

Оригинальная статья

УДК 681.5

DOI: 10.57070/2307-4497-2023-3(45)-39-46

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2023 г. С. Ю. Коршунов^{1, 2}, Г. В. Макаров^{1, 3}, И. Р. Загидулин^{1, 3}, М. М. Свинцов^{1, 3}

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

²ООО «РТ-Инжиниринг» (Россия, 115114, Москва, Павелецкая наб., 2)

³ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (Россия, 654005, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Строителей, 55А)

Аннотация. Рассмотрена проблема, возникающая в системах с множеством последовательных отдельно управляемых технологических контуров и агрегаты. Эти контуры на входе и выходе имеют технологические связи с соседними, но на уровне управления их интеграция в производство предусматривает только передачу информационных параметров оператору всего технологического комплекса. Оператор, зачастую, не успевает обработать весь поток поступающей информации и правильно принять корректирующие решения. Это приводит к проблемам взаимного влияния контуров и агрегатов друг на друга, которое снижает эффективность управления, качество готовой продукции и может приводить к внеплановым простоям и аварийным ситуациям. В качестве решения предлагается возложить некоторые функции управления производством на основную АСУ ТП, выделив специальный технологический контроллер и подсеть для управления локальными системами управления и регулирования. С помощью специальных подсистем (агентов) можно ввести корректирующие воздействия в технологические уставки и параметры каждого контура так, чтобы минимизировать отклонения заданных значений готовой продукции всего комплекса. В случае современного производства роль таких агентов играют цифровые советчики, но они выдают только возможные варианты решений и оставляют выбор за человеком (оператором). При достаточной эффективности отлаженных советчиков, построенных на базе физико-химических, балансовых, технологических, статистических, нейросетевых, экспертных (или комбинированных) натурно-математических и физико-химических моделей, предлагается их перевести из советующего в автоматический режим. В качестве примера приведена схема комплекса технических средств АСУ ТП главного корпуса обогатительной фабрики «Шахта № 12». В качестве сложности реализации такого решения отмечена закрытость локальных систем управления, особенно зарубежных, в качестве решения предложено применение методов комплексного реверс-инжиниринга.

Ключевые слова: АСУ ТП, локальные системы управления, многоагентные системы, цифровые советчики

Для цитирования: Коршунов С.Ю., Макаров Г.В., Загидулин И.Р., Свинцов М.М. Управление распределенными системами технологического комплекса // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 39 – 46. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-39-46](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-39-46)

Original article

MANAGEMENT OF DISTRIBUTED SYSTEMS TECHNOLOGICAL COMPLEX

© 2023 S. Yu. Korshunov^{1,2}, G. V. Makarov^{1,3}, I. R. Zagidulin^{1,3}, M. M. Svintsov^{1,3}

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²RT-Engineering LLC (2 Paveletskaya nab., Moscow, 115114, Russian Federation)

³«Research and Development Center of Control Systems» LLC (55A Stroiteley Ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The article deals with the problem arising in systems with a set of consecutive separately controllable technological circuits and units. These circuits at the input and output have technological links with neighboring ones, but at the control level their integration into production provides only for the transfer of information parameters to the operator of the entire technological complex. The operator often does not have time to process the entire flow of incoming information and make corrective decisions. This leads to problems of mutual influence of such circuits and units on each other, which reduces the efficiency of management, quality of finished products and can lead to unscheduled downtime and emergencies. As a solution, it is proposed to assign some production control functions to the main ACS, allocating a special process controller and subnetwork for controlling local control and regulation systems. Then, with the help of special subsystems ("agents") it is possible to introduce corrective actions into the technological setpoints and parameters of each circuit so as to minimize the deviations of the setpoints of the finished products of the whole complex. In the case of modern production, the role of such "agents" is played by digital advisors, but they provide only possible solutions and leave the choice to the human operator. For well-established advisors built on the basis of physico-chemical, balance and technological, statistical, neural network, expert or combined natural-mathematical and physico-chemical models. As an example, the scheme of the complex of technical means of ACS of the main building of the enrichment plant "Mine No. 12" is given. As a difficulty of realization of such a solution the closedness of local control systems, especially foreign ones, is noted and as a solution the application of complex reverse-engineering methods is proposed.

Keywords: ACS, local control systems, multi-agent systems, digital advisors

For citation: Korshunov S.Yu., Makarov G.V., Zagidulin I.R., Svintsov M.M. Management of distributed systems technological complex. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 39 – 46. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-39-46](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-39-46)

Введение

В настоящее время одной из особенностей создания производства является «конструирование» технологического процесса из отдельных элементов. Эти элементы производства представляют собой технологические контуры определенных процессов или механизмов, соединенные только «входами» и «выходами» [1]. Достаточно просто подать материал с указанными в паспорте свойствами на вход, чтобы получить проектные свойства продукта на выходе.

В идеальном случае эффективность такой работы достигается за счет совместной поставки технологического оборудования и системы управления, которые предлагается называть локальные системы управления (ЛСУ) [2]. Эти системы проходят множественную «обкатку» на различных объектах (ошибки устранены и подобраны оптимальные алгоритмы управления под конкретные тип и характеристики сырья). Такие элементы производства представляют собой черный ящик с полностью определенными входными/выходными зависимостями, из которых последовательно формируется требуемый технологический процесс (рис. 1, штриховыми

линиями отмечены возможные обратные связи и рециклы, обусловленные технологией).

Однако, суммарный эффект возникающих неопределенностей в действующем производстве зачастую приводит к значительному отклонению свойств готового продукта, поскольку отклонение входных/выходных параметров одного контура от нормы влечет за собой значительные отклонения в последующих по цепочке. Кроме того, когда в системе предусмотрен рецикл, эти отклонения могут критически повлиять на весь процесс [3] и привести к аварийным ситуациям, остановке или даже порче оборудования.

Частично эта проблема решается установкой и введением в локальные системы управления дополнительных средств контроля входных и выходных параметров, однако эта информация остается в локальной системе управления и не передается в смежные. Влияние возмущений редко ограничивается локальным контуром. Эти возмущения влияют на последующие технологические контуры в цепочке, суммируются с другими и приводят к сильным отклонениям от ожидаемых качества и количества продукции на выходе.

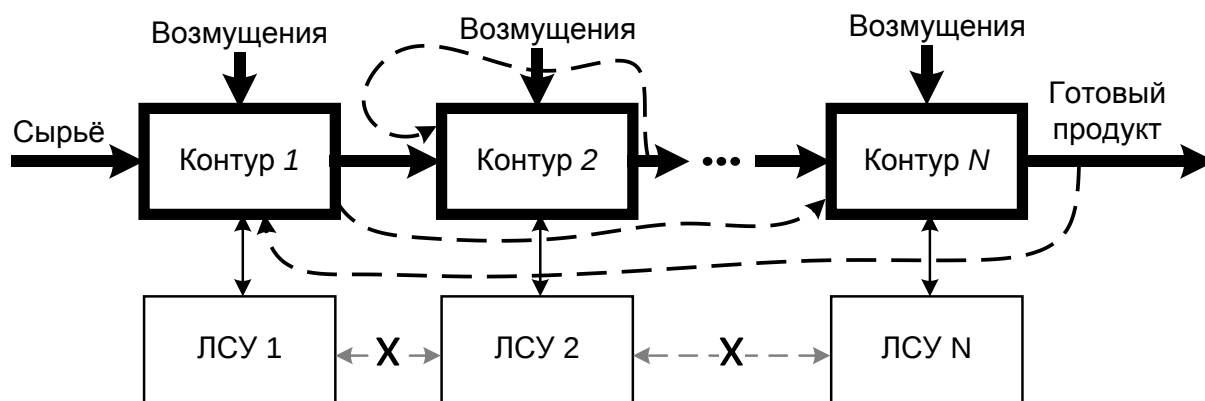


Рис. 1. Схема технологического процесса
Fig. 1. Flow chart of the technological process

Инструменты цифровизации производства

В настоящее время востребованным инструментом оптимизации процессов в рамках цифровизации производства [4, 5] и систем усовершенствованного управления [6, 7] являются цифровые советчики (производственные и учебно-производственные) [8 – 10], которые позволяют определить нужные значения технологических уставок в контурах и выводят подсказки о необходимости их изменения при значительных отклонениях от заданных. Эта информация предоставляется оператору (аппаратчику) для принятия решения (применить или не применить рекомендации).

Цифровой советчик – математическая модель, которая в оперативном режиме выдает рекомендации относительно работы оборудования, позволяет принимать решения, корректирующие технологический процесс. Также как и с математическими моделями существует множество подходов (физико-химические, балансовые и технологические, статистические, нейросетевые, экспертные и многие другие модели и закономерности), которые можно положить в основу цифрового советчика. В большинстве случаев готовые «коробочные решения» цифровых советчиков не раскрывают принципов действия. Наиболее эффективными, как показывает практика, являются комбинированные модели (натурно-математические и физико-математические) [11], совместно с имеющимися фундаментальными моделями и непрерывно поступающей информацией о протекании процессов. Другим возможным вариантом решения является встраивание подсистем оптимизации, в тех случаях, когда нет возможности нахождения хоть какого-либо решения на основе других моделей (или их комбинация). Однако, в этом случае возникает проблема разделе-

ния технологических уставок между контурами, в зависимости от целевых показателей.

Проблемой такого подхода является сложность применения на «большом» производстве – оператор может «потеряться» в таком объеме информации. Другой проблемой является взаимное влияние таких контуров, когда изменение уставок в одном из них оказывает влияние на остальные, что приводит к новым отклонениям с течением времени и превращается в бесконечный процесс изменения взаимно влияющих параметров.

Целесообразной представляется частичная интеграция функций управления производством с центральной АСУ ТП. Задачей управления является выработка регулирующих воздействий и корректировок уставок отдельных систем и агрегатов в соответствии с качественным и количественным заданием всего технологического комплекса.

Вариант многоагентной системы управления технологическими процессами

Одним из вариантов реализации является частичный перевод АСУ ТП в автоматический режим, когда модель цифрового советчика превращается в элемент системы регулирования в качестве модели объекта или прогнозирующей модели [12 – 14] и выдача оператору более укрупненных «советов» и диагностических сообщений. Такая многоагентная система [15] в общем виде представлена на рис. 2 (здесь U – входные воздействия; Y – выходы объектов и системы; W – внешние воздействия; Y^* – заданные параметры; ε – отклонения; u – регулирующие воздействия локальных систем; Z – параметры локальных систем; φ – операторы моделей объектов управления; f – локальные системы регулирования; A – «агенты» АСУ ТП).

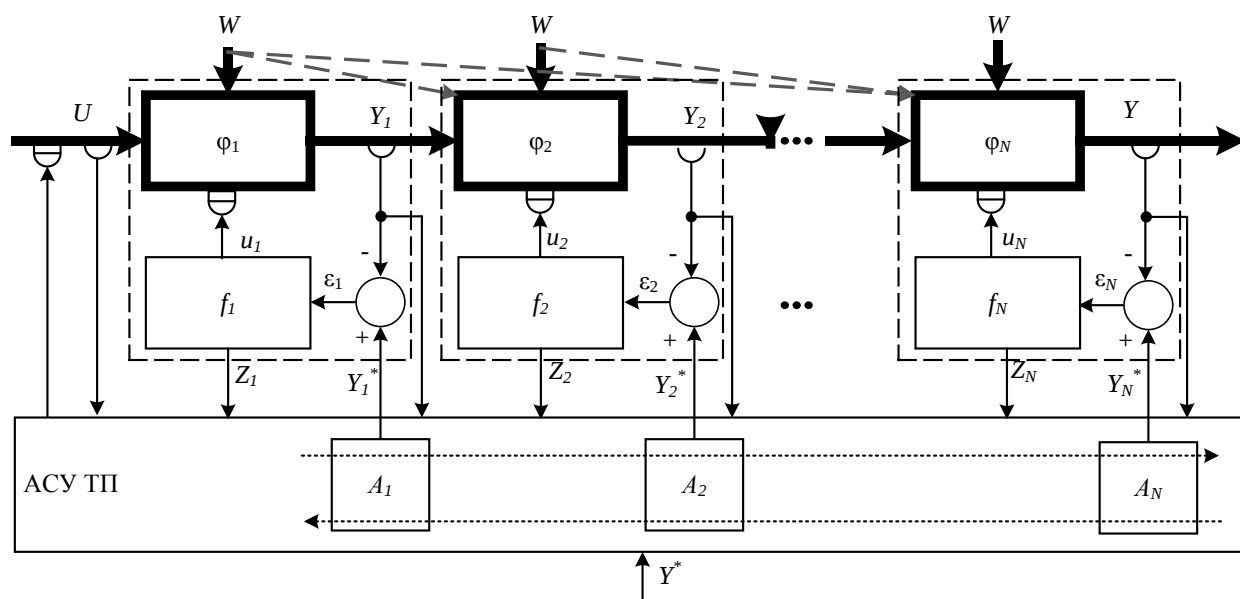


Рис. 2. Структура системы управления распределенным технологическим процессом
Fig. 2. Structure of the distributed process control system

В соответствии с теорией синтеза оптимальных систем [16] передаточная функция системы регулирования S , включающая в себя объект φ и регулятор f , должна стремиться к единице. Наиболее рациональным вариантом является синтез «агентов» таким образом, чтобы

$$SgA \rightarrow 1 \Rightarrow A = \frac{1}{S}.$$

Построение обратной модели системы S является сложной задачей, которая не будет иметь корректных решений. В качестве вариантов можно рассматривать аппроксимацию типовыми звеньями теории автоматического регулирования (ТАР), различными нейронными сетями, экспертными системами или физическими моделями с обеспечением подобия таких систем [17].

Помимо решения задач обработки поступающей информации и корректировки параметров регулирования непосредственно в контуре ЛСУ необходимо реализовать ее интеграцию в вышестоящую АСУ ТП. В традиционном понимании под интеграцией понимают вывод диагностической информации оператору всего технологического процесса и взаимную технологическую блокировку со смежными агрегатами и системами. Это позволяет фиксировать состояние процессов в локальной системе, но не дает возможности оперативно исправить или компенсировать отклонения, возникшие на входе или выходе ее контура.

В связи с этим вышестоящая АСУ ТП должна принять на себя роль не регулирования, а управления, корректируя заданные уставки контуров

цепочки исходя из конечной цели функционирования всего комплекса. Вышестоящая АСУ ТП может содержать свои цифровые советчики для оптимизации, прогнозирования состояний процесса [18 – 20] и качественно-количественных показателей готовой продукции [21] в соответствии с кратко- и долгосрочными планами переработки (часовой, сменной, суточной, месячной и т.д.).

Технические решения

Технические решения для организации рассматриваемой структуры управления предусматривают выделение под взаимодействие с локальными системами отдельной подсети, что будет обеспечивать сокращение времени реакции на изменения за счет исключения систем АСУ ТП, которые зачастую реализуются на отдельных серверах и станциях и отдельной офисной информационной сети, что не позволяет считать их средствами реального времени. Для примера на рис. 3 представлена проектная схема комплекса технических средств главного корпуса ОФ «Шахта № 12».

Выводы

Достоинства представленной структуры заключается в сокращении времени передачи информации между ЛСУ для регулирования исполнительных механизмов и технологического управления в ответ на изменение условий технологического процесса, а также комплексное регулирование и поддержание стабильных показателей технологических процессов для обеспечения заданного объема и качества продукта.

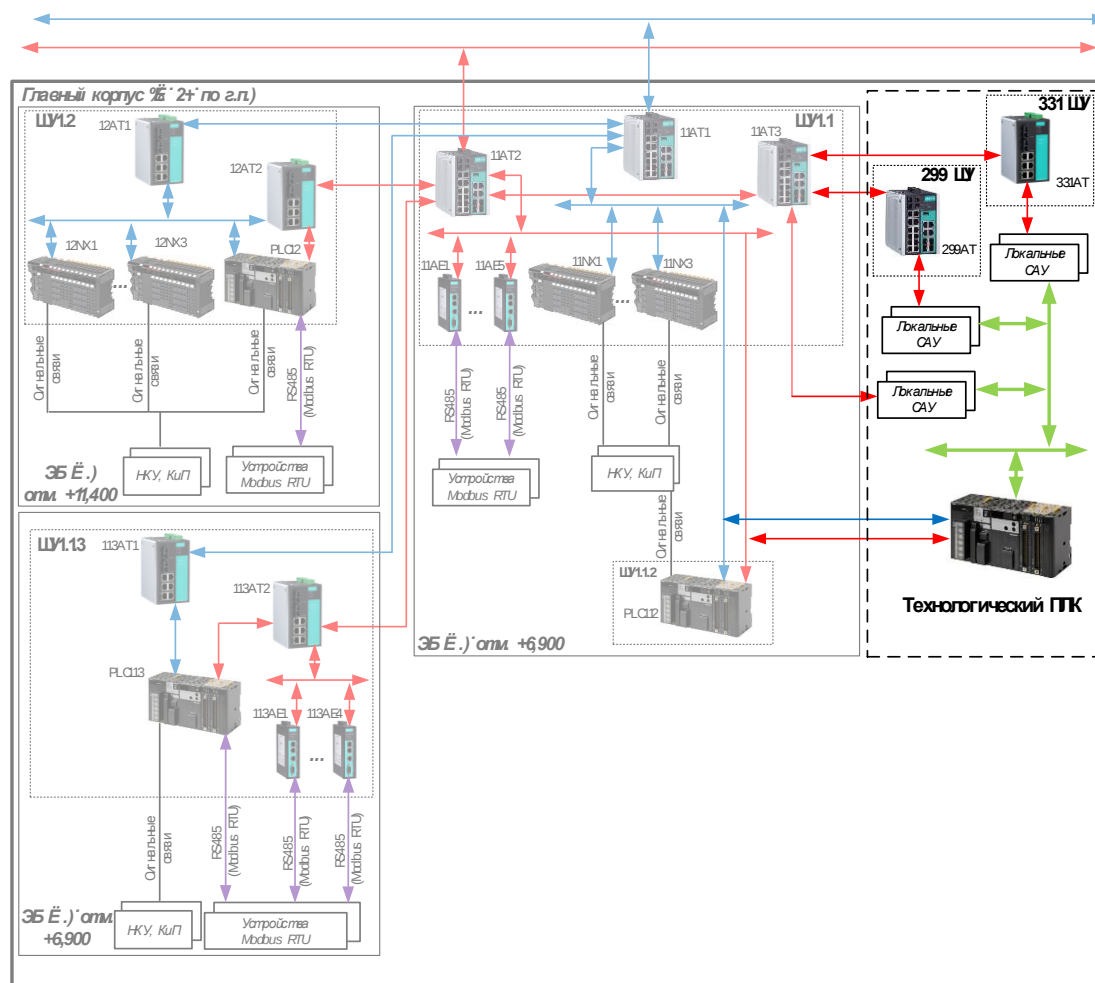


Рис. 3. Схема комплекса технических средств АСУ ТП главного корпуса ОФ «Шахта № 12»

Fig. 3. The scheme of the complex of technical means of the automated control system of the main building of the Mine no. 12

Недостатки структуры в том, что каждая ЛСУ должна иметь открытую систему управления или иметь дополнительные программные теги относящиеся к системе регулирования и влияющие на математическое обеспечение системы, а также необходимо проводить дополнительные смежные настроечные работы для увязки смежных ЛСУ между собой для оперативного реагирования на изменение технологического процесса или объема и качества входящего или заданного продукта. Большая часть локально поставляемых АСУ ТП зарубежного производства являются закрытыми, что делает актуальными задачи реверс-инжиниринга не только механических изделий, а комплексного реверс-инжиниринга систем и технологий в целом [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есенбаев Т.Д. Автоматизация проектирования систем локального управления в АСУ ТП АЭС. В кн.: Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Достижения вузовской науки: от теории к практике», Кумертау, 21 апреля 2022 г. Мелеуз: Государственное унитарное предприятие «Мелеузовская городская типография», 2022. С. 48–52.
2. Загидулин И.Р., Саламатин А.С., Макаров Г.В., Коршунов С.Ю. Особенности интеграции локальных систем управления в АСУТП обогатительной фабрики. В кн.: Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве). AS'2021. Труды XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 2-3 декабря 2021 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 155–159.
3. Tsiryapkina A.V., Myshlyaev L.P., Ivushkin K.A., Gracheva V.V. Control systems for objects with positive internal feedback // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. P. 943–948. <https://doi.org/10.3103/S0967091215120141>
4. Албагачиев А.Ю., Краско А.С., Радаикин Д.А. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства // Кузнеч-

- но-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 2. С. 62–74.
5. Ghobakhloo Morteza. Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 252. P. 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
 6. Görner S., Luse A., Maheshwari N., Malladi R., Mori L., Samek R. The potential of advanced process controls in energy and materials // McKinsey & Company, 2020. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-potential-of-advanced-process-controls-in-energy-and-materials#. (Дата обращения: 28.08.2023).
 7. Helgers H., Schmidt A., Lohmann L.J., Vetter F.L., Juckers A., Jensch C., Mouellef M., Zobel-Roos S., Strube J. Towards Autonomous Operation by Advanced Process Control-Process Analytical Technology for Continuous Biologics Antibody Manufacturing // *Processes*. 2021. Vol. 9. No. 1. P. 172. <https://doi.org/10.3390/pr9010172>
 8. Клебанов Д.А., Макеев М.А. Цифровые советчики для угольной промышленности. Методология внедрения // *Уголь*. 2022. № 8 (1157). С. 112–115. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-112-115>
 9. Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурин И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 8. С. 588–598. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
 10. Chambers R., Beaney P. The potential of placing a digital assistant in patients' homes // *British Journal of General Practice*. 2019. Vol. 70. No. 690. P. 8–9. <https://doi.org/10.3399/bjgp20X707273>
 11. Евтушенко В.Ф., Ивушкин А.А., Венгер К.Г. О натурно-модельном подходе и теории подобия применительно к системам управления. В кн.: *Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019. Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием)*, Новокузнецк, 28 – 30 ноября 2019 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 21–24.
 12. Емельянов С.В., Коровин С.К., Мышляев Л.П. Теория и практика прогнозирования в системах управления. Кемерово; Москва: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат АСТШ. 2008. 487 с.
 13. Krasovskii A.A., Platonov A.S. Stability, Control and Differential Games: Proceedings of the International Conference. Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings, Yekaterinburg, 16-20 September 2019. Switzerland: Springer Nature, 2020. P. 27–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42831-0_3.
 14. Amrit R., Canney W., Carrette P., Linn R., Martinez A., Singh A., Skrovanek T., Valiquette J., Williamson J., Zhou J., Cott B.J. Platform for Advanced Control and Estimation (PACE): Shell's and Yokogawa's Next Generation Advanced Process Control Technology // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48. No. 8. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.148>
 15. Вяткин А.Ю., Смирнов Д.В., Кочетов И.А. Многоагентные системы как возможность реализации систем поддержки принятия решений. В кн.: *Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции*. 2015. № 1-2. С. 234–238.
 16. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. Москва: Энергия, 1973. 439 с.
 17. Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Евтушенко В.Ф., Бурков В.Н., Макаров Г.В., Буркова Е.В. Применение физических моделей в задачах испытания и настройки систем управления (на примере установки сжигания водоугольного топлива). В кн.: *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2015. № 2. С. 211–218.
 18. Hewing L., Wabersich K.P., Menner M., Zeilinger M.N. Learning-based model predictive control: Toward safe learning in control // *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2020. Vol. 3. P. 269–296. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-control-090419-075625>
 19. Berberich J., Köhler J., Müller M.A., Allgöwer F. Data-driven model predictive control with stability and robustness guarantees // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020. Vol. 66. No. 4. P. 1702–1717. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3000182>
 20. Kuhn M., Johnson K. Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models. Chapman and Hall/CRC; 2019. 310 p. <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2020.1790217>
 21. Горайнов С., Красильников А., Райффершайд А., Кланке Ш. Предиктивный ассистент контроля качества МНЛЗ. В кн.: *Литейное производство и металлургия, 2017. Беларусь. Сборник трудов 25-й Международной научно-технической конференции*, Минск, 18-19 октября, Минск: БНТУ, 2017. С. 169–179.

22. Тагильцев-Галета К.В., Кольчурина И.Ю., Коршунов С.Ю., Макаров Г.В. Концепция системного реверс-инжиниринга в условиях комплексного замещения производственных технологий. В кн.: Современные технологии и реверс-инжиниринг. Сборник статей Всероссийских научно-практических конференций («Современные технологии: проблемы и перспективы», 17 – 20 апреля 2023 г. «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования», 10-12 мая 2023 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет, Политехнический институт, Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2023. С. 184–187.

REFERENCES

1. Esenbaev T.D. Automation of the design of local control systems in the automated control system of the NPP. In: *Collection of materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Achievements of university science: from theory to practice"*, Kumertau, April 21, 2022. Meleuz: State Unitary Enterprise "Meleuz city Printing House", 2022, pp. 48–52. (In Russ.).
2. Zagidulin I.R., Salamatina A.S., Makarov G.V., Korshunov S.Yu. Features of integration of local control systems in the automated control system of the processing plant. In: *Automation Systems (in Education, Science and Production): AS'2021: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)*, Novokuznetsk, 02-03 December 2021. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2021, pp. 155–159. (In Russ.).
3. Tsiryapkina A.V., Myshlyaev L.P., Ivushkin K.A., Gracheva V. V. Control systems for objects with positive internal feedback. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, pp. 943–948. <https://doi.org/10.3103/S0967091215120141>
4. Albagachiev A.Yu., Krasko A.S., Radaikin D.A. The need to use automated systems in the 21st century. Prerequisites for the emergence of digital production. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2023, no. 2, pp. 62–74. (In Russ.).
5. Ghobakhloo Morteza. Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 2020. vol. 252, pp. 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
6. Görner S., Luse A., Maheshwari N., Malladi R., Mori L., Samek R. The potential of advanced process controls in energy and materials. *McKinsey & Company*. 2020. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-potential-of-advanced-process-controls-in-energy-and-materials#. (Дата обращения: 28.08.2023).
7. Helgers H., Schmidt A, Lohmann L.J., Vetter F.L., Juckers A., Jensch C., Mouellef M., Zobel-Roos S., Strube J. Towards Autonomous Operation by Advanced Process Control-Process Analytical Technology for Continuous Biologics Antibody Manufacturing. *Processes*. 2021, vol. 9, no. 1, pp. 172. <https://doi.org/10.3390/pr9010172>
8. Klebanov D.A., Makeev M.A. Digital advisors for the coal industry. Implementation methodology. *Ugol*. 2022, no. 8 (1157), pp. 112–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-112-115>
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 588–598. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
10. Chambers R., Beaney P. The potential of placing a digital assistant in patients' homes. *British Journal of General Practice*. 2019, vol. 70, no. 690, pp. 8, 9. <https://doi.org/10.3399/bjgp20X707273>
11. Evtushenko V.F., Ivushkin A.A., Venger K.G. On the full-scale model approach and the theory of similarity in relation to control systems. In: *Automation systems in education, science and production. AS'2019: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)*, Novokuznetsk, November 28-30, 2019. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2019, pp. 21–24. (In Russ.).
12. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyaev L.P. *Theory and practice of forecasting in control systems*. Kemerovo; Moscow: Izdatel'skoe ob"edinenie «Rossiiskie universitety»: Kuzbassvuzizdat ASTSh, 2008, 487 p. (In Russ.).
13. Krasovskii A.A., Platov A.S. *Stability, Control and Differential Games: Proceedings of the International Conference. Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings*, Yekaterinburg, 16-20 September 2019. Switzerland: Springer Nature, 2020, pp. 27–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42831-0_3.
14. Amrit R., Canney W., Carrette P., Linn R., Martinez A., Singh A., Skrovanek T., Valiquette J., Williamson J., Zhou J., Cott B.J. Platform for Advanced Control and Estimation (PACE): Shell's and Yokogawa's Next Generation Advanced Process Control Technology. *IFAC-PapersOnLine*.

- 2015, vol. 48, no. 8, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.148>
15. Vyatkin A.Yu., Smimov D.V., Kochetov I.A. Multi-agent systems as an opportunity to implement decision support systems. In: *Electronic means and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference*. 2015, no. 1-2, pp. 234–238. (In Russ.).
 16. Rotach V.Ya. *Calculation of the dynamics of industrial automatic control systems*. Moscow: Energiya, 1973, 439 p. (In Russ.).
 17. Myshlyaev L.P., Ivushkin A.A., Evtushenko V.F., Burkov V.N., Makarov G.V., Burkova E.V. Application of physical models in the tasks of testing and configuring control systems (for example, a coal-water fuel combustion plant). In: *Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources*. 2015, no. 2, pp. 211–218. (In Russ.).
 18. Hewing L., Wabersich K.P., Menner M., Zeilinger M.N. Learning-based model predictive control: Toward safe learning in control. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2020, vol. 3, pp. 269–296. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-control-090419-075625>
 19. Berberich J., Köhler J., Müller M.A., Allgöwer F. Data-driven model predictive control with stability and robustness guarantees. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020, vol. 66, no. 4, pp. 1702–1717. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3000182>
 20. Kuhn M., Johnson K. *Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models*. Chapman and Hall/CRC. 2019, 310 p. <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2020.1790217>
 21. Goryainov S., Krasil'nikov A., Raiffershaid A., Klanke Sh. Predictive assistant of quality control of the MNLZ. In: *Foundry and Metallurgy, 2017. Belarus: Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference*, Minsk, October 18-19, Minsk : BNTU, 2017, pp. 169–179. (In Russ.).
 22. Tagil'tsev-Galetka K.V., Kol'churina I.Yu., Korshunov S.Yu., Makarov G.V. The concept of system reverse engineering in the context of complex substitution of production technologies. In: *Modern Technologies and Reverse Engineering: Collection of articles of All-Russian scientific and practical conferences ("Modern technologies: Problems and prospects"*, April 17-20, 2023. "Promising technologies of reverse engineering and rapid prototyping", May 10-12, 2023) / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Sevastopol State University, Polytechnic Institute, Sevastopol: Sevastopol State University, 2023, pp. 184–187. (In Russ.).

Сведения об авторах

Сергей Юрьевич Коршунов, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет; главный специалист по АСУ ТП отдела механизации и автоматизации, ООО «РТ-ИНЖИНИРИНГ»
E-mail: s.korshunov@rt-eg.ru

Георгий Валентинович Макаров, к.т.н., доцент, Сибирский государственный индустриальный университет, главный инженер проекта, ООО «Научно-исследовательский центр систем автоматизации»
E-mail: gmakarov@nicsu.ru
ORCID: 0000-0002-9933-4769

Игорь Рамильевич Загидулин, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет, инженер, ООО «Научно-исследовательский центр систем автоматизации»
E-mail: ig.zagidulin2014@yandex.ru

Максим Максимович Свинцов, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет, инженер, ООО «Научно-исследовательский центр систем автоматизации»
E-mail: svintzovmax@yandex.ru

Information about the authors

Sergei Yu. Korshunov, postgraduate student, Siberian State Industrial University; Chief Automated Control System Specialist of the Department of Mechanization and Automation, RT-ENGINEERING LLC
E-mail: s.korshunov@rt-eg.ru

Georgii V. Makarov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Industrial University; Chief Project Engineer, LLC "Automation systems research center"
E-mail: gmakarov@nicsu.ru
ORCID: 0000-0002-9933-4769

Igor' R. Zagidulin, postgraduate student, Siberian State Industrial University, engineer, LLC "Automation systems research center"
E-mail: ig.zagidulin2014@yandex.ru

Maksim M. Svintsov, post-graduate student, Siberian State Industrial University, engineer, LLC "Automation systems research center"
E-mail: svintzovmax@yandex.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 01.09.2023

После доработки 14.09.2023

Принята к публикации 15.09.2023

Received 01.09.2023

Revised 14.09.2023

Accepted 15.09.2023