

УДК 631.372:621.01:004.94

UDC 631.372:621.01:004.94

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

**ОТ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ РАСЧЕТОВ К СТОХАСТИЧЕСКИМ ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКАМ: ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ**

**FROM DETERMINISTIC CALCULATIONS TO STOCHASTIC DIGITAL TWINS: THE EVOLUTION OF THE METHODOLOGY FOR DESIGNING INTELLIGENT AGRICULTURAL AGGREGATES**

Нестеренко Дмитрий Александрович  
Аспирант

SPIN-код автора 8181-2771

РИНЦ Author ID = 202094

e-mail: dn\_800\_36@bk.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Nesterenko Dmitry Alexandrovich  
Graduate student

RSCI SPIN-code: 8181-2771

RSCI Author ID = 202094

e-mail: dn\_800\_36@bk.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

Михайлов Владимир Сергеевич

к-т. тех. наук, доцент

SPIN-код автора 2276-9717

РИНЦ Author ID = 1115621

e-mail: voh\_a@mail.ru

*Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, кафедра ТСиЭвАПК, Приднестровье, Тирасполь*

Mikhailov Vladimir Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

author's SPIN code is 2276-9717

RSCI Author ID = 1115621

e-mail: voh\_a@mail.ru

*T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University, Department of TSiEvAPK, Pridnestrovie, Tiraspol*

Козлов Вячеслав Геннадиевич

д-р. техн. наук, профессор

SPIN-код автора 8181-2771

РИНЦ Author ID = 202094

e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Kozlov Vyacheslav Gennadievich

Doctor of Technical Sciences, Professor

RSCI SPIN-code: 8181-2771

RSCI Author ID = 202094

e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

Козлова Елена Владимировна

к-т. тех. наук, доцент

SPIN-код автора 9356-2523

РИНЦ Author ID = 836693

e-mail: naselvl@mail.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Kozlova Elena Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

author's SPIN code 9356-2523

RSCI Author ID = 836693

e-mail: naselvl@mail.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

Димогло Анатолий Владимирович

к-т. тех. наук, доцент

SPIN-код автора 8185-2814

РИНЦ Author ID = 1225213

e-mail: tolikxd@gmail.com

*Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, кафедра ТСиЭвАПК, Приднестровье, Тирасполь*

Dimoglo Anatoly Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

author's SPIN code is 8185-2814

RSCI Author ID = 1225213

e-mail: tolikxd@gmail.com

*T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University, Department of TSiEvAPK, Pridnestrovie, Tiraspol*

Попов Антон Евгеньевич

к-т. тех. наук, доцент

SPIN-код автора 1936-5117

Popov Anton Evgenievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

author's SPIN code is 1936-5117

РИНЦ Author ID = 700179

e-mail: pae\_83@inbox.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Современный тренд интенсификации агропроизводства эволюционирует от экстенсивного наращивания мощностей к стратегии «ключевой задачи», требующей обеспечения оптимальных технологических режимов при минимальных энергозатратах. Ключевым препятствием на этом пути является методологический разрыв между стохастическим характером реального взаимодействия рабочих органов с почвенной средой и детерминистическим инструментарием традиционных методов сельскохозяйственной технологии. Цель исследования – преодоление указанного разрыва путем разработки методологии и практической реализации стохастического цифрового двойника на примере дискового сошника сеялки, позволяющего перейти от физических испытаний к виртуальной оптимизации параметров агрегата. В основу работы положен синтез методов статистической динамики, теории случайных процессов и компьютерного инжиниринга. Вместо детерминированного подхода предложено моделировать эксплуатационные нагрузки с использованием формирующих фильтров, преобразующих сигнал типа «белый шум» в нестационарный случайный процесс с автокорреляционной функцией, релевантной микрорельефу поля. Для эффективного моделирования систем второго порядка (уравнение движения сошника) применен метод, основанный на замене случайного процесса с заданной корреляционной функцией эквивалентным импульсным воздействием. Цифровой двойник реализован в виде модульной архитектуры, включающей: а) виртуальный прототип (математическое ядро динамики), б) генератор цифровой среды (формирующие фильтры для имитации почвы) и в) аналитический модуль для оценки качества (дисперсии рассогласования глубины хода). На основе лабораторных, стендовых и полевых экспериментов получены и верифицированы коэффициенты модели для различных скоростей движения. Построены зависимости дисперсии рассогласования для переднего и заднего сошников в диапазоне скоростей 3,6–14,4 км/ч. Установлено, что копирующие свойства переднего сошника могут быть значимо улучшены введением демпфирующего элемента. Для заднего сошника показано, что оптимизация демпфирования для одной скорости не гарантирует эффективности на других, что подтверждает необходимость адаптивных или настраиваемых систем

RSCI Author ID = 700179

e-mail: pae\_83@inbox.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

The current trend of agricultural production intensification is evolving from an extensive capacity increase to a "key task" strategy that requires optimal technological regimes with minimal energy consumption. The key obstacle on this path is the methodological gap between the stochastic nature of the real interaction of the working bodies with the soil environment and the deterministic tools of traditional methods of agricultural technology. The aim of the study is to bridge this gap by developing a methodology and practical implementation of a stochastic digital twin using the example of a disc coulters of a seeder, which makes it possible to switch from physical tests to virtual optimization of unit parameters. The work is based on the synthesis of methods of statistical dynamics, theory of random processes and computer engineering. Instead of a deterministic approach, it is proposed to simulate operational loads using formative filters that convert a white noise signal into an unsteady random process with an autocorrelation function relevant to the microrelief of the field. For effective modeling of second-order systems (the coulters motion equation), a method based on replacing a random process with a given correlation function with an equivalent impulse action is applied. The digital twin is implemented as a modular architecture, including: a) a virtual prototype (the mathematical core of dynamics), b) a digital environment generator (forming filters to simulate soil), and c) an analytical module for quality assessment (depth mismatch variance). Based on laboratory, bench and field experiments, the coefficients of the model for various speeds of movement were obtained and verified. The dependences of the misalignment dispersion for the front and rear coulters in the speed range 3.6–14.4 km/h are constructed. It is established that the copying properties of the front coulters can be significantly improved by the introduction of a damping element. For the rear coulters, it is shown that optimizing damping for one speed does not guarantee efficiency at others, which confirms the need for adaptive or configurable systems

Ключевые слова: ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК, СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИСКОВЫЙ СОШНИК, ДИНАМИКА, ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

Keywords: DIGITAL TWIN, STOCHASTIC MODELING, DISK COULTER, DYNAMICS, PRECISION FARMING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-216-013>

Современный тренд интенсификации Российского агропроизводства основан на трансформации экстенсивного наращивания мощностей, т.е. увеличения энергонасыщенности, размеров и объемов рабочих органов и скоростей, к стратегии «ключевой задачи», изменения отдельных элементов, орудий, рабочих органов. Ее суть – в обеспечении оптимальных технологических режимов при минимальных энергозатратах, что недостижимо без перехода на принципиально новый уровень управления агротехническими системами. Этот переход движим сближением разнородных технологий: необходимостью управления высокоскоростными мехатронными комплексами в стохастически изменчивой среде и требованиями концепции «Индустрия 4.0» - новый подход к производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, масштабной автоматизации бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта, к цифровизации жизненного цикла машины.

Ключевым ограничением традиционной научной базы – сельскохозяйственной технологии – является ее опора на детерминистические методы, которые используются для решения задач, при которых считается, что каждая выбираемая стратегия приводит к единственному, заранее известному результату. Эти методы, абстрагируясь от принципиально случайного характера взаимодействия рабочего органа с гетерогенной почвенной средой, не могут служить основой для предиктивного проектирования и адаптивного управления. Таким образом, возникает методологический разрыв между сложностью реальных эксплуатационных условий и инструментарием для их

<http://ej.kubagro.ru/2026/02/pdf/13.pdf>

моделирования.

Разрешение этого противоречия лежит в переходе от статических расчетных моделей к динамическим стохастическим цифровым двойникам. Если традиционная модель описывает преимущественно конструкцию, цифровой двойник симулирует поведение узла или целого агрегата в виртуальной среде, изоморфной реальному агрофону. Например, цифровой двойник сошника сеялки объединяет в свое математическое ядро не только массу и геометрию, но и жесткость нажимной пружины, демпфирующие свойства подвески, а главное – алгоритмы генерации стохастических воздействий, имитирующих микрорельеф и сопротивление почвы.

Это позволяет перенести основную тяжесть исследований и оптимизаций в виртуальную среду, минимизируя дорогостоящие и длительные натурные испытания. Критически важным становится адекватное математическое описание случайных входных воздействий.

Современный подход к имитации эксплуатационных нагрузок предполагает использование не просто «генераторов шума», а иерархии моделей. Исходные случайные сигналы (например, белый шум) трансформируются формирующими фильтрами в нестационарные случайные процессы с заданными корреляционными функциями и спектральными плотностями, релевантными конкретному типу почвы, ее влажности и скорости движения агрегата [1]. Это превращает цифровой двойник из кинематической схемы в динамическую стохастическую систему, способную «проживать» множество виртуальных сценариев эксплуатации.

Решение задач проектирования и управления агротехническими комплексами нового поколения требует синтеза трех областей знания: классической сельскохозяйственной технологии, статистической динамики систем управления и компьютерного инжиниринга. Формирование теории

управления сельскохозяйственными агрегатами как самостоятельной дисциплины становится ее требованием. Ее ядром должна стать методология создания и валидации стохастических цифровых двойников, обеспечивающая не только описание, но и предсказанием, прогнозом поведения системы в условиях неопределенности, что является краеугольным камнем для истинной автоматизации и перехода к автономным сельскохозяйственным роботам.

При моделировании сельскохозяйственных машин и их узлов, для имитации реальных эксплуатационных нагрузок на цифровой двойник, используют генераторы шума, выходные сигналы которых преобразуются в более сложные (в виде стационарной случайной функции с заданными статистическими характеристиками) с помощью формирующих фильтров [1].

Такой метод моделирования случайных сигналов отличается большой наглядностью и может применяться для систем любого порядка. Недостатками этого метода являются длительное время интегрирования и некоторый разброс результатов вследствие нестабильности работы генераторов в шуме.

Кроме того, генераторы шума, как правило, не дают на выходе сигнал типа «белый шум» с постоянной спектральной плотностью, что необходимо учитывать при расчете формирующих фильтров. Ряд узлов сельскохозяйственных машин является линейными системами второго порядка и при их моделировании можно воспользоваться простым методом, предложенным в работе [2, 3]. Этот метод позволяет получить статистики в виде ошибки рассогласования следящей системы за одно, достаточно продолжительное, машинное решение и основан на замене случайного процесса с заданной автокорреляционной функцией  $R(\tau)$  импульсной функцией такого же вида.

Если на вход системы подается сигнал «белый шум» с авто-

корреляционной функцией в виде дельта-функции, т.е.  $R_{xx}(\tau) = \delta(\tau)$ , то взаимная корреляционная функция входного и выходного сигналов будет иметь вид импульсной функции [2, 3], т.е.

$$R_{xy}(\tau) = \omega(\tau); \tag{1}$$

причем дисперсия выходного сигнала будет

$$D_y = R_{yy}(L) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2(\tau) d\tau. \tag{2}$$

Соответствующий возбуждающий импульс  $\delta(\tau) = R_{xx}(\tau)$  воспроизводится методом введения начальных условий в моделируемую систему. Такой метод был применен для исследования математической модели дискового сошника овощной сеялки. Уравнение движения дискового сошника при входном возмущении в виде неровностей поверхности поля и выходе — колебания сошника относительно рамы сеялки [4] имеет вид

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) \Delta\psi = f(t), \tag{3}$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — постоянные времени;

$\Delta\psi$  — угол колебания поводка сошника относительно рамы сеялки;

$f(t)$  — возмущающее воздействие.

Значения коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$ , полученные в результате опытов в почвенном канале [4], представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  в почвенном канале.

Скорость сеялки $v$ , км/час	Коэффициент постоянного времени $T_1$ , сек	Коэффициент постоянного времени $T_2$ , сек
4,65	0,0350	0,071
5,75	0,0300	0,064
9,50	0,0270	0,058
10,50	0,0265	0,054

В результате полевого эксперимента [5] получены следующие значения коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  уравнения (3) и приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  в полевых условиях.

Скорость сеялки $v$ , км/час	Коэффициент постоянного времени $T_1$ , сек	Коэффициент постоянного времени $T_2$ , сек
5,60	0,0610	0,07
9,55	0,0480	0,05
13,85	0,0428	0,02

В лабораторных условиях из уравнения колебания сошника как динамической системы значения  $T_1$  для переднего и заднего сошников оказались равными  $T_{1п} = 0,025$  сек;  $T_{1з} = 0,035$  сек.

Одним из относительных агротехнических требований, предъявляемых к сошнику, является равномерная глубина заделка семян. Наибольшую равномерность семян можно получить при условии копирования сошником поверхности поля. Однако известно [5, 6], что при увеличении скорости движения посевного агрегата свыше 7 км/час равномерность глубины заделки семян дисковыми сошниками значительно ухудшается. Равномерность глубины заделки семян сошником зависит также от качества подготовки поля под посев: чем лучше проведена планировка поверхности поля, тем лучших результатов работы посевных агрегатов на повышенных скоростях можно ожидать. Таким образом, равномерность заделки семян при повышенных скоростях движения посевного агрегата зависит как от копирующих свойств (динамики) сошника, так и от состояния поверхности поля, подготовленного под посев.

При моделировании в качестве критерия равномерности глубины хода сошника было принято наименьшее значение дисперсии разности  $\Delta\psi$  колебания поводка сошника относительно рамы сеялки при идеальном и

реальном копировании сошником рельефа поверхности поля.

В качестве возмущения, действующего на сошник, был принят случайный процесс с автокорреляционной функцией вида

$$R(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau \quad (4)$$

Уравнением (4) описываются профили многих полей Приднестровья и южной зоны России, подготовленных под посев. Для скорости  $v = 1$  м/сек значения  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно приняты равными  $2,0$  <sup>1</sup>/сек и  $4,0$  <sup>1</sup>/сек по опытным данным, значение дисперсии принято  $D = 4,0$  см<sup>2</sup>. По уравнению (4) известными методами [1] был произведен расчет формирующего фильтра. Для различных скоростей  $v$  значение  $\alpha_v$  и  $\beta_v$  определялось как

$$\alpha_v = v\alpha; \beta_v = v\beta.$$

Моделирование цифрового двойника динамики дискового сошника выполнялось в высокопроизводительной программной среде динамического моделирования MATLAB/Simulink.

Архитектурная структурная схема цифрового двойника дискового сошника в среде динамического моделирования представлена на рисунке 1.

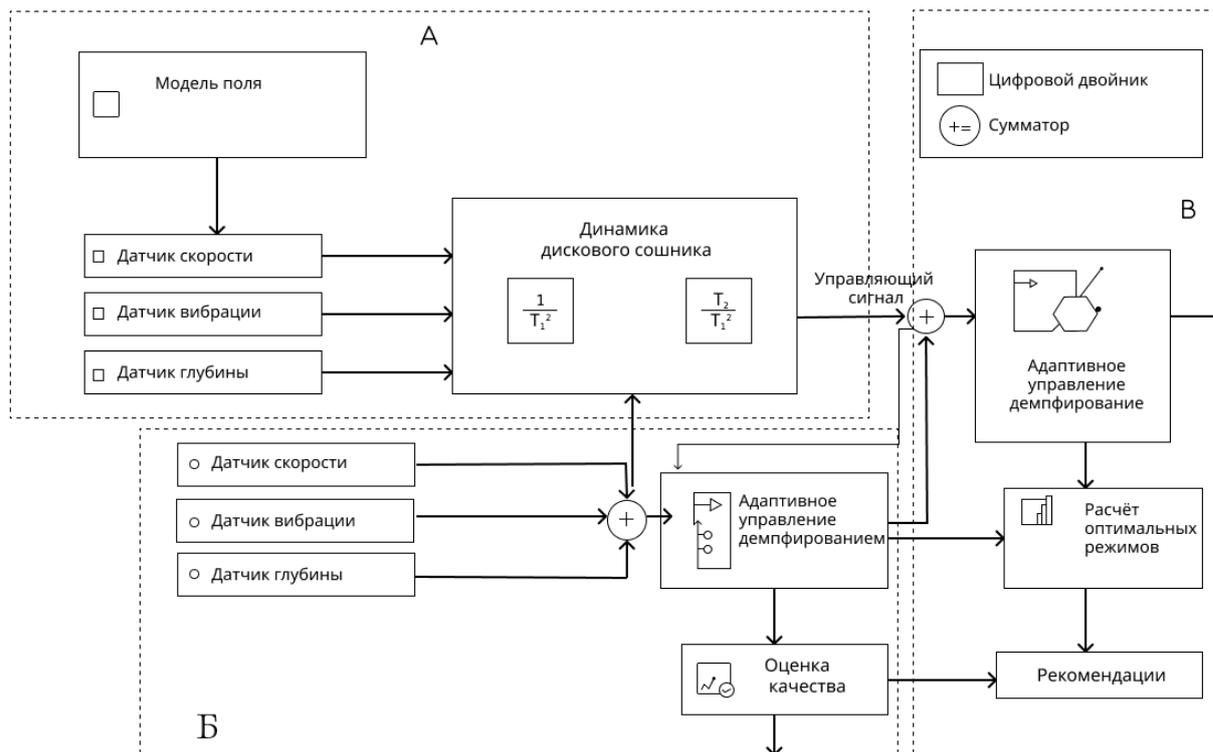


Рисунок 1. Архитектурная структурная схема цифрового двойника дискового сошника в среде динамического моделирования:

а — виртуальный прототип объекта; б — генератор цифровой среды; в — аналитический модуль

Набор уравнения сошника (3) был произведен обычным приемом понижения порядка уравнения, применяемым при моделировании. На рисунке 1 схема описывает логическую архитектуру цифрового двойника, которая реализована в виде модульной программной системы. В отличие от физической реализации на аналоговых компонентах, современный цифровой двойник оперирует программными блоками обработки данных.

Структурно архитектура разделена на три функциональных домена:

- Модуль «А» — Виртуальный прототип объекта: Представляет собой математическое ядро, имитирующее физическую динамику сошника. Вместо операционных усилителей здесь используются блоки численного интегрирования, которые рассчитывают перемещение, скорость и ускорение рабочего органа в зависимости от его массы,

жесткости пружин и коэффициента демпфирования.

- Модуль «Б» — Генератор цифровой среды: Этот модуль отвечает за имитацию внешних воздействий. Он преобразует статические характеристики микрорельефа почвы в поток входных данных, используя алгоритмы формирующих фильтров. Это позволяет подавать на «вход» цифрового двойника случайные возмущения, идентичные тем, что возникают на реальном поле.

- Модуль «В» — Аналитический модуль: играет роль «виртуальных датчиков», которые в режиме реального времени снимают показатели работы модели. Он автоматически вычисляет среднеквадратическое отклонение глубины заделки, обеспечивая предиктивную оценку качества посева без проведения полевых замеров.

Были исследованы модели переднего и заднего сошников, причем значения  $T_1$  были приняты по данным лабораторных опытов. Значения  $\alpha$  и  $\beta$  формирующего фильтра вычислены для переднего и заднего сошников и скоростей 3,6; 7,2; 10,8 и 14,4 км/час. Для каждой из приведенных скоростей набирался свой формирующий фильтр. При изменении коэффициента усиления по входу 8 усилителя 7 (рис. 1) фиксировалось значение напряжения на выходе усилителя 13, которое соответствует дисперсии рассогласования. Таким образом были определены значения дисперсии рассогласования при различных значениях  $T_2$ . Кривые  $D_{\text{рас}}=f(T_2)$  для переднего сошника представлены на рисунке 2, для заднего — на рисунке 3.

Как видно из рисунка 2, копирующие свойства переднего сошника можно значительно улучшить, если изменить коэффициент  $T_2$  внесением в конструкцию демпфирующего элемента.

Оптимальным можно считать  $T_2=0,1\div 0,2$  сек. У заднего сошника оптимальными будут те же значения  $T_2$ . Однако с увеличением скорости движения численные значения дисперсии (рис. 3) существенно

повышаются. Поэтому введение в задний сошник демпфирующего элемента, рассчитанного для одной скорости движения, не дает существенных результатов при переходе на повышенную скорость.

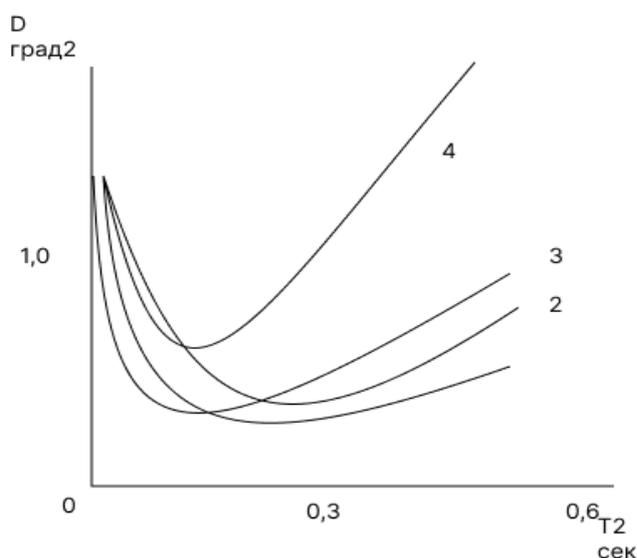


Рисунок 2. Изменение дисперсии рассогласования для переднего сошника: 1 –  $v = 3,6$  км/час; 2 –  $v = 7,2$  км/час; 3 –  $v = 10,8$  км/час; 4 –  $v = 14,4$  км/час.

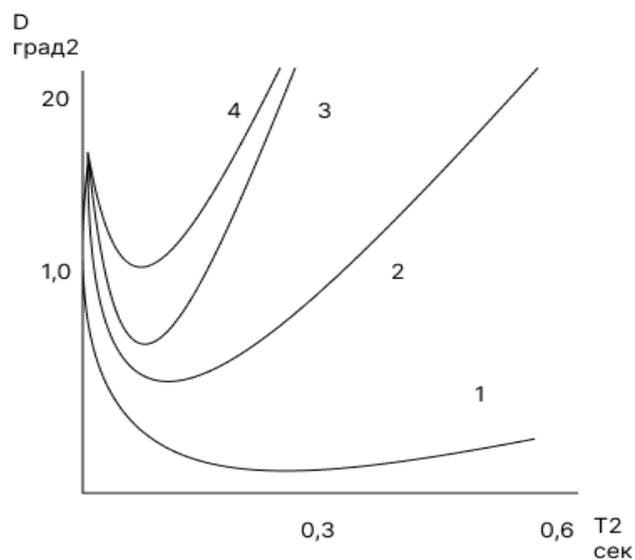


Рисунок 3. Изменение дисперсии рассогласования для заднего сошника: 1 –  $v = 3,6$  км/час; 2 –  $v = 7,2$  км/час; 3 –  $v = 10,8$  км/час; 4 –  $v = 14,4$  км/час.

Предлагаемая архитектура цифрового двойника дискового сошника является эффективным инструментом для бесконтактной настройки и проектирования высевающих систем. Применение технологии цифровых двойников позволяет минимизировать объем полевых испытаний, обеспечивая достижение заданных агротехнических показателей еще на этапе цифрового проектирования. Сопоставление данных функционирования двойника с экспериментальными данными подтверждает высокую адекватность предложенного подхода.

### Литература

1. Нагорский И. С. Анализ модели навесного пахотного агрегата на АММ при стационарном случайном воздействии. Записки ЛСХИ, т. 121, 1968.
2. Квасников В. П. Математическое моделирование динамических систем : учебное пособие / В. П. Квасников, С. И. Пчельников. — Москва : Инфра-Инженерия, 2021. — 156 с. — ISBN 978-5-9729-0732-8.
3. Корн Г. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. М., изд-во «Мир», 1968.
4. Лурье А. Б. Автоматизация сельскохозяйственных агрегатов. Л., изд-во «Колос», 1967.
5. Ладик Е. П. Анализ на ЭЦВМ и АММ моделей сошниковых систем зерновых сеялок. Записки ЛСХИ, т. 138, 1969.
6. Повышение качества посева семян лука / В. С. Михайлов, Е. В. Козлова, А. А. Заболотная, Е. А. Кондобарова // Проблемы ресурсобеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: Материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 214-216.

### References

1. Nagorskij I. S. Analiz modeli navesnogo paxotnogo agregata na AMM pri stacionarnom sluchajnom vozdejstvii. Zapiski LSXI, t. 121, 1968.
2. Kvasnikov V. P. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskix sistem : uchebnoe posobie / V. P. Kvasnikov, S. I. Pchel`nikov. — Moskva : Infra-Inzheneriya, 2021. — 156 s. — ISBN 978-5-9729-0732-8.
3. Korn G. Modelirovanie sluchajny`x processov na analogovy`x i analogo-cifrovuy`x mashinax. M., izd-vo «Mir», 1968.
4. Lur`e A. B. Avtomatizaciya sel`skoxozyajstvenny`x agregatov. L., izd-vo «Kolos», 1967.
5. Ladik E. P. Analiz na E`CzVM i AMM modelej soshnikovuy`x sistem zernovy`x seyalok. Zapiski LSXI, t. 138, 1969.
6. Povy`shenie kachestva poseva semyan luka / V. S. Mixajlov, E. V. Kozlova, A. A. Zabolotnaya, E. A. Kondobarova // Problemy` resursoobespechennosti i perspektivy` razvitiya agropromy`shlennogo kompleksa: Materialy` nacional`noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 01 oktyabrya 2021 goda. – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvenny`j agrarny`j universitet im. Imperatora Petra I, 2021. – S. 214-216.