

**Горькавый М. А., Егорова В. П., Соловьев В. А., Горькавый А. И., Мельниченко М. А.  
M. A. Gorkavii, V. P. Egorova, V. A. Soloviev, A. I. Gorkavii, M. A. Melnichenko**

**РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО  
ДВОЙНИКА**

**DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM ARCHITECTURE FOR A ROBOTIC  
PRODUCTION PROCESS BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY**

**Горькавый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavii** – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Егорова Валерия Павловна** – аспирант, старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Valeria P. Egorova** – Postgraduate Student, Senior Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Vyacheslav A. Soloviev** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Горькавый Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorkavyu\_ai51@mail.ru.

**Aleksandr I. Gorkavii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyu\_ai51@mail.ru.

**Мельниченко Маркел Андреевич** – аспирант, преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Markel A. Melnichenko** – Postgraduate Student, Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Аннотация.** На основе типовой структурной схемы автоматизированной системы управления показана необходимость применения интеллектуальных инструментов для повышения качества функционирования производственного процесса. Предложенное решение по модернизации типовой структурной схемы САУ предусматривает использование эталонной модели для достижения требуемых показателей качества, оптимальности и быстродействия реализации решений. В результате проведенных исследований сформирована структурная схема управления производственным процессом на базе цифрового двойника с элементами человеко-машинного взаимодействия. Применение разработанного подхода к синтезу систем управления позволит выявить наиболее нагруженные контуры управления, а также снизить влияние человеческого фактора при передаче информации между агентами системы.

**Summary.** On the basis of a typical block diagram of an automated control system, the necessity of using intelligent tools to improve the quality of the production process is shown. The proposed solution for the modernization of a typical structural diagram of the ACS provides for the use of a reference model to achieve the required indicators of quality, optimality and speed of implementation of solutions. As a result of the research, a block diagram of the production process management based on a digital twin with elements of human-machine interaction has been formed. The application of the developed approach to the synthesis of control systems will make it possible to identify the most loaded control loops, as well as reduce the influence of the human factor in the transfer of information between system agents.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, система автоматизированного управления, роботизированный технологический процесс, промышленное производство, система поддержки принятия решений, агентная модель, объектно-ориентированный подход.

**Key words:** digital twin, automated control system, robotic process, industrial production, decision support system, agent model, object-oriented approach.

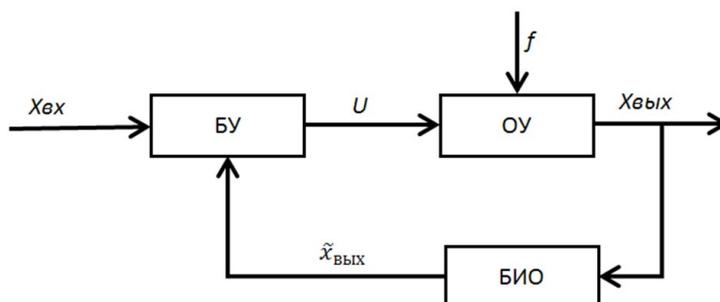
*Данное исследование выполнено в рамках деятельности Консорциума устойчивого развития и технологического лидерства и НИОКТР «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», финансируемой за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» № ВН002/2020. Исследование проводилось с использованием оборудования научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии».*

УДК 004.8

**Введение.** Сложившиеся условия современных реалий и ситуация международной напряжённости формируют новые вызовы перед органами управления ведущих отечественных предприятий. Так, согласно стратегическим приоритетам РФ, высокотехнологичные промышленные предприятия, несмотря на существенные ограничения доступа к импортируемым технологиям, программному обеспечению и оборудованию, должны обеспечить необходимый объём и качество выпускаемой продукции. Помимо технико-технологической составляющей, существенным также является значительное снижение финансовых ресурсов предприятий в связи с беспрецедентным давлением на экономику страны, что в свою очередь автоматически определяет снижение объёма доступных материальных, информационных и временных ресурсов.

Таким образом, промышленные предприятия, выпускающие технологичную продукцию, вынуждены функционировать в условиях жёсткой системы оптимизации, одновременно форсируя процессы выработки инновационных решений и производства продукции необходимого качества с максимальной экономией дефицитных ресурсов, при этом осуществляя импортозамещение целых сегментов производственных технологий и составных частей конечного изделия. Одним из основных инструментов комплексного повышения эффективности производственных процессов, в том и числе в условиях существенных возмущающих воздействий, являются программно-аппаратные средства автоматизации (интеллектуальные системы управления, роботизированные комплексы, комплексные технологии цифрового двойника (ЦД) и др. [1–3]), а научные разработки, направленные на поиск путей совершенствования существующих средств автоматизации и разработку новых, будут востребованы.

**Методология.** При разработке систем управления на базе цифровых двойников целесообразно в том числе опираться на кибернетический подход классической теории управления, сопоставляющий объектам реального мира модели в составе блоков, для которых установлены связанные причинно-следственным отношением входные и выходные сигналы [3] (см. рис. 1).



ОУ – объект управления; БУ – блок управления; БИО – блок измерения и оценки

Рис. 1. Типовая структурная схема АСУ с замкнутым контуром управления

Эффективность применения классических методов синтеза систем управления и математических моделей детерминированных технологических процессов на базе промышленных роботов достаточно высока, что подтверждается в большом количестве публикаций, например [4; 14; 15; 18].

Однако в случае стохастических процессов в условиях нестабильности значений достаточно большого числа параметров и, что хуже, в условиях возможных изменений структуры самого объекта управления эффективность классических методов синтеза систем управления (СУ) может значительно снизиться, т. е. не будут достигнуты требуемые показатели качества, оптимальности и быстродействия реализации решений в ЦД. Как правило, нестабильность параметров и структуры объекта и, соответственно, цифрового двойника, который в каждый момент времени должен обладать требуемой степенью адекватности, вызвана большой сложностью объекта управления (например, полная интеграция ЛСУ, АСУТП и АСУПП), а также, что немаловажно, необходимостью включения в имитационные модели цифрового двойника элементов человеко-машинного взаимодействия (например, коллаборативные роботизированные процессы). В таком случае целесообразно задействовать интеллектуальные алгоритмы вывода [5; 7], в частности, нейронные сети [6], нечёткие системы [6], генетические алгоритмы [8], а также прогрессивные технологии синтеза имитационных моделей, например, мультиагентное моделирование [6]. Представленные инструменты позволяют с достаточной степенью адекватности синтезировать модули цифрового двойника, моделирующие недетерминированные процессы. В то же самое время общая технология проектирования имитационных моделей [5; 7] может быть применена без существенных коррекций и для разработки интеллектуальных модулей в составе автоматизированных систем управления (АСУ) роботизированным процессом на базе ЦД.

**Результаты и обсуждение.** На текущий момент системы управления отечественных предприятий по производству высокотехнологичной продукции в целом работают согласно схеме, приведённой на рис. 1. Абстрактный блок управления при этом сочетает в себе три режима управления (автоматический, автоматизированный и «ручной»), а существенная часть от всего объёма сформированных управленческих воздействий приходится на третий режим, обеспечиваемый человеком. Необходимость одновременного функционирования управленческих процессов в трёх режимах значительно усложняет процедуры разработки и оптимизации решений как вычислительными системами, так и лицами, принимающими решения. Несогласованность, не оптимальность, субъективизм и невысокая скорость выработки решения человеком также не способствуют повышению показателей эффективности АСУ. Если учесть результаты концептуальной декомпозиции блока управления (БУ) (см. рис. 2), очевидным становится тот факт, что в существующих системах управления, несмотря на частичную автоматизацию, технологический процесс не подкреплён целостной моделью.

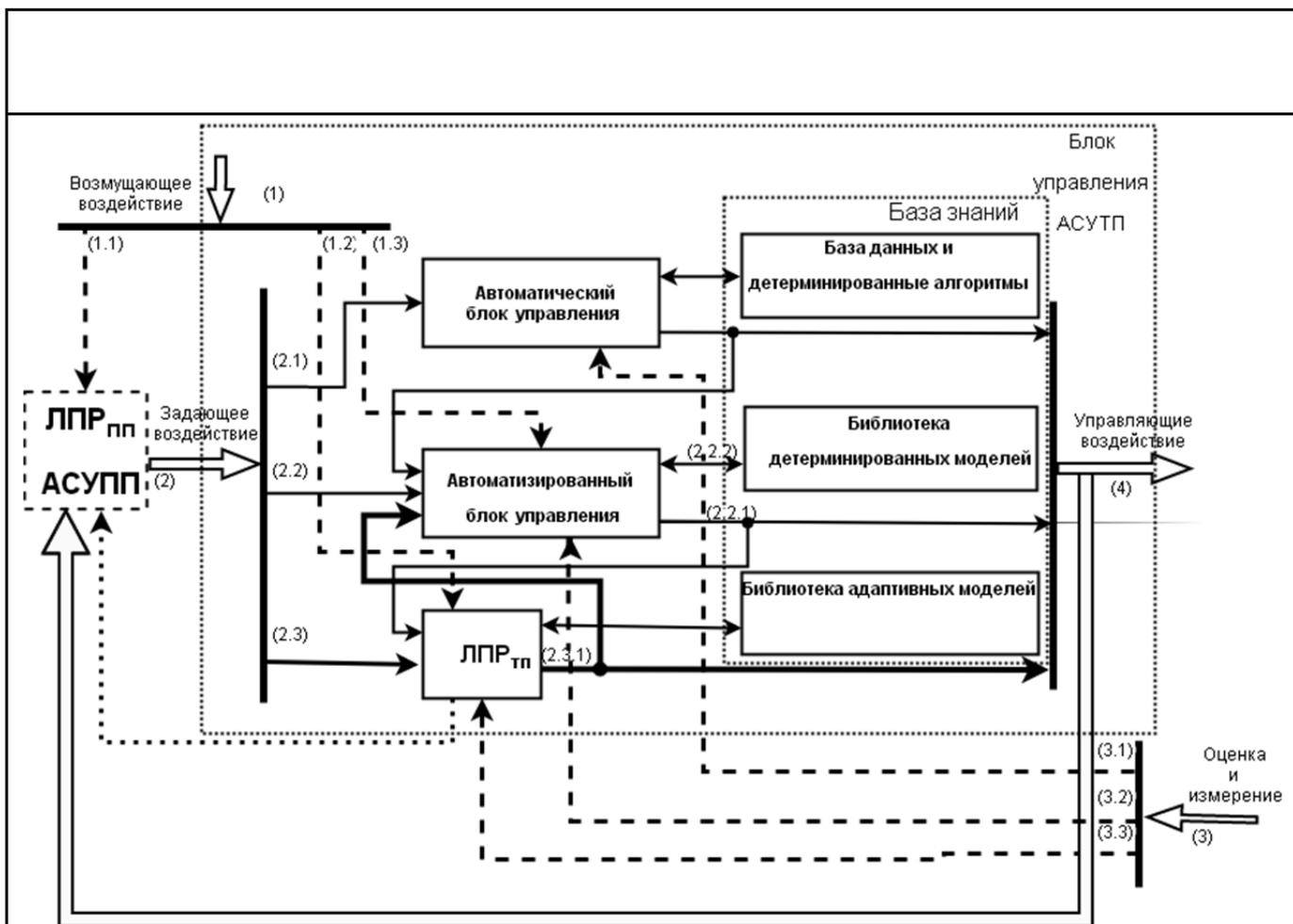


Рис. 2. Структурная декомпозиция блока управления АСУ коллаборативным роботизированным процессом

Как правило, модели сложных элементов процесса существуют лишь в абстрактной форме и хранятся в виде эмпирических знаний и опыта лица, принимающего решение (ЛПР), а также разрозненной документации разных форматов. Это обуславливает трудности в формировании управленческих решений по контуру (2)-(2.3)-(2.3.1)-(4) (см. рис. 2), определяет высокую итеративность процесса выработки решений, а также многократную коррекцию задающего воздействия (2). Кроме того, наличие оперативного канала взаимодействия (2.3.1), призванного улучшить качество итогового решения, зачастую создаёт существенную нагрузку на интеллектуальные ресурсы лица, принимающего решение, технологического процесса (ЛПР ТП) и АСУ ТП, позволяя лицу, принимающему решение, производственного процесса (ЛПР ПП) и АСУ ПП изменять задающее воздействие (2), не получив ещё информацию по каналу (4). Нестабильность контура (2)-(2.3)-(2.3.1)-(4) также вносит значительные элементы неопределённости в контур (2)-(2.2)-(2.2.1)-(4), что замедляет автоматизированный процесс принятия решений и повышает затраты ресурсов на его реализацию (вычислительные мощности, временные затраты сотрудников по сопровождению АСУ, операторов и т. п.).

Кроме того, абстрактные модели в части ЛПР представляются в редуцированном формате с оттенками субъективных причинно-следственных связей в связи с ограниченными «вычислительными» возможностями сотрудников, что также негативным образом сказывается на процессе управления. Человек не в состоянии учитывать и обрабатывать многообразие моделей и их режимов в тактическом и тем более оперативном планировании, одновременно согласуя свои решения с ключевыми показателями эффективности (КРП), установленными на уровне управления производственными процессами. Дополнительным фактором снижения качества решения и замедления скорости его выработки является несогласованность видения ситуации ЛПР ТП и ЛПР ПП наряду с существованием фактора неопределённости оценки параметров в каналах (4) и (3.3).

Снижение загрузки контура (2)-(2.3)-(2.3.1)-(4) за счёт повышения степени автоматизации, т. е. расширения функционала контура (2)-(2.2)-(2.2.1)-(4), связано в первую очередь с отсутствием устоявшихся и дающих гарантированный результат методов интеллектуализации сложных коллаборативных процессов [9], а также функционированием АСУ на базе разнородного аппаратно-программного обеспечения разной архитектуры, форматов, производителя и т. д. Интеграционные функции эксплуатируемых аппаратно-программных модулей опять же ложатся на ЛПР со всеми вытекающими последствиями.

Сформулированные проблемы управления могут быть решены за счёт расширения существующих систем автоматизации (описываемых структурной схемой на рис. 1) дополнительными модулями анализа и поддержки принятия решения на базе цифровых двойников по принципу объект – «модель-эталон» [10] (см. рис. 3).

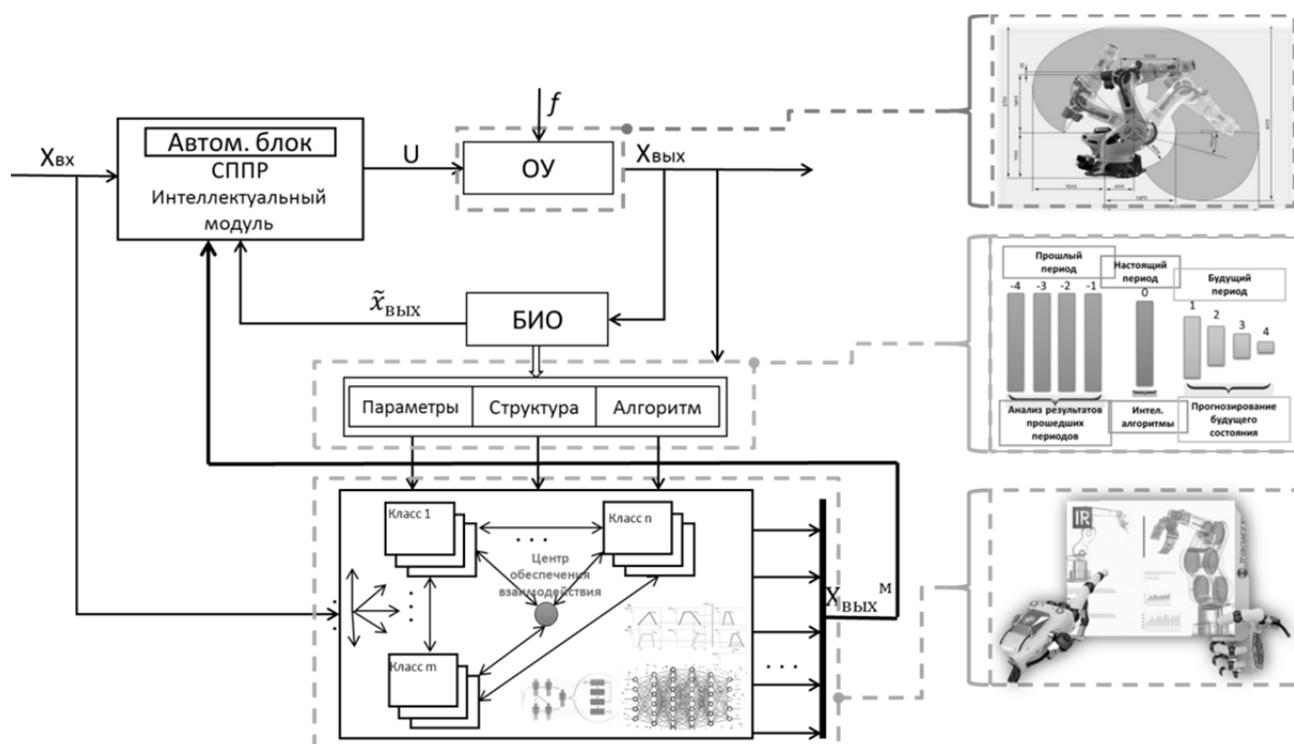


Рис. 3. Структурная схема управления производственным процессом на базе ЦД

Ключевыми изменениями АСУ на рис. 3 являются: включение цифрового двойника, интерфейсов и механизмов его адаптации и расширения блока управления (БУ), интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР), анализирующей результаты моделирования в цифровом двойнике и корректирующей управляющее воздействие  $U$ . Технологии ЦД позволяют обеспечивать работу моделей в трёх реальностях (в настоящем, прошлом и будущем), архивируя и анализируя фактически случившиеся события, анализируя и оперативно корректируя текущие значения параметров, прогнозируя будущие состояния и учитывая их результаты в оперативном и тактическом планировании. Степень зависимости уровня объективности данных от вида моделирования схематично изображена на рис. 3. При этом для реализации прогноза целесообразно использовать интеллектуальные методы [5; 20]. Интерфейсы адаптации (обучения) модели должны предусматривать механизмы, корректирующие не только параметры и структуру модели, но и алгоритмы её функционирования, например алгоритмы функционирования отдельных модулей. Одной из особенностей предлагаемой схемы является включение в ЦД имитационной модели организационной части объекта и блока управления, т. е. HDT [13; 14; 15; 16], обеспечивающих прогнозирование человеко-машинной составляющей, например, экспертных

знаний, компетентностных характеристик и психофизических параметров сотрудников, а также учёт их при формировании управленческих воздействий на объект управления.

Для идентификации технологического процесса и синтеза цифрового двойника необходима технология, позволяющая в максимально редуцированной имитационной модели отразить максимально возможное количество ключевых структур, зависимостей и причинно-следственных связей. Идентификация процесса должна быть направлена на выявление структурных взаимосвязей, их параметризацию, декомпозицию подпроцессов, временных интервалов жизненного цикла продукции и процесса, а также формирование гибких систем критериев качества.

Перспективным и эффективным инструментом интеграции полученных в ходе идентификации знаний может выступать объектно-ориентированный подход [11; 12]. Наделение интеллектуальных агентов модели свойствами интеллектуальности и обеспечения адекватной «внешней среды» их существования позволяет выявить в ходе имитационного моделирования синергетические взаимосвязи и скрытые закономерности. Для интеллектуального вывода целесообразно использовать нейро-нечёткие гибридные системы [6; 17; 19], позволяющие формировать решения с достаточной степенью достоверности в условиях неопределённости.

**Заключение.** Анализ текущего состояния и будущих перспектив развития промышленных предприятий позволил сформулировать набор ключевых проблем, снижающих эффективность производственных процессов, основными из которых являются несовершенство систем управления, связанное с нерациональным использованием элементов внутренней структуры управляющих блоков, большое количество подпроцессов управления, сконцентрированных у ЛПР, необходимость поддержания в работоспособном состоянии большого числа интеграционных связей. Выполненная декомпозиция блоков управления роботизированными процессами позволила выделить наиболее нагруженные и слабодетерминированные контуры управления. Исследование способов снижения влияния человеческого фактора внутри систем управления человекомашинных систем позволило предложить концептуальную схему системы управления роботизированным процессом на базе цифрового двойника и СППР, являющихся надстройками над существующей АСУ. Продемонстрирована целесообразность включения в имитационные модели ЦД модуля НДТ, позволяющего частично снизить негативное влияние человеческого фактора, возникающего вследствие перегрузки неавтоматизированного контура управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zakoyan, E. V. Management of production processes in the organization to increase its efficiency / E. V. Zakoyan, N. G. Kondrashova // Journal of Economy and Business. – 2022. – V. 1, № 83. – P. 102-105.
2. Improving the Efficiency of Production Processes of Enterprises of the Aviation Industry / S. Serebryansky, B. Safoklov, I. Pocebneva, V. Lepeshkin // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – V. 247. – DOI:10.1007/978-3-030-80946-1\_91.
3. Balogun A. A. A., Improving the energy efficiency of production processes at industrial enterprises of the Russian Federation / A. A. A. Balogun, P. Hefei, E.S. Zakharova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. – 2022.
4. Лясковский, В. Л. Методические и программные средства выбора решений по созданию (развитию) автоматизированных систем управления / В. Л. Лясковский, И. Б. Бреслер, М. А. Алашеев // Научноёмкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 48-59.
5. Глухих, И. Н. Гибридный СВР-подход в системах мониторинга и поддержки принятия решений на сложных технологических объектах / И. Н. Глухих // The scientific heritage. – 2021. – Т. 1. – № 72. – С. 24-29.
6. Кузин, А. Ю. Мультиагентная система управления распределённой энергосистемой / А. Ю. Кузин, Д. В. Лукичев, Г. Л. Демидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 945-954.
7. Гришин, Е. С. Программное обеспечение подсистемы контроля качества выпускаемой продукции с использованием интеллектуальных алгоритмов / Е. С. Гришин // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 4. – С. 681-688.
8. Гавриленко, Н. Г. Использование генетического алгоритма для решения задач оптимизации управленческого воздействия в автотранспортной системе / Н. Г. Гавриленко // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2021. – Т. 2. – № 62. – С. 14-19.

9. Андрианов, А. М. Анализ технологий комплексной цифровизации высокотехнологичного промышленного производства в условиях парадигмы «Индустрия 4.0» / А. М. Андрианов // Научные труды вольного экономического общества России. – 2021. – Т. 1. – № 227. – С. 298-317.
10. Хасанов, О. З. Алгоритмы адаптивного управления и идентификации нелинейных динамических объектов роботизированного технологического комплекса с эталонной моделью и сигнальной адаптацией / О. З. Хасанов, З. М. Хасанов // Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 2. – № 92. – С. 102-111.
11. Шальнев, И. О. Объектно-ориентированный подход к описанию взаимодействия группы робототехнических средств на основе распределённой виртуальной машины / И. О. Шальнев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – Т. 1. – № 218. – С. 125-137.
12. Михелёв, В. В. Нормативная система системно-объектного анализа и моделирования / В. В. Михелёв, С. И. Маторин, А. Г. Жихарев // Экономика. Информатика. – 2020. – Т. 47. – № 3. – С. 623-637.
13. Human Digital Twin in Industry 4.0: Concept and Preliminary Model / Y. Naudet, A. Baudet, M. Risse // Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics. – 2021. – P. 137-144. – DOI:10.5220/0010709000003062.
14. Шанин, Д. О. Разработка структуры роботизированного комплекса, функционирующего в динамически изменяющейся среде / Д. О. Шанин, С. И. Сухоруков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 90-94.
15. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 26-33.
16. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололёда на проводах линий электропередач // В. А. Соловьев, С. И. Сухоруков, С. П. Чёрный, К. Е. Костин, Д. О. Савельев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № III-1 (23). – С. 18-25.
17. Максимова, Н. А. Особенности моделирования развитых нечётких систем с алгоритмом вывода Мамдани для управления электроприводами постоянного тока / Н. А. Максимова, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 37-50.
18. Зайченко, И. В. Математическое моделирование и управление процессом повышения эффективности человекомашинных систем с помощью комплексного критерия оценки эргономичности / И. В. Зайченко, С. А. Гордин, Ю. Г. Егорова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 45-50.
19. Стельмашук, С. В. Оценка точности системы согласованного управления с учётом возмущающего воздействия / С. В. Стельмашук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 9-17.
20. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.