

УДК (UDC) 62-235: 62-1/-9: 62-752.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА В СОСТАВЕ ТРАНСПОРТНОГО
АГРЕГАТА С УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИМ МЕХАНИЗМОМRESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A MOBILE ENERGY VEHICLES IN A
TRANSPORT UNIT WITH AN ELASTIC DAMPING MECHANISMСенькевич С.Е.¹, Годжаев З.А.¹, Сергеев Н.В.², Ильченко Е.Н.¹, Алексеев И.С.¹
Senkevich S.Ye.¹, Godzhaev Z.A.¹, Sergeev N.V.², Ilchenko Ye.N.¹, Alekseyev I.S.¹¹ – Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (Москва, Россия)² – Азово-Черноморский инженерный институт (Зерноград, Россия)¹ – Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)² – Azov-Black Sea Engineering Institute (Zernograd, Russian Federation)

Аннотация. Повышение эксплуатационной эффективности мобильных энергетических средств является одним из основных факторов, способствующих увеличению производительности при существенном уменьшении непроизводительных энергозатрат. Немаловажное значение имеют разработки, которые связаны с усовершенствованием конструкции силовых передач колёсных сельскохозяйственных мобильных энергосредств, для которых непременным условием является повышения производительности труда в сельскохозяйственном производстве. Достижение требуемых характеристик мобильных энергосредств определяются свойствами силовой передачи, а также взаимодействием связанных с ней систем. Одно из главных качеств силовой передачи - это способность поглощать крутильные колебания и демпфировать нагрузку. В статье представлены исследования по установлению конструктивного усовершенствования силовой передачи мобильного энергосредства путем установки в неё разработанного упруго-демпфирующего механизма на примере трактора малого класса тяги. Учитывая актуальность обсуждаемой темы в настоящей статье необходимо определить влияние упруго-демпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с транспортным прицепом, опираясь на проведенные натурные измерения с помощью метода корреляционно – спектрального анализа. Цель исследования заключалась в определении влияния упруго-демпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с транспортным прицепом. В настоящей статье был проведен анализ взаимной корреляционной функции и анализ взаимной спектральной плотности двух процессов: частоты вращения коленчатого вала двигателя и частоты вращения ведущего колеса. Анализ взаимной корреляционной функции показывает изменение скорости распространения проходящих частот колебаний нагрузки по валопроводу на 39%. Анализ взаимной спектральной плотности, показывает, что происходит поглощение части колебаний

Abstract. Improving the operational efficiency of mobile energy vehicles is one of the main factors contributing to increased productivity while significantly reducing non-productive energy costs. Of no small importance are developments that are associated with the improvement of the design of transmissions of wheeled agricultural mobile energy vehicles, for which an indispensable condition is to increase labor productivity in agricultural production. The achievement of the required characteristics of mobile energy vehicles is determined by the properties of the transmission, as well as the interaction of the systems associated with it. One of the main qualities of the transmission is the ability to absorb torsional vibrations and damp the load. The article presents studies on establishing the constructive improvement of the transmission of a mobile energy vehicle by installing a developed elastic-damping mechanism in it using the example of a tractor of a small traction class. Taking into account the relevance of the topic under discussion in this article, it is necessary to determine the effect of the elastic-damping mechanism installed in the tractor transmission on its operation with a transport trailer, based on the field measurements carried out using the method of correlation - spectral analysis. 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 transport trailer. 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 engine crankshaft speed and the drive wheel speed. The analysis of the cross-correlation function shows the change in the propagation speed of the passing frequencies of load oscillations along the shafting by 39%. The analysis of the mutual spectral density shows that there is an absorption of a part of the load fluctuations propagating along the shafting and a shift in the frequency of disturbing influences by up to 68.3%.

нагрузки распространяющихся по валопроводу и смещение частоты возмущающих воздействий на величину до 68,3%.

Ключевые слова: упруго-демпфирующий механизм, силовая передача трактора, взаимная корреляционная функция, взаимная спектральная плотность.

Дата принятия к публикации: 29.09.2021

Дата публикации: 25.12.2021

Сведения об авторах:

Сенькевич Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Мобильные энергосредства», ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, e-mail: umo.viesh@list.ru.

ORCID: 0000-0001-6354-7220

Годжаев Захид Адыгезалович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заместитель директора, ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, e-mail: fic51@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-1665-3730

Сергеев Николай Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тракторы, автомобили и эксплуатация автотранспортных средств», Азово-Черноморский инженерный институт - филиал ФГБОУ ВО Донской ГАУ, e-mail: sergeev-n.v@mail.ru.

Ильченко Екатерина Николаевна – инженер лаборатории «Мобильные энергосредства», ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, e-mail: il4enkocat@yandex.ru.

Алексеев Илья Сергеевич – инженер лаборатории «Мобильные энергосредства», ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, e-mail: dreeddog@mail.ru.

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

Date of acceptance for publication: 29.09.2021

Date of publication: 25.12.2021

Authors' information:

Sergey Ye. Senkevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head laboratory «Mobile power facilities», Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: umo.viesh@list.ru.

ORCID: 0000-0001-6354-7220

Zakhid A. Godzhaev – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director, Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: fic51@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-1665-3730

Nikolai V. Sergeev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Tractors, cars and operation of vehicles», Azov-Black Sea Engineering Institute - branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Donskoy State Agrarian University, e-mail: sergeev-n.v@mail.ru.

Yekaterina N. Pchenko – Engineer of laboratory «Mobile power facilities», Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: il4enkocat@yandex.ru.

Ilya S. Alekseyev – Engineer of laboratory «Mobile power facilities», Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: dreeddog@mail.ru.

1. Введение

Повышение эксплуатационной эффективности мобильных энергетических средств является одним из основных факторов, способствующим увеличению производительности при существенном уменьшении непроизводительных энергозатрат. Среди энергосберегающих технологий немаловажное значение имеют разработки, которые связаны с усовершенствованием конструкции силовых передач колёсных сельскохозяйственных мобильных энергетических средств. Для таких агрегатов непременным условием является повышения производительности труда в сельскохозяйственном производстве.

Решение этой проблемы встречает ряд трудностей, связанных с неустановившимися процессами при движении. Достижение требуемых характеристик агрегатов определяются свойствами силовой передачи, а также взаимодействием связанных с ней систем, к которой относится главная передача и ходовая часть. Кроме того, связующим звеном, общим для обеих систем (общей частью систем), является опорная поверхность, характеристики которой оказывают значительное, а часто и первичное влияние на динамические свойства системы в целом. Для любой из рассмотренных систем колесного движителя мобильной машины силовая передача имеет первостепенное значение для дости-

жения необходимых качеств системы. Кроме того, свойства мобильного энергетического средства, как системы имеют решающее значение для создания необходимых тяговых характеристик, плавности хода и уплотняющего воздействия на почву, особенно при агрегатировании с сельскохозяйственной техникой, а также характеристик траектории их движения. В целом требования к самому агрегату настолько разнообразны, что удовлетворить их можно только на основе набора качеств, которые определяет потребитель. Одно из главных качеств - это способность силовой передачи поглощать крутильные колебания и демпфировать нагрузку. Причём демпфирование должно быть в нужном направлении и таким, чтобы соответствующие показатели эксплуатационных качеств агрегата получились наилучшими.

Применение упруго-демпфирующих механизмов улучшает работу сельскохозяйственных мобильных энергетических средств. Доказательство этого было проверено в статье [1], где при помощи методов математического моделирования и анализа доказывалось облегчение трогания составного транспортного средства при наличии упруго-деформируемых 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 [2]. Не только приведённые исследования, но и многие другие работы доказывают актуальность исследований в области применения упругих элементов для снижения вибрационной нагрузки тракторов и мобильных машин, и элементов их силовых передач. Эти вопросы, исследуемые по всему миру, позволяют значительно улучшать параметры силовой передачи трактора.

Устройство, работа и преимущества упруго-демпфирующего механизма были подробно представлены в работах [3-5]. Продолжение исследований по изучению влияния механизма на работу силовой передачи представлено в работах [6-8]. В работах [9, 10] было доказано, что использование упруго-демпфирующего 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 [11, 12] обосновано, что упруго-демпфирующий механизм в силовой передаче трактора устраняет резонансные режимы работы в зоне реальных колебаний внешней нагрузки.

Настоящая статья является продолжением исследования влияния упруго-демпфирующего механизма в силовой передаче трактора малого класса тяги (14 кН) на различные его показатели. Опираясь на результаты экспериментальных измерений, был 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 упруго-демпфирующий механизм. Исследования были проведены для условий работы трактора с транспортным прицепом. Экспериментальные данные, которые использовались при проведении расчетно-теоретических исследований по определению спектральных характеристик элементов упруго-демпфирующего механизма в силовой передаче были получены автором и описаны в работах [4, 6, 9, 12]. Устройство упруго-демпфирующего механизма защищено патентом на изобретение, а подробное описание приведено в работе [13]. Исходя из вышесказанного, в статье представлены исследования конструктивного усовершенствования силовой передачи агрегата путем установки в неё разработанного упруго-демпфирующего механизма для тракторов малого класса тяги [3, 12, 14]. Для проведения исследований процесса функционирования трактора был выбран универсально-пропашной трактор тягового класса 1,4 Минского тракторного завода. Серийный трактор этого завода является самой распространённой машиной в нашей стране и может работать в агрегате с прицепными навесными и полунавесными машинами, так же осуществлять погрузочные, разгрузоч-

ные, транспортные и другие виды работ, включая комплексную механизацию пропашных и овощных культур от возделывания до уборки.

2. Постановка задачи

Цель исследования заключалась в определении влияния упруго-демпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с транспортным прицепом. Учитываю поставленную цель и актуальность затронутой темы, в настоящей статье в качестве задачи исследований необходимо определить влияние упруго-демпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с транспортным прицепом, опираясь на проведенные натурные измерения с помощью метода корреляционно – спектрального анализа.

3. Материалы и методы

3.1. Описание упруго-демпфирующего механизма

Разработанный нами упруго-демпфирующий механизм служит для снижения динамической нагруженности силовой передачи. Его принципиальная схема представлена на рис. 1. Конструкция механизма защищена патентами на изобретение, а устройство и работа описаны в [13].

Упруго-демпфирующий механизм так же предназначен для плавного трогания трактора при разгоне, для выполнения защитных функций от колебаний внешней нагрузки за счет демпфирующих свойств и автоматического изменения передаточного числа привода механизма.

Упруго-демпфирующий механизм состоит из следующих узлов и систем:

- планетарного редуктора;
- привода масляного насоса, коробки перемены передач, гидравлической системы и системы управления;
- масляных магистралей и устройств с системой дозировки, и предохранения;

– пневмогидроаккумулятора с системой дозировки и предохранения.

Коронная шестерня 2 планетарного редуктора 1 соединена с маховиком двигателя и передает крутящий момент на вал 11 привода коробки передач и на сателлиты, связанные с водило и солнечной шестерней 3. Водило, имеет жесткую связь с ведущим валом коробки перемены передач. Центральная шестерня 3 редуктора через привод 4 приводит во вращение податливое звено упруго-демпфирующего механизма – гидронасос 5. Насос имеют всасывающий и нагнетательный каналы. Нагнетательный канал соединяет гидронасос с масляной полостью пневмогидроаккумулятора 22. Вторая полость пневмогидроаккумулятора, отделенная от первой поршнем с уплотнениями, заправлена сжатым воздухом. Заправка осуществляется через воздушный кран. Закон подачи масла в пневмогидроаккумулятор может изменяться регулируемым дросселем 15. Максимальное давление в нагнетательной полости насоса ограничивается предохранительным клапаном 17. Сброс масла при срабатывании клапана 17 и при открытом положении крана 18 осуществляется в бак 20.

В настоящей статье приводятся продолжение исследований, начало которых опубликовано в работе [12]

3.2. Объект исследования

Объектом исследования является процесс функционирования трактора тягового класса 1,4, в силовую передачу которого установлен упруго-демпфирующий механизм. Трактор находится в агрегате с транспортным прицепом. Трактор-макет созданный на базе МТЗ-80 оснащен упруго-демпфирующим механизмом. Механизм выполнен с возможностью отключения (блокировки) для проведения сравнительных измерений.

В собранном виде на тракторе элементы механизма представлены на рис.2. На рисунке видно расположение пневмогидроаккумулятора, дросселя, предохранительного клапана и масляного насоса на раме трактора).

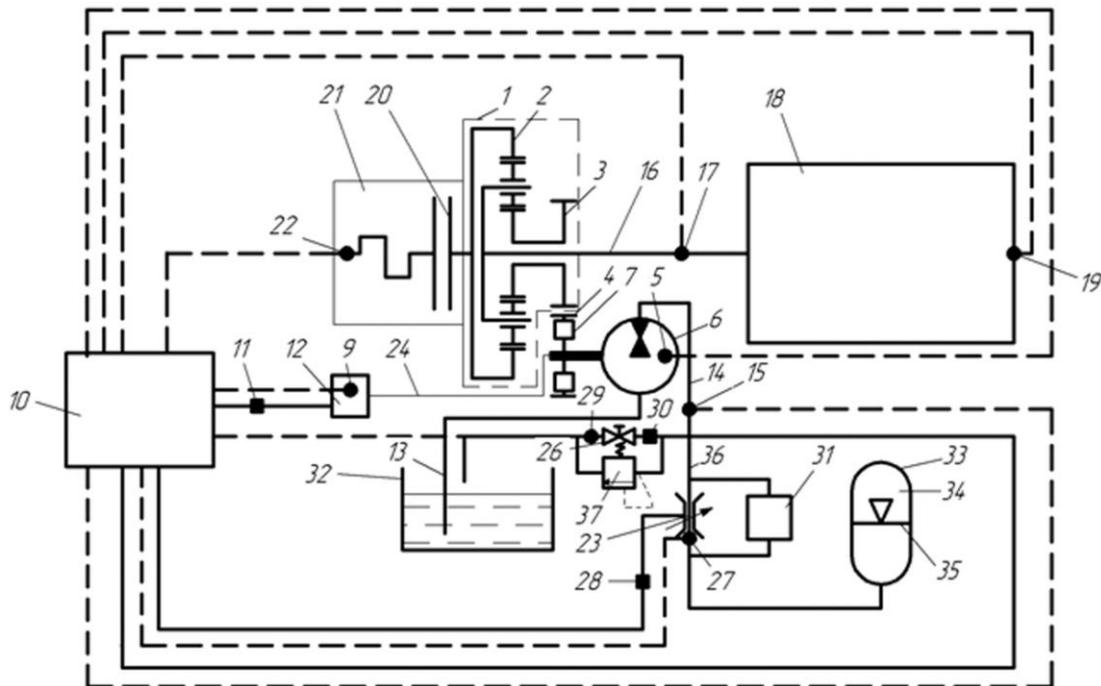


Рис. 1. Схема упрямо-демпфирующего механизма в силовой передаче трактора тягового класса 1,4 [13].

1 – планетарный редуктор; 2 – коронная шестерня; 3 – реактивное звено (солнечная шестерня); 4 – шестерня привода масляного насоса; 5 – датчик частоты вращения шестерни; 6 – масляный насос; 7 – подвижные грузы для изменения момента инерции; 8 – пружина (на рисунке не показано); 9 – датчик положения грузов; 10 – контроллер; 11 – исполнительный элемент управления подвижными грузами; 12 – регулятор положения грузов; 13 – всасывающий канал (магистраль); 14 – нагнетательный канал (напорная магистраль); 15 – датчик давления масляного насоса; 16 – вал водила (первичный вал коробки передач); 17 – датчик частоты вращения вала трансмиссии; 18 – коробки передач и вся силовая передача; 19 – датчик частоты вращения; 20 – муфта сцепления; 21 – двигатель; 22 – датчик частоты вращения двигателя; 23 – двухступенчатый регулируемый дроссель; 24 – маслопровод; 25 – предохранительный клапан; 26 – кран управления; 27 – датчик положения дросселя; 28 – исполнительный элемент управления заслонкой; 29 – датчик положения крана; 30 – исполнительный элемент управления краном; 31 – демпферный клапан; 32 – гидробак; 33 – пневмогидроаккумулятор; 34 – гидроцилиндр (сжатый воздух); 35 – подвижный поршень (свободный поршень); 36 – вход в дроссель; 37 – предохранительный клапан.

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

3.3. Измерительная аппаратура и комплект первичных преобразователей

Для исследования динамических процессов и определения энергетических параметров работы трактора, который находился в агрегате с транспортным прицепом, приме-

нялась система автоматического накопления и обработки метрологической информации мобильного исполнения. Схема этой системы представлена на рис. 3. Все записывающее оборудование было установлено в кабине передвижной лаборатории на базе полноприводного автомобиля. Система включает в себя комплексы аппаратных и программных средств. Она состоит из бортового компьютера, платы аналого-цифрового преобразования, платы сопряжений, блок полного инструментального усилителя сигнала.



Рис. 2. Общий вид компоновки элементов упруго-демпфирующего механизма на тракторе:

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

Все элементы системы смонтированы внутри передвижной лаборатории. Комплект первичных преобразователей (датчиков), установлен на исследуемом тракторе.

Комплект датчиков системы, установленных на исследуемый трактор, позволяет измерять мгновенные значения следующих параметров:

$R_{кр}$ – 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 упруго-демпфирующего механизма;

$P_{масл}$ – давление масла в масляной магистрали (до дросселя) упруго-демпфирующего механизма;

$n_{кол}$ – импульсы оборотов путеизмерительного колеса трактора;

$N_{кол}$ – импульсы оборотов ведущего колеса трактора;

G_T – расход топлива.

Предварительно была проведена калибровка и настройка всех датчиков. После обработки калибровочной информации строились графики. Были получены уравнения аппроксимации полученных графиков, которые являются ключом при переводе кодирован-

ного сигнала в натуральные физические величины.

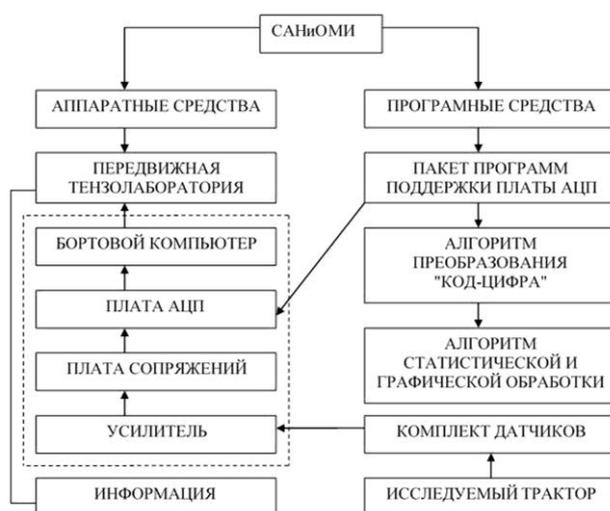


Рис. 3. Система автоматического накопления и обработки информации

4. Результаты проведения исследований

Методика проведения исследований [14, 15] трактора в составе с транспортным прицепом позволила изучить влияние параметров упруго-демпфирующего механизма на показатели работы трактора при работе с прицепом.

Для получения одинаковых показателей при сравнительных испытаниях и снижения влияния таких параметров как коэффициент полезного действия силовой передачи и колёсных движителей, сопротивление самопередвижению трактора, контрольные опыты проводились на одной дороге в течение рабочего дня [16]. Это грунтовая полевая дорога учебно-опытного фермерского хозяйства на территории учебного полигона Азово-Черноморского инженерного института - филиала Донского государственного аграрного университета. Опыты проводились при движении трактора с прицепом на 8 и 9 передаче основного ряда скоростей коробки передач. Общий вид испытываемого трактора-макета в агрегате с транспортным прицепом ПТС-6 и измерительным комплексом лаборатории ТЛ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66 приведен на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Общий вид испытываемого трактора-макета в агрегате с транспортным прицепом ПТС-6 и измерительным комплексом лаборатории ТЛ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66: а) – вид сбоку; б) – вид спереди

При проведении сравнительных опытов использовался тот же самый трактор, но с заблокированным упруго-демпфирующим механизмом. Управление трактором с прицепом во всех вариантах осуществлялось одним и тем же трактористом первого класса. Время опыта и пройденный путь фиксировались при помощи системы накопления информации, описанной ранее. Обработка результатов эксперимента осуществлялась на персональном компьютере с использованием пакета специальных программ [17]. Измерительное оборудование позволило получить числовые временные ряды, на основе которых получены вероятностные характеристики процесса работы [17, 18].

Применяя классические методы анализа временных рядов, был проведен корреляционно – спектральный анализ, методика которого описана в работах [15, 18-23]. Этот ана-

лиз позволяет оценить частотные составляющие при применении упруго-демпфирующего механизма в силовой передаче трактора тягового класса 1,4. [24-27].

Для оценки сходства и различия двух процессов используют функцию взаимной корреляции. С помощью этой функции можно измерить запаздывание во времени двух процессов. В нашем случае необходимо измерить скорость прохождения сигнала от датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя (Датчик 1) до датчика оборотов ведущего колеса трактора (Датчик 2). Изменение сигнала являются случайными, однако не верно 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 Датчике 1, либо на Датчике 2). Иначе говоря, имеется связь между двумя сигналами. Если вычислить функцию взаимной корреляции этих двух сигналов, то можно узнать величину временного запаздывания между сигналами. После чего 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.

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

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.

Нами определена взаимная корреляционная функция двух случайных процессов частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса (рис. 5 и рис. 6), которая позволяет оценить параметры и свойства, двух случайных процессов. На рисунках взаимная корреляционная функция угловых скоростей представлена для двух

вариантов: опытный вариант - сплошная линия; серийный вариант - прерывистая линия.

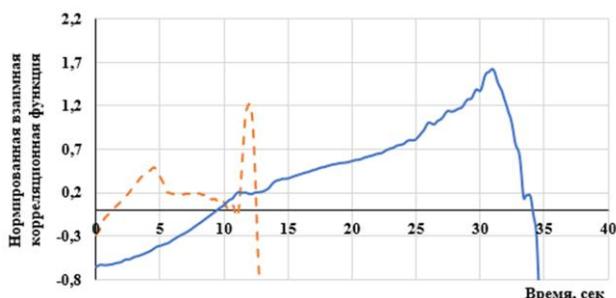


Рис. 5. Совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции угловых скоростей серийного и опытного трактора в агрегате с транспортным прицепом (анализ сигнала от двигателя к ведущему колесу)

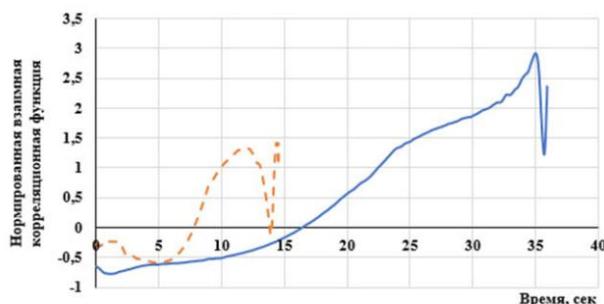


Рис. 6. Совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции угловых скоростей и серийного и опытного трактора в агрегате с транспортным прицепом (анализ сигнала от ведущего колеса к двигателю)

На рис. 5 представлены совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса в опытном и серийном варианте для трактора во время работы с транспортным прицепом, с учетом анализа сигнала от двигателя к ведущему колесу. На рис.6 представлены совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса в опытном и серийном варианте для трактора во время работы в агрегате с транспортным прицепом, с учетом анализа сигнала от ведущего колеса к двигателю.

Рис. 5 и рис. 6 показывают корреляцию между частотой вращения коленвала двигателя и частотой вращения ведущего колеса в варианте трактора без упруго-демпфирую-

щего механизма в силовой передаче. В опытном варианте корреляция отрицательная. Серийный вариант находится в прямой корреляции в начальный период (разгон) и в процессе движения. Максимальная корреляция наступает на четвертой секунде. Далее идет снижение до нуля. Что означает конец разгона.

Рис. 7 - 9 показывают изменения мнимой части, действительной части и модуля функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей (вращения коленвала двигателя и ведущего колеса) опытного и серийного трактора в агрегате с транспортным прицепом.

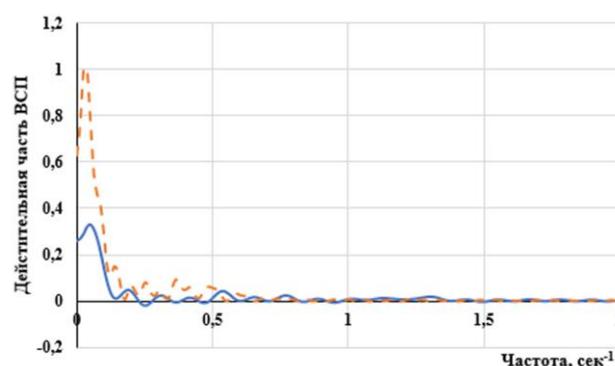


Рис. 7. Графики изменения действительной части функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора в агрегате с транспортным прицепом

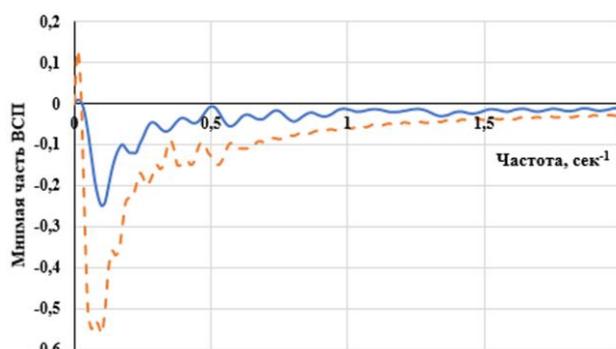


Рис. 8. Графики изменения мнимой части функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора в агрегате с транспортным прицепом

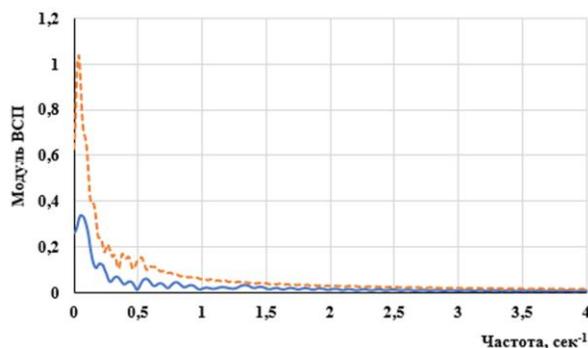


Рис. 9. Графики изменения модуля функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора в агрегате с транспортным прицепом

Рис. 7 - 9 показывают смещение частоты возмущающих воздействий и уменьшение их величины (действительной и мнимой части) в серийном варианте. Сравнивая модуль взаимной спектральной плотности видны вершины на низкой частоте ($\omega = 0,1 \text{ с}^{-1}$) для серийного и опытного вариантов. Преимущество опытного варианта в том, что величина взаимной спектральной плотности ниже и площадь под кривой меньше в опытном варианте.

4. Заключение

Анализ взаимной корреляционной функции двух процессов (частоты вращения ко-

ленчатого вала двигателя и ведущего колеса) показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу). Отношение времени прохождения (прохождение сигнала в опытном тракторе по отношению к серийному варианту) возмущений по валопроводу при агрегатировании трактора с транспортным прицепом уменьшается на 39,9%.

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 транспортным прицепом на 68,3%. Величина взаимной спектральной плотности меньше в опытном варианте трактора, что может означать то, что упруго-демпфирующий механизм, как элемент силовой передачи, поглощает часть колебаний нагрузки по распространяющимся по валопроводу.

Проведённые исследования доказали, что упруго-демпфирующий механизм поглощает частоты нагрузки и снижает их скорость распространения по валопроводу силовой передачи трактора.

Список литературы

1. Попов И.П. Упругие сцепки составного сельскохозяйственного транспортно-технологического средства // Вестник НГИ-ЭИ. 2021. № 4(119). С. 21-30. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-21-30.
2. Melikov I., Kravchenko V., Senkevich S., Hasanova Ye., Kravchenko L. 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
3. Сенькевич С.Е., Васильев Е.К., Сенькевич А.А. Результаты применения гидропневматического демпфирующего устройства в силовой передаче трактора малого класса тяги для улучшения показателей ра-

References

1. Popov I.P. Elastic couplings of a composite agricultural transport and technological means. *Vestnik NGIEI*, 2021, No. 4 (119). pp. 21-30. DOI: 10.24412 / 2227-9407-2021-4-21-30. (In Russian)
2. Melikov I., Kravchenko V., Senkevich S., Hasanova Ye., Kravchenko L. 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
3. Senkevich S.Ye., Vasilyev Ye.K., Senkevich 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. *Agrotehnika i*

боты // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4 (21). С. 128 -139.

4. 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 https://doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_17

5. 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

6. 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.

7. 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: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_20

8. 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.

9. Senkevich, S.E, Lavrukhin P.V., Senkevich A.A., Ivanov P.A., Sergeev N.V. Improvement of Traction and Coupling Proper-

energoobes-pechenie, 2018, No. 4 (21), pp. 128-139. (In Russian)

4. 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 https://doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_17

5. 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

6. Senkevich S.Ye. Analysis of the results of experimental studies of a tractor of class 1.4 modernized with a hydropneumatic damper device in a power transmission. *Agrotekhnika i energo-obespechenie*, 2019, No. 3 (24), pp. 8-16. (In Russian)

7. 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: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_20

8. 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.

9. 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

ties of the Small Class Tractor for Grain Crop Sowing by Means of the Hydropneumatic Damping Device // In V. Kharchenko, & P. Vasant (Eds.), Handbook of Re-search 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

10. 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 Renew-able Energy and Agro-Engineering. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2020. P. 423-463. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017

11. 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.

12. Сенькевич С.Е., Крюковская Н.С. Анализ экспериментальных исследований трактора, оснащенного упруго-демпфирующим 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.

13. Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Кравченко В.А., Дурягина 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.

14. 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.

15. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М.: Колос, 1973. 199 с.

Sowing by Means of the Hydropneumatic Damping Device // In V. Kharchenko, & P. Vasant (Eds.), Handbook of Re-search 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

10. 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 Renew-able Energy and Agro-Engineering. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2020. P. 423-463. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017

11. Senkevich S.Ye., Ilchenko Ye.N., Godzhaev Z.A., Duryagina V.V. Results of field research 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. DOI 10.31992 / 2074-0530-2020-46-4-76-87. (In Russian)

12. Senkevich S.Ye., Kryukovskaya N.S. Analysis of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism in the transmission, when moving as part of a transport tractor unit. *Traktory i selkhoz mashiny*, 2020, No 6, pp. 59-66. DOI 10.31992/0321-4443-2020-6-59-66. (In Russian)

13. Patent RU 2739100. *Avtomaticheskoe ustroystvo dlya snizheniya zhestkosti transmissii transportnogo sredstva* [Automatic device for reducing the rigidity of the vehicle's transmission]. Senkevich S.Ye., Ilchenko Ye.N., Kravchenko V.A., Duryagina V.V., Godzhaev Z.A., Alekseyev I.S. Declared 13.08.2020. Published 21.12.2020. (In Russian)

14. Kravchenko V.A., Senkevich A.A., Senkevich S.Ye., Maksimenko V.A. Modernization of a sowing machine-tractor unit based on a tractor of class 1.4. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal*, 2008, No 1, pp. 57-62. (In Russian)

15. Vedenyapin, G.V. *Obshchaya metodika eksperimentalnogo issledovaniya i obra-botki opytnykh dannykh* [General method of experimental research and processing of experimental data]. Moscow: Kolos, 1973. 199 p.

16. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. М.: Питер, 2002. 604 с.
17. Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W., Hoki M. Tractors and their power units // Van Nostrand Reinhold, New York. 1996. P. 364.
18. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2014. 38 с.
19. Бендат, Д., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
20. Мясникова Н.В., Берестень М.П. Экспресс-анализ сигналов в технических системах. Пенза: ПГУ, 2012. 151 с.
21. 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.
22. Хованова Н. А., Хованов И. А. Методы анализа временных рядов // Учеб. пособие. Саратов: Изд-во ГосУНЦ" Колледж", 2001. 120 с.
23. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016. P. 425.
24. Cryer J.D., Chan K.S. Time Series Analysis with Applications in R. Second Edition Springer Science & Business Media. 2008. P. 492.
25. Klenke A. Probability theory: a comprehensive course. Springer Science & Business Media, 2014. P. 638.
26. Schmetterer L. Introduction to mathematical statistics. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 202.
27. Turner J.C. Modern applied mathematics: probability, statistics, operational research. English University Press, 1970. P. 502.
16. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Moscow: Peter, 2002. 604 p. (In Russian)
17. Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W., Hoki M. Tractors and their power units // Van Nostrand Reinhold, New York. 1996. P. 364.
18. Boyko B.P., Tyurin V.A. *Spektr signala: uchebno-metodicheskoe posobie* [Signal spectrum: training manual]. Kazan: Kazan Federal University, 2014. 38 p. (In Russian)
19. Bendat, D., Pirsol A. *Primenenie korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza* [Application of correlation and spectral analysis]. Moscow: Mir, 1983. 312 p. (In Russian)
20. Myasnikova N.V., Beresten M.P. *Ekspress-analiz signalov v tekhnicheskikh sistemakh* [Express analysis of signals in technical systems]. Penza: PSU, 2012. 151 p. (In Russian)
21. Myasnikova N.V., Stroganov M.P., Beresten M.P. Spectral analysis based on the study of extreme values of the process. *Datchiki sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: Mezhevuz. sb. nauch. tr. Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhn. un-ta, 1995, No. 15, pp. 80–82.* (In Russian)
22. Khovanova NA, Khovanov IA *Metody analiza vremennykh ryadov* [Methods of time series analysis]. Proc. in a way. Saratov: Publishing house of GosUNTs "College", 2001. 120 p. (In Russian)
23. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016. P. 425.
24. Cryer J.D., Chan K.S. Time Series Analysis with Applications in R. Second Edition Springer Science & Business Media. 2008. P. 492.
25. Klenke A. Probability theory: a comprehensive course. Springer Science & Business Media, 2014. P. 638.
26. Schmetterer L. Introduction to mathematical statistics. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 202.
27. Turner J.C. Modern applied mathematics: probability, statistics, operational research. English University Press, 1970. P. 502.