

DOI

УДК 631.365:51-74

К МЕТОДИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ОРГАНИЧЕСКИХ СЕМЯН ТИМОФЕЕВКИ**В. А. Смелик, А. Р. Валиев, А. В. Добринов, А. Н. Перекопский**

Реферат. Важной специфичной особенностью функционирования машин и оборудования в технологиях послеуборочной обработки зерна и семян является вероятностная изменчивость внешних условий, негативно влияющих на эффективность их работы. Процесс сушки отличается ещё и нестационарностью по своим вероятностно-статистическим характеристикам. Методики формирования цифровых двойников стационарных процессов достаточно хорошо освоены, однако построение цифровых двойников нестационарных процессов является гораздо более сложной задачей, для решения которой необходимо учитывать природу нестационарности, а также особенности и внутреннюю структуру моделируемых процессов. Цель исследований - построение цифрового двойника нестационарного процесса сушки семян тимopheевки и оценка достоверности полученной модели. Экспериментальные данные получены в результате сушки семян тимopheевки луговой сорта Ленинградская 204 с полевого органического севооборота на универсальной сушильной установке с применением цифрового влагомера семян Фауна ПМДР4, оснащенного поточными датчиками погружного типа. В результате экспериментальных исследований получены реализации случайных процессов изменения влажности семян на заключительном этапе сушки для построения математических моделей методами статистической идентификации. Построение дискретных аналогов исследуемых процессов проведено с использованием экспериментальных корреляционных функций, аппроксимируемых соответствующими функциями для получения параметров моделирующих рекуррентных уравнений. Рассмотренный алгоритм моделирования работы сушилки позволяет воспроизводить процессы неограниченно большой длины и моделировать различные условия и режимы работы для нахождения заданных оптимумов по качеству, энергозатратам и экологичности. Точность результатов имитационного моделирования определялась на основе сходимости моментных функций экспериментального и смоделированного технологических процессов. Оценки статистических характеристик смоделированного процесса сушки семян тимopheевки с 95-процентной вероятностью соответствуют статистическим оценкам процесса сушки, полученным в ходе экспериментальных исследований, а графики их нормированных корреляционных функций наглядно подтверждают идентичность процессов. Полученные математические зависимости протекания технологического процесса сушки органических семян тимopheевки являются его цифровым двойником, позволяющим методами имитационного моделирования решать оптимизационные задачи.

Ключевые слова: цифровой двойник, технологический процесс, сушка семян, идентификация, имитационное моделирование.

Введение. Отличительной особенностью сельскохозяйственного производства от других отраслей экономики является разнообразие выполнения технологических процессов, их вариации, применение различных вариантов механизированных технологий в зависимости от погодных, климатических и почвенных условий. Производство продукции растениеводства накладывает дополнительные условия на выращивание, уборку и послеуборочную обработку урожая в зависимости от видов, сортов, фаз спелости растений. Важной специфичной особенностью функционирования машин и оборудования при производстве сельскохозяйственной продукции является вероятностная изменчивость внешних условий, как правило, негативно влияющих на эффективность их работы [1, 2].

При послеуборочной обработке зерна и семян трав достаточно проблематично учесть при настройке на заданные режимы работы различные варианты физико-механических свойств зерна и семян трав, исходную (начальную) влажность, требования к температуре сушки [3, 4]. Особую трудность представляет необходимость поддержания заданных режимов работы в условиях вероятностной изменчивости исходной влажности зерна

и семян, а также внешних условий — (температуры и влажности) окружающего воздуха [4, 5].

К настоящему времени в виду развития цифровых технологий и искусственного интеллекта представляется возможным использовать информационно-коммуникационные системы как моделирующие элементы на основе математических и полунатурных моделей «проигрывать различные сценарии» по типу «что будет, если ...» [2, 6]. Известно [7], что построение цифровых двойников технологических процессов в различных отраслях уже является необходимым условием при проектировании и строительстве предприятий, заводов и других объектов, а также отдельных технологических процессов, реализуемых на этих объектах. В сушке семян различных трав представляется возможным также использовать имитационное моделирование технологического процесса и рассматривать рациональные параметры и режимы работы сушильных установок [4].

В ряде работ [8, 9] в России предложено использовать метод описания технологического процесса на основе цифрового двойника технологического процесса, который позволяет решать проблемы оптимального

управления информацией на предприятии без существенных вложений.

Использование цифрового двойника на основе имитационного моделирования, связанного с заданными оператором и фактическими значениями технологического процесса, позволяет вести наблюдение за параметрами и режимами работы оборудования в реальном времени. Это позволяет оперативно принимать управляющие воздействия на основе анализа данных [10, 11]. Реализация системы мониторинга технологического процесса на основе имитационного моделирования дает возможность осуществить необходимые настройки системы в соответствии с необходимыми требованиями оператора для дальнейшего увеличения эффективности управления процессом [12, 13], в том числе и процессом сушки семян трав [14].

Почвенно-климатические условия регионов повышенного увлажнения РФ диктуют условия сушки высоковлажных семян в более «мягких» режимах для обеспечения сохранности и всхожести семян, особенно выращенных по органической технологии [5, 15].

За счет управления процессом сушки возможно увеличить время нахождения семян в сушильной камере, чтобы незрелые семена успели отдать влагу, стали щуплыми и легко-весными, и их можно было отделить при дальнейшем сортировании. При экспериментальных исследованиях практически невозможно учесть все варианты условий функционирования (различные виды топлива, вид и сорт зерна или семян трав, исходную влажность и температуру семян, наличия сорняков в сушеном ворохе), накладываются ограничения по короткому периоду сезонной уборки семян, а также затраты времени и средств [5].

После определения проблемы и цели исследования этапами проектирования имитационной модели технологического процесса будут следующие [2, 13, 15]: разработка концепции (параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевая функция); формализация логико-математической модели; разработка программы-имитатора с применением

языков и систем моделирования; верификация модели; планирование имитационного (машинного) эксперимента; интерпретация результатов и использование модели.

В работе [14] моделируются режимы функционирования универсальной сушилки по корреляционным функциям дискретных последовательностей величин влажности различных растительных материалов. Отмечено, что точность результатов исследований моделирования процессов сушки и экспериментальных исследований достаточно близки.

В нашей работе рассмотрена методика формирования цифрового двойника технологического процесса сушки с последующим имитационным моделированием процесса сушки органических семян тимopheевки. Данный метод позволяет воссоздать реальные условия работы сушилки и получать данные о выходных показателях, имитационные модели могут быть получены как при экспериментальных исследованиях, так и на основе аналитических расчетов [2, 12].

Цель исследований – построение цифрового двойника нестационарного процесса сушки семян тимopheевки и оценка достоверности полученной модели.

Условия, материалы и методы. Экспериментальные данные получены в результате сушки семян тимopheевки луговой сорта Ленинградская 204 с полевого органического севооборота на универсальном экспериментальном образце сушилки. Под формирование урожая семян при полосном посеве было внесено органическое удобрение БИАГУМ производства ИАЭП - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ из расчета 40 кг д. в. азота на гектар [15].

Базовая энергетическая часть экспериментального образца сушилки используется для сушки семян зерновых и масличных культур, семян трав, растительной массы в рулонах и кипах, аналогом которой являются применяемые на практике известные установки [16, 17]. Экспериментальная сушильная камера для семян представляет собой квадратную емкость высотой 0,75 м с сетчатым дном (рис. 1).

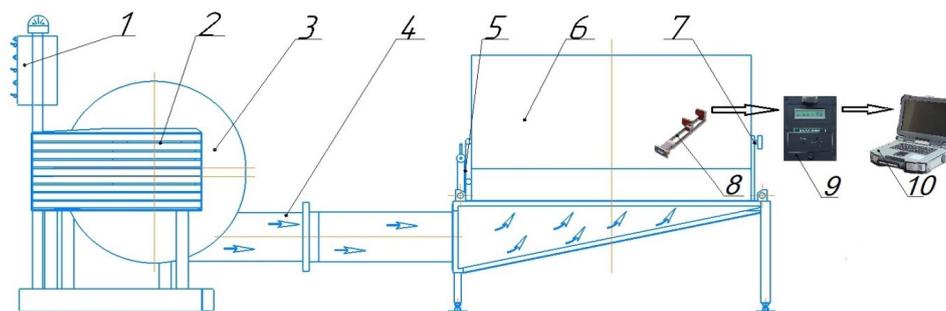


Рис. 1 – Схема лабораторной установки для сушки семян (вид сбоку):

- 1 – блок управления; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – воздуховод; 5 – подъемное устройство;
- 6 – сушильная камера; 7 – заслонка сушильной камеры; 8 – датчик влагомера; 9 – блок индикации влагомера; 10 – мобильный компьютер

Принцип действия сушилки следующий: подогретый калорифером 2 воздух вентилятором 3 по воздуховоду 4 подается в сушильную камеру 6. Блоком управления 1 осуществляется включение установки, подключение необходимого количества калориферов, частотным регулятором LS 600 осуществляется изменение частоты вращения крыльчатки вентилятора и подачи теплоносителя (воздуха). Подъемным устройством 5 осуществляется выгрузка семян из камеры через заслонку 7.

Для контроля температуры агента сушки и влажности семян в сушилке использовался влагомер Фауна-ПМДР. Принципиально влагомер состоит из датчика погружного типа 8 (рис. 1), блока индикации 9, преобразователя интерфейса RS485 в USB для связи с мобильным компьютером 10.

Разработанная лабораторная установка

позволяет регулировать температуру и скорость теплоносителя, обеспечивает необходимый для постановки опытов «мягкий» режим сушки семян, соответствующий требованиям научно-технических разработок для органического производства [18].

Графический интерфейс компьютера отображает установленные показатели процесса сушки: влажность семян и температуру, получаемые от датчиков (до 4-х штук) (рис. 2). Информацию с датчиков возможно фиксировать с заданным по времени шагом в виде дискретных последовательностей исследуемых процессов с последующим сохранением в файлах. Управляющее воздействие с блока индикации осуществляется по сигналу на исполнительный механизм (например, выключение калорифера, вентилятора и др.).

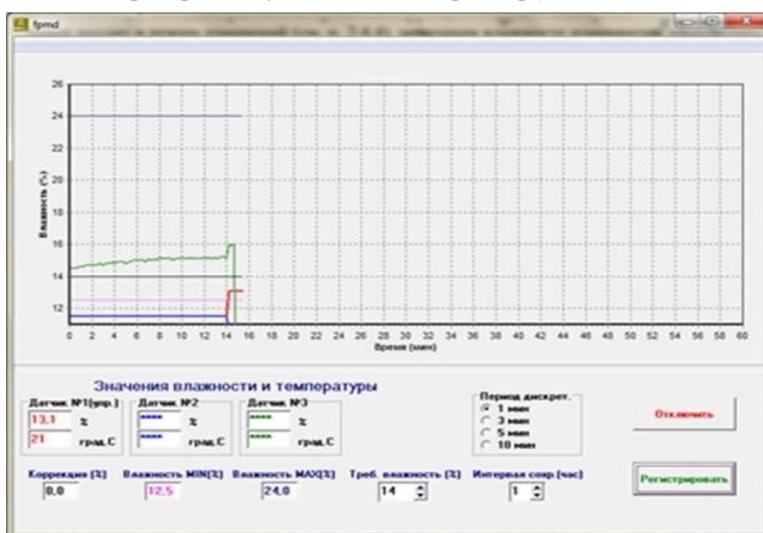


Рис. 2 – Графический экранный интерфейс мобильного компьютера

Как объект построения цифрового двойника, на начальном этапе исследуемую сушилку удобно [2, 14] представить состоящей из двух частных моделей: калорифера (теплогенератора) A_1 и сушильной камеры

A_2 (рис. 3), на входах которых действуют внешние возмущения, а выходы представлены в виде результатов функционирования технологического процесса сушки семян.

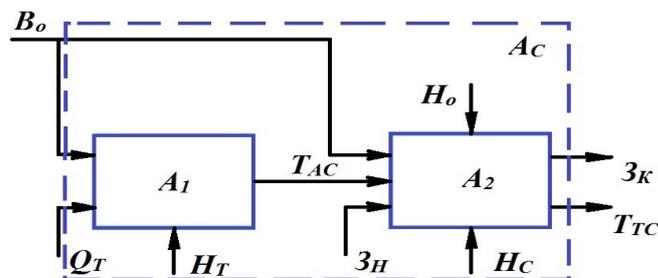


Рис. 3 - Расчетная схема сушилки семян:

A_C – модель сушилки; A_1 – модель калорифера; A_2 – модель сушильной камеры; B_0 – вектор исходного состояния окружающего воздуха; Q_T – вектор подачи теплоты; H_T – настроечный вектор подачи теплоты и воздуха; T_{AC} – входной вектор состояния теплоносителя; H_0 – настроечный вектор степени загрузки камеры; H_C – входной вектор начальных параметров семян; H_C – вектор настройки времени сушки; Z_K – вектор параметров семян после сушки; T_{TC} – вектор состояния теплоносителя после сушки

Основными возмущающими воздействиями, во многом определяющими эффективность протекания процесса сушки семян [3, 15, 19], будут исходное состояние окружающего воздуха, оцениваемое вектором B_0 и начальное состояние поступающего на сушку семенного вороха Z_H . Причем, вектор B_0 является внешним входным воздействием как для частной модели калорифера A_1 , так и частной модели сушильной камеры A_2 .

Составляющими вектора B_0 будут являться: $q_0(t)$ - расход (подача) воздуха, $t_0(t)$ - его температура, $j_0(t)$ - относительная влажность и $i_0(t)$ - энтальпия, что можно записать как $B_0 = \{q_0(t), t_0(t), j_0(t), i_0(t)\}$. Входной вектор Z_H для сушильной камеры A_2 оценивается начальной (исходной) влажностью семян $w_{30}(t)$ и их температурой $t_{30}(t)$ так, что $Z_H = \{w_{30}(t), t_{30}(t)\}$.

Вид теплонагревателей $q_{Tн}$ и количество теплоты $q_T(t)$, поступающей в воздуховод калорифера, являются составляющими другого входного вектора $Q_T = \{q_T(t), q_{Tн}\}$ частной модели A_1 . Заданные установочные значения подачи теплоты $q_{Tн}$ и воздуха $q_{вн}$ составляют настроечный вектор $H_T = \{q_{Tн}, q_{вн}\}$.

Состояние теплоносителя, формируемого на выходе калорифера A_1 описывается вектором $T_{AC} = \{q_{AC}(t), t_{AC}(t), d_{AC}(t), i_{AC}(t)\}$, где $q_{AC}(t)$ - расход теплоносителя на выходе калорифера, его конечная температура $t_{AC}(t)$, влагосодержание $d_{AC}(t)$ и энтальпия $i_{AC}(t)$.

Настройка сушильной камеры A_2 на требуемые режимы работы оценивается вектором настройки времени сушки H_C , и настроечным вектором H_0 степени загрузки (заполнения) сушильной камеры.

Выходными параметрами модели A_2 сушильной камеры являются конечное состояние семян после сушки $Z_K = \{w_{зк}(t), t_{зк}(t)\}$, где $w_{зк}(t)$ конечная влажность семян и $t_{зк}(t)$ их температура после сушки. Вектор $T_{TC} = \{q_{TC}(t), t_{TC}(t), d_{TC}(t), i_{TC}(t)\}$ оценивает состояние теплоносителя после сушки, где $q_{TC}(t)$ - расход теплоносителя, его конечная температура $t_{TC}(t)$, влагосодержание $d_{TC}(t)$ и энтальпия $i_{TC}(t)$.

В таком представлении построение цифрового двойника сушилки семян сводится к определению вида и параметров операторов моделей A_1 и A_2 . Одним из наиболее удобных способов построения цифрового двойника рассматриваемых моделей является метод статистической идентификации [2]. Для этого расчетную схему сушилки семян (рис. 3) можно описать следующими символическими выражениями:

$$\begin{aligned} T_{AC} &= A_1 \{B_0; Q_T; H_T\} \\ T_{TC} &= A_2^{(TC)} \{B_0; T_{AC}; H_0; H_C\} \\ Z_K &= A_2^{(ЗК)} \{B_0; Z_H; H_0; H_C\} \end{aligned}$$

Для статистической идентификации моделей достаточно будет выполнить условия:

$$A_1 = \frac{T_{AC}}{B_0; Q_T; H_T}$$

$$A_2^{TC} = \frac{T_{TC}}{B_0; Z_H; H_0; H_C}$$

$$A_2^{ЗК} = \frac{Z_K}{B_0; Z_H; H_0; H_C}$$

И в соответствии с построенной схемой на рис. 3 справедлива будет запись:

$$A_C = A_1 \cdot \begin{bmatrix} A_2^{TC} \\ A_2^{ЗК} \end{bmatrix}$$

или

$$A_C = \frac{T_{AC}}{B_0; Q_T; H_T} \cdot \begin{bmatrix} T_{TC} \\ B_0; Z_H; H_0; H_C \\ Z_K \\ B_0; Z_H; H_0; H_C \end{bmatrix}$$

Получение математических моделей на основании представленных зависимостей сводится к нахождению наиболее оптимальных операторов по результатам синхронной экспериментальной информации о входных и выходных процессах по методике, изложенной в работах [1, 2].

Результаты и обсуждение. Одной из существенных особенностей процесса сушки зерна и семян, затрудняющих статистическую обработку и идентификацию является их нестационарность. В качестве примера, на рис. 4 представлена экспериментальная реализация процесса изменения влажности органических семян тимфеевки при сушке с шагом дискретизации $\Delta t = 1$ мин. Как изложено в работах [2, 14], наиболее целесообразным в данном случае будет приведение нестационарного процесса к стационарному виду путем разложения его на составляющие: низкочастотную $w_{зк}(t)_{(1)}$ и высокочастотную $w_{зк}(t)_{(2)}$, таким образом, что:

$$w_{зк}(t) = w_{зк}(t)_{(1)} + w_{зк}(t)_{(2)} \quad (1)$$

где $w_{зк}(t)$ - процесса изменения влажности семян при сушке, $w_{зк}(t)_{(1)}$ - низкочастотная составляющая процесса влажности, $w_{зк}(t)_{(2)}$ - высокочастотная составляющая процесса сушки семян.

Низкочастотная составляющая процесса изменения влажности семян $w_{зк}(t)_{(1)}$ представлена на графике (рис. 4) в виде кривой, описываемой уравнением:

$$w_{зк}(t)_{(1)} = 13,095 - 0,0552t + 0,0001t^2, R^2 = 0,85 \quad (2)$$

где t - время сушки, мин., R^2 - коэффициент детерминации.

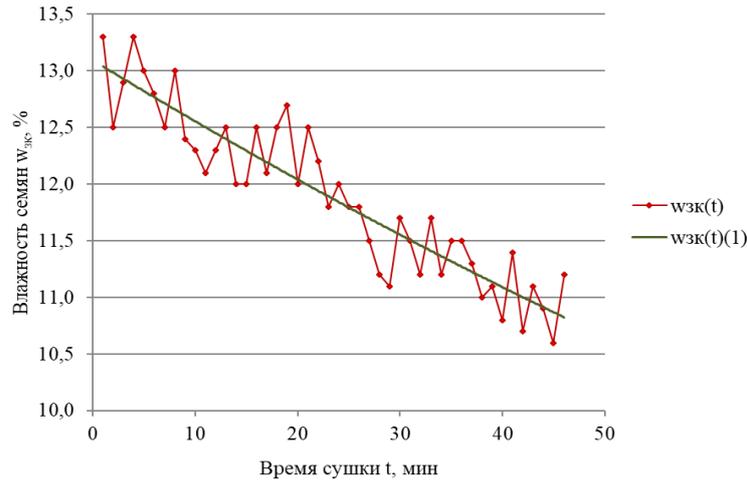


Рис. 4 – Нестационарная реализация процесса изменения влажности семян при сушке $w_{зк}(t)$ и её низкочастотная составляющая $w_{зк}(t)_{(1)}$

Стационарная высокочастотная составляющая процесса изменения влажности семян $w_{зк}(t)_{(2)}$, рассчитанная относительно низкочастотной составляющей $w_{зк}(t)_{(1)}$ за период наблюдения T представлена на рис. 5.

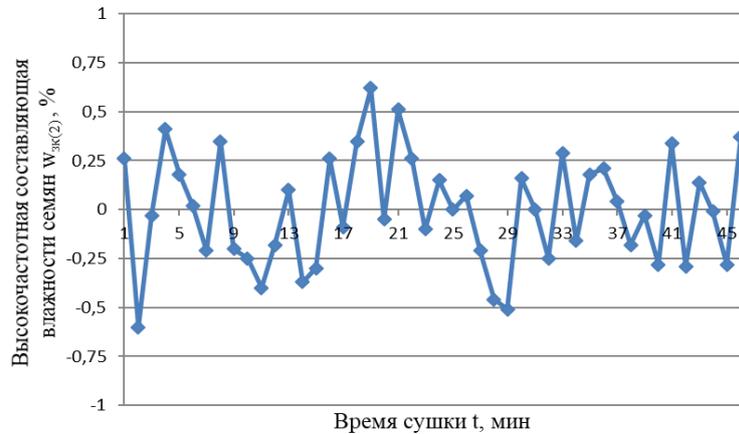


Рис. 5 – Стационарная высокочастотная составляющая $w_{зк}(t)_{(2)}$ изменения влажности семян в период сушки

Представленная на рис. 5 кривая высокочастотной составляющей изменения влажности семян $w_{зк}(t)_{(2)}$, свидетельствует о случайном (в вероятностно-статистическом смысле) характере процесса. Дискретные значения высокочастотной составляющей изменения влажности семян $w_{зк}(t)_{(2)}$, полученные с заданным шагом $\Delta t = 1$ мин, колеблются вокруг выбранной за базу отсчета низкочастотной составляющей $w_{зк}(t)_{(1)}$, что позволяет принять гипотезу о стационарности процесса.

Методики расчета статистических характеристик стационарных случайных процессов достаточно хорошо известны и широко применяются в исследованиях [1, 2]. Построение цифровых двойников объектов для использования их, в том числе, для целей имитационного моделирования удобно выполнять на основе экспериментальных корреляционных функций процессов:

$$R_{w_{зк}(t); t_{i+1}}(2) = R_{w_{зк}(t)}(2) = M\{[w_{зк}(t_1)_{(2)} - m_{w_{зк}(2)}][w_{зк}(t_{i+1})_{(2)} - m_{w_{зк}(2)}]\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [w_{зк}(t_1)_{(2)} - m_{w_{зк}(2)}][w_{зк}(t_{i+1})_{(2)} - m_{w_{зк}(2)}] dt_1 dt_{i+1}, \quad (3)$$

где $m_{w_{зк}(2)}$ – математическое ожидание высокочастотной составляющей процесса влажности семян; $R_{w_{зк}(2)}(t_1; t_{i+1}) = R_{w_{зк}(2)}(\tau)$ – корреляционная функция высокочастотной составляющей процесса изменения влажности семян; τ – время корреляции; M – условное обозначение моментной функции.

В прикладных решениях удобнее использовать нормированную корреляционную функцию:

$$\rho_{w_{зк}(t)}(\tau)_{(2)} = R_{w_{зк}(t)}(\tau)_{(2)} / D_{w_{зк}(2)}, \quad (4)$$

где $\rho_{w_{зк}(t)}(\tau)_{(2)}$ – нормированная корреляционная функция высокочастотной

составляющей процесса изменения влажности семян; $D_{w_{зк}(2)}$ - дисперсия исследуемого процесса.

Для целей статистической идентификации цифрового двойника исследуемого случайного процесса экспериментальную корреляционную функцию достаточно аппроксимировать одним из известных и наиболее соответствующих математических выражений [2].

Экспериментальная корреляционная функция высокочастотной составляющей процесса изменения влажности семян $w_{зк}(t)_{(2)}$ с достаточной точностью аппроксимируется следующим экспоненциально-косинусным выражением [1, 2]:

$$R_{w_{зк}(2)}(\tau) = D_{w_{зк}(2)} \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cos\beta\tau \quad (5)$$

где α и β - коэффициенты аппроксимации.

Или после нормирования:

$$\rho_{w_{зк}(2)}(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos\beta\tau, \quad (6)$$

где $\rho_{w_{зк}(2)}(\tau)$ - нормированная корреляционная функция высокочастотной составляющей процесса изменения влажности семян $w_{зк}(t)_{(2)}$.

На рисунке 6 приведены графические зависимости экспериментальной и смоделированной нормированных корреляционных функций одной из реализаций случайного процесса изменения влажности семян тимopheевки в процессе сушки.

Смоделированная корреляционная функция получена при $\alpha = 0,16$ и $\beta = 0,41$.

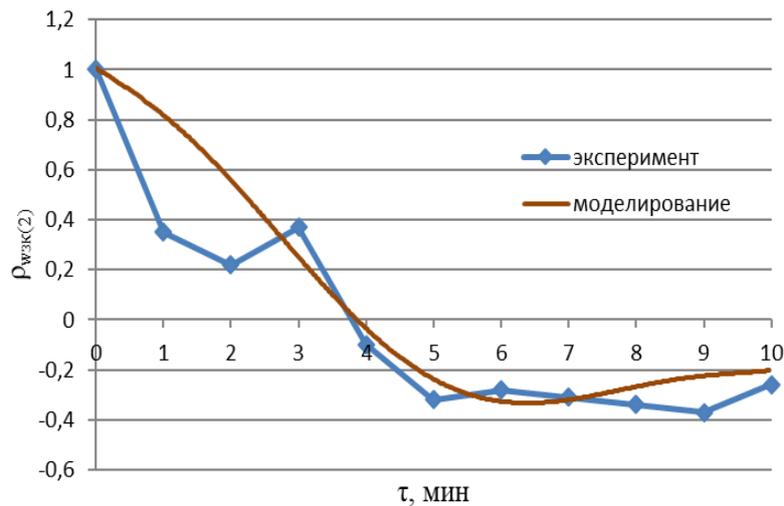


Рис. 6 – Нормированная корреляционная функция $\rho_{w_{зк}(2)}(\tau)$ высокочастотной составляющей одной из реализаций процесса сушки в ходе эксперимента и по результатам моделирования

Представленные на графике (рис. 6) кривые нормированной корреляционной функции, полученные по экспериментальным данным и по результатам моделирования, имеют близкие характеристики. Время спада кривых (первое пересечение оси абсцисс) одинаково и составляет $T_0 = 4$ мин, а время их затухания около 10 минут, что наглядно подтверждает точность результатов моделирования.

Обратным преобразованием корреляционных функций (5) и (6) при известных коэффициентах α и β возможно генерировать высокочастотную составляющую процесса влажности семян $w_{зк}(t)_{(2)}$ неограниченной длительности и на основании уравнений (1) и (2) имитационным моделированием оптимизировать параметры и режимы сушки семян тимopheевки.

Полученные математические модели являются частью цифрового двойника исследуемого процесса сушки семян тимopheевки, которые могут быть использованы в обучаемых системах искусственного интеллекта (ИИ),

построенных на основе нейронных сетей для контроля и безлюдного управления производством семян.

Выводы. Предложена методика построения цифрового двойника, отличительной особенностью которой является то, что она учитывает нестационарность случайных (в вероятностно-статистическом смысле) процессов. Методика апробирована на примере технологического процесса сушки семян тимopheевки. Наиболее удобным в данном случае является метод идентификации по результатам экспериментальных исследований, который при современном развитии систем искусственного интеллекта составляет основу обучения нейронных сетей. Для получения экспериментальной информации проведены исследования на лабораторной установке при сушке органических семян тимopheевки луговой, требующих соблюдения особых «мягких» режимов. Для синхронной регистрации экспериментальных данных с необходимым шагом дискретизации использовались современные цифровые

приборы и аппаратура. Экспериментальные исследования проводились на основе информационных моделей, построенных в виде блок-схем по принципу «вход-выход», входами которых были условия функционирования, а выходом результаты работы. Нестационарные случайные процессы приведены к стационарному виду путём разложения процесса на низкочастотную и высокочастотную составляющие. Рассчитанные корреляционные функции аппроксимированы известными экспоненциально-косинусными выражениями, которые позволяют воспроизводить аналоги исследуемых процессов методами имитационного моделирования

неограниченной продолжительности. Полученные уравнения являются частью цифрового двойника исследуемого процесса, с помощью которых возможно решать задачи по оптимизации, контролю и управлению режимами работы сушки семян тимофеевки. Предложенная методика применима для моделирования и других нестационарных процессов, имеющих место в сельскохозяйственном производстве. Причем, нестационарный процесс возможно разложить на другое число составляющих, по методике, изложенной в исследовании [2]. При увеличении количества составляющих случайного процесса точность моделирования увеличивается.

Литература

1. Лурье А.Б. Основы теории эффективности функционирования рабочих процессов сельскохозяйственных машин и их систем управления // Сборник научных трудов ЛСХИ. Совершенствование рабочих органов и повышение эффективности технологических процессов и систем управления сельскохозяйственных машин. Т.415. Л., 1981. - С.3-7.
2. Смелик В.А. Технологическая надежность сельскохозяйственных агрегатов и средства ее обеспечения. - Ярославль, 1999. - 230 с.
3. Smelik V.A., Perekopskiy A.N., Dobrinov A.V., Chugunov S.V. Study of the efficiency of drying grass seeds for forage crops on a rotary dryer / E3S Web of Conferences 262, 01037 (2021), 01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201037>
4. Perekopskiy A.N., Smelik V.A. Variables of the wheat seeds drying process in a carousel type dryer // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2016. – Vol. 1, No. 2. – P. 11-20.
5. Stanisavljević R., Milenković J., Djokić D., Terzić D., Petrović D., Djukanović L., Dodig D. Drying of meadow fescue seeds of different moisture contents: changes in dormancy and germination // Plant Soil and Environment, February 2013, 59 (1), p. 37–43 <https://doi.org/10.17221/551/2012-PSE>
6. Валге А.М., Сухопаров А.И. Формализация технологий растениеводства как динамических систем // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 3(100). – С. 47-53. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10184>.
7. Холопов В.А., Антонов С.В., Курнасов Е.В., Каширская Е.Н. Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 37-43.
8. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 14-25.
9. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Кислицкий М.М., Миронова А.В. Эффекты от применения цифровых двойников в сельском хозяйстве // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 103. С. 71-78.
10. Кондратьева О.В., Мишуров Н.П., Федоров А.Д., Слинко О.В., Войтюк В.А., Федоренко В.Ф. Лучшие практики использования информационных технологий в АПК: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. – 84 с.
11. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве // Техника и оборудование для села. 2022. №4. С. 2-8.
12. Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Имангулов В.Х. и др. Оценка значимости и выбор параметров контактной модели при моделировании семян гороха методом дискретных элементов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2024. – Т. 19, № 1(73). –С.54-60.<https://doi.org/10.12737/2073-0462-2024-54-60>.
13. Каштаева С. В. Методика планирования продовольственной безопасности с использованием экономико-математических методов // Техноклад 6.0. Цифровая трансформация АПК и продовольственная безопасность. – Пермь: ИПЦ Прокрость, 2021. – С. 355-362.
14. Ширяев А.С. Повышение эффективности сушки урожая зерновых, кормовых культур и их грубоизмельченной массы в установках с неподвижным слоем сушеного материала за счет совершенствования сушильной камеры. Дис. ... канд.техн.наук, Ярославль, 2002, 183 с.
15. Смелик В.А., Перекопский АН., Шушков Р.А., Чугунов С.В. Математические зависимости обоснования режимов сушки органических семян тимофеевки луговой // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 1(118). С. 82-96. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-82-95>
16. Zakharov A., Zikov A., Yunin V. Effect of initial moisture content of wheat grain on its drying time in a rotary dryer // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2021. – Vol. 16, No. 19. – P. 1991-1996.
17. Чугунов С.В. Специальная камера к универсальной сушилке // Сельский механизатор. 2010. № 9. С. 26.
18. Зиганшин Б.Г., Семушкин Н.И., Семушкин Д.Н. и др. Повышение результативности научно-технических разработок для органического земледелия // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 18, № 3(71). – С. 84-91. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-84-91>.
19. Rasi J. R., Neto M. and Bernardo R. 2021. Bibliographic prospecting for dryeration process system evaluation in the face of the conventional grain drying. Int. J. Innov. Educ. Res. 9 410-424. <https://doi.org/10.31686/ijer.vol9.iss1.2914>.

Сведения об авторах:

Смелик Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, e-mail: smelik_va@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, профессор, чл.-корр. АН РТ, ректор, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

Добринов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом агроэкологии в растениеводстве, e-mail: a.v.dobrinov@yandex.ru

Перекопский Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, e-mail: areperekopskii@mail.ru

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург, Россия.

TO THE METHOD OF FORMING A DIGITAL TWIN OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF DRYING ORGANIC TIMOTHY SEEDS

V. A. Smelik, A. R. Valiev, A. V. Dobrinov, A. N. Perekopskiy

Abstract. An important specific feature of the functioning of machines and equipment in the technologies of post-harvest processing of grain and seeds is the probabilistic variability of external conditions that negatively affect the efficiency of their work. The drying process is also characterized by non-stationarity in its probabilistic and statistical characteristics. The methods of forming digital twins of stationary processes are quite well mastered, but the construction of digital twins of non-stationary processes is a much more complex task, the solution of which requires taking into account the nature of non-stationarity, as well as the features and internal structure of the processes being modeled. The purpose of the research is to build a digital twin of the non-stationary process of drying timothy seeds and assess the reliability of the resulting model. The experimental data were obtained by drying Leningradskaya 204 timothy grass seeds from the field organic crop rotation using a universal drying unit with a Fauna PMDR4 digital seed moisture meter equipped with submersible flow sensors. As a result of the experimental studies, realizations of random processes of change in seed moisture content at the final stage of drying were obtained for constructing mathematical models using statistical identification methods. Discrete analogs of the processes under study were constructed using experimental correlation functions approximated by the corresponding functions to obtain the parameters of the modeling recurrent equations. The considered algorithm for modeling the dryer operation allows reproducing processes of unlimited length and modeling various conditions and operating modes to find the specified optima for quality, energy consumption and environmental friendliness. The accuracy of the simulation results was determined based on the convergence of the moment functions of the experimental and modeled technological processes. Estimates of statistical characteristics of the simulated process of drying timothy grass seeds with 95% probability correspond to statistical estimates of the drying process obtained in the course of experimental studies, and the graphs of their normalized correlation functions clearly confirm the identity of the processes. The obtained mathematical dependencies of the technological process of drying organic timothy grass seeds are its digital twin, allowing the methods of simulation modeling to solve optimization problems.

Key words: digital twin, technological process, seed drying, identification, simulation modeling.

References

1. Lure AB. [Fundamentals of the theory of efficiency of functioning of working processes of agricultural machines and their control systems]. Sbornik nauchnykh trudov LSKhI. Sovershenstvovanie rabochikh organov i povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov i sistem upravleniya sel'skokhozyaistvennykh mashin. Vol.415. Leningrad. 1981; 3-7 p.
2. Smelik VA. Tekhnologicheskaya nadezhnost sel'skokhozyaistvennykh agregatov i sredstva ee obespecheniya. [Technological reliability of agricultural units and means of ensuring it]. Yaroslavl. 1999; 230 p.
3. Smelik VA, Perekopskiy AN, Dobrinov AV, Chugunov SV. Study of the efficiency of drying grass seeds for forage crops on a rotary dryer. E3S Web of Conferences 262. 2021; 01037 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201037>
4. Perekopskiy AN, Smelik VA. Variables of the wheat seeds drying process in a carousel type dryer. British Journal of Innovation in Science and Technology. 2016; Vol.1. 2. 11-20 p.
5. Stanisavljević R, Milenković J, Djokić D, Terzić D, Petrović D, Djukanović L, Dodig D. Drying of meadow fescue seeds of different moisture contents: changes in dormancy and germination. Plant Soil and Environment. February 2013; 59 (1). 37-43 p. <https://doi.org/10.17221/551/2012-PSE>
6. Valge AM, Sukhoparov AI. [Formalization of plant growing technologies as dynamic systems]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019; 3 (100). 47-53 p. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10184>.
7. Kholopov VA, Antonov SV, Kurnasov EV, Kashirskaya EN. [Development and application of a digital twin of a mechanical engineering technological process]. Vestnik mashinostroeniya. 2019; 9. 37-43 p.
8. Dorokhov AS, Pavkin DYU, Yurochka SS. [Digital twin technology in agriculture: application prospects]. Agroinzheneriya. 2023; Vol.25. 4. 14-25 p.
9. Lobachevskiy YaP, Mironov DA, Kislitskiy MM, Mironova AV. [Effects of using digital twins in agriculture]. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; 103. 71-78 p.
10. Kondrateva OV, Mishurov NP, Fedorov AD, Slinko OV, Voytyuk VA, Fedorenko VF. Luchshie praktiki ispolzovaniya informatsionnykh tekhnologii v APK: analit.obzor. [Best practices in using information technologies in the agro-industrial complex: analytical review]. Moscow: FGBNU Rosinformagrotekh. 2023; 84 p.
11. Lachuga YuF, Izmaylov AYU, Lobachevskiy YaP, Shogenov YuKh. [Results of scientific research of agroengineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2022; 4. 2-8 p.
12. Mudarisov SG, Farkhutdinov IM, Imangulov VKh. [Assessment of the significance and selection of parameters of the contact model in modeling pea seeds using the discrete element method]. Vestnik Kazanskogo

gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 1(73). 54-60 p. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2024-54-60>.

13. Kashtaeva SV. Metodika planirovaniya prodovolstvennoy bezopasnosti s ispolzovaniem ekonomiko-matematicheskikh metodov. Tekhnouklad 6.0. Tsifrovaya transformatsiya APK i prodovolstvennaya bezopasnost. [Methodology for planning food security using economic and mathematical methods. Technouklad 6.0. Digital transformation of the agro-industrial complex and food security]. Perm: IPTs Prokrost. 2021; 355-362 p.

14. Shiryayev AS. Povyshenie effektivnosti sushki urozhaya zernovykh, kormovykh kultur i ikh gruboizmelchennoy massy v ustanovkakh s nepodvizhnym sloem sushimogo materiala za schet sovershenstvovaniya sushilnoy kamery. Dis. ... kand.tekhn.nauk. [Improving the efficiency of drying grain crops, forage crops and their coarsely ground mass in installations with a fixed bed of drying material by improving the drying chamber: dissertation for a degree of Ph.D. of Technical sciences]. Yaroslavl. 2002; 183 p.

15. Smelik VA, Perekopskiy AN, Shushkov RA, Chugunov SV. [Mathematical dependencies for substantiating drying modes for organic timothy grass seeds]. AgroEkoInzheneriya. 2024; 1(118). 82-96 p. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-82-95>

16. Zakharov A, Zykov A, Yunin V. Effect of initial moisture content of wheat grain on its drying time in a rotary dryer. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021; Vol.16. 19. 1991-1996 p.

17. Chugunov SV. [Special chamber for a universal dryer]. Selskiy mekhanizator. 2010; 9. 26 p.

18. Ziganshin BG, Semushkin NI, Semushkin DN. [Improving the effectiveness of scientific and technical developments for organic farming]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 3 (71). 84-91 p. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-84-91>.

19. Rasi JR, Neto M, Bernardo R. 2021. Bibliographic prospecting for dryeration process system evaluation in the face of the conventional grain drying. Int. J. Innov. Educ. Res. 9. 410-424 p. <https://doi.org/10.31686/ijier.vol9.iss1.2914>.

Authors:

Smelik Viktor Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Technical Systems in Agribusiness Department, e-mail: smelik_va@mail.ru

Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Rector, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Dobrinov Aleksandr Vladimirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Agroecology in Crop Production Department, e-mail: a.v.dobrinov@yandex.ru

Perekopskiy Aleksandr Nikolaevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Agroecology in Crop Production Department, e-mail: aperekopskii@mail.ru

Institute of Agroengineering and environmental problems of agricultural production- branch of Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center of VIM, St. Petersburg, Russia.