

веществ в почве. – М.: 2009. – URL: [http://snipov.net/c\\_4655\\_snip\\_55917.html](http://snipov.net/c_4655_snip_55917.html).

13. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. – М.: 2003. – URL: [http://snipov.net/c\\_4655\\_snip\\_103890.html](http://snipov.net/c_4655_snip_103890.html).

14. МУ 2.1.7.730-99. Методические указания. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. – М.: 2003. – URL: [http://snipov.net/c\\_4655\\_snip\\_99446.html](http://snipov.net/c_4655_snip_99446.html).

15. О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами: письмо Минприроды РФ от 27 декабря 1993 г. – URL: [http://snipov.net/c\\_4654\\_snip\\_102964.html](http://snipov.net/c_4654_snip_102964.html).

#### Критерии авторства

Карпенко Н.П., Ширяева М.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Карпенко Н.П., Ширяева М.А. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 14.12.2020 г.

Одобрена после рецензирования 11.01.2021 г.

Принята к публикации 14.01.2021 г.

13. SANPiN 2.1.7.1287-03. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k kachestvu pochvy. – М.: 2003. [http://snipov.net/c\\_4655\\_snip\\_103890.html](http://snipov.net/c_4655_snip_103890.html).

14. МУ 2.1.7.730-99. Metodicheskie ukazaniya. Pochva, ochistka naselennyh mest, bytovye promyshlennye othody, sanitarnaya ohrana pochvy. – М.: 2003. [http://snipov.net/c\\_4655\\_snip\\_99446.html](http://snipov.net/c_4655_snip_99446.html).

15. О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. – Pisjmo Minprirody RF № 04-25/61-5678 ot 27.12.1993 г. [http://snipov.net/c\\_4654\\_snip\\_102964.html](http://snipov.net/c_4654_snip_102964.html).

#### Criteria of Authorship

Karpenko N.P., Shiryayeva M.A. performed theoretical studies, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Karpenko N.P., Shiryayeva M.A. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 14.12.2020

Approved after reviewing 11.01.2021

Accepted for publication 14.01.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504:631.171:004.94

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-14-22

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

**КАМЫШОВА ГАЛИНА НИКОЛАЕВНА**, канд. физико-математических наук, доцент  
[gkamichova@mail.ru](mailto:gkamichova@mail.ru)

Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова; 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, Россия

*Цель исследования заключается в разработке новых научных подходов к повышению эффективности дождевальной техники. Современные цифровые технологии позволяют осуществлять сбор данных, их анализ и оперативное управление техникой и технологическими процессами зачастую в режиме реального времени. Все это позволяет, с одной стороны, применять новые подходы к моделированию технических систем и процессов (так называемые "data-driven модели – модели на основе данных"), с другой стороны, требует разработки принципиально новых моделей, в основу которых будут положены методы искусственного интеллекта – такие, как искусственные нейронные сети, алгоритмы машинного обучения, нечеткая логика и многое другое. Проведенный анализ треков и фактических скоростей движения дождевальной машины в режиме реального времени показал их значительные отклонения в диапазоне от заданной скорости движения, что ведет к ухудшению параметров орошения. Нами разработана модель управления дождевальными машинами, основанная на подходах*

прогнозирующего управления и теории искусственных нейронных сетей. Применение модели позволяет реализовать алгоритмы регулирования с прогнозом реакции дождевальнoй машины на управляющий сигнал. Предложены схема алгоритма построения прогнозирующего управления, структура нейрорегулятора и инструменты его синтеза с использованием современного программного обеспечения. Универсальность модели позволяет использовать ее как для повышения эффективности управления существующей техникой, так и при разработке новых дождевальных машин с интегрированными интеллектуальными системами управления.

**Ключевые слова:** моделирование, искусственные нейронные сети, прогнозирующее управление, нейроконтроллер, дождевальная машина

**Формат цитирования:** Камышова Г.Н. Моделирование нейропрогнозирующего управления дождевальными машинами // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 14-22. DOI: 10.26897/1997-6011/2021-1-14-22

© Камышова Г.Н., 2021

Original article

## MODELING OF NEURAL PREDICTIVE CONTROL OF IRRIGATION MACHINES

**KAMYSHOVA GALINA NIKOLAEVNA**, candidate of physical-mathematical sciences, associate professor  
gkamichova@mail.ru

Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov; 410012, Saratov, Teatralnaia pl.,1. Russia

*The purpose of the study is to develop new scientific approaches to improve the efficiency of irrigation machines. Modern digital technologies allow the collection of data, their analysis and operational management of equipment and technological processes, often in real time. All this allows, on the one hand, applying new approaches to modeling technical systems and processes (the so-called “data-driven models”), on the other hand, it requires the development of fundamentally new models, which will be based on the methods of artificial intelligence (artificial neural networks, fuzzy logic, machine learning algorithms and etc.). The analysis of the tracks and the actual speeds of the irrigation machines in real time showed their significant deviations in the range from the specified speed, which leads to a deterioration in the irrigation parameters. We have developed an irrigation machine’s control model based on predictive control approaches and the theory of artificial neural networks. Application of the model makes it possible to implement control algorithms with predicting the response of the irrigation machine to the control signal. A diagram of an algorithm for constructing predictive control, a structure of a neuroregulator and tools for its synthesis using modern software are proposed. The versatility of the model makes it possible to use it both to improve the efficiency of management of existing irrigation machines and to develop new ones with integrated intelligent control systems.*

**Keywords:** modelling, artificial neural networks, predictive control, neuro controller, irrigation machines

**Format of citation:** Kamyshova G.N. Modeling of neural predictive control of irrigation machines // Prirodoobustrojstvo. – 2021. – № 1. – С. 14-22. DOI: 10.26897/1997-6011/2021-1-14-22.

**Введение.** Сельскохозяйственное производство за последние полвека в мировом масштабе выросло в 2,5-3 раза, а рост посевных площадей составил около 12%. Увеличение производства может происходить на существующих обрабатываемых землях во многом за счет его интенсификации.

При этом возрастает роль орошения, так как более 40% роста мирового производства продовольствия и 60% производства зерна приходится именно на орошаемые земли. Развитие орошаемого земледелия в свою очередь невозможно без надежного технического обеспечения.

Анализ рынка оросительной техники показывает, что доля импортной дождевальной техники растет, так как последние годы широкомасштабное серийное производство российской дождевальной техники не было налажено – в основном по причине отсутствия качественной конструкторской и технологической документации. Ввод в эксплуатацию площадей орошаемых земель осуществлялся в основном за счет поставок импортной техники орошения, составляющей до 90% в объеме поставок. Дождевальные машины зарубежного производства, например, Bauer, Valley, Zimmatic, Rainke, T-L и др., используются в основном крупными агрофирмами и товаропроизводителями несмотря на высокую автоматизацию и надежность полива. Это обусловлено их значительной стоимостью, сложностью конструкции и специальными требованиями при эксплуатации [1].

Развитие цифровых технологий оказывает влияние и на тенденции развития дождевальной техники. Одними из ключевых направлений являются интеллектуализация, автоматизация и роботизация. Можно привести примеры зарубежной техники: «Zimmatic», «Valley», «Reinke», – которые уже активно идут по этому пути. Анализ научных исследований в области совершенствования дождевальной техники в России показывает их направленность прежде всего на совершенствование конструктивных параметров [2-3]. И только в течение последних нескольких лет прилагаются усилия по внедрению элементов автоматизации и роботизации [4] в оросительную технику.

Современные достижения, способствующие росту возможностей сбора и анализа данных, способны значительно повысить эффективность инженерных решений. Все более широкое применение для управления техническими объектами находят системы, в основу которых положены такие методы искусственного интеллекта, как искусственные нейронные сети, алгоритмы машинного обучения и многое другое. Нейронные сети и создаваемые на их основе системы управления (так называемое нейроуправление) активно используются в различных технических областях – таких, как, например, системы управления движением роботов, летательных аппаратов, морских судов и др. [5-6]. В работах [7-8] представлены подходы к совершенствованию дождевальной техники на основе методов нейроуправления. Однако исследования в этой области

необходимо интенсифицировать в направлении создания различных типов нейромоделей и инструментов повышения эффективности работы дождевальных машин.

Представленное исследование сконцентрировано на разработке модели нейропрогнозирующего управления для повышения эффективности дождевальной техники.

Цель исследования заключается в разработке новых научных подходов к повышению эффективности дождевальной техники.

#### **Материал и методы исследований.**

Разработка модели нейропрогнозирующего управления дождевальных машин базируется на использовании современных методов искусственных нейронных сетей, моделей нейросетевого управления, технологий и технических средств сбора и анализа данных, а также на применении современных программных продуктов и языков программирования – таких, как Matlab, Python и т.п. Для сбора данных были проведены экспериментальные исследования в Энгельсском районе Саратовской области на базе УНПО Поволжье Саратовского ГАУ. Объектом моделирования выступила дождевальная машина кругового действия «Каскад». Дождевальная машина оборудована GPS-трекерами, и данные в режиме реального времени отражаются в цифровой платформе для управления агробизнесом «Агросигнал».

Ключевой характеристикой в орошении выступает поливная норма. С одной стороны, исходя из гидравлической модели дождевальной машины поливная норма зависит от скорости. С другой стороны, эта зависимость сохраняется и является существенной при эксплуатации дождевальных машин [9], причем она не линейна и обусловлена множеством стохастических эксплуатационных факторов – таких, как агрофон, уклон поля, тип почвы, влажность почвогрунта и др.

Анализ треков движения и фактических скоростей движения дождевальной машины в режиме реального времени (рис. 1) как при прохождении полного круга полива, так и при анализе конкретных секторов в течение всего сезона работы, показал их значительные отклонения в диапазоне 8-13% от заданной скорости движения, что ведет к отклонениям норм полива на 7,4-11% от заданных.

В связи с тем, что дождевальная машина – сложный динамический объект, а процесс

орошения – сложный динамический процесс с нелинейными связями, мы вместо классических методов математического моделирования, использующего аналитическое описание с помощью дифференциальных уравнений

поведения объекта, будем использовать так называемый «data – driven подход» (модели на основе данных). Этот подход позволяет использовать методы искусственного интеллекта, а именно нейросетевые методы и модели.

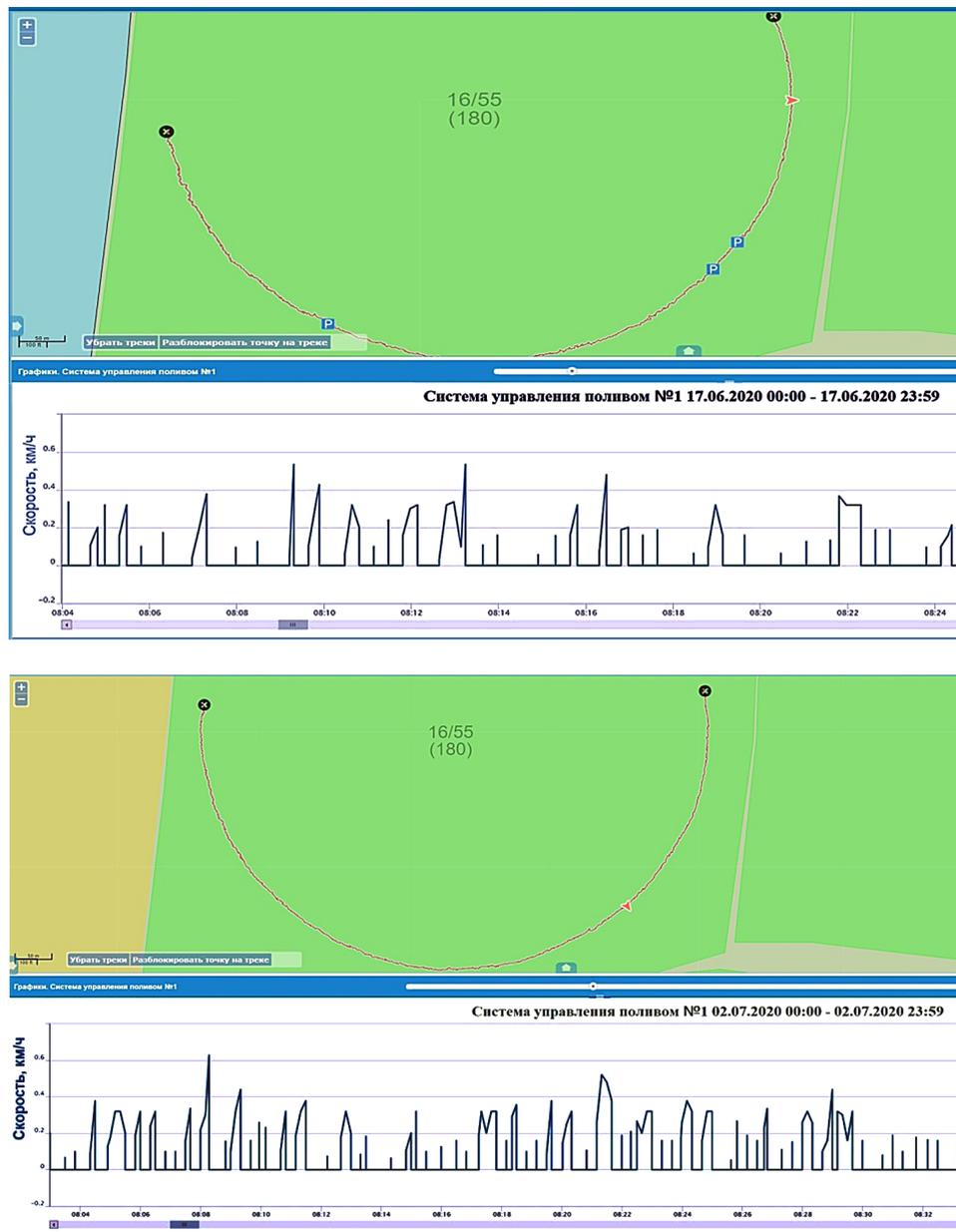


Рис. 1. Треки и графики фактических скоростей движения дождевальная машины  
Fig. 1. Tracks and graphs of the actual speeds of the irrigation machine movement

Моделирование, в основу которого положены искусственные нейронные сети, рассматривает поведение объекта в качестве «черного ящика», у которого известны входы и выходы, а задача сети заключается в «наилучшем подражании» его поведению.

Множество связанных по входам и выходам нейронов составляет нейронную сеть, которая имеет математическую формализацию.

Уравнение сумматора и уравнение активационного блока представляют собой формализацию искусственного нейрона:

$$s_k = \sum_{j=1}^n w_{j,k} \cdot x_j + b_k, \quad y_k = f(s_k).$$

Здесь  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные сигналы;  $y_k$  – выходной сигнал;  $w_{1,k}, w_{2,k}, \dots, w_{n,k}$  – синоптические веса;  $b_k$  – уровень опорного сигнала;  $s_k$  – сигнал на выходе линейного сумматора;  $f(s_k)$  – функция преобразования активационного блока.

При разработке системы управления возможно использование искусственных нейронных сетей. Выбор конкретных методов и моделей из огромного числа нейросетевых моделей и структур существенно зависит от решаемой задачи. Однако общим в проектировании модели является наличие следующих этапов:

1. Идентификация управляемого процесса – разработка нейромодели управляемого процесса.

2. Синтез закона управления – построение регулятора на основе нейромодели.

Для идентификации применяется двухслойная искусственная нейронная сеть с линиями задержки. Информация о поведении дождевальной машины используется для обучения модели и настройки весов искусственной нейронной сети на основании одного из алгоритмов (например, [10]).

Более существенным является второй этап, на котором и сконцентрировано наше исследование.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Детальный анализ фактических скоростей движения дождевальной машины (рис. 2) в привязке к геолокации на протяжении всего сезона работы показывает наличие определенной зависимости. Однако эту зависимость нельзя выразить простым аналитическим выражением вида  $V(t) = F(X(t), Y(t), Z(t), \dots)$ , где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и т.д. – некоторые факторы, влияющие на скорость  $V$ . Мы должны либо упростить модель и отбросить часть параметров, либо линеаризовать зависимости. Все вышесказанное приведет к значительной потере точности. Помимо этого, модель будет носить локальный характер и ее обобщение потребует значительных ресурсов.

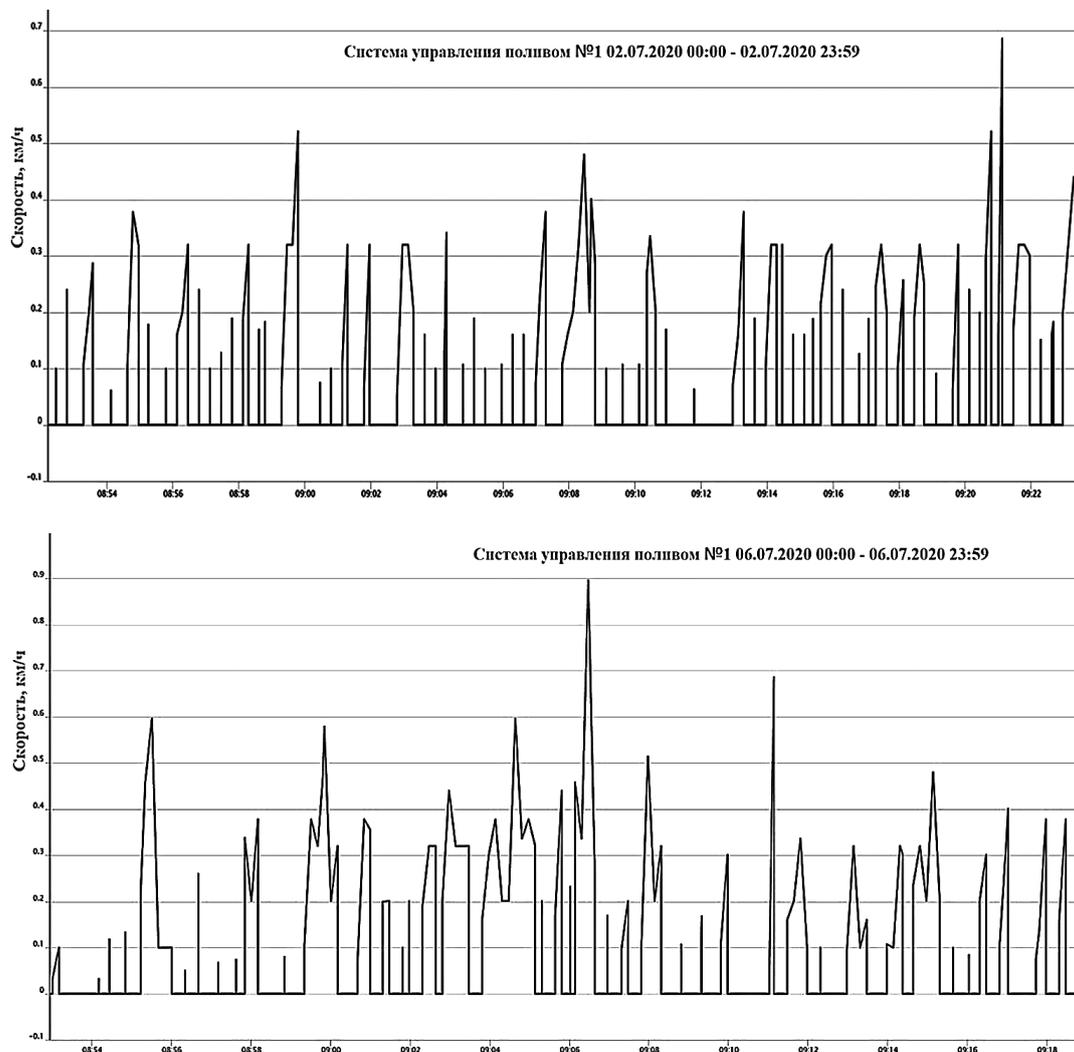


Рис. 2. Графики фактических скоростей движения дождевальной машины по датам орошения

Fig. 2. Tracks of the actual speeds of the irrigation machine movement according to the irrigation dates

Таким образом, проблема заключается в построении предсказательной модели эксплуатационных характеристик дождевальной машины (в нашем случае – скорости) и управлении орошением на основе этой модели. Нами предлагается в основу модели положить нейросетевые модели скорости движения дождевальной машины при орошении и построенные на их основе модели управления дождевальной машиной с предсказанием.

Динамику поведения дождевальной машины как объекта управления можно представить в дискретном виде:

$$\begin{cases} X(k+1) = F(X(k), U(k)) \\ V(k+1) = G(X(k)), \end{cases} \quad (1)$$

где  $X(k)$  – значение вектора состояния;  $U(k)$  – значение вектора входа (управления) на  $k$ -м шаге;  $V(k+1)$  – значение вектора выхода (скорости) на  $(k+1)$ -м шаге.

Концептуальная модель прогнозирующего управления состоит в определении последовательности управляющих воздействий (то есть управляемых изменений входных данных), чтобы прогнозируемая реакция перемещалась к заданной точке оптимальным образом [11]. Все расчеты основаны на текущих измерениях и прогнозах будущих значений выходных данных скоростей дождевальных машин. На определенном временном интервале в будущем нейросетевая модель управления скоростью предсказывает реакцию дождевальной машины. Фактический

выход  $v$ , прогнозируемый выход  $\hat{v}$  и управляющее воздействие  $u$  показаны на рисунке 3. В текущий момент, обозначенный  $k$ , моделью вычисляется набор из  $M$ -значений входных данных  $\{u(k+i-1), i=1, 2, \dots, M\}$ . Набор состоит из текущего входного управления  $u(k)$  и  $M-1$  будущих входов. Ввод остается постоянным после  $M$ -кратного перемещения регулятора. Входы рассчитываются так, что набор  $P$  предсказанных выходов скоростей  $\{\hat{v}(k+i), i=1, 2, \dots, P\}$  оптимальным образом достигает заданного значения. Управляющий сигнал вычисляется оптимизационным блоком с использованием предсказанных выходов исходя из условия оптимизации функционала качества управления [12]:

$$J = \sum_{i=n}^l (v_r(k+i) - v_f(k+i))^2 + \rho \sum_{i=1}^q (u(k+i-1) - u(k+i-2))^2 \xrightarrow{u} \min. \quad (2)$$

Здесь параметры  $n, l, q, \rho$  являются параметрами модели, определяющими пределы вычисления ошибки слежения и мощности управляющего сигнала. Переменная  $u$  описывает пробный управляющий сигнал, по которому происходит оптимизация;  $v_r$  и  $v_f$  – желаемая и реальная скорости в модели. Мощность управления задается  $\rho$ . Количество предсказаний  $P$  называется горизонтом предсказания, а количество управляющих движений  $M$  называется горизонтом управления. Предлагается выбирать горизонт предсказания в соответствии с количеством секторов, на которые разбивается общая площадь орошения. При этом, чем больше разбиение, тем точнее будет общий прогноз.

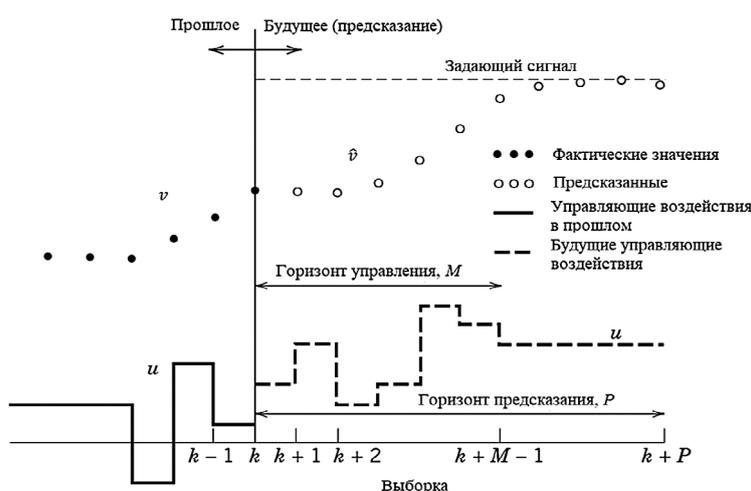


Рис. 3. Схема концептуальной модели прогнозирующего управления

Fig. 3. Diagram of concept model of predictive control

Предлагается следующий алгоритм построения прогнозирующего управления дождевальной машиной (рис. 4).

Для внедрения в общую систему управления дождевальной машиной прогнозирующего нейрорегулирования на основе

разработанной модели и алгоритма создается нейрорегулятор, который состоит из блока оптимизации, вычисляющего оптимальные по критерию качества  $J$  значения управления  $u^*$ , а сигнал, соответствующий значению  $u^*$ , управляет процессом.



Рис. 4. Схема алгоритма построения прогнозирующего управления

Fig. 4. Algorithm scheme of building a predictive control

Синтез регулятора можно реализовать, например, в пакете прикладных программ Neural Network Block set/Control Systems системы Matlab с помощью блока NN Predictive

#### Библиографический список

1. Ольгаренко Г.В. Реализация программы импортозамещения в области производства техники полива в Российской Федерации // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 44-47.

2. Технический уровень отечественного и зарубежного оборудования, применяемого в мелиорации: Информационный сб. ФГНУ ЦНТИ «Мелиоводинформ». – М.: ФГНУ ЦНТИ «Мелиоводинформ». – 2011. – 215 с.

Controller [13]. В работе [14] рассматривалось построение такого общего нейроконтроллера для скорости дождевальной машины.

Симуляция модели нейропрогнозирующего управления скоростью дождевальной машины показывает его хорошую сходимость, из чего следует, что предлагаемый регулятор на основе модели позволяет минимизировать отклонение заданных и фактических значений скоростей, возникающих под влиянием стохастических факторов до 1-4%, не требуя при этом дополнительных усилий по выявлению и корректировке работы техники.

#### Выводы

Разработана модель управления дождевальными машинами российского производства, основанная на подходах прогнозирующего управления и теории искусственных нейронных сетей. Применение модели позволяет реализовать алгоритмы регулирования с прогнозом реакции дождевальной машины на управляющий сигнал. Предложены схема алгоритма построения прогнозирующего управления, структура нейрорегулятора и инструменты его синтеза.

Модель, основанная на нейропрогнозирующем управлении, позволяет сократить разрыв между заданной и фактической скоростью до 1-4% в отличие от существующих 7-11%, что приводит к улучшению эффективности и качества орошения. Модель обладает универсальностью, что позволяет ее использовать для разных типов дождевальных машин и в различных условиях. Модель может быть использована для повышения эффективности управления как существующей техникой (внедрение в системы поддержки принятия решений), так и при разработке новых дождевальных машин (непосредственное внедрение в интеллектуальные системы управления дождевальных машин и роботизированных оросительных комплексов).

#### References

1. Olgarenko G.V. Realizatsiya programmy importozameshcheniya v oblasti proizvodstva tehniki poliva v Rossijskoj Federtasii // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo. – 2018. – № 1. – S. 44-47.

2. Tehniceskij uroven otechestvennogo i zarubezhnogo oborudovaniya, ghbvenyaemogo v melioratsii: Informatsionny sb. FGNU TSNTI "Meliovodinform". – M.: FGNU TSNTI "Meliovodinform". – 2011. – 215 s.

3. Результаты создания и исследования работы модифицированной дождевальной машины «Фрегат», работающей в режимах при низких напорах / Соловьев Д.А., Колганов Д.А., Загоруйко М.Г., и др. // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 2. – С. 67-69.

4. **Soloviev D., Zhuravleva L., Bakirov S.** Robotic Irrigative Complex with Intellectual Control System "CASCADE" // XVIII International Scientific and Practical Conference "Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy". – 2019. – P. 145-156.

5. **Белов М.П., Носиров И.С., Фыонг Ч.Х.** Исследование системы управления электроприводом подачи токарного станка с применением метода обобщенного нейрорегулирования с прогнозированием // СПБГЭТУ "ЛЭТИ". – 2017. – № 4. – С. 45-53.

6. **Cheon K., Kim J., Hamadache M., Lee D.** On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System // J. of Automation Control Engineering, Vol. 3, № 6, 2015. – P. 452-456.

7. Совершенствование дождевальной техники на основе методов нейрорегулирования / Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Макаров С.А. и др. // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 4(40). – С. 23-38.

8. Improving the efficiency of circular irrigation machines based on models of neural network irrigation control / Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N. i dr. // E3S Web of Conferences / INTERAGROMASH 2020. – 2020. – V. 175.

9. **Соловьев Д.А., Журавлева Л.А.** Влияние режима движения дождевальных машин на норму полива // Вестник АПК Верхневолжья. – 2018. – № 1 (41). – С. 38-43.

10. **Чернодуб А., Дзюба Д.** Обзор методов нейрорегулирования // Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79-94.

11. **Бураков М.В.** Нейронные сети и нейроконтроллеры: учебное пособие. – СПб.: ГУАП, 2013. – 284 с.

12. **Soloway D., Haley P.J.** Neural generalized predictive control // Proc. 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1996. P. 277-281.

13. **Дьяконов В.П.** MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

14. Моделирование нейрорегулирования скоростью дождевальных машин / Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Терехова Н.Н. и др. // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 7. – С. 81-84.

3. Rezultaty sozdaniya i issledovaniya raboty modifitsirovannoj dezhdevalnoj mashiny "Fregat", rabotayushchej v rezhimah pri nizkih naporah / Solovjev D.A., Kolganov D.A., Zagorujko M.G. i dr. // Agrarny nauchny zhurnal. – 2017. – № 2. – S. 67-69.

4. **Soloviev D., Zhuravleva L., Bakirov S.** Robotic Irrigative Complex with Intellectual Control System "CASCADE" // XVIII International Scientific and Practical Conference "Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy". – 2019. – P. 145-156.

5. **Belov M.P., Nosirov I.S., Fyong Ch.H.** Issledovanie sistemy upravleniya elektropriivodom podachi tokarnogo stanka s primeneniem meoda obobshchennogo nejroupravleniya s rognozirovaniem // SPBGETU "LETI". – 2017. – № 4. – S. 45-53.

6. **Cheon K., Kim J., Hamadache M., Lee D.** On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System // J. of Automation Control Engineering, Vol. 3, № 6, 2015. – P. 452-456.

7. Sovershenstvovanie dozhdevalnoj tehniki na osnove meodov nejroupravleniya / Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Makarov S.A. i dr. // Nauchny zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. – 2020. – № 4(40). – S. 23-38.

8. Improving the efficiency of circular irrigation machines based on models of neural network irrigation control / Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N. i dr. // E3S Web of Conferences / INTERAGROMASH 2020. – 2020. – V. 175.

9. **Soloviev D.A., Zhuravleva L.A.** Vliyanie rezhima dvizheniya dozhdevalnyh mashin na normu poliva // Vestnik APK Verhnevolyzha. – 2018. – № 1 (41). – S. 38-43.

10. **Chernodub A., Dzyuba D.** Obzor metodov nejroupravleniya // Problemy programmirvaniya. – 2011. – № 2. – S. 79-94.

11. **Burakov M.V.** Neironnye seti i nejrokontrollery: uchebnoe posobie. – SPb.: GUAP, 2013. – 284 s.

12. **Soloway D., Haley P.J.** Neural generalized predictive control // Proc. 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1996. P. 277-281.

13. **Djakonov V.P.** MATLAB. Polny sa-mouchitel. – M.: DMK Press, 2012. – 768 s.

14. Modelirovanie nejroupravleniya skorostyu dozhdevalnyh mashin / Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Terehova N.N. i dr. // Agrarny nauchny zhurnal. – 2020. – № 7. – S. 81-84.

**Критерии авторства**

Камышова Г.Н. имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию: 21.12.2020 г.

Одобрена после рецензирования 11.01.2021 г.

Принята к публикации 14.01.2021 г.

**Authorship criteria**

Kamyshova G.N. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism

The article was submitted to the editorial office 21.12.2020

Approved after reviewing 11.01.2021

Accepted for publication 14.01.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504: 626.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-22-28

## **ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ)**

**ЛОСКИН МИХАИЛ ИВАНОВИЧ**<sup>✉1</sup>, канд. техн. наук., научный сотрудник  
melio\_lmi@mail.ru

**ГОТОВЦЕВ СЕМЕН ПЕТРОВИЧ**<sup>2</sup>, канд. геол.-мин. наук., старший научный сотрудник  
gotovcev@mpi.ysn.ru

**ПАВЛОВА САХАЯНА АФАНАСЬЕВНА**<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук., доцент  
sachayana@mail.ru

<sup>1</sup> Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. М.Г. Сафронова; 677001, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Бестужева-Марлинского, 23, корп. 1, Россия

<sup>2</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36, Россия

*В Центральной Якутии по сравнению с 70-ми гг. XX в. среднегодовая температура воздуха повысилась на 2,5-3,0°C. На фоне потепления климата, спровоцировавшего экстремальные погодные явления, деградацию подземных льдов, изменился водный режим малых рек и залесенных территорий, что повлияло на устойчивость геосистем, расположенных в бассейнах малых рек. На примере системы лиманного орошения «Эбэ», расположенной в Центральной Якутии, проведены исследования по установлению причин возникновения процессов, связанных с изменением климата, влияющих на устойчивость геосистем. Учащающиеся случаи экстремальных погодных явлений, изменение количества осадков и температурных показателей приводят к снижению урожайности сельскохозяйственных угодий, нарушению жизнедеятельности сельских территорий. Сверхнормативная выдержка паводковых вод в форсированном режиме в целях защиты от затопления жилого и социального сектора населенного пункта, находящегося в нижнем бьефе, привела к разрушению шлюз-регулятора системы лиманного орошения. Основной причиной сверхнормативной выдержки шлюз-регулятора в форсированном режиме во избежание угрозы подтопления населенного пункта являлся подпор с устьевой части р. Хаар Балаган, замедляющий отток паводковых вод вниз по руслу. По результатам исследований можно предположить, что одним из негативных процессов, отрицательно влияющих на устойчивость геосистем, является увеличение глубины сезонного протаивания в условиях изменения климата под лесами в таежной зоне Центральной Якутии, которое в проведенных исследованиях спровоцировало снижение устойчивости мелиоративного агроландшафта и нарушение жизнеобеспечения населенного пункта. Для снижения рисков возникновения указанных негативных явлений необходимо принятие комплекса превентивных адаптивных мер по изменению климата, в том числе исследование климатической изменчивости стока малых рек и технических решений по его регулированию.*

**Ключевые слова:** изменение климата, гидротехническое сооружение, лиманное орошение, Центральная Якутия, весеннее половодье, устойчивость геосистем