

## Раздел I. Мультиагентные системы и технологии

УДК 007:519.711:681.5

**К.В. Петрин, Е.Д. Теряев, А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов**

### **МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

*Анализируются перспективы применения мультиагентных технологий в эргатических системах управления техническими объектами. Обсуждается агентная концепция гибридного интеллекта. Излагаются особенности агентно-ориентированного проектирования эргатических систем. Рассматриваются агентно-ориентированные решения для задач интеллектуализации человеко-машинного интерфейса, многорежимного управления, ситуационно-целевого управления и сценарного планирования.*

*Эргатические системы; мультиагентные технологии; гибридный интеллект; интеллектуальный человеко-машинный интерфейс; многорежимность; ситуационно-целевой подход; сценарное планирование.*

**K.V. Petrin, E.D. Teryaev, A.B. Filimonov, N.B. Filimonov**

### **MULTIAGENT TECHNOLOGIES IN THE ERGATIC CONTROL SYSTEMS**

*The perspectives of multiagent technologies use in the ergatic control systems by technological objects are analyzed. The agent conception of hybrid intellect is discussed. The singularities of the agent-oriented design of the ergatic systems are presented. The agent-oriented decisions for the tasks of intellectualization of human-machine interface, multicondition control, situation-goal control and scenario designing are considered.*

*Ergatic systems; multiagent technologies; hybrid intellect; intellectual human-machine interface; multicondition; situation-goal approach; scenario designing.*

**Введение.** Одна из закономерностей научно-технического прогресса – ускоренное возрастание сложности и масштабов технических систем, степени их влияния на техносферу. Проблема их эффективности и безопасной эксплуатации приобретает первостепенное значение и не может решаться вне сферы автоматизации, в которой исключительно важную роль играют эргатические системы управления (ЭСУ). К данному классу систем относятся автоматизированные системы оперативно-диспетчерского управления в производственной сфере, управляемый человеком автомобильный, железнодорожный, авиакосмический, морской и речной транспорт, системы дистанционного управления манипуляционными роботами, радиолокационными станциями, системы телеуправления в ручном режиме и др.

Современный этап развития автоматизированных систем характеризуется более широким применением интеллектуальных компьютерных технологий в процессах обработки информации, принятия решений и управления. Проблематика применения встроенного компьютерного интеллекта открывает новое направление научных исследований в области автоматизации ЭСУ. Развитие данного направления предполагает кардинальные изменения функциональной структуры процессов управления, создание необходимой теоретической базы для постановки и решения конкретных научно-технических задач.

В общем арсенале средств интеллектуализации автоматизированных систем все большее признание получает агентный подход, который представляет несомненный интерес и для эргатических систем. В докладе предпринята попытка панорамного рассмотрения перспектив применения мультиагентных технологий к данному классу систем.

**Агентный подход и принцип гибридного интеллекта.** Функционирование современных ЭСУ протекает в динамичной и потенциально опасной внешней среде, в условиях жестких требований к правильности и качеству принимаемых оперативных решений, что закономерно порождает негативные факторы для человека-оператора (ЧО) – *сенсорные, эмоциональные и интеллектуальные перегрузки*. В связи с этим одна из важнейших проблем разработки высокоэффективных ЭСУ заключается в оптимальном распределении функций между ЧО и техническими средствами с учетом психофизиологических возможностей человека.

В простых случаях машина обеспечивает ЧО информацией о реальной обстановке и осуществляет трансформацию его действий в сигналы управления исполнительными механизмами. Для многих видов ЭСУ основными являются ручной и полуавтоматический режимы управления. При этом предъявляются высокие требования к операторам: к их сенсомоторным реакциям, тренированности и координации движений, способности мгновенно ориентироваться и принимать решения в критических ситуациях и автоматически выполнять эти решения. На более высоких уровнях автоматизации ЭСУ компьютер замещает человека при выполнении ряда функций. Наиболее гибкое взаимодействие человека и машины обеспечивается в адаптивных ЭСУ.

Свойство *адаптации* ЭСУ заключается в приспособлении к изменяющимся условиям работы как внутри самой системы, так и по отношению к внешней среде, в изменении режима функционирования в соответствии с новыми условиями. В адаптивных эргатических системах осуществляется не жесткое, а гибкое распределение информационно-управляющих функций между человеком и машиной.

До недавнего времени свойство адаптации эргатических систем реализовалось благодаря приспособительным возможностям человека, гибкости и пластичности его поведения, возможности его изменения в зависимости от конкретной обстановки. В настоящее время на повестку дня ставится вопрос о реализации машинных механизмов адаптации средствами компьютерного интеллекта: интеллектуальная информационно-управляющая среда ЭСУ должна *изменять свои параметры и функции в зависимости от текущего конкретного психофизиологического состояния человека и показателей эффективности его деятельности*.

Интеллектуальная поддержка деятельности оператора ЭСУ реализуется компьютерными технологиями. Здесь могут быть использованы различные инструменты искусственного интеллекта, включая экспертные технологии. Такие системы являются системами реального времени с динамической базой знаний, которая может наращиваться в процессе функционирования ЭСУ. Экспертная система в режиме консультации выдает оператору необходимые советы и подсказки.

Однако машина не может конкурировать с человеком в слабоструктурированных ситуациях, поэтому в сложной и изменчивой среде функционирования ЭСУ оператор неизбежно будет являться ведущим звеном в управляющем тандеме «человек – компьютер». Одних лишь сенсомоторных и психофизических кондиций и навыков оператора недостаточно для эффективного управления – необходимо также учитывать и использовать его интеллектуальные ресурсы. Поэтому эволюционирование ЭСУ неизбежно будет основываться на принципах *гибридного интеллекта* [1] – симбиотической интеграции функциональностей искусственного (компьютера) и естественного (оператора) интеллектов.

*Многоагентные системы* интегрируют в себе самые передовые достижения в области программного обеспечения, систем искусственного интеллекта и распределенных информационных систем, демонстрируя принципиально новые качества самоорганизации и интеллектуального поведения. В рамках мультиагентного подхода система строится как совокупность (сеть) агентов. Под *агентом* понимается программно-аппаратная или программная сущность, которая может принимать информацию из внешней среды и реагировать на внешние возмущения. Агент способен автономно решать возложенные на него задачи, адаптироваться к изменениям во внешнем окружении, а также общаться с другими агентами для достижения глобальных целей.

Программные агенты ЭСУ – это компьютерные программы, которые исполняются асинхронно в соответствии с предписанным им целенаправленным поведением. В системах с агентной архитектурой задачи разбиваются на типовые подзадачи, выполняемые командой программных агентов. Каждая из них инициируется либо периодически, либо при возникновении определенных ситуаций. В ЭСУ с агентно-ориентированным программным обеспечением осуществляется гибкое распределение ролей в процессе управления между оператором и агентами.

Агентный подход органично сочетается с идеей гибридного интеллекта. Вплощением его является мультиагентная архитектура компьютерной компоненты гибридного интеллекта. В итоге эргатические функции рационально распределяются между ЧО и сетью специализированных агентов, которые дополняют сенсорные и моторные возможности человека, выполняют роль его ассистентов при решении задач фильтрации, селекции и интеграции информационных потоков, принятии оперативных решений и реализации управляющих воздействий.

**Агентно-ориентированное проектирование эргатических систем управления.** Агентные решения не укладываются в рамки традиционных проектных решений. В связи с этим необходима разработка агентно-ориентированной методологии проектирования ЭСУ. Ее основу должны составлять новые *системотехнические* принципы:

- 1) виртуализация функциональной структуры системы;
- 2) делегирование функциональных задач агентам;
- 3) ролевая специализация агентов;
- 4) структуризация ролей агентов, гарантирующая достижение целей;
- 5) агентная организация параллельных процессов реального времени и др.

Агентный подход применим ко всем базовым функциям ЭСУ. В принципе каждая из функциональных задач автоматизируемой системы может решаться на агентной основе. При этом комплекс таких задач распределяется между организованными в сеть *агентами-исполнителями*, а поток задач управляется *агентами-менеджерами*. *Сенсорные* и *эффекторные* агенты обеспечивают взаимодействие системы с внешним миром. Другие агенты осуществляют управление информационно-измерительными каналами, процессами, ресурсами, работами, выполняют адаптивную обработку информации. Интерфейсные агенты поддерживают человеко-машинное взаимодействие.

Кроме того, агентная архитектура расширяет функциональность проектируемой системы: появляются новые функции, к примеру, функция саморганизации/реорганизации самой системы.

**Агентное управление динамическими режимами.** Важнейшим свойством эргатических систем управления является многорежимность. В зависимости от степени автоматизации возможны различные режимы управления, различающиеся характером человеко-машинного взаимодействия: ручное, полуавтоматическое, автоматическое.

Возможна также классификация режимов управления по функционально-динамическим признакам: цели управления (режимы стабилизации, слежения), стадии движения (установившийся, переходный режимы), принципу управления (режимы программного управления, обратной связи, компенсации возмущений), уровню возмущений номинального режима (режимы управления «в малом», «в большом») и др. Такой тип многорежимной декомпозиции процессов управления лежит в основе методологии многорежимного управления [10], которой стихийно придерживаются многие проектировщики автоматических систем.

Мультиагентная схема организации многорежимного управления заключается в следующем. Задача контроля каждого режима делегируется отдельному агенту, так что множество всех возможных режимов контролируется командой агентов. Процесс диспетчеризации режимов осуществляет специальный агент. Таким образом, имеем двухуровневую агентную структуру: нижний уровень образован агентами-контроллерами режимов, а верхний – агентом-диспетчером режимов.

**Интеллектуализация человеко-машинного интерфейса.** Важнейшим компонентом архитектуры перспективных ЭСУ является человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), в максимальной степени учитывающий человеческий фактор – психологические, физиологические и анатомические аспекты человеко-машинного взаимодействия с учетом всего комплекса решаемых функциональных задач.

Процесс управления должен осуществляться на основе информационной модели объекта и окружающей среды, формируемой в основном за счет средств отображения информации. Однако существуют границы операторских возможностей, за которыми восприятие информации ЧО и его действия затруднены или становятся невозможными [14], вследствие чего необходимо рассматривать проблему ЧМИ через фильтр ограничений.

ЧМИ должен обеспечивать оптимальный информационный баланс и не приводить к таким нежелательным явлениям, как дефицит или избыток информации. Он должен осуществлять адаптивную фильтрацию информационных потоков: в зону внимания ЧО должна вводиться только лишь релевантная оперативная информация, отвечающая текущей цели управления.

Современные ЧМИ включают компьютерный пользовательский интерфейс. С увеличением сложности операторской работы возрастают требования к функциональным и эргономическим аспектам пользовательского интерфейса. Многообразие всех этих требований возможно учесть лишь на пути создания интеллектуального многомодального интерфейса.

*Многомодальный интерфейс* естествен для межчеловеческого общения. Человек сам выбирает, какой канал для передачи какого типа информации ему наиболее удобно использовать в данный момент. Многомодальные интерфейсы могут параллельно обрабатывать несколько потоков информации. Различные формы вывода визуальной и звуковой информации обеспечивают устойчивый интерактивный диалог с пользователем [4]. Современный диалоговый интерфейс организуется с применением речевого интерфейса, компьютерных технологий 3D-визуализации и виртуальной реальности.

Интеллектуализация интерфейса направлена на обеспечение гибкого и адаптивного взаимодействия оператора с компьютером, управление активностью и формами ведения диалога. В его функцию входит также обеспечение диалога на ограниченном естественном языке. Считается, что естественный интерфейс между человеком и компьютером будет достигнут тогда, когда они смогут говорить друг с другом.

Основным информационным каналом для оператора является визуальный. В связи с этим самого пристального внимания для понимания процессов человеко-

машинного взаимодействия заслуживает концепция экологической оптики, разработанная Гибсоном (J.J.Gibson) [3].

Голосовой интерфейс является наиболее естественным и простым способом взаимодействия человека с компьютером [15]. Он дополняет (а в ряде случаев исключает) зрительный канал передачи информации, разгружая нервную систему ЧО. Базовые функции голосовых сервисов: командное управление и информирование о состоянии системы и внешней среды, подтверждение выполнения команд, выдача инструкций-подсказок. Голосовой интерфейс играет важную роль в обеспечении безопасности эргатической системы: голосовые сообщения дают возможность адекватно воспринимать информацию и принимать правильные решения в критических ситуациях.

Агентные технологии открывают новые перспективы решения проблемы конструирования интеллектуального интерфейса. Интерфейсные агенты создают единую интегрированную коммуникационную среду, обеспечивают гибкость интерфейсу – адаптируемость структуры и сценария развития диалога применительно к выполняемому заданию и текущим процессам ввода-вывода информации. Формирование грамматики диалога должно основываться на онтологической модели рабочей среды ЭСУ. Интерфейсные агенты способны одновременно (параллельно) выполнить ряд задач, включая корректировку или блокировку ошибочных действий оператора, ведущих к фатальным ошибкам.

**Ситуационно-целевое управление.** Ситуационный подход, берущий начало от аппарата ситуационного исчисления Маккарти (J. McCarthy) [16] и модельной теории мышления Д.А. Поспелова и В.Н. Пушкина [7], находит широкое применение в сфере организационного управления, а также в системах искусственного интеллекта.

*Ситуация* – конкретный набор обстоятельств, которые влияют на систему в данное конкретное время. *Ситуационная модель* дает формальное описание мира с помощью ситуаций, в которых предстоит действовать ЭСУ. В модели учитываются те динамические факторы в структуре объекта и внешнего мира, которые действительно влияют на последующее развитие ситуаций.

Классическое ситуационное управление подчиняется двухступенчатой схеме «ситуация – действие». Алгоритм управления явно не задается, а реализуется на *ситуационной сети*, под которой понимается ориентированный взвешенный граф переходов по эталонным ситуациям, определяемый исходной и целевой ситуациями. Дуги графа отражают смену ситуаций и вызывающие ее информационно-управляющие процессы.

Компьютерная поддержка работы оператора требует разработки формальной модели функционирования ЭСУ. Деятельность ЧО носит сознательный характер – оператор осознает цель своих действий в каждой конкретной ситуации, способы достижения цели и предвидит результат. Следовательно, для описания работы оператора сложной эргатической системы необходимо применять четырехступенчатую схему «ситуация – цель – план – действия». Поскольку каждая ситуация порождает определенную локальную цель действий, то в итоге глобальная цель функционирования ЭСУ достигается посредством отработки перманентно возникающих локальных целей.

Компьютеризация процесса ситуационно-целевого управления сводится к решению цепочки следующих задач: 1) мониторинг ситуаций; 2) генерация локальной цели; 3) формирование оперативного плана действий; 4) выполнение запланированных действий. В рамках агентного подхода ситуационно-целевое управление воплощается двухуровневой иерархической структурой: каждая из выделенных функциональных задач делегируется соответствующему агенту-исполнителю, а действия последних координируются вышестоящим агентом.

В данную группу агентов включаются также интерфейсные агенты, реализующие интерактивную оболочку ситуационно-целевого подхода.

Термины «ситуация» и «ситуационное управление» достаточно широко распространены в области автоматического и автоматизированного управления, получая различные истолкования (см., например, [5, 8, 13]). В связи с этим необходимо подчеркнуть особенности развиваемого авторами ситуационно-целевого подхода:

1. Ситуация не является совокупность переменных состояния объекта и окружающей среды, а идентифицирует некоторую область локализации динамических переменных. К примеру, при малых возмущениях текущего динамического режима состояние системы изменяется, однако ситуация остается неизменной.

2. Каждая ситуация порождает локальную (рабочую) цель деятельности, для достижения которой формируется свой план действий, который принимается к исполнению. В итоге процесс ситуационно-целевого управления носит дискретно-временной характер.

3. Важнейшими компонентами ситуационно-целевого подхода являются классификация ситуаций (в частности, выделение критических – предаварийных и аварийных ситуаций) и базирующаяся на данной классификации задача ситуационного мониторинга.

4. Предлагаемый ситуационно-целевой подход органично сочетается с многоцелевым принципом функционирования ЭСУ: главная цель системы разбивается на подцели, порождаемые сменяющимися ситуациями.

5. Излагаемая трактовка ситуации позволяет характеризовать и анализировать динамические процессы в объекте с учетом различных факторов неопределенности в динамике объекта и свойствах окружающей среды.

6. Ситуационное пространство динамических объектов является конечным и представляется ситуационным графом. Тем самым открывается возможность построения аппарата ситуационного исчисления и разработки логико-динамического формализма ситуационно-целевого управления.

**Сценарное планирование.** В рассмотренной цепи эргатических функций «ситуация - цель - план - действия» крайне проблематичным оказывается механизм оперативного планирования действий. Такое планирование должно предписывать выполнение последовательности операций над изменением состояния системы «машина – среда» в текущей ситуации и должно учитывать особенность психологии ЧО: восприятие им рабочей среды, структуру информационных и мыслительных процессов. Таким образом, здесь налицо весьма специфический тип планирования, которое предлагается интерпретировать как сценарное планирование.

Под *сценарием* понимается упорядоченная последовательность сцен. Сцена определяется стереотипной ситуацией, сложившейся вследствие наступления некоторого набора событий, и действиями в данной ситуации. Сценарий разворачивается в процессе функционирования системы.

*Сценарное планирование* заключается в разработке альтернативных сценариев будущего и создании на их основе гибких долгосрочных планов действий. Все альтернативные сценарии формируются на основе исследования окружающей среды на наличие предопределенных элементов и ключевых неопределенностей, и комбинировании исходов последних. Сценарное планирование рассматривает все сценарии как одинаково возможные в будущем. Сценарный подход придает гибкость стратегиям управления, помогает сократить время реагирования на изменения ситуаций.

Приведенные формулировки понятий сценария и сценарного планирования близки по смыслу к тем, которые используются в когнитивной психологии [11] и, в частности, когнитивной теории сценариев Шенка (R.C. Schank) и Абельсона (R.P. Abelson). Сценарное планирование также является одним из наиболее эффек-

тивных системных инструментов стратегического менеджмента, которые позволяют хозяйствующим субъектам управлять неопределенностью будущего [9].

Сценарные модели, по сути, являются одним из способов представления знаний [6]. Следовательно, те агенты, на которые возлагаются функции сценарного планирования, по своему интеллектуальному уровню должны относиться к так называемому классу когнитивных агентов [12].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Венда В.Ф.* Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
2. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы (обзор) // *Новости искусственного интеллекта.* – 1998. – № 2. – С. 64-116.
3. *Гибсон Дж.* Экологический подход к зрительному восприятию. – М.: Прогресс, 1988. – 464 с.
4. *Ронжин А.Л., Карпов А.А., Ли И.В.* Речевой и модальный интерфейсы. – М.: Наука, 2006. – 171 с.
5. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
6. *Люгер Дж.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: ИД «Вильямс», 2005. – 864 с.
7. *Поспелов Д.А., Пушкин В.Н.* Мышление и автоматы. – М.: Сов. радио, 1972. – 222 с.
8. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
9. *Рингланд Дж.* Сценарное планирование для разработки стратегии, 2008. – М.: ИД «Вильямс», 2008. – 560с.
10. *Солодовников В.В., Филимонов Н.Б.* Динамическое качество систем автоматического регулирования. – М.: МВТУ, 1987. – 84 с.
11. *Солсо Р.Л.* Когнитивная психология. М.: Тривола, 1996. – 600 с.
12. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
13. *Чекинов Г.П., Чекинов С.Г.* Ситуационное управление: состояние и перспективы // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2004. – № 2. – 32 с.
14. Человеческий фактор: В 6 т. / Под ред. Г.Салвенди. – М.: Мир, 1991.
15. *Cohen M.H., Giangola J.P., Balogh J.* Voice User Interface Design, Publisher: Addison-Wesley Professional, 2004. – 368 p.
16. *McCarthy J.* Situations, Actions and Causal Laws // Stanford University Artificial Intelligence Project: Memo 2, Stanford. CA, 1963.

**Петрин Константин Васильевич**

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

E-mail: Kfrolov@imash.ru

101990, г. Москва, М. Харитоньевский пер., 4.

Тел.: 89165147102; факс: 84992695510.

**Теряев Евгений Дмитриевич**

**Филимонов Александр Борисович**

**Филимонов Николай Борисович**

**Petrin Konstantin Vasil'evich**

A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Institute RAS.

E-mail: Kfrolov@imash.ru.

4, M. Khariton'evskii per., Moscow, 101990, Russia.

Phone: 89165147102; fax: 84992695510.

**Terjaev Evgenij Dmitrievich**

**Filimonov Aleksandr Borisovich**

**Filimonov Nikolaj Borisovich**