, снижение количества ошибок, повышение скорости обучения и улучшение условий работы оператора. Одной из частных задач, относящихся к данной группе, является управление коллаборативными робототехническими комплексами на основе методов бесконтактного распознавания действий человека [10, 11].

4. Реализация адаптивности в процессе управления движением исходя из текущего положения и скорости рабочего органа или при решении транспортной задачи при перемещении промышленного робота или мехатронной системы в вариативном окружении цеха, закрытого помещения или на открытых пространствах. Частной задачей, относящейся к данной группе, является задача интеллектуального планирования траектории движения исполнительных механизмов робототехнических и мехатронных систем в результате восстановления трехмерных сцен [12].

5. Расширение функциональности и качества бесконтактных измерений и других технологий неразрушающего контроля физических объектов на основе интеллектуализации измерений. Частной задачей, имеющей существенную практическую значимость, является задача контроля качества сварных швов и соединений методами неразрушающего контроля на основе глубинного обучения [13, 14].

Анализ реализации различных задач интеллектуализации управления движением выявил повторяемость использования ограниченной номенклатуры подсистем, обеспечивающих заданную функциональность системы управления. В результате схема синтеза подсистем интеллектуального блока и блока очувствления получает детализацию в виде используемых подсистем (рис. 3).

Указанная номенклатура включает подсистемы блока очувствления, необходимые для решения задач интеллектуализации управления (восстановление данных; уменьшение размерности данных; преобразование данных в другие пространства; объединение данных; реконструкция данных), и подсистемы интеллектуального блока (оценка качества данных, сегментация данных, выделение объектов, оценка параметров объектов (особые точки/дескрипторы), оценка траектории, сопровождение объектов, распознавание объектов).

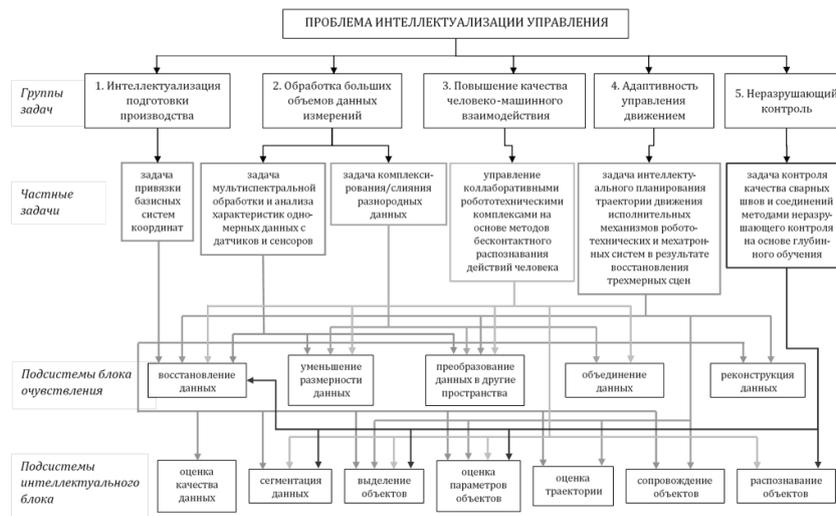


Рис. 3. Схема синтеза подсистем интеллектуального блока и блока оувствления

Рассмотрим теперь подсистемы исполнительного блока.

Исследования существующих систем управления промышленных роботов и мехатронных систем [15–21], показывают, что в исполнительном блоке системы управления обычно присутствуют следующие подсистемы (функциональные модули): интерполятор, модуль разгона-торможения, модуль эквидистантной коррекции, модуль предварительного просмотра, модуль трансформации, а также регуляторы исполнительных устройств.

Метод синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу. Структурно-параметрический синтез – это процесс, в результате которого определяется структура объекта и находятся значения параметров составляющих ее элементов таким образом, чтобы были удовлетворены условия задания на синтез (технического задания) [22]. Отличие параметрического синтеза от структурно-параметрического заключается в том, что для него структура модели фиксирована и не изменяется в процессе синтеза, а размерность вектора параметров фиксирована. В результате изменяются только параметры и поиск в процессе синтеза осуществляется в пространстве параметров.

Применительно к синтезу исполнительного блока в составе системы управления структурно-параметрический синтез означает, что осуществляется уточнение структуры (набора подсистем – функциональных модулей из числа доступных для использования), а также определяются параметры подсистем, необходимые для реализации заданных функциональных свойств. Для решения типовых задач синтеза, когда совокупность подсистем уже известна, задача синтеза упрощается и может использоваться параметрический синтез, заключающийся в определении параметров подсистем (номенклатура параметров, диапазоны изменений, задержки, протоколы обмена данными и т.д.).

Ключевой составляющей структурно-параметрического и параметрического синтеза является определение необходимого и достаточного комплекса подсистем, из которых будет формироваться («собираться») исполнительный блок.

Для формирования указанного комплекса подсистем следует использовать подход, включающий в себя две взаимодополняющих составляющие:

1. Структурный анализ существующих промышленных роботов, станков с ЧПУ и других производственных мехатронных комплексов с целью выявления ограниченного комплекса подсистем (функциональных модулей), из которых формируются исполнительные блоки их систем управления. Анализ существующих промышленных роботов, станков с ЧПУ и других производственных мехатронных комплексов показывает, что в исполнительном блоке системы управления обычно присутствуют такие подсистемы (функциональные модули) как интерполятор, модуль разгона-торможения, модуль эквидистантной коррекции, модуль предварительного просмотра, модуль трансформации, регуляторы исполнительных устройств, а также модуль безопасности.

2. Определение совокупности функций и задач управления, реализуемых подсистемами (функциональными модулями), обеспечивающий требуемые функциональные свойства исполнительного блока систем управления для максимально широкой номенклатуры задач синтеза. Стандартный набор задач подготовки данных, решаемых системой управления, включает: приведение координат узловых точек траектории из текущей локальной системы координат в систему координат осей оборудования (робота, станка и др.), преобразование единиц измерения, пересчёт относительных размеров в абсолютные; расчёт параметров линейной, круговой (винтовой) интерполяции или интерполяции сплайнами; построение эквидистантных траекторий для коррекции длины и радиуса обрабатываемого инструмента; предпросмотр траектории для поиска изломов и расчёта допустимой скорости движения; расчёт участков разгона-торможения. Наряду с задачами подготовки данных функциональное назначение исполнительного блока также включает управление внешними устройствами (в частности, приводами).

Приведенный выше комплекс задач обеспечения точности и быстродействия исполнения движения рабочего органа (задач управления для исполнительного блока) может быть реализован соответствующими подсистемами. К числу подсистем исполнительного блока, обеспечивающих необходимый набор функций управления, в частности относятся (рис. 4): модуль задания траектории в декартовых координатах, геометрический модуль сглаживания, динамический модуль АСДС (реализующий двунаправленный алгоритм сканирования, объединяющий функцию управления разгоном/торможением и функцию предварительного просмотра), интерполяционный модуль, а также блоки кинематических преобразований.

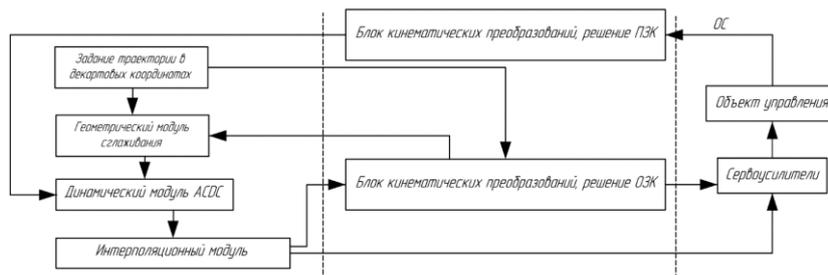


Рис. 4. Биективная сквозная система формирования оптимального движения

Все указанные подсистемы, за исключением блоков кинематических преобразований, образуют объединенную сквозную системы формирования оптимального движения. После ее дополнения блоком кинематических преобразований получается биективная сквозная система формирования оптимального движения, реализующая однозначное решение полного комплекса задач обеспечения точности и быстродействия исполнения движения рабочего органа.

**Заключение.** На основе проведенных в данной статье исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Проведенные автором исследования позволили разработать методологию количественного определения доверия к системе управления движением. В рамках данной методологии доверие к системе управления движением определяется в соответствии с доверием ко всем ее элементам на всех технологических уровнях применительно к обеспечению функциональной надежности и информационной безопасности исходя из оценки доверия к результатам разработки и тестирования этих элементов.

2. Проблема обеспечения доверия к системам управления движением в случае России имеет комплексный характер. Полное решение этой проблемы возможно только при освоении в России всего спектра технологий, используемых для создания систем управления. В среднесрочной перспективе это невозможно, поэтому необходимо искать альтернативные пути обеспечения доверия, основанные на более эффективном использовании имеющихся в России ограниченных технологических возможностей.

3. Одновременное решение проблемы доверия к системе управления и проблемы повышения быстродействия, ограниченное использованием имеющейся электронной компонентной базы с ограниченными функциональными возможностями представляется целесообразным искать с использованием предложенной автором комплексной методологии синтеза систем управления, в основе которой лежит известный подход построения системы управления в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства, дополненный заданием промежуточного уровня – уровня архитектуры системы управления и конкретным выбором память-центрической архитектуры.

4. С учетом определения выбранного промежуточного уровня системы управления движением комплексная методология системы управления приобретает специфическую последовательность: отталкиваясь от возможностей память-центрической архитектуры в соответствии с поставленной задачей управления формируется методология программирования системы управления, а в соответствии с имеющейся в наличии электронной компонентной базы определяются методы синтеза подсистем управления движением.

5. Подсистемы интеллектуального блока доверенной системы управления реального времени являются инструментарием решения комплексной проблемы интеллектуализации управления. Анализ реализации различных задач интеллектуализации управления движением выявил повторяемость использования ограниченной номенклатуры подсистем, обеспечивающих заданную функциональность системы управления.

6. Метод синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу. Весь комплекс задач управления для исполнительного блока может быть реализован ограниченным набором подсистем. Все указанные подсистемы, за исключением блоков кинематических преобразований, образуют объединенную сквозную систему формирования оптимального движения. После ее дополнения блоком кинематических преобразований получается биактивная сквозная система формирования оптимального движения, реализующая однозначное решение полного комплекса задач обеспечения точности и быстродействия исполнения движения рабочего органа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зеленский А.А., Морозкин М.С., Панфилов А.Н., Купцов В.Р., Грибков А.А. Проблема зависимости оборонно-промышленного комплекса России от импорта технологического оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 203-207.
2. Зеленский А.А., Морозкин М.С., Грибков А.А. Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 468-480.

3. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Жданова М.М., Воронин В.В., Грибков А.А. Проблема обеспечения производительности доверенных систем управления с глубинным обучением // *Advanced Engineering Research*. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 57-66.
4. Patt Y. Requirements, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution / *Proceedings of the IEEE*. – 2001. – Vol. 89, No. 11. – P. 1553-1559.
5. Бурцев В.С. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры супер-ЭВМ. МВК "Эльбрус". – М.: ИВВС РАН, 1998.
6. Зеленский А.А., Илюхин Ю.В., Грибков А.А. Память-центрические модели систем управления движением промышленных роботов // *Вестник Московского авиационного института*. – 2021. – Т. 28, № 4 – С. 245-256.
7. Bouzgou K., Ahmed-Foitih Z. Workspace analysis and geometric modeling of 6 dof fanuc 200ic robot // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2015. – Vol. 182. – P. 703-709.
8. Zhang Z. Microsoft kinect sensor and its effect // *IEEE multimedia*. – 2012. – Vol. 19, No. 2. – P. 4-10.
9. Walts E.L. Data fusion for C3I: a tutorial, in: *Command, Control, Communications Intelligence (C3I) Handbook*, EW Communications Inc., Palo Alto, CA. – 1986. – P. 217-226.
10. Hall D.L., Linas J.L. An introduction to multisensor fusion // *Proceedings of the IEEE*. – 1997. – 85 (1). – P. 6-23.
11. Wang H, Kläser A, Schmid C, Liu CL. Dense trajectories and motion boundary descriptors for action recognition // *Int. J. of computer vision*. – 2013. – 103 (1). – P. 60-79.
12. Ji X.F., Wu Q.Q., Ju Z.J., Wang Y.Y. Study of human action recognition based on improved spatio-temporal features. – Springer Berlin Heidelberg. – 2017. – P. 233-250.
13. Dissanayake G., Newman P. Durrant-Whyte H.F., Clark S., Csorba M. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem // *IEEE transaction robotic automation*. – 2001. – No. 17 (3). – P. 229-241.
14. Russakovsky O., Deng J., Su H., Krause J., and et al. ImageNet large scale visual recognition challenge / *CoRR*, vol. abs/1409.0575 (2014). – URL: <http://arxiv.org/abs/1409.0575>.
15. Kountchev R.K., Rubin S.H., Todorov V.T., Kountcheva R. A. Automatic detection of welding defects / *Int. J. Reasoning-based Intelligent Systems*. – 2011. – Vol. 3, No. 1. – P. 34-43.
16. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Илюхин Ю.В., Харьков М.А. Высокопроизводительная цифровая система на основе ПЛИС для управления движением многокоординатных станков и промышленных роботов // *СТИН*. – 2019. – № 8. – С. 5-8.
17. Suh S.H., Kang S.K., Chung D.H., Stroud I. *Theory and design of CNC systems*. – Springer Science & Business Media, 2008.
18. Мартинов Л.И., Мартинов Г.М. Организация межмодульного взаимодействия в распределенных системах ЧПУ. Модели и алгоритмы реализации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2010. – № 11. – С. 50-55.
19. Фу К., Гонсалес Р., Лу К. *Робототехника*. – М.: Мир, 1989. – С. 624.
20. Ruishu Z., Chang Z., Weigang Z. The status and development of industrial robots // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018. – Vol. 423, No. 1. – P. 012051.
21. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 1. Промышленная робототехника // *Российский технологический журнал*. – 2019. – Т. 7, № 5. – С. 30-46.
22. Илюхин Ю.В. Синергетический (мехатронный) подход к проектированию систем управления технологических роботов // *Мехатроника*. – 2000. – № 2. – С. 7-12.
23. Волков В.А., Чудинов С.М. Системный анализ для структурно-параметрического синтеза // *Экономика. Информатика*. – 2012. – № 19 (138). – Вып. 24/1.

## REFERENCES

1. Zelensky A.A., Morozkin M.S., Panfilov A.N., Kuptsov V.R., Gribkov A.A. Problema zavisimosti oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii ot importa tekhnologicheskogo oborudovaniya [The problem of dependence of the military-industrial complex of Russia on the import of technological equipment], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News of the Tula State University. Technical science], 2021, No. 9, pp. 203-207.
2. Zelensky A.A., Morozkin M.S., Gribkov A.A. Obzor poluprovodnikovoy promyshlennosti v mire i Rossii: proizvodstvo i oborudovaniye [Overview of the semiconductor industry in the world and Russia: production and equipment], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2021, Vol. 26, No. 6, pp. 468-480.

3. Zelensky A.A., Abdullin T.Kh., Zhdanova M.M., Voronin V.V., Gribkov A.A. Problema obespecheniya proizvoditel'nosti doverennykh sistem upravleniya s glubinnym obucheniym [The problem of ensuring the performance of trusted control systems with deep learning], *Advanced Engineering Research*, 2022, Vol. 22, No 1, pp. 57-66.
4. Patt Y. Requirements, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution, *Proceedings of the IEEE*, 2001, Vol. 89, No.11, pp. 1553-1559.
5. Burcev V.S. Parallelizm vychislitel'nykh processov i razvitie arhitektury superEVM [Parallelism of computational processes and development of supercomputer architecture]. MVK "El'brus". Moscow: IVVS RAN, 1998.
6. Zelensky A.A., Ilyukhin Yu.V., Gribkov A.A. Pamyat'-tsentricheskiye modeli sistem upravleniya dvizheniyem promyshlennykh robotov [Memory-centric models of motion control systems for industrial robots], *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute], 2021, Vol. 28, No. 4, pp. 245-256.
7. Bouzgou K., Ahmed-Foitih Z. Workspace analysis and geometric modeling of 6 dof fanuc 200ic robot, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, Vol. 182, pp. 703-709.
8. Zhang Z. Microsoft kinect sensor and its effect, *IEEE multimedia*, 2012, Vol. 19, No. 2, pp. 4-10.
9. Walts E.L. Data fusion for C3I: a tutorial, in: Command, Control, Communications Intelligence (C3I) Handbook, EW Communications Inc., Palo Alto, CA. 1986, pp. 217-226.
10. Hall D.L., Linas J.L. An introduction to multisensor fusion, *Proceedings of the IEEE*, 1997, No 85 (1), pp. 6-23.
11. Wang H, Kläser A, Schmid C, Liu CL. Dense trajectories and motion boundary descriptors for action recognition, *Int. J. of computer vision*, 2013, No. 103(1), pp. 60-79.
12. Ji X.F., Wu Q.Q., Ju Z.J., Wang Y.Y. Study of human action recognition based on improved spatio-temporal features. *Springer Berlin Heidelberg*, 2017, pp. 233-250.
13. Dissanayake G., Newman P. Durrant-Whyte H.F., Clark S., Csorba M. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem, *IEEE transaction robotic automation*, 2001, No. 17 (3), pp. 229-241.
14. Russakovsky O., Deng J., Su H., Krause J., and et al. ImageNet large scale visual recognition challenge. *CoRR*, vol. abs/1409.0575 (2014). Available at: <http://arxiv.org/abs/1409.0575>.
15. Kountchev R.K., Rubin S.H., Todorov V.T., Kountcheva R. A. Automatic detection of welding defects. *Int. J. Reasoning-based Intelligent Systems*, 2011, Vol. 3, No. 1, pp. 34-43.
16. Zelensky A.A., Abdullin T.Kh., Ilyukhin Yu.V., Kharkov M.A. Vysokoproizvoditel'naya tsifrovaya sistema na osnove PLIS dlya upravleniya dvizheniyem mnogokoordinatnykh stankov i promyshlennykh robotov [High-performance digital system based on FPGA for motion control of multi-axis machine tools and industrial robots], *STIN*, 2019, No. 8, pp. 5-8.
17. Suh S.H., Kang S.K., Chung D.H., Stroud I. Theory and design of CNC systems. *Springer Science & Business Media*, 2008.
18. Martinov L.I., Martinov G.M. Organizatsiya mezhmodul'nogo vzaimodeystviya v raspredelennykh sistemakh CHPU. Modeli i algoritmy realizatsii [Organization of inter-module interaction in distributed CNC systems. Models and implementation algorithms]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control], 2010, No. 11, pp. 50-55.
19. Fu K., Gonzalez R., Lee K. Robototekhnika [Robotics]. Moscow: Mir, 1989, 624 p.
20. Ruishu Z., Chang Z., Weigang Z. The status and development of industrial robots, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, V. 423, №. 1, pp. 012051.
21. Romanov A.M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Chast' 1. Promyshlennaya robototekhnika [Review of hardware and software control systems for robots of various sizes and purposes. Part 1. Industrial robotics]. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian technological journal], 2019, Vol. 7, No. 5, pp. 30-46.
22. Ilyukhin Yu.V. Sinergeticheskii (mekhatronnyy) podkhod k proyektirovaniyu sistem upravleniya tekhnologicheskikh robotov [Synergetic (mechatronic) approach to designing control systems for technological robots], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No 2, pp. 7-12.
23. Volkov V.A., Chudinov S.M. Sistemnyy analiz dlya strukturno-parametricheskogo sinteza [System Analysis for Structural-Parametric Synthesis], *Ekonomika. Informatika* [Economics. Computer science], 2012, No. 19 (138), Issue 24/1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.М. Червяков.

**Зеленский Александр Александрович** – Научно-производственный комплекс «Технологический центр»; e-mail: Zelenskyaa@gmail.com; г. Зеленоград, Россия; к.т.н.; в.н.с.

**Zelensky Alexander Aleksandrovich** – Scientific-Manufacturing Complex «Technological Centre»; e-mail: Zelenskyaa@gmail.com; Zelenograd, Russia; cand. of eng. sc.; leading researcher.