

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.3.02:631.5

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.340-354



Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами

М. В. Суханова^{1*}, А. В. Суханов^{2,3}, С. А. Войнаш⁴

¹Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ
ВО «Донской государственный аграрный университет»
(г. Зерноград, Россия)

²Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»
(г. Ростов-на-Дону, Россия)

³ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет
путей сообщения» (г. Ростов-на-Дону, Россия)

⁴ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный
университет» (г. Новосибирск, Россия)

*m_suhanova@list.ru

Введение. Разработка интеллектуальных систем управления с помощью различных производственных и технологических процессов является актуальной проблемой. Обработка семян перед посевом – важный сельскохозяйственный процесс, без которого невозможно получение запланированного урожая высокого качества.

Материалы и методы. Для создания интеллектуальной системы управления процессами смешивания в машинах для обработки семян перед посевом технологический процесс предпосевной обработки следует рассматривать как многоуровневую биотехническую систему. В процессе предпосевной обработки семян между объектами биотехнической системы существует взаимосвязь, которую можно представить в виде блок-схемы. Многоуровневая биотехническая система рассматривается как киберфизическая система – совокупность естественных и искусственных объектов, представляющих единое целое, способное к самосохранению и развитию.

Результаты исследования. Компонентами интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания будут: рабочая память, множество нечетких правил, описывающих выполнение операций перемешивания, и стратегия выбора правил в зависимости от состояния системы. При построении интеллектуаль-

© Суханова М. В., Суханов А. В., Войнаш С. А., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

ной системы управления процессами смешивания реализуется стратегия с возвратами. Стратегия управления динамической системой смешивания реализуется по прямому выводу.

Обсуждение и заключение. Интеллектуальная система управления биотехнической системой позволит контролировать процесс смешивания в режиме реального времени, корректировать кинематические параметры смесителя и своевременно предупреждать о вероятности повреждения высокоэластичного рабочего органа. Искусственная интеллектуальная система управления является цифровым двойником естественного интеллекта специалиста, призванным упростить взаимодействие типа «человек – машина». Предварительные экспертные оценки и лабораторные испытания показали, что использование интеллектуальной системы управления процессами обработки семян перед посевом позволит улучшить качество принимаемых решений, уменьшить время управления процессом смешивания более чем в 2 раза по сравнению с существующими методами управления, на 50 % снизить физическую нагрузку на оператора и до 20 % увеличить производительность процесса смешивания.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, смешивание, предпосевная обработка семян, биотехническая система, высокоэластичные рабочие органы, динамический процесс

Финансирование: Исследование проведено при поддержке грантов ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» № 19-01-00250, № 20-07-00100.

Для цитирования: Суханова, М. В. Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами / М. В. Суханова, А. В. Суханов, С. А. Войнаш. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.340-354 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 340–354.

Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies

M. V. Sukhanova^{a*}, A. V. Sukhanov^{b,c}, S. A. Voinash^d

^a*Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Zernograd, Russia)*

^b*Rostov-on-Don Branch of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (Rostov-on-Don, Russia)*

^c*Rostov-on-Don State Transport University (Rostov-on-Don, Russia)*

^d*Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)*

**m_sukhanova@list.ru*

Introduction. The development of intelligent control systems by means of various production and technological processes is an urgent problem. Pre-sowing seed treatment is an important agricultural process, without which it is impossible to get a planned harvest of high quality.

Materials and Methods. To create an intelligent system for control of seed mixing processes in seed processing machines before sowing, the technological process of pre-sowing treatment should be considered as a multi-level biotechnical system. There is a relationship between the objects of the biotechnological system in the process of pre-sowing seed treatment that can be represented in the form of a block diagram. A multi-level biotechnological system is considered as a cyber-physical system – a combination of various natural and artificial objects which is a single whole capable of self-preservation and development.

Results. The components of an intelligent system for controlling dynamic mixing processes will be working memory, many fuzzy rules describing the execution of mixing operations, and a strategy for selecting rules depending on the state of the system. In developing the intelligent mixing process control system, a return strategy is implemented. The strategy of dynamic mixing system control is implemented by a direct conclusion.

Discussion and Conclusion. The intelligent biotechnology control system will allow controlling the mixing process in real-time, correcting the kinematic parameters of the mixer and warning timely about the probability of damage for the elastic working element. Preliminary expert assessments and laboratory tests have shown that the use of an intelligent control system for seed treatment processes before sowing will improve the quality of the decisions made, reduce the control time of the mixing process by more than two times compared to existing control methods, reduce the physical load on the operator by 50% and increase the productivity of the mixing process by up to 20%.

Keywords: intelligent control systems, mixing, pre-sowing seed treatment, biotechnological system, highly elastic working elements, dynamic process

Funding: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the research projects No. 19-01-00250 and No. 20-07-00100.

For citation: Sukhanova M.V., Sukhanov A.V., Voinash S.A. Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):340-354. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.340-354>

Введение

Разработка интеллектуальных систем управления с помощью различных производственных и технологических процессов является весьма актуальной проблемой. Обработка семян перед посевом – важный сельскохозяйственный технологический процесс, без которого невозможно обойтись при подготовке семян к посеву для получения запланированного урожая высокого качества. Основной вид обработки семян перед посевом – химическая обработка (протравливание).

Используемые системы управления технологическими процессами в сельском хозяйстве не обладают способностью мгновенно реагировать на неопределенности, которые воздействуют на систему «человек – технологическая машина». Создание адаптированной системы управления динамическими процессами в сельскохозяйственных машинах приводит к излишнему усложнению алгоритмов и их реализации. В области знаний, посвященных интеллектуальным системам управления, имеется фундаментальная теоретическая база, основанная на исследованиях зару-

бежных и российских ученых: Л. Заде, Е. Мамдани, Д. А. Поспелова, В. М. Лохина, Д. М. Ерёмину, В. Н. Вагина, С. М. Ковалева, В. М. Лохина, Г. С. Осипова, И. М. Макарова, Р. Г. Фараджева и многих других. Применяя современные технологии и методы обработки знаний, необходимо использовать преимущества интеллектуальных систем управления динамическими процессами. Основными преимуществами интеллектуальных систем управления являются относительная простота построения и возможность реализации программного продукта при обработке ограниченного количества информации и знаний в применяемой сфере. Классическая теория управления не может адекватно и быстро реагировать на неопределенности, возникающие в процессе эксплуатации современной сельскохозяйственной техники. В работе рассматривается возможность создания интеллектуальной киберфизической системы управления на исполнительном уровне функционирования биотехнической системы в качестве интеллектуального привода рабочих органов и интеллектуальной

системы управления работоспособностью высокоэластичного рабочего органа машины для смешивания и обработки семян перед посевом. Цель создания такой системы – контролировать процесс смешивания в режиме реального времени, корректировать кинематические параметры рабочих органов привода смесителя и своевременно предупреждать о вероятности повреждения высокоэластичного рабочего органа.

Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания должна отвечать следующим требованиям:

- способность автоматически реагировать на изменения параметров системы, в том числе и аномальные;
- гибкость и адаптируемость к изменениям режимов работы и кинематических параметров машины;
- способность прогнозировать оптимальный режим смешивания при изменении внешних воздействий;
- способность к самообучению на основе анализа происходящих событий и результатов работы киберфизической системы;
- удобный интерфейс, обеспечивающий бесперебойное взаимодействие программных средств и оператора.

Обзор литературы

Основные принципы создания интеллектуальных систем управления были разработаны около полувека назад [1]. Математическим моделированием динамических процессов зани-

мались зарубежные ученые Л. Заде, У. Эшби, Дж. Аридис, Д. Йонг, Е. Динг, Я. Кёхлер [2–4]. Разработкой и внедрением технологий искусственного интеллекта в сельскохозяйственное производство занимались российские ученые А. В. Акимов, А. Н. Важенин, А. А. Гришин, Л. П. Кормановский, Ю. Ф. Лачуга, Н. М. Морозов, Е. А. Скворцов, П. А. Суровцев, Е. А. Тяпугин, В. К. Углин, Р. Р. Хисамов, Ю. А. Цой, С. В. Шаныгин, Е. И. Юревич и другие.

Дж. Аридис (США) предложил принцип Increasing Precision with Decreasing Intelligence (IPDI), заключающийся в объединении цели и задачи управления в виде сложного динамического объекта, зависящего от требуемой степени интеллектуализации [5]. Г. С. Осипов продолжил исследования интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами¹ [6; 7].

Основные принципы ситуационного управления изложены в фундаментальной работе Д. А. Поспелова². Разработкой принципов ситуационного управления применительно к агроинженерному направлению развития науки на конкретных примерах создания интеллектуальных систем управления занимались Б. А. Арютов, А. Н. Важенин, Б. И. Горбунов, В. М. Лохин, И. М. Макаров³ [8–10].

В качестве базового принципа построения систем автоматического управления динамическими процесса-

¹ Best Agricultural Drones 2020 – Reviews and Specs [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dronethusiast.com/agricultural-drones/> (дата обращения: 24.07.2020).

² **Поспелов Д. А.** Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.

³ Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001. 506 с.; Уровни прогнозируемых параметров зонального использования техники в весенний период / А. Н. Важенин [и др.] // Совершенствование методов организации использования машинно-тракторного парка: Сб. науч. тр. Горький: ГСХИ, 1985. С. 16–31; **Важенин А. Н., Арютов Б. А.** Статистическая оценка надежности машинно-тракторных агрегатов // Совершенствование методов организации и использования машинно-тракторного парка: Сб. науч. тр. Н. Новгород: НСХИ, 1992. С. 19–29; **Важенин А. Н., Арютов Б. А.** Модель роста растения в основе проектирования производственных процессов растениеводства // Совершенствование ситуационного использования сельскохозяйственной техники: Сб. науч. тр. Н. Новгород: НГСХА, 1998. С. 7–13.

ми У. Р. Эшби предложил принцип необходимости разнообразия⁴. Базовым принципом проектирования систем автоматического управления динамическими объектами является разработанный В. В. Солодовниковым принцип минимальной сложности. Этот принцип гласит: «Чем выше точность разработки управления динамическими объектами, тем может быть ниже уровень интеллектуальности, и, наоборот, с повышением требуемого уровня интеллектуальности понижаются требования к точности управления» [6]. В. В. Васильевым и С. С. Валеевым разработана теория создания интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами⁵ [11; 12]. На примере газотурбинного двигателя учеными рассмотрена возможность обеспечения достижения цели управления с помощью принципа минимальной сложности, а также адаптация характеристик системы при перемене обстановки управления на основе самообучения и самоорганизации интеллектуальной системы управления [11].

Новые разрабатываемые сельскохозяйственные машины и орудия, являющиеся сложными динамическими объектами, нуждаются в автоматизации системы управления для обеспечения безопасности и бесперебойности работы и снижения нагрузки на оператора [13–15].

Материалы и методы

Наиболее развитыми технологиями искусственного интеллекта в сельском хозяйстве в настоящее время являются:

нечеткая логика, экспертные системы, нейронные сети, ассоциативная память [16; 17]. Основная отличительная черта интеллектуальной системы управления динамическими процессами заключается в том, что входные воздействия на систему имеют слабоформализованную природу «при случайном характере внешних воздействий на систему» [17].

При создании интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами необходимо руководствоваться основными базовыми принципами ситуационного управления, обоснованного использования наиболее развитых технологий искусственного интеллекта, соблюдения соответствия степени интеллектуализации фактора неопределенности. Эти принципы влияют на киберфизическую систему управления процессами смешивания в машинах для предпосевной обработки семян.

Несмотря на несомненные положительные качества, устройство с высокоэластичными рабочими органами имеет свои специфические особенности эксплуатации⁶ [15; 18; 19]. Прочность эластомера ниже прочности стали. Именно благодаря меньшей прочности высокоэластичный материал не создает угрозы разрушения для частиц сыпучего тела. Но при этом ресурс материала рабочего органа не должен быть меньше срока его эксплуатации. Обработка семян – сезонный процесс, в течение которого все механизмы и машины, участ-

⁴ Best Agricultural Drones 2020...

⁵ **Васильев В. И., Шаймарданов Ф. А.** Синтез многосвязных автоматических систем методом порядкового отображения. М.: Наука, 1983. 126 с.; **Валеев С. С.** Алгоритмический метод решения полной проблемы собственных значений для однородной вектор-функции // Теория и проектирование систем автоматического управления и их элементов: Межвуз. научн. сб. Уфа: УАИ, 1989. С. 70–72.

⁶ **Суханова М. В., Бондарев А. В., Войнаш С. А.** Преимущества использования устройств с высокоэластичными рабочими органами в сельскохозяйственных машинах и механизмах // Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК: сборник статей II Российской (Национальной) научно-практической конференции (20 декабря 2019 г.). Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2019. С. 86–88.

вующие в технологическом процессе предпосевной обработки, должны находиться в работоспособном состоянии. Поэтому необходимо создать интеллектуальную систему предупреждения появления аномального события (повреждения материала рабочего органа).

Результаты исследования

Рассмотрим, как можно использовать существующие подходы к решению задач интеллектуального управления динамическими системами при разработке интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами.

В Комплексной программе развития биотехнологий в России на период до 2020 г. отмечается, что с помощью биотехнологии созданы новые средства защиты растений, не уступающие по воздействию на вредных насекомых и болезни химикатам, но безопасные для человека и окружающей среды⁷. В последние десятилетия тенденция на биологизацию земледелия наблюдается во всех странах мира с развитым сельскохозяйственным производством.

Использование биопрепаратов для защиты растений от вредителей и болезней при предпосевной обработке должно основываться на новых более эффективных технологиях и специализированной технике. Предварительные исследования показывают, что использование металлических шнеков и других недеформируемых рабочих органов в машинах для предпосевной обработки приводит к разрушению и травмированию семян, а применяемые кинематические режимы работы машин негативно воздействуют на живые бактерии, грибы и вирусы, составляющие основу биопрепаратов [20; 21]. Ранее нами была предложена и обоснована научная

гипотеза о том, что высокоэластичные рабочие органы не повреждают семена и не оказывают вредного воздействия на живые микроорганизмы, входящие в биопрепараты [19].

Технологический процесс предпосевной обработки семян можно представить в виде многоуровневой биотехнической системы. В состав этой системы входят биологическая система, представленная семенным материалом и обслуживающим персоналом, и техническая система, представленная машиной для обработки семян перед посевом с высокоэластичными рабочими органами.

В процессе предпосевной обработки семян между объектами биотехнической системы существует взаимосвязь, которую можно представить в виде блок-схемы (рис. 1).

Процесс обработки семян перед посевом осуществляется с помощью технической системы, алгоритм работы которой зависит от векторов входных воздействий: X_n – воздействия со стороны препарата; X_c – воздействия со стороны семян; $X_{упр}$ – управляющие воздействия оператора.

Воздействия со стороны препарата включают:

$$X_n = \{x_{n1}; x_{n2}; x_{n3}; \dots; x_{nm}\},$$

где x_{n1} – вид препарата; x_{n2} – объемная или весовая подача; x_{n3} – прилипаемость и другие воздействия.

Входные воздействия в техническую систему от обрабатываемого семенного материала включают:

$$X_c = \{x_{c1}; x_{c2}; x_{c3}; x_{c4}; x_{c5}; \dots; x_{cn}\},$$

где x_{c1} – обрабатываемая культура; x_{c2} – физико-механические характеристики материала; x_{c3} – степень засоренности;

⁷ Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года (утв. Правительством РФ от 24 апреля 2012 г. № 1853п-П8) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70068244> (дата обращения: 24.07.2020).

x_{c4} – влажность семян; x_{c5} – способы взаимодействия семян и защитно-стимулирующих компонентов (химических и биологических) и другие свойства.

Оператор, управляющий технологическим процессом, оказывает влияние на техническую систему, изменяя кинематические и технологические воздействия, которые можно рассматривать как входные:

$$X_{упр} = \{x_{упр1}; x_{упр2}; x_{упр3}; \dots; x_{упрn}\},$$

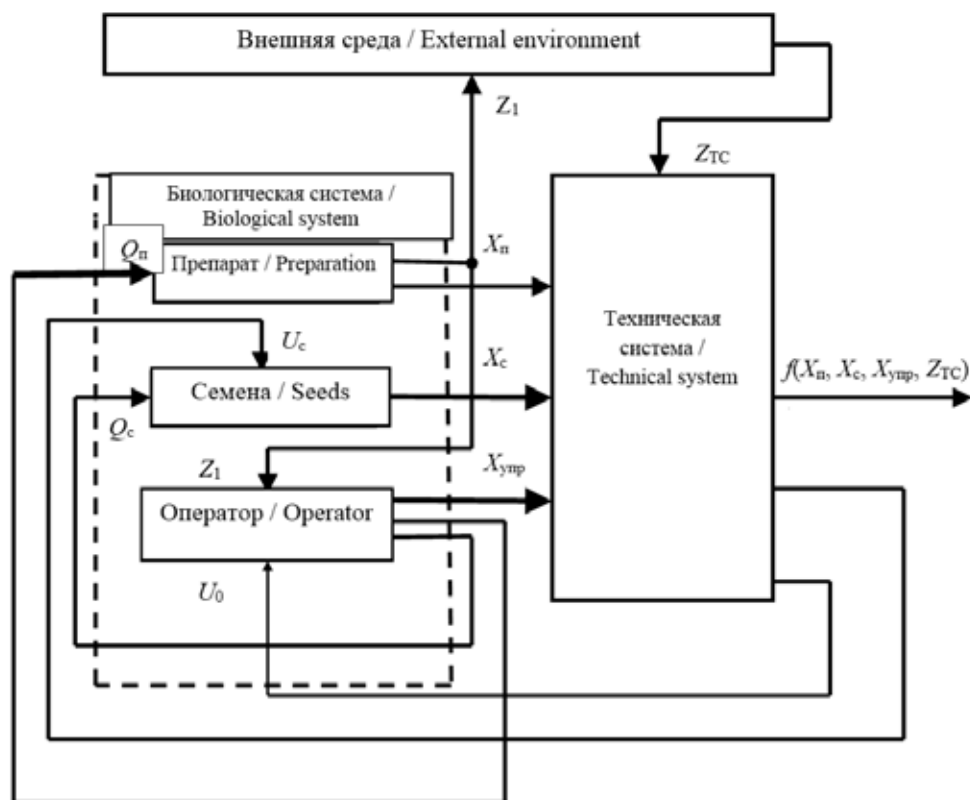
где $x_{упр1}$ – управляющие воздействия подачей препарата; $x_{упр2}$ – управляющие воздействия подачей семян; $x_{упр3}$ – управляющие воздействия на кинематические параметры рабочих

органов технической системы; $x_{упр4}$ – управляющие воздействия на технологические параметры технической системы и др.

Кроме входных техническая система (ТС) подвержена влиянию внешних воздействий $Z_{ТС}$, имеющих в основном случайный характер. Эти воздействия можно представить в виде вектора:

$$Z_{ТС} = \{z_{ТС1}; z_{ТС2}; z_{ТС3}; \dots; z_{ТСn}\},$$

где $z_{ТС1}$ – воздействия, вызванные непостоянством кинематических параметров; $z_{ТС2}$ – воздействия, вызванные нарушением технологических характеристик; $z_{ТС3}$ – воздействия, вызванные колебаниями ТС, и др.



Р и с. 1. Биотехническая система протравливания семян

F i g. 1. Biotechnical seed treatment system

В процессе протравливания семян ТС оказывает влияние на биологическую систему. Эти воздействия могут быть представлены в виде векторов U_c – воздействия технической системы на семена и U_o – воздействия технической системы на оператора.

Выходная функция технической системы $f(X_n, X_c, X_{\text{упр}}, Z_{\text{ТС}})$ в зависимости от используемых параметров и целей процесса может характеризовать: равномерность покрытия семян обрабатываемым препаратом; степень повреждения семян в процессе обработки; накопленную семенами в процессе обработки потенциальную энергию. Кроме указанных выходных характеристик могут быть приняты и другие показатели, вызванные требованиями потребителя.

Биологическая система включает обрабатываемый материал (семена) и оператора, осуществляющего функции управления и контроля.

Оператор осуществляет управляющие воздействия на препарат Q_n и на обрабатываемый материал (семена) Q_c .

Управляющие воздействия оператора на препарат Q_n включают: выбор типа препарата; дозирование препарата; контроль и управление процессом обработки семян препаратом.

В свою очередь препарат оказывает внешние воздействия Z_1 на оператора и окружающую среду:

$$Z_1 = \{z_{1,1}; z_{1,2}; z_{1,3}; \dots; z_{1,n}\},$$

где $z_{1,1}$ – воздействие препарата.

Управляющие воздействия оператора на обрабатываемый материал (семена) Q_c включают: выбор обрабатываемой культуры; выбор сорта семян; установление подачи семян; регулировку подачи препарата-протравителя (биопрепарата); контроль и управление процессом обработки семян препаратом.

В настоящее время использование искусственного интеллекта стало весь-

ма актуальным направлением развития технических систем сельскохозяйственного производства. Интеллектуальная система управления процессами смешивания позволит автоматически отследить и скорректировать технологический процесс обработки семян перед посевом в режиме реального времени благодаря способности к обучению и саморегулированию, что значительно облегчит работу оператора и обеспечит безопасность работы при выполнении технологических операций. Основной целью внедряемых интеллектуальных систем является получение искусственных устройств-посредников между технологической машиной и оператором с целенаправленным поведением и разумными вычислениями, схожими с мышлением.

Компонентами интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания будут: рабочая память M , множество нечетких правил R , описывающих выполнение операций перемешивания, и стратегия выбора правил в зависимости от состояния системы S . Таким образом, интеллектуальная система I представлена в виде тройки:

$$I = \langle M, R, S \rangle.$$

Пример правила:

ЕСЛИ x однородное И y одинаково,
И $z > 0,03$ мм, ТО u хорошо,

где x_1 – степень окрашивания семян; x_2 – распределение смеси по объему камеры; x_3 – содержание капель воды в рабочей поверхности камеры; y – качество приготовленной смеси.

Для правила представляем интерпретацию в виде множества конкретных значений предметной области:

$$\forall P(x, y, \dots, z) \in C \cup A \cup D,$$

$$\exists R(P) \subseteq M^n,$$

где $R(P)$ – интерпретирующее отображение; M – множество конкретных значений предметной области.

Интерпретатор предназначен для организации процесса вывода заключения путем исполнения стратегии управления. Интерпретация действий интеллектуальной динамической системы может быть представлена последовательностью выполнения следующих операций (рис. 1):

1. Выбирается правило (однородное состояние смеси при минимальном времени смешивания).

2. Проверяется выполнимость правила в текущем состоянии рабочей памяти.

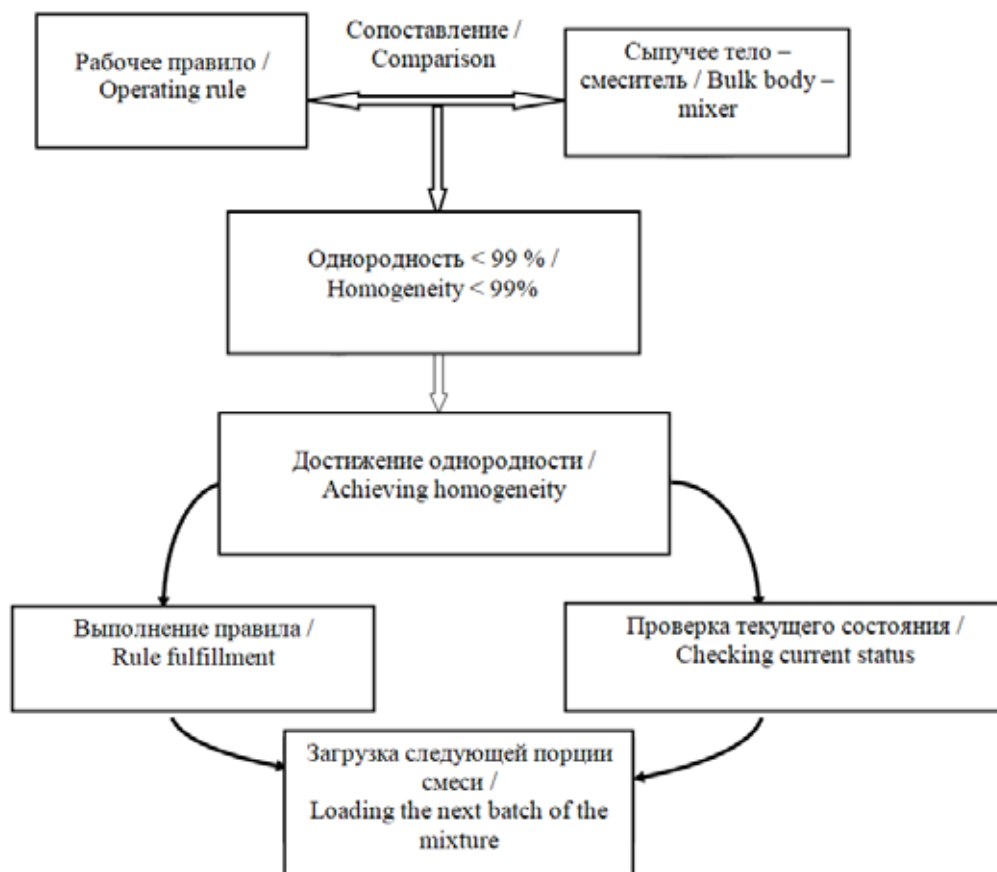
3. Если условие правила выполнено, правило помещается в конфликтное множество.

4. Если множество применимых правил исчерпано, выбирается какое-либо правило из конфликтного множества и применяется.

5. Переход к шагу 1.

Критерием остановки алгоритма является достижение однородного состояния.

При построении интеллектуальной системы управления процессами смешивания реализуется стратегия с возвращениями (рис. 2). Разрабатывая стратегию с возвращениями, принима-



Р и с. 2. Стратегия интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами

F i g. 2. Strategy of the intelligent control system for dynamic mixing processes in seed processing machines with highly flexible working elements

ем в качестве способа выбора правил из конфликтного множества меру близости целевого и полученного состояний.

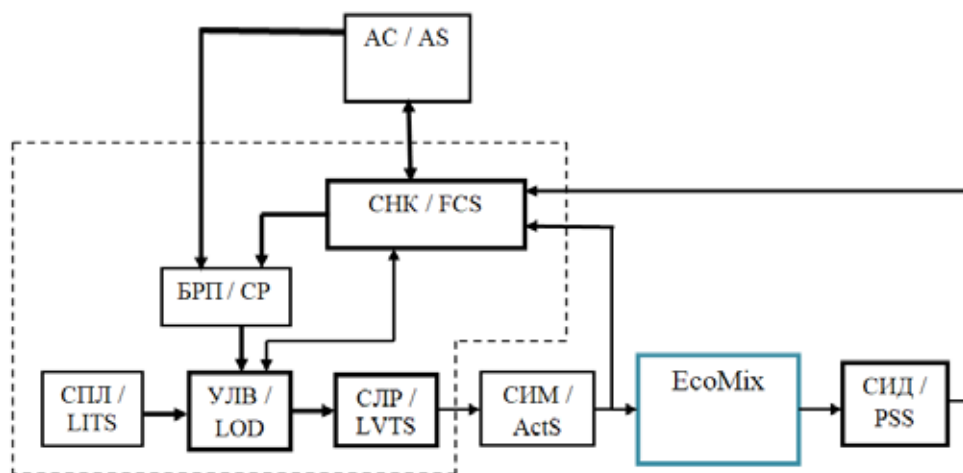
Кроме выполнения операций управления процессом смешивания машины для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами должны регулярно подвергаться диагностике работоспособного безотказного состояния рабочей поверхности смесительной камеры. На рисунке 3 представлена общая структура системы управления работоспособностью высокоэластичной смесительной камеры.

Блок нечеткого управления включает в себя систему нечеткого контроля (ЧНК), выполняющую управление базой рабочих правил (БРП). БРП устанавливает и контролирует взаимосвязь между системой перевода входных воз-

действий в лингвистические переменные (СПЛ) и системой перевода лингвистических переменных в регулирующие воздействия (СЛР) посредством устройства логического вывода (УЛВ). СЛР осуществляет контроль и управление системой исполнительных механизмов (СИМ) смесителя для предпосевной обработки семян (ЕсоМіх). Для регистрации входных сигналов (деформация рабочей емкости, состояние смеси) используется система исполнительных датчиков (СИД), закрепляемых внутри смесительной камеры машины для обработки семян.

Обсуждение и заключение

Для предупреждения вероятности наступления повреждения высокоэластичного материала рабочей емкости можно преобразовать реальный про-



Р и с. 3. Нечеткая система управления работоспособностью высокоэластичной смесительной камеры EcoMix: AC – адаптационная система; ЧНК – система нечеткого контроля; БРП – база рабочих правил; УЛВ – устройство логического вывода; СПЛ – система перевода входных воздействий в лингвистические переменные; СЛР – система перевода лингвистических переменных в регулирующие воздействия; СИМ – система исполнительных механизмов; СИД – система датчиков контролируемых параметров

F i g. 3. Fuzzy performance control system for the high elastic mixing chamber EcoMix:

AS – adaptive system; FCS – fuzzy control system; CP – code of practice;

LOD – logic output device; LITS – linguistic input translation system;

LVTS – language variable translation system; ActS – actuation system; PSS – parameter sensor system

цесс в марковский с помощью нечеткой адаптивной системы, используя методологию обнаружения аномалий, основанную на анализе динамики развития вероятностных значений аномалии, разработанную С. М. Ковалевым [22]. Для решения проблемы выявления и предупреждения нештатных ситуаций, которые могут стать причиной возникновения необратимых процессов, разработана «методология упреждения нештатных ситуаций на основе детектирования паттернов – предвестников аномалий», рассмотренная в другой работе [23]. Приведенная методология в своей основе содержит стохастическую марковскую доходную модель, в которую внедряют правила, содержащие темпоральные нечеткие отношения. Это приводит к росту эффективности представления реальных процессов и к возможности использования экспертных знаний. Гибридный метод обучения можно использовать в качестве теоретической базы систем управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян и упреждения повреждения эластичных рабочих органов. Создание интеллектуальной системы управления биотехнической системой позволит контроли-

ровать процесс смешивания в режиме реального времени, корректировать кинематические параметры смесителя и своевременно предупреждать о вероятности повреждения высокоэластичного рабочего органа. Искусственная интеллектуальная система управления будет являться цифровым двойником естественного интеллекта специалиста и позволит упростить взаимодействие типа «человек – сельскохозяйственная машина». Цифровой двойник должен стать виртуальной копией контролируемого технологического процесса и оптимизировать ход процесса смешивания и обработки семян перед посевом на этапе планирования, спрогнозировать ошибки, связанные с человеческим фактором, а также выявить и упредить отказы технических средств. По предварительным экспертным оценкам и лабораторным испытаниям, использование интеллектуальной системы позволяет улучшить качество принимаемых решений, уменьшить время управления процессом смешивания более чем в 2 раза по сравнению с существующими методами управления, на 50 % снизить физическую нагрузку на оператора и до 20 % увеличить производительность процесса смешивания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Copeland, J.** Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction / J. Copeland. – Hoboken : Wiley-Blackwell, 1993. – 328 p. – ISBN 978-0631183853. – URL: <https://philpapers.org/rec/COPAIA-4> (дата обращения: 24.07.2020).
2. **Yang, X.** Tracking Illicit Drug Dealing and Abuse on Instagram Using Multimodal Analysis / X. Yang, J. Luo. – DOI 10.1145/3011871 // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. – 2017. – No. 58. – 15 p. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3011871> (дата обращения: 24.07.2020).
3. **Mayer-Schönberger, V.** Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think / V. Mayer-Schönberger, K. Cukier. – Eamon Dolan/Mariner Books, 2014. – 272 p. – ISBN-10: 0544227751
4. **Koehler, J.** Planning from Second Principles / J. Koehler. – DOI 10.1016/0004-3702(95)00113-1 // Artificial Intelligence. – 1996. – Vol. 87, Issue 1-2. – Pp 145–186. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370295001131?via%3Dihub> (дата обращения: 24.07.2020).
5. **Saridis, G. N.** Hierarchically Intelligent Machines / G. N. Saridis. – Singapore : World Scientific Pub., 2001. – 126 p.



6. **Aldewereld, H.** Social Coordination Frameworks for Social Technical Systems / H. Aldewereld, O. Boissier, V. Dignum [et al.]. – DOI 10.1007/978-3-319-33570-4. – New York : Springer, 2016. – 276 p. – ISBN 978-3-319-33568-1. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-33570-4> (дата обращения: 24.07.2020).

7. **Osipov, G.** Limit Behaviour of Dynamic Rule-Based Systems / G. Osipov // Information Theories & Applications. – 2008. – Vol. 15. – Pp. 115–119. – URL: <http://sci-gems.math.bas.bg:8080/jspui/bitstream/10525/54/1/ijita15-2-p03.pdf> (дата обращения: 24.07.2020).

8. **Федоренко, В. Ф.** Цифровизация сельского хозяйства / В. Ф. Федоренко // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 6. – С. 2–9.

9. **Kovalev, S.** Adaptive Approach for Anomaly Detection in Temporal Data Based on Immune Double-plasticity Principle / S. Kovalev, A. Sukhanov, M. Sukhanova [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 679. – Pp. 234–243.

10. **Козубенко, И. С.** Точное земледелие и Интернет вещей / И. С. Козубенко // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 11. – С. 46–48.

11. **Васильев, В. И.** Синтез многосвязной адаптивной системы управления ГТД на основе нейронных сетей / В. И. Васильев, С. С. Валеев, А. А. Шилоносов // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 7. – С. 36–41. – URL: <http://avia.tgizd.ru/ru/arhiv/5749> (дата обращения: 24.07.2020).

12. **Васильев, В. И.** Оценка сложности нейросетевых моделей на основе энтропийного подхода / В. И. Васильев, С. С. Валеев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2004. – № 9. – С. 10–16. – URL: <http://neurocomp.ru/2004/09/01/ocenka-slozhnosti-nejrosetevykh-modelej-na-osnove-entropijnogo-podkhoda/> (дата обращения: 24.07.2020).

13. **Патент № 2484612 Российская Федерация, МПК А01 В 59/04.** Пахотный агрегат : № 2012106494/13 : заявл. 22.02.2012 : опубл. 20.06.2013 / Войнаш С. А., Войнаш А. С., Жарикова Т. А. ; заявитель и патентообладатель Войнаш С. А., Войнаш А. С., Жарикова Т. А.

14. **Пашенко, В. Ф.** Влияние локального рыхления почвы на урожайность сои / В. Ф. Пашенко, Ю. Н. Сыромятников, Н. С. Храмов [и др.]. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-5-79-86 // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 79–86. – URL: https://mospolytech.ru/storage/files/doi/file_7fc8ef54a8154c28341bf9a47443a5ce_1574616717.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

15. **Патент № 2618106 Российская Федерация, МПК А01 С1/00(2006.01).** Способ предпосевной обработки семян и устройство для его осуществления : № 2016101318 : заявл. 19.01.2016 : опубл. 02.05.2017 / Суханова М. В., Суханов А. В., Малиновский С. В. ; патентообладатель Суханова М. В. – 15 с. – URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2618106C1_20170502.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

16. **Скворцов, Е. А.** Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Е. А. Скворцов, В. И. Набоков, К. В. Некрасов [и др.]. – DOI 10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141 // Аграрный вестник Урала. – 2019. – Вып. 187, № 8. – С. 91–98. – URL: <https://usau.editorum.ru/en/nauka/article/30755/view> (дата обращения: 24.07.2020).

17. **Лохин, В. М.** Интеллектуальные системы управления – перспективная платформа для создания техники нового поколения / В. М. Лохин, М. П. Романов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – Вып. 1 (2). – 24 с. – URL: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/3ed/01-lohin_romanov.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

18. **Суханова, М. В.** Актуальность использования интеллектуальных систем управления динамическими процессами смешивания компонентов сыпучего тела в устройствах для предпосевной обработки семян / М. В. Суханова, В. П. Мирошникова, А. В. Суханов // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – Т. 1, № 45. – С. 45–54. – URL: <https://clck.ru/PshM8> (дата обращения: 24.07.2020).

19. **Суханова, М. В.** Смеситель-инкрустатор Ecomix – устройство импульсного воздействия, исключающее травмирование семян при предпосевной обработке / М. В. Суханова, В. П. Забродин, А. В. Суханов // Научная жизнь. – 2018. – № 6. – С. 38–42.

20. **Забродин, В. П.** Исследование ударного воздействия механического устройства на семена озимой пшеницы / В. П. Забродин, А. Ф. Бутенко, М. В. Суханова [и др.]. – DOI 10.22314/2073-7599-

2018-12-2-14-18 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12, № 2. – С. 14–18. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/234> (дата обращения: 24.07.2020).

21. **Sukhanova, M. V.** Damage to Seeds by the Working Bodies of Continuous Machines / M. V. Sukhanova // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2019. – Vol. 8, № 5. – URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100814505&tip=sid> (дата обращения: 24.07.2020).

22. **Ковалев, С. М.** Методы многошагового предсказания аномалий в темпоральных данных / С. М. Ковалев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – Вып. 7 (144). – С. 85–91. – URL: <https://clck.ru/PSicz> (дата обращения: 24.07.2020).

23. **Ковалев, С. М.** Гибридный метод обучения стохастических моделей упреждения аномалий на основе нечетких продукций / С. М. Ковалев, А. Н. Гуда, А. В. Суханов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (59). – С. 40–47. – URL: http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2015/10/2015_3_vestnik_rgups_a.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

Поступила 08.12.2019; принята к публикации 10.02.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Суханова Майя Викторовна, доцент кафедры технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), кандидат технических наук, Researcher ID: P-3013-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3863>, m_suhanova@list.ru

Суханов Андрей Валерьевич, старший научный сотрудник Ростовского филиала АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Ленина, д. 44/13), доцент кафедры вычислительной техники и автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-4776-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6161-4709>, Scopus ID: 57052339600, sukharudze@gmail.com

Войнаш Сергей Александрович, инженер научно-исследовательской части ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (630039, Россия, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, sergey_voi@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Суханова – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формулирование выводов; А. В. Суханов – выполнение критического анализа исследований; С. А. Войнаш – литературный и патентный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Copeland J. Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction. Hoboken: Wiley-Blackwell; 1993. 328 p. Available at: <https://philpapers.org/rec/COPAIA-4> (accessed 24.07.2020). (In Eng.)
2. Yang X., Luo J. Tracking Illicit Drug Dealing and Abuse on Instagram using Multimodal Analysis. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2017; 58.15 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/3011871>
3. Mayer-Schönberger V., Cukier K. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. Eamon Dolan/Mariner Books; 2014. 272 p. (In Eng.)



4. Koehler J. Planning from Second Principles. *Artificial Intelligence*. 1996; 87(1-2):145-186. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(95\)00113-1](https://doi.org/10.1016/0004-3702(95)00113-1)
5. Saridis G.N. Hierarchically Intelligent Machines. Singapore: World Scientific Pub.; 2001. 126 p. (In Eng.)
6. Aldewereld H., Boissier O., Dignum V., et al. Social Coordination Frameworks for Social Technical Systems. New York: Springer; 2016. 276 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33570-4>
7. Osipov G. Limit Behaviour of Dynamic Rule-Based Systems. *Information Theories & Applications*. 2008; 15:115-119. Available at: <http://sci-gems.math.bas.bg:8080/jspui/bitstream/10525/54/1/ijita15-2-p03.pdf> (accessed 24.07.2020). (In Eng.)
8. Fedorenko V.F. Digitalization of Agriculture. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018; (6):2-9. (In Russ.)
9. Kovalev S., Sukhanov A., Sukhanova M., et al. Adaptive Approach for Anomaly Detection in Temporal Data Based on Immune Double-Plasticity Principle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 679:234-243. (In Eng.)
10. Kozubenko I.S. Precision Farming and Internet of Things. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2017; (11):46-48. (In Russ.)
11. Vasilev V.I., Valeev S.S., Shilonosov A.A. Design of Multivariable Adaptive Control System of Gas-Turbine Engine on the Base of Neural Networks. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* = Aerospace Instrument-Making. 2003; (7):36-41. Available at: <http://avia.tgizd.ru/ru/arhiv/5749> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
12. Vasilev V.I., Valeev S.S. Evaluation of the Complexity of Neural Network Models Based on the Entropy Approach. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = Neurocomputers. 2004; (9):10-16. Available at: <http://neurocomp.ru/2004/09/01/ocenka-slozhnosti-nejrosetevyx-modelej-na-osnove-entropijnogo-podxoda/> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
13. Plowing Unit: Patent 2484612 Russian Federation. No. 2012106494/13; appl. 22.02.2012; publ. 20.06.2013. (In Russ.)
14. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Hramov N.S., et al. The Influence of Local Loosening of the Soil on Soybean Productivity. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2019; (5):79-86. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-5-79-86>
15. Method for Pre-Sowing Treatment of Seeds and Device for Its Implementation: Patent 2618106 Russian Federation. No. 2016101318; appl. 19.01.2016; publ. 02.05.2017. Bulletin No. 13. 15 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2618106C1_20170502.pdf (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
16. Skvorcov E.A., Nabokov V.I., Nekrasov K.V., et al. Application of Technologies of Artificial Intelligence in Agriculture. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2019; 187(8):91-98. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141
17. Lokhin V.M., Romanov M.P. Intelligent Control Systems – the Perspective Platform for Creation of New Generation of Technical Objects. *Vestnik MGTU MIREA* = Bulletin of Moscow Technological University (MIREA). 2014; 1. 24 p. Available at: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/3ed/01-lohin_romanov.pdf (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
18. Sukhanova M.V., Miroshnikova V.P., Sukhanov A.V. The Relevance of the Use of Intelligent Control Systems for the Dynamic Mixing of Loose Body Components in Seedbed Preparation Devices. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2019; 1:45-54. Available at: <https://clck.ru/PshM8> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
19. Sukhanova M.V., Zabrodin V.P., Sukhanov A.V. Mixer-Incrustator “Ecomix” – Pulse Exposure Device, Excluding Grain Damage during Pre-Sowing Treatment. *Nauchnaya zhizn* = Scientific Life. 2018; (6):38-42. (In Russ.)
20. Zabrodin V.P., Butenko A.F., Sukhanova M.V., et al. Research of Impact by Mechanical Device on Winter Wheat Seeds. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(2):14-18. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-2-14-18>

21. Sukhanova M.V. Damage to Seeds by the Working Bodies of Continuous Machines. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019; 8(5). Available at: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100814505&tip=sid> (accessed 24.07.2020). (In Eng.)

22. Kovalev S.M. The Method of Multistep Prediction of Anomalies in Temporal Data. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = SFU News. Engineering Sciences. 2013; 7:85-91. Available at: <https://clck.ru/Psicz> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)

23. Kovalev S.M., Guda A.N., Sukhanov A.V. Hybrid Educational Method of Stochastic Modules of Anomaly Prediction on the Base of Fuzzy Productions. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* = Rostov State University of Railway Transport Bulletin. 2015; (3):40-47. Available at: http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2015/10/2015_3_vestnik_rgups_a.pdf (accessed 24.07.2020). (In Russ.)

Received 08.12.2019; revised 10.02.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Maya V. Sukhanova, Associate Professor of Chair of Technical Mechanics and Physics, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: P-3013-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3863>, m_suhanova@list.ru

Andrey V. Sukhanov, Senior Researcher of Rostov-on-Don Branch of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (44/13 Lenin St., Rostov-on-Don 344038, Russia), Associate Professor of Chair of Computer Science and Automated Control Systems, Rostov-on-Don State Transport University (2 Ploshchad Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya, Rostov-on-Don 344038, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Y-4776-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6161-4709>, Scopus ID: 57052339600, sukharudze@gmail.com

Sergey A. Voinash, Researcher of Engineering Department, Novosibirsk State Agrarian University (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, sergey_voi@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Sukhanova – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, preparation of the initial text and conclusions; A. V. Sukhanov – critical review of the research; S. A. Voinash – literary and patent analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.