

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРАКТОРА, ОСНАЩЕННОГО УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМ МЕХАНИЗМОМ ПРИ АГРЕГАТИРОВАНИИ С СЕЯЛКОЙ

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A TRACTOR EQUIPPED WITH AN ELASTIC-DAMPING MECHANISM WHEN AGGREGATED WITH A SEEDER

С.Е. СЕНЬКЕВИЧ, К.Т.Н.
Е.Н. ИЛЬЧЕНКО
И.С. АЛЕКСЕЕВ

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия,
sergej_senkevich@mail.ru

S.E. SEN'KEVICH, PhD in Engineering
YE.N. IL'CHENKO
I.S. ALEKSEYEV

Federal Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia,
sergej_senkevich@mail.ru

Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на работу трактора, является неустановившаяся нагрузка, возникающая при трогании, в начальный период разгона и торможения. Для уменьшения негативных последствий от таких нагрузок применяются упругодемпфирующие механизмы. Разработкой и изучением их применения ученые занимаются и сегодня.

В настоящей статье проведен анализ взаимной корреляционной функции и анализ взаимной спектральной плотности двух процессов: частоты вращения коленчатого вала двигателя и частоты вращения ведущего колеса. Этот анализ показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу силовой передачи колесного трактора тягового класса 1,4, в силовую передачу которого установлен упругодемпфирующий механизм. Исследования были проведены для условий работы трактора с сеялкой. Цель исследования заключалась в определении влияния упругодемпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с прицепной сеялкой.

В общем случае объектом исследования является процесс функционирования трактора тягового класса 1,4, который находится в агрегате с сеялкой. Анализ взаимной корреляционной функции двух процессов показал изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу. Отношение времени прохождения сигнала возмущений в опытном тракторе по отношению к серийному варианту по валопроводу при агрегатировании трактора с сеялкой уменьшается на 40,1 %. Анализ взаимной спектральной плотности показывает смещение частоты возмущающих воздействий по отношению к серийному варианту и уменьшение их величины при агрегатировании трактора с сеялкой на 33,3 %. Величина взаимной спектральной плотности меньше в опытном варианте трактора, что может означать то, что упругодемпфирующий механизм, как элемент силовой передачи, поглощает часть колебаний нагрузки и снижает их скорость распространения по валопроводу.

Ключевые слова: динамические процессы, упругодемпфирующий механизм, силовая передача трактора, взаимная корреляционная функция, взаимная спектральная плотность.

Для цитирования: Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Алексеев И.С. Результаты проведения экспериментальных исследований трактора, оснащенного упругодемпфирующим механизмом при агрегатировании с сеялкой // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 33–44. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-33-44.

One of the significant factors influencing the operation of the tractor is the unsteady load that occurs when starting off, during the initial period of acceleration and deceleration. The elastic-damping mechanisms are used to reduce the negative consequences of such loads. Scientists still develop and study their application.

In this article, the analysis of the cross correlation function and the analysis of the mutual spectral density of two processes were carried out. The analyzed processes were the engine crankshaft speed and the drive wheel speed. This analysis shows the change in the speed of the passing load frequencies along the shaft line of the traction class 1,4 wheeled tractor power transmission, where an elastic-damping mechanism is installed. The studies were carried out for the operating conditions of a tractor with a seeder. The purpose of the study was to determine the effect of the elastic-damping mechanism installed in the power transmission of a tractor on its operation with a trailed seeder.

In the general case, the object of research is the functioning of a tractor of traction class 1,4 process, which is located in a unit with a seeder. Analysis of the mutual correlation function of the two processes showed a change in the speed of the passing load frequencies along the shaft line. The ratio of the propagation time of the disturbance signal in the experimental tractor in relation to the production version along the shaft line when aggregating the tractor with the seeder decreases by 40,1 %. The analysis of the mutual spectral density shows a shift in the frequency of disturbing influences in relation to the serial version and a decrease in their value when the tractor is aggregated with a seeder by 33,3 %. The value of the mutual spectral density is lower in the experimental version of the tractor, which may mean that the elastic-damping mechanism, as an element of the power transmission, absorbs part of the load fluctuations and reduces their propagation speed along the shaft line.

Keywords: dynamic processes, elastic-damping mechanism, tractor power transmission, cross correlation function, mutual spectral density.

Cite as: S.E. Sen'kevich, YE.N. Il'chenko, I.S. Alekseyev Results of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism when aggregated with a seeder. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 33–44 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-33-44.

Введение

Повышение производительности технологических процессов и продление срока службы рабочих органов машин всегда было основными целями улучшения любого производства. Сельское хозяйство не является исключением. Так, например, на трактор действует ряд факторов, которые сокращают срок его службы и требуют больших расходов на содержание. Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на работу, является неустановившаяся нагрузка, возникающая при трогании, в начальный период разгона и при торможении агрегата. Для уменьшения негативных последствий от таких нагрузок применяются упругодемпфирующие механизмы (УДМ). Разработкой и изучением их применения ученые занимаются и в настоящее время.

Например, в работе [1] доказывается эффективность введения упругих элементов в ведомый диск. При проведении эксплуатационных испытаний было доказано что дополнительное демпфирование обеспечивает снижение резонансных колебаний со стороны дизельного двигателя в 1,5–2 раза, а в начальный период разгона помогают сделать включение сцепления более плавным и снижают пробуксовку ведомого диска на 12–20 %. При этом износ фрикционных накладок ведомых дисков снижается в среднем на 29,5 % по сравнению с серийными.

Увеличение производительности трактора в составе различных агрегатов возможно за счет увеличения рабочих скоростей, но это приводит к появлению повышенных динамических нагрузок. Для эффективного снижения динамических нагрузок на силовую передачу, авторы статьи [2] предлагают вводить упругие демпфирующие элементы (УДЭ) ближе к источникам колебаний, а именно к ведущим колесам. При проведении тяговых испытаний было выявлено, что при движении по стерне с использованием УДЭ максимальная тяговая мощность увеличивается с 25 до 26 кВт, буксование движителя снижается на 28 %, а удельный расход топлива – на 12,5 %.

В других работах [3, 4] также говорится, что применение упругого элемента уменьшает амплитуды колебаний коэффициента буксования, теоретическую и действительную скорости машинно-тракторного агрегата, что снижает крюковую нагрузку трактора и его колебания. Более равномерное распределение

нагрузки в трансмиссии позволяет стабилизировать нагрузочный режим двигателя, обеспечить снижение удельного расхода топлива и повысить долговечность деталей.

Для проверки эффективности установки УДЭ проводятся эксперименты на реальных тракторах и создаются математические модели. Создание моделей позволяет рассчитать силы, влияющие на отдельные узлы системы. Так, статья [5] рассматривает моделирование физических динамических процессов в силовых передачах транспортной техники, основное внимание уделяя применению этой методики расчета для процессов в коробке передач при переключениях передач под нагрузкой при прямом и реверсном включении. В то же время в работе [6] модель силовой передачи, созданная в среде визуального моделирования Matlab/Simulink, помогла определить оптимальные места установки УДЭ и их параметры для снижения динамической нагруженности.

Для более полных и достоверных результатов обычно применяются два вида исследований: экспериментальные и теоретические. В статье [7] представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования для сравнения характеристик серийного трактора и трактора с упругодемпфирующим механизмом. Адекватность модели была проверена и доказана ее возможность использования для получения рабочих характеристик. В результате было установлено, что угловая скорость коленчатого вала двигателя трактора с УДМ сразу выходит на значения 210–250 рад/с, в то время как в серийном агрегате эти значения достигаются через 8 с со снижением оборотов до 100 рад/с. На графиках характеристик опытного трактора резких скачков не наблюдается, а абсолютная величина линейной скорости выше.

Авторы статьи [8] доказывали эффективность применения газогидравлического упругодемпфирующего привода (УДП) на ведущих колесах трактора тягового класса 1,4. По результатам исследования, применение УДП эффективно, так как благодаря ему уменьшаются амплитуды колебаний остова в среднем до 60 % и амплитудные максимумы смещаются в более низкие диапазоны частот (0,2–1,8 Гц), снижается буксование в среднем на 10–12 %, повышается топливная экономичность трактора на 8–14 % и производительность – на 6–15 %.

Применение УДМ улучшает работу и составных сельскохозяйственных транспортно-технологических средств. Это было проверено авторами статьи [9], где при помощи методов математического моделирования и анализа доказывалось облегчение трогания составного транспортного средства при наличии упругодеформируемых сцепок. Этот эффект обуславливается заменой одновременного трогания секций на поочередное. Эффективное взаимодействие ходовой части машины с поверхностью земли также помогают увеличить производительность и снизить потребление топлива [10].

Проведенный обзор показывает актуальность исследований в области применения упругих элементов для снижения вибронегруженности тракторов и мобильных машин и элементов их силовых передач. Эти вопросы, исследуемые по всему миру, позволяют значительно улучшать параметры силовой передачи трактора.

Настоящая статья является продолжением исследования влияния упругодемпфирующего механизма в силовой передаче трактора малого класса тяги (14 кН) на различные его показатели. Устройство, работа и преимущества упругодемпфирующего механизма были подробно представлены в работах [11–13]. Продолжение исследований по изучению влияния механизма на работу силовой передачи представлено в работах [14–16]. В работах [17, 18] доказано, что использование упругодемпфирующего механизма позволило повысить производительность трактора более чем на 10 %; это снизило колебания внешней нагрузки на двигатель на 15–20 % и расход топлива – на 9 %. В работах [19, 20] обосновано, что упругодемпфирующий механизм в силовой передаче трактора устраняет резонансные режимы работы в зоне реальных колебаний внешней нагрузки.

В настоящей статье (опираясь на результаты экспериментальных измерений) проведен анализ взаимной корреляционной функции и анализ взаимной спектральной плотности двух процессов (частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущего колеса). Он показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу силовой передачи колесного трактора тягового класса 1,4, в силовую передачу которого установлен упругодемпфирующий механизм. Исследования были проведены для условий работы трактора с сеялкой. Экспериментальные данные, кото-

рые использовались при проведении расчетно-теоретические исследования по определению спектральных характеристик элементов УДМ в силовой передаче, были получены авторами и описаны в работах [12, 14, 17, 20]. Устройство и подробное описание упругодемпфирующего механизма приведено в работе [21] и защищено патентом на изобретение.

Цель исследований

Определение влияния упругодемпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с прицепной сеялкой.

Материалы и методы

В общем случае объектом исследования является технологический процесс функционирования трактора тягового класса 1,4, который находится в агрегате с сеялкой как технологической машиной.

Для проведения натурных измерений в рамках эксперимента по исследованию процесса функционирования трактора тягового класса 1,4 был выбран универсально-пропашной трактор Минского тракторного завода. Для создания экспериментального образца трактора-макета в силовой привод серийного трактора был установлен УДМ. Механизм выполнен с возможностью отключения (блокировки) для проведения сравнительных измерений. В собранном виде на тракторе элементы УДМ представлены на рис. 1. На рисунке видно расположение пневмогидроаккумулятора, дросселя, предохранительного клапана и масляного насоса на раме трактора.

При подготовке трактора были проведены техническое обслуживание и регулировка основных его узлов и агрегатов. Перечень операций соответствовал техническому уходу № 2.

Измерительная аппаратура и комплект первичных преобразователей

Для проведения измерений работы трактора, который находился в составе с сеялкой, применялась система автоматического накопления и обработки метрологической информации (САНиОМИ) мобильного исполнения. Все записывающее оборудование было установлено в кабине передвижной лаборатории на базе полноприводного автомобиля ГАЗ-66. САНиОМИ включает в себя комплексы аппаратных и программных средств (рис. 2).

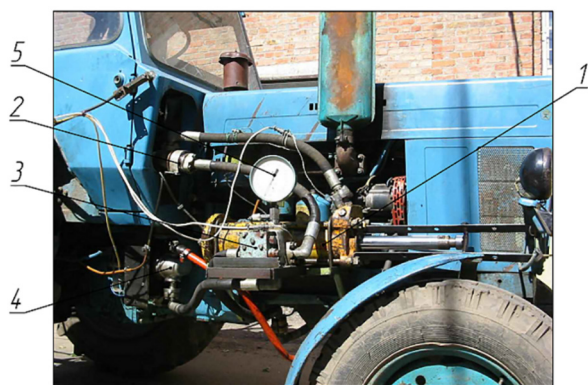


Рис. 1. Общий вид компоновки элементов УДМ на тракторе:

- 1 – пневмогидроаккумулятор; 2 – дроссель;
- 3 – блок предохранительных клапанов;
- 4 – масляный насос; 5 – манометр

Fig. 1. General view of the layout of the elements of the elastic-damping mechanism on the tractor:

- 1 – pneumatic hydroaccumulator; 2 – throttle;*
- 3 – block of safety valves; 4 – oil pump;*
- 5 – manometer*

САНиОМИ состоит из бортового компьютера, платы аналого-цифрового преобразования (АЦП), платы сопряжений, блока усилителя сигнала. Все элементы САНиОМИ смонтированы внутри передвижной лаборатории. Комплект первичных преобразователей (датчиков) установлен на исследуемом тракторе. Применяемая САНиОМИ с комплек-

том датчиков, установленных на исследуемый трактор, обеспечивает получение изменяющихся по времени опыта массивов мгновенных значений следующих параметров в цифровом виде: $P_{кр}$ – тяговое сопротивление на крюке трактора; $M_{кр}$ – крутящий момент на оси ведущего колеса трактора; $n_{ген}$ – частота вращения вала генератора трактора; $n_{шпмн}$ – частота вращения шестерни привода масляного насоса упругодемпфирующего механизма; $P_{масл}$ – давление масла в масляной магистрали (до дросселя) УДМ; $n_{кол}$ – импульсы оборотов путеизмерительного колеса трактора; $N_{кол}$ – импульсы оборотов ведущего колеса трактора; G_T – расход топлива.

Методика проведения полевых измерений трактора в составе с сеялкой

Изучить влияние параметров УДМ на показатели работы трактора при работе с прицепной сеялкой позволила методика проведения полевых исследований [22, 23]. Для проведения полевых экспериментальных исследований был подготовлен трактор-макет с УДМ в силовой передаче на базе трактора МТЗ-80 в составе с прицепной сеялкой СЗ-5,4А. Общий вид испытываемого трактора-макета в агрегате с прицепной сеялкой СЗ-5,4А и измерительным комплексом лаборатории ТЛ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66 представлен на рис. 3.

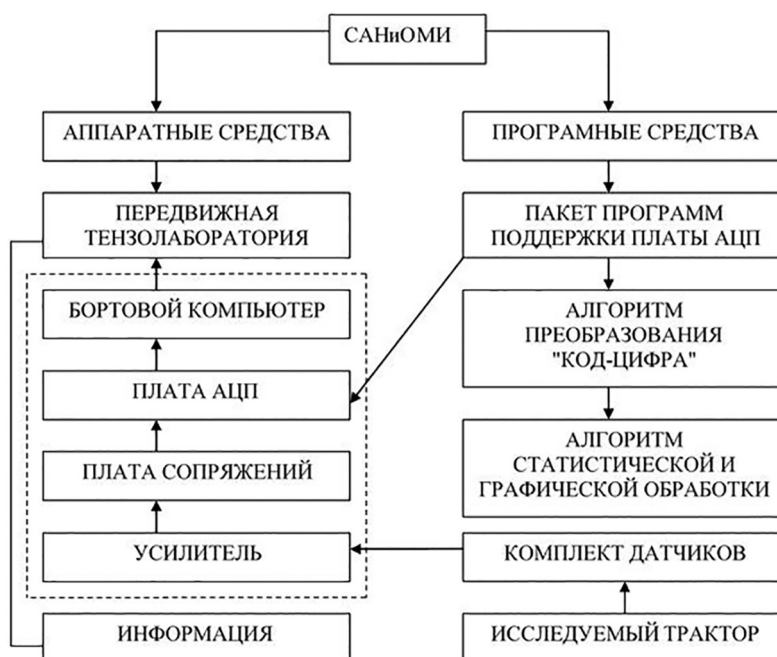


Рис. 2. Система автоматического накопления и обработки информации (САНиОМИ)

Fig. 2. System of automatic accumulation and processing of information (SAAPI)



Рис. 3. Общий вид испытываемого трактора-макета в агрегате с прицепной сеялкой СЗ-5,4А и измерительным комплексом лаборатории ТЛ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66

Fig. 3. General view of the tested tractor in a unit with a trailed seeder SZ-5.4A and a measuring complex of the TL-2 laboratory based on the GAZ-66 vehicle

Обеспечение электрической энергией измерительного оборудования в полевых условиях было осуществлено бензогенератором, расположенным в тензометрической лаборатории ТЛ-2. При выполнении измерений тензометрическая лаборатория передвигалась вместе с исследуемым трактором. За одну секунду до начала трогания трактора производилось включение регистрирующего оборудования САНиОМИ, которая регистрировала основные параметры, а также время опыта и пройденный путь. Обработка результатов эксперимента осуществлялась на персональном компьютере с использованием пакета программ [25].

В качестве эталонного трактора при проведении сравнительных измерений использовался тот же самый трактор, но с заблокированным УДМ. Управление трактором в обоих вариантах осуществлялось одним и тем же трактористом первого класса. Положение рычага управления подачей топлива соответствовало максимальному значению. Испытания проводились на следующих режимах: разгон и установившейся процесс движения, сопровождаются значительными колебаниями тяговой нагрузки. Записав параметры движения, удалось получить достоверные данные вероятностных характеристик процесса функционирования трактора при работе с сеялкой. Опираясь на методику проведения полевых исследований, были получены результаты, позволяющие оценить влияние параметров

УДМ на показатели работы трактора в агрегате с сеялкой. Измерительное оборудование позволило получить числовые временные ряды, на основе которых получены вероятностные характеристики процесса работы [25, 26].

Применяя классические методы анализа временных рядов, был проведен корреляционно-спектральный анализ, методика которого описана во многих работах [26–30]. Это позволяет оценить частотные составляющие при применении УДМ в силовой передаче трактора тягового класса 1,4 [31–34].

Для оценки сходства и различия двух процессов используют функцию взаимной корреляции (ВКФ). С помощью ВКФ можно измерить запаздывание во времени двух процессов. В нашем случае необходимо измерить скорость прохождения сигнала от датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя (ДЧВКВД) до датчика оборотов ведущего колеса трактора (ДОВКТ). Изменения сигнала являются случайными, однако неверно считать, что они не связаны между собой. Колебания нагрузки, проходящие по валопроводу, будут проходить через оба датчика. Таким образом, на одном из датчиков должен появиться сигнал, очень похожий на сигнал наблюдаемый на другом датчике (либо на ДЧВКВД, либо на ДОВКТ). Иначе говоря, имеется связь между двумя сигналами. Если вычислить ВКФ этих двух сигналов, то можно узнать величину временного запаздывания между сигналами. После этого легко определить скорость прохождения колебаний нагрузки по валопроводу. Корреляция между сигналами от датчиков при запаздывании на время τ_0 принимает максимальное значение. Отношение расстояния между датчиками к временному запаздыванию определяет скорость прохождения колебаний:

$$V(\omega) = \frac{D_{1-2}}{\tau_0}, \quad (1)$$

где $V(\omega)$ – скорость распространения колебаний (сигнала) по валопроводу, м/с; D_{1-2} – расстояние между датчиками-преобразователями сигнала, м; τ_0 – временное запаздывание сигнала, с.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены совмещенные графики изменения ВКФ частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса (далее используется название «угловых

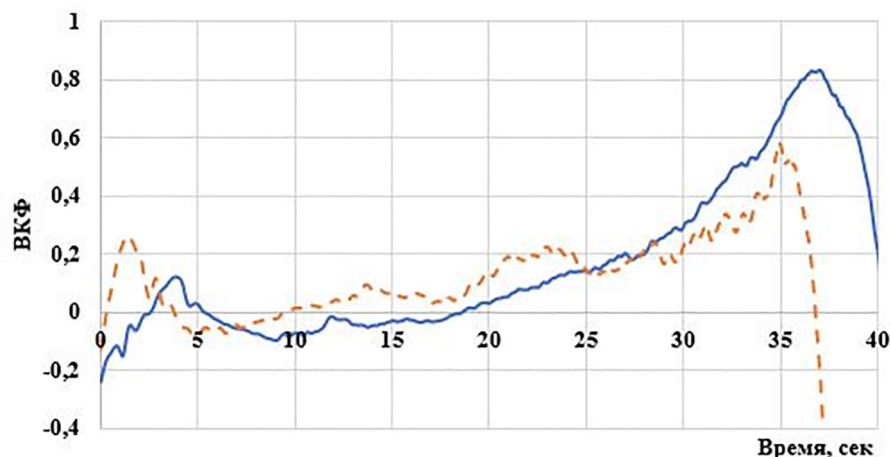


Рис. 4. Совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой (анализ сигнала от ведущего колеса к двигателю)

Fig. 4. Combined graphs of changes in the cross-correlation function of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder (signal analysis from the drive wheel to the engine)

скоростей») в опытном и серийном варианте для трактора во время работы в составе посевного агрегата, с учетом анализа сигнала от ведущего колеса к двигателю. Взаимная корреляционная функция угловых скоростей на рис. 4 и 5 обозначена для двух вариантов так: опытный вариант – сплошная линия; серийный вариант – прерывистая линия.

На рис. 5 представлены совмещенные графики изменения ВКФ частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса в опытном и серийном варианте для трактора

во время работы с сеялкой, с учетом анализа сигнала от двигателя к ведущему колесу.

Графики на рис. 4 и 5 показывают, что корреляция между частотой вращения коленвала двигателя и ведущим колесом (в прямом и обратном направлении) в опытном и серийном вариантах стремится к нулю или уходят из отрицательных значений в положительные значения. При работе трактора с сеялкой зависимости очень идентичны, однако имеются различия, которые характеризуют работу УДМ. Наблюдается отрицательная корреля-

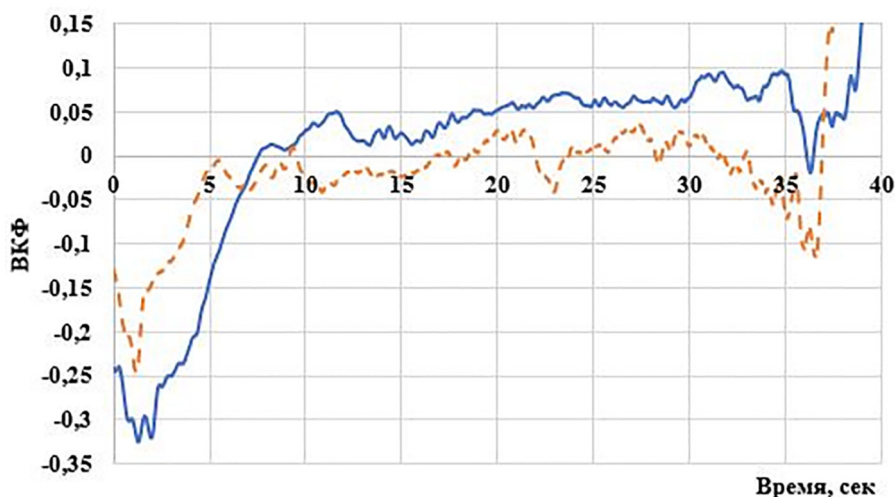


Рис. 5. Совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции угловых скоростей опытного и серийного тракторов при агрегатировании с сеялкой (анализа сигнала от двигателя к ведущему колесу)

Fig. 5. Combined graphs of changes in the cross-correlation function of angular velocities of an experimental and production tractors when aggregated with a seeder (analysis of the signal from the engine to the drive wheel)

ция в период трогания у опытного варианта в направлении от колеса к двигателю. Кривые ВКФ показывают, что механизм, работая как фильтр, реализует минимум своих возможностей при агрегатировании с сеялкой.

На рис. 6–8 представлены совмещенные графики изменения функции взаимной спектральной плотности (ВСП) частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса (далее используется название «угловых скоростей») опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой. Функция

ВСП угловых скоростей на рис. 6–8 обозначена для двух вариантов так: опытный вариант – сплошная линия; серийный вариант – прерывистая линия.

Графики на рис. 6–8 показывают смещение частот возмущающих воздействий и уменьшение их величины (действительной и мнимой части) в серийном варианте. При сравнении модуля взаимной спектральной плотности видны вершины на низкой и высокой частоте ($\omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 4,0 \text{ с}^{-1}$). Для серийного варианта это свидетельствует о том, что частоты

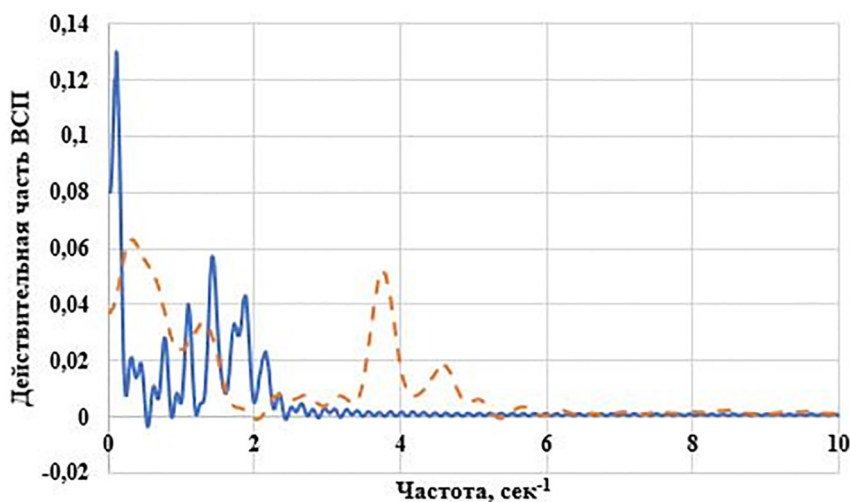


Рис. 6. Совмещенные графики изменения действительной части функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой

Fig. 6. Combined graphs of changes in the real part of the function of the mutual spectral density of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder

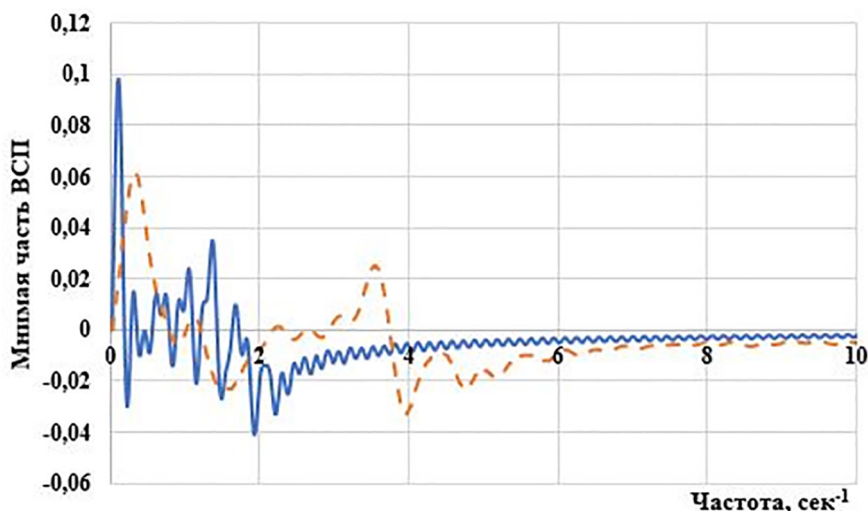


Рис. 7. Совмещенные графики изменения мнимой части функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой

Fig. 7. Combined graphs of changes in the imaginary part of the function of the mutual spectral density of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder

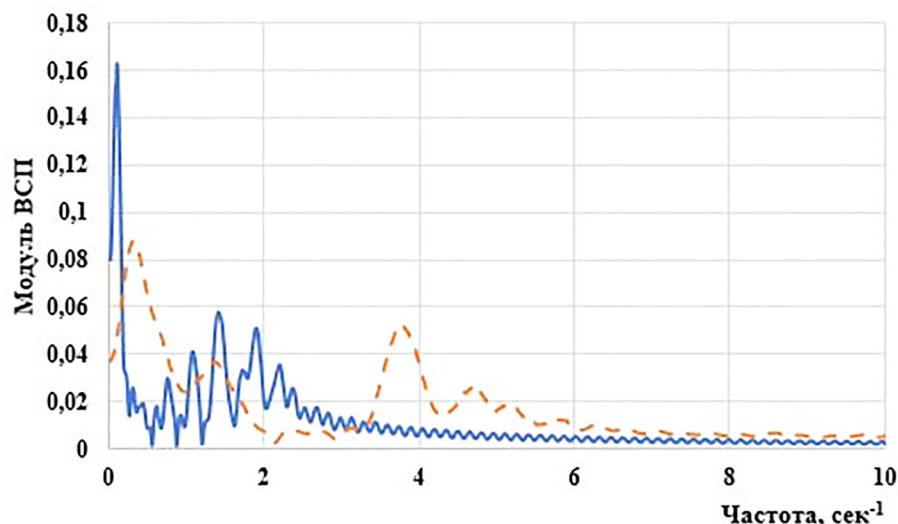


Рис. 8. Совмещенные графики зависимости модуля функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой

Fig. 8. Combined graphs of the dependence of the modulus of the function of the mutual spectral density of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder

(проходят) формируются не только в двигателе, но и в силовой передаче. В опытном варианте все вершины спектральной плотности находятся в диапазоне частоты до $\omega = 2,0 \text{ с}^{-1}$.

Выводы

Анализ ВКФ двух процессов (частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущего колеса) показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу (определяемых по формуле (1)). Отношение времени прохождения (прохождение сигнала в опытном тракторе по отношению к серийному варианту) возмущений по валопроводу при агрегатировании трактора с сеялкой уменьшается на 40,1 %. Это доказывает, что упругодемпфирующий механизм поглощает частоты нагрузки и снижает скорость их распространения по валопроводу.

Анализ взаимной спектральной плотности (частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущего колеса), показывает смещение (по отношению к серийному варианту) частоты возмущающих воздействий и уменьшение их величины при агрегатировании трактора с сеялкой на 33,3 %. Величина взаимной спектральной плотности меньше в опытном варианте трактора, что может означать то, что упругодемпфирующий механизм, как элемент силовой передачи, поглощает часть колебаний нагрузки по распространяющимся по валопроводу.

Литература

1. Поливаев, О.И., Ведринский О.С., Дерканосова Н.М. Повышение долговечности сцепления тракторов за счет упругофрикционного демпфера // Наука и образование в современных условиях: материалы международной научной конференции: Воронеж, 2016. С. 226–230.
2. Polivaev O.I., Gorban L.K., Vorokhobin A.V., Vedrinsky O.S. Decrease of dynamic loads in mobile energy means // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042083.
3. Нехорошев Д.Д., Коновалов П.В., Попов А.Ю., Нехорошев Д.А. Особенности улучшения работы машинно-тракторного агрегата за счет снижения колебания нагрузки // Известия НВ АУК. 2019. № 1 (53). С. 345–351. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-45.
4. Нехорошев Д.Д., Нехорошев Д.А. Совершенствование конструкции механической трансмиссии колесного трактора // Развитие АПК на основе принципов рационального природопользования и применения конвергентных технологий: материалы Международной научно-практической конференции, проведенной в рамках Международного научно-практического форума, посвященного 75-летию образования Волгоградского государственного аграрного университета, Волгоград, 30 января 2019 г. Волгоград: Волго-

- градский государственный аграрный университет, 2019. С. 164–168.
5. Худорожков С.И., Красильников А.А. Численное моделирование динамических процессов в трансмиссии транспортных средств // Известия МГТУ МАМИ. 2021. № 1 (47). С. 38–45. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-38-45.
 6. Бондаренко, Д.Б., Краснокутский В.Ю. Оптимизация упруго-инерционных параметров трансмиссии ТТС тягового класса 0,4 для снижения общей вибранагруженности // XXIV Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: сборник материалов конференции. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. С. 72–73.
 7. Кравченко В.А., Дурягина В.В., Гамolina И.Э. Анализ результатов аналитических исследований пахотного агрегата на базе трактора класса 1,4 с УДМ в трансмиссии // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 37. С. 36–42.
 8. Бабанин Н.В., Поливаев О.И. Экспериментальные исследования на плавность хода, производительность и топливную экономичность машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4, оборудованного газогидравлическим упруго-демпфирующим приводом // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 3. С. 112–118.
 9. Попов И.П. Упругие сцепки составного сельскохозяйственного транспортно-технологического средства // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 21–30. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-21-30.
 10. Melikov I. et al. Traction and energy efficiency tests of oligomeric tires for category 3 tractors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 403. P. 012126. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012126.
 11. Сенькевич С.Е., Васильев Е.К., Сенькевич А.А. Результаты применения гидропневматического демпфирующего устройства в силовой передаче трактора малого класса тяги для улучшения показателей работы // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4 (21). С. 128–139.
 12. Senkevich S., Kravchenko V., Duriagina V., Senkevich A., Vasilev E. Optimization of the Parameters of the Elastic Damping Mechanism in Class 1,4 Tractor Transmission for Work in the Main Agricultural Operations // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) Intelligent Computing & Optimization. ICO 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2018. V. 866. P. 168–177. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_17.
 13. Senkevich S.E., Sergeev N.V., Vasilev E.K., Godzhaev Z.A., Babayev V. Use of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN): Theoretical and Experimental Substantiation // (Chapter 6) Handbook of Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2019. P. 149–179. DOI: 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch006.
 14. Сенькевич С.Е. Анализ результатов экспериментальных исследований трактора класса 1,4 модернизированного гидропневматическим демпферным устройством в силовой передаче // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 3 (24). С. 8–16.
 15. Senkevich S., Duriagina V., Kravchenko V., Gamolina I., Pavkin D. Improvement of the Numerical Simulation of the Machine-Tractor Unit Functioning with an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN) // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) Intelligent Computing and Optimization. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. V. 1072. P. 204–213. DOI: 10.1007/978-3-030-33585-4_20.
 16. Senkevich S., Bolshev V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasiński M., Leonowicz Z., Chaplygin M. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers // IEEE Access, vol. 9, pp. 71784–71804, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078609.
 17. Senkevich, S.E, Lavrukhin P.V., Senkevich A.A., Ivanov P.A., Sergeev N.V. Improvement of Traction and Coupling Properties of the Small Class Tractor for Grain Crop Sowing by Means of the Hydropneumatic Damping Device // In V. Kharchenko, & P. Vasant (Eds.), Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development. Hershey, PA: IGI Global, 2020. P. 1–27. DOI:10.4018/978-1-5225-9420-8.ch001.
 18. Senkevich S., Kravchenko V., Lavrukhin P., Ivanov P., Senkevich A. Theoretical Study of the Effect of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission on a Machine-Tractor Unit Performance While Sowing // (Chapter 17) Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2020. P. 423–463. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017
 19. Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Годжаев З.А., Дурягина В.В. Результаты проведения полевых исследований трактора класса тяги 1,4 с упруго-демпфирующим механизмом в силовом приводе //

- Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 4 (46). С. 76–87. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-46-4-76-87.
20. Сенькевич С.Е., Крюковская Н.С. Анализ экспериментальных исследований трактора, оснащенного упругодемпфирующим механизмом в трансмиссии, при движении в составе транспортного тракторного агрегата // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 59–66. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-59-66.
21. Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Кравченко В.А., Дурагина В.В., Годжаев З.А., Алексеев И.С. Автоматическое устройство для снижения жесткости трансмиссии транспортного средства: патент на изобретение № 2739100 Российская Федерация; опубл. 21.12.2020, Бюл. № 36.
22. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М.: Колос, 1973. 199 с.
23. Кравченко В.А., Сенькевич А.А., Сенькевич С.Е., Максименко В.А. Модернизация посевного машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4 // Международный научный журнал. 2008. № 1. С. 57–62.
24. Маркина М.В., Судакова А.В. Практикум по решению задач оптимизации в пакете MATLAB: учебно-методическое пособие. 2017. 49 с. URL: http://www.unn.ru/books/met_files/optim_MANTLAB.pdf (дата обращения 01.06.2021).
25. Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W., Hoki M. Tractors and their power units // Van Nostrand Reinhold. New York. 1996. P. 364.
26. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2014. 38 с.
27. Мясникова Н.В., Берестень М.П. Экспресс-анализ сигналов в технических системах. Пенза: ПГУ, 2012. 151 с.
28. Мясникова Н.В., Строганов М.П., Берестень М.П. Спектральный анализ на основе исследования экстремальных значений процесса // Датчики систем измерения, контроля и управления: межвуз. сб. науч. тр. Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1995. Вып. 15. С. 80–82.
29. Хованова Н. А., Хованов И. А. Методы анализа временных рядов: учеб. пособие. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2001. 120 с.
30. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016. P. 425.
31. Cryer J.D., Chan K.S. Time Series Analysis with Applications in R. Second Edition Springer Science & Business Media. 2008. P. 492.
32. Klenke A. Probability theory: a comprehensive course. Springer Science & Business Media, 2014. P. 638.
33. Schmetterer L. Introduction to mathematical statistics. Springer Science & Business Media. 2012. Vol. 202.
34. Turner J.C. Modern applied mathematics: probability, statistics, operational research. English University Press. 1970. P. 502.

References

1. Polivayev, O.I., Vedrinskiy O.S., Derkanosova N.M. Increasing the durability of the tractors clutch due to the elastic-friction damper. *Nauka i obrazovaniye v sovremennykh usloviyakh: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Science and education in modern conditions: materials of the international scientific conference], Voronezh, 2016, pp. 226–230 (in Russ.).
2. Polivaev O.I., Gorban L.K., Vorokhobin A.V., Vedrinsky O.S. Decrease of dynamic loads in mobile energy means // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. pp. 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042083.
3. Nekhoroshev D.D., Konovalov P.V., Popov A.YU., Nekhoroshev D.A. Features of improving the operation of the machine-tractor unit by reducing load fluctuations. *Izvestiya NV AUK*. 2019. No 1 (53), pp. 345–351 (in Russ.). DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-45.
4. Nekhoroshev, D.D. Improvement of the design of the mechanical transmission of a wheeled tractor / D.D. Nekhoroshev, D.A. Nekhoroshev // *Razvitiye APK na osnove printsipov ratsional'nogo prirodopol'zovaniya i primeneniya konvergentnykh tekhnologiy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, provedennoy v ramkakh Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma, posvyashchennogo 75-letiyu obrazovaniya Volgogradskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [The development of the agro-industrial complex based on the principles of rational environmental management and the use of convergent technologies: materials of the International Scientific and Practical Conference held within the framework of the International Scientific and Practical Forum dedicated to the 75th anniversary of the foundation of the Volgograd State Agrarian University], Volgograd, 30 yanvarya 2019 g. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2019, pp. 164–168 (in Russ.).
5. Khudorozhkov S.I., Krasil'nikov A.A. Numerical modeling of dynamic processes in the trans-

- mission of vehicles. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2021. No 1 (47), pp. 38–45 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-38-45.
6. Bondarenko, D.B., Krasnokutskiy V.YU. Optimization of the elastic-inertial parameters of the traction class 0.4 vehicle transmission in order to reduce the overall vibration load. XXIV Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovateley Volgogradskoy oblasti: sbornik materialov konferentsii [XXIV Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: Collection of Conference Papers]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2020, pp. 72–73 (in Russ.).
 7. Kravchenko V.A., Duryagina V.V., Gamolina I.E. Analysis of the results of analytical studies of a plowing unit based on a 1.4 traction class tractor with an elastic-damping mechanism in the transmission. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2017. No 37, pp. 36–42 (in Russ.).
 8. Babanin N.V., Polivayev O.I. Experimental studies on the smoothness, performance and fuel efficiency of a machine-tractor unit based on a 1.4 class tractor equipped with a gas-hydraulic elastic damping drive. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 3, pp. 112–118 (in Russ.).
 9. Popov I.P. Elastic couplings of a composite agricultural vehicle. *Vestnik NGIEI*. 2021. No 4 (119), pp. 21–30 (in Russ.). DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-21-30.
 10. Melikov I. et al. Traction and energy efficiency tests of oligomeric tires for category 3 tractors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 403. P. 012126. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012126.
 11. Sen'kevich S.E., Vasil'yev YE.K., Sen'kevich A.A. The results of the use of a hydropneumatic damping device in the power transmission of a tractor of a small traction class to improve performance. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2018. No 4 (21), pp. 128–139 (in Russ.).
 12. Senkevich S., Kravchenko V., Duriagina V., Senkevich A., Vasilev E. Optimization of the Parameters of the Elastic Damping Mechanism in Class 1,4 Tractor Transmission for Work in the Main Agricultural Operations // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) *Intelligent Computing & Optimization*. ICO 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2018. V. 866. P. 168–177. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_17.
 13. Senkevich S.E., Sergeev N.V., Vasilev E.K., Godzhaev Z.A., Babayev V. Use of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN): Theoretical and Experimental Substantiation // (Chapter 6) *Handbook of Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development*. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2019. P. 149–179. DOI: 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch006
 14. Sen'kevich S.E. Analysis of the results of experimental studies of a tractor of class 1.4 upgraded with a hydropneumatic damper device in a power transmission. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2019. No 3 (24), pp. 8–16 (in Russ.).
 15. Senkevich S., Duriagina V., Kravchenko V., Gamolina I., Pavkin D. Improvement of the Numerical Simulation of the Machine-Tractor Unit Functioning with an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN) // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) *Intelligent Computing and Optimization*. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. V. 1072. P. 204–213. DOI: 10.1007/978-3-030-33585-4_20.
 16. Senkevich S., Bolshov V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasiński M., Leonowicz Z., Chaplygin M. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers // *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71784–71804, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078609.
 17. Senkevich, S.E., Lavrukhin P.V., Senkevich A.A., Ivanov P.A., Sergeev N.V. Improvement of Traction and Coupling Properties of the Small Class Tractor for Grain Crop Sowing by Means of the Hydropneumatic Damping Device // In V. Kharchenko, & P. Vasant (Eds.), *Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development*. Hershey, PA: IGI Global, 2020. P. 1–27. DOI: 10.4018/978-1-5225-9420-8.ch001.
 18. Senkevich S., Kravchenko V., Lavrukhin P., Ivanov P., Senkevich A. Theoretical Study of the Effect of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission on a Machine-Tractor Unit Performance While Sowing // (Chapter 17) *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering*. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2020. P. 423–463. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017.
 19. Sen'kevich S.E., Il'chenko YE.N., Godzhayev Z.A., Duryagina V.V. Results of field studies of a tractor of traction class 1.4 with an elastic-damping mechanism in a power drive. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2020. No 4(46), pp. 76–87 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-46-4-76-87.

20. Sen'kevich S.E., Kryukovskaya N.S. Analysis of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism in the transmission, when driving as part of a transport tractor unit. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. No 6, pp. 59–66 (in Russ.). DOI; 10.31992/0321-4443-2020-6-59-66.
21. Sen'kevich S.E., Il'chenko YE.N., Kravchenko V.A., Duryagina V.V., Godzhayev Z.A., Alekseyev I.S. Avtomaticheskoye ustroystvo dlya snizheniya zhestkosti transmissii transportnogo sredstva [Automatic device for reducing the rigidity of the vehicle transmission]: patent na izobreteniyе No 2739100 Rossiyskaya Federatsiya; opubl. 21.12.2020, Byul. No 36.
22. Vedenyapin G.V. Obshchaya metodika eksperimental'nogo issledovaniya i obrabotki opytnykh dannykh [General method of experimental research and processing of experimental data]. Moscow: Kolos Publ., 1973. 199 p.
23. Kravchenko V.A., Sen'kevich A.A., Sen'kevich S.E., Maksimenko V.A. Modernization of a sowing machine-tractor unit based on a 1.4 traction class tractor. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal*. 2008. No 1, pp. 57–62 (in Russ.).
24. Markina M.B., Sudakova A.V. Praktikum po resheniyu zadach optimizatsii v pakete MATLAB. [Laboratory manual on solving optimization problems in the MATLAB package] Uchebno-metodicheskoye posobiye. 2017. 49 p. URL: http://www.unn.ru/books/met_files/optim_MATLAB.pdf (accessed: 01.06.2021).
25. Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W., Hoki M. Tractors and their power units // Van Nostrand Reinhold, New York. 1996. P. 364.
26. Boyko B.P., Tyurin V.A. Spektr signala: uchebno-metodicheskoye posobiye [Signal spectrum: training manual]. Kazan': Kazanskiy federal'nyy universitet Publ., 2014. 38 p.
27. Myasnikova N.V., Beresten' M.P. Ekspress-analiz signalov v tekhnicheskikh sistemakh [Express analysis of signals in technical systems]. Penza: PGU Publ., 2012. 151 p.
28. Myasnikova N.V., Stroganov M.P., Beresten' M.P. Spectral analysis based on the study of process extreme values. *Datchiki sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: Mezhdvuz. sb. nauch. tr.* Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhn. un-ta Publ., 1995. Vyp. 15, pp. 80–82 (in Russ.).
29. Khovanova N. A., Khovanov I. A. Metody analiza vremennykh ryadov [Time series analysis techniques]. Ucheb. posobiye. Saratov: Izd-vo GosUNTS" Kolledzh" Publ., 2001. 120 p.
30. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016. P. 425.
31. Cryer J.D., Chan K.S. Time Series Analysis with Applications in R. Second Edition Springer Science & Business Media. 2008. P. 492.
32. Klenke A. Probability theory: a comprehensive course. Springer Science & Business Media, 2014. P. 638.
33. Schmetterer L. Introduction to mathematical statistics. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 202.
34. Turner J.C. Modern applied mathematics: probability, statistics, operational research. English University Press, 1970. P. 502.