

Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-5613-0838, martynowa999@bk.ru

Н. К. Киселев^б, первый заместитель главного конструктора, orcid.org/0000-0002-5401-4470

А. А. Мысливый^в, канд. воен. наук, заместитель начальника отдела, orcid.org/0000-0002-6741-3139

^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Малая Посадская ул., 30, Санкт-Петербург, 197046, РФ

^бАО «ЦКБ «Лазурит», Свободы ул., 57, Нижний Новгород, 603951, РФ

^вНИИ ОСИС ВМФ, Разводная ул., 17, Санкт-Петербург, Петергоф, 198516, РФ

Введение: постоянное совершенствование автономных необитаемых подводных аппаратов, усложнение их систем и использование гибридной системы энергообеспечения привели к необходимости разработки системы управления с использованием мультиагентной технологии. К настоящему времени сформировалось большое количество стилей мультиагентных архитектур, преимущественно в области организации производства и разработки программного обеспечения. В связи с этим возникает задача выбора наиболее подходящего стиля архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с гибридной системой энергообеспечения с учетом его особенностей. **Цель:** разработка метода выбора наиболее подходящего стиля мультиагентной архитектуры на множестве альтернативных вариантов. **Метод:** в основу разработанного метода положена сравнительная оценка различных стилей архитектур по нефункциональным требованиям. Для этого специально разрабатывается целевой граф с учетом особенностей проектируемого аппарата. Кроме того, при формировании итогового результата использован алгоритм распространения меток как наиболее подходящий для рассматриваемой задачи. **Результаты:** предложенный метод выбора стиля архитектуры включает в себя выработку показателей, по которым целесообразно вести сравнение альтернативных вариантов; формирование различных стилей архитектур, наиболее подходящих для разрабатываемого аппарата; анализ положительных и отрицательных влияний стиля архитектуры на нефункциональные требования; формализацию этих влияний в виде качественных или количественных меток; получение итоговой оценки путем применения алгоритма распространения меток. **Практическая значимость:** предложенный метод позволяет осуществить выбор наиболее целесообразной архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата. Метод может быть использован также для более широкого круга робототехнических комплексов наземного и воздушного базирования.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, архитектура мультиагентной системы управления, оценка эффективности, нефункциональные требования, алгоритм распространения меток.

Для цитирования: Мартынова Л. А., Киселев Н. К., Мысливый А. А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата. Информационно-управляющие системы, 2020, № 4, с. 31–41. doi:10.31799/1684-8853-2020-4-31-41

For citation: Martynova L. A., Kiselev N. K., Mysliviy A. A. Choice of architecture for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 4, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-4-31-41

Введение

Совершенствование технологий привело к возможности создания сложных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для выполнения продолжительных миссий с переходом на дальние расстояния. Спецификой функционирования АНПА является невозможность использовать спутниковые навигационные системы, а также ограниченность дальности гидроакустической связи и объема передаваемой информации. В результате при выполнении маршрутного задания АНПА приходится преодолевать дальние расстояния практически без сторонней помощи, без дозаправки, с крайне редкой обсервацией по сигналам спутниковых навигационных

систем. Создание таких АНПА сопровождается разработкой сложных систем: системы освещения обстановки; навигационной системы; энергетической системы; интегрированной системы управления [1, 2], взаимодействующей с системами управления остальных систем АНПА, — каждая из которых имеет собственную локальную систему управления. В результате сложилась необходимость формирования интегрированной системы управления на мультиагентной основе. Движение АНПА и выполнение других функций осуществляются путем взаимодействия всех систем-агентов на основе равноправного общения между собой. Все системы взаимосвязаны в виде логической архитектуры, определяемой целями и задачами, стоящими перед АНПА. Логическая

архитектура включает в себя функциональную, поведенческую и временную архитектуры. Функциональная архитектура определяет преобразования, проводимые системой при выполнении своего назначения. Поведенческая архитектура определяет последовательность выполнения действий, условия для управления системой или потоком данных, уровень производительности, необходимый для удовлетворения системных требований. Временная архитектура определяет синхронные и асинхронные аспекты функций системы.

Однако логическая архитектура не способна обеспечить слаженную работу всех агентов, основанную на обработке информации в реальном масштабе времени, безотказности системы, предсказуемости поведения агентов, наиболее критичных для морской робототехники. Поэтому при проектировании системы управления АНПА необходимо учитывать не только функциональные требования, но и так называемые «нефункциональные» требования, определяющие свойства, которые система должна демонстрировать, или ограничения, которые она должна соблюдать, не относящиеся к поведению системы [3]. От того, насколько удачно выбрана архитектура системы управления, зависит успешность и эффективность функционирования АНПА в целом.

К сожалению, в настоящее время, в отличие от оценки функциональности АНПА [4–8], нефункциональным требованиям в области морской робототехники не уделено должного внимания, что может привести при проектировании сложного АНПА к многократному повторному перепроектированию вплоть до полного отказа от проекта.

В отечественной литературе нефункциональные требования к АНПА не рассматривались: в середине 2000-х применительно к АНПА описаны различные виды архитектур [9–17], однако для сложных АНПА они не могут быть использованы без усовершенствования.

В зарубежных источниках формированию современных сложных АНПА уделено достаточно внимания [18–30], однако без сравнительного анализа альтернативных вариантов построения. В то же время работы по формированию различных стилей архитектур мультиагентных систем в других областях, например, при организации крупных предприятий [31] или при разработке сложного программного обеспечения [32] несколькими коллективами, позволили создать ряд альтернативных стилей архитектур [33], часть из которых может быть использована также и в робототехнике.

В качестве наиболее целесообразных архитектур для применения в робототехнике в работе [34] предложено рассматривать архитектуры «Структура-5» и «Совместное предприятие».

Однако указанные архитектуры можно применить к простым роботам с несложными системами управления, и, кроме того, в них отсутствует энергетическая составляющая, наиболее критичная для АНПА, поскольку специальных дозправок по ходу выполнения маршрутного задания в морской среде пока не предусмотрено. Последнее обстоятельство вызвало необходимость использовать гибридную систему энергообеспечения (СЭО).

В связи с этим возникла задача формирования стиля мультиагентной архитектуры, наиболее подходящего под особенности функционирования сложного АНПА с гибридной СЭО.

Для того чтобы сформировать стиль мультиагентной архитектуры АНПА, необходимо прежде всего методически определить последовательность выполняемых действий. Методическая последовательность действий легла в основу специально разработанного метода, описание которого приведено в настоящей работе.

Постановка задачи и последовательность ее решения

Пусть разрабатываемый АНПА включает в себя следующие основные системы: навигации (СН); освещения обстановки (СОО); гидроакустической и радиосвязи (СРС); энергообеспечения (СЭО); аварийную, а также движительно-рулевую комплекс и полезную нагрузку.

Пусть на этапе разработки АНПА уже определена логическая архитектура, не учитывающая нефункциональные требования.

Пусть имеется множество стилей мультиагентных архитектур $\{A_1, \dots, A_m\}$ размерности m .

Пусть имеется множество критериев $\{K_1, \dots, K_n\}$ размерности n , сформированных по нефункциональным требованиям.

Пусть получены оценки S_{ij} , $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$ каждого нефункционального показателя $K_j \in \{K_1, \dots, K_n\}$ каждого стиля архитектуры A_i .

Пусть по совокупности критериев K_1, \dots, K_n получены итоговые оценки S_i , $i = 1, \dots, m$ каждого стиля архитектуры A_i , образующие множество $\{S_1, \dots, S_m\}$ по правилам, описанным ниже.

Необходимо выбрать такой стиль архитектуры $A \in \{A_1, \dots, A_m\}$, который доставлял бы максимум итоговой оценке $S_i(K_1, \dots, K_n) \forall i = 1, \dots, m$.

Таким образом, получив результат $S(K_1, \dots, K_n)$, мы получим тем самым наиболее подходящий стиль архитектуры.

Для решения поставленной задачи необходимо:

— сформировать множество показателей $\{K_1, \dots, K_n\}$, основанных на нефункциональных требованиях;

— сформировать множество альтернативных стилей архитектур $\{A_1, \dots, A_m\}$ мультиагентной системы управления АНПА;

— сформировать оценки S_i по показателям $\{K_1, \dots, K_n\}$ каждого альтернативного стиля архитектуры из множества $\{A_1, \dots, A_m\}$;

— определить итоговые оценки S_i по совокупности параметров $\{K_1, \dots, K_n\}$ каждого альтернативного стиля архитектуры из множества $\{A_1, \dots, A_m\}$;

— осуществить выбор наиболее подходящего стиля архитектуры $A \in \{A_1, \dots, A_m\}$.

Последовательное решение перечисленных задач составляет основу предлагаемого метода выбора стиля мультиагентной архитектуры АНПА.

Формирование показателей для выбора стиля мультиагентной архитектуры

Показатели, по которым предлагается осуществить выбор наиболее подходящего стиля архитектуры мультиагентной системы управления АНПА, представляют собой нефункциональные требования к мультиагентной системе.

Применительно к робототехнике наиболее подходящими требованиями определены [34]:

- работа в режиме реального времени;
- координация работы агентов;
- предсказуемость поведения агентов и глобального поведения системы;
- адаптация;
- безопасность;
- отказоустойчивость;
- масштабируемость.

Под *режимом реального времени* понимается способность агентов обрабатывать данные в таком темпе, при котором обеспечивается взаимодействие вычислительной системы с внешними по отношению к ней процессами в темпе, соизмеримом со скоростью протекания этих процессов.

Под *координацией* понимается способность агентов мультиагентных систем координировать свои действия с другими агентами для достижения общей цели или своих локальных целей.

Под *предсказуемостью* понимается прогнозирование поведения агентов, которое может быть затруднено из-за их адаптивности и отзывчивости к неожиданным ситуациям.

Под *адаптивностью* понимается способность агентов адаптироваться к изменениям в их окружении.

Под *безопасностью* функционирования мультиагентной системы понимается проверка подлинности данных, полученных от источников, например, путем их идентификации со своими собственными данными.

Под *отказоустойчивостью* понимается обнаружение неисправности или восстановление си-

стемы после отказа элементов, агентов или систем; защита услуг, предоставляемых другим агентам, от прерываний; исключение отказа всей системы в целом в случае отказа только одного из агентов.

Под *масштабируемостью* понимается возможность добавлять новые программные и аппаратные модули и эффективная коммуникация потока данных.

Для решения поставленной задачи на данном этапе исследований выберем основные показатели, наиболее критичные для АНПА с гибридной СЭО, и проведем их объективизацию.

При рассмотрении любой мультиагентной системы основным вопросом является координация действий агентов, так как обработка данных может вестись в различном темпе, объем данных может быть различным, темп поступления также может различаться. В то же время в обработке должны использоваться данные, соответствующие одному и тому же моменту времени вне зависимости от момента их поступления. Поэтому координация опирается на работу в режиме реального времени.

Кроме того, при использовании в АНПА гибридной СЭО, включающей в себя разнородные источники электропитания, на передний план выходят вопросы безопасности, так как при неудачном подключении источников питания или потребителей, ошибочной передаче команд на включение или переключение может возникнуть предаварийная или аварийная ситуация. Поэтому вопросы безопасности для АНПА с гибридной СЭО являются основополагающими.

Таким образом, наиболее критичными показателями для АНПА с гибридной СЭО являются координация, работа в режиме реального времени и безопасность.

Такие показатели, как адаптируемость и масштабируемость для данного АНПА не критичны, так как разрабатываемый АНПА — уникальный, все особенности конструктива можно предусмотреть заранее, и что-то добавлять или исключать не планируется. Формировать системы, что называется, с запасом, на всякий случай — нецелесообразно, поскольку те негативные явления, которые могут произойти в ходе модернизации, прогнозируются и учитываются заранее при проектировании. При разработке уникального аппарата рациональнее по максимуму задействовать имеющиеся ресурсы без учета возможной перспективы.

Рассмотрим подробнее, чем определяются выбранные показатели.

Координация, выражаемая способностью агентов системы координировать свои действия, определяется синхронизацией и постоянным общением агентов между собой, направленным на обеспечение синхронизации. Для этого, с одной стороны, должна быть предварительная дого-

воренность, каким образом происходит синхронизация, а с другой стороны, обработку информации следует производить так, чтобы успевать выполнять договоренности о правилах синхронизации. Сказанное означает следующее. Пусть правилами функционирования мультиагентной системы определено, что синхронизация происходит путем обработки данных в определенные моменты времени с постоянным интервалом. Для выдерживания этих интервалов должны использоваться или точно выверенные внутренние часы каждого агента, или единое время для всех агентов, которое постоянно рассылается системой единого времени, входящей в состав оборудования АНПА. В любом случае агенты должны функционировать так, чтобы успевать к заданному моменту времени справиться с внутренней обработкой данных и переслать их заинтересованным агентам. Поэтому, кроме синхронизации, важно иметь факторы, способствующие возможности выполнять обработку данных в режиме реального времени.

На работу в режиме реального времени влияние оказывает скорость обработки данных и доставки сообщений между агентами. Скорость обработки данных зависит от объема обрабатываемой информации и использования быстрых алгоритмов обработки (возможно, в ущерб точности). На скорость доставки влияние оказывают прямое общение между взаимодействующими агентами и объем информационных потоков: чем больше поток, тем дольше он доставляется и обрабатывается на предмет целостности переданных данных, их безопасности, корректности и т. д.

Безопасность обеспечивается постоянным контролем истинности поступающих данных и результатов обработки в целях непротиворечивости прогнозируемым результатам. Кроме того, в процессе функционирования в максимально сжатые сроки должны быть выявлены и оперативно устранены нестыковки в данных. В этом случае безопасности способствуют также ограничение информационных потоков, прямое общение между агентами и быстрые алгоритмы обработки поступающих данных.

После того как для проведения сравнительного анализа стилей архитектур мультиагентных систем выбраны показатели, сформируем с их учетом альтернативные стили мультиагентных систем, наиболее подходящие под особенности АНПА.

Формирование стилей архитектур системы управления АНПА

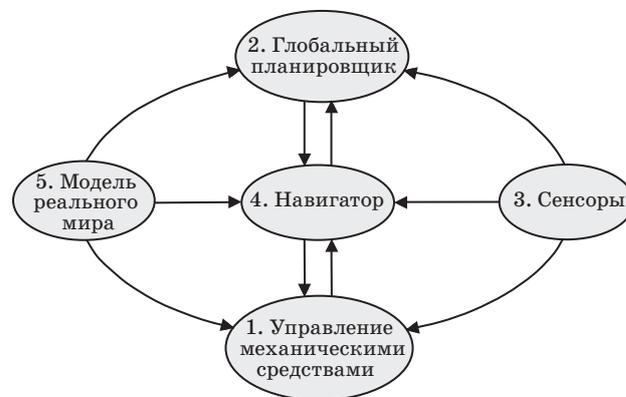
При функционировании мультиагентной системы управления главным является обеспечение координации взаимодействия между агента-

ми, поэтому стили мультиагентных архитектур определяются той системой-агентом, которая будет являться координатором в АНПА с гибридной СЭО.

Поскольку задачей разрабатываемого АНПА является прибытие в заданную конечную точку маршрута, то системой, координирующей работу остальных систем мультиагентной системы управления, можно назначить навигационную систему. Это положение согласуется с предложенным в работе [33] стилем архитектуры, использующим в качестве координатора навигационную систему (рис. 1). Однако для более адекватного отражения работы АНПА с гибридной СЭО в схему [33] была добавлена одна из важнейших ключевых систем — гибридная СЭО, выраженная на схеме агентом «Энергетика».

В соответствии с этой схемой агент «Управление механическими средствами» управляет устройствами, клапанами, приводами и т. д. Агент «Глобальный планировщик» осуществляет стратегическое планирование маршрута движения АНПА. Агент «Сенсоры» является опорным агентом получения реальной информации от датчиков, который интегрирует ее в последовательную интерпретацию в реальном масштабе времени для агента «Навигатор». Агент «Энергетика» получает данные по удельному расходу энергоресурса от механических средств, сопоставляет данные с собственной информацией о запасах энергоресурса и сообщает эти данные агенту «Навигация». Тот сопоставляет полученные данные с текущим положением АНПА на маршрутной траектории и по результатам оценивает оставшийся путь и достаточность энергоресурса для завершения маршрутного задания и прибытия АНПА в конечную точку маршрута.

Другим подходом к контролю возможности достижения АНПА конечной точки маршрута яв-



■ **Рис. 1.** Архитектура мультиагентной системы «Структура-5», дополненная агентом «Энергетика»

■ **Fig. 1.** The architecture of the multi-agent system “Structure-5”, supplemented by the agent “Energy”

ляется оценка достаточности энергоресурса, проводимая в гибридной СЭО (агент «Энергетика»). В функцию агента «Энергетика» входят контроль расхода энергоресурса при движении АНПА вдоль маршрутной траектории и оценка соответствия текущего расхода плану расхода энергоресурса. По результатам сопоставления данных о положении АНПА на маршрутной траектории, выдаваемых агентом «Навигация», оценивается достаточность энергоресурса для преодоления всего запланированного маршрута. В связи с этим координатором может также являться агент «Энергетика». Сама по себе СЭО — гибридная, постоянно внутри себя принимающая решение относительно того, какой именно источник электроэнергии задействовать так, чтобы энергии хватило на завершение маршрутного задания. Поэтому для оперативного управления энергосистемой все исполнительные органы должны быть рядом с координатором, и в этом случае координатором целесообразно назначить агента «Энергетика».

Вместе с тем функционирование и навигационной системы, и энергетической тесно связано с функционированием остальных систем АНПА. Так, например, при отклонении АНПА от маршрута он должен произвести маневр для восстановления своего положения на маршрутной траектории, а также необходимы данные системы освещения обстановки о том, не попал ли АНПА в результате отклонения в неблагоприятную зону. В связи с этим еще одним альтернативным вариантом является формирование специального агента «Диспетчер» и назначение его координа-

тором. «Диспетчер» собирает все данные, благодаря чему имеет полную информацию обо всех системах АНПА.

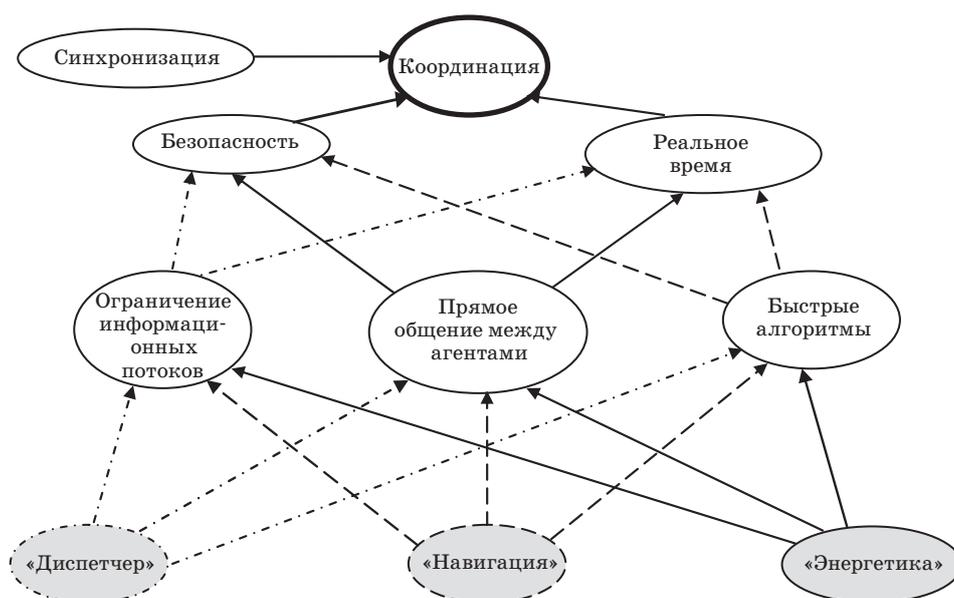
Таким образом, по результатам анализа работы АНПА наиболее перспективными для дальнейшего рассмотрения выбраны три альтернативных стиля архитектуры: «Навигация», «Энергетика», «Диспетчер», — отличающиеся агентом-координатором, именем которого они названы.

Представим сформированные стили архитектуры и выбранные ранее показатели в виде целевого графа (рис. 2). У построенного графа ребра характеризуют отношения между нефункциональными требованиями, а узлы являются целями и подцелями.

На следующем этапе исследований из сформированных стилей мультиагентных архитектур необходимо определить наиболее подходящий. Проанализируем достоинства и недостатки каждого из рассматриваемых стилей архитектур по выбранным показателям.

Ограничение информационных потоков. Агент «Диспетчер» аккумулирует, по сути, всю информацию у себя, и это приводит к перегрузке его вычислительных ресурсов и сети обмена данными. Агент «Навигация» и агент «Энергетика» способствуют ограничению информационных потоков, общаясь только с теми агентами, с которыми это необходимо.

Прямое общение между агентами. Агент «Диспетчер» исключает возможность прямого общения агентов друг с другом, агент «Навигация» и агент «Энергетика» такую возможность обеспечивают.



■ **Рис. 2.** Граф целей и подцелей АНПА с гибридной системой энергообеспечения
 ■ **Fig. 2.** Graph of goals and sub-goals of the AUV with a hybrid energy supply system

Быстрые алгоритмы. При работе в режиме реального времени агент «Диспетчер» проигрывает, поскольку вынужден обрабатывать большой объем данных по широкому спектру задач и раздавать результаты обработки всем потребителям-подсистемам. Агент «Навигация» в части навигации самостоятельно принимает решение и тут же корректирует положение АНПА на маршрутной траектории. Агент «Энергетика» также проводит оперативную оценку по собственным алгоритмам.

С учетом результатов анализа выберем далее подход к оценке этих показателей.

Получение оценки показателей для выбора стиля архитектуры

После того как сформирован целевой граф, задачу получения оценки можно формализовать как обнаружение сообществ в графе [35]. В настоящее время существуют три основных класса алгоритмов, которые обеспечивают хорошую точность в выявлении структуры сильно пересекающихся сообществ. Эти классы включают алгоритмы, основанные на базе графических моделей, методы локальной оптимизации и методы распространения меток.

Для рассматриваемой задачи получения оценки показателей в работе [31] применительно к робототехнике наиболее подходящим указан метод распространения меток (Label Propagation — LP), поскольку он позволяет практически без изменений уложить всю цепочку зависящих факторов в стройный связный граф. Парадигма LP может рассматриваться как популярное направление современных методов обнаружения сообществ. Простые и интуитивно понятные методы из данного класса обеспечивают идеальное сочетание свойств приемлемой точности обнаружения сообществ, низкой вычислительной сложности, простоты реализации с точки зрения современных вычислительных парадигм распределенной обработки графов [36, 37].

Общие и отличительные характеристики методов в этом семействе состоят в процессе обмена метками сообществ между узлами графа, которые накапливают пришедшие метки и отправляют сообщения об обновленной коллекции меток соседним узлам. Первый раз модель LP была введена авторами работы [38].

Преимуществами использования данного алгоритма являются:

- возможность получения качественного (или) количественного значения оценки;
- доказанность сходимости алгоритма к конечному результату.

Для получения оценки каждого альтернативного стиля архитектуры используем разложение

цели на подцели (см. рис. 2). Для этого воспользуемся подходом [31], в котором разложение цели на подцели подчинено правилам AND или OR. Пусть переходы из одного узла графа в другой характеризуются метками: S (Satisfied — повышение) и D (Denied — понижение). Тогда выполнение одной из задач может привести к понижению уровня, а выполнение другой — наоборот, к его повышению. Затем каждому узлу графа G ставятся в соответствие две переменные $Sat(G)$ и $Den(G)$, принимающие одно из значений из множества $\{F; P; N\}$, где F — полное, P — частичное, N — никакое, при этом $F > P > N$.

Использование алгоритма LP основано на понятиях Initial (стартовое), Current (текущее) и Old (предыдущее) значений переменных. Пара $\{Sat(G_i); Den(G_i)\}$ является меткой для G_i . Алгоритм LP [14] заключается в следующем. Сначала происходит инициализация массива Current стартовым значением Initial. Затем для каждого узла графа G_i и для каждого перехода из этого узла в смежный узел происходит обновление пары $\{Sat(G_i); Den(G_i)\}$ с учетом повышения (Set) или понижения (Den) текущего его значения. Полученный результат сравнивается с предыдущим значением Old, и по результатам сравнения возвращается максимум как новое текущее значение G_i Current. Эта процедура выполняется до тех пор, пока не окажется, что дальнейшее обновление невозможно, т. е. выполнено условие Current = Old. В результате будут получены качественные оценки рассматриваемых типов архитектур, и по максимуму полученного результата будет осуществлен выбор наиболее целесообразного стиля архитектуры.

В том случае, если есть все возможности хотя бы частично наделить цели и подцели количественными характеристиками, то можно использовать метод LP по количественным характеристикам.

При количественном анализе используются две действительные константы \inf и \sup такие, что $0 < \inf < \sup$, для каждого узла графа G введены две действительные переменные $Sat(G)$; $Den(G)$ в диапазоне интервала $[\inf; \sup]$. Для обработки целевых отношений используются два оператора \otimes и \oplus , означающие, соответственно, конъюнкцию и дизъюнкцию; кроме того, могут быть использованы отрицание дизъюнкции и конъюнкции. Также приписываем каждому целевому отношению $+S$, $-S$, $+D$, $-D$ вес $w \in [\inf; \sup]$. По аксиомам для инвариантов и правилам, приведенным в работе [31], вычисляем текущее значение узла графа, основываясь на прежнем значении. В данном случае принимается вероятностная модель, в которой увеличение $Sat(G)$ представляется как вероятность того, что G увеличивается, а снижение $Den(G)$ представляется

как вероятность того, что G снижается. В алгоритме LP полагается $\inf = 0$, $\sup = 1$, и операции \otimes , \oplus , $\text{inv}()$ определены как

$$p_1 \otimes p_2 = \text{def } p_1 \cdot p_2;$$

$$p_1 \oplus p_2 = \text{def } p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2;$$

$$\text{inv}(p_1) = 1 - p_1.$$

Приведенные выражения означают вероятности конъюнкции и дизъюнкции двух независимых событий с вероятностями p_1 и p_2 , а также событие отрицания исходного события. В этом смысле правила вычислений в узлах графа соответствуют правилам Байеса. Отметим, что качественный подход можно трактовать как частный случай количественного подхода с

$$D = \{F; P; N\}, \oplus = \min () \text{ и } \otimes = \max ().$$

Отличительной особенностью количественного подхода к анализу по сравнению с качественным является то, что элементы Initial, Current и Old теперь выбираются численно из диапазона $[0; 1]$; целевой граф содержит также веса $+S$, $-S$, $+D$, $-D$.

Таким образом, в ходе выбора наиболее целесообразного стиля мультиагентной архитектуры были выработаны показатели, сформированы наиболее подходящие для АНПА с гибридной СЭО стили архитектуры, представлен целевой граф, определен метод оценки выработанных показателей для каждого рассматриваемого стиля архитектуры. По совокупности сформировался метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления АНПА.

Пример применения разработанного метода выбора

Рассмотрим АНПА с гибридной СЭО, который в целях своей безопасности должен двигаться в различных скоростных режимах. Различные скоростные режимы движения АНПА связаны с необходимостью проходить узкости, в которых для повышения устойчивости движения и удержания курса следует повышать скорость. Это автоматически означает переключение с одного источника электроэнергии на другой. При этом должно быть понимание точного положения АНПА в узкости, поскольку высокоскоростной режим для АНПА является запредельным, и как только необходимость в нем пропадет, АНПА должен перейти на обычный скоростной режим.

Для АНПА с гибридной СЭО осуществим выбор стиля архитектуры, используя в качестве цели «Безопасность». Рассмотрим подграф (рис. 3) целевого графа (см. рис. 2), разделив показа-



■ Рис. 3. Целевой граф «Безопасность»
 ■ Fig. 3. Security Target Graph

тель «Прямое общение между агентами» на два: «Прямое общение с подсистемами навигации» и «Прямое общение с подсистемами СЭО».

Основным источником опасности при использовании гибридной СЭО является повышение внутриотсечной температуры из-за нерационального подключения потребителей к токопроводам, запитываемым разнородными источниками электроэнергии. Вторым неблагоприятным фактором, оказывающим влияние на безопасность, является нехватка энергоресурса для прибытия АНПА в заданную конечную точку маршрута.

Проанализируем по показателю «Безопасность» каждый из трех рассматриваемых стилей архитектуры, отличающихся координатором: «Диспетчер», «Навигация», «Энергетика».

Координатор «Диспетчер» способен обеспечить наибольшую безопасность, так как владеет всей информацией, но поступающей с некоторым запаздыванием, так как информацию поставляют все агенты, ввиду чего возможно скопление, переполнение, задержки в обработке. Это может оказаться критичным в плане оперативности функционирования системы для предотвращения аварий. «Диспетчер» общается с агентами «Навигация» и «Энергетика» и не имеет прямого общения с подсистемами этих агентов.

Координатор «Навигация» обеспечивает меньшую безопасность по сравнению с координатором «Диспетчер», так как не владеет всей ситуацией в целом и не может сформировать интегральную оценку признаков опасности. Однако, с другой стороны, по напрямую поступающим данным способен прямо или косвенно оценить правильность или ошибочность поступающей информации и оперативно принять решение относительно вероятного возникновения опасности. В то же время отсутствие прямого доступа к подсистемам

гибридной СЭО не позволяет оперативно оценить основную источник опасности.

Координатор «Энергетика» не способен объективно оценить сложившуюся ситуацию из-за недостатка поступающей информации. Однако, учитывая то, что сама по себе гибридная СЭО является наиболее вероятным источником опасности, с этой точки зрения наиболее безопасно именно в ней разместить анализ предаварийной ситуации, поскольку обеспечен оперативный прием данных и их обработка, прямое общение с подсистемами гибридной СЭО, непосредственными устройствами, формирующими эти данные. Плюсы координатора «Энергетика» заключаются в том, что все ключевые данные, необходимые для безопасного движения АНПА вдоль маршрутной траектории, сосредоточены в агенте «Энергетика». Прямое общение агента «Энергетика» с подсистемами СЭО, входящими в него, исключают нагревание внутри корпуса АНПА, контролируют расход ресурса, оценивают его достаточность для прибытия в заданную точку и принимают решение о выборе скоростного режима движения АНПА, напрямую связанного с управлением маршевым двигателем. Поэтому и данные о потребляемой мощности маршевого двигателя также должны поступать координатору — агенту «Энергетика».

В связи со сказанным представляется наиболее предпочтительным назначить координатором агента «Энергетика». При этом за навигацией остается контроль соответствия положения АНПА заданному маршруту, который заранее проложен с учетом карты глубин, береговой черты, положения опасных зон.

Результаты анализа выразим на рис. 3 указанием рядом с каждым ребром графа положительного «+» или отрицательного «-» влияния особенностей стиля архитектуры на целевой показатель.

Результаты оценки стиля по показателям занесем в таблицу. Итоговый результат оценки выведен по правилам алгоритма LP.

- Качественные оценки стилей мультиагентной системы управления
- Qualitative estimate of multi-agent management system styles

Цель «Безопасность»	«Диспетчер»	«Навигация»	«Энергетика»
Прямое обращение к навигации	FD	FS	PS
Прямое обращение к СЭО	FD	FD	FS
Итого	FD	N	PS

Из приведенных результатов видно, что назначение координатором агента «Энергетика» для АНПА с гибридной СЭО позволило получить максимальный результат PS, поскольку $FD < N < PS$.

Однако если СЭО не гибридная, а однородная, то тогда основная опасность возникновения аварий связана с отклонением АНПА от маршрутной траектории и возможным его попаданием в неблагоприятные районы препятствий, течения, загрязнения и т. д. В этом случае отсутствует необходимость «Прямого общения с подсистемами СЭО», а вот «Прямое общение к подсистемам навигации» для принятия оперативного решения требуется. Поэтому предпочтение целесообразно отдать стилю архитектуры, в котором координатором будет являться агент «Навигация».

Заключение

Рассмотрены особенности функционирования АНПА с гибридной системой энергообеспечения и мультиагентной системой управления. В результате анализа выявлена необходимость выбора стиля архитектуры мультиагентной системы с использованием нефункциональных требований.

Для выбора стиля архитектуры мультиагентной системы управления разработан метод, включающий в себя формирование множества наиболее подходящих для АНПА показателей; множество стилей мультиагентных систем управления, наиболее подходящих для АНПА; получение оценки рассматриваемых стилей по показателям и итоговой оценки по каждому альтернативному стилю. Получение такой оценки позволяет осуществить выбор наиболее подходящего стиля мультиагентной архитектуры.

На примере анализа фрагмента целевого графа показано использование разработанного метода для выбора наилучшего решения.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-08-00130 а).

Литература

1. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. И. Система управления — наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов. *Морская радиоэлектроника*, 2015, № 4(54), с. 27–33.
2. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В. Система поддержки разработки алгоритмов систе-

- мы управления АНПА. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2015, № 10(171), с. 178–190.
3. Chung L. K., Nixon B., Yu E., Mylopoulos J. *Non-Functional Requirements in Software Engineering*. Kluwer Publishing, 2000. 441 p.
 4. Мартынова Л. А. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 1, с. 31–41. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31
 5. Мартынова Л. А. Метод эффективного удержания положения АНПА на маршрутной траектории при ведении сейсморазведки. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 3, с. 34–44. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.34
 6. Мартынова Л. А., Карсаев О. В. Метод координации поведения группы автономных необитаемых подводных аппаратов на мультиагентной основе при ведении сейсморазведки. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2018, № 1 (195), с. 52–67. doi:10.23683/2311-3103-2018-1-52-67
 7. Безрук Г. Г., Мартынова Л. А., Саенко И. Б. Динамический способ поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов. *Труды СПИИРАН*, 2018, вып. 58, с. 203–226. doi:10.15622/sp.58.9
 8. Martynova L. A., Bezruk G. G., Myslivyi A. A. Application of differential mode for AUV location. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 4, с. 15–23. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-15-23
 9. Пшихопов В. Х., Чернухин Ю. В., Федотов А. А., Гужик В. Ф., Медведев М. Ю., Гуренко Б. В., Пьявченко А. О., Сапрыкин Р. В., Переверзев В. А., Приемко А. А. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2014, № 3, с. 87–101.
 10. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gaiduk A. R., Gurenko B. V. Control system design for autonomous underwater vehicle. *Latin American Robotics Symposium and Competition*, Arequipa, Peru, 2013. doi:10.1109/LARS.2013.61
 11. Pshikhopov V., Chernukhin Y., Guzik V., Medvedev M., Gurenko B., Pivachenko A., Saprikin R., Pereversev V., Krukhmalev V. Implementation of intelligent control system for autonomous underwater vehicle. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 701–702, pp. 704–710. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.701-702.704
 12. Gurenko B. V., Fedorenko R., Beresnev M., Saprykin R. Development of simulator for intelligent autonomous underwater vehicle. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 799–800, pp. 1001–1005. doi:http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.1001
 13. Kostukov V. A., Kulchenko A. E., Gurenko B. V. Model parameters research procedure for underwater vehicle. *Proc. of XXXVI–XXXVII International Conference*, Novosibirsk, 2015, no. 11–12 (35), pp. 75–79.
 14. Инзарцев А. В., Львов О. Ю., Сидоренко А. В., Хмельнов Д. Б. Архитектурные конфигурации систем управления АНПА. *Подводные исследования и робототехника*, 2006, № 1, с. 18–30.
 15. Киселев Л. В., Инзарцев А. В., Матвиенко Ю. В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований. *Подводные исследования и робототехника*, 2006, № 1, с. 6–17.
 16. Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Костенко В. В., Матвиенко Ю. В., Павин А. М., Щербатюк А. Ф. *Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение*. Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. 368 с.
 17. Боровик А. И., Наумов Л. А. Компонентно-ориентированная система управления АНПА ММТ-2012. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2014, № 3, с. 102–112.
 18. Zhang L., Jiang D., Zhao J. The basic control system of an ocean exploration AUV. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 411–414, pp. 1757–1761. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.411-414.1757
 19. Freire L. O., Oliveira L. M., Vale R. T. S., Medeiros M., Diana R. E. Y., Lopes R. M., Pellini E. L., de Barros E. A. Development of an AUV control architecture based on systems engineering concepts. *Ocean Engineering*, 2018, vol. 151, pp. 157–169. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.016.
 20. Aili A., Ekelund E. *Model-based Design, Development and Control of an Underwater Vehicle*. MSc Thesis. Linköping University, 2016. 102 p.
 21. Blanke M., Lindegaard K.-P., Fossen T. I. Dynamic model for thrust generation of marine propellers. *IFAC Proceedings Volumes*, 2000, no. 33(21), pp. 353–358.
 22. Deutsch C., Moratelli L., Thuné S., Kutteneuler J., Söderling F. Design of an AUV research platform for demonstration of novel technologies. *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, Nov 2018, pp. 1–8.
 23. Perez T. *Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins*. Springer Science & Business Media, 2006. 109 p. doi:10.1007/1-84628-157-1
 24. Tanakitkorn K., Wilson Ph. A., Turnock S. R., Phillips A. B. Depth control for an over-actuated, hover-capable autonomous underwater vehicle with experimental verification. *Mechatronics*, 2017, no. 41, pp. 67–81.
 25. Vervoort J. H. A. M. *Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle*. MSc Thesis. University of Canterbury, 2008. 119 p.
 26. Wehbe B., Fabisch A., and Krell M. M. Online model identification for underwater vehicles through incremental support vector regression. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, Vancouver, BC, Canada, pp. 4173–4180. doi:10.1109/IROS.2017.8206278
 27. Weiss J. D., Du Toit N. E. Real-time dynamic model learning and adaptation for underwater vehicles. *2013 OCEANS*, San Diego, 2013, pp. 1–10.

28. Yoerger D. R., Cooke J. G., Slotine J. J. E. The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, no. 15(3), pp. 167–178.
29. Yuh J., Marani G., Blidberg D. R. Applications of marine robotic vehicles. *Intelligent Service Robotics*, 2011, no. 4(4), pp. 221–231.
30. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots. *A Survey. Autonomous Robots*, 2000, no. 8(1), pp. 7–24.
31. Giorgini P., Mylopoulos J., Nicchiarelli E., Sebastiani R. Reasoning with goal models. *Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002)*, Tampere, Finland, October 2002. doi:10.1007/3-540-45816-6_22. https://www.researchgate.net/publication/226665392_Reasoning_with_Goal_Models. (дата обращения: 21.04.2019).
32. Чеглаков А. Л., Нехогина В. С. Оценка нефункциональных требований ИТ-архитектуры с использованием онтологий. *Национальная ассоциация ученых (НАУ)*, 2015, # IV (9), с. 44–46. <https://national-science.ru/> (дата обращения: 21.04.2019).
33. Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J. Multi-agent architectures as organizational structures. *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems*, 2006, no. 13, pp. 1–2. https://www.academia.edu/2731942/Multi-agent_architectures_as_organizational_structures (дата обращения: 21.04.2019).
34. Innocenti Badano B. M. A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. *2009 Universitat de Girona*. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tbi1de1.pdf;sequence=1> (дата обращения: 13.08.2019).
35. Buzun N., Korshunov A. Innovative methods and measures in overlapping community detection. *Proceedings of International Workshop on Experimental Economics in Machine Learning 2012*, KU-Leuven, 2012, pp. 20–31.
36. Malewicz G., Austern M. H., Bik A. J. C., Dehnert J. C., Horn I., Leiser N., Czajkowski G. Pregel: a system for large-scale graph processing. *Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '10)*, ACM, New York, NY, USA, 2010, pp. 135–145.
37. Xin R., Gonzalez J., Franklin M., Stoica I. GraphX: A resilient distributed graph system on spark. *GRADES (SIGMOD Workshop)*, 2013, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1145/2484425.2484427>
38. Raghavan U. N., Albert R., Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks. *Physical Review E*, 2007, vol. 76, no. 3, p. 036106.

UDC 519.87

doi:10.31799/1684-8853-2020-4-31-41

Choice of architecture for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle

L. A. Martynova^a, Dr. Sc., Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-5613-0838, martynowa999@bk.ruN. K. Kiselev^b, First Deputy Chief Designer, orcid.org/0000-0002-5401-4470A. A. Mysliviy^c, PhD, Military, Deputy Head of Division, orcid.org/0000-0002-6741-3139^aConcern CSRI Elektropribor, JSC State Research Center of Russia, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation^bJSC Central Design Bureau Lazurit, 57, Svobody St., 603951, Nizhnij Novgorod, Russian Federation^cResearch Institute of OSIS Navy, 17, Razvodnaya St., 198516, Petergof, Sankt-Peterburg, Russian Federation

Introduction: The continuous improvement of autonomous underwater vehicles, the complexity of their systems and the use of a hybrid energy supply system have led to the need of developing a control system using multi-agent technology. To date, a large number of styles of multi-agent architectures have been formed, mainly in the field of organizing the manufacture and developing software. It is important to choose the most suitable architecture style for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle with a hybrid energy supply system, taking into account its features. **Purpose:** The development of a method for choosing the most suitable style of a multi-agent architecture among a variety of alternative options. **Method:** The developed method is based on comparative assessment of various architecture styles according to non-functional requirements. For this purpose, a target graph is specially developed, taking into account the features of the device to be designed. In addition, when generating the final result, the label distribution algorithm was used as the most suitable one for this problem. **Results:** The proposed method of choosing the architecture style includes the following components: developing indicators by which it is advisable to compare the alternative options; forming various styles of architectures most suitable for the device under construction; analyzing the positive and negative effects of the architecture style according to non-functional requirements; formalizing these influences in the form of qualitative or quantitative labels; obtaining the final grade by applying the label distribution algorithm. **Practical relevance:** The proposed method allows you to select the most appropriate architecture for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle. The method can also be used for a wider range of ground-based and air-based robotic systems.

Keywords — autonomous underwater vehicle, multi-agent control system architecture, performance evaluation, non-functional requirements, label propagation algorithm.

For citation: Martynova L. A., Kiselev N. K., Mysliviy A. A. Choice of architecture for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 4, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-4-31-41

References

- Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V., Sokolov A. I. Control system is the most complicated part of autonomous underwater vehicles. *Marine Radio electronics*, 2015, no. 4 (54), pp. 27–33 (In Russian).
- Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. The support system for design of AUV integrated control system algorithms. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015, no. 10(171), pp. 178–190 (In Russian).
- Chung L. K., Nixon B., Yu E., Mylopoulos J. *Non-Functional Requirements in Software Engineering*. Kluwer Publishing, 2000. 441 p.
- Martynova L. A. The solution of the problem of underwater observation in the conditions of application of intellectual interference. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31
- Martynova L. A. The method of effectively maintaining the position of the AUV on the route trajectory during seismic surveys. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 34–44 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.34
- Martynova L. A., Karsaev O. V. A method for coordinating the behavior of a group of autonomous underwater vehicles on a multi-agent basis during seismic surveys. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2018, no. 1(195), pp. 52–67 (In Russian). doi:10.23683/2311-3103-2018-1-52-67
- Bezruk G. G., Martynova L. A., Saenko I. B. Dynamic method of searching anthropogenic objects in use of seabed with autonomous underwater vehicles. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 3(58), pp. 203–226 (In Russian). doi:10.15622/sp.58.9
- Martynova L. A., Bezruk G. G., Mysliviy A. A. Application of differential mode for AUV location. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 15–23 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-15-23
- Pshikhov V. Kh., Chernukhin Yu. V., Fedotov A. A., Guzik V. F., Medvedev M. Yu., Gurenko B. V., Piavchenko A. O., Saprikin R. V., Pereversev V. A., Priemko A. A. Development of intelligent control system for autonomous underwater vehicle. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2014, no. 3(152), pp. 87–101.
- Pshikhov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gaiduk A. R., Gurenko B. V. Control system design for autonomous underwater vehicle. *Latin American Robotics Symposium and Competition*, Arequipa, Peru, 2013. doi:10.1109/LARS.2013.61
- Pshikhov V., Chernukhin Y., Guzik V., Medvedev M., Gurenko B., Piavchenko A., Saprikin R., Pereversev V., Krukhmalev V. Implementation of intelligent control system for autonomous underwater vehicle. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 701–702, pp. 704–710. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.701-702.704
- Gurenko B. V., Fedorenko R., Beresnev M., Saprikin R. Development of simulator for intelligent autonomous underwater vehicle. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 799–800, pp. 1001–1005. doi:http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.1001
- Kostukov V. A., Kulchenko A. E., Gurenko B. V. Model parameters research procedure for underwater vehicle. *Proc. of XXXVI–XXXVII International Conference*, Novosibirsk, 2015, no. 11–12 (35), pp. 75–79.
- Inzartsev A. V., Lvov O. Yu., Sidorenko A. V., Khmel'nov D. B. Architectural configurations of AUV control systems. *Underwater Investigations and Robotics*, 2006, no. 1, pp. 18–30 (In Russian).
- Kiselev L. V., Inzartsev A. V., Matvienko Yu. V. The Creation of intelligent AUVs and the problems of the integration of scientific research. *Underwater Investigations and Robotics*, 2006, no. 1, pp. 6–17 (In Russian).
- Inzartsev A. V., Kiselev L. V., Kostenko V. V., Matvienko Yu. V., Pavin A. M., Sherbatyuk A. F. *Underwater Robotics: System, Technologies, Application*. Vladivostok, IPMT FEB RAS Publ., 2018. 368 p. (In Russian).
- Borovik A. I., Naumov L. A. Component-oriented management system AUV MMT-2012. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2014, no. 3, pp. 102–112 (In Russian).
- Zhang L., Jiang D., Zhao J. The basic control system of an ocean exploration AUV. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, no. 411–414, pp. 1757–1761. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.411-414.1757
- Freire L. O., Oliveira L. M., Vale R. T. S., Medeiros M., Diana R. E. Y., Lopes R. M., Pellini E. L., de Barros E. A. Development of an AUV control architecture based on systems engineering concepts. *Ocean Engineering*, 2018, vol. 151, pp. 157–169. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.016.
- Aili A., Ekelund E. *Model-based Design, Development and Control of an Underwater Vehicle*. MSc Thesis. Linköping University, 2016. 102 p.
- Blanke M., Lindegaard K.-P., Fossen T. I. Dynamic model for thrust generation of marine propellers. *IFAC Proceedings Volumes*, 2000, no. 33(21), pp. 353–358.
- Deutsch C., Moratelli L., Thuné S., Kutenkeuler J., Söderling F. Design of an AUV research platform for demonstration of novel technologies. *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop* (AUV), Nov 2018, pp. 1–8.
- Perez T. *Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins*. Springer Science & Business Media, 2006. 109 p. doi:10.1007/1-84628-157-1
- Tanakitkorn K., Wilson Ph. A., Turnock S. R., Phillips A. B. Depth control for an over-actuated, hover-capable autonomous underwater vehicle with experimental verification. *Mechatronics*, 2017, no. 41, pp. 67–81.
- Vervoort J. H. A. M. *Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle*. MSc Thesis. University of Canterbury, 2008. 119 p.
- Wehbe B., Fabisch A., Krell M. M. Online model identification for underwater vehicles through incremental support vector regression. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, Vancouver, BC, Canada, pp. 4173–4180. doi:10.1109/IROS.2017.8206278
- Weiss J. D., Du Toit N. E. Real-time dynamic model learning and adaptation for underwater vehicles. *2013 OCEANS*, San Diego, 2013, pp. 1–10.
- Yoerger D. R., Cooke J. G., Slotine J. J. E. The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, no. 15(3), pp. 167–178.
- Yuh J., Marani G., Blidberg D. R. Applications of marine robotic vehicles. *Intelligent Service Robotics*, 2011, no. 4(4), pp. 221–231.
- Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots. *A Survey. Autonomous Robots*, 2000, no. 8(1), pp. 7–24.
- Giorgini P., Mylopoulos J., Nicchiarelli E., Sebastiani R. Reasoning with goal models. *Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002)*, Tampere, Finland, October 2002. doi:10.1007/3-540-45816-6_22. Available at: https://www.researchgate.net/publication/226665392_Reasoning_with_Goal_Models. (accessed 21 April 2019).
- Cheglakov A. L., Nekhotina V. S. Assessment of non-functional requirements of IT architecture using ontologies. *National Science Journal*, 2015, # IV (9), pp. 44–46. Available at: https://national-science.ru/ (accessed 21 April 2019).
- Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J. Multi-agent architectures as organizational structures. *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems*, 2006, no. 13, pp. 1–2. Available at: https://www.academia.edu/2731942/Multi-agent_architectures_as_organizational_structures (accessed 21 April 2019).
- Innocenti Badano B. M. A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. *2009 Universitat de Girona*. Available at: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tb11de1.pdf;sequence=1 (accessed 13 August 2019).
- Buzun N., Korshunov A. Innovative methods and measures in overlapping community detection. *Proceedings of International Workshop on Experimental Economics in Machine Learning 2012*, KU-Leuven, 2012, pp. 20–31.
- Malewicz G., Austern M. H., Bik A. J. C., Dehnert J. C., Horn I., Leiser N., Czajkowski G. Pregel: a system for large-scale graph processing. *Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '10)*, ACM, New York, NY, USA, 2010, pp. 135–145.
- Xin R., Gonzalez J., Franklin M., Stoica I. GraphX: A resilient distributed graph system on spark. *GRADES (SIGMOD Workshop)*, 2013, pp. 1–6. https://doi.org/10.1145/2484425.2484427
- Raghavan U. N., Albert R., Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks. *Physical Review E*, 2007, vol. 76, no. 3, p. 036106.