

МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАГОТОВКИ КОРМОВ

А. И. СЕМЕНОВ*, А. Ю. КУЛАКОВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
alekssemyenov1996@gmail.com

Аннотация. Заготовка кормов из трав рассматривается как сложный технико-технологический процесс. Конечный продукт, в данном случае заготовка силоса, может быть получен с использованием разных вариантов технологий кормопроизводства. Представлен подход к выбору наиболее приемлемого варианта технологий и планов производства кормов из трав на основе логико-динамических и нечетко-возможностных моделей. Разработанный комплекс моделей и алгоритмов позволяет с системно-кибернетических позиций описать и исследовать существующие взаимосвязанные многоэтапные процессы производства кормов из трав при переводе объекта управления (сельскохозяйственного предприятия, производящего корма) из заданного исходного состояния в заданное конечное в зависимости от конкретных сценариев изменения внешних условий. В качестве основных внешних условий рассматриваются факторы, связанные с агробиологическими, временными, климатическими, экономическими и организационными ограничениями. Для решения задач предложены нечетко-возможностные модели оценивания урожайности кормовых угодий и качества выращенной кормовой массы. При анализе эффективности процессов кормопроизводства важным вопросом является многокритериальное оценивание качества, а также соответствующих программ проактивного управления процессом заготовки силоса с учетом следующих показателей: своевременности выполнения операций при различных условиях, степени равномерности использования ресурсов и общего времени заготовки кормов из трав. Предложены оригинальный математический анализ рассматриваемых процессов и алгоритмы решения задач прогнозирования и планирования заготовки кормов.

Ключевые слова: модельно-алгоритмическое обеспечение, логико-динамические модели, нечетко-возможностный подход, экспертные знания, проактивное управление, проактивное планирование, кормопроизводство

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Семенов А. И., Кулаков А. Ю. Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 818—825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.

MODEL AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR FORECASTING AND PLANNING THE FORAGE HARVESTING PROCESS

A. I. Semyonov*, A. Yu. Kulakov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
alekssemyenov1996@gmail.com

Abstract. Harvesting of grass forage is considered as a complex technical and technological process. The final product, in this case a silage billet, can be obtained using different variants of feed production technologies. An approach to choosing the most acceptable variant of technologies and plans for the production of grass feed based on logical-dynamic and fuzzy-probability models is presented. The developed set of models and algorithms makes it possible to describe and investigate the existing interconnected multi-stage processes of grass feed production from a system-cybernetic standpoint when transferring a management object (an agricultural enterprise producing feed) from a given initial state to a given final state, depending on specific scenarios of changing external conditions. Factors related to agrobiological, temporal, climatic, economic and organizational constraints are considered as the main external conditions. To solve the problems, fuzzy-probability models for estimating the yield of forage lands and the quality of the grown fodder mass are proposed. When analyzing the effectiveness of feed production processes, an important issue is the multi-criteria assessment of quality, as well as the corresponding programs for proactive management of the silage har-

vesting process, taking into account the following indicators: the timing of operations under various conditions, the degree of uniformity of resource use and the total time of harvesting grass feed. An original mathematical analysis of the processes under consideration and algorithms for solving problems of forecasting and planning forage harvesting are proposed.

Keywords: model-algorithmic support, logical-dynamic models, fuzzy-possibility approach, expert knowledge, proactive control, proactive planning, fodder production

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the budget theme FFZF-2022-0004.

For citation: Semyonov A. I., Kulakov A. Yu. Model and algorithmic support for forecasting and planning the forage harvesting process. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 818—825 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.

По уровню использования информационных технологий в сельском хозяйстве Россия занимает 45-е место в мире, что связано с высокой стоимостью оборудования и отсутствием научных основ [1].

Под информатизацией и интеллектуализацией, в частности процессов сельскохозяйственных производств, понимается разработка и внедрение специального программно-математического и информационного обеспечения проактивного и управления сложными объектами и процессами, в качестве которых в настоящей статье рассматривается производство кормов из трав.

На сельскохозяйственных предприятиях Северо-Западного региона РФ доля затрат кормов в себестоимости молока и мяса составляет до 70 % [2]. Поэтому исследования по повышению эффективности сельскохозяйственных производств кормов из трав и снижению их себестоимости являются весьма актуальными. Предпосылками к этому служит существующая в настоящее время возможность повышения эффективности производства кормов, потенциал которого составляет 30—40 %. Данный потенциал может быть реализован за счет ликвидации нарушений в сроках уборки трав, а также совершенствования технологий изготовления и хранения кормов [3].

Процесс производства кормов из трав (на примере заготовки силоса) состоит из следующих этапов: основная обработка почвы, внесение органических и минеральных удобрений, подготовка семян к посеву, предпосевная обработка почвы, посев семян трав, уход за растениями и уборка трав. Выполнение каждого этапа зависит от целого ряда условий, к числу которых относятся временные, климатические, технические, агробиологические и финансовые ограничения.

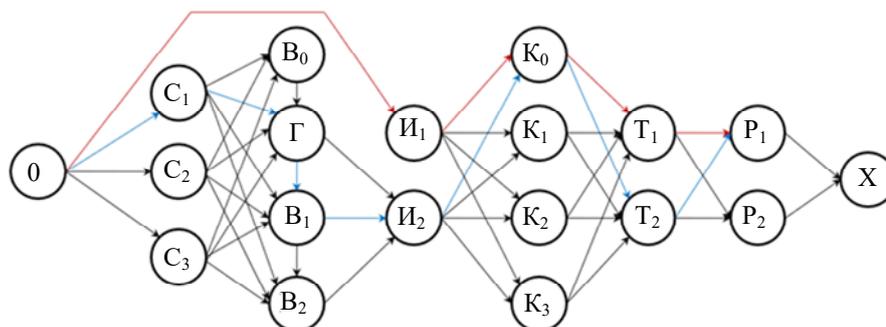
Следует отметить достаточно значительное внимание исследователей к математическому моделированию в сельском хозяйстве, однако, в сущности, большинство работ нацелено на изолированное решение локальных задач частных производств сельскохозяйственной продукции [2—6]. Это в итоге приводит к использованию эвристических методов и алгоритмов, которые не могут обеспечить требуемый уровень качества управления кормопроизводством. Проведенный анализ показывает [7—13], что задача разработки комплексных прогнозов и планов производства рассматриваемой сельскохозяйственной продукции с формальной точки зрения может быть сведена к решению взаимосвязанных задач динамического многокритериального структурно-функционального синтеза технологий производства кормов из трав, а также к задачам оптимизации программ управления материальными, энергетическими и информационными потоками и ресурсами для реализации выбранных технологий.

Для решения перечисленных задач необходимо, в первую очередь, разработать комплекс логико-динамических моделей программного управления разномасштабными взаимосвязанными операциями и гетерогенными ресурсами, используемыми при производстве кормов из трав, на основе функционально-стоимостного и сервис-ориентированного подходов. Данные модели позволят с системно-кибернетических позиций описать и исследовать

взаимосвязанные многоэтапные процессы производства кормов из трав с учетом конкретных сценариев изменения внешних условий.

Цель настоящей статьи — постановка и формальное описание задачи планирования процессов использования материальных ресурсов и выполнения соответствующих технологических операций на этапе уборки трав для заготовки силоса на основе разработанных логико-динамических и нечетко-возможностных моделей.

Этап уборки трав на силос состоит из четко регламентированных по времени процессов, включающих такие операции, как скашивание, ворошение, сгребание, прессование, внесение консерванта, транспортировка и хранение [14]. В зависимости от климатических, агробиологических, пространственно-временных, технико-технологических, экономических и организационных ограничений заготовка силоса может быть осуществлена с использованием различных технологических операций. Варианты технологий уборки трав на силос представлены на рисунке, где приняты следующие обозначения: 0 — травостой; C_1 — скашивание, C_2 — скашивание с плющением стеблей, C_3 — скашивание с перебиванием стеблей; B_0 — ворошение в прокосе, Γ — сгребание в валки, B_1 — ворошение валка, B_2 — ворошение валка вторичное; I_1 — скашивание с измельчением, I_2 — подбор с измельчением; K_0 — этап без внесения консервантов, K_1 — внесение химических консервантов, K_2 — внесение биологических консервантов (заквасок), K_3 — введение электрохимического активированного раствора; T_1 — транспортировка тракторами, T_2 — транспортировка автомобилями; P_1 — закладка на хранение в траншею, P_2 — закладка на хранение в башни; X — силос (корм из трав).



При формальном описании системы кормопроизводства следует понимать, что рассматриваемая система характеризуется нелинейностью, нестационарностью происходящих в ней процессов, большой размерностью, неопределенностью, а также требует использования многокритериального подхода при выборе наиболее предпочтительных технологий кормопроизводства [4, 6].

Использование гетерогенных ресурсов на различных этапах кормопроизводства, увлажненность травостоя, почвенно-климатические условия и квалификация персонала — все эти условия и ограничения в итоге оказывают влияние на выбор технологии и плана заготовки кормов и соответствующих моделей, их описывающих. Вместе с тем достаточно ясно, что на различных этапах жизненного цикла производства рассматриваемого вида сельскохозяйственной продукции важно уметь упреждающе оценивать ее планируемую урожайность в целях реализации максимально возможного потенциала имеющихся либо синтезируемых технологий заготовки кормов при соблюдении всех агробиологических требований [4—6].

В настоящей работе предлагается использовать новый комплекс логико-динамических моделей (ЛДМ) для решения как задач прогнозирования и оценивания урожайности кормовых угодий, так и задач выбора предпочтительного варианта технологии и плана заготовки силоса [9—11]. В этом случае формальная постановка перечисленных задач должна включать в себя следующие элементы.

Пусть $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ — множество типов полей, подлежащих уборке; $K_k^i = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ — множество операций по уборке силоса на выбранном поле, к операциям K_k^i относятся операции скашивания, ворошения, сгребания, внесения консервирующих добавок, подбор трав, выбор средств транспортировки и выбор места хранения; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ — множество ресурсов для уборки силоса, имеющихся в хозяйстве. В этом случае можно ввести следующие ЛДМ:

$$\begin{aligned}
 M^{(0)} = & \left\{ u(t) \mid \dot{x}_{ik} = \sum_{r=1}^n e_{ik}(t) u_{ikr}; \quad \dot{x}_r = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l u_{ikr}; \right. \\
 & x_{ik}(t_0) = 0; \quad x_{ikr}(t_f) = a_{kr}; \\
 & \sum_{r=1}^n u_{ikr} \leq P_k \forall i, \forall k; \quad \sum_{k=1}^l u_{ikr} \leq P_r \forall i, \forall r; \\
 & u_{ikr}(t) \in \{0, 1\}; \\
 & \left. \sum_{r=1}^n u_{ikr} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} (a_{i\tilde{\alpha}} - x_{i\tilde{\alpha}}(t)) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} (a_{i\tilde{\beta}} - x_{i\tilde{\beta}}(t)) \right] = 0, \right. \\
 & \left. i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, l; r = 1, \dots, n \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где x_{ik} — переменная, характеризующая состояние выполнения операции K_k^i в ходе реализации процесса производства силоса; $e_{ik}(t)$ — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с возможностью использования ресурса R для выполнения операции K_k^i : $e_{ik}(t) = 1$, если соответствующие ограничения выполняются, и $e_{ik}(t) = 0$ в противоположном случае; $u_{ikr} = 1$, если операции K_k^i должны выполняться с помощью одного из ресурсов, входящих в множество R , и $u_{ikr} = 0$ в противоположном случае; x_r — переменная, характеризующая время задействования ресурса R ; $a_{i\tilde{\alpha}}, a_{i\tilde{\beta}}$ — заданные объемы операций, которые входят в варианты реализации технологий производства силоса; $\Gamma_{ik1}, \Gamma_{ik2}$ — множество номеров операций, проводимых в рамках операции K_k^i , а также непосредственно предшествующих и технологически связанных с ней с помощью логических операций „И“, „ИЛИ“; P_k, P_r — заданные константы, характеризующие технико-технологические ограничения, связанные с возможностью использования тех или иных материальных и энергетических ресурсов при выполнении различных операций по производству силоса.

Качество выполнения программ проактивного управления процессом заготовки силоса можно оценить с помощью следующих показателей [10]:

$$J_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \sum_{r=1}^n \int_{t_0}^{t_f} a_{ikr}(\tau) u_{ikr}(\tau); \tag{2}$$

$$J_2 = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^n \left[t_f - x_r(t_f) \right]^2; \tag{3}$$

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_f} d\tau; \quad (4)$$

$$J_{об} = \lambda_1 J_1 + \lambda_2 J_2 + \lambda_3 J_3, \quad (5)$$

где J_1 — функционал, с помощью которого оценивается „своевременность“ выполнения операций при различных условиях; a_{ikr} — заданная гладкая функция времени, которая применяется для „штрафа“ за нарушение директивных сроков выполнения соответствующей операции, входящей в граф, представленный на рисунке; J_2 — функционал, введенный для оценивания степени равномерности использования ресурсов R , имеющихся в хозяйстве; J_3 — функционал, введенный для оценивания общего времени заготовки кормов из трав; $J_{об}$ — обобщенный функционал, введенный для оценивания общего качества выполнения планируемых работ (операций).

Отметим, что нарушение заранее определенных сроков способно привести к потерям более 30 % качества кормов [3].

Приведем обобщенный алгоритм планирования производства кормов из трав (в том числе, и для этапа уборки трав для заготовки силоса).

Шаг 1.1. Разработка пессимистических, стандартных и оптимистических сценариев функционирования сельскохозяйственного предприятия (СхП) в различных условиях:

— задание пространственно-временных и организационных ограничений (задаются различные сценарии изменения матричной функции $e_{ik}(t)$);

— моделирование процессов кормопроизводства, а также расчет различных технико-технологических характеристик соответствующего СхП (например, путем варьирования констант P_k, P_r).

Шаг 1.2. Многоэтапное решение задач динамического многокритериального синтеза программ перевода рассматриваемого СхП из заданного начального состояния в заданное конечное при различных исходных данных (реализация технологии проактивного планирования). Подробно с особенностями реализации данных этапов можно ознакомиться в работах [10—13].

Шаг 1.3. Фаззификация полученных значений показателей качества на основе чисел L-R типа. Крайние значения нечетко-возможностной шкалы задаются с учетом полученных ранее значений $J_{об}$ для оптимистических и пессимистических сценариев [14—16].

В результате проведения численных экспериментов синтезируются не только наиболее приемлемые программы технологии, но и планы проведения работ по заготовке кормов из трав (в том числе, силоса, см. рисунок).

В условиях неопределенности (прежде всего, связанных с погодно-климатическими факторами), присущей сельскохозяйственной деятельности, предлагается при построении модели прогнозирования и оценивания урожайности кормов опираться на логико-динамический и нечетко-возможностный подходы, а также алгоритм, базирующийся на синтезе элементов теории управления, теории нечетких множеств, теории планирования экспериментов [15, 16]. В рамках данных подходов и теорий следует учитывать как знания и опыт высококвалифицированных специалистов-экспертов на этапе оценивания потенциальной урожайности, так и возможные последствия, вызванные воздействием различных факторов неопределенности на результаты кормопроизводства.

При синтезе нечетко-возможностной модели прогнозирования и оценивания урожайности кормов требуется в первую очередь учитывать факторы, системно влияющие на эффективность кормопроизводства. В этом случае факторное пространство разрабатываемой модели будет

включать количественные и неколичественные (качественные) четкие и нечеткие лингвистические переменные, из которых формируется полином следующего вида:

$$Y = 10,56 + 2,35z_1 + 4,39z_2 + 3,18z_3 + 1,28z_4 + 1,35J_{06} - 0,43z_1z_3 + 0,79z_2z_3 - 0,41z_2J_{06} + 0,92z_3J_{06} - 0,37z_1z_3z_4 + 0,93z_1z_3J_{06}, \quad (6)$$

где z_1 — параметр (фактор), характеризующий агробиопотенциал угодий, z_2 — погодноклиматические условия, z_3 — технологический ресурс (качество кормов из трав), z_4 — энергетический ресурс; значение J_{06} — обобщенного показателя качества выполнения работ — может быть получено с использованием логико-динамической модели вида $M^{(0)}$ (см. формулу (1)).

Перечисленные выше переменные факторного пространства представляют собой, по сути, агрегированные показатели. Так, наиболее значимый управляемый фактор z_3 соответствует используемому технологическому ресурсу, который, в свою очередь, зависит от шести факторов (переменных), определяющих особенности их реализации. К ним относятся переменные, характеризующие фазу вегетации (k_{31}), вид скашивания (k_{32}), количество и интенсивность ворошений (k_{33}), внесение консерванта (k_{34}), способ досушивания (k_{35}) и способ хранения (k_{36}). Значения $k_{31, \dots, 36}$ могут быть получены на этапе решения задачи программного управления (см. шаг 1.1 алгоритма), т.е. при синтезе оптимальных планов и комбинированных технологий производства кормов из трав.

Модель технологического ресурса z_3 , определяющего качество кормов, имеет следующий вид:

$$z_3 = 8,859 + 0,703k_{31} + 0,109k_{32} + 0,172k_{33} + 0,359k_{34} + 0,140k_{35} + 0,359k_{36} - 0,109k_{34}k_{35} - 0,131k_{31}k_{34}k_{36} - 0,109k_{32}k_{33}k_{35}. \quad (7)$$

В моделях (6) и (7) приведены только значимые коэффициенты, а переменные представлены в безразмерном стандартизованном масштабе, что дает возможность проведения их сравнительного анализа.

Анализируя модель (7), можно отметить ее нелинейность и зависимость от трех технологических факторов (способ хранения, фаза вегетации и внесение консервантов), которые оказывают наибольшее влияние на значение общего параметра, характеризующего состояние технологического ресурса.

С учетом вышеизложенного обобщенный алгоритм прогнозирования и оценивания урожайности кормовых угодий состоит из следующих этапов.

Шаг 2.1. Разработка пессимистических и оптимистических сценариев функционирования СхП, занимающегося заготовкой кормов из трав.

Шаг 2.2. Решение комплекса задач динамического многокритериального синтеза технологий и программ заготовки кормов из трав для пессимистических, стандартных и оптимистических сценариев развития внешней обстановки.

Шаг 2.3. Фаззификация значений обобщенных показателей качества, полученных для перечисленных условий.

Шаг 2.4. Использование нечетко-возможностных моделей для оценивания и прогнозирования урожайности кормовых угодий для выбранных сценариев изменения внешних условий.

Итак, заготовка кормов из трав в данном исследовании рассматривается как сложный технико-технологический процесс. Разработаны комплексы моделей и алгоритмов программного управления, позволяющие с системно-кибернетических позиций исследовать взаимосвязанные многоэтапные процессы производства кормов из трав и оценивать урожайность угодий. Комбинированное использование предложенных логико-динамических и нечетко-возможностных математических моделей может послужить основой для создания методики комплексного оценивания урожайности кормов, а также синтеза программ управления процессом их заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вартанова М. Л., Дробот Е. В.* Перспективы цифровизации сельского хозяйства как приоритетного направления импортозамещения // *Экономические отношения*. 2018. Т. 8, № 1.
2. *Валге А. М., Еремин М. А., Сухопаров А. И.* Методика моделирования технологического процесса заготовки кормов из трав // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства: Теоретический и научно-практический журнал*. 2018. № 4, вып. 97. С. 115—126.
3. *Тихомиров И. А., Скоркин В. К., Аксенова В. П., Андрюхина О. Л.* Повышение эффективности производства продукции молочного и мясного скотоводства на основе совершенствования технологии кормления // *Вестн. ВНИИМЖ*. 2017. №1(25). С. 70—77.
4. *Popov V. D., Spesivtsev A. V., Sukhoparov A. I., Spesivtsev V. A.* Convolution of multi-criteria expert estimates in a context of uncertainty // *Proc. of the 20th IEEE Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements*. 2017. P. 203—206.
5. *Popov V., Spesivtsev A., Sukhoparov A., Spesivtsev V.* Fuzzy-multiple models of formalization of soil resources in formation of system for controlling processes of feed production from grasses // *Proc. 19th Intern. Sci. Conf. „Engineering for Rural Development“*, Jelgava, Latvia, May 20—22, 2020. P. 773—777.
6. *Башилов А. М., Королев В. А., Арженовский А. Г., Глобин А. Н., Глечикова Н. А.* Проактивное моделирование динамической сложности агротехноценозов // *Вестн. аграрной науки Дона*. 2020. № 3 (51). С. 45—53.
7. *Marino R., Tomei P.* Robust adaptive state-feedback tracking for nonlinear systems // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1998. Vol. 43. P. 84—89. DOI:10.1109/9.654892.
8. *Охмилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // *Изв. ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 1 (162). С. 162—174.
9. *Sokolov B. V., Pavlov A. N., Potriasaev S. A., Zakharov V. V.* Methodology and Technologies of the Complex Objects Proactive Intellectual Situational Management and Control in Emergencies // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. 1156 AISC. P. 234—243.
10. *Захаров В. В.* Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 11. С. 975—984.
11. *Sokolov B. V., Potriasaev S. A., Yusupov R. M.* Proactive Management of Information Processes in the Industrial Internet // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021. N 1864 (1). P. 012—007.
12. *Gnidenko A.S., Vladislav S.A., Sokolov B.V., Potriasaev S.A.* Methodology and integrated modeling technologies for synthesis of cyber-physical production systems modernization programs and plans // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. P. 642—647.
13. *Sokolov B. V., Verzilin D. N., Zaychik E. M.* Models and an Algorithm for Multi-Criteria Synthesis of Control Technologies Managing Information Systems of Virtual Enterprises // *Proc. 22nd European Conf. on Modelling and Simulation*. 2008. DOI:10.7148/2008-0048.
14. *Спесивцев А. В., Сухопаров А. И., Спесивцев В. А., Семенов А. И.* Многофакторная свертка экспертной информации при оценивании сельскохозяйственных технологий на основе явных и неявных экспертных знаний // *Мягкие измерения и вычисления*. 2021. № 7. С. 23—32.
15. *Drozdo A. V., Spesivtsev A. V.* Formalization of expert information in the logical-linguistic description of complex systems // *Journal of Computer and Systems Sciences Intern.* 1995. N 33(4). P. 76—83.
16. *Спесивцев А. В.* Мягкие измерения и мягкие вычисления при моделировании состояния сложных объектов на базе экспертных знаний // *Управление в условиях неопределенности: Монография / Под общ. ред. С. В. Прокопчиной*. СПб: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2017. С. 217—263.

Сведения об авторах**Александр Игоревич Семенов**

— аспирант; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: alekssemyenov1996@gmail.com

Александр Юрьевич Кулаков

— канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ст. научный сотрудник; E-mail: russ69@bk.ru

REFERENCES

1. Vartanova M.L., Drobot E.V. *Creative economy. Economic relations*, 2018, no. 1(8). (in Russ.)
2. Valge A.M., Eremin M.A., Sukhoparov A.I. *Technologies and technical means of mechanized production of crop products*, 2018, no. 97, pp. 115–126. (in Russ.)
3. Tikhomirov I.A., Skorkin V.K., Aksenova V.P., Andryukhina O.L. *Vestnik vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*, 2017, no. 1(25), pp. 70–77. (in Russ.)
4. Popov V.D., Spesivtsev A.V., Sukhoparov A.I., Spesivtsev V.A. *Proceedings of 2017 20th IEEE Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*, 2017, pp. 203–206.
5. Popov V., Spesivtsev A., Sukhoparov A., Spesivtsev V. *Proceedings of the 19th Intern. Scientific Conf. Engineering for Rural Development*, Jelgava, May 20–22, 2020, vol. 19, pp. 773–777.
6. Bashilov A.M., Korolev V.A., Arzhenovskiy A.G., Globin A.N., Glechikova N.A. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2020, no. 3(51), pp. 45–53. (in Russ.)
7. Marino R., Tomei P. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 43, pp. 84–89, DOI:10.1109/9.654892.
8. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015, no. 1(162), pp. 162–174.
9. Sokolov B.V., Pavlov A.N., Potriasaev S.A., Zakharov V.V. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 1156 AISC, pp. 234–243.
10. Zakharov V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 11(63), pp. 975–984. (in Russ.)
11. Sokolov B.V., Potriasaev S.A., Yusupov R.M. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1(1864), pp. 012–007.
12. Gnidenko A.S., Vladislav S.A., Sokolov B.V., Potriasaev S.A. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, pp. 642–647.
13. Sokolov B.V., Verziin D.N., Zaychik E.M. *Proceedings 22nd European Conf. on Modelling and Simulation*, 2008, DOI:10.7148/2008-0048.
14. Spesivtsev A.V., Sukhoparov A.I., Spesivtsev V.A., Semenov A.I. *Soft Measurements and Computing*, 2021, no. 7, pp. 23–32 (in Russ.)
15. Drozdov A.V., Spesivtsev A.V. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1995, no. 4(33), pp. 76–83.
16. Spesivtsev A.V. *Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti* (Management under Uncertainty), St. Petersburg, 2017, pp. 217–263. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander I. Semyonov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling;
E-mail: alekssemyenov1996@gmail.com
- Alexander Yu. Kulakov** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Researcher;
E-mail: russ69@bk.ru

Received 18.07.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.