

УДК 004.89/65.011.56

Искусственный интеллект в задачах планирования производства

¹Александров В. Р., ¹Баранов С. Е., ²Кузнецов М. И., ¹Мальгин С. А.,
²Обухов И. А., ¹Свердлова А. Д., ²Фатеев Д. А.

¹ Научно-производственное предприятие «Исток им. Шокина»
ул. Вокзальная, 2а, г. Фрязино, 141190, Российская Федерация
vrleksandrov@istokmw.ru

² Научно-производственное предприятие «Радиотехника»
5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, г. Москва, 115419, Российская Федерация
iao001@mail.ru

Получено: 18 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Представлены результаты применения методов искусственного интеллекта к задачам планирования производства электронных компонентов и устройств в условиях неполноты нормативной базы. Продемонстрирована возможность оптимизации планов и поэтапного пополнения производственных нормативов. Показано, что взаимодействие интеллектуальной системы планирования с автоматизированной системой мониторинга работы оборудования позволяет выявить проблемные зоны в управлении производством.

Ключевые слова: производство, искусственный интеллект, планирование, объекты планирования, графы, промышленный интернет вещей, нейронная сеть, оптимизация.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Искусственный интеллект в задачах планирования производства / В. Р. Александров [и др.] // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 196—208.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Искусственный интеллект в задачах планирования производства / В. Р. Александров, С. Е. Баранов, М. И. Кузнецов [и др.] // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 196—208.

1. Введение

Стандартный цикл управления современным предприятием, показанный на рис. 1, поддерживается различными средствами автоматизации,

использующими специальные вычислительные процедуры. Как правило, они интегрированы в единую автоматизированную систему управления, основанную на стандартизованных процессах и обеспечивающую единство и целостность используемых данных. Примерами такого подхода являются различные *ERP*-системы [1—3], широко применяемые в промышленности.

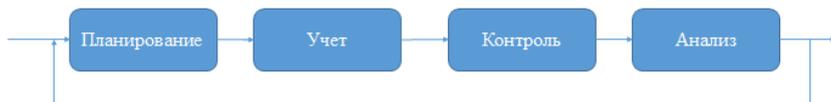


Рис. 1. Цикл управления.

Fig. 1. Loop control

Важнейшими вычислительными процедурами являются расчет потребности в материалах и расчет потребности в производственных мощностях.

Эти классические методы эффективны, если ассортимент продукции предприятия не меняется или меняется медленно и обеспечен гарантированным спросом. Для применения расчетных процедур необходимо наличие максимально полной нормативной базы предприятия, включая нормативы складского хранения, нормативные сроки и объемы поставок, производственные и финансовые нормативы.

Если эти условия не выполнены, или выполнены частично, то нужно искать дополнительные пути повышения эффективности управления. Один из них — совместное использование классических расчетных процедур и вычислительных методов искусственного интеллекта (далее ИИ).

2. Укрупненные объекты планирования

Общими проблемами большинства отечественных предприятий, производящих электронику, являются недостаточно детализированные временные пооперационные нормы или их частичное, а иногда и полное отсутствие. Это затрудняет, а часто делает невозможным, применение для планирования классических расчетных алгоритмов. При этом из опыта с определенной точностью известны времена производства отдельных блоков и узлов изделий.

Выделение таких блоков и узлов в укрупненные объекты планирования позволяет достаточно точно и оптимально планировать производство в условиях неполной нормативной базы. Технологически укрупненные объекты планирования представляют собой цепочки последовательных операций до первой точки сборки. Источниками данных для автома-

тического формирования объектов являются иерархический состав изделия (дерево изделия) и технологические карты его изготовления. Используется аппарат теории графов.

Дерево изделия формируется сверху-вниз, реализуя процесс разделения изделия на детали, компоненты и необходимые материалы. Производственный процесс, описываемый технологическими картами, формируется в обратном направлении — снизу-вверх, реализуя процессы изготовления компонентов и соединения их в детали и изделие. На рис. 2 приведена визуализация дерева изделия А, содержащего 4493 записи. Граф изделия формируется как ориентированный граф от узла «номер записи» к узлу «номер материнской записи».

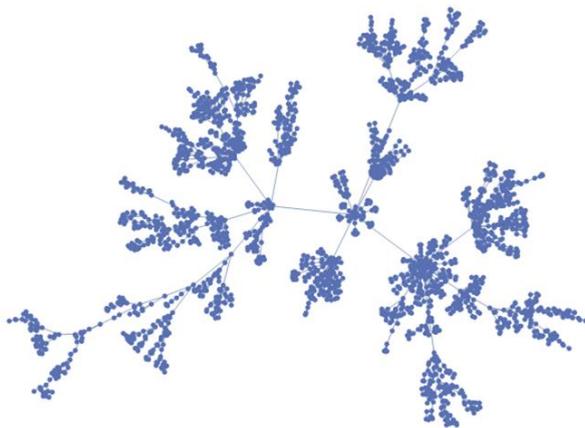


Рис. 2. Визуализация дерева изделия А.

Fig. 2. Visualization of the product tree A

Если в графе изделия выделить все окончечные вершины и вершины, смежные с окончечными и имеющие только один вход и один выход, то получатся первичные объекты, которые необходимо первоначально создать при производстве изделия. На рис. 3 приведены все такие первичные объекты для изделия А. Красными точками обозначен этап сборки, для выполнения которого необходимы все составные компоненты первичных объектов.

Первичные объекты являются первой группой объектов планирования, так как без них не может корректно продолжаться процесс производства изделия. Формирование первой группы объектов планирования сразу же подсказывает достаточно простое решение задачи уменьшения материальных затрат на производство: группировка деталей и сборочных единиц в партии.

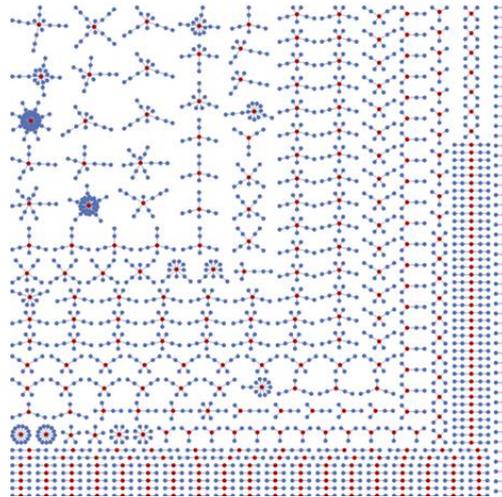


Рис. 3. Визуализация первичных объектов изделия А.

Fig. 3. Visualization of the primary objects of product A

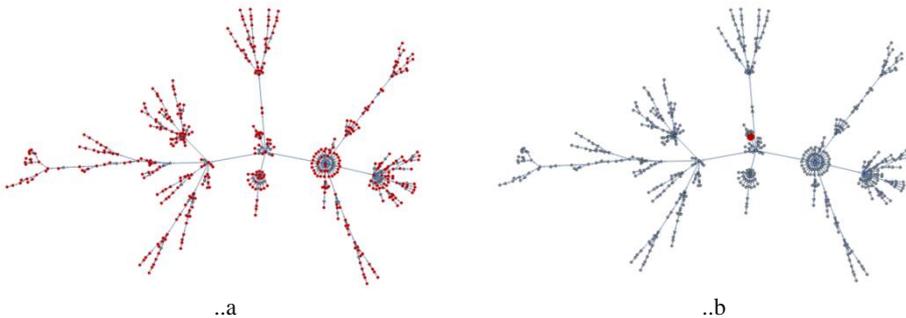


Рис. 4. Граф сборки изделия А: а — с указанием этапа сборки;
b — с выделением конечной точки сборки изделия.

Fig. 4. Graph of the assembly of the product A: a – indicating the stage of assembly;
b – with the selection of the end point of the assembly of the product

Если из графа изделия удалить все первичные объекты, то получим более обозримый граф сборки, показанный на рис. 4а. Красными точками на графе сборки обозначены вершины, соответствующие первичным объектам, так же обозначенные красными точками на рис. 3.

Конечная вершина, реализующая факт создания изделия, обозначена большим красным кругом на графе сборки рис. 4б. Граф сборки определяет вторую группу объектов планирования, связанных с распараллеливанием работ. Именно их целесообразно использовать в качестве укрупненных

объектов планирования. В результате перехода к таким объектам описание изделия в технологической карте, состоящее из пяти—восми тысяч записей, преобразуется в сорок—девяносто объектов планирования и графа итоговой сборки, на который приходится 5—7 % общей трудоемкости изделия.

Использование описанных процедур позволяет перейти к решению двух оптимизационных задач:

- уменьшение материальных затрат за счет группировки деталей и сборочных единиц в партии;
- увеличение производительности за счет сокращения простоев и переналадок оборудования.

Однако при отсутствии информации о временах формирования объектов планирования решения этих задач возможно только в терминах оптимальных партий и оптимального количества переналадок, не привязанных к срокам исполнения работ. Требуемые времена могут быть получены при анализе данных, предоставляемых системой мониторинга работы производственного оборудования.

3. Система мониторинга работы оборудования — промышленный Интернет вещей

На предприятии АО «НПП “Исток” им. Шокина» разработана, внедрена и функционирует собственная платформа промышленного Интернета вещей (*Industrial Internet of Things*) *IIoT.Istok*, решающая задачи мониторинга функционирования оборудования и предиктивной аналитики [4, 5, 6]. В основу платформы положено коммерческое решение *Winnun*¹. Разработка платформы *IIoT.Istok* велась при финансовой поддержке Минпромторга России в рамках комплексного проекта «Цифровое производство».

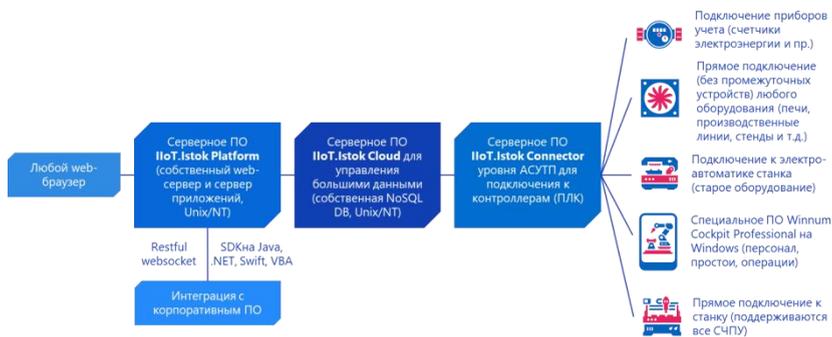


Рис. 5. Технология реализации платформы *IIoT.Istok*.

Fig. 5. Implementation technology of the IIoT.Istok platform

¹ Электронный ресурс: <https://winnun.io/>

Технология реализации платформы показана на рис. 5. Платформа содержит полный набор инструментов для удаленного мониторинга, диагностики и оптимизации работы технологического, инженерного и стандового оборудования.



Рис. 6. Информационное табло руководителя предприятия.

Fig. 6. Information board of the head of the enterprise

Платформа формирует общий (см. рис. 6) и детальный фактический отчеты (см. рис. 7) о работе оборудования, как в режиме реального времени, так и за любой период мониторинга, включая смену, указывает причины остановок.

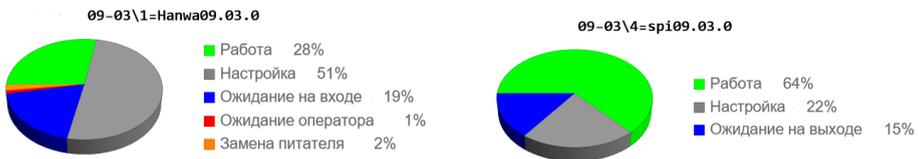


Рис. 7. Примеры анализа и визуализации данных о функционировании оборудования для производства электросчетчиков.

Fig. 7. Examples of analysis and visualization of data on the operation of equipment for the production of electricity meters

Автоматизированный анализ этих данных позволяют вычислить средние за некоторый период «грубые показатели», такие как время переналадки оборудования и время простоя по другим причинам. Для вычисления средних времен производственных операций, то есть производственных нормативов, необходима дополнительная информация, описыва-

вающая процесс производства. Она, к сожалению, далеко не всегда присутствует в маршрутных картах. Однако и «грубые показатели» могут быть с успехом использованы для оптимизации планов производства.

4. Пример оптимизации плана производства

Процедуру оптимизации плана производства на основе методов искусственного интеллекта продемонстрируем на примере электросчетчиков. Исходный план первого квартала 2022 г. предполагал выпуск двадцати шести наименований продукции (итоговых изделий) в заданных количествах. Все необходимые материалы и комплектующие имелись, что серьезно упрощало задачу планирования.

Анализ составов изделий и маршрутных карт их производства показал, что обобщенными объектами планирования являются итоговые изделия. На рис. 8 показана связность изделий и составляющих их компонентов. Изделия имеют двузначную, а компоненты — трехзначную нумерацию. С математической точки зрения задача дискретной оптимизации в пространстве представленных на рис. 8 параметров относится к классу нерешаемых за разумное время.

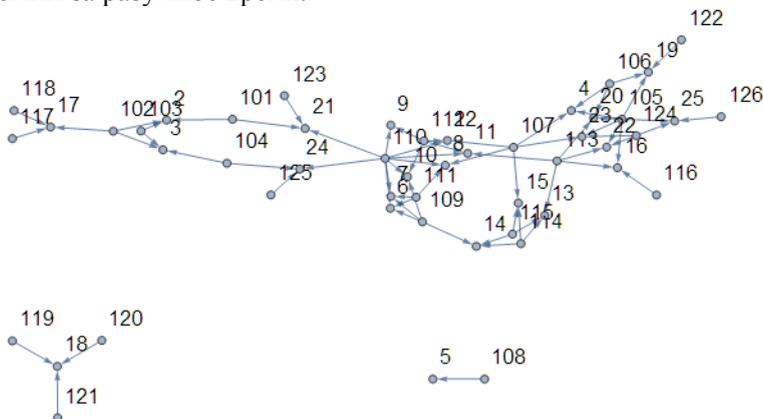


Рис. 8. Связность изделий и компонент.

Fig. 8. Connectivity of products and components

Применение кластеризации при помощи нейронной сети со структурой, показанной на рис. 9, позволяет упростить задачу и сделать ее решаемой за разумное время. Как видно на рис. 10, только четыре компонента с номерами 107, 109, 110 и 113 определяют связность изделий. «Выкалывание» этих четырех компонентов позволяет разбить изделия на условно-независимые группы, показанные на рис. 11. В этих группах так же можно

выделить компоненты, определяющие связность группы. Таким образом, сложность исходной задачи уменьшается многократно.

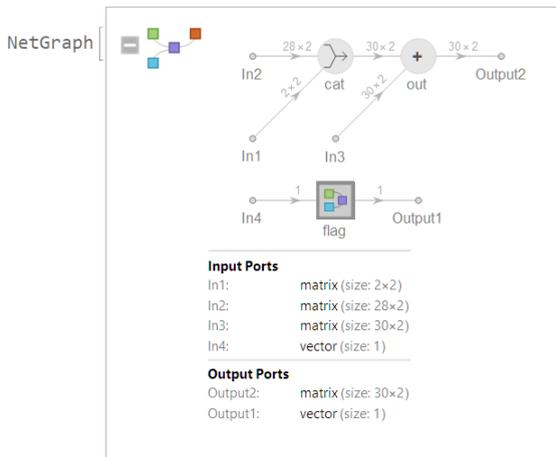


Рис. 9. Структура нейронной сети, используемой для планирования.

Fig. 9. The structure of the neural network used for planning

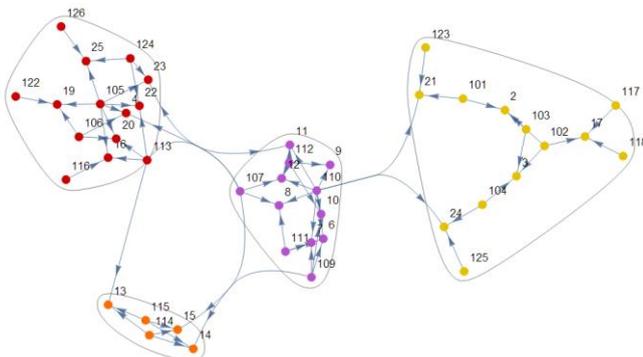


Рис. 10. Выделение кластеров.

Fig. 10. Selection of clusters

Из анализа данных мониторинга (см. рис. 7) следует, что наиболее значимым фактором, уменьшающим время работы оборудования, является время настройки. Начальный кварталный план производства содержал пятьдесят шесть перенастроек.

Из анализа данных состава изделий (см. рис. 10 и 11) следует, что минимизировать количество настроек оборудования можно за счет производства сначала компонентов 107, 109, 110 и 113, определяющих связность изделий, и последующего изготовления изделий в любой последова-

тельности при условии, что все входящие в текущее изделие компоненты изготавливаются в объеме всей программы работ. Такой «первоначально оптимальный» план гарантирует минимальное количество переналадок конвейера, которое точно равняется общему количеству изготавливаемых различных итоговых изделий программы работ, т. е. двадцати шести в рассматриваемом случае.

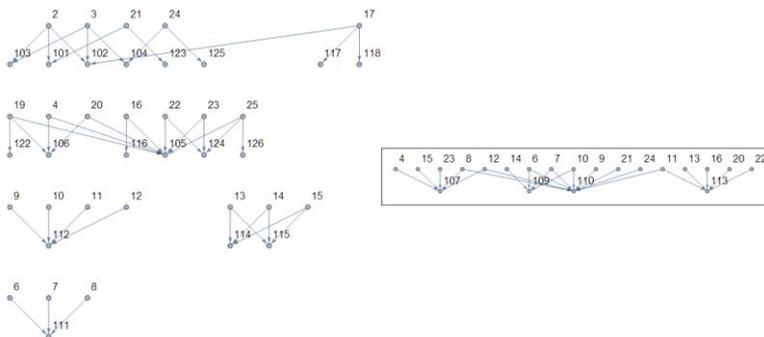


Рис. 11. Условно независимые группы изделий.

Fig. 11. Conditionally independent product groups

Если имеются дополнительные требования к срокам и очередности выпуска отдельных итоговых изделий, то их можно учесть, применяя ту же нейронную сеть, что использовалась при кластеризации. Она переставляет единицы планирования в требуемые позиции и пересчитывает план в виде последовательности операций. Такая перестановка увеличивает необходимое количество переналадок конвейера, но при этом обеспечивает требуемые условия по срокам изготовления изделий. Перебор возможных вариантов показывает, что оптимизация позволяет сократить время выполнения рассматриваемой квартальной программы на 5—12 рабочих дней.

5. Заключение

В ОА «НПП «Исток» им. Шокина» внедрен и находится в опытной эксплуатации программный модуль оптимизации плана производства на основе искусственного интеллекта. Он интегрирован с подсистемами планирования производства, технологии, мониторинга технологического, инженерного и стенового оборудования, входящими в состав программного продукта «Цифровое производство», созданного и функционирующего на предприятии. Реализованные в настоящее время возможности модуля представлены в данной работе.

Основой модуля являются методы и алгоритмы теории графов и специализированная нейронная сеть, решающая задачи анализа данных и

оптимизации маршрутов в условиях внешних ограничений, в частности, производственно-коммерческого характера.

Представленные результаты являются первыми шагами на пути реализации более общей программы применения методов искусственного интеллекта к задачам производственного планирования. Она подразумевает формирование дерева всех возможных вариантов состояний (производственных цепочек), которые обучаются на множестве вариантов производственных параметров (доступность материалов и комплектующих, готовность оборудования и др.). В результате машинного обучения должна появиться нейронная сеть, представляющая собой «расчетную таблицу», которая позволит сопоставить конкретную текущую ситуацию ранее просчитанным вариантам из дерева всех состояний.

Наличие такого инструмента позволит многократно ускорить процедуры планирования, сделать их гибкими и адаптивными к быстро меняющимся внешним условиям. Все это в конечном итоге должно привести к существенному росту эффективности деятельности предприятия.

Благодарности

Авторы благодарны Минпромторгу России за предоставленную субсидию на выполнение работ.

Список литературы

1. Гайфуллин Б. Н., Обухов И. А. Автоматизация систем управления предприятиями стандарта ERP/MRP II. Москва : Богородский печатник ; Интерфейс-Пресс, 2000. 104 с.
2. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II. С.-Петербург : Питер, 2008. 416 с.
3. Питеркин С. В., Оладов Н. А., Исаев Д. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем. Москва : Альпина Паблишерз, 2010. 368 с.
4. Machinery health prognostics: a systematic review from data acquisition to RUL prediction / Y. Lei [et al.] // *Mech. Syst. Signal Process.* 2018. Vol. 104. P. 799—834.
5. Чикало О. В., Александров В. Р., Обухов И. А. Система раннего обнаружения проблемного телекоммуникационного оборудования. В сб. : 30-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, 6—12 сент. 2020 г.). 2020. С. 128—129.
6. Александров В. Р., Баранов С. Е., Обухов И. А. Промышленный интернет вещей для предприятий радиоэлектронной промышленности // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии.* 2022. Т. 5, № 2. С. 191—199.

Информация об авторах

Александров Виталий Романович, директор по цифровой трансформации АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Баранов Сергей Евгеньевич, начальник отдела АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Кузнецов Михаил Иванович, начальник отдела АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Мальгин Сергей Анатольевич, начальник сектора АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Обухов Илья Андреевич, технический директор АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Свердлова Алёна Дмитриевна, начальник сектора АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская область, г. Фрязино, Россия.

Фатеев Дмитрий Александрович, начальник отдела АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Artificial Intelligence in the Tasks of Manufacturing Planning

V. R. Alexandrov¹, S. E. Baranov¹, M. I. Kuznetsov², S. A. Malgin¹,
I. A. Obukhov², A. D. Sverdlova¹, and D. A. Fateev²

¹ *Research and production enterprise “Istok” n. a. Shokin
2a, Vokzalnaya st., Fryazino, 141190, Russian Federation
vrleksandrov@istokmw.ru*

² *Research and production enterprise “Radiotekhnika”
15, build. 11, 5th Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru*

Received: May 18, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *Results of applying the methods of Artificial Intelligence to the tasks of planning the production of electronic components and devices under conditions of incomplete normative base are presented. The possibility of optimization plans and gradually replenish production standards is demonstrated. It has been shown that the interaction of the intelligent planning system with the automated system for monitoring the operation of equipment makes it possible to identify problem areas in manufacturing management.*

Keywords: *manufacturing, Artificial Intelligence, planning, planning objects, graphs, Industrial Internet of Things, neural network, optimization.*

For citation (IEEE): V. R. Alexandrov [et al.], “Artificial Intelligence in the Tasks of Manufacturing Planning,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 196–208, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.14. (In Russ.).

Acknowledgements

The authors are grateful to the Ministry of Industry and Trade of Russia for the grant provided for the work.

References

- [1] B. N. Gaifullin and I. A. Obukhov, *Automation of enterprise management systems of the ERP/MRP II standard*. Moscow: Bogorodsky pechatnik; Interface-Press, 2000. (In Russ.).
- [2] D. A. Gavrilov, *Production management based on the MRP II standard*. St. Petersburg: Piter, 2008. (In Russ.).
- [3] S. V. Peterkin, N. A. Oladov, and D. V. Isaev, *Just in time for Russia. The practice of using ERP-systems*. Moscow: Alpina Publishers, 2010. (In Russ.).
- [4] Y. Lei, N. Li, L. Guo, N. Li, T. Yan, and J. Lin, “Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 104, pp. 799–834, May 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.11.016.

- [5] O. V. Chikalo, V. R. Aleksandrov, and I. A. Obukhov, “Early detection system for problematic telecommunication equipment,” *30th Intern. Crimean Conf. “Microwave and telecommunication technology” — CriMiCo ’2020* (Sevastopol, September 6–12, 2020), pp. 128–129, 2020. (In Russ.).
- [6] V. R. Alexandrov, S. E. Baranov, and I. A. Obukhov, “Industrial Internet of Things for Electronic Industry Enterprises,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 209–217, 2022. (In Russ.).

Information about the authors

Vitaly R. Aleksandrov, Director for Digital Transformation of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Sergey E. Baranov, Head of the Department of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Mikhail I. Kuznetsov, Head of Department of JSC NPP JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

Sergey A. Malgin, head of the sector of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Ilya A. Obukhov, Technical Director of JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

Alyona D. Sverdlova, head of the sector of JSC NPP “Istok” n. a. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

Dmitry A. Fateev, Head of Department of JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.