

ХАРАКТЕРИСТИКА ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТУ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

CHARACTERISTICS OF EXTERNAL INFLUENCES ON THE OPERATION OF MACHINE-TRACTOR UNITS

С.И. КАМБУЛОВ, д.т.н.

В.Б. РЫКОВ, д.т.н.

И.В. БОЖКО, к.т.н.

В.В. КОЛЕСНИК

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград,
Россия, kambulov.s@mail.ru

S.I. KAMBULOV, DSc in Engineering

V.B. RYKOV, DSc in Engineering

I.V. BOZHKO, PhD in Engineering

V.V. KOLESNIK

The Federal State Budget Scientific Institution «Agrarian Science
Center «Donskoy», Zernograd, Russia, kambulov.s@mail.ru

Наиболее существенной особенностью работы сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов является случайный характер внешних воздействий, который определяет их выходные показатели. Основной задачей теории сложных систем следует считать разработку методов, позволяющих на основе их функционирования получить характеристики отдельных элементов и анализа взаимодействия между этими элементами и внешней средой, определение характеристик системы в целом. Цель исследования – анализ характеристик внешних воздействий как реакции на работу машинно-тракторных агрегатов. При решении многих задач земледельческой механики (исследования технологических и производственных процессов, построение моделей и синтез параметров рабочих органов и агрегатов) необходимо учитывать внешние факторы, которыми обуславливаются главные закономерности различных процессов. Процесс работы агрегата можно представить в виде множества состояний – векторов выходных величин: агротехнических, технологических, кинематических, энергосиловых и т.д. Роль входных величин играют внешние условия и управляющие воздействия, которые также обладают определенным множеством состояний. Внешними воздействиями на агрегат являются технологические, эксплуатационные и конструктивные факторы, к числу которых можно отнести сопротивление почвы, профиль поверхности поля, физико-механические свойства обрабатываемого материала (плотность почвы, влажность почвы и др.), техническое состояние рабочих органов машин, глубина обработки. С увеличением скорости движения уменьшается корреляционная связь между сечениями случайной функции. При увеличении скорости движения значения спектральной плотности уменьшаются, а ее максимальное значение смещается в сторону более высоких частот; разброс значений случайной функции относительно математического ожидания увеличивается с увеличением скорости агрегата; по корреляционным функциям и спектральным плотностям можно установить основные параметры случайных процессов, дисперсии, средние квадратические отклонения, преобладающие в процессе частоты и соответствующие им периоды, распределения дисперсий по частотам, которые необходимы для установления параметров выходных показателей, характеризующих уровень функционирования сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов.

Ключевые слова: внешнее воздействие, машинно-тракторный агрегат, корреляционная функция, спектральная плотность, тяговое сопротивление.

The most significant feature of the operation of agricultural machine-tractor aggregates is the random nature of external influences, which determines its output indices. The main task of the theory of complex systems should be considered the development of methods that allow on the basis of their functioning to obtain the characteristics of individual elements and analyze the interaction between these elements and the external environment, to determine the characteristics of the system as a whole. The purpose of the study is to analyze the characteristics of external influences as a reaction to the operation of machine-tractor units. When solving many problems of agricultural mechanics (researching technological and production processes, building models and synthesizing the parameters of working organs and aggregates), it is necessary to take into account the external factors that determine the main regularities of various processes. The process of operation of the unit can be represented in the form of a set of states - vectors of output quantities: agrotechnical, technological, kinematic, energy-power and so on. The role of input quantities is played by external conditions and control actions, which also have a certain set of states. External influences on the unit are technological, operational and constructive factors, the number of which include soil resistance, the surface profile of the field, the physical and mechanical properties of the material being processed (soil density, soil moisture, etc.), the technical condition of the machine working bodies, and the depth of processing. As the speed of motion increases, the correlation between the sections of the random function decreases. As the speed of motion increases, the spectral density decreases, and its maximum value shifts towards higher frequencies; spread of the values of random function with respect to the mathematical expectation increases with increasing aggregate speed; by correlation functions and spectral densities, it is possible to establish the main parameters of random processes, variances, the mean square deviations prevailing in the frequency process and the corresponding periods, the dispersion distributions over frequencies that are necessary to establish the parameters of the output indicators characterizing the level of functioning of agricultural machine-tractor aggregates.

Keywords: external influence, machine-tractor unit, correlation function, spectral density, traction resistance.

Введение

Сельскохозяйственные машинно-тракторные агрегаты (МТА) представляют собой сложные динамические системы, работающие в условиях изменяющихся внешних воздействий. Разнородность назначения элементов этих сложных систем, наличие большого количества действующих на них факторов, функционирование в случайных условиях приводит к разнообразию описания их элементов.

Основной задачей теории сложных систем следует считать [1–3] разработку методов, позволяющих на основе их функционирования получение характеристик отдельных элементов и анализа взаимодействия между этими элементами и внешней средой, определение характеристик системы в целом. Единственным методом, существующим в настоящее время и позволяющим находить характеристики сложных систем, является метод машинного моделирования.

Наиболее существенной особенностью работы сельскохозяйственных МТА является случайный характер внешних воздействий, который определяет их выходные показатели.

Второй особенностью работы сельскохозяйственных МТА является их многомерность, т.е. наличие взаимосвязанных входных и выходных переменных, число которых зависит от типов агрегатов, условий работы и др. Сложность изучения таких систем состоит в том, что каждое входное воздействие может оказывать влияние на несколько выходных показателей.

Третьей особенностью сельскохозяйственных МТА является вариативность их параметров во времени, что изменяет закономерности внешних воздействий на них, а следовательно, и на выходные показатели.

К особенностям функционирования сельскохозяйственных МТА следует отнести и то, что наиболее полную и достоверную информацию о реальных ситуациях их работы можно получить в результате проведения экспериментов. Но никакое множество реализаций случайного процесса не может дать исчерпывающую информацию о процессе, так как количество реализаций всегда ограничено [4, 5]. Поэтому реально всякая статистическая характеристика, полученная аппаратным путем, отличается от вероятностной (теоретической). Найденную статистическую характеристику принимают за вероятностную и назначают оценки, т.е. всегда имеется некоторая доля ошибок.

Цель исследования

Целью исследования является анализ характеристик внешних воздействий как реакции на работу МТА.

Материалы и методы

При решении многих задач земледельческой механики (исследования технологических и производственных процессов, построение моделей и синтез параметров рабочих органов и агрегатов) необходимо учитывать внешние факторы, которыми обуславливаются главные закономерности различных процессов. Все технологические, эксплуатационные и технико-экономические параметры, связанные с условиями работы агрегатов, относятся к категории случайных: к многомерным случайным величинам (при изучении статических моделей) и случайным функциям (при изучении динамики процессов). При этом возникает необходимость статистического описания характеристик внешних условий и процессов [6].

Процесс работы агрегата можно представить в виде множества состояний – векторов выходных величин: агротехнических, технологических, кинематических, энерго-силовых и т.д. Роль входных величин играют внешние условия и управляющие воздействия, которые также обладают определенным множеством состояний.

При этом, в любой момент времени на достаточно большом почвенном массиве можно отыскать большое число ограниченных по размерам участков со статистически изотропными агротехническими и физическими характеристиками, обеспечивающими определенную однородность различных показателей машины. Аналогично представлениям статистической физики [7] линейный l_i и временной τ_i масштабы этих участков (τ_i – время, в течение которого сохраняется стационарное состояние физических параметров или показателей работы) будут характеризовать стационарную микроструктуру процесса, статистические параметры которой не зависят от времени. Тогда нестационарный процесс как случайный поток можно трактовать как некоторый квазистационарный сигнал, обладающий рядом характерных стационарных структур, которые связаны с временным его масштабом и скачком сменяют друг друга.

Результаты и обсуждения

Внешними воздействиями на агрегат являются технологические, эксплуатационные

и конструктивные факторы, к числу которых можно отнести сопротивление почвы, профиль поверхности поля, физико-механические свойства обрабатываемого материала (плотность почвы, влажность почвы и др.), техническое состояние рабочих органов машин, глубину обработки и т.д.

Из числа входных воздействий на МТА многие исследователи выделяют тяговое сопротивление и профиль поверхности поля, так как они существенно влияют на работу сельскохозяйственных агрегатов, снижают стабильность выполняемых технологических процессов, изменяют колебания машин, влияют на надежность их работы, повышают динамичность процессов.

На рис. 1 и 2 представлены фрагменты изменения тягового сопротивления агрегатов на базе трактора Т-150 на пахоте на глубину 20...22 см и на посеве зерновых культур при скорости движения соответственно 2 и 2,5 м/с.

Из рисунков видно, что каждая реализация изменяется в определенных пределах и имеет вполне определенное среднее значение. Во многих практических случаях (например, для определения возможностей агрегатирования с различными типами МТА) этих числовых характеристик вполне достаточно для оценки агрегата.

Однако известно [5, 8–11], что наиболее полными, исчерпывающими характеристиками случайных явлений являются законы их распределений, корреляционные функции и спектральные плотности.

На рис. 3 и 4 приведены плотности распределения тягового сопротивления агрегатов на базе трактора Т-150 и их динамика в зависимости от режимов работы МТА.

Выравнивание эмпирических частот экспериментальных данных проводилось с помощью закона нормального распределения:

$$f(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left(-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (1)$$

где σ_x – среднее квадратическое отклонение случайной величины; m_x – математическое ожидание случайной величины.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что при изменении скорости движения агрегата Т-150 + ПЛП 6-35 от 2,0 до 2,79 м/с изменяются вероятностные характеристики тягового сопротивления. Математическое ожидание увеличивается от 24,4 до 31,2 кН, или на

29 %. При этом темп изменения тягового сопротивления агрегата составляет около 9 % на каждый километр увеличения скорости. Значительно увеличивается разброс тягового сопротивления. Так, среднее квадратическое отклонение увеличивается от 4,54 кН при скорости 2,0 м/с до 6,80 кН при скорости 2,84 м/с.



Рис. 1. Фрагмент изменения тягового сопротивления плуга (Т-150+ПЛП-6-35)



Рис. 2. Фрагмент изменения тягового сопротивления сеялки (Т-150+3СЗ-3,6)

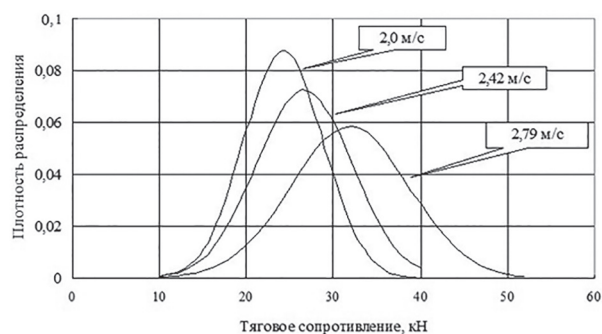


Рис. 3. Плотность распределения тягового сопротивления плуга

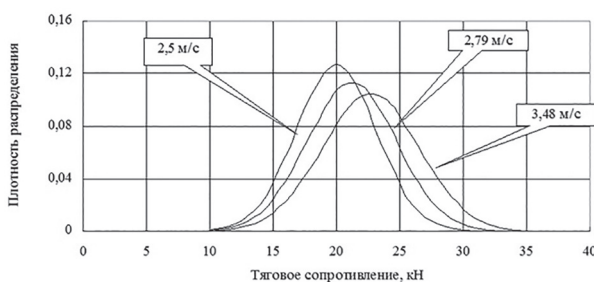


Рис. 4. Изменение плотности распределения тягового сопротивления посевного агрегата

При этом коэффициент вариации изменяется в пределах 18,0...22,0 %.

На посеве (агрегат Т-150+3СЗ-3,6) скорость движения изменялась от 2,5 до 3,48 м/с. Общие закономерности динамики параметров распределения тягового сопротивления такие же, как и на пахоте, т.е. с увеличением скорости движения агрегата увеличивается тяговое сопротивление и его разброс относительно математического ожидания. Так, математическое ожидание изменяется в пределах 20,1...23,4 кН, среднее квадратическое отклонение – в пределах 3,1...3,84 кН. Прирост тягового сопротивления на каждый километр скорости составляет 4,6 %. Коэффициент вариации увеличивается незначительно и составляет 14...16 %.

Корреляционные функции тягового сопротивления пахотного и посевного агрегатов приведены на рис. 5 и 6.

Кривые корреляционных функций, построенных по экспериментальным данным, имеют периодические составляющие, поэтому для их аппроксимации выбрано выражение, имеющее в своем составе периодическую функцию:

$$K_x(\tau) = D_x e^{-\alpha\tau} \cos\beta\tau, \quad (2)$$

где α – коэффициент, характеризующий интенсивность затухания корреляционной функции; β – коэффициент, характеризующий среднюю

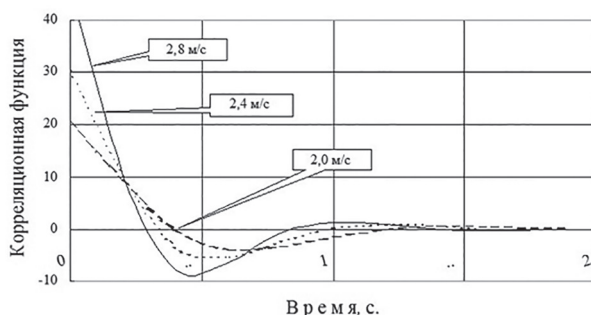


Рис. 5. Корреляционные функции тягового сопротивления плуга

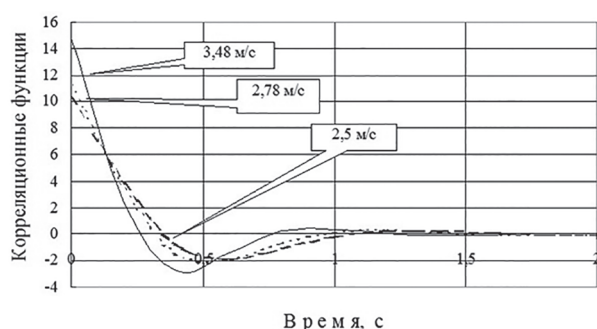


Рис. 6. Корреляционные функции тягового сопротивления посевного агрегата

частоту периодической составляющей случайного процесса; D_x – дисперсия случайного процесса.

Коэффициенты α и β определялись по следующим зависимостям [12, 13]:

$$\beta = \frac{\pi}{2\tau_k}; \quad \alpha = \frac{1}{\tau_1} \ln \left| \frac{\cos\beta\tau_1}{R_x(\tau_1)} \right|, \quad (3)$$

где τ_k – длительность корреляционной связи (абсцисса первого пересечения кривой корреляционной функции с осью абсцисс); τ_1 , $R_x(\tau_1)$ – абсцисса и значение первого минимума корреляционной функции.

Анализ характера изменения полученных кривых корреляционных функций показывает, что режимы работы агрегата оказывают существенное влияние на параметры корреляционных функций.

Так дисперсия случайного процесса, которая равна корреляционной функции при $\tau = 0$, с увеличением скорости движения увеличивается на пахоте с 20,6 кН² (при скорости движения агрегата 2,0 м/с) до 46,2 кН² (при скорости движения агрегата 2,8 м/с), что составляет 224 %. На посеве эти показатели соответственно равны 10,2 кН² (при скорости движения 3,2 м/с) и 14,75 кН² (при скорости движения 3,84 м/с), увеличение на 45 %.

Динамичность процесса с увеличением скорости движения тоже увеличивается, о чем можно судить по времени корреляционной связи между сечениями корреляционной функции. Так, на пахоте время корреляционной связи при скорости движения 2,8 м/с составляет 0,30 с, а при скорости движения 2,0 м/с – 0,42 с. Эти же показатели на посеве соответственно равны 0,27 (при скорости движения 3,48 м/с) и 0,38 (при скорости движения 2,5 м/с).

Изменение спектральных характеристик тягового сопротивления пахотных и посевных агрегатов показано на рис. 7 и 8.

Спектральные плотности были получены путем функционального преобразования корреляционной функции (2) по Фурье, в результате которого получена следующая формула для их определения:

$$S_x(\omega) = \frac{2\alpha}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2) + 4\alpha^2\beta^2}, \quad (4)$$

где ω – частота.

Анализ кривых спектральных плотностей изменения тягового сопротивления пахотных и посевных агрегатов в зависимости от скоро-

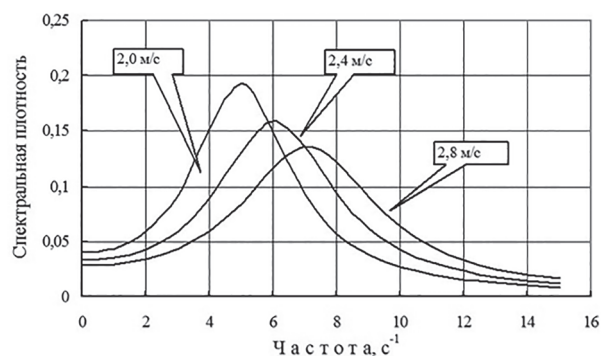


Рис. 7. Изменение спектральной плотности на пахоте

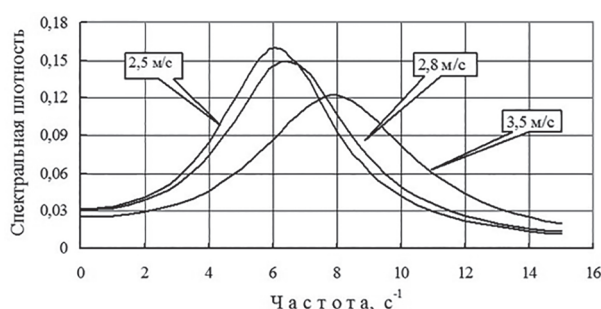


Рис. 8. Изменение спектральной плотности тягового сопротивления посевного агрегата

сти движения МТА показывает, что с увеличением скорости движения значение спектральной плотности уменьшается, а ее максимум смещается в сторону более высоких частот. Так, на пахоте при скорости движения 2,0 м/с максимум спектральной плотности соответствует частоте $4,95 \text{ с}^{-1}$, а при скорости движения 2,8 м/с – $7,21 \text{ с}^{-1}$. На посеве эти показатели соответственно равны $6,1 \text{ с}^{-1}$ (при скорости движения 2,5 м/с) и $7,9 \text{ с}^{-1}$ (при скорости движения 3,48 м/с). Частота среза спектральной плотности для обоих случаев почти одинакова и составляет $14...15 \text{ с}^{-1}$, а частоты, которым соответствует наибольшая спектральная плотность, изменяются в пределах: на пахоте $5...7 \text{ с}^{-1}$, на посеве $6...8 \text{ с}^{-1}$. Основная доля дисперсий на пахоте при скорости движения 2,0 м/с приходится на диапазон частот $4...6 \text{ с}^{-1}$, при скорости движения 2,8 м/с – на диапазон $5,5...8,8 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, при повышении скорости движения спектральная плотность становится шире, корреляционная функция при этом имеет меньшее время корреляционной связи между сечениями.

Следовательно, с увеличением скорости движения случайная составляющая процесса усиливается. Такой же характер протекания имеет спектральная плотность тягового сопротивления посевного агрегата.

Период колебаний случайной функции, который соответствует максимальным значениям спектральной плотности, можно определить по формуле $T = 2\pi/\omega$. На пахоте при скорости движения агрегата 2,0 м/с этот период составляет 1,26 с, а при скорости движения агрегата 2,8 м/с – 0,86 с. На посеве эти показатели соответственно равны 1,03 с (при скорости 2,5 м/с) и 0,79 с (при скорости 3,5 м/с). Таким образом, с увеличением скорости движения период колебаний уменьшается.

Основные вероятностные характеристики профиля поверхности стерни в зависимости от скорости движения приведены на рис. 9–11.

Характеристиками профиля поверхности стерни, обработанной противозерозийными машинами, являются высота неровностей, длина

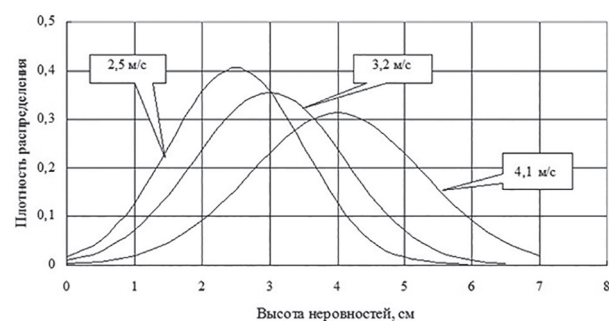


Рис. 9. Плотность распределения высоты неровностей поверхности стерни

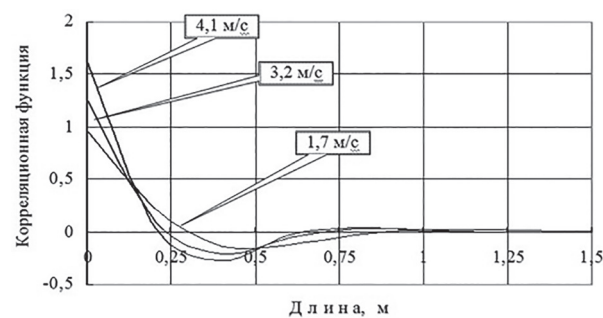


Рис. 10. Корреляционные функции профиля поверхности стерни

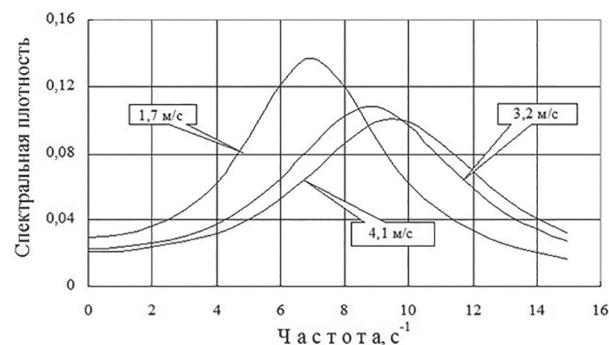


Рис. 11. Спектральные плотности профиля поверхности стерни

неровностей, а также параметры корреляционных функций и спектральных характеристик. Характер протекания приведенных характеристик значительно меняется с изменением скорости движения агрегата. Аргументом корреляционной функции является длина.

Спектральная плотность с увеличением скорости движения уменьшается, а ее максимальное значение смещается в сторону более высоких частот.

При этом, основной спектр дисперсий при скорости движения 1,7 м/с заключен в диапазоне частот 6...8 с⁻¹, а при скорости движения 4,1 м/с – в диапазоне 8...2 с⁻¹. Длина, соответствующая максимальному значению спектральной плотности ($L = 2\pi/\omega$), при скорости движения 1,7 м/с равна 0,9 м, а при скорости движения 4,1 м/с – 0,66 м. Эти размеры сравнимы с габаритами рабочих органов машин и длиной опорной поверхности опорных колес, следовательно, профиль поверхности поля будет вызывать интенсивные воздействия на МТА. Высота неровностей может быть установлена из корреляционной функции как $6\sigma_h = 5,76$ см (при скорости 1,7 м/с) и $6\sigma_h = 7,62$ см (при скорости 4,1 м/с). При этом среднеквадратическое отклонение определяется как корень квадратный из значений корреляционной функции при нулевом значении аргумента.

Выводы

Анализируя общие закономерности внешних воздействий, можно сделать следующие выводы:

- режимы работы МТА оказывают существенное влияние на параметры входных воздействий;
- с увеличением скорости движения уменьшается корреляционная связь между сечениями случайной функции;
- при увеличении скорости движения значения спектральной плотности уменьшаются, а ее максимальное значение смещается в сторону более высоких частот;
- разброс значений случайной функции относительно математического ожидания увеличивается с увеличением скорости агрегата;
- по корреляционным функциям и спектральным плотностям можно установить основные параметры случайных процессов, дисперсии, среднеквадратические отклонения, преобладающие в процессе частоты и соответствующие им периоды, распределения дис-

персий по частотам и др., которые необходимы для установления параметров выходных показателей, характеризующих уровень функционирования сельскохозяйственных МТА.

Литература

1. Камбулов С.И. Механико-технологические основы повышения уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов. Ростов н/Д: Изд-во ООО «Терра Принт», 2006. 304 с.
2. Калашников В.В. Сложные системы и методы их анализа. М.: Знание, 1980. 63 с.
3. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
4. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат, 1982. 319 с.
5. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 1981. 382 с.
6. Погорелый Л.В. Системный принцип прогнозирования типажа свеклоуборочных машин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1971. № 11. С. 45–50.
7. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. М.: Гостехиздат, 1946. 232 с.
8. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. Л.: Колос, 1978. 295 с.
9. Иофинов С.А. Эксплуатация машинно-тракторных агрегатов. М.: Колос, 1974. 475 с.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977. 478 с.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 572 с.
12. Кербер В.Н. Повышение уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов на основе их моделирования: дис. ... д-ра техн. наук. С-Петербург, 1993. 435 с.
13. Ровный И.В., Борзов Н.А., Ровная М.И. Исследование характера неровностей поверхности поля в зависимости от режимов работы противозрозийных орудий // Вопросы механизации сельскохозяйственного производства Северного Казахстана. Сборник научных работ ЦилинНИИМЭСХ. Выпуск III. Алма-Ата: Кайнар, 1976. С. 64–72.

References

1. Kambulov S.I. Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy povysheniya urovnya funktsionirovaniya sel'skokhozyaystvennykh agregatov [Mechanic-technological basis for increasing the level of functioning of agricultural units]. Rostov n/D:

- Izd-vo OOO «Terra Print» Publ., 2006. 304 p.
2. Kalashnikov V.V. Slozhnye sistemy i metody ikh analiza [Complex systems and methods for their analysis]. Moscow: Znanie Publ., 1980. 63 p.
3. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnykh system [Modeling of complex systems]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 400 p.
4. Mirskiy G.Ya. Kharakteristiki stokhasticheskoy vzaimosvyazi i ikh izmereniya [Characteristics of stochastic relationships and their measurement]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 319 p.
5. Lur'e A.B. Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov [Statistical dynamics of agricultural aggregates]. Leningrad: Kolos Publ., 1981. 382 p.
6. Pogorelyy L.V. System principle of forecasting the type of beet harvesters. Mekhanizatsiya, i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva. 1971. No 11, pp. 45–50 (in Russ.).
7. Bogolyubov N.N. Problemy dinamicheskoy teorii v statisticheskoy fizike [Problems of dynamical theory in statistical physics]. Moscow: Gostekhzdat Publ., 1946. 232 p.
8. Ageev L.E. Osnovy rascheta optimal'nykh i dopuskaemykh rezhimov raboty mashinno-traktornykh agregatov [Basics of calculating the optimal and acceptable modes of operation of machine and tractor units]. Leningrad: Kolos Publ., 1978. 295 p.
9. Iofinov S.A. Ekspluatatsiya mashinno-traktornykh agregatov [Operation of machine and tractor units]. Moscow: Kolos Publ., 1974. 475 p.
10. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1977. 478 p.
11. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey [Theory of probability]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 572 p.
12. Kerber V.N. Povyshenie urovnya funktsionirovaniya sel'skokhozyaystvennykh agregatov na osnove ikh modelirovaniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Increasing the level of functioning of agricultural units on the basis of their modeling: dissertation for degree of Doctor of Technical Sciences]. S-Peterburg, 1993. 435 p.
13. Rovnyy I.V., Borzov N.A., Rovnaya M.I. Investigation of the nature of the unevenness of the surface of the field, depending on the operation modes of the erosion control tools. Voprosy mekhanizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva Severnogo Kazakhstan. Sbornik nauchnykh rabot Tsilin-NIIMESKh [Questions of mechanization of agricultural production in Northern Kazakhstan. Collection of scientific papers of Scientific Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture of the North-West]. Vypusk III. Alma-Ata: Kay-nar, 1976, pp. 64–72 (in Russ.).