

**Калужский филиал федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»**

На правах рукописи



**СИДОРОВ Максим Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА  
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ  
С ВЕДУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ ДЛЯ ТРАКТОРА ТЯГОВОГО КЛАССА 1,4**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель -  
кандидат технических наук, доцент  
*Алакин В.М.*

Калуга - 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Состояние вопроса и постановка задач исследования.....	11
1.1 Проблема повышения производительности МТА на основе трактора тяговой концепции.....	11
1.2 Проблемы и пути расширения тягово-технологических возможностей трактора.....	14
1.3 Особенность работы двигателя при агрегатировании трактором технологических машин.....	21
1.4 Способы снижения колебательных процессов в МТА путем применения упругих элементов.....	23
1.5 Выводы и задачи исследования.....	29
2 Теоретические исследования применения в составе МТА технологического модуля с ведущими колесами и обладающего упругодемпфирующими свойствами.....	31
2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы технологического модуля для тракторов тягового класса 1,4.....	31
2.2 Математическая модель тягово-динамических процессов МТА на базе трактора с технологическим модулем.....	37
2.3 Разработка функциональных и структурных схем моделей подсистем МТА в программе Simulink .....	48
2.4 Поиск рациональных характеристик шин ведущих колес технологического модуля и трактора.....	57
2.5 Обоснование рациональных веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластировании энергонасыщенных тракторов .....	69
2.5.1 Обоснование веса технологического модуля и трактора тягово-энергетической концепции .....	69
2.5.2 Определение номинальной эксплуатационной мощности двигателя трактора тягово-энергетической концепции .....	76

2.6 Выводы.....	87
3 Программа и методика экспериментальных исследований.....	90
3.1 Программа и задачи экспериментальных исследований.....	90
3.2 Методика лабораторно-полевых испытаний.....	90
3.3 Измерительное оборудование и погрешности измерений.....	92
3.4 Программа и методика проведения полевых сравнительных испытаний.....	103
3.5 Методика обработки результатов испытаний.....	104
3.6 Выводы.....	107
4 Результаты теоретических и экспериментальных исследований.....	108
4.1 Определение влияние упругодемпфирующих свойств технологического модуля на стабилизацию момента сопротивления на входе в двигатель.....	108
4.2 Исследование упругодемпфирующих свойств технологического модуля с позиции теории случайных процессов.....	112
4.3 Результаты сравнительных полевых испытаний.....	120
4.4 Выводы.....	121
5 Техничко-экономическая оценка.....	123
Заключение.....	128
Список литературы.....	131
Приложения А.....	145
Приложение Б.....	147
Приложение В.....	148
Приложение Г.....	149
Приложение Д.....	150
Приложение Е.....	151
Приложение Ж.....	152
Приложение З.....	153

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Многолетний опыт эксплуатации машинно-тракторных агрегатов (МТА) в различных регионах Российской Федерации показал, что рост энергонасыщенности тракторов не дал пропорционального прироста производительности МТА и увеличил энергозатраты на единицу выполненной работы.

Теоретически и экспериментально доказано, что повышение производительности МТА через увеличение ширины захвата (увеличение тягового усилия трактора), или через увеличение его скорости имеет агротехнический предел.

Альтернативное направление развития тракторостроения, заключающееся в замене трактора-тягача, при повышении его энергонасыщенности, на трактор тягово-энергетической концепции и создание на его основе тягово-приводных машинно-тракторных агрегатов еще недостаточно изучено. Особый интерес представляет формирование МТА по модульному принципу с использованием технологических модулей с ведущими колесами.

Заложенный резерв мощности двигателя, который не может быть реализован через ходовую систему энергонасыщенного трактора-тягача, при модульной системе агрегатирования реализуется через ведущие колеса технологического модуля за счет использования в качестве сцепного не только веса трактора, но и веса всего агрегата, включая его технологическую часть.

Непрерывные колебания внешней нагрузки в условиях реальной эксплуатации МТА приводят к снижению установленной мощности двигателя и увеличению удельного расхода топлива на единицу выполненной работы. Положительным побочным свойством технологического модуля является демпфирование колебаний, создаваемых силой сопротивления сельскохозяйственного орудия. Гашение колебаний осуществляется эластичностью пневматических шин ведущих колес и инерционностью массы технологического модуля. Исследование упруго-демпфирующих свойств технологического модуля представляет определенный

интерес, потому что они могут существенно снизить динамическую нагрузку на трансмиссию и двигатель.

Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов на базе энергонасыщенных тракторов на основе модульной системы агрегатирования, прирост производительности которых будет осуществляться без повышения удельных энергозатрат на выполняемую работу является важной научной проблемой, имеющей большое народно-хозяйственное значение.

Диссертация выполнялась в рамках плана госбюджетной научно-исследовательской работы кафедры автомобиле- и тракторостроения Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» «Повышение эффективности и долговечности использования наземных транспортно-технологических средств».

**Степень разработанности темы.** Основные вопросы, связанные с исследованием динамики МТА, повышением его эффективности и снижением энергозатрат, были достаточно подробно рассмотрены в работах В.Н. Болтинского, С.А.Иофинова, Г.М.Кутькова, Л.Е.Агеева, В.Н. Попова, В.Я. Аниловича, И.Б. Барского, А.Г. Жутова, В.А. Кравченко, И.П. Ксеневича, Н.Г. Кузнецова, О.И. Поливаева, В.Л. Строкова и других. Результаты исследований, выполненные указанными учеными, нашли применение в различных технических решениях при создании новых эффективных конструкций тракторов.

Проведенный анализа существующих упругодемпфирующих приводов и устройств по снижению колебательных процессов в МТА позволил выявить их преимущества и недостатки, а также влияние на колебания внешней нагрузки, действующей на нижнюю ось механизма навески трактора и крутящего момента на входе в двигатель.

Проблема состоит в необходимости обоснования конструктивных и тягово-динамических параметров высокопроизводительных и энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов на базе энергонасыщенных тракторов, в том числе

путем увеличения тягового усилия, за счет применением технологического модуля с упругодемпфирующими свойства и ведущими движителями.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе энергонасыщенных тракторов тягового класса 1,4 за счет подбора рациональных параметров технологического модуля при модульной системы агрегатирования.

В соответствии с целью исследований предусмотрено решение следующих задач:

- провести изыскание модульного построения в виде компоновочной и функциональной схемы МТА для трактора тягового класса 1,4 с технологическим модулем и разработать экспериментальный образец технологического модуля, обеспечивающий совмещение снижения колебаний внешней нагрузки и увеличения тягового усилия трактора при уменьшении удельного расхода топлива на единицу выполненной работы;

- разработать методику расчета рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластировании энергонасыщенных тракторов с учетом потерь мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам, и использования энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- разработать математическую модель динамических процессов МТА с учетом наличия в его составе предложенного технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами, позволяющую определить рациональные параметры технологического модуля и провести имитационное моделирование для установления взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель;

- провести экспериментальное подтверждение и экономическую оценку эффективности применения технологического модуля с ведущими колесами для трактора тягового класса 1,4 при модульном построении МТА.

**Объект исследования** – рабочие процессы МТА на базе колесного трактора тягового класса 1,4 Минского тракторного завода с технологическим модулем, обладающим упругодемпфирующими свойствами в агрегате с плугом, тяжелой дисковой бороной.

**Предмет исследования** – закономерности формирования тягово-динамических свойств МТА на базе колесного трактора с технологическим модулем, обладающим упругодемпфирующими свойствами.

**Научная новизна составляет:**

- зависимости для определения рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластирования энергонасыщенных тракторов, отличающаяся учетом потерь мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам и использования энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- математическая модель динамических процессов МТА, отличающаяся учетом особенностей функционирования МТА с технологическим модулем, обладающим упругодемпфирующими свойствами;

- результаты имитационного моделирования МТА как динамической системы, отличающееся тем что определены взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель;

- экспериментальный образец технологического модуля с ведущими колесами для модульного комплектования МТА на базе трактора тягового класса 1,4, отличающийся рациональными параметрами и возможностью навески сельскохозяйственных машин, предназначенных для тракторов более высокого тягового класса.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Теоретическое значение результатов исследования заключается в выявлении влияния технологического модуля на снижение колебаний внешней нагрузки, действующей на нижнюю ось механизма навески трактора и момента сопротивления на входе в двигатель. Теоретически обоснованы на основе математической

модели динамических процессов МТА, учитывающей в его составе предложенный технологический модуль с ведущими колесами и упругодемпфирующими свойствами, и подтверждены экспериментально рациональные параметры технологического модуля для трактора тягового класса 1,4 в составе МТА.

Применение технологического модуля для трактора тягового класса 1,4 позволяет повысить производительность МТА и снизить удельный расход топлива на единицу выполненной работы.

**Методология и методы исследования.** В работе применены методы дифференциального и интегрального исчисления, теории эксплуатационных свойств МТА, моделирования динамических систем.

Оценка МТА на базе серийного трактора МТЗ-82 и опытного вариантов МТЗ-82 с технологическим модулем проводилась на основе лабораторно-полевых исследований на вспашке и дисковании стерни колосовых.

Данные исследования выполнены с использованием тензометрического измерительного комплекса. Полученные результаты обрабатывались в программе Matlab.

Технико-экономическую оценку применения технологического модуля проводили по принятой методике с использованием результатов, полученных при сравнительных полевых испытаниях МТА на базе МТЗ-82 с технологическим модулем.

**Положения, выносимые на защиту:**

- компоновочная схема, реализованная в МТА с технологическим модулем, обеспечивающая совмещение снижения колебаний внешней нагрузки и увеличения тягового усилия трактора, при уменьшении удельного расхода топлива;

- рациональные параметры технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами для модульного комплектования агрегатов на основе энергонасыщенных тракторов, обеспечивающие снижение колебаний тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора тягового класса 1,4;



- зависимости для определения рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования или балластировании энергонасыщенных тракторов, позволяющие учитывать потери мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам, и использования энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- математическая модель и параметры динамических процессов МТА, позволяющие учитывать наличие в его составе предложенного технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами;

- имитационное моделирование МТА как динамической системы, позволяющее устанавливать взаимосвязь упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность подтверждается результатами лабораторно-полевых испытаний, проведенных с достаточным количеством опытов и аппаратурой, обеспечивающей требуемую точность измерений, обработкой опытных данных с использованием математических программ на ПЭВМ.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на международных, всероссийских, межрегиональных и вузовских научно-практических конференциях Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, Брянского ГАУ за период с 2001 по 2016 годы.

Результаты проведенных исследований внедрены в сельскохозяйственной артели «Колхоз Маяк» Калужской области и крестьянском фермерском хозяйстве «Ягодное» Брянской области, подтверждают целесообразность применения технологических модулей с ведущими колесами. Данные технологические модули могут быть использованы для повышения эффективности использования МТА на базе энергонасыщенных универсально-пропашных тракторов.

Результаты диссертации используются в учебном процессе кафедры автомобиле- и тракторостроения Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке специалистов по специальности 23.05.01 и кафедры механизации сельскохозяйственного производства Калужского филиала РГАУ-МСХА им. К.А.

Тимирязева и Брянского ГАУ при подготовке бакалавров по направлению 35.03.06.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит постановка цели и задач исследования, разработка программы исследований. Принято непосредственное участие в сборе и обработке необходимых исходных данных, проведении теоретических, лабораторно-полевых исследований и сравнительных испытаний на полях сельскохозяйственной артели «Колхоз Маяк» Калужской области и учебно-опытного хозяйства Брянского ГАУ; обработке полученных экспериментальных данных; апробации результатов исследования на международных, всероссийских, межрегиональных и вузовских научно-практических конференциях в 2001–2016 годах, а также в условиях сельскохозяйственной артели «Колхоз Маяк» Калужской области и крестьянского фермерского хозяйства «Ягодное» Брянской области; подготовке публикаций.

**Публикации.** По результатам теоретических и экспериментальных исследований опубликовано 18 печатных работ, в том числе пять статей – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, восьми приложений. Объем диссертации составляет 153 страницы машинописного текста, список литературы состоит из 141 наименования.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Проблема повышения производительности МТА на основе трактора тяговой концепции

Теоретически и экспериментально доказано, что повышение производительности МТА через увеличение тягового усилия трактора (увеличение ширины захвата, или применение комбинированных сельскохозяйственных машин), или через увеличение его скорости в настоящее время достигли предельных значений и в обозримом будущем не претерпят существенных изменений [1, 2].

При тяговой концепции трактора полная реализация мощности двигателя через тяговое усилие трактора возможна только при согласовании мощности двигателя и его массы. Поэтому при повышении мощности двигателей тракторов их масса растет и увеличивается нагрузка на колеса трактора. Использование перспективных широкозахватных и комбинированных агрегатов приводит к увеличению веса технологической части агрегата, что также увеличивает нагрузку на колеса трактора с навесными и полунавесными орудиями, и повышает давление их движителей на почву.

Следствием увеличения нагрузки на колеса трактора является нарушение физико-механических качеств почвы и приводит к снижению урожайности. Так например, при увеличении давления на почву со 150 до 200 кПа отмечен рост недобора урожая в 1,5...2 раза [3]. По данным [3, 4] воздействие на почву у существующих тракторов в 1,3...2,5 раза превышает допустимое значение установленное ГОСТом 26953-86 [5]. Для снижения вредного давления на почву колесных тракторов и улучшения их тягово-сцепных свойств российские и зарубежные производители применяют сдвоенные и широкопрофильные шины, которые усложняют передвижение тракторов по дорогам, а также не вписываются в междурядье пропашных культур [6-9].

Для улучшения сцепления с опорной поверхностью и снижения степени ее уплотнения были сделаны попытки создания многоосных тракторов. Трехосные

варианты были разработаны ВИМом на базе узлов и агрегатов Т-150К и К-701 [10]. Финская фирма Valmet разработала трактор с колесной формулой 6К4, у которого задний мост мог подниматься в транспортное положение при помощи гидравлики [11].

На выставке «Agritechnica-2007» немецкая компания Fendt представила новую концептуальную разработку трехмостового трактора Trisix Vario, которая объединила в себе преимущества колесных и гусеничных тракторов. Три оси с шестью одинаковыми шинами 650/65 R 38 увеличивают площадь опоры по сравнению со стандартными тракторами примерно на 70 %. Этим устраняется ограничение двухосевых тракторов с шарнирно-сочлененной рамой, которые переносят мощность двигателя на почву только через сдвоенные и утроенные шины. Для оптимизации сцепления и снижения степени уплотнения грунта предусмотрена система контроля давления в шинах. По сравнению с гусеничными тракторами, возможности при пробуксовке на влажной почве лучше, скорость больше, комфорт при езде выше [12].

Для снижения степени уплотнения опорной поверхности американской фирмой Versatile выпущен трактор Big Roy с четырьмя поддрессоренными ведущими мостами, имеющий двигатель мощностью 442 кВт [13].

На выставке «Agritechnica-2009» в Ганновере (Германия) немецкой фирмой Deutz-Fahr был представлен трактор Agro XXL, имеющий мощность двигателя 440 кВт/600 л.с. и вес 19500 кг. Каждые два колеса на одной стороне соединены между собой посредством осевой системы типа „Буги" (Boogie) и приводятся от одного центрального привода. Трактор имеет четыре отвода мощности и распределяет силу и нагрузку на восемь колес. Задняя часть имеет платформу, оснащенную системой быстрой стыковки с контейнерами от фирмы Jost и имеет шаровое сцепное устройство для полуприцепа [14].

Применение многоосных тракторов хотя и снижает нагрузку на отдельные колеса трактора, однако не позволяет решить проблему роста общей массы трактора для реализации через тягу увеличенной мощности двигателя.

Экспериментально было доказано, что увеличения мощности двигателя не

дает пропорционального прироста производительности МТА при увеличении ширины захвата агрегата. Так, увеличение мощности тракторов Т-150 и К-701 по сравнению с трактором ДТ-75 соответственно в 2 и 4 раза, дало прирост производительности всего лишь в 1,6 и 2,7 раза [9]. При тяговой концепции трактора, не только не удастся получить повышения производительности МТА пропорционально увеличению мощности тракторного двигателя, но при этом увеличиваются энергозатраты на единицу выполненной работы. По данным [15] при увеличении мощности двигателя с 50 до 80 л.с. расход топлива на единицу выполненной работы увеличивается до 18%. Энергозатраты на дополнительное рыхление почвы, после воздействия колес трактора Т-150К, увеличиваются до 30% [16].

Таким образом, реализация возрастающей мощности двигателя через увеличение тягового усилия трактора является неперспективным, так как требует повышения массы трактора, что приводит к увеличению давления движителей на почву, потерь на его передвижение и удельного расхода топлива.

Другой путь повышения производительности МТА, через увеличение рабочих скоростей также ограничен. Для большинства современных сельскохозяйственных машин переход на рабочие скорости выше 10 км/ч нецелесообразен в первую очередь с энергетической точки зрения [17]. Кроме того, повышение колебаний нагрузки на входе в двигатель, вызванное, ростом рабочих скоростей МТА, приводит к недоиспользованию мощности двигателя до 20 % от стендовых показателей [18].

Дополнительный рост энергозатрат на единицу выполненной работы широкозахватными и скоростными МТА связан с увеличением разворотных полос и частых режимов разгон-торможение на коротких расстояниях полей средних размеров, характерных для Центральной части Российской Федерации.

Таким образом, формирование МТА на базе трактора тягача не только не дает пропорционального повышения ширины захвата МТА и его рабочей скорости относительно увеличения мощности двигателя трактора, но и приводит к повышению удельного расхода топлива. Поэтому в данном направлении создалась практически тупиковая ситуация, а рассмотренные способы развития тракторо-

строения являются неперспективными. Дальнейшее развитие сельскохозяйственного трактора связано с расширением его функциональных возможностей и переобразование трактора тягача в энергетическое средство - трактор тягово-энергетической концепции.

## **1.2 Проблемы и пути расширения тягово-технологических возможностей трактора**

Принципиальной особенностью трактора новой тягово-энергетической концепции является высокая энергонасыщенность, значение которой, по мнению профессора Кутькова Г.М [2] должно находиться в пределах 2,2...2,6 кВт/кН, что в 1,5...1,7 раза больше энергонасыщенности современных тракторов тяговой концепции. Такой трактор должен обладать развитой системой отбора и передачи мощности на привод технологической части МТА. Так как необоснованное увеличение энергонасыщенности тракторов старой тяговой концепции приводит к их недогрузке на 40...55% [19].

В последние десятилетия в мировом тракторостроении проводятся работы, направленные на поиск новых компоновочных и концептуальных решений, позволяющих существенно расширить функциональные возможности энергетического средства использовать его на возможно большем количестве технологических операций.

Для реализации заложенного резерва мощности двигателей энергонасыщенных тракторов через увеличение тягового усилия трактора при выполнении энергоемких технологических операций в последние годы наметилась тенденция применения балластирования [20, 21]. Увеличение веса трактора до 50% от эксплуатационного веса: трактор Fend-936 догружается до веса 150 кН при эксплуатационном весе 105 кН, приводит к значительному увеличению нагрузки на колеса трактора [2].

Другим направлением реализации избыточной мощности является составление сложных агрегатов из однооперационных навесных машин с приводом ра-

бочих органов от ВОМ и применением передненавесной системы. Среди разработок, отвечающих таким требованиям можно выделить модель универсально-пропашного трактора «MB-trak» немецкого концерна Daimler-Benz с формулой 4К4б, получившей название «системный», или «интегральный» трактор. Он имеет жесткую раму с управляемыми передними колесами, четыре ведущих колеса одинакового размера и распределением веса 60/40% по осям [22, 23, 138].

Английская фирма JCB предлагает шесть тракторов интегральной схемы серии «Fastrac» мощностью 128, 139, 147, 158, 167 и 185 л.с. Двигатель расположен спереди (как у трактора традиционной компоновки), кабина — между осями и за ней имеется пространство для установки емкостей, передние и задние колеса одинакового размера, передние и задние навесные устройства. Тракторы могут работать по двум скоростным характеристикам (два уровня мощности), что позволяет оптимизировать технико-экономические показатели двигателя в зависимости от нагрузки. Первая характеристика соответствует требованиям при выполнении полевых работ, вторая — при движении по дорогам на высоких скоростях. Тракторы Fastrac, по мнению специалистов фирмы, могут использоваться в течение всего года и эффективнее обычных тракторов на 50 % [24, 25].

Кроме того, тракторы аналогичной схемы выпускаются немецкой фирмой «Fendt» серии «Xylon» мощностью 110, 125 и 147 л.с. Специфическими отличиями тракторов указанной фирмы является комплектование их передними колесами несколько меньшего размера и наличие свободного пространства для обзора в зоне последних. Благодаря отмеченным особенностям конструкции тракторы фирмы «Fendt» обеспечивают большую (на 12-14%) величину массы, приходящуюся на заднюю ось, чем у тракторов остальных фирм, у которых масса распределяется примерно поровну между передней и задней осями.

В России и на Украине были созданные интегральные тракторы ЛТЗ-155 [26-29], РТМ-160 [30, 31], ХТЗ-121/160 [32, 33]. Следует отметить, что конструктивные параметры и тягово-сцепные свойства интегральных тракторов хотя и обеспечивают рациональное распределения массы между передними и задними колесами и позволяют комплектовать комбинированные МТА, но не решают про-

блему увеличения общей нагрузки на ось, которая и приводит к переуплотнению подпахотного горизонта [24].

Особый интерес представляют универсальные энергетические средства производства ГОМСЕЛЬМАШ (Белоруссия): УЭС-2-250А «ПАЛЕССЕ 2U250А» и УЭС-2-280А «ПАЛЕССЕ 2U280А» обеспечивающие высокую производительность, присущую специализированным самоходным машинам в то же время, как и интегральный трактор, может выполнять различные традиционные и совмещенные операции. В целях повышения универсальности энергосредства оборудованы передним и задним гидронавесными устройствами. В универсальных энергосредствах реализована концепция преимущественной передачи (до 100%) мощности двигателя через ВОМ. Это позволяет эффективно агрегатировать с ним машины и комбайны с активными рабочими органами и до 2 раз снизить массу энергосредства по сравнению с тракторами аналогичной мощности тяговой концепции. Наличие переднего и заднего валов отбора мощности позволяет агрегатировать сельхозмашины с двух сторон энергосредства, используя их в одном комплексе, что сокращает количество проходов по полю. В зависимости от необходимости двигаться вперед или назад рабочее место оператора может реверсироваться [34].

Дальнейшим развитием универсальных энергетических средств являются УЭС-450 «ПАЛЕССЕ U450». Новое энергосредство имеет гидромеханическую двухпоточную трансмиссию. Режим гидростатической трансмиссии используется при работе с машинами, не требующими значительного тягового усилия. При работе в режиме двухпоточной комбинированной трансмиссии на ходовую систему через ветвь гидростатической трансмиссии передается не более 30% мощности, а через механическую ветвь - не менее 70% мощности. Данный режим позволяет использовать энергосредство как мощный трактор (класса 5) при работе с машинами, требующими большого тягового усилия: с комбинированными агрегатами для обработки почвы и посева, а также с многокорпусными плугами.

Можно отметить оригинальное универсальное энергетическое средство «Steyr-8300», «Steyr-8300А», выпускаемое австрийской фирмой Steyr, аналогичное УЭС «Полесье-250» с кормо-, свекло- и зерноуборочными модулями [35].



Универсальное энергетическое средство «Steyr-8300» имеет полный реверс с хорошей обзорностью и удобным расположением органов управления для работы в обоих направлениях движения. Высокая энергонасыщенность «Steyr-8300», составляющая 42 кВт/т позволяет агрегатировать его с сельскохозяйственными машинами, обладающими активными рабочими органами. Для получения высокого КПД трансмиссии применен комбинированный привод (гидрообъемный – на ходовые колеса и механический – на ВОМ). Главным недостатком «Steyr-8300» это плохая приспособленность для выполнения тяговых операций [36].

Из всех двухосных энергетических средств конца 90-х наиболее универсальным был признан «Ксерин» фирмы «Класс». УЭС «Ксерин» является сочетанием самоходной машины, системы-носителя и трактора, предоставляющим пользователям небывалое разнообразие возможностей его применения. В отличие от многих других универсальных энергетических средств у него хорошая приспособленность для выполнения тяговых операций. Смещение кабины в одно из трех различных положений обеспечивает оптимальный обзор рабочих органов и освобождает большее пространство для навесных агрегатов. Превосходная тяговая мощность достигается благодаря оптимальному распределению веса. Производительность УЭС «Ксерин» сравнима со специализированными самоходными машинами [37].

На базе ВИМ была разработана концепция использования мобильных агрегатов с активными рабочими органами, совмещающими функции движителей [38]. Трактор становился и энергоносителем, и технологической машиной.

Для расширения функциональных возможностей энергетических средств был заложен модульный принцип построения самоходных агрегатов с высвобождаемыми энергетическими средствами. Основной принцип построения самоходных агрегатов на базе высвобождаемого энергетического модуля – стыковка двух самостоятельных модулей – энергетического и технологического.

В работе [39] рассмотрена возможность формирования зерноуборочного модульного агрегата, состоящего из энергетического, технологического и транс-

портного модулей. В качестве технологического модуля был предложен высвобождаемый прицепного адаптера.

Западногерманской фирмой AGG был выпущен одноосный тяговый модуль PU, обладающий мощностью 115 кВт. Он имеет переднюю и заднюю сцепками, что позволяет агрегатировать его с машинами как фронтального типа, так и орудиями, требующих больших тяговых усилий. Одноосные тяговые энергетические средства выпускала также французская фирма Vandel мощностью 92, 120 и 150 кВт [36].

Энергетическое средство МЭС-0,6 с колесной формулой 2К2, разработанное Харьковским заводом тракторных самоходных шасси совместно с ВИСХОМом и УНИИМЭСХ на основе моторно-трансмиссионной части самоходного шасси Т-16МГ, позволяет комплектовать МТА по блочно-модульному принципу [37, 39-41]. Принципиальная схема таких МЭС получила определение жесткостыкуемых. Такие агрегаты предназначены для механизации работ в агроцехах промышленных предприятий, на малых животноводческих фермах, мелкоконтурных полях, селекционных и сортоиспытательных участках. В результате жесткого соединения такого энергетического средства с модулями различного назначения можно получить различные мобильные средства: транспортный, транспортно-технологический, самоходное шасси, универсальный трактор, самоходный комбайн и т.д.

Основным недостатком таких конструкции является полная потеря качеств самостоятельной транспортной единицы в автономном положении.

Французской фирмой Dehondt создана приставка PRM-200, которая стыкуется с передней частью колесного трактора и имеет опорные колеса [43]. Для выполнения различных сельскохозяйственных операций к приставке присоединяются навесные и полунавесные машины фронтального типа.

ВИСХОМом были разработаны высвобождаемые энергетические модули ВЭС-150 и ВЭМ-220 с колесной формулой 6К4 или 6К6 тягового класса 2,5...3,5, предназначенные для агрегатирования с орудиями в межосевой зоне. МТА на базе ВЭС хоть и имеют недостаточную поворотливость, зато обладают высокими тя-

гово-сцепными свойствами [44]. Основным принципом построения самоходных агрегатов на базе высвобождаемого энергетического модуля конструкции ВИСХОМа – стыковка двух самостоятельных модулей – энергетического и технологического.

Модульный принцип построения заложен в конструкцию модульных энергетических средств МЭС-150, МЭС-200 и МЭС -300 на основе трактора тягово-энергетической концепции. Принципиальным отличием от всех ранее известных энергетических средств, это высокая универсальность, связанная с его переменным тяговым классом, позволяющая либо сократить номенклатуру тракторов там, где она слишком разветвлена, либо наоборот – решить проблему, вызванную отсутствием энергетических средств определенного тягового класса. Вес технологических модулей подобраны такими, чтобы обеспечивать переход трактора в смежный тяговый класс по действующему в нашей стране типу. Транспортно-технологический модуль, оснащен активными колесами, приводимыми от двигателя трактора, гидравлическим навесным, седельным и прицепным устройствами, ВОМ и другим оборудованием, необходимым для выполнения полевых и транспортных операций [45-47].

Разработанный НАТИ совместно с ГСКБ по универсальным пропашным тракторам Минского тракторного завода МЭС-200 состоял из энергетического модуля (серийный трактор МТЗ-142 класса 2) с забалластированным транспортно-технологическим модулем (ТТМ). Наличие на ТТМ механизма навески трактора Т-150К, отбора, технологического пространства позволяло эффективно использовать МЭС-200 для составления на его основе комбинированных агрегатов, предназначенных для агрегатирования с тракторами 3 тягового класса. Сменная производительность агрегатов на базе МЭС-200 повышалась на 35...37%, а расход топлива снижался не менее чем на 17% по сравнению с базовыми пахотными МТА. Одним из недостатков МЭС-200 является отсутствие независимого ВОМ.

Харьковским тракторным заводом был создан МЭС-300 с мощностью двигателя 190 кВт на базе серийного трактора Т-150К, имеющий синхронный ВОМ. Установленный на энергетическом модуле двигатель СМД-61 имел два уровня мощности: 162 кВт и 190 кВт. Технологический модуль МЭС-300, выполненный

на базе заднего моста трактора Т-150К имел механизм навески трактора К-700. Сменная производительность МЭС-300 была на 66,3% больше в сравнении с МТА на базе гусеничного трактора Т-150 и на 68,0% в сравнении с агрегатом на основе колесного трактора Т-150К. Экономия погектарного расхода топлива пахотного МТА на основе МЭС-300 в сравнении с агрегатом на базе гусеничного трактора составляла 20,1%, а колесного 43,9% [45-47]. Высокая производительность МЭС-300 достигалась за счет большей в 1,6 раза ширины захвата и на 5 – 9% большей скорости рабочего движения. Возможность использования различных схем присоединения технологических частей МТА обеспечило МЭС-200 и МЭС-300 высокую функциональность и универсальность. Использование на ТТМ седельно-сцепного устройства (ССУ) позволило агрегатировать МЭСы практически со всеми прицепными, полунавесными и навесными сельскохозяйственными машинами, и орудиями, включая большегрузные седельные полуприцепы.

Однако простым добавлением дополнительного ведущего моста нельзя создать модульное энергетическое средство переменного тягового класса на базе трактора существующей тяговой концепции. Это подтверждают результаты тяговых испытаний, проведенных ВИМом трактора МТЗ-52 (4К4) с энергонасыщенностью - 11,5 кВт/т оборудованного дополнительным активно-приводным мостом с колесами 12-38 [48]. Отмечен рост номинального тягового усилия на 62% при снижении скорости движения на 27% из-за недостаточной энергонасыщенности МТЗ-52. В результате прирост максимальной тяговой мощности (т.е. условного тягового КПД) составил всего 17%, а не возможные 62% при равных скоростях, которые возможно достичь при энергонасыщенности трактора не менее 18 кВт/т. Такой показатель, как отмечается в [64], является характерным признаком трактора не тяговой, а тягово-энергетической концепции. При этом если принять энергонасыщенность трактора класса 2 такую же, как у МТЗ-52 (11,5 кВт/т), то развиваемая производительность МТА на основе МТЗ-52 с приставным мостом будет по крайней мере на 27% меньше, чем у аналогичных (абсолютно одинаковых по составу) агрегатов на базе трактора класса 2.

### **1.3 Особенность работы двигателя при агрегатировании трактором технологических машин**

В условиях сельскохозяйственной эксплуатации работа тракторного двигателя значительно отличается от работы его в стендовых условиях в сторону ухудшения показателей. Многочисленные исследования проведенные В.Н. Болтинским [52], С.А.Иофиновым [49], Г.М.Кутьковым [50], Л.Е.Агеевым [51], В.Н. Поповым [20] и др. указывают на наличие значительных колебаний момента сопротивления на входе в двигатель при агрегатировании с трактором технологических машин. Источником которых являются постоянные изменение сопротивления рабочих органов МТА, вызывающие дополнительные колебания нагрузок в зубчатых зацеплениях трансмиссии трактора. Колебание сопротивления рабочих органов МТА объясняется различным макро- и микрорельефом обрабатываемого поля, неоднородностью физических свойств почвы. На величину неравномерности сопротивления рабочих органов МТА влияют глубина обработки, скорость движения, наличие поворотов и другие факторы.

Исследованиями влияния колебаний момента сопротивления на входе в двигатель на его показатели в условиях эксплуатации посвящены многочисленные исследования, что свидетельствует об актуальности данной проблемы. Академик В.Н. Болтинский [52] впервые получил показатели снижения мощности при работе тракторного двигателя при переменной нагрузке. На основании теоретических и экспериментальных исследований [52 -54] он сделал вывод, что вследствие колебаний нагрузки снижаются мощностные и экономические показатели двигателя по сравнению с этими же показателями при загрузке постоянным моментом, и ввёл понятие коэффициента использования мощности двигателя. Этот коэффициент равен отношению максимальной мощности, полученной при работе двигателя с переменной нагрузкой, к максимальной мощности, полученной при стандартных тормозных испытаниях. В результате исследований В.Н. Болтинского были установлены значительные изменения показателей работы двигателя при периодических колебаниях момента сопротивления.

В других исследованиях [55, 56] установлено, что изменения энергетических показателей наблюдаются при отсутствии фазовых сдвигов между входными и выходными координатами системы. Авторы этих работ отмечают, что им не удалось получить снижение показателей работы двигателя на линейном участке регуляторной характеристики. Колебания внешней нагрузки вызывают колебания показателей двигателя, однако их средние значения сохранялись такими же, как при нагрузке с постоянным моментом сопротивления. В то же время работа двигателя при переходе рабочей точки с корректорного участка характеристики на регуляторный и обратно сопровождается ухудшением показателей работы двигателя. Это объясняется нелинейностью регуляторной характеристики двигателя.

В работах Ю.К. Киртбая [56], А.А. Юшина [57] и других ученых отмечается влияние гармонических колебаний внешней нагрузки на показатели работы автотракторных двигателей. С.А. Иофинов [49], Л.Е. Агеев [51], Е.М. Демченко [58] и др., отмечали снижение средних показателей мощности на нелинейном участке регуляторной характеристики, а также снижение скоростного режима двигателя при рассмотрении изменения нагрузки в виде случайной функции, близкой к нормальному закону распределения,

Ухудшение выходных показателей двигателя при неустановившемся характере нагрузки А.К. Юлдашев [59] объясняет нарушением процессов топливоподачи и сгорания. Н.С. Ждановский и А.В. Николаенко [60] отмечают так же снижение индикаторных показателей при переменной нагрузке.

Как показали опыты, проведенные в Челябинском ИМЭСХ под руководством профессора В.Н. Попова, непрерывное колебание нагрузки на входе в двигатель на тракторе с МСТ приводит к рассогласованию систем двигателя, влияет на его работу в процессе эксплуатации и отражается на энергозатратах МТА. В работе [61] отмечено, что динамическая характеристика не соответствует стендовой скоростной характеристике как на корректорном, так и на регуляторном участках. Причем отклонения увеличиваются по мере увеличения амплитуды и частоты колебаний момента сопротивления на входе в двигатель. Падение коэффициента использования мощности двигателя происходит, с одной стороны из-за

несоответствия цикловых подач топлива и воздуха скоростному и нагрузочному режимам работы дизеля, с другой - падением его индикаторного КПД. Снижение цикловой подачи топлива в эксплуатационных условиях объясняется в работах [62, 63] смещением среднего положения рейки топливного насоса в сторону снижения подачи топлива.

Снижение мощности двигателя от неравномерной нагрузки объясняется Г.М.Кутьковым [64] уменьшением количества рабочих циклов (вследствие нелинейности регуляторной характеристики), что и приводит к уменьшению часовой подачи топлива, даже при сохранении его цикловой подачи, а также индикаторных показателей работы. При наличии потерь, вызванных ухудшением теплового процесса двигателя, рассогласованием в САР и т. д. из-за колебаний момента сопротивления на входе в двигатель, необходимо их учитывать дополнительно [64].

Неустановившийся режим работы сказывается и на темпах износа механизмов и деталей двигателя. Стендовые испытания [65] показали, что темпы износа двигателя при неустановившейся нагрузке на 20...80% выше, чем при установившейся.

#### **1.4 Способы снижения колебательных процессов в МТА путем применения упругих элементов**

Показатели трактора как динамической системы в большой степени зависят от того, как отдельные элементы этой системы приспособлены для работы в условиях колебательных воздействий. Для устранения отрицательного влияния колебательных процессов были проведены многочисленные исследования влияния постановки упругих элементов и демпфирующих устройств в различных местах трактора. Изменённая конструкция позволяет уменьшить воздействие изменяющихся нагрузок на весь трактор или на отдельные его узлы.

На рисунке 1.1. показаны места возможной установки в тракторе упругих элементов и демпфирующих устройств.

Впервые влияние упругих элементов в виде пружины между силовой уста-

новкой и орудием на динамику МТА рассмотрено В.П. Горячкин. Было отмечено, что продолжительность удара при этом растягивалась на больший промежуток времени, а среднее усилие уменьшалось, чем при неупругом ударе.

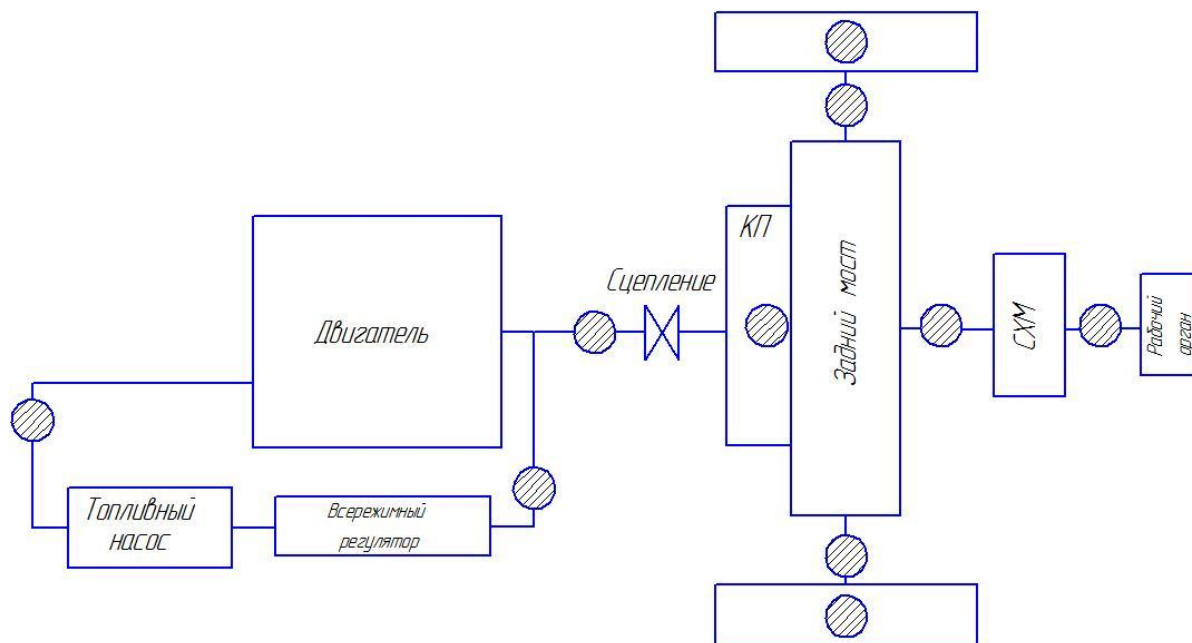


Рисунок 1.1 - Места возможной установки в тракторе упругих элементов и демпфирующих устройств

Использование упругой сцепки на пахотном агрегате позволило снизить колебания тягового сопротивления и повысить среднюю скорость движения [66, 67]. Наличие упругих элементов в сцепном устройстве улучшает динамику разгона тракторного поезда: минимальные обороты двигателя в период трогания и разгона повышаются в среднем на 5-15% в сравнении с жёсткой сцепкой; несколько снижаются динамические нагрузки в трансмиссии, благодаря постепенному нарастанию тягового усилия; сокращается на 8-15% работа буксования муфты сцепления; уменьшается нагрев её деталей и износ фрикционных накладок.

Ввиду разнообразия режимов работы МТА, упругий элемент должен обладать переменной нелинейной нагрузочной характеристикой, что позволит уменьшить вероятность резонанса при совпадении частот свободных и вынужденных колебаний [68], а также свойством диссипации энергии колебаний, которые возникают при установившемся движении вследствие воздействия внешних возмущений.



Для уменьшения отрицательного влияния колебания нагрузки со стороны сельскохозяйственной машины была создана и испытана навеска с пневмогидравлическим упругим элементом на гусеничном тракторе [69, 70], которая обладает большей энергоемкостью и возможностью получения нелинейной характеристики. Введение пневмогидравлического упругого элемента на колесном тракторе позволило снизить среднеквадратическое отклонение горизонтальной составляющей тягового усилия на 34 - 52%, момента сопротивления на входе в двигатель на 33 - 42%, частоты вращения коленчатого вала на 43 - 51%.

Еще одним способом уменьшения динамической нагруженности трактора является упругое крепление рабочих органов сельхозмашины. Отмечается, что применение упругого крепления корпусов рабочих органов к раме сельхозмашины снижает степень неравномерности сопротивления орудия, при этом повышается загрузка двигателя, увеличивается производительность агрегата и уменьшается удельный расход топлива [71].

В работах [72 - 75] рассмотрен упругодемпфирующий привод ведущих колес трактора МТЗ-80Л, встроенный в ведомую шестерню конечной передачи, на полуосях ведущих колес и пневмогидравлический упругодемпфирующий элемент ведущих колес. Установка упругодемпфирующего привода на полуосях ведущих колес [74], снижает максимумы спектральных плотностей крутящих моментов на задних полуосях до 2,1 раза и смещает их в область низких частот 1,3...1,8 Гц. Установка эластичного привода ведущих колес ведет к снижению затрат энергии на перекачивание на 10-15%, снижается буксование ведущих колес на основных технологических операциях на 10-13% в сравнении с серийным приводом [75]. При упругодемпфирующем приводе движителей в сравнении с обычным дифференциальным улучшается процесс трогания и разгон агрегата, уменьшается буксование муфты сцепления, повышается устойчивость работы, двигателя и агрегата в целом.

Наряду с положительными сторонами, следует отметить, что упругодемпфирующие элементы, установленные на колесе, передают значительные моменты, поэтому такие устройства громоздки и обладают недостаточной надежностью,

приводы имеют малую энергоёмкость. Кроме того, они не могут предохранить двигатель от крутильных колебаний возникающих в трансмиссии трактора, линейная характеристика таких приводов может вызывать возникновение резонансных режимов в трансмиссии на определенных видах работ.

Особый интерес представляют пневмогидравлические приводы преимуществ, которых - большая энергоёмкость и возможность получения нелинейной характеристики. Применение упругодемпфирующего пневмогидравлического привода ведущих колес регрессивно-прогрессивного вида в агрегате с плугом ПЛН-3-35 позволило снизить колебание крутящего момента на ведущих колесах и тяговое усилие на 17 - 22%, буксование движителей на 16 - 20% и повысить производительность на 7 - 9% [76, 77].

Наиболее полное снижение динамических нагрузок в трансмиссии трактора достигается установкой в трансмиссию гидротрансформаторов и гидромукта. Отдельным вопросам применения сочетания гидродинамического трансформатора и ступенчатого редуктора на тракторах сельскохозяйственного назначения посвящены исследования В.И. Анохина [78], Ф.А. Черпака [81], Е.И. Дьячкова, М.А. Шарова [82], В.Н. Попова [20], Ж.И. Султанова [83] и других ученых. Применение гидротрансформаторов снижает ударные воздействия изменяющейся нагрузки на двигатель и трансмиссию. Гидротрансформатор позволяет плавно трогаться с места и плавно разгоняться под нагрузкой, что значительно увеличивает срок службы двигателя и трансмиссии за счёт уменьшения динамических нагрузок в силовой цепи трактора. Гидротрансформатор даёт возможность автоматически и бесступенчато изменять скорость движения трактора в зависимости от тяговой нагрузки, что обеспечивает максимальную скорость МТА от тягового сопротивления.

Решающим положительным качеством ГМТ является способность обеспечивать эксплуатацию двигателя и его систем на оптимальных режимах работы. Это даёт возможность в определенных диапазонах скорости и тяги выходить трактору на его потенциальную тяговую характеристику, что обеспечивает максимальную производительность МТА при минимальных энергозатратах. Однако,

несмотря на наличие бесспорных достоинств, гидротрансформаторы имеют и существенный недостаток, который сдерживает их широкое применение в сельскохозяйственных тракторах. Это КПД трансмиссии с гидродинамическим трансформатором, который на 10...15% ниже КПД механической трансмиссии.

Для снижения крутильных колебаний со стороны двигателя и уменьшения динамических нагрузок в трансмиссии широкое применение получили упруго-демпфирующие элементы, устанавливаемые в дисках муфт сцепления [84 - 86]. Для снижения резонансных амплитуд в гасителе устанавливают поглотитель энергии крутильных колебаний [87]. В качестве сил сопротивления в таких гасителях используют внутреннее трение резины, сопротивление вязкой жидкости и сопротивление сухого трения. Основным недостатком демпферов с резиновыми элементами является нестабильность механических характеристик резины при различной температуре. Применение гидравлического демпфера в диске сцепления трактора не нашло широкого распространения в результате сложной конструкции и высокой стоимости. Кроме того, применение упругодемпфирующих элементов в дисках муфт сцепления оказывают незначительное снижение колебаний внешней нагрузки.

Применение эластичного элемента на валу сцепления позволило на установленном режиме работы МТА стабилизировать нагрузку. Снижение в 1,6-2,6 раза вероятности работы трансмиссии на максимальном крутящем моменте и повышение среднеквадратичного отклонения моментов на валах сцепления и ведущих колёс в 1,24 и 1,41 раза и вероятности работы трансмиссии на среднем крутящем моменте в 1,33 раза уменьшают расход топлива на 5,7% и увеличивают производительность на 4% [88].

В работе [89] для улучшения разгонных характеристик трактора класса 1,4 предлагается устанавливать между двигателем и первичным валом коробки перемены передач специальное устройство, выполненное на базе увеличителя крутящего момента трактора МТЗ-50, у которого вместо муфты свободного хода установлено податливое звено (спиральная пружина). Закручивание упругого элемента на достаточно большой угол приводит к существенному увеличению габаритов

самого устройства. Авторами установлено значительное снижение динамических нагрузок на двигатель и повышение коэффициента полезного действия трансмиссии.

Применение упругодемпфирующего механизма в трансмиссии трактора с переменной жесткостью и автоматическим изменением передаточного числа, предназначенного для плавного трогания и снижения динамических нагрузок в трансмиссии при разгоне был рассмотрен в работах [90, 91]. Упругодемпфирующий механизм состоит из планетарного редуктора, масляного насоса с системой предохранения и дозировки, и пневмогидроаккумулятора. Маховик двигателя имеет жесткую связь с коронной шестерней, а водило планетарного редуктора соединено с ведущим валом коробки передач, на котором установлены фрикционы гидроподжимных муфт, а центральная шестерня редуктора приводит во вращение податливое звено упругого элемента - насос соединенный с гидроаккумулятором. Исследования применения упругодемпфирующего механизма на тракторе К-701 показали, что при разгоне агрегата минимальная частота вращения коленчатого вала двигателя повышается на 1,4-9,1% [91]. Исследования, проведенные с аналогичным устройством на тракторе МТЗ-80 [92] в составе посевного агрегата показали, что двигатель трактора с упругодемпфирующим механизмом защищен от высокочастотных колебаний внешней нагрузки.

Чувствительному элементу регулятора прямого действия тракторного двигателя передаются как высокочастотные колебания угловой скорости, вызванные изменениями нагрузки, так и высокочастотные (с частотой 25-50 Гц) возникающие из-за неравномерности вращения коленчатого вала двигателя, толчков со стороны плунжеров на кулачковый вал насоса и неуравновешенности грузов регулятора. Применение демпфера в регуляторе повышает коэффициент использования мощности на 2-8% [93, 94].

## 1.5 Выводы и задачи исследования

Анализ исследований, посвященных изучению работы МТА на базе энергонасыщенных тракторов при выполнении технологических операций позволяет сделать следующие выводы.

1. Формирование МТА на базе трактора тягача снижает темп увеличения ширины захвата МТА и его рабочей скорости относительно увеличения мощности тракторного двигателя с одновременным увеличением энергозатрат на единицу обработанной площади. Дальнейшее развитие сельскохозяйственного трактора связано с расширением его функциональных возможностей и трансформацией трактора тягача в энергетическое средство - трактор тягово-энергетической концепции.

2. Заложенный резерв мощности двигателя энергонасыщенных тракторов не может быть реализован в силу тяги при тяговой концепции трактора. Выделены два основных варианта реализации резерва мощности: балластирование трактора и применение технологического модуля с ведущим мостом, позволяющие повысить тяговое усилие.

3. Работа двигателя на тракторе с механической ступенчатой трансмиссией в условиях сельскохозяйственной эксплуатации сопровождается значительными колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель, приводит к ухудшению его показателей и снижению производительности МТА.

4. Для устранения отрицательного влияния колебательных процессов были проведены многочисленные исследования влияния постановки упругих элементов и демпфирующих устройств в различных местах трактора. Однако остается не изучено влияние упругодемпфирующих свойств технологического модуля на снижение колебаний внешней нагрузки при модульном комплектовании МТА на базе тракторов тягово-энергетической концепции.

Таким образом, проблема формирования высокопроизводительных и энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов на базе энергонасыщенных тракторов, в том числе путем увеличения тягового усилия за счет применения техно-

логического модуля с упругодемпфирующими свойствами и ведущими двигателями приобретает высокую научно-практическую значимость.

В связи с этим целью работы является повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе трактора тягового класса 1,4 за счет подбора рациональных параметров технологического модуля при модульной системе агрегатирования.

В соответствии с целью исследований предусмотрено решение следующих задач:

- провести изыскание модульного построения в виде компоновочной и функциональной схемы МТА для трактора тягового класса 1,4 с технологическим модулем и разработать экспериментальный образец технологического модуля, обеспечивающий совмещение снижения колебаний внешней нагрузки и увеличения тягового усилия трактора при уменьшении удельного расхода топлива на единицу выполненной работы;

- разработать методику расчета рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластировании энергонасыщенных тракторов с учетом потерь мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам, и использования энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- разработать математическую модель динамических процессов МТА с учетом наличия в его составе предложенного технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами, позволяющую определить рациональные параметры технологического модуля и провести имитационное моделирование для установления взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель;

- провести экспериментальное подтверждение и экономическую оценку эффективности применения технологического модуля с ведущими колесами для трактора тягового класса 1,4 при модульном построении МТА.

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ МТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ВЕДУЩИМИ КОЛЕСАМИ И ОБЛАДАЮЩЕГО УПРУГОДЕМФИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ**

### **2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы технологического модуля для тракторов тягового класса 1,4**

Обзор известных конструкций применения дополнительных ведущих мостов на тракторах [10-14, 37, 39-41, 43-47] позволил установить общую тенденцию компоновочных решений путем комплектации тяговых агрегатов на основе трактора и технологического модуля. Наиболее эффективная компоновка тракторов с технологическим модулем заключается в последовательном присоединении его к трактору посредством трехточечной навески, допускающей одну степень свободы для перемещения модуля в вертикальной плоскости. С целью обеспечения достаточной маневренности трактора с технологическим модулем и сельскохозяйственной машиной применяется метод «излома агрегата» по типу шарнирно-сочлененной рамы. На технологическом модуле устанавливаются навесные системы для агрегатирования сельскохозяйственных машин в полевых условиях аналогичные основной навеске трактора более высокого класса.

Анализ конструктивных и эксплуатационных характеристик известных модульных энерготехнологических средств показывает, что компоновочные решения в основном удовлетворяют требованиям по составлению полевых машинно-тракторных агрегатов и обеспечивают их эффективное использование с тракторами 2 и 3 тяговых классов. В результате обзора известных модульных энерготехнологических средств выявлено отсутствие практических вариантов конструкции и результатов исследований по составлению МТА по модульному принципу для универсально-пропашных тракторов тягового класса 1,4. Поэтому на основании проведенного обзора источников предложена компоновочная схема и конструкция технологического модуля для исследования с универсально-пропашными тракторами тягового класса 1,4.

При модульной схеме комплектования МТА на базе тракторов тягового классов 1,4 необходимо учесть их назначение в качестве универсально-пропашного варианта для выполнения широкого спектра сельскохозяйственных технологических операций. Поэтому для тракторов тягового класса 1,4 предложена схема комплектации трактора с технологическим модулем на основе легко соединяемой и отсоединяемой конструкции навески. Для обеспечения маневренности универсально-пропашного трактора с технологическим модулем и сельскохозяйственной машиной предложена гидромеханическая конструкция поворотного удерживающего устройства, которое устанавливается на технологическом модуле. На технологическом модуле предложено установить навесную систему аналогичную тракторной для агрегатирования всех вариантов сельскохозяйственных машин в полевых условиях. На рисунке 2.1 представлены схема компоновки МТА на базе трактора 1 тягового класса 1,4 в сочетании с технологическим модулем 2.

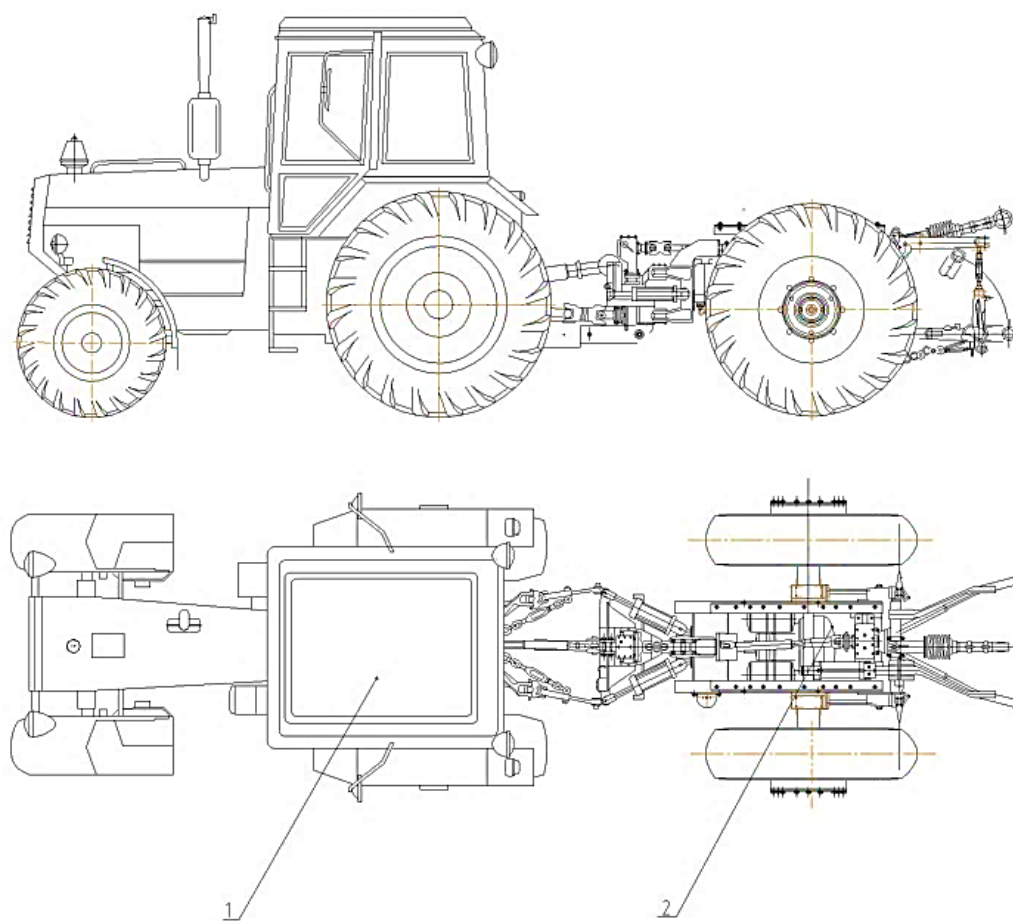


Рисунок 2.1 – Трактор тягового класса 1,4 с технологическим модулем:  
1-трактор, 2- технологический модуль.



Технологический модуль представляет собой одноосную приводную тележку-сцепку, выполненную на основе шарнирно-сочлененной несущей рамы оборудованной ведущими колесами, изготовленный на базе заднего моста трактора Т-150К (рисунок 2.2). В передней части технологический модуль оснащен стандартным устройством трактора класса 1,4 для навешивается на треугольник заднего навесного механизма трактора МТЗ-82. В задней части технологический модуль имеет механизм навески, унифицированный с механизмом навески трактора класса 3.



Рисунок 2.2 - Общий вид МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и тяжелой дисковой бороной БДТ-7

Присоединение технологического модуля к трактору с помощью штатной четырехзвенной навесной системы последнего, настроенной по трехточечной схеме позволяет также самостоятельно агрегатировать трактор с любым орудием без какой-либо переналадки его заднего навесного устройства, что повышает его универсальность. Для удобства стыковки трактора и технологического модуля, последний оснащен автоматической сцепкой и передней выдвижной опорой. Для соединения с сельскохозяйственными машинами, технологический модуль оснащен универсальным гидравлическим навесным оборудованием.

Привод ходовой части технологического модуля осуществляется от синхронного ВОМ трактора через карданную передачу и согласующий редуктор технологического модуля, обеспечивающий равенство окружных скоростей ведущих колес трактора и технологического модулей.

Поворот технологического модуля относительно трактора во время движения на поворотной полосе и копирование профиля поля в поперечно-вертикальной плоскости обеспечивается благодаря наличию вертикального и горизонтального шарниров. Вертикальный шарнир размещен на половине расстояния между его движителями и задними колесами трактора, что обеспечивает вписываемость в колею задних колес трактора. В процессе движения рычаг управления гидроцилиндром навесного устройства устанавливается в «плавающее» положение, что обеспечивает удовлетворительное копирование неровностей почвы трехосной ходовой системой в продольно-вертикальной плоскости.

МТА сформированный по модульной схеме на базе колесного трактора, позволяет использовать сцепной вес не только трактора, но и технологического модуля с навешенным на него сельскохозяйственным орудием. Вес технологических модулей подобраны такими, чтобы обеспечивать переход трактора в смежный тяговый класс по действующему в нашей стране типу. При необходимости технологический модуль можно балластировать. Получение дополнительного тягового усилия позволяет использовать перспективные широкозахватные или комбинированные орудия, предназначенные для тракторов большего тягового класса. Такой подход к созданию МТА позволяет использовать трактор отдельно или трактор в сочетании с технологическим модулем в агрегате с имеющимся шлейфом сельскохозяйственных машин, предназначенных для работы с серийно выпускаемыми тракторами как минимум двух смежных тяговых классов. Таким образом трактор тягово-энергетической концепции при использовании технологического модуля становится универсальным по «вертикали».

Технологические модули могут быть не только пропашного, но и тягово-транспортного назначения для тракторов тягового класса 1,4, что позволяет расши-

ритель диапазон технологической универсальности трактора тягового класса 1,4 новой тягово-энергетической концепции (рисунок 2.3).

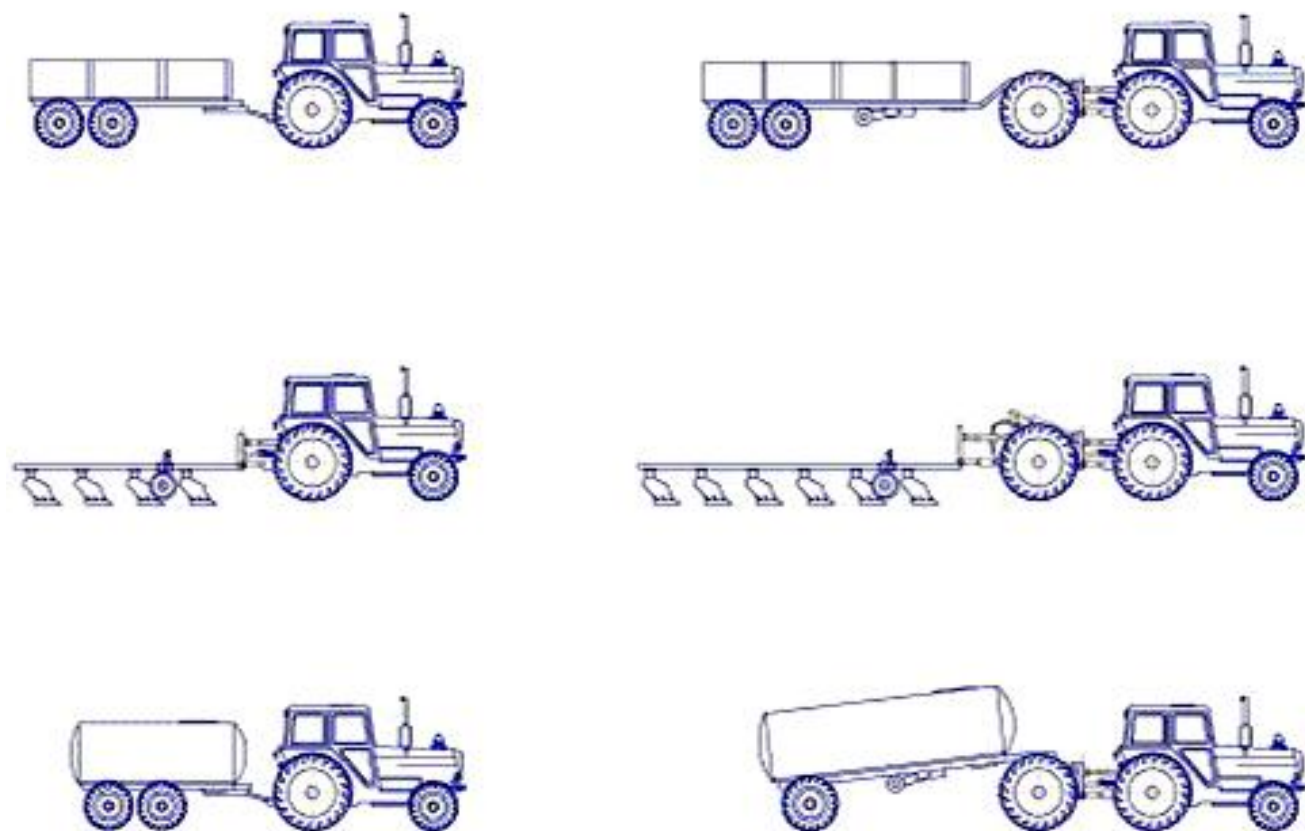


Рисунок 2.3 - Сравнительные варианты агрегатирования МТА на базе тракторов тяговой и тягово-энергетической концепции

В силу своей высокой функциональной универсальности рассматриваемый МТА отличается множеством схем присоединения технологической части МТА. Применение переднего навесного устройства увеличивает количество технологических пространств (рисунок 2.4) и позволяет агрегатировать широкозахватные агрегаты по нескольким схемам: одно орудие спереди, два сзади, или два орудия спереди, одно сзади с применением технологической емкости (рисунок 2.5).

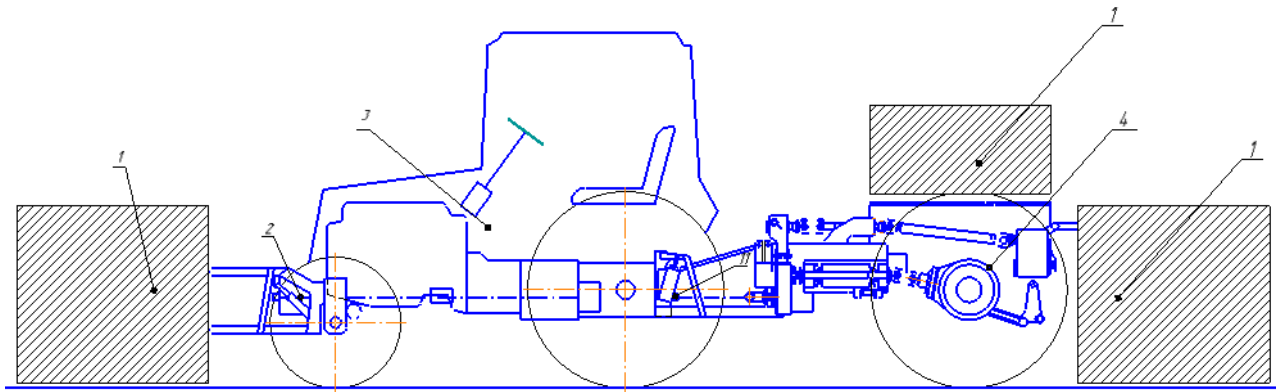


Рисунок 2.4 – Технологические пространства на тракторе с технологическим модулем:

1 – технологические пространства; 2 – переднее навесное устройство;  
3 – трактор; 4 – технологический модуль

Существующие на сегодняшний день многочисленные рекомендации и предложения по выбору схемы и параметров агрегатов на базе серийных тракторов, не могут быть полностью использованы при решении подобной задачи для МТА при модульном построении с универсально-пропашными тракторами тягового класса 1,4. Особенности конструктивной схемы последних требуют разработки практически новых основ их агрегатирования с сельскохозяйственными машинами и орудиями. Наличие причин специфического характера объясняется особенностями их схемы и конструктивных параметров (удлиненная база, колея и др.) МТА на основе модульной схемы с универсально-пропашными тракторами.

При неоптимальном способе и параметрах соединения трактора и технологического модуля в продольно-вертикальной плоскости это может привести к разгрузке переднего моста трактора. В результате, кроме снижения тягово-сцепных свойств последнего, вполне возможно ухудшение управляемости и устойчивости движения модульного МТА со всеми вытекающими отсюда последствиями

Потери на преодоление сопротивления качению МТА на основе модульной схемы будут уменьшаться вследствие снижения эксплуатационного веса трактора и замены опорных колес технологической части агрегата ведущими колесами, которые имеют больший диаметр и меньшее давление воздуха. Потери на буксование движителей МТА могут несколько снижаться, если в состав МТА входит колесный трактор и колея технологического модуля совпадает с колеей трактора тя-

гового класса 1,4. При применении механического привода ведущих колес технологической части агрегата следует ожидать некоторого роста потерь в трансмиссии МТА для тракторов тягового класса 1,4.

Производительность МТА на основе модульной схемы будет выше благодаря более полному использованию мощности двигателя через ведущие колеса технологического модуля. Кроме того, технологический модуль позволяет устанавливать большие емкости для технологического материала, чем МТА на основе трактора.

## **2.2 Математическая модель тягово-динамических процессов МТА на базе трактора с технологическим модулем**

Основное назначение технологического модуля (ТМ) состоит в создании дополнительной силы тяги за счет использования избыточной мощности двигателя энергонасыщенного трактора. Положительным побочным его свойством являются демпфирование горизонтальных колебаний, создаваемых силой сопротивления сельскохозяйственного орудия. Гашение колебаний осуществляется эластичностью пневматических шин колес и инерционностью массы ТМ. Исследование упругодемпфирующих свойств ТМ представляет определенный интерес, потому что они могут существенно снижать динамическую нагрузку на трансмиссию и двигатель, а также повышать виброзащищенность тракториста [45, 95].

Для соблюдения динамического подобия рассматриваемой эквивалентной модели реальному МТА с ТМ при установившемся режиме движения подбираем маховые массы таким образом, чтобы кинетическая энергия каждой из них была равна суммарной кинетической энергии заменяемых ею масс. Данным условиям соответствует укрупненная динамическая модель МТА с ТМ по окончании буксования ведомой части сцепления, изображенная на рисунке 2.6 [96, 97, 101].

Модель МТА характеризуют следующие параметры:

$J_1$  - приведенный момент инерции двигателя;

$J_2$  - момент инерции вращающихся деталей ведомой части муфты сцепления;

$J_3$  - момент инерции вращающихся деталей общей части трансмиссии для всех ведущих мостов;

$J_4$ ,  $J_5$  и  $J_6$  - моменты инерции, вращающихся деталей приводов передних и задних ведущих колес трактора и привода ведущих колес технологического модуля (ТМ);

$J_7$ ,  $J_8$  и  $J_9$  - моменты инерции дисков передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля (ТМ);

$J_{10}$ ,  $J_{11}$  и  $J_{12}$  - моменты инерции шин передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля (ТМ);

$m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  - поступательно-движущиеся массы: трактора, технологического модуля (ТМ) и агрегатируемой сельскохозяйственной машины;

$c_{23}$  и  $k_{23}$  - окружная жесткость и коэффициент демпфирования общей части трансмиссии;

$c_{34}$ ,  $c_{35}$ ,  $c_{36}$  и  $k_{34}$ ,  $k_{35}$ ,  $k_{36}$  - окружная жесткость и коэффициент демпфирования привода передних и задних ведущих колес трактора и деталей привода ведущих колес технологического модуля;

$c_{47}$ ,  $c_{58}$ ,  $c_{69}$  и  $k_{47}$ ,  $k_{58}$ ,  $k_{69}$  - окружная жесткость и коэффициент демпфирования передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;

$c_{7.10}$ ,  $c_{8.11}$ ,  $c_{9.12}$ ,  $k_{7.10}$ ,  $k_{8.11}$ ,  $k_{9.12}$  - окружная жесткость и коэффициенты демпфирования шин

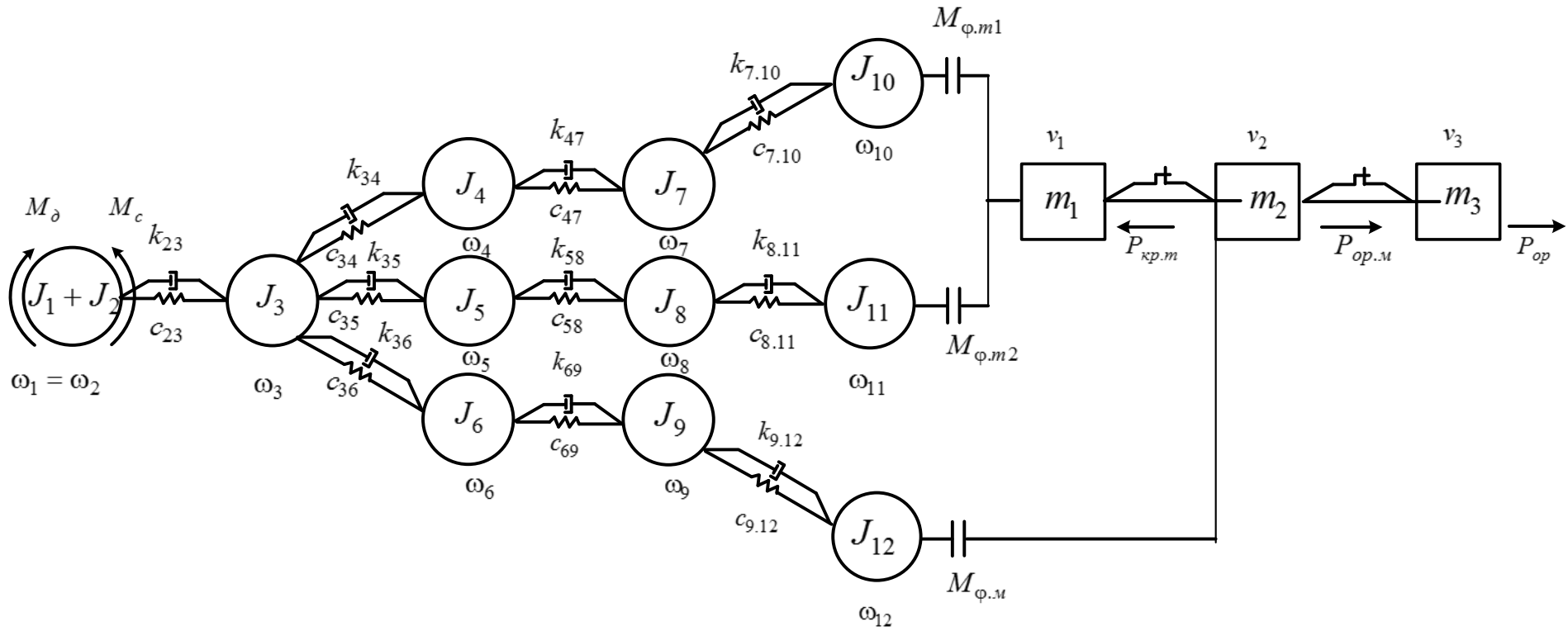


Рисунок 2.5 - Схема эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ

$M_{\partial}$  - крутящий момент двигателя;

$M_c$  - момент сопротивления на входе в двигатель;

$M_{\varphi.m1}$ ,  $M_{\varphi.m2}$  и  $M_{\varphi.m}$  - моменты касательных сил взаимодействия передних и задних ведущих колес трактора и технологического модуля с почвой;

$P_{op}$  - сопротивление рабочих органов сельскохозяйственной машины;

$P_{кр.т}$  - тяговое усилие на механизме навески трактора;

$P_{op.m}$  - сопротивление со стороны сельскохозяйственной машины на механизме навеске технологического модуля.

Приведенная динамическая многомассовая комбинированная модель МТА на основе трактора с технологическим модулем позволяет оценить его работу с учетом упругих свойств и демпфирующих элементов трансмиссии и движителей трактора, и технологического модуля и их буксования при установившемся движении МТА при котором муфта сцепления перестает буксовать, угловые скорости ее ведущей  $\omega_1$  и ведомой  $\omega_2$  частей выравниваются. Масса, имитирующая вращающиеся массы двигателя с моментом инерции  $J_1$  объединяются с массой вращающихся детали ведомой части муфты сцепления с моментом инерции  $J_2$ .

Рассмотрим подробно звено двигатель внутреннего сгорания с регулятором (рисунок 2.5). Двигатель как регулируемый объект может иметь установившиеся, так и неустановившиеся режимы работы. Нарушение установившегося режима работы двигателя может произойти как в результате изменения крутящего момента двигателя, так и в результате изменения момента сопротивления [96, 99, 102]. Дифференциальное уравнение движения коленчатого вала двигателя строим на основании принципа Даламбера:

$$J_{\partial} (d\omega_1/dt) = M_{\partial} - M_c \quad (2.1)$$

где  $\omega_1$  - угловая скорость коленчатого вала двигателя;

$M_{\partial}$  - крутящий момент двигателя;



$M_c$  - момент сопротивления на входе в двигатель;

$J_\partial = J_1 + J_2$  - момент инерции равный сумме момента инерции  $J_1$  вращающихся деталей двигателя, приведенный к коленчатому валу и момента инерции  $J_2$  вращающихся деталей ведомой части муфты сцепления.

Для трактора с механической трансмиссией при отсутствии буксования муфты сцепления в установившемся режиме движения  $\omega_1 = \omega_2$ , где  $\omega_2$  - угловая скорость ведомой части муфты сцепления.

Для аппроксимации функциональной зависимости  $M_\partial = f(\omega_1, h)$  используем аппроксимацию полиномом второго порядка регрессии вида [92, 99]:

$$M_\partial = a_{\partial 0} + a_{\partial 1}\omega_1 + a_{\partial 2}\omega_1^2 + a_{\partial 3}h + a_{\partial 4}\omega_1h + a_{\partial 5}h^2, \quad (2.2)$$

где  $\omega_1$  - угловая скорость коленчатого вала двигателя;

$h$  - положения рейки подачи топлива.

Для описания зависимости положения рейки подачи топлива от угловой скорости коленчатого вала двигателя воспользуемся дифференциальным уравнением всережимного механического регулятора в полных координатах:

$$m \frac{d^2h}{dt^2} + N \frac{dh}{dt} + E = A_u \omega_p^2, \quad (2.3)$$

где  $\omega_p$  - угловая скорость регулятора;

$m$  - масса движущихся частей регулятора и топливного насоса;

$E$  - восстанавливающая сила;

$N$  - коэффициент, учитывающий силы жидкостного трения или демпфирования;

$A_u$  - инерционный коэффициент.

Для детализации выражения (2.3) используем функциональные зависимости:

$$E = E_{рег} = E_p + c_p h \text{ при } h \geq h_{ном};$$

$$E = E_{кор} = E_k + c_k h \text{ при } h \leq h_{ном};$$

$$A_u = A_{uo} + c_a h,$$

где  $E_p$  и  $E_k$  - коэффициенты характеризуют предварительное натяжение пружин регулятора и корректора;

$c_p$  и  $c_k$  - коэффициенты, выражающие зависимость восстанавливающей силы от положения дозирующего органа, соответственно на регуляторном и корректором участка характеристики регулятора;

$c_a$  - коэффициент, выражающий зависимость инерционного коэффициента от перемещения дозирующего органа;

$A_{uo}$  - инерционный коэффициент, соответствующий нулевому положению дозирующего органа.

Рассмотрим звено, учитывающее движение ведущих колес (рисунок 2.1). При работе колесного движителя в ведущем режиме под действие веса трактора, реакции почвы и прилагаемого крутящего момента оболочка шины ведущего колеса испытывает радиальную, продольную и окружную деформации и сглаживает неравномерность сил сопротивления рабочего орудия и колебаний неровности почвы [102, 103]. Шины передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля представлены двухмассовыми моделями с моментами инерции обода и частью шины  $J_7$ ,  $J_8$  и  $J_9$  и беговыми дорожками шин соответственно  $J_{10}$ ,  $J_{11}$  и  $J_{12}$ .

Движение передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} J_{10} \frac{d^2 \varphi_{10}}{dt^2} = c_{7.10}(\varphi_7 - \varphi_{10}) + k_{7.10} \left( \frac{d\varphi_7}{dt} - \frac{d\varphi_{10}}{dt} \right) - M_{\varphi.m1}; \\ J_{11} \frac{d^2 \varphi_{11}}{dt^2} = c_{8.11}(\varphi_8 - \varphi_{11}) + k_{8.11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right) - M_{\varphi.m2}; \\ J_{12} \frac{d^2 \varphi_{12}}{dt^2} = c_{9.12}(\varphi_9 - \varphi_{12}) + k_{9.12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right) - M_{\varphi.m}; \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $c_{7.10}$ ,  $c_{8.11}$ ,  $c_{9.12}$ ,  $k_{7.10}$ ,  $k_{8.11}$ ,  $k_{9.12}$  - окружная жесткость и коэффициенты демпфирования шин соответственно передних и задних ведущих колес энергетического модуля (трактора) и ведущих колес технологического модуля;

$M_{\varphi.m1}$ ,  $M_{\varphi.m2}$  и  $M_{\varphi.m}$  - моменты касательных сил взаимодействия передних и задних ведущих колес энергетического модуля и технологического модуля с почвой.

Моменты касательных сил взаимодействия передних и задних ведущих колес энергетического модуля (трактора) и технологического модуля с почвой можно выразить через моменты, обусловленные упругостью и демпфированием в шинах соответственно передних и задних ведущих колес трактора и технологического модуля [98, 102, 103, 139]:

$$M_{\varphi.m1} = \left( c_{10.1} \lambda_{u.m1} + k_{10.1} \frac{d\lambda_{u.m1}}{dt} + \frac{a_{m1}}{r_1} R_{m1} \right) r_1;$$

$$M_{\varphi.m2} = \left( c_{11.1} \lambda_{u.m2} + k_{11.2} \frac{d\lambda_{u.m2}}{dt} + \frac{a_{m2}}{r_2} R_{m2} \right) r_2;$$

$$M_{\varphi.m} = \left( c_{12.2} \lambda_{u.m} + k_{12.2} \frac{d\lambda_{u.m}}{dt} + \frac{a_m}{r_3} R_m \right) r_3,$$

где  $c_{10.1}$ ,  $c_{11.1}$ ,  $c_{12.2}$ ,  $k_{10.1}$ ,  $k_{11.1}$ ,  $k_{12.2}$  - коэффициент продольной жесткости и коэффициенты демпфирования шин соответственно передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;

$a_{m1}$ ,  $a_{m2}$  и  $a_m$  - смещение вертикальных реакций  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$  и  $R_m$  относительно оси соответственно передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;

$\lambda_{u.m1}$ ,  $\lambda_{u.m2}$  и  $\lambda_{u.m}$  - продольная деформация шин соответственно передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;

$r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  - динамические радиусы колес.

Уравнение движения серийного агрегата можно описать зависимостью [98]:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{M_{\varphi.m1}}{r_1} + \frac{M_{\varphi.m2}}{r_2} - P_{op.m};$$

где  $m_1$  - масса трактора;

$P_{op.m}$  - усилие сопротивления на навеске трактора.

Скорость трактора зависит от величины приложенных к ведущим колесам трактора сил и моментов [98]:

$$v_1 = \omega_{10} r_1 - \frac{d\lambda_{u.m1}}{dt} - \beta_1 \lambda_{u.m1};$$

$$v_1 = \omega_{11} r_2 - \frac{d\lambda_{u.m2}}{dt} - \beta_2 \lambda_{u.m2};$$

где  $\omega_{10}$  и  $\omega_{11}$  - угловая скорость соответственно передних и задних ведущих колес трактора;

$\beta_1$  и  $\beta_2$  - коэффициенты, учитывающие буксование соответственно передних и задних ведущих колес трактора.

Уравнение движения агрегата с технологическим модулем можно выразить зависимостью:

$$m_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{M_{\varphi.m}}{r_3} + P_{кр.m} - P_{op.m};$$

где  $m_2$  - масса технологического модуля;

$P_{кр.m}$  - тяговое усилие создаваемое трактором;

$P_{op.m}$  - усилие сопротивления на навеске технологического модуля.

Скорость технологического модуля зависит от величины приложенных к ведущим колесам технологического модуля сил и моментов:

$$v_2 = \omega_{12} r_3 - \frac{d\lambda_{u.m}}{dt} - \beta_3 \lambda_{u.m};$$

где  $\omega_{12}$  - угловая скорость;

$\beta_3$  - коэффициент, учитывающий буксование ведущих колес технологического модуля.

В приведенных выше уравнениях, обобщенные координаты и скорости записаны с целью удобства решения и анализа без приведения к одному валу.

Согласно динамической модели (рисунок 2.5) в серийном агрегате отсутствует технологический модуль. Следовательно, система дифференциальных уравнений движения серийного МТА имеет вид:

$$\begin{aligned}
 (J_1 + J_2) \frac{d\omega_1}{dt} &= M_\partial - k_{23} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_3}{dt} \right) - c_{23} (\varphi_1 - \varphi_3); \\
 m_p \frac{d^2 h}{dt^2} + N \frac{dh}{dt} + E &= A_u \omega_p^2; \\
 M_\partial &= a_{\partial 0} + a_{\partial 1} \omega_1 + a_{\partial 2} \omega_1^2 + a_{\partial 3} h + a_{\partial 4} \omega_1 h + a_{\partial 5} h^2; \\
 J_3 \frac{d\omega_3}{dt} &= c_{23} (\varphi_1 - \varphi_3) + k_{23} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_3}{dt} \right) - c_{34} (\varphi_3 - \varphi_4) - k_{34} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} \right) - \\
 &- c_{35} (\varphi_3 - \varphi_5) - k_{35} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_5}{dt} \right) - c_{36} (\varphi_3 - \varphi_6) - k_{36} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_6}{dt} \right); \quad (2.5) \\
 J_5 \frac{d\omega_5}{dt} &= c_{35} (\varphi_3 - \varphi_5) + k_{35} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_5}{dt} \right) - c_{58} (\varphi_5 - \varphi_8) - k_{58} \left( \frac{d\varphi_5}{dt} - \frac{d\varphi_8}{dt} \right); \\
 J_7 \frac{d\omega_7}{dt} &= c_{47} (\varphi_4 - \varphi_7) + k_{47} \left( \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{d\varphi_7}{dt} \right) - c_{7.10} (\varphi_7 - \varphi_{10}) - k_{7.10} \left( \frac{d\varphi_7}{dt} - \frac{d\varphi_{10}}{dt} \right); \\
 J_8 \frac{d\omega_8}{dt} &= c_{58} (\varphi_5 - \varphi_8) + k_{58} \left( \frac{d\varphi_5}{dt} - \frac{d\varphi_8}{dt} \right) - c_{8.11} (\varphi_8 - \varphi_{11}) + k_{8.11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right); \\
 J_{10} \frac{d\omega_{10}}{dt} &= c_{7.10} (\varphi_7 - \varphi_{10}) + k_{7.10} \left( \frac{d\varphi_7}{dt} - \frac{d\varphi_{10}}{dt} \right) - M_{\varphi.m1}; \\
 J_{11} \frac{d\omega_{11}}{dt} &= c_{8.11} (\varphi_8 - \varphi_{11}) + k_{8.11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right) - M_{\varphi.k.m2}; \\
 m_1 \frac{dv_1}{dt} &= \frac{M_{\varphi.m1}}{r_1} + \frac{M_{\kappa.m2}}{r_2} - P_{op.m};
 \end{aligned}$$

$$M_{\varphi.m1} = \left( c_{10.1} \lambda_{u.m1} + k_{10.1} \frac{d\lambda_{u.m1}}{dt} + \frac{a_{m1}}{r_1} R_{m1} \right) r_1;$$

$$M_{\varphi.m2} = \left( c_{11.1} \lambda_{u.m1} + k_{11.2} \frac{d\lambda_{u.m2}}{dt} + \frac{a_{m2}}{r_2} R_{m2} \right) r_2;$$

$$v_1 = \omega_{10} r_1 - \frac{d\lambda_{u.m1}}{dt} - \beta_1 \lambda_{u.m1};$$

$$v_1 = \omega_{11} r_2 - \frac{d\lambda_{u.m2}}{dt} - \beta_2 \lambda_{u.m2};$$

$$a_{u.m1} = a_{0.m1} + \lambda_{u.m1};$$

$$a_{u.m2} = a_{0.m2} + \lambda_{u.m2};$$

$$a_{0.m1} = f_1 r_1;$$

$$a_{0.m2} = f_2 r_2;$$

Система дифференциальных уравнений движения МТА на основе трактора с технологическим модулем примет следующий вид:

$$(J_1 + J_2) \frac{d\omega_1}{dt} = M_\partial - k_{23} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_3}{dt} \right) - c_{23} (\varphi_1 - \varphi_3);$$

$$m_p \frac{d^2 h}{dt^2} + N \frac{dh}{dt} + E = A_u \omega_p^2;$$

$$M_\partial = a_{\partial 0} + a_{\partial 1} \omega_1 + a_{\partial 2} \omega_1^2 + a_{\partial 3} h + a_{\partial 4} \omega_1 h + a_{\partial 5} h^2;$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = c_{23} (\varphi_1 - \varphi_3) + k_{23} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_3}{dt} \right) - c_{34} (\varphi_3 - \varphi_4) - k_{34} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} \right) - c_{35} (\varphi_3 - \varphi_5) - k_{35} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_5}{dt} \right) - c_{36} (\varphi_3 - \varphi_6) - k_{36} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_6}{dt} \right); \quad (2.6)$$

$$J_4 \frac{d\omega_4}{dt} = c_{34} (\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} \right) - c_{47} (\varphi_4 - \varphi_7) - k_{47} \left( \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{d\varphi_7}{dt} \right);$$

$$J_5 \frac{d\omega_5}{dt} = c_{35} (\varphi_3 - \varphi_5) + k_{35} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_5}{dt} \right) - c_{58} (\varphi_5 - \varphi_8) - k_{58} \left( \frac{d\varphi_5}{dt} - \frac{d\varphi_8}{dt} \right);$$

$$J_6 \frac{d\omega_6}{dt} = c_{36}(\varphi_3 - \varphi_6) + k_{36} \left( \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_6}{dt} \right) - c_{69}(\varphi_6 - \varphi_9) - k_{69} \left( \frac{d\varphi_6}{dt} - \frac{d\varphi_9}{dt} \right);$$

$$J_7 \frac{d\omega_7}{dt} = c_{47}(\varphi_4 - \varphi_7) + k_{47} \left( \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{d\varphi_7}{dt} \right) - c_{7,10}(\varphi_7 - \varphi_{10}) - k_{7,10} \left( \frac{d\varphi_7}{dt} - \frac{d\varphi_{10}}{dt} \right);$$

$$J_8 \frac{d\omega_8}{dt} = c_{58}(\varphi_5 - \varphi_8) + k_{58} \left( \frac{d\varphi_5}{dt} - \frac{d\varphi_8}{dt} \right) - c_{8,11}(\varphi_8 - \varphi_{11}) + k_{8,11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right);$$

$$J_9 \frac{d\omega_9}{dt} = c_{69}(\varphi_6 - \varphi_9) - k_{69} \left( \frac{d\varphi_6}{dt} - \frac{d\varphi_9}{dt} \right) - c_{9,12}(\varphi_9 - \varphi_{12}) + k_{9,12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right);$$

$$J_{10} \frac{d\omega_{10}}{dt} = c_{7,10}(\varphi_7 - \varphi_{10}) + k_{7,10} \left( \frac{d\varphi_7}{dt} - \frac{d\varphi_{10}}{dt} \right) - M_{\varphi,m1};$$

$$J_{11} \frac{d\omega_{11}}{dt} = c_{8,11}(\varphi_8 - \varphi_{11}) + k_{8,11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right) - M_{\varphi,m2};$$

$$J_{12} \frac{d\omega_{12}}{dt} = c_{9,12}(\varphi_9 - \varphi_{12}) + k_{9,12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right) - M_{\varphi,m};$$

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{M_{\varphi,m1}}{r_1} + \frac{M_{\varphi,m2}}{r_2} - P_{op,m};$$

$$m_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{M_{\varphi,m}}{r_3} + P_{op,m} - P_{op,m};$$

$$M_{\varphi,m1} = \left( c_{10,1} \lambda_{u,m1} + k_{10,1} \frac{d\lambda_{u,m1}}{dt} + \frac{a_{m1}}{r_1} R_{m1} \right) r_1;$$

$$M_{\varphi,m2} = \left( c_{11,1} \lambda_{u,m1} + k_{11,2} \frac{d\lambda_{u,m2}}{dt} + \frac{a_{m2}}{r_2} R_{m2} \right) r_2;$$

$$M_{\varphi,m} = \left( c_{12,2} \lambda_{u,m} + k_{12,2} \frac{d\lambda_{u,m}}{dt} + \frac{a_m}{r_3} R_m \right) r_3;$$

$$v_1 = \omega_{10} r_1 - \frac{d\lambda_{u,m1}}{dt} - \beta_1 \lambda_{u,m1};$$

$$v_1 = \omega_{11} r_2 - \frac{d\lambda_{u,m2}}{dt} - \beta_2 \lambda_{u,m2};$$

$$v_2 = \omega_{12} r_3 - \frac{d\lambda_{u,m}}{dt} - \beta_3 \lambda_{u,m};$$

$$a_{u,m1} = a_{0,m1} + \lambda_{u,m1};$$

$$a_{u.m2} = a_{0.m2} + \lambda_{u.m2};$$

$$a_{u.m} = a_{0.m} + \lambda_{u.m};$$

$$a_{0.m1} = f_1 r_1;$$

$$a_{0.m2} = f_2 r_2;$$

$$a_{0.m} = f_m r_3.$$

Таким образом, движение машинно-тракторного агрегата описывается выше приведенными уравнениями и функциональными зависимостями. Совместное их решение позволит определить показатели функционирования машинно-тракторного агрегата в реальных условиях эксплуатации.

### **2.3 Разработка функциональных и структурных схем моделей подсистем МТА в программе Simulink**

Для моделирования динамических процессов МТА была использована прикладная программа Simulink. В соответствии со схемой эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ (рисунок 2.5) была составлена структурная схема в форме прикладной программы Simulink, соответствующая уравнениям (2.5-2.6), приведенная на рисунке 2.6. Данная структурная схема состоит из отдельных блоков Subsystem, описывающих работу отдельных звеньев МТА.

При составлении цифровой модели в среде Simulink каждая подсистема модели тягово-динамических процессов МТА представлена в виде функциональных схем. Функциональная схема двигателя внутреннего сгорания с регулятором рассмотрена как структура состоящая из двух подсистем: подсистемы "Двигатель" и подсистемы "Регулятор".



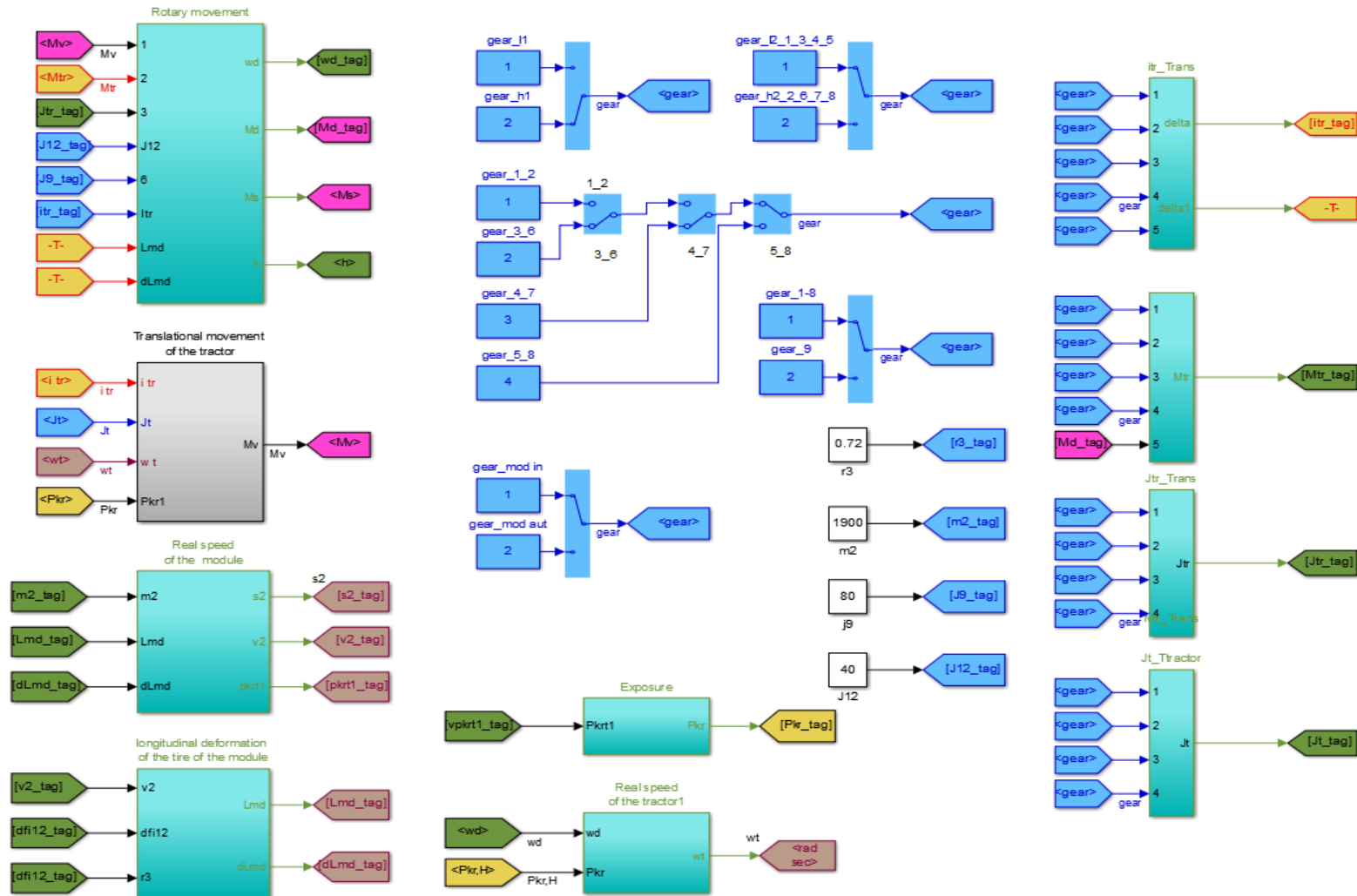


Рисунок 2.6 - Структурная схема МТА в форме прикладной программы Simulink.

Подсистема "Двигатель" представлена так же из двух подсистем: подсистемы "Движение коленчатого вала", соответствующая уравнению (2.1) и подсистемы "Крутящий момент двигателя", соответствующая уравнению (2.2), имеющие свои входы, выходы и связи

При составлении цифровой модели движения коленчатого вала двигателя в среде Simulink дифференциальное уравнение движения коленчатого вала двигателя (2.1) решено относительно  $d\omega_1/dt$ :

$$d\omega_1/dt = (M_\delta - M_c)/J_\delta \quad (2.7)$$

Функциональная схема движения коленчатого вала двигателя, как подсистема двигателя представлена на рисунке 2.7 и отражает динамику вращательного движения коленчатого вала двигателя. В рассмотренной функциональной схеме движения коленчатого вала двигателя входные сигналы: момент сопротивления на входе в двигатель и величина момента двигателя, которая является функцией угловой скорости и хода рейки регулятора  $M_\delta = f(\omega_1, h)$ . Выходной сигнал – угловая скорость коленчатого вала двигателя.

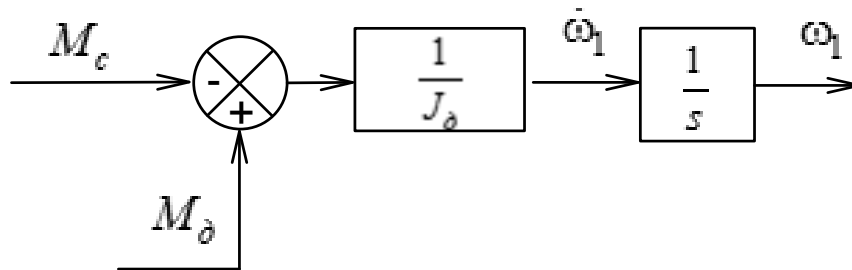


Рисунок 2.7 - Функциональная схема движения коленчатого вала двигателя как подсистема двигателя

Структурная схема движения коленчатого вала двигателя (рисунок 2.8) содержит следующие функциональные блоки: интегратор, блок усилителя и сумматор. Угловая скорость коленчатого вала двигателя моделируется после интегратора и записывается в оперативную память. После сумматора результат алгебраической суммы момента сопротивления на входе в двигатель и величины момента

двигателя делится на константу, равную сумме момента инерции вращающихся деталей двигателя, приведенный к коленчатому валу и момента инерции вращающихся деталей ведомой части муфты сцепления.

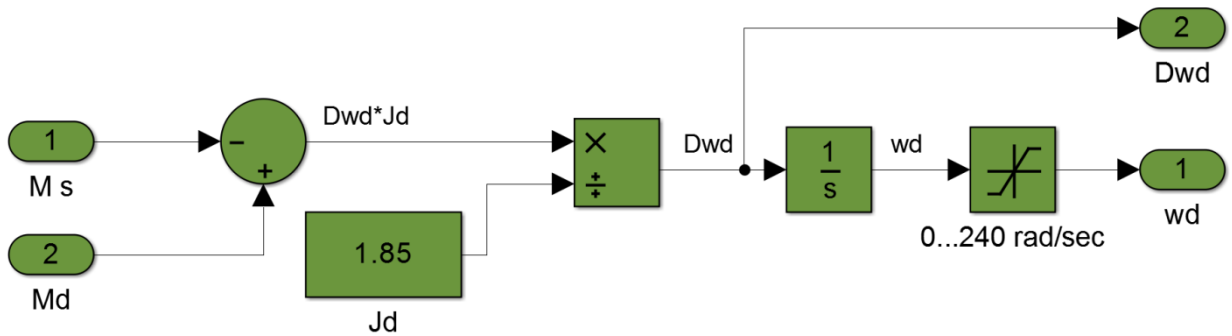


Рисунок 2.8 - Структурная схема подсистемы "Движение коленчатого вала"

Функциональная схема крутящего момента двигателя, как подсистемы двигателя представлена на рисунке 2.9. Данная подсистема реализовывает полиномом второго порядка.

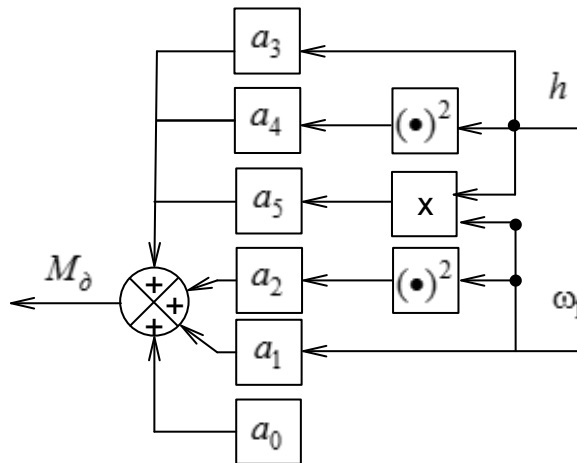


Рисунок 2.9 - Функциональная схема крутящего момента двигателя как подсистема двигателя

Структурная схема (рисунок 2.10) подсистемы "Крутящий момент двигателя" имеет два входных сигнала: угловую скорость коленчатого вала двигателя и величину хода рейки регулятора. На выходе – крутящий момент двигателя.

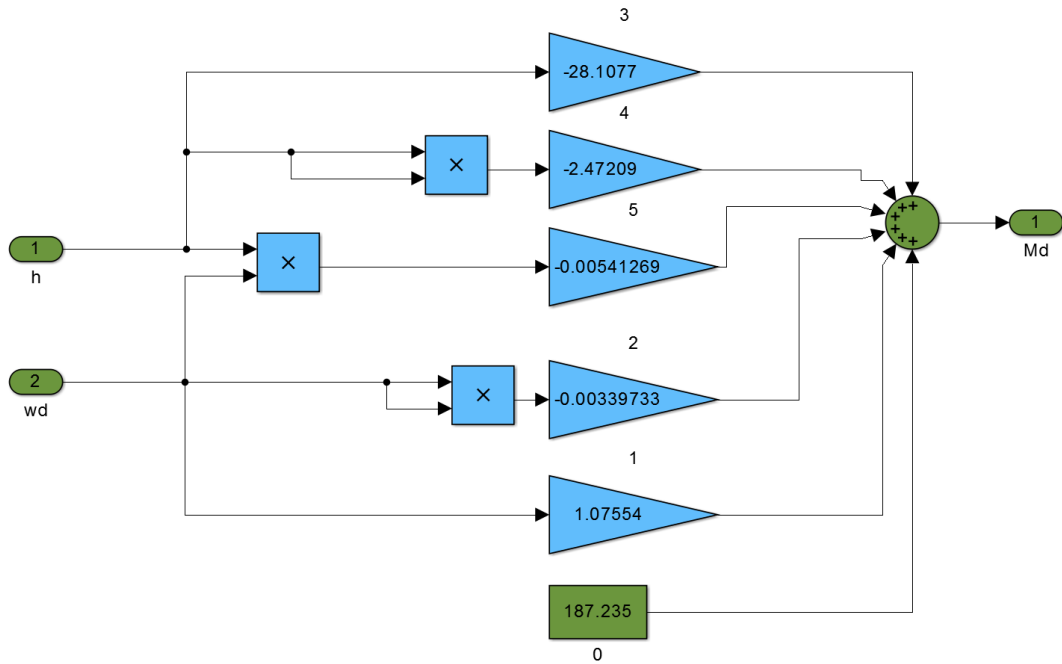


Рисунок 2.10 - Структурная схема подсистемы "Крутящий момент двигателя"

Функциональная схема регулятора, как подсистемы двигателя, представленная на рисунке 2.11, воспроизводит закон регулирования по уравнению (2.4). Модель подсистемы "Регулятор" является нелинейной, имеет второй порядок и описывает работу регулятора на корректорном и регуляторном участках.

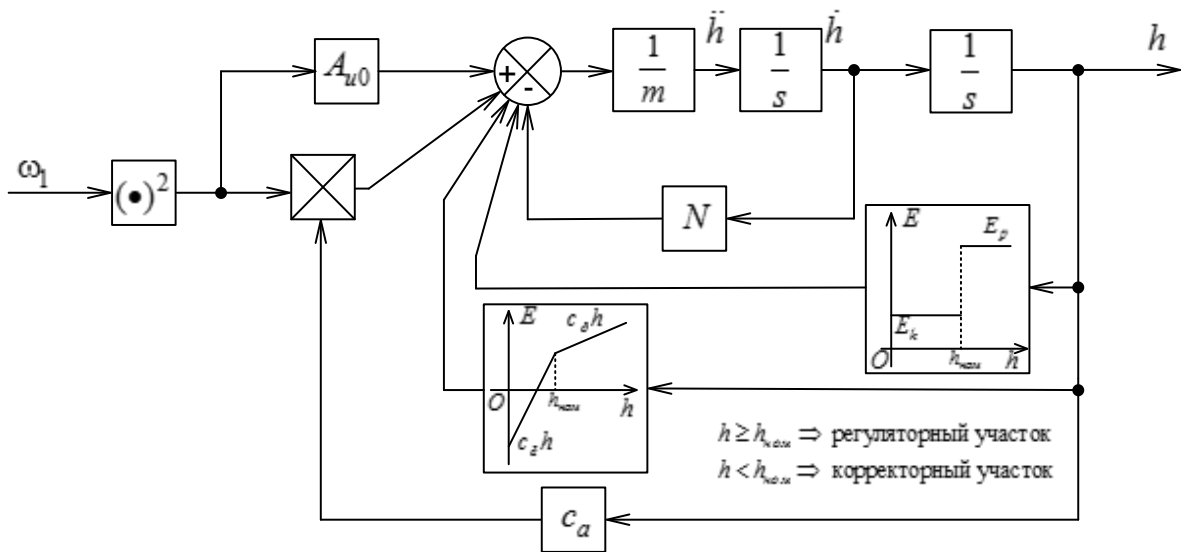


Рисунок 2.11 - Функциональная схема подсистемы "Регулятор"

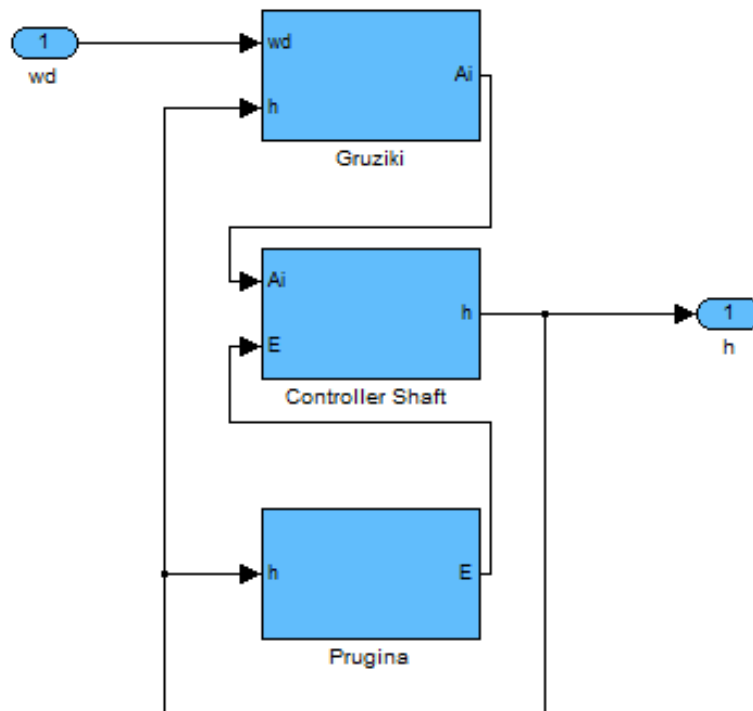


Рисунок 2.12 - Структурная схема подсистемы "Регулятор"

Структурная схема (рисунок 2.12) подсистемы "Регулятор" состоит из трех подсистем: "Грузики", "Вал регулятора" и "Пружина" (рисунки 2.13-2.16) и имеет входной сигнал - угловую скорость коленчатого вала двигателя. На выходе – ход рейки регулятора.

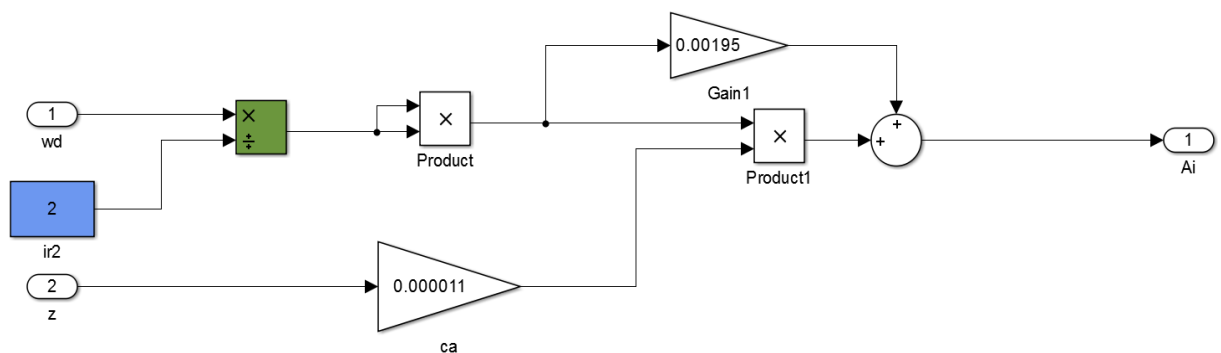


Рисунок 2.13 - Структурная схема подсистемы "Грузики"

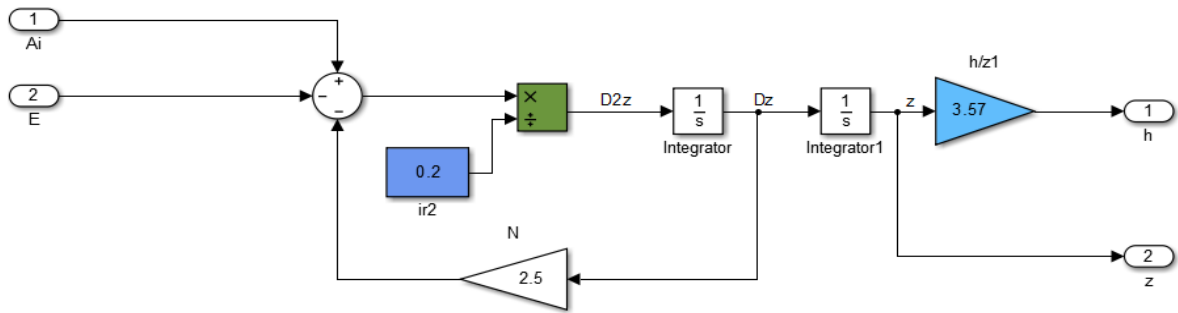


Рисунок 2.14 - Структурная схема подсистемы "Вал регулятора"

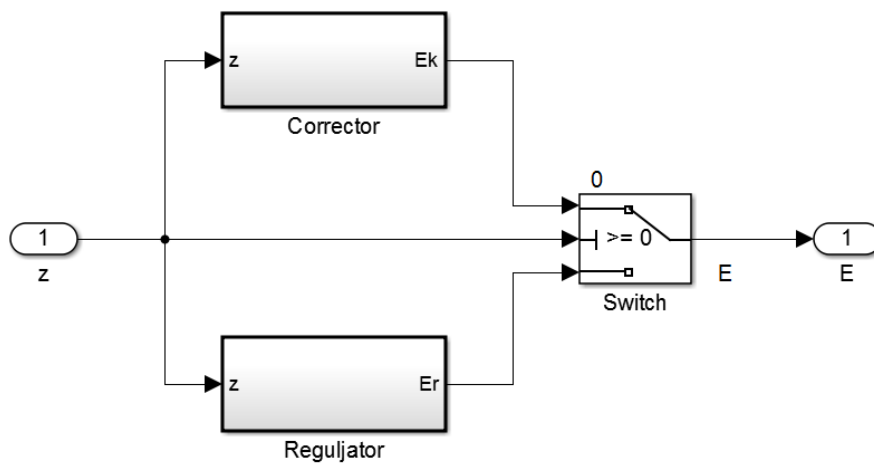


Рисунок 2.15 - Структурная схема подсистемы "Пружина"

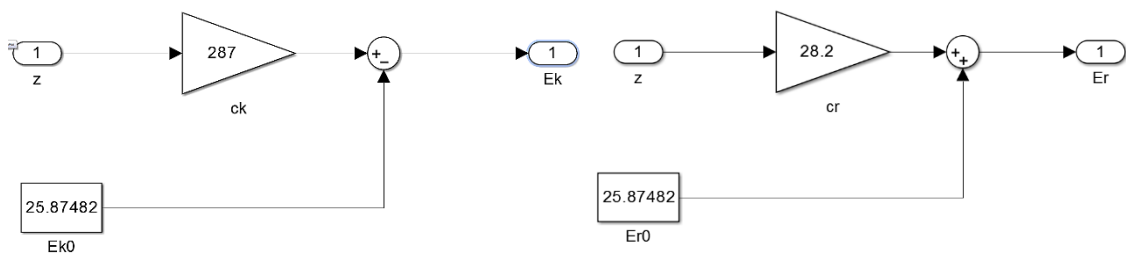


Рисунок 2.16 - Структурная схема подсистем «Корректор» и «Регулятор»

Для моделирования работы трансмиссии трактора и технологического модуля на разных передачах, составлена структурная схема подсистемы трансмиссии трактора с технологическим модулем «Трансмиссия трактора» (рисунок 2.17).

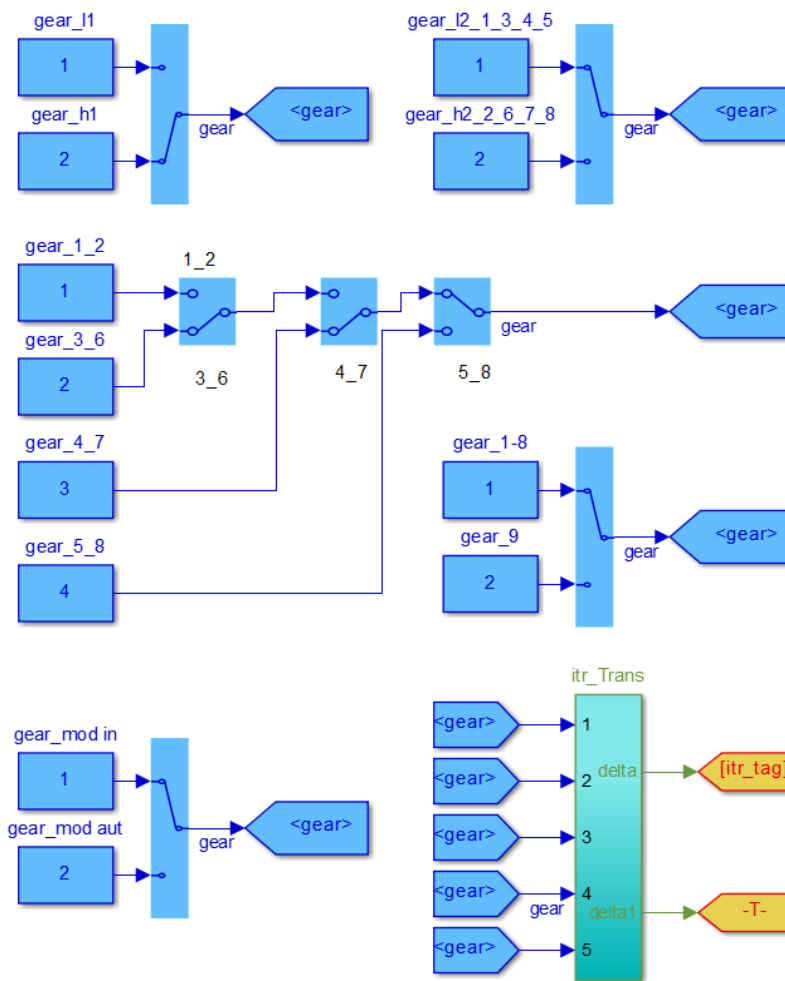


Рисунок 2.17 - Структурная схема подсистемы трактора МТЗ-82 с технологическим модулем «Трансмиссия трактора»

Подсистема трансмиссии трактора с технологическим модулем «Трансмиссия трактора» описывает работу трансмиссии трактора с технологическим модулем, а также позволяет переключать передачи без остановки процесса моделирования.

Для моделирования деформации шины ведущего колеса технологического модуля, составлена структурная схема подсистемы «Деформация шины технологического модуля» (рисунок 2.18).

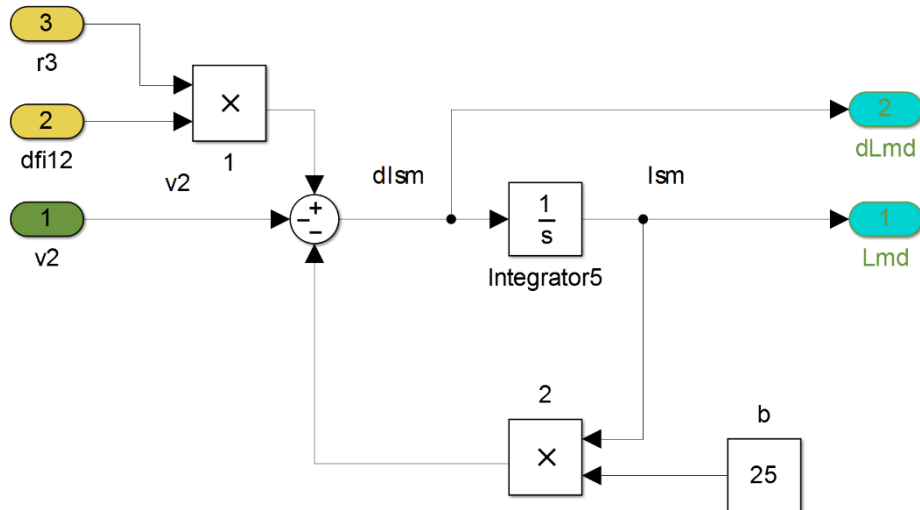


Рисунок 2.18 - Структурная схема подсистем «Деформация шины технологического модуля»

Для моделирования скорости технологического модуля составлена структурная схема подсистемы трактора с технологическим модулем «Скорость технологического модуля» (рисунок 2.19).

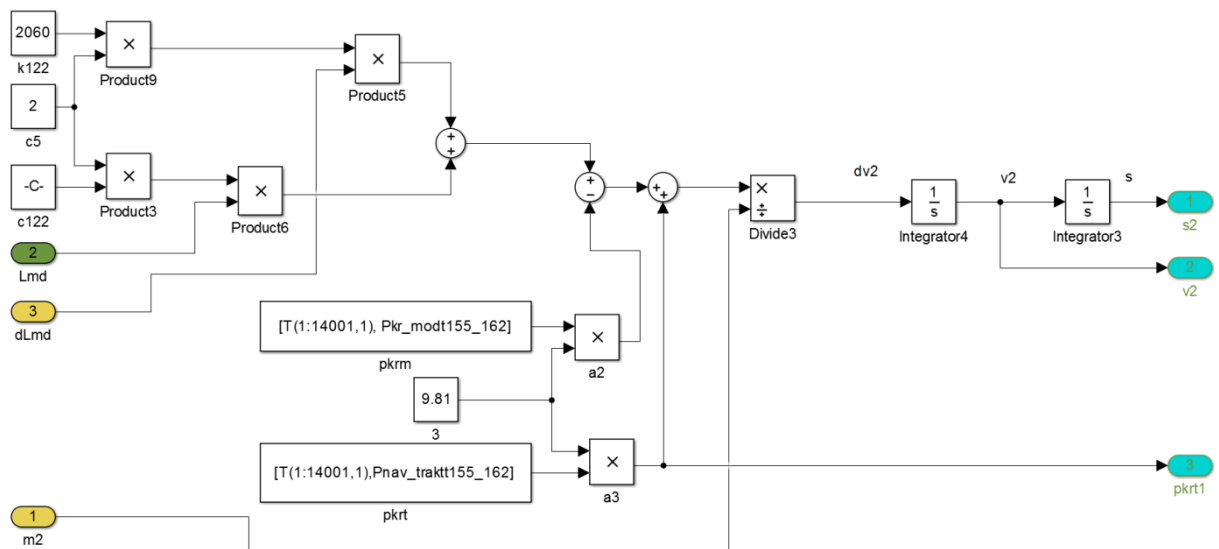


Рисунок 2.19- Структурная схема подсистем «Скорость технологического модуля»

Результаты теоретических исследований влияния упругодемпфирующих



свойств технологического модуля на колебание момента сопротивления на входе в двигатель с использованием моделей подсистем МТА с технологическим модулем в среде Simulink приведены в главе 4.

## 2.4 Поиск рациональных характеристик шин ведущих колес технологического модуля и трактора

При выполнении технологических операций МТА подвержен одновременно нескольким внешним воздействиям, которые создаются от неровности опорной поверхности, неоднородности физико-химических свойств почвы и непрерывных тяговых колебаний со стороны орудия. Для описания характеристик этих воздействий широко применяются вероятностные методы [50, 72, 76, 104].

Для обеспечения эффективного демпфирования, технологический модуль, должен обеспечивать минимально возможное значение спектральной плотности колебаний выходного параметра технологического модуля  $S_{вых}(\omega)$  в диапазоне рабочих частот при выполнении технологической операции и отсутствие резонансных режимов.

В соответствие с этим, показатель эффективности демпфирования выбираем величину дисперсии спектральной плотности выходного процесса технологического модуля

$$D = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} S_{вых}(\omega) d\omega = \min, \quad (2.8)$$

где  $\omega_{min}$ ,  $\omega_{max}$  - рассматриваемый диапазон частот,  $c^{-1}$ .

Чем меньше эта величина, тем выше демпфирующие свойства технологического модуля. Наличие пиков (явно выраженных экстремумов) в кривой спектральной плотности колебаний выходной нагрузки технологического модуля говорит о проявлении резонансных эффектов. Количественным показателем, наличия экстремума принято отношение максимального значения спектральной плот-

ности колебаний выходного параметра  $S_{вых}(\omega)$  в рассматриваемом диапазоне частот к дисперсии  $D$  [76], то есть к площади кривой этой функции из выражения (2.8):

$$K = \frac{S_{вых.max}}{D}, \quad (2.9)$$

Чем меньше этот показатель, тем эффективнее работает технологический модуль, отсутствие резонансных явлений возможно при  $K = \min$ .

Для выбора рационального значения параметров технологического модуля можно использовать следующую целевую функцию:

$$F(c, k) = \alpha_1 D + \alpha_2 K = \min, \quad (2.10)$$

где  $D$  – площади кривой спектральной плотности колебаний выходной нагрузки технологического модуля;

$K$  – коэффициент, учитывающий наличие явно выраженных экстремумов кривой спектральной плотности;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – весовые коэффициенты, определяющие степень важности составляющих.

Таким образом, при выборе рациональных значений параметров технологического модуля для режима работы МТА с ТМ, который характеризуется спектральной плотностью входных нагрузок на технологический модуль  $S_{ex}(\omega)$ , необходимо обеспечение условия (2.10).

Для получения рационального значения параметров технологического модуля: коэффициента демпфирования и жесткости для выбранного режима работы необходимо найти оптимальное значение, соответствующее минимальному значению целевой функции  $F(c, k)$ .

При работе МТА внешние воздействия на трактор и технологический модуль передаются в виде случайных процессов. Связь между характеристиками этих случайных процессов выражается через передаточную функцию системы  $W_{TM}(j\omega)$  [104, 105]:

$$S_{вых}(\omega) = |W_{TM}(j\omega)|^2 \cdot S_{вх}(\omega), \quad (2.11)$$

где  $S_{вых}(\omega)$  и  $S_{вх}(\omega)$  - спектральные плотности выходного и входного случайных процессов технологического модуля;

$W_{TM}(j\omega)$  - передаточная функция системы.

Так как случайный процесс на выходе возникает как сумма двух случайных стационарных и эргодических процессов  $x$  и  $y$ , то корреляционная функция процесса равна:

$$R_z(l) = R_x(l) + R_y(l) + R_{xy}(l) + R_{yx}(l), \quad (2.12)$$

где  $R_{xy}(l)$  и  $R_{yx}(l)$  - взаимные корреляционные функции.

При этих условиях спектральная плотность выходного процесса равна:

$$S_z(\omega) = S_x(\omega) + S_y(\omega) + S_{xy}(\omega) + S_{yx}(\omega), \quad (2.13)$$

Таким образом, для определения статистических характеристик выходного процесса необходимо знать характеристики входных воздействий и передаточную функцию системы. Как видно из выражения (2.11), технологический модуль играет роль частотного фильтра, ослабляя входные колебания. Таким образом, изменяя параметры технологического модуля, можно демпфировать наиболее выраженные гармоники колебаний входных воздействий на соответствующих видах технологических операций, соответственно будет меняться и форма амплитудно-частотной характеристики.

Для исследования влияния параметров шины ведущих колес технологического модуля, опишем ее как звено эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ (рисунок 2.5) с учетом системы (2.6) следующим уравнением:

$$\begin{cases} J_9 \frac{d^2 \varphi_9}{dt^2} + k_{9.12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right) + c_{9.12} (\varphi_9 - \varphi_{12}) = M_{9.12}; \\ J_{12} \frac{d^2 \varphi_{12}}{dt^2} - k_{9.12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right) - c_{9.12} (\varphi_9 - \varphi_{12}) = -M_{\varphi.м}. \end{cases}$$

При рассмотрении режима малых колебаний относительно установившегося состояния движения системы можно определить передаточную функцию:

$$\begin{cases} J_9 \frac{d^2 \Delta \varphi_9}{dt^2} + k_{9.12} \frac{d \Delta \varphi_9}{dt} - k_{9.12} \frac{d \Delta \varphi_{12}}{dt} + c_{9.12} \Delta \varphi_9 - c_{9.12} \Delta \varphi_{12} = 0; \\ J_{12} \frac{d^2 \Delta \varphi_{12}}{dt^2} - k_{9.12} \frac{d \Delta \varphi_9}{dt} + k_{9.12} \frac{d \Delta \varphi_{12}}{dt} - c_{9.12} \Delta \varphi_9 + c_{9.12} \Delta \varphi_{12} = -\Delta M_{\varphi.m}. \end{cases}$$

Упростим данное уравнениям, применив преобразование Лапласа:

$$\begin{cases} Q_1 \Delta \varphi_9 - P_1 \Delta \varphi_{12} = 0; \\ P_1 \Delta \varphi_9 + Q_2 \Delta \varphi_{12} = -\Delta M_{\varphi.m}, \end{cases}$$

здесь используются обозначения:

$$\begin{aligned} Q_1 &= J_9 s^2 + k_{9.12} s + c_{9.12}; \\ Q_2 &= J_{12} s^2 + k_{9.12} s + c_{9.12}; \\ P_1 &= k_{9.12} s + c_{9.12}; \end{aligned}$$

Преобразуя вышеприведенные уравнения, определим передаточную функцию для малых колебаний момента на валу ведущих колес технологического модуля от момента касательных сил взаимодействия ведущих колес технологического модуля с почвой:

$$W_{\Delta M_{\varphi.m}} = P_1 \frac{P_1 - Q_1}{P_1^2 - Q_1 Q_2}.$$

С учетом условия минимизации колебаний выходной нагрузки (2.10) и полученной передаточной функции была построена поверхность целевой функции (рисунок 2.20) при изменении коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес технологического модуля  $c_{9.12}$  от  $0,5 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^5$  Н/рад и коэффициента демпфирования шины ведущих колес технологического модуля  $k_{9.12}$  от 1000 до 4000 Н·с/рад.

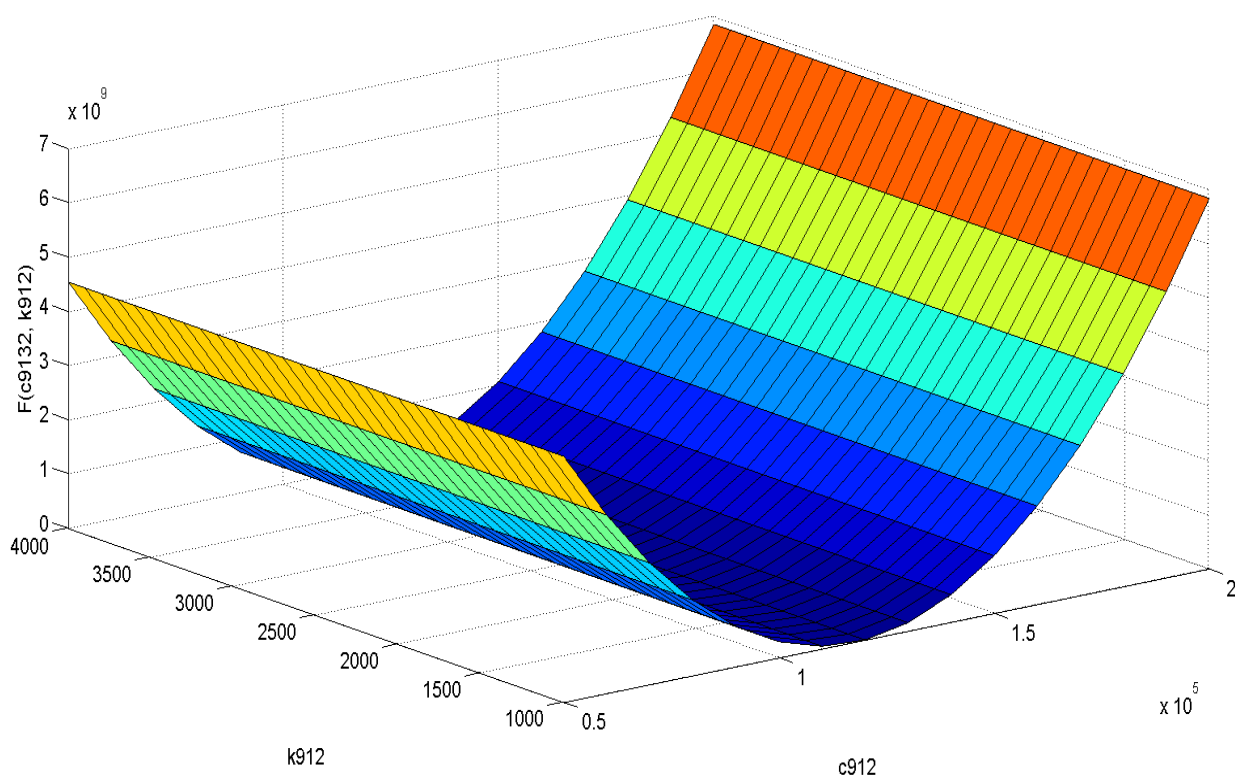


Рисунок 2.20 - Поверхность целевой функции при изменении окружной жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля при работающем их приводе

Полученное графическое изображение целевой функция позволяет сделать вывод о наличии ее экстремума. Оптимальное значение коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес технологического модуля  $c_{9.12}$  составляет 120000 Нм/рад, коэффициент демпфирования шины ведущих колес технологического модуля  $k_{9.12}$  не имеет явно выраженного оптимума. Значение коэффициента  $c_{9.12}$  соответствует характеристике шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,08 МПа.

При отключенном приводе технологического модуля (рисунок 2.21) оптимальные значения коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес технологического модуля  $c_{9.12}$  составляет 90000 Н/рад. Значение коэффициента соответствует характеристике шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,06 МПа.

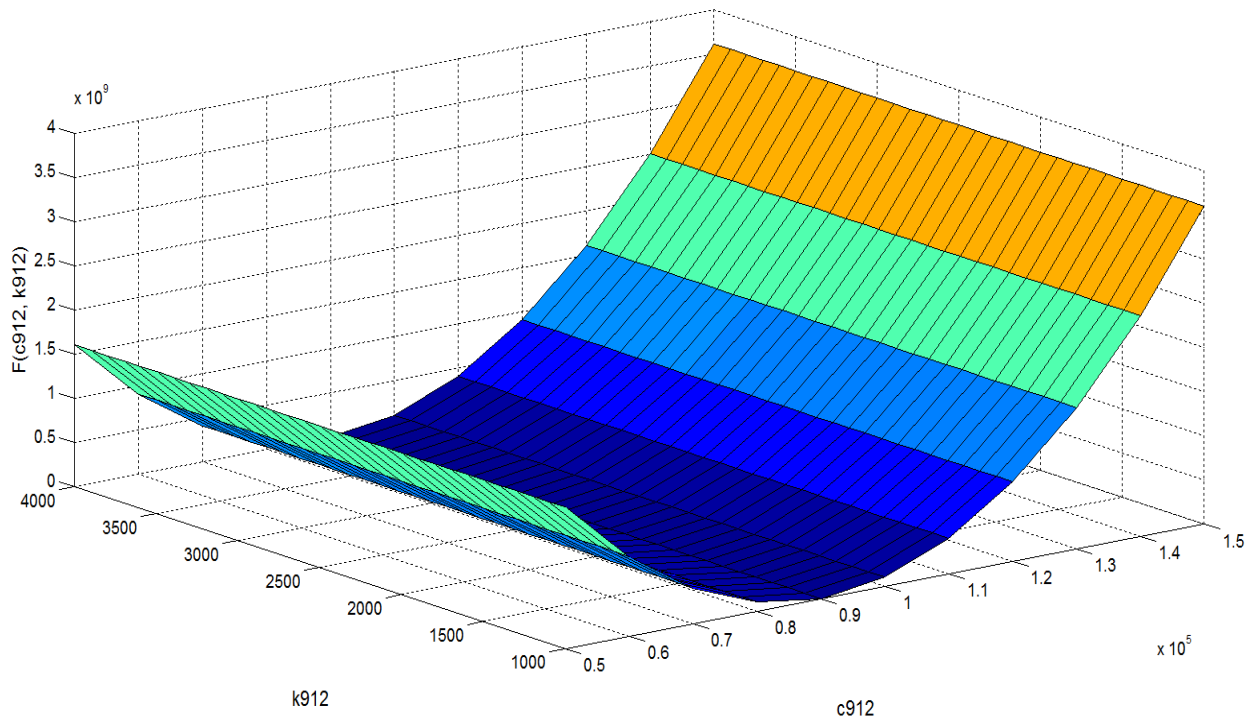


Рисунок 2.21 - Поверхность целевой функции при изменении окружной жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля без включенного их привода

Для исследования влияния параметров шины задних ведущих колес трактора с технологическим модулем, опишем ее как звено эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ (рисунок 2.5) с учетом системы (2.5) следующим уравнением:

$$\begin{cases} J_8 \frac{d^2 \varphi_8}{dt^2} + k_{8.11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right) + c_{8.11} (\varphi_8 - \varphi_{11}) = M_{8.11}; \\ J_{11} \frac{d^2 \varphi_{11}}{dt^2} - k_{8.11} \left( \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{d\varphi_{11}}{dt} \right) - c_{8.11} (\varphi_8 - \varphi_{11}) = -M_{\varphi.m2}. \end{cases}$$

При рассмотрении режима малых колебаний относительно установившегося состояния движения системы можно определить передаточную функцию:

$$\begin{cases} J_8 \frac{d^2 \Delta \varphi_8}{dt^2} + k_{8.11} \frac{d\Delta \varphi_8}{dt} - k_{8.11} \frac{d\Delta \varphi_{11}}{dt} + c_{8.11} \Delta \varphi_8 - c_{8.11} \Delta \varphi_{11} = 0; \\ J_{11} \frac{d^2 \Delta \varphi_{11}}{dt^2} - k_{9.11} \frac{d\Delta \varphi_8}{dt} + k_{8.11} \frac{d\Delta \varphi_{11}}{dt} - c_{8.11} \Delta \varphi_8 + c_{8.11} \Delta \varphi_{11} = -\Delta M_{\varphi.m2}. \end{cases}$$

Применим к уравнениям преобразование Лапласа [105] при нулевых начальных условиях и упростим полученное выражение

$$\begin{cases} Q_1 \Delta \varphi_8 - P_1 \Delta \varphi_{11} = 0; \\ P_1 \Delta \varphi_8 + Q_2 \Delta \varphi_{11} = -\Delta M_{\varphi.m2}, \end{cases}$$

Здесь используются обозначения:

$$\begin{aligned} Q_1 &= J_8 s^2 + k_{8.11} s + c_{8.11}; \\ Q_2 &= J_{11} s^2 + k_{8.11} s + c_{8.11}; \\ P_1 &= k_{8.11} s + c_{8.11}; \end{aligned}$$

Преобразуя эти уравнения, получим передаточную функцию для малых колебаний момента на оси задних ведущих колес трактора от момента касательных сил взаимодействия ведущих колес трактора с почвой:

$$W_{\Delta M_{\varphi.m2}} = P_1 \frac{P_1 - Q_1}{P_1^2 - Q_1 Q_2}.$$

С учетом условия минимизации колебаний выходной нагрузки (2.10) и полученной передаточной функции была построена поверхность целевой функции (рисунок 2.22) при изменении коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес трактора  $c_{8.11}$  от  $0,5 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^5$  Н/рад и коэффициента демпфирования шины ведущих колес трактора  $k_{8.11}$  от 1000 до 4000 Н•с/рад.

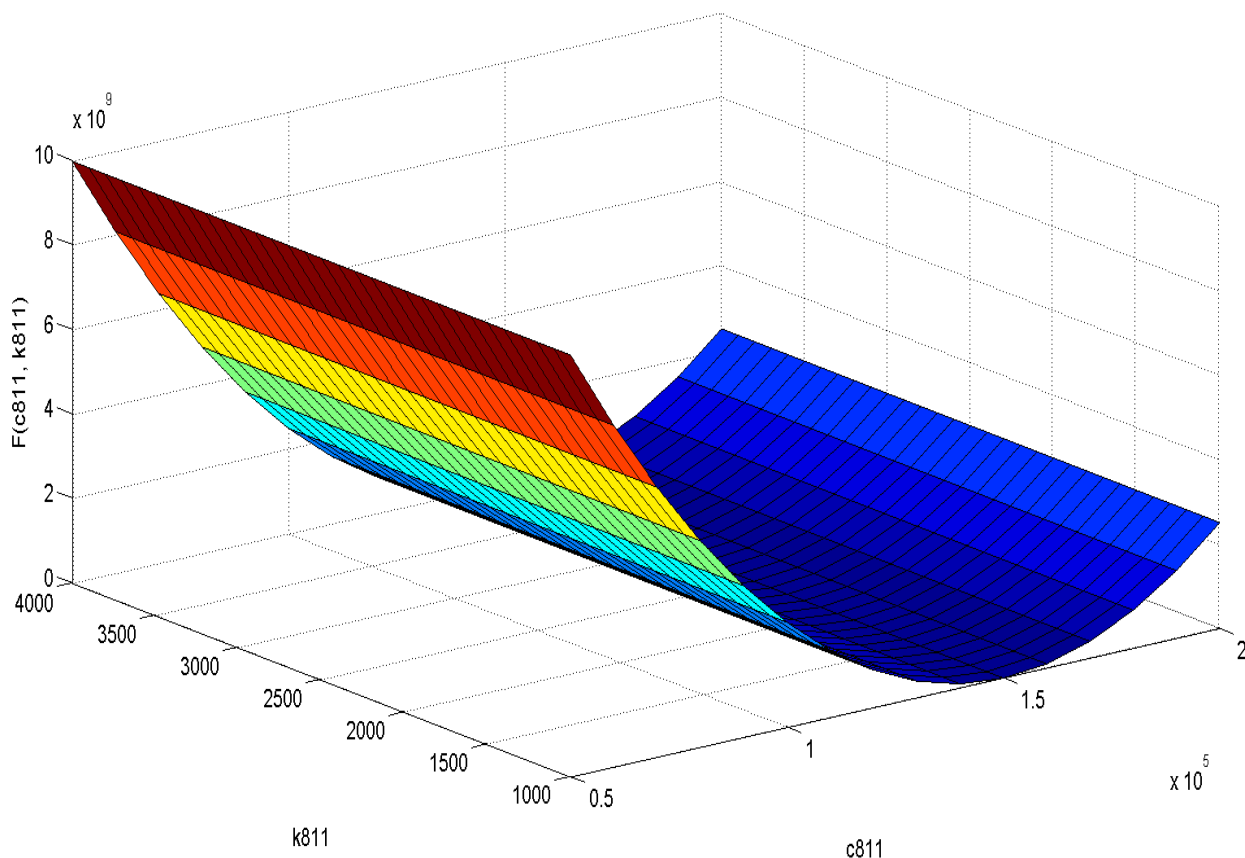


Рисунок 2.22 - Поверхность целевой функции при изменении окружающей жесткости и демпфирования шины задних ведущих колес энергетического модуля (трактора) с технологическим модулем

Анализируя полученную целевую функцию можно сделать вывод о наличии у нее экстремума. Оптимальные значения коэффициента окружающей жесткости шины ведущих колес трактора  $c_{8.11}$  составляет 150000 Н/рад, коэффициент демпфирования шины ведущих колес трактора  $k_{8.11}$  не имеет явно выраженного оптимума. Значение коэффициента  $c_{8.11}$  соответствует характеристике шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,1 МПа.

Для исследования влияния технологического модуля на характер нагрузки на навеске трактора, опишем технологический модуль как звено эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ (рисунок 2.5) с учетом системы (2.6) следующим уравнением:



$$\begin{cases} m_2 \frac{dv_2}{dt} = M_{\varphi.m} - P_{f.m} + P_{кр.m} - P_{ор.m}; \\ v_2 = \omega_{12} r_3 - \frac{d\lambda_{ш.м}}{dt} - \beta_3 \lambda_{ш.м}; \\ M_{\varphi.m} = \left( k_{12.2} \frac{d\lambda_{ш.м}}{dt} + c_{12.2} \lambda_{ш.м} + \frac{a_{ш.м}}{r_3} R_m \right) r_3; \\ P_{f.m} = a_{ш.м} R_m; \\ a_{ш.м} = a_{0.m} + \lambda_{ш.м}; \\ a_{0.m} = f_m r_3. \end{cases}$$

Получим передаточную функцию рассмотрев режим малых колебаний относительно установившегося состояния движения системы:

$$\begin{cases} m_2 s \Delta v_2 - (k_{12.2} s + c_{12.2}) \Delta \lambda_{ш.м} - \Delta P_{кр.m} + \Delta P_{ор.m} = 0; \\ r_3 \Delta \omega_{12} - (s + \beta_3) \Delta \lambda_{ш.м} - \Delta v_2 = 0; \\ \Delta M_{\varphi.m} = ((k_{12.2} s + c_{12.2}) r_3 + m_2 g) \Delta \lambda_{ш.м}. \end{cases}$$

Применим к уравнениям (2.10) преобразование Лапласа [105] при нулевых начальных условиях и упростим это выражение:

$$\begin{cases} Q_1 \Delta v_2 - P_1 \Delta \lambda_{ш.м} - \Delta P_{кр.m} + \Delta P_{ор.m} = 0; \\ P_2 \Delta \lambda_{ш.м} + \Delta v_2 = 0; \\ \Delta M_{\varphi.m} = Q_2 \Delta \lambda_{ш.м}, \end{cases}$$

где приняты следующие обозначения многочленов от  $s$ :

$$\begin{cases} Q_1 = m_2 s; \\ Q_2 = (k_{12.2} s + c_{12.2}) r_3 + m_2 g; \\ P_1 = k_{12.2} s + c_{12.2}; \\ P_2 = s + \beta_3. \end{cases}$$

Используя эти уравнения, определим передаточную функцию для малых колебаний усилия на навеске трактора от продольной деформации, обусловленные упругостью и демпфированием в шинах технологического модуля:

$$W_{\Delta M_{\text{ф.м}} \Delta P_{\text{ор.м}}}(s) = \frac{Q_1 P_2 - P_1}{Q_2}.$$

С учетом условия минимизации колебаний нагрузки на навеске трактора (2.10) и полученной передаточной функции была получена поверхность целевой функции при изменении продольной деформации шины ведущих колес технологического модуля  $c_{12.2}$  от  $2 \cdot 10^4$  до  $30 \cdot 10^4$  Н/м и коэффициента демпфирования шины ведущих колес технологического модуля  $k_{12.2}$  от 1000 до 4000 Н•с/м.

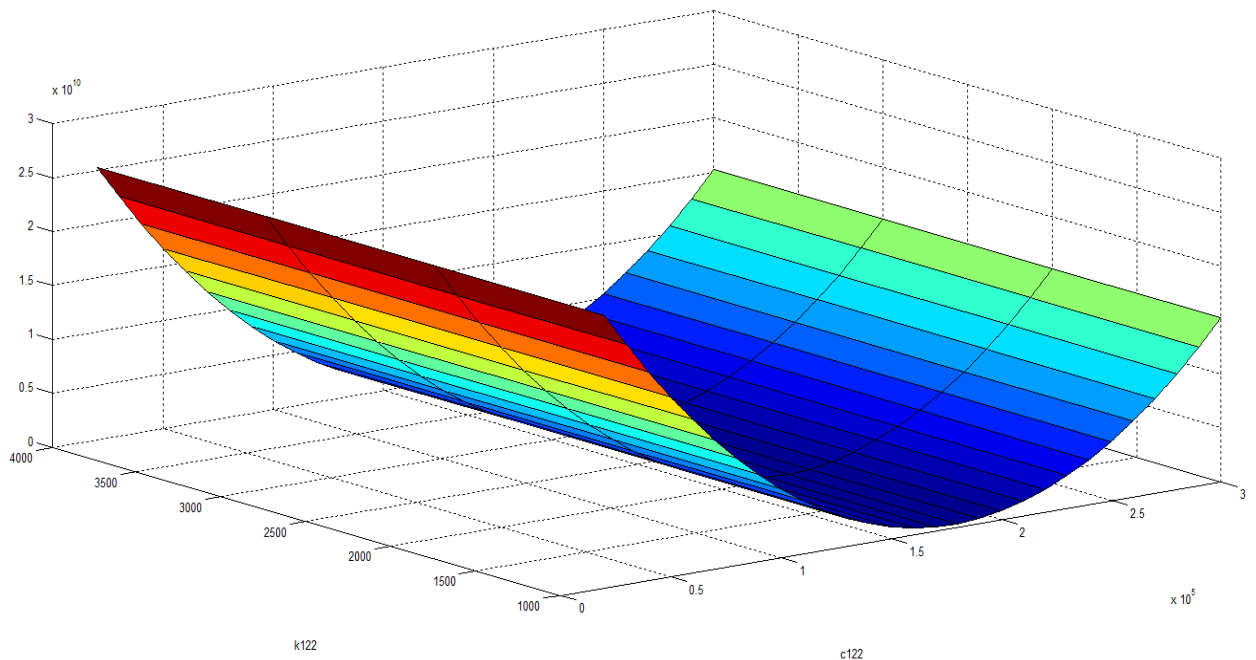


Рисунок 2.23 - Поверхности целевой функции при изменении продольной жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля при работающем приводе колес

Данная целевая функция имеет экстремум. Оптимальные значения коэффициента продольной деформации шины ведущих колес технологического модуля составляет 180000 Н/рад, а коэффициент демпфирования шины ведущих колес не имеет явно выраженного оптимума. Значение коэффициента  $c_{12.2}$  соответствует характеристике шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,08 МПа.

Используя выражение (2.11), были построены спектральные усилия на навеске трактора МТЗ-82 при работе с БДТ-7. На рисунках 2.24-2.26 приведены

спектральные плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора МТЗ-82 при работе с БДТ-7 на режиме с технологическим модулем (с включенным приводом колес технологического модуля) и без технологического модуля (режим работы без привода технологического модуля).

Из сравнения кривых представленных на (рисунке 2.24) видна следующая закономерность: применение технологического модуля с оптимальными коэффициентами жесткости и демпфирования шин ведущих колес технологического модуля позволяет значительно снизить амплитуду колебаний усилий на навеске трактора (сплошная линия) в среднем в 3...4 раза. При этом частотный диапазон смещается в более низкие частоты от 0 до 2,5 Гц. При этом спектральная плотность усилия на навеске трактора, соответствующая режиму работы трактора без технологического модуля находится в более высоком частотном диапазоне.

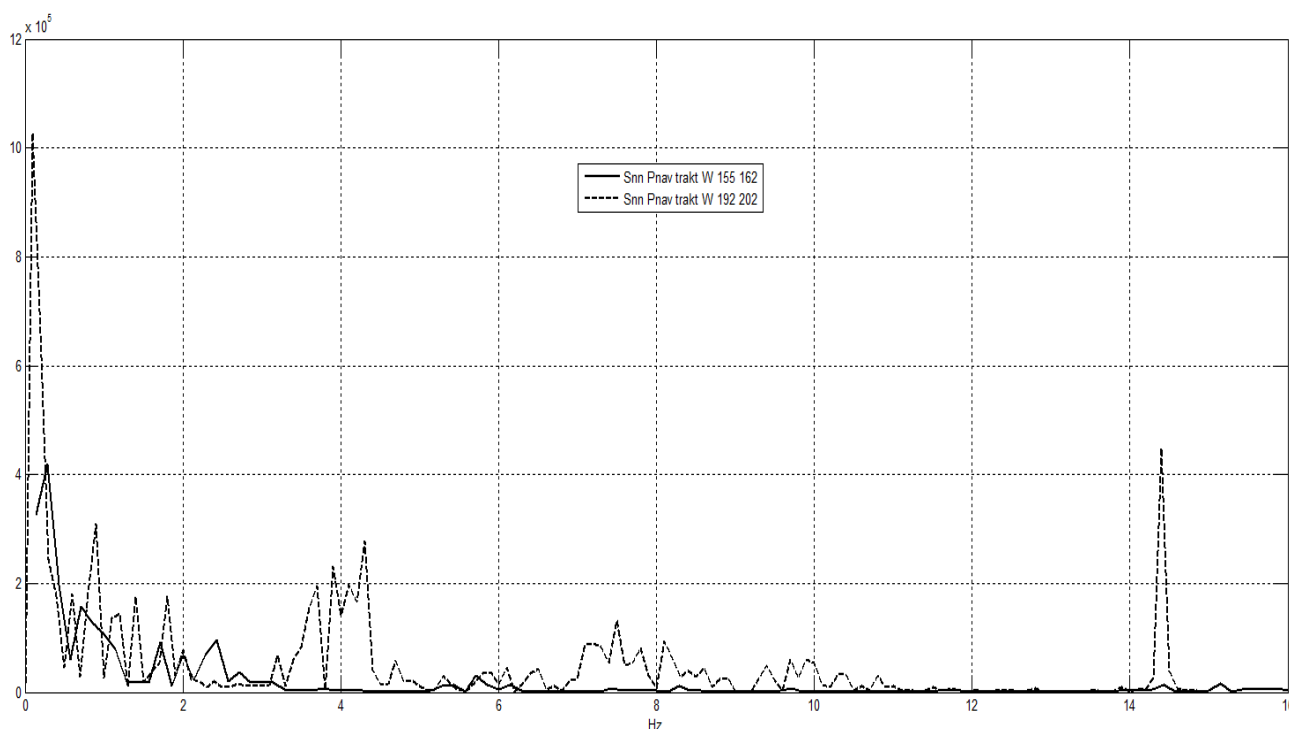


Рисунок 2.24 – Теоретические спектральные плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора МТЗ-82 с технологическим модулем:  
 ————— - с приводом колес модуля;  
 - - - - - без привода колес технологического модуля

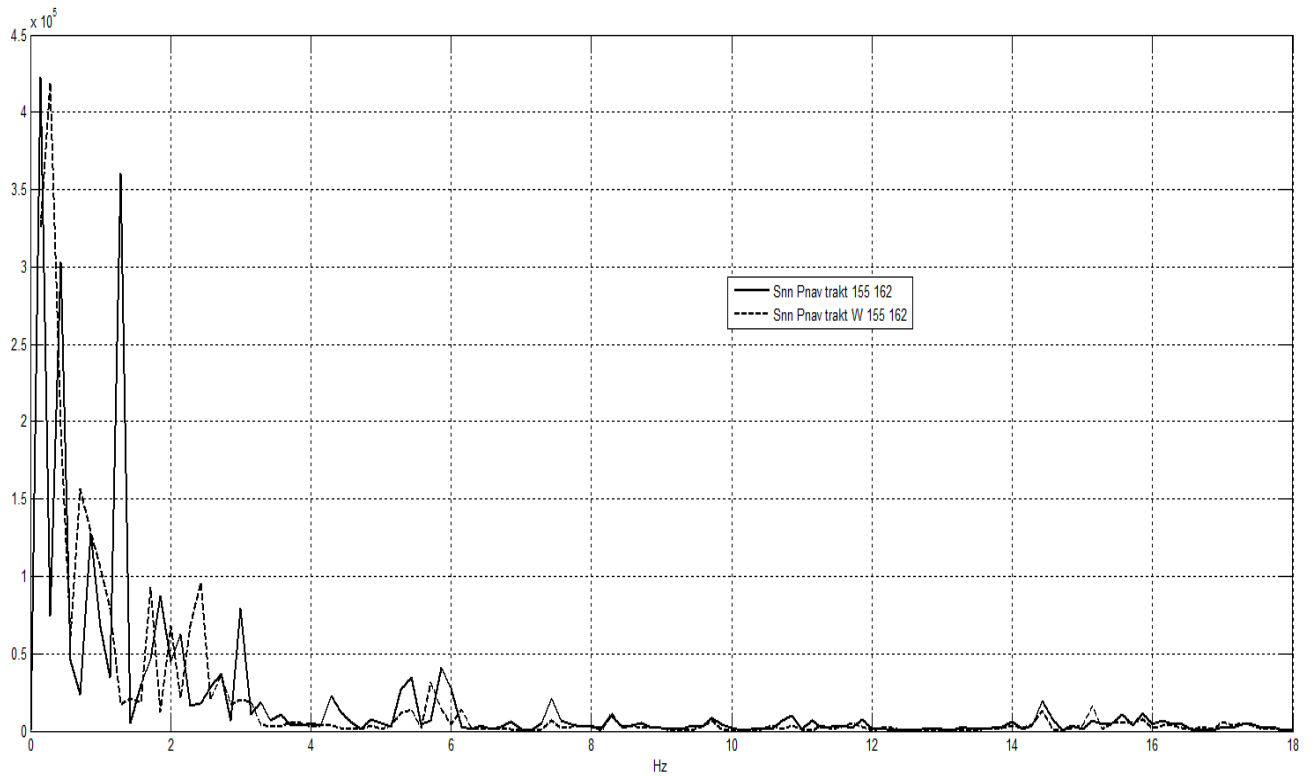


Рисунок 2.25 - Спектральные плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора МТЗ-82 с технологическим модулем с включенным приводом:  
 - - - - - теоретическая и ————— -экспериментальная.

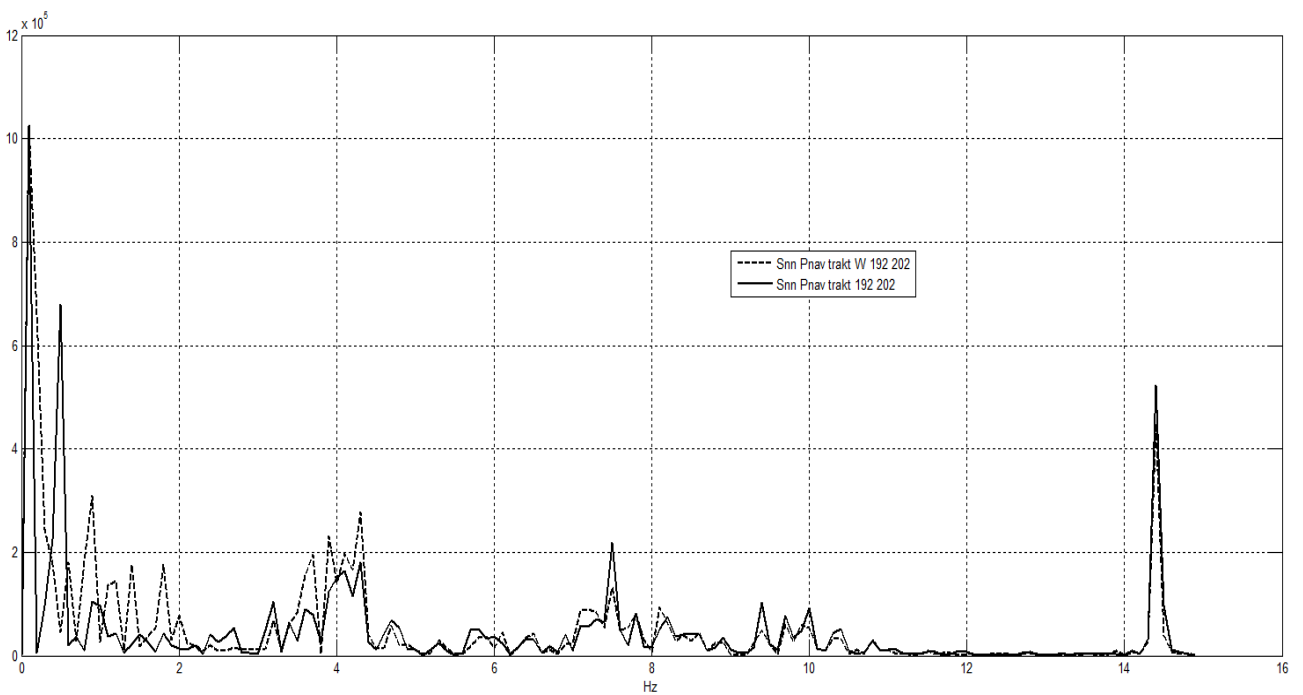


Рисунок 2.26 - Спектральная плотность горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора МТЗ-82 с технологическим модулем с отключенным приводом:  
 - - - - - теоретическая и ————— -экспериментальная.

На рисунках 2.25 и 2.26 приведены теоретические и экспериментальные спектральные плотности усилия на навеске трактора, визуальное сравнение которых позволяет наглядно судить о совпадении основных частот спектральной плотности.

Оценка по минимуму суммы квадратов разности амплитуд теоретических и экспериментальных спектральных плотностей позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели МТА на базе трактора с технологическим модулем. Теоретические и экспериментальные реализации процессов хорошо согласуются и расхождение составляет в пределах 8...16%.

## **2.5 Обоснование рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластировании энергонасыщенных тракторов**

Как было рассмотрено выше, наиболее приемлемыми для трактора тягово-энергетической концепции в настоящее время являются две комплектации: трактор плюс балласт или трактор с технологическим модулем. Тяговый класс трактора тягово-энергетической концепции предложено задавать двумя номинальными значениями тягового усилия – верхним (трактор с полным балластом или с ТМ) и нижним (трактор без балласта или без ТМ) [2].

### **2.5.1 Обоснование веса технологического модуля и трактора тягово-энергетической концепции**

Значение номинального тягового усилия трактора пропорционально его весу:

$$P_{кр н} = \varphi_{кр н} G_{тр}, \quad (2.14)$$

где  $G_{тр}$  – вес трактора, обеспечивающий условия сцепления движителей с почвой при достижении трактором заданного тягового усилия на лущеной стерне зерно-

вых культур нормальной влажности с буксованием не более допустимого  $\delta_n$  стандартом;

$\varphi_{кр.н}$  — коэффициент использования веса трактора при номинальном тяговом усилии и работе на лущеной стерне.

Значение коэффициента использования веса колесного трактора 4К4 при номинальном тяговом усилии и работе на лущеной стерне по ГОСТ 4.40-84 составляет  $\varphi_{кр.н} = 0,392$ . По данным испытаний, проведенных в Кубанском НИИ, значение коэффициента использования веса колесного трактора 4К4 с третьим мостом (модульное энергетическое средство (МЭС) при номинальном тяговом усилии и работе на лущеной стерне составило  $\varphi_{кр.МЭС} = 0,4 \dots 0,41$ . Большее значение коэффициента использования веса трактора с третьим мостом по сравнению с трактором колесной формулы 4К4 объясняется более высокими тягово-сцепными свойствами трехосной схемы комплектования.

Для повышения универсальности колесных тракторов путем использования их с сельскохозяйственными машинами, предназначенными для тракторов разных тяговых классов, необходимо что бы колесный трактор мог развивать несколько номинальных тяговых усилий, соответствующих разным тяговым классам. Это возможно, согласно выражения (2.14) изменением веса трактора. Для перехода трактора в более высокий тяговый класс необходимо увеличить его вес на разность между весом трактора верхнего тягового класса и весом трактора нижнего тягового класса:

$$\Delta G_{тр} = G_{тр в} - G_{тр н} \quad (2.15)$$

где  $G_{тр в}$  и  $G_{тр н}$  — вес трактора соответственно верхнего тягового класса и нижнего тягового классов.

Эксплуатационный вес трактора для нижнего и верхнего тяговых классов определяем по формулам соответственно для трактора с ТМ и с балластом:

$$G_{\text{тр.н}} = \frac{P_{\text{кр.н.н}}}{\Phi_{\text{кр.н}}}, \quad (2.16)$$

$$G_{\text{тр.в}} = \frac{P_{\text{кр.н.в}}}{\Phi_{\text{кр.МЭС}}}, \quad (2.17)$$

$$G_{\text{тр.в}} = \frac{P_{\text{кр.н.в}}}{\Phi_{\text{кр.н}}}, \quad (2.18)$$

где  $P_{\text{тр.н.в}}$  и  $P_{\text{кр.н.н}}$  – номинальные тяговые усилия трактора, соответствующие верхнему и нижнему тяговым классам.

Необходимый вес для перехода в более высокий тяговый класс, как было рассмотрено выше, может быть дополнен балластом или применением третьего моста (технологического модуля) [133]. При использовании технологического модуля, полученный вес по формуле (2.15) будет его эксплуатационным весом. В конструкции технологический модуль может быть выполнен с более низким весом и дополнен до необходимого значения балластом. Таким образом эксплуатационный вес технологического модуля задается из условия возможности перехода трактора в верхний тяговый класс трактора тягово-энергетической концепции.

Проведем расчет по предлагаемой методике веса и массы тракторов нижнего и верхнего тяговых классов, и веса балласта и технологического модуля при переходе от нижнего к верхнему тяговому классу на примере трактора тягового класса 1,4.

Эксплуатационный вес трактора для нижнего тягового класса 1,4 согласно выражению (2.16):

$$G_{\text{тр.н}} = \frac{P_{\text{кр.н.н}}}{\Phi_{\text{кр.н}}} = \frac{14}{0,392} = 35,71 \text{ кН},$$

где  $P_{\text{кр.н.н}}$  – нижнее номинальное тяговое усилие трактора,  $P_{\text{кр.н}} = 14 \text{ кН}$ ;

$\Phi_{\text{кр.н}}$  – коэффициент использования веса колесного трактора при номинальном тяговом усилии и работе на лущеной стерне.

Эксплуатационный вес трактора для верхнего тяговых класса 2 при балластование согласно выражению (2.18):

$$G_{\text{тр.в.б}} = \frac{P_{\text{кр.н.в.б}}}{\varphi_{\text{кр.н}}} = \frac{20}{0,392} = 51,02 \text{ кН},$$

где  $P_{\text{кр.н.в.б}}$  - верхнее значение номинального тягового усилия трактора с полным балластом,  $P_{\text{кр.н.в.б}} = 20 \text{ кН}$ .

Эксплуатационный вес трактора для верхнего тяговых класса 2 при использовании технологического модуля согласно выражению (2.17):

$$G_{\text{тр.в.МЭС}} = \frac{P_{\text{кр.н.в.МЭС}}}{\varphi_{\text{кр.МЭС}}} = \frac{20}{0,40} = 50,00 \text{ кН},$$

где  $P_{\text{кр.н.в.МЭС}}$  - верхнее значение номинального тягового усилия МЭС,  $P_{\text{кр.н.в.МЭС}} = 20 \text{ кН}$ .

$\varphi_{\text{кр.МЭС}}$  - коэффициент использования веса трактора с технологическим модулем.

Максимальный вес балласта:

$$G_{\text{б}} = G_{\text{тр.в.б}} - G_{\text{тр.н}} = 51,02 - 35,71 = 15,31 \text{ кН}.$$

Максимальная масса балласта:

$$m_{\text{б}} = 10^3 \frac{G_{\text{б}}}{g} = \frac{15,31}{9,81} = 1560 \text{ кг}.$$

Максимальный вес технологического модуля:

$$G_{\text{ТМ}} = G_{\text{тр.в.МЭС}} - G_{\text{тр.н}} = 50,00 - 35,71 = 14,29 \text{ кН}.$$

Максимальная масса технологического модуля:

$$m_{\text{ТМ}} = 10^3 \frac{G_{\text{ТМ}}}{g} = \frac{14,29}{9,81} = 1456 \text{ кг}.$$

Результаты расчетов массы колесных тракторов в различных комплектациях, балластов и технологических модулей для разных тяговых классов приведены в таблице 2.1.



Таблица 2.1 - Результаты расчетов массы колесных тракторов в различных комплектациях

Комплектация	Показатели		
	Эксплуатационная масса, кг	Тяговый класс	Номинальное тяговое усилие, кН
на базе трактора класса 1,4			
без балласта	3641	1,4	14
с балластом	5201	2	20
с ТМ	5097	2	20
балласт	1560	-	6
ТМ	1456	-	6
на базе трактора класса 1,4			
без балласта	3641	1,4	14
с балластом	7801	3	30
с ТМ	7645	3	30
балласт	4161	-	16
ТМ	4005	-	16
на базе трактора класса 2			
без балласта	5201	2	20
с балластом	7801	3	30
с ТМ	7645	3	30
балласт	2600	-	10
ТМ	2444	-	10
на базе трактора класса 3			
без балласта	7801	3	30
с балластом	10402	4	40
с ТМ	10194	4	40
балласт	2600	-	10
ТМ	2392	-	10
на базе трактора класса 3			
без балласта	7801	3	30
с балластом	13002	5	50
с ТМ	12741	5	50
балласт	5201	-	20
ТМ	4941	-	20
на базе трактора класса 4			
без балласта	10402	4	40
с балластом	13002	5	50
с ТМ	12742	5	50
балласт	2600	-	10
ТМ	2340	-	10

Продолжение таблицы 2.1

на базе трактора класса 4			
без балласта	10402	4	40
с балластом	15603	6	60
с ТМ	15291	6	60
балласт	5201	-	20
ТМ	4889	-	20

Анализ таблицы 2.1 показывает, что необходимая масса технологического модуля для перехода в верхний тяговый класс на 5...11% ниже массы балласта. Таким образом применение технологического модуля вместо балластирования тракторов при переходе в верхний тяговый класс позволит уменьшить общий вес трактора с технологическим модулем и тем самым потери на сопротивление качению. Если учитывать, что масса технологического модуля складывается из массы самого технологического модуля и части массы сельскохозяйственной машины, установленной на технологическом модуле, то потери на сопротивление качению всего МТА на базе трактора с технологическим модулем будут значительно меньше чем у МТА на базе трактора с балластами.

Таблица 2.2 - Результаты сравнения расчетных масс тракторов тяговых классов 1,4; 2; 3 и 5 и тракторов МТЗ-82, МТЗ-1221, Т-142, Т-150К и К-744 (в скобках данные из литературы)

Название параметра	Значение			
	1,4	2	3	5
Эксплуатационная масса трактора, кг				
МТЗ-82	3641 (3420)			
МТЗ-1221		5201 (5300)		
Т-142		5201 (5340)		
Т-150К			7801 (8190)	
К-744				13002 (13820)
Разница массы расчетной и действительной, %	6,46	1,87 2,60	4,75	5,91

Анализ таблиц 2.2 показывает, что расхождение расчетной массы тракторов

от данных приведенных заводами изготовителями составляет от 1,87% до 6,46%, что говорит о хорошей сходимости расчетных и приведенных данных.

Анализ таблицы 2.3 показывает, что расхождение расчетной массы трактора с балластами от данных приведенных заводом изготовителем составляет 2,04...2,81%, что говорит о хорошей сходимости расчетных и приведенных данных.

Таблица 2.3 - Результаты расчетов массы трактора Fendt-936 в различных комплектациях (в скобках данные из литературы [2])

Название параметра	Значение		
	4	5	6
Тяговый класс			
Эксплуатационная масса трактора: без балласта, кг	10402 (10703)	-	-
с балластом, кг	-	13002	15603(15290)
Разница массы расчетной и действительной, %	2,81		2,04
Масса балласта, кг		2600	5201

Анализ таблиц 2.4 показывает, что расхождение расчетной массы технологических модулей от данных приведенных в литературе [45, 46] составляет от 2,71% до 24,77%. Большой процент расхождения массы МЭС сформированного на базе трактора тягового класса 3 можно объяснить тем, что опытный экземпляр МЭС сформированный на базе трактора тягового класса 3 имел не достаточную мощность в сравнении с расчетной.

Таблица 2.4 - Результаты расчетов массы технологических модулей (в скобках данные из литературы [45, 46])

Название параметра	Значение		
	4	5	6
Эксплуатационная масса трактора: без ТМ, кг	5201 (5200)	5201 (5930)	7801(8140)
с ТМ, кг	7645(7580)	7645(8350)	12741(12100)
Соответствие тяговому классу	2-3	2-3	3-5
Масса технологического модуля, кг	2444 (2380)	2444 (2420)	4941 (3960)
Разница массы ТМ расчетной и действительной, %	2,71	1,01	24,77

Приведенная методика расчета рационального веса технологического модуля и трактора тягово-энергетической концепции позволила сформировать для экспериментальных исследований МТА с рациональными параметрами технологического модуля.

### 2.5.2 Определение номинальной эксплуатационной мощности двигателя трактора тягово-энергетической концепции

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя трактора тяговой концепции принято рассчитывать по формуле:

$$N_{н.э} = \frac{(P_{кр.н} + P_f)v_{тр.н}}{\eta_{тр}(1 - \delta_{н.к})} \quad (2.19)$$

где  $P_{кр.н}$  — значение номинального тягового усилия трактора, кН;

$P_f$  — сила сопротивления качению трактора, кН;

$v_{тр.н}$  — действительная скорость движения трактора при номинальном тяговом усилии, м/с;

$\eta_{тр}$  — механический КПД трансмиссии трактора;

$\delta_{н.к}$  — допустимое значение буксования колес заднего ведущего моста.

Зависимость (2.19) справедлива для определения номинальной эксплуатационной мощности двигателя только для тракторов формулы 4К2. Для тракторов, имеющих колесную формулу 4К4 или 6К6 необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, влияющих на точность расчета номинальной эксплуатационной мощности двигателя.

Во-первых, помимо того, что при всех ведущих колесах в силу тяги реализуется полный вес трактора и возрастает коэффициент использования веса  $\varphi_{кр}$ , проявляется эффект снижения сопротивления качению (уменьшается коэффициент  $f_k$ ) и повышения сцепления (увеличивается коэффициент  $\varphi_k$ ) вследствие прохода колес второго и третьего мостов по следу колес первого моста (рисунок 2.27) [133].

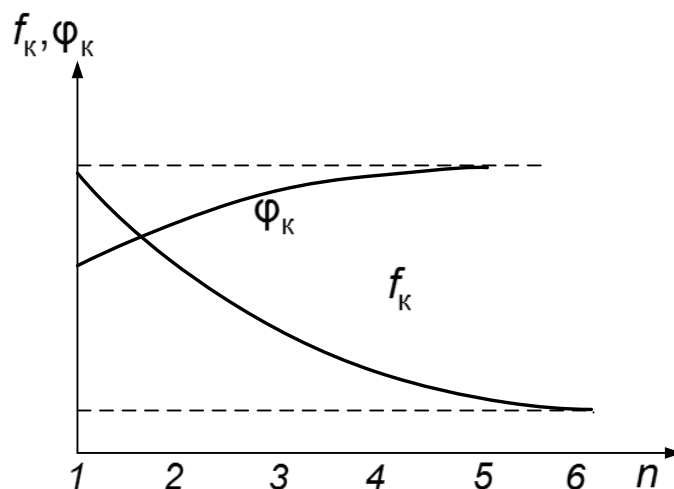


Рисунок 2.27 - Зависимость изменения  $\varphi_k$  и  $f_k$  от числа проходов  $n$  колеса по одному следу деформируемой поверхности

Во-вторых, буксование колес  $\delta$  по отдельным осям неодинаково и зависит от конструктивно заданного кинематического несоответствия в их приводе (коэффициент  $k_n$ ), а в выражении (2.18) используется буксование колес только одного - заднего моста трактора [133].

В-третьих, КПД двухосной трансмиссии  $\eta_{тр}$  трактора колесной формулы 4К4 и тем более трехосной трансмиссии 6К6 можно определить расчетом только как сумму КПД двух или трех ветвей трансмиссии: на привод передних и задних колес трактора отдельно и на привод колес ТМ отдельно. Потери мощности в каждой ветви трансмиссии зависят от двух факторов: от механического КПД ( $\eta_{тр1}$ ,  $\eta_{тр2}$ ,  $\eta_{тр3}$ ) и от доли мощности двигателя, передаваемой через данную ветвь трансмиссии и учитываемую коэффициентом передачи мощности  $k_{N1}$ ,  $k_{N2}$ ,  $k_{N3}$ .

Учитывая изложенное, для уточнения выражения (2.18) принимаем условие, что номинальную эксплуатационную мощность двигателя можно определить, как сумму мощностей, потребляемых отдельным мостом – передним, задним и ТМ

$$N_{н.э.ЭМ} = N_{н.э.п} + N_{н.э.к} \quad (2.20)$$

$$N_{н.э.МЭС} = N_{н.э.п} + N_{н.э.к} + N_{н.э.ТМ} \quad (2.21)$$

где  $N_{н.э.ЭМ}$  – мощность двигателя, реализуемая на создание номинального тягового

усилия трактора без технологического модуля (без ТМ);

$N_{н.э.МЭС}$  – мощность двигателя трактора с ТМ (модульного энерготехнологического средства);

$N_{н.э.п}$  – мощность двигателя на привод колес переднего моста трактора;

$N_{н.э.к}$  – мощность двигателя на привод колес заднего моста трактора;

$N_{н.э.ТМ}$  – мощность двигателя на привод колес ТМ.

Исходя из принятого условия, что номинальная эксплуатационная мощность двигателя равна сумме мощностей, реализуемых каждым ведущим мостом, силу тяги трактора определяем, как сумму сил тяги мостов трактора или МЭС. Тогда для трактора без ТМ

$$P_{кр} = P_{кр.п} + P_{кр.к} \quad (2.23)$$

и с ТМ соответственно

$$P_{кр.МЭС} = P_{кр.п} + P_{кр.к} + P_{кр.ТМ} \quad (2.24)$$

где  $P_{кр.п}$ ,  $P_{кр.к}$ ,  $P_{кр.ТМ}$  — значение силы тяги переднего, заднего мостов трактора и ТМ соответственно, кН.

Аналогично примем, что сила сопротивления качению трактора и МЭС равна сумме сил сопротивления качению мостов трактора или МЭС. Тогда для трактора без ТМ и с ТМ соответственно

$$P_{ф.тр} = P_{ф.п} + P_{ф.к} \quad (2.25)$$

$$P_{ф.МЭС} = P_{ф.п} + P_{ф.к} + P_{ф.ТМ} \quad (2.26)$$

где  $P_{ф.п}$ ,  $P_{ф.к}$ ,  $P_{ф.ТМ}$  — сила сопротивления качению колес переднего, заднего мостов трактора и ТМ соответственно, кН.

Сложив выражения (2.23) и (2.25) и соответственно (2.24) и (2.26) получим:

$$P_{кр} + P_{ф.тр} = (P_{кр.п} + P_{ф.п}) + (P_{кр.к} + P_{ф.к}) \quad (2.27)$$

$$P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС} = (P_{кр.п} + P_{ф.п}) + (P_{кр.к} + P_{ф.к}) + (P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ}) \quad (2.28)$$

Левая часть уравнений (2.27) и (2.28) представляет собой часть числителя выражения (2.19), заключенного в скобку. Так как средняя поступательная скорость всех ведущих мостов одинаковая, то тяговая мощность трактора будет рав-

на сумме мощностей, реализуемых каждым ведущим мостом трактора или МЭС:

$$(P_{кр} + P_{ф.тр})v_{тр} = (P_{кр.п} + P_{ф.п})v_{тр} + (P_{кр.к} + P_{ф.к})v_{тр} \quad (2.29)$$

$$(P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС})v_{тр} = (P_{кр.п} + P_{ф.п})v_{тр} + \\ + (P_{кр.к} + P_{ф.к})v_{тр} + (P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ})v_{тр} \quad (2.38)$$

Умножим и поделим каждый член выражений (2.29) и (2.30) на знаменатель выражения (2.18) с учетом присущего каждому мосту своего буксования и КПД привода:

$$\frac{(P_{кр} + P_{ф.тр})v_{тр}}{\eta_{тр}(1-\delta_{н})} \eta_{тр}(1-\delta_{н}) = \frac{(P_{кр.п} + P_{ф.п})v_{тр}}{\eta_{тр1}(1-\delta_{н.п})} \eta_{тр1}(1-\delta_{н.п}) + \\ + \frac{(P_{кр.к} + P_{ф.к})v_{тр}}{\eta_{тр2}(1-\delta_{н.к})} \eta_{тр2}(1-\delta_{н.к}) \quad (2.39)$$

$$\frac{(P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС})v_{тр}}{\eta_{тр.МЭС}(1-\delta_{н})} \eta_{тр.МЭС}(1-\delta_{н}) = \frac{(P_{кр.п} + P_{ф.п})v_{тр}}{\eta_{тр1}(1-\delta_{н.п})} \eta_{тр1}(1-\delta_{н.п}) + \\ + \frac{(P_{кр.к} + P_{ф.к})v_{тр}}{\eta_{тр2}(1-\delta_{н.к})} \eta_{тр2}(1-\delta_{н.к}) + \frac{(P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ})v_{тр}}{\eta_{тр3}(1-\delta_{н.ТМ})} \eta_{тр3}(1-\delta_{н.ТМ}) \quad (2.40)$$

Здесь 
$$\frac{(P_{кр.п} + P_{ф.п})v_{тр.п}}{\eta_{тр}(1-\delta_{н})} = N_{н.э.п}, \quad \frac{(P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС})v_{тр}}{\eta_{тр.МЭС}(1-\delta_{н})} = N_{н.э.МЭС};$$

$$\frac{(P_{кр.п} + P_{ф.п})v_{тр.п}}{\eta_{тр1}(1-\delta_{н})} = N_{н.э.п},$$

$$\frac{(P_{кр.к} + P_{ф.к})v_{тр.к}}{\eta_{тр2}(1-\delta_{к})} = N_{н.э.к} \quad \frac{(P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ})v_{тр.ТМ}}{\eta_{тр3}(1-\delta_{ТМ})} = N_{н.э.ТМ} \quad (2.41)$$

где  $\eta_{тр1}$ ,  $\eta_{тр2}$ ,  $\eta_{тр3}$  — механический КПД ветви трансмиссии от двигателя к переднему, заднему мостам трактора и к ТМ соответственно;

$\delta_{к}$ , — допустимое буксование на лущеной стерне зерновых колес заднего моста трактора;

$\delta_{п}$ , и  $\delta_{ТМ}$  — буксование колес переднего моста и ТМ соответственно с учетом кинематического несоответствия в их приводе.

С учетом (2.41) выражения (2.39) и (2.40) можно записать в следующем виде

$$N_{\text{н.э.ЭМ}}\eta_{\text{тр}}(1-\delta_{\text{н}}) = N_{\text{н.э.п}}\eta_{\text{тр1}}(1-\delta_{\text{н.п}}) + N_{\text{н.э.к}}\eta_{\text{тр2}}(1-\delta_{\text{н.к}}) \quad (2.42)$$

$$N_{\text{н.э.МЭС}}\eta_{\text{тр.МЭС}}(1-\delta_{\text{н}}) = N_{\text{н.э.п}}\eta_{\text{тр1}}(1-\delta_{\text{н.п}}) + N_{\text{н.э.к}}\eta_{\text{тр2}}(1-\delta_{\text{н.к}}) + N_{\text{н.э.ТМ}}\eta_{\text{тр3}}(1-\delta_{\text{н.ТМ}}) \quad (1.43)$$

Разделив левые и правые части уравнений (2.42) и (2.43) на  $N_{\text{н.э.}}$ , получим:

$$\eta_{\text{тр}}(1-\delta_{\text{н}}) = \eta_{\text{тр1}}(1-\delta_{\text{н.п}})k_{\text{N1}} + \eta_{\text{тр2}}(1-\delta_{\text{н.к}})k_{\text{N2}} \quad (2.44)$$

$$\eta_{\text{тр.МЭС}}(1-\delta_{\text{н}}) = \eta_{\text{тр1}}(1-\delta_{\text{н.п}})k_{\text{N1М}} + \eta_{\text{тр2}}(1-\delta_{\text{н.к}})k_{\text{N2М}} + \eta_{\text{тр3}}(1-\delta_{\text{н.ТМ}})k_{\text{N3М}} \quad (2.45)$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  и  $\eta_{\text{МЭС}}$  – КПД трансмиссии трактора и МЭС соответственно;

$\eta_{\text{тр1}}$ ,  $\eta_{\text{тр2}}$  и  $\eta_{\text{трТМ}}$  — КПД привода переднего, заднего моста трактора и ТМ;

$k_{\text{N1}}$ ,  $k_{\text{N2}}$  — коэффициенты передачи мощности на привод передних и задних колес трактора;

$k_{\text{N1М}}$ ,  $k_{\text{N2М}}$  и  $k_{\text{N3М}}$  - коэффициенты передачи мощности на привод передних, задних колес трактора (или ЭМ) и колес ТМ в составе МЭС, учитывающие долю мощности, передаваемую через  $j$ -й мост. Коэффициенты передачи мощности на привод колес определяем:

для трактора 4К4:

$$k_{\text{N1}} = \frac{N_{\text{н.э.п}}}{N_{\text{н.э.ЭМ}}}, \quad k_{\text{N2}} = \frac{N_{\text{н.э.к}}}{N_{\text{н.э.ЭМ}}},$$

для трактора 4К4 с ТМ:

$$k_{\text{N1М}} = \frac{N_{\text{н.э.п}}}{N_{\text{н.э.МЭС}}}, \quad k_{\text{N2М}} = \frac{N_{\text{н.э.к}}}{N_{\text{н.э.МЭС}}}, \quad k_{\text{N3М}} = \frac{N_{\text{н.э.ТМ}}}{N_{\text{н.э.МЭС}}},$$

Для расчета коэффициентов передачи мощности используют выражения (2.41).

Обязательным при определении коэффициентов передачи мощности служит условие

$$\sum_{j=1}^N k_{\text{Nj}} = 1,$$

которое получается из равенства



$$N_{\text{н.э.тр}} = \sum_{j=1}^N N_{\text{н.э.}j},$$

где  $N_{\text{н.э.}j}$  — доля эффективной мощности двигателя, передаваемых отдельно на  $j$ -й мост.

Тогда для трактора 4К4 и трактора 4К4 с ТМ соответственно:

для трактора 4К4:

$$1 = k_{N1} + k_{N2},$$

для трактора 4К4 с ТМ:

$$1 = k_{N1M} + k_{N2M} + k_{N3M},$$

Таким образом, знаменатель выражения (2.18) следует рассчитывать, как произведение механического КПД трансмиссии  $\eta_{\text{тр}}$  на КПД буксования  $(1 - \delta_{\text{н}})$  с учетом доли мощности, передаваемой через  $j$ -й мост.

$$\eta_{\text{тр}}(1 - \delta_{\text{н}}) = \sum_{j=1}^N \eta_{\text{тр}j} k_{Nj} (1 - \delta_{\text{н.}j}), \quad (2.46)$$

а выражение (2.19) в общем виде содержит в числителе сумму сил тяги и сил сопротивления качению ведущих мостов, а в знаменателе — сумму механических потерь мощности в трансмиссии и потерь на буксование

$$N_{\text{н.э}} = \frac{\sum_{j=1}^N (P_{\text{кр}j} + P_{\text{f}j}) v_{\text{тр.н}}}{\sum_{j=1}^N \eta_{\text{тр}j} k_{Nj} (1 - \delta_{\text{н.}j})} \quad (2.47)$$

где  $k_{Nj}$  — коэффициент передачи мощности, учитывающий долю мощности, передаваемую через  $j$ -й мост;  $\eta_{\text{тр}j}$  — механический КПД отдельной ветви трансмиссии;  $(1 - \delta_{\text{н.}j})$  — КПД буксования  $j$ -го моста.

Расчет буксования колес ведущих мостов проводим с учетом конструкционного кинематического несоответствия в приводе относительно допустимого буксования колес заднего моста трактора  $\delta_{\text{н}}$  на лущеной стерне зерновых культур

$$\delta_{\text{п}} = \delta_{\text{н}} k_{\text{н1}}; \quad \delta_{\text{ТМ}} = \delta_{\text{н}} k_{\text{нТМ}},$$

где  $\delta_{\text{п}}$ ,  $\delta_{\text{ТМ}}$  – буксование колес переднего, заднего мостов трактора и ТМ соответственно;  $k_{\text{н1}}$  и  $k_{\text{нТМ}}$  – коэффициент кинематического несоответствия в приводе колес переднего моста трактора и ТМ соответственно.

В качестве допустимого значения буксования  $\delta_{\text{н}}$  принимаем регламентированное стандартом для тракторов колесной формулы 4К4 значение, равное 16 %.

Силу тяги  $P_{\text{кр}}$  принимаем пропорциональной вертикальной нагрузке на каждый мост. Тогда

$$P_{\text{кр.п}} = \varphi_{\text{кр1}} G_{\text{п}}, P_{\text{кр.к}} = \varphi_{\text{кр2}} G_{\text{к}}, P_{\text{кр.ТМ}} = \varphi_{\text{кр.3}} G_{\text{ТМ}} \quad (2.49)$$

где  $G_{\text{п}}$ ,  $G_{\text{к}}$ , и  $G_{\text{ТМ}}$  — вертикальная нагрузка на передний и задний мост ЭМ, и на ТМ;

$\varphi_{\text{кр1}}$ ,  $\varphi_{\text{кр2}}$ ,  $\varphi_{\text{кр3}}$  – коэффициент использования веса переднего, заднего мостов, и ТМ;

Значения коэффициента использования веса  $\varphi_{\text{кр}}$  переднего и заднего мостов, а также ТМ определяем с учетом разных условий качения их колес. Для этого необходимо иметь зависимость  $\varphi_{\text{кр}} = f_{(n)}$  или зависимости  $\varphi_{\text{к}} = f_{(n)}$  и  $f_{\text{п}} = f_{(n)}$ , где  $n$  – порядковый номер колеса, перемещающегося по колее переднего колеса. В технической литературе трудно найти количественные зависимости  $\varphi_{\text{к}} = f_{(n)}$  и  $f_{\text{п}} = f_{(n)}$  для построения графика  $\varphi_{\text{кр}} = f_{(n)}$  применительно к почвенным условиям работы сельскохозяйственных тракторов. Поэтому можно рекомендовать экспертную оценку распределения  $\varphi_{\text{кр}}$  по осям, ориентируясь на качественную картину изменения этих зависимостей, представленную на рисунке. 2.22. При этом должно быть соблюдено условие

$$\varphi_{\text{кр.н}} = \varphi_{\text{кр.1}} \lambda_{\text{п}} + \varphi_{\text{кр.2}} \lambda_{\text{к}} \quad (2.50)$$

и

$$\varphi_{\text{кр.н.МЭС}} = \varphi_{\text{кр.1}} \lambda_{\text{п}} + \varphi_{\text{кр.2}} \lambda_{\text{к}} + \varphi_{\text{кр.ТМ}} \lambda_{\text{ТМ}} \quad (2.51)$$

Выражения (2.50) и (2.51) для расчета значений коэффициентов использования веса  $\varphi_{\text{кр1}}$ ,  $\varphi_{\text{кр2}}$  и  $\varphi_{\text{крТМ}}$  получены следующим образом. Используя уравнения тягового баланса трактора и МЭС

$$P_{\text{кр}} = P_{\text{кр.п}} + P_{\text{кр.к}}$$

$$P_{\text{кр.МЭС}} = P_{\text{кр.п}} + P_{\text{кр.к}} + P_{\text{кр.ТМ}}$$

с учетом (2.49) получим

$$\varphi_{\text{кр.н}} G_{\text{ЭМ}} = \varphi_{\text{кр.1}} G_{\text{п}} + \varphi_{\text{кр.2}} G_{\text{к}}$$

и

$$\varphi_{\text{кр.н}} G_{\text{ЭМ}} = \varphi_{\text{кр.1}} G_{\text{п}} + \varphi_{\text{кр.2}} G_{\text{к}} + \varphi_{\text{кр.ТМ}} G_{\text{ТМ}}$$

Отсюда

$$\varphi_{\text{кр.н}} = \varphi_{\text{кр.1}} \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{ЭМ}}} + \varphi_{\text{кр.2}} \frac{G_{\text{к}}}{G_{\text{ЭМ}}}$$

и

$$\varphi_{\text{кр.н}} = \varphi_{\text{кр.1}} \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{МЭС}}} + \varphi_{\text{кр.2}} \frac{G_{\text{к}}}{G_{\text{МЭС}}} + \varphi_{\text{кр.3}} \frac{G_{\text{ТМ}}}{G_{\text{МЭС}}}.$$

Подставив в эти уравнения коэффициенты нагрузки колес

$$\lambda_{\text{п}} = G_{\text{п}}/G_{\text{МЭС}}, \lambda_{\text{к}} = G_{\text{к}}/G_{\text{МЭС}}, \lambda_{\text{ТМ}} = G_{\text{ТМ}}/G_{\text{МЭС}}$$

получим выражения (2.50) и (2.51).

При выводе выражения (2.51) принято допущение, что распределение веса между передней и задней осью трактора сохраниться в составе МЭС таким же.

Рассмотрим определение коэффициента использования веса трактора по мостам на примере МЭС. По результатам испытаний в Кубанском НИИ испытаний сельскохозяйственных тракторов и машин  $\varphi_{\text{кр.МЭС}} = 0,4 \dots 0,41$ . Чтобы определить значения  $\varphi_{\text{кр}}$  для отдельных мостов МЭС, примем в качестве номинального значения  $\varphi_{\text{кр.МЭС}}$  нижнее, равное 0,4. Тогда выбранные экспертно значения  $\varphi_{\text{кр.1}} = 0,38$ ,  $\varphi_{\text{кр.2}} = 0,4$  и  $\varphi_{\text{кр.3}} = 0,41$  соответствуют нарастающей нелинейной зависимости  $\varphi_{\text{кр}} = f(n)$  (рисунок 2.22) и удовлетворяют условию (2.51).

Силу сопротивления качению  $P_f$  рассчитываем по методике, изложенной для определения силы тяги  $P_{\text{кр}}$ . Находим значения коэффициента сопротивления качению переднего, заднего мостов, и ТМ -  $f_1, f_2, f_3$ , используя график  $f_k = f(n)$  с соблюдением условий

$$f_k = f_1 \lambda_{\Pi} + f_2 \lambda_k \quad (2.52)$$

$$f_k = f_1 \lambda_{\Pi} + f_2 \lambda_k + f_3 \lambda_{\Gamma\Gamma\text{М}}, \quad (2.53)$$

где  $f_k$  коэффициент сопротивления качению на лушеной стерне колосовых по справочной таблице.

Значение коэффициента  $f_k = 0,11$  выбираем по справочным таблицам для условий работы машины на стерне. Тогда для отдельных мостов МЭС значения  $f_1=0,13$ ,  $f_2=0,11$  и  $f_3=0,1$  соответствуют убывающей нелинейной зависимости  $f = f_{(n)}$  и удовлетворяют условию (2.53).

Проведем расчет по предлагаемой методике мощности двигателя тракторов нижнего и верхнего тяговых классов с балластом и технологическим модулем при переходе от нижнего к верхнему тяговому классу на примере трактора тягового класса 1,4.

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя трактора класса 1,4 в разных комплектациях определим согласно (2.47):

- для трактора нижнего класса 1.4

$$N_{\text{н.э.тр}} = \frac{(14,00 + 4,79) \cdot 2,50}{0,79} = 59,63 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего класса на базе трактора класса 1.4 с балластом

$$N_{\text{н.э.тр.б}} = \frac{(20,00 + 6,84) \cdot 2,50}{0,79} = 85,18 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего класса на базе трактора класса 1.4 с ТМ

$$N_{\text{н.э.МЭС}} = \frac{(20,00 + 6,07) \cdot 2,50}{0,77} = 84,66 \text{ кВт}.$$

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя трактора класса 1,4 в разных комплектациях определим согласно традиционной методике расчета (2.19), но с учетом доли мощности двигателя, реализуемой через отдельные мосты, так как иначе КПД трансмиссии невозможно определить:

- для трактора нижнего тягового класса 1,4

$$N_{\text{н.э.тр}} = \frac{(14,00 + 5,357) \cdot 2,50}{0,90 \cdot (1 - 0,14)} = 62,23 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего тягового класса на базе трактора класса 1.4 с балластом

$$N_{\text{н.э.тр.б}} = \frac{(20,00 + 7,653) \cdot 2,50}{0,90 \cdot (1 - 0,14)} = 88,90 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего тягового класса на базе трактора класса 1.4 с ТМ

$$N_{\text{н.э.МЭС}} = \frac{(20,00 + 7,50) \cdot 2,50}{0,86 \cdot (1 - 0,14)} = 92,47 \text{ кВт}.$$

Результаты расчетов мощности двигателя колесных тракторов в различных комплектациях приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Результаты расчетов эксплуатационной мощности колесных тракторов в различных комплектациях

Комплектация	Показатели				
	Номинальное тяговое усилие, кН	Тяговый класс	Мощность двигателя, кВт	Энергонасыщенность трактора, кВт/кН	
				с балластом или ТМ	без балласта и ТМ
на базе трактора класса 1,4					
без балласта	14	1,4	56,90/57,66		1,59
с балластом	20	2	81,30/82,32	1,59	2,28
с ТМ	20	2	81,93/84,96	1,64	2,29
на базе трактора класса 1,4					
без балласта	14	1,4	56,90/57,66		1,59
с балластом	30	3	121,94/123,56	1,59	3,41
с ТМ	30	3	124,02/132,27	1,65	3,47
на базе трактора класса 2					
без балласта	20	2	81,28/82,37		1,59
с балластом	30	3	121,94/123,56	1,59	2,39
с ТМ	30	3	123,06/128,04	1,64	2,41
на базе трактора класса 3					
без балласта	30	3	121,92/123,56		1,59
с балластом	40	4	162,59/164,75	1,59	2,12
с ТМ	40	4	163,54/168,76	1,64	2,14
с балластом	50	5	203,24/205,94	1,59	2,66
с ТМ	50	5	205,63/215,56	1,65	2,69

Продолжение таблицы 2.5

на базе трактора класса 4					
без балласта	40	4	162,57/164,75		1,59
с балластом	50	5	203,24/205,94	1,59	1,99
с ТМ	50	5	204,02/209,60	1,63	2,00
с балластом	60	6	243,89/256,09	1,59	2,39
с ТМ	60	6	246,12/256,09	1,64	2,41

В числителе расчет произведен по предлагаемой методике, в знаменателе по традиционной методике

Результаты расчетов (таблица 2.5) показывают, что при всех комплектациях имеется превышение мощности при расчете по традиционной методике от 1,31% до 6,23%.

Таблица 2.6 - Результаты сравнения расчетных мощностей тракторов тяговых классов 1.4; 2.0; 3.0 и 5.0 и тракторов МТЗ-82, МТЗ-1221, Т-142, Т-150К и К-744 (в скобках данные из литературы)

Название параметра	Значение			
	1,4	2	3	5
Тяговый класс				
Эксплуатационная мощность трактора, кВт расчетная				
МТЗ-82	56,90 (58,84)	81,28 (95,6)	121,92 (117,6)	203,21 (220,65)
МТЗ-1221				
Т-142				
Т-150К				
К-744				
Разница мощности расчетной и действительной, %	3,30	14,98 30,88	0,46	7,91

В числителе расчет произведен по предлагаемой методике, в знаменателе по традиционной методике

Анализ таблицы 2.6 показывает, что расхождение расчетной мощности трактора от данных приведенных заводом изготовителем составляет от 0,46% до 7,91% по предлагаемой методике. Исключением являются модели Т-142 и МТЗ-1221. Трактор Т-142 создавался специально для эксплуатации в составе МЭС и его мощность была заложена для тягового класса 3. Трактор МТЗ-1221 также не является трактором тяговой концепции.

Таблица 2.7 - Результаты расчетов мощности трактора с технологическим модулем (в скобках данные из литературы [45, 46])

Название параметра	Значение	
Эксплуатационная мощность трактора с ТМ, кВт	123,06 (117,6)	205,63 (162,0)
Соответствие тяговому классу	3	5
Разница мощности трактора с ТМ расчетной и действительной, %	4,64	26,93

Анализ таблиц 2.7 показывает, что расхождение расчетной мощности тракторов от данных приведенных в литературе [45, 46] составляет от 4,64% до 26,93%. Можно отметить, что МЭС сформированный на базе трактора Т-150К тягового класса 3 имел не достаточную мощность для формирования МЭС тягового класса 5. МЭС сформированный на базе трактора Т-150К развивал меньшую скорость в сравнении с трактором К-701 класса 5 [45].

Результаты проведенных расчетов показывают, что для достижения предельной по сцеплению силы тяги на крюке при переходе в следующий более высокий класс тяги необходимо, чтобы энергонасыщенность трактора с технологическим модулем соответствовала энергонасыщенности трактора к которому подсоединяется технологический модуль (1,59...1,65 кВт/кН), а сам трактор, к которому подсоединяется технологический модуль обладал энергонасыщенностью (2,0...2,41 кВт/кН).

## 2.6 Выводы

1. Проведенные теоретические изыскания позволили обосновать компоновку модульного построения МТА для трактора класса 1,4 с технологическим модулем и разработать функциональную схему, которая обеспечит согласованную кинематическую и силовую передачу полной мощности двигателя, маневренность и агрегатирование полного комплекса сельскохозяйственных машин для универсально пропашного трактора двух тяговых классов 1,4 и 2;

2. Выбор рациональных (оптимальных) значений параметров шин ведущих колес технологического модуля и трактора для заданных режимов работы (заданной кривой спектральной плотности колебаний моментов сопротивления на этих колесах и колебаний горизонтальной составляющей усилия на навеске технологического модуля) состоит в подборе значений коэффициентов окружной и продольной жесткости и демпфирования шин таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение условия минимизации колебаний крутящих моментов на полуосях модуля и трактора, и колебаний горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора.

Оптимальные значения коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес трактора  $C_{8.11}$  составляет 150000 Н/рад, коэффициент демпфирования шины ведущих колес трактора не имеет явно выраженного оптимума. Значения коэффициента  $C_{8.11}$  соответствует характеристике шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,1 МПа.

Оптимальные значения коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес технологического модуля  $C_{9.12}$  составляет 120000 Нм/рад и коэффициента продольной деформации шины ведущих колес технологического модуля составляет 180000 Н/рад, коэффициенты демпфирования шины ведущих колес технологического модуля не имеют явно выраженных оптимумов. Значения коэффициентов соответствуют характеристикам шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,08 МПа.

3. Исследование разработанной математической модели МТА на базе трактора с технологическим модулем позволило спрогнозировать спектральные плотности процессов нагружения навески трактора и технологического модуля, которые показали, что применение технологического модуля с оптимальными коэффициентами жесткости и демпфирования шин ведущих колес технологического модуля позволяет значительно снизить амплитуду колебаний усилий на навеске трактора в среднем в 3...4 раза и сместить их частотный диапазон в более низкий от 0 до 2,5 Гц. При этом спектральная плотность усилия на навеске трактора, соответствующая режиму работы трактора без технологического модуля находится



в более высоком частотном диапазоне.

4. Для установления взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель было проведено имитационное моделирование в программе Simulink среды Matlab с использованием разработанной математической модели МТА на базе трактора с технологическим модулем. Структурная схема электронной модели в программе Simulink включает блоки вращательного и поступательного движения, блок действительной скорости, блок взаимодействия с опорной поверхностью и блок внешней нагрузки, а также механизм переключения передач.

5. Предложенная методика определения веса трактора тягово-энергетической концепции показывает, что необходимая масса технологического модуля для перехода в верхний тяговый класс на 5...11% ниже массы балласта. Таким образом применение технологического модуля вместо балластирования тракторов тягово-энергетической концепции при переходе в верхний тяговый класс позволит уменьшить общий вес трактора с технологическим модулем и тем самым снизить потери на сопротивление качению на 5-11%. Если учитывать, что масса технологического модуля складывается из массы самого технологического модуля и части массы сельскохозяйственной машины, установленной на технологическом модуле, то потери на сопротивление качению всего МТА на базе трактора с технологическим модулем будут значительно меньше чем у МТА на базе трактора с балластами.

6. Предложенная методика определения мощности двигателя энергонасыщенного трактора и веса технологического модуля позволила повысить точность определения массы технологического модуля и эксплуатационной мощности двигателя при переходе трактора из одного тягового класса в более высокий тяговый класс до 10%. Для достижения МТА на базе трактора с технологическим модулем скорости 2,5...2,7 м/с при номинальной силе тяги на крюке, необходимо, чтобы энергонасыщенность трактора, к которому подсоединяется технологический модуль, была увеличена с 1,59...1,65 до 2,0...2,41 кВт/кН.

### **3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

#### **3.1 Программа и задачи экспериментальных исследований**

Программа экспериментальных исследований включает: проведение лабораторно-полевых исследований МТЗ-82 с технологическим модулем и тяжелой бороной БДТ-7 и проведение сравнительных полевых испытаний на вспашке МТЗ-82 с плугом ПЛН-3-35 и МТЗ-82 с технологическим модулем и плугом ПЛН-4-35.

В соответствии с программой исследований было предусмотрено решение следующих задач:

- оборудование объектов исследования датчиками измерения и их тарировка;
- создание измерительного комплекса для непрерывной регистрации исследуемых процессов на ноутбук в масштабе реального времени, оснащение им трактора без и с технологическим модулем;
- проведение лабораторно-полевых и сравнительных полевых испытаний;
- обработка экспериментального материала, оценка погрешности измерений и анализ опытных данных;
- установление закономерностей изменения динамических процессов МТА на базе трактора с технологическим модулем в эксплуатационных условиях;
- экспериментальная проверка результатов математического моделирования;
- оценка влияния упругодемпфирующих свойств технологического модуля на стабилизацию внешней нагрузки на МТА на базе трактора с технологическим модулем.

#### **3.2 Методика лабораторно-полевых испытаний**

Лабораторно-полевые испытания проводились на стерне колосовых на полях сельхозартели «Колхоз Маяк» Калужской области (тип почвы суглинок). При

проведении испытаний руководствовались требованиями, предусмотренными в стандартах (ГОСТ 24055-80, ГОСТ 24057-80). Для исключения субъективных погрешностей опыты проводились одной группой исполнителей.

При проведении лабораторно-полевых испытаний одновременно с регистрацией процессов на ноутбук, велся протокол испытаний, в который заносились: вид операции, время опыта, номер передачи, почвенный фон, атмосферные условия и др.

На каждом участке определялась плотность почвы согласно ГОСТу 7057-81. Для определения влажности и объемного веса почвы и грунта на каждом участке брались пробы в слоях на глубине 0-5, 5-10 и 10-15 см, согласно ГОСТу 20915-75. Атмосферные условия (температура окружающего воздуха, барометрическое давление и влажность) в период проведения зачетных опытов фиксировалось по данным ближайшей метеостанции.

Длина рабочего гона, где непосредственно регистрировались параметры работы агрегата, была выбрана с таким расчетом, чтобы на различных скоростных и нагрузочных режимах время регистрации процессов на ноутбук была не меньше 120 секунд с частотой 2000 Гц.

В течение опытов непрерывно и синхронно записывались на ноутбук следующие параметры МТА на основе трактора с технологическим модулем:

- пройденный МТА путь  $S$ , по числу оборотов  $n_n^s$  пятого колеса;
- тяговые усилия, действующее на нижнюю ось  $P_{кр}^2$  механизма навески энергетического и на нижнюю ось  $P_{кр..м}^2$  механизма технологического модуля в горизонтальной плоскости, кН;
- крутящие моменты на правом  $M_{вед}^{np}$  и левом  $M_{вед}^{лев}$  задних колесах и на правом  $M_m^{np}$  и левом  $M_m^{лев}$  колесах технологического модуля, Нм;

- числа оборотов правого  $n_{вед}^{np}$  и левого  $n_{вед}^{лев}$  задних, правого  $n_n^{np}$  и левого  $n_n^{лев}$  передних колес энергетического, правого  $n_m^{np}$  и левого  $n_m^{лев}$  колес технологического модулей.

При этом одновременно записывались следующие параметры двигателя:

- число оборотов коленчатого вала двигателя  $n_0$ ;
- крутящий момент двигателя  $M_{дв}$ ;
- объемный расход топлива  $Q_m$ , мл.

Перед началом каждого опыта проводилась подготовка МТА и настройка измерительной аппаратуры. Запись исследуемых процессов на ноутбук начиналась с момента трогания МТА, при выполнении технологической операции и заканчивалась при полной его остановке. Перед и после записи рабочего процесса проводилась проверка нулевых и контрольных отметок и подготовка к следующему опыту.

### 3.3 Измерительное оборудование и погрешность измерений

Разработана усовершенствованная система регистрации параметров МТА на базе энергетического модуля с технологическим модулем и с сельскохозяйственным орудием. Система имеет следующие основные составляющие:

- аналогово-цифровой преобразователь;
- конечное устройство регистрации данных;
- источники и преобразователи напряжения;
- индукционные датчики;
- тензодатчики;
- датчик расхода топлива;
- интерфейсы передачи данных.

Разработанный измерительный комплекс позволял вести запись в цифровой форме на конечное устройство в режиме реального времени без предварительной аналоговой фильтрации с высокой частотой дискретизации, достигающей 2000 Гц,

что повышает эффективность последующей обработки данных. Обоснование применения разработанного измерительного комплекса заключается в необходимости фильтрации данных на этапе обработки, а не на этапе записи. Это позволяет более детально исследовать все частотные составляющие сигнала и проводить статистический анализ, исходя из условия решаемой задачи.

Для регистрации данных, поступающих от датчиков использовался аналогово-цифровой преобразователь фирмы National Instruments, представляющий собой блочно-модульную систему с несущим шасси DAQ-9172 (рисунок 3.1) с восемью слотами для модулей цифрового ввода-вывода NI 9401, подключения датчиков различных типов NI 9219, подключения тензодатчиков NI 9237 и 25-тиконтактного блока NI 9934, а также USB-разъёмом для подключения к ноутбуку.

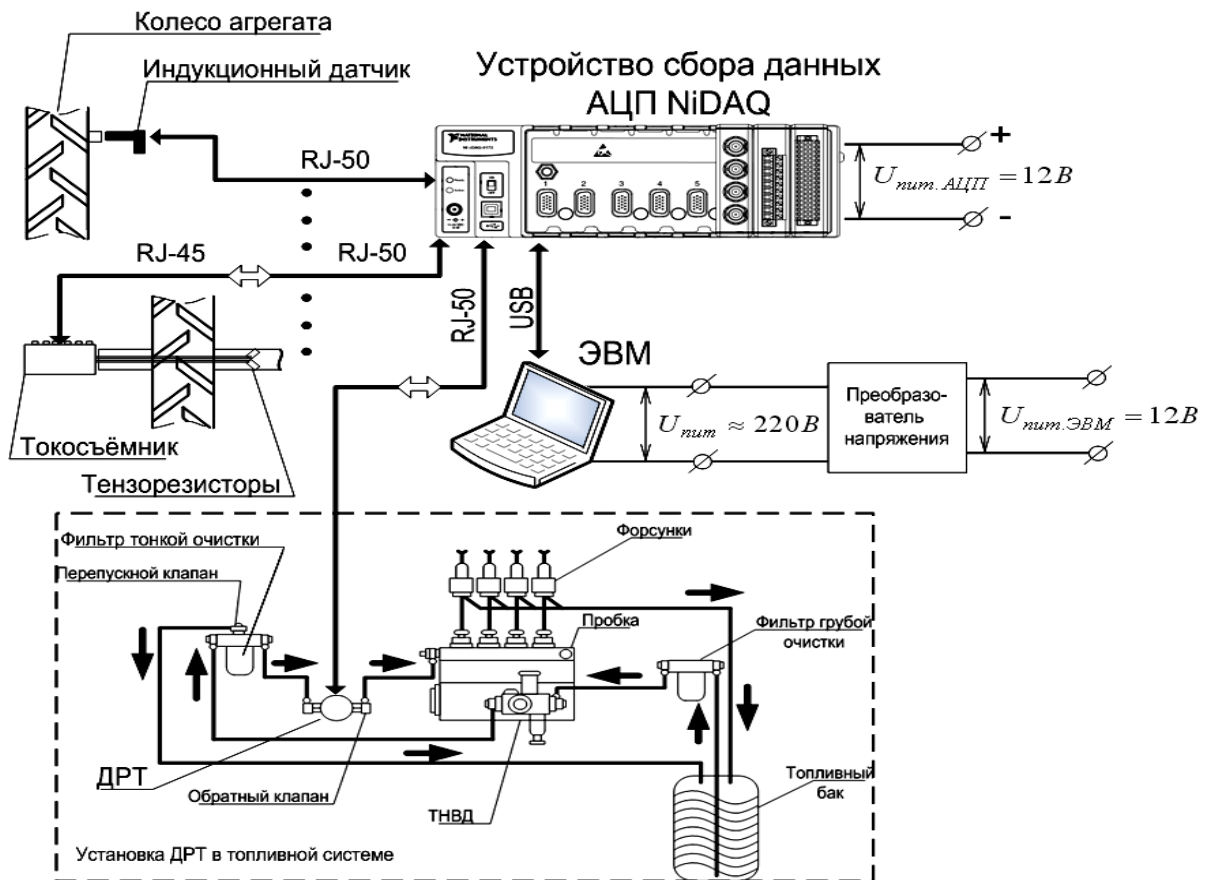


Рисунок 3.1 - Функциональная схема измерительного комплекса

Основными параметрами АЦП являются разрешение, зависящее от разрядности и определяющее минимальное фиксируемое изменение значения аналогового сигнала, а также частота дискретизации. Шасси DAQ-9172 имеет разрядность 24 бит, а разрешение составляет 0.0000596 мВ при диапазоне входного сигнала  $\pm 0.5$  В. Для бортовых устройств МТА крайне важен предел ударных нагрузок, который для DAQ-9172 составляет 30g. Шасси DAQ-9172 поддерживает горячую замену и автоматическое распознавание модулей ввода/вывода. Подключение сигналов и датчиков осуществляется напрямую к модулям. К ПЭВМ шасси подключается в режиме plug-and-play. Шасси питается от постоянного напряжения 12 В.

Общая схема включения датчиков измерительной системы представлена на рисунок 3.2.

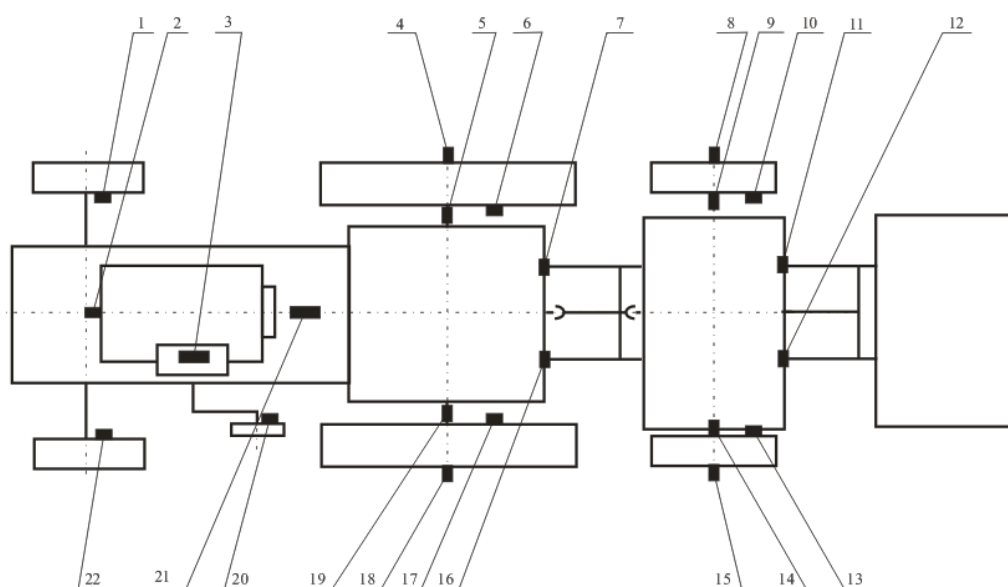


Рисунок 3.2 - Общая схема расположения элементов измерительной системы на машинно-тракторном агрегате: 9, 14, 5, 19 - тензодатчики на ведущих полуосях технологического модуля и трактора; 21 - тензодатчики на валу муфты сцепления; 7, 11, 12, 16 – тензодатчики на нижних осях навесок технологического модуля и трактора; 2, 13, 10, 6, 17, 1, 20, 22 – индукционные датчики числа оборотов коленчатого вала, левого и правого колес технологического модуля, левого и правого задних, левого и правого передних колес трактора, «пятого» колеса; 3 - расходомер топлива; 4, 8, 15, 18 - концевые токосъемники.

Для измерений исследуемых тяговых усилий и крутящих моментов были применены проволочные тензодатчики типа 2ПКБ-30-200ГБ. Для наклейки тензодатчиков применялся клей на основе цианакрилата. Для защиты от механических повреждений, влагозащиты и защиты от нефтепродуктов датчики обматывались киперной лентой, которая пропитывалась нитрокраской.

Измерение тяговых сопротивлений энергетического и технологического модулей производилось путем замера продольных сил, параллельных направлению движения, действующих на нижнюю ось навесных устройств (рисунок 3.2).

При этом оценка усилий, действующих на нижнюю ось навески, осуществлялась замером деформаций от изгибающих моментов на оси в горизонтальной плоскости. Для этой цели на оси делались проточки, на которых выполнялись площадки в вертикальной плоскости для наклейки проволочных резисторов. Наклейка последних позволила измерить составляющую усилия, которым нагружены нижние тяги навески, в горизонтальной плоскости, независимо от угла наклона тяг к плоскости пути. Для исключения ошибки от изменения точки приложения силы, через тяги нагружающую нижнюю ось, применялась дифференциальная схема соединения тензодатчиков. Схема расположения тензодатчиков и соединения их в измерительную схему, приведена на рисунке 3.3.

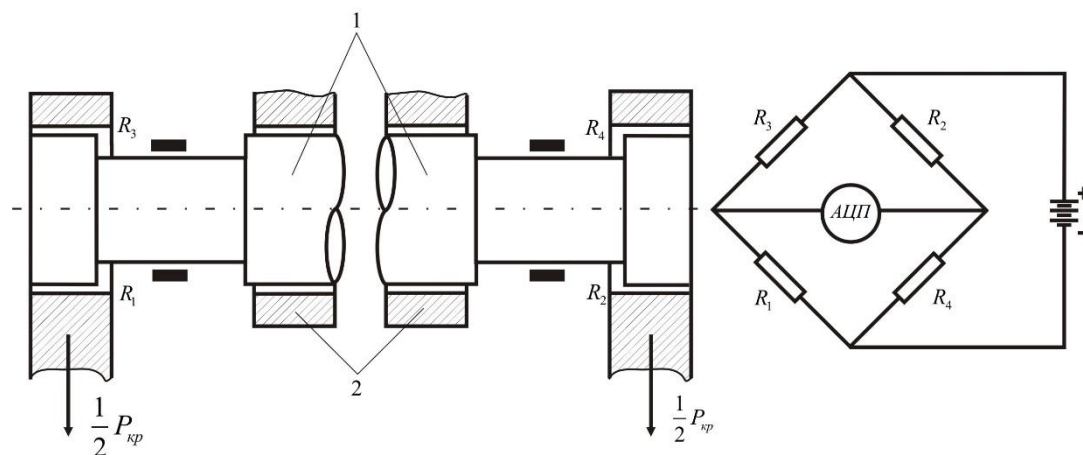


Рисунок 3.3 - Схема расположения тензодатчиков и соединения их в измерительную схему для записи горизонтальной составляющей тягового усилия на нижней оси навески

Для замера момента сопротивления на входе в двигатель тензодатчики наклеивались на валу муфты сцепления, под углом  $45^{\circ}$  к оси вала и соединялись в мостовую схему (рисунок 3.4). Такая схема наклейки автоматически компенсирует влияние изгибаемых моментов и осевых сил на результат измерения. Для осуществления непрерывного токосъема применялся ртутно-амальгамированный проходной токосъемник, обеспечивающий надежную работу при высоких угловых скоростях.

Измерение крутящих моментов на задних ведущих колесах трактора и технологического модуля производилось тензодатчиками, наклеенными на их полуосях и соединенные в мостовые схемы. Для осуществления непрерывного токосъема применялись ртутно-амальгамированные концевые токосъемники ТРАК-12.

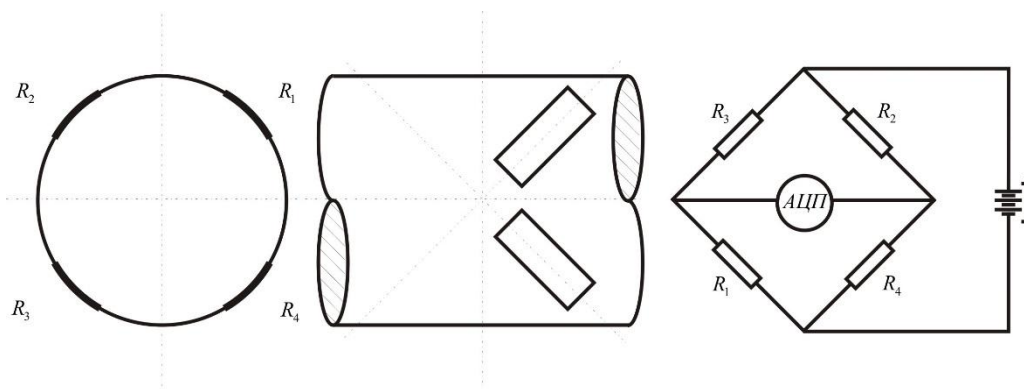


Рисунок 3.48 - Схема наклейки тензодатчиков и соединения их в измерительную схему для замера крутящего момента.

1,2- тензодатчики, 3- АЦП, 4- источник постоянного напряжения.

Для замера количества израсходованного топлива за время опыта применялся расходомер дизельного топлива роторно-импульсного типа ДРТ-5, который включался в топливоподводящую магистраль на участке между подкачивающей помпой и фильтром грубой очистки топлива [140]. Роторно-импульсный расходомер позволяет регистрировать расход топлива с дискретностью 5 грамм и погрешностью менее 1%.

Датчики подключаются к модулям шасси в соответствии с предназначением конкретного модуля согласно технической документации. NI 9219, универсальный модуль аналогового ввода для подключения термисторов, термопар, тензодатчики, работающих через токосъёмники и т.п., имеющий восемь каналов раз-



рядностью 24 бит и частотой записи до 100 кГц на канал, использовался для подключения тензодатчиков. NI 9401, модуль с восемью каналами цифрового ввода/вывода, частотой записи до 10МГц использовался для подключения индукционных датчиков и ДРТ-5.

Для записи числа оборотов путеизмерительного колеса, ведущих колес трактора и технологического модуля использовались индукционные датчики bosch, установленные на неподвижных элементах конструкции с зазором 2-3 мм между ними и металлическими выступающими деталями на диске колеса. При вращении колеса металлические выступающие детали на диске колеса проходят мимо индукционного датчика, в котором наводится ЭДС индукции, регистрируемая на ноутбуке в виде остrokонечных пиков. Количество пиков равно числу магнитов, пройденных возле индукционных датчиков. Для соединения индукционных датчиков использовалась прямая схема включения.

Для функционирования АЦП требуется программное обеспечение, которое позволяет не только получить необходимые данные, но и произвести их обработку и сохранение для последующего анализа. Программная часть представляет собой комплекс LabView 8.5. Он позволяет записывать данные с учетом тарировки датчиков, при записи перед экспериментом вводить поправки по разбалансировке мостовых схем, основываясь на сигналах от индукционных датчиков не только получать количество импульсов, но и выводить текущее значение данной физической величины, управлять записью данных во время эксперимента [141].

Проект в программном комплексе LabView представляет собой «виртуальный прибор», состоящий из двух частей: блочная диаграмма и лицевая панель (интерфейс). Первая является, по сути, визуальным программным кодом на языке G, в этом она схожа с программами на языке Simulink пакета Matlab. Вторая является интерфейсом программы, который содержит средства ввод/вывода на экран, управляющие элементы и прочее. Принцип визуального программирования является весьма удобным и мощным средством разработки приложений, а динамический вывод результатов предоставляет мощное средство по контролю за вирту-

альными приборами. При этом графический язык программирования содержит все необходимые конструкции традиционных языков, такие как циклы, блоки условного исполнения, переменные, типы данных, последовательности, средства обработки ошибок и прочие. Тем не менее, главной особенностью комплекса LabView является возможность программирования DAQ-устройств, то есть устройств сбора данных, и других аппаратных средств, имеющих интерфейсы GPIB, VXI, PXI, RS-232 и RS-485. Помимо прочего компилятор LabView способен создавать не только автономные модули (.exe), но и совместно используемые динамические библиотеки (.dll), что обеспечивает принцип повторного использования кода.

На рисунке 3.5 представлен интерфейс измерительного комплекса для МТА. Интерфейс содержит кнопки управления выводом сигнала на дисплей, окна вывода количества оборотов колёс трактора и технологического модуля, входящего в МТА, количества импульсов расходомера, кнопку сброса вывода сигнала, аннотации, панель вывода данных в файл, панель управления параметрами осей дисплея и кнопку управления записью.

Блочная диаграмма содержит следующие основные элементы: помощник настройки устройства сбора данных (в данном случае таким устройством является АЦП), который позволяет конфигурировать каналы сбора данных; логические элементы; реле; усилители; вычислительные элементы (например, блок оценки математического ожидания); блоки условного выполнения; блок управления выводом в файл и прочие.

На рисунке 3.6 показан фрагмент блочной диаграммы - расходомер. Данный фрагмент фиксирует поступающие импульсы, если они превосходят заданный порог. Математический блок выполняет функцию подсчёта оборотов путём деления числа зафиксированных импульсов на количество металлических выступающих деталей на диске.

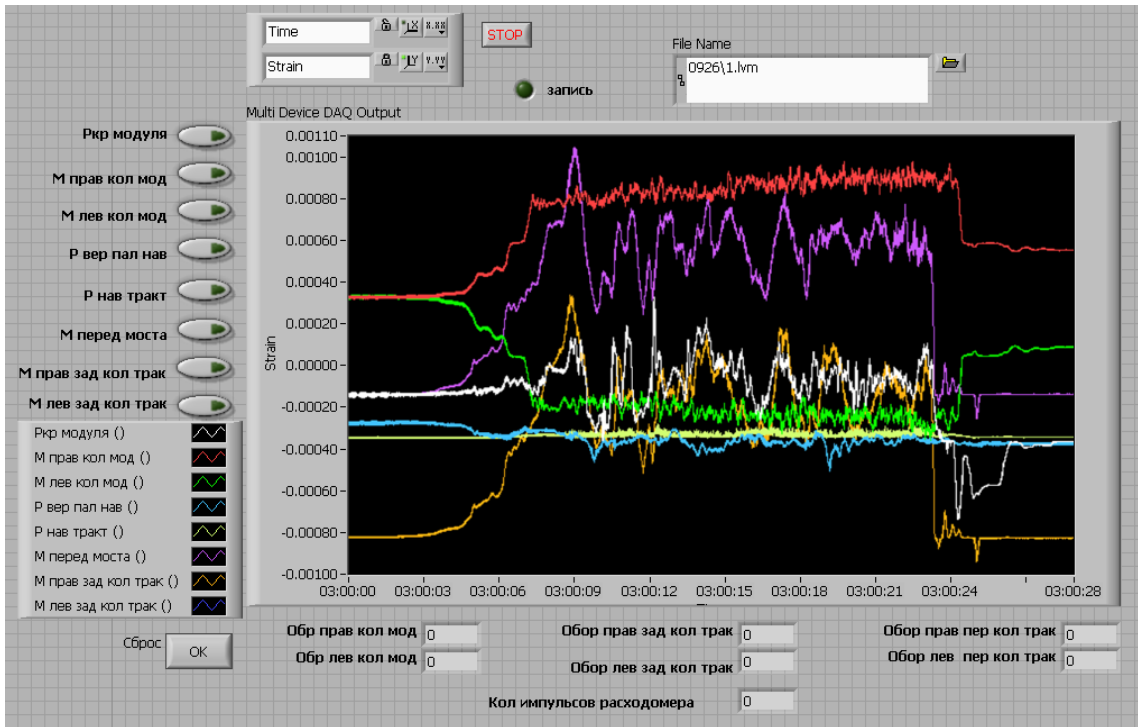


Рисунок 3.5 - Интерфейс измерительного комплекса для МТА

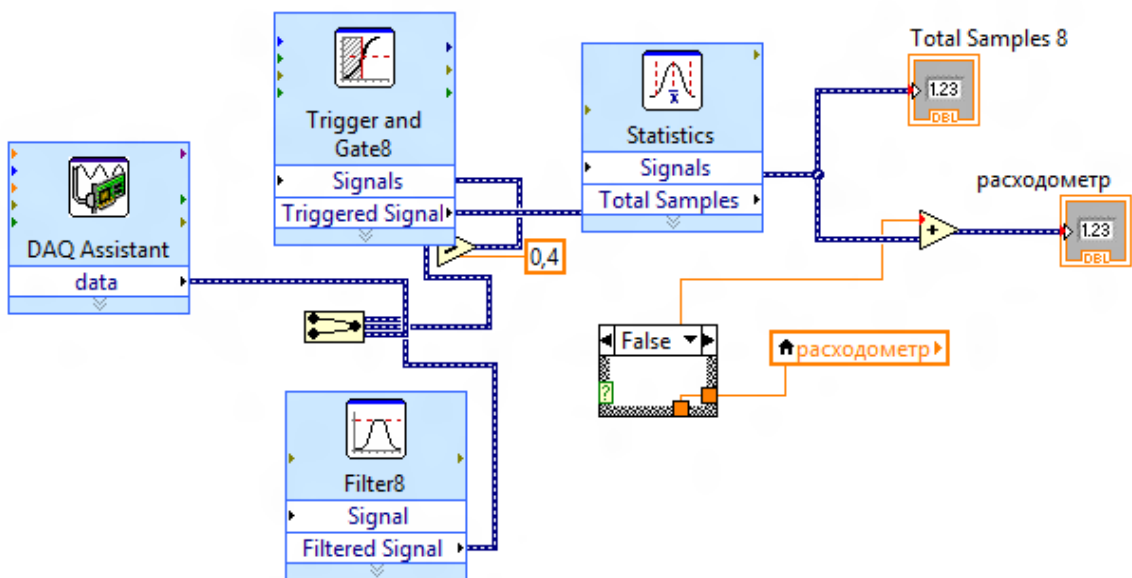


Рисунок 3.6 - Фрагмент блочной диаграммы «Расходомер»

На рисунке 3.7 показан фрагмент блочной диаграммы, который предназначен для измерения импульсов от тензодатчика пятого колеса трактора и подсчета усилия сельхоз. машины путем несложных математических преобразований.

Разработанная измерительная комплекс обладает высокой точностью и надёжностью, обеспеченной свойствами как первичных преобразователей, так и

устройства сбора данных и конечных устройств (ЭВМ), использование её при полевых испытаниях МТА позволяет записывать данные высокой разрядности и в удобном для последующей обработки цифровом виде, в данном случае нет необходимости в ручной обработке записанных осциллограмм, анализ и оценка статистических характеристик может быть проведена автоматизированными вычислительными средствами.

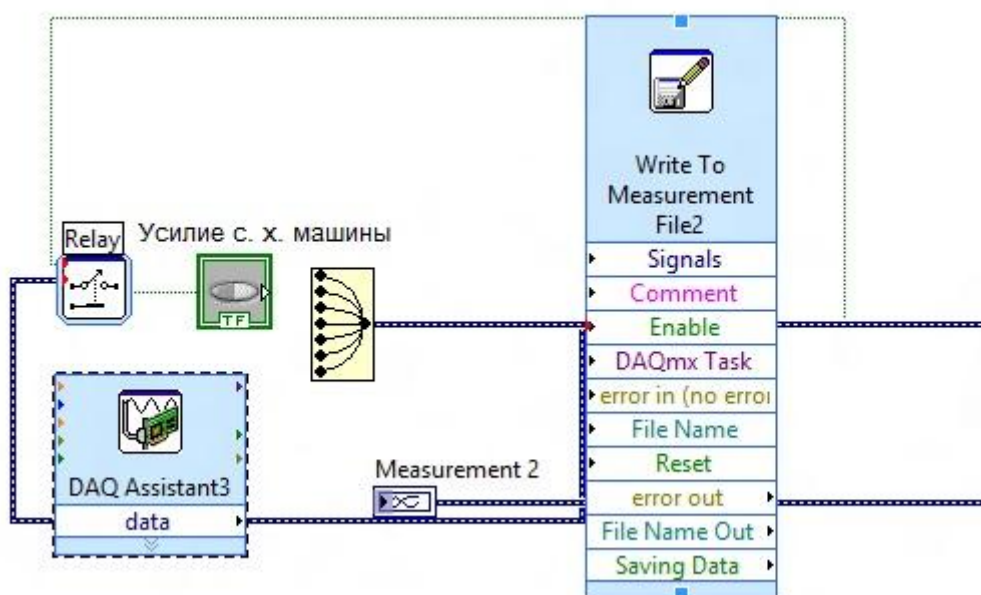


Рисунок 3.7 - Фрагмент блочной диаграммы  
«Усилие сельскохозяйственной машины»

Тарировка и контроль функционирования аппаратуры производились перед проведением и после окончания опытов. Тарировка тензометрических узлов проводилась натурная в диапазоне от нуля до значения превышающего максимальное значение измеряемого параметра не менее чем на 10...20%, при ступенчатом трехкратном цикле нагружения и разгрузки с записью на ноутбук. Полный цикл тарировки состоял из 5...10 равномерно расположенных в диапазоне измерения ступеней, задаваемых в порядке возрастания и убывания.

Тензометрические полуоси тарировались путем создания нагрузки гидравлическим домкратом, которая контролировалась образцовым динамометром сжатия ДОСМ-1,5 с индикаторной головкой ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм.

Тарировка оси навески трактора проводилась непосредственно на тракторе путем создания усилий в нижних продольных тягах механизма навески гидравлическим домкратом, которая контролировалась образцовым динамометром сжатия ДОСМ-1,5 с индикаторной головкой ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм при одновременной записи сигнала на ноутбук.

Тарировка расходомера осуществлялась объемным способом путем долива топлива при помощи мерной мензурки объемом 500 мл.

Определение масштаба импульса путеизмерительного колеса и ведущих колес трактора производилась прохождением предварительного замеренного пути при холостом ходе агрегата до и после опытов на скоростных режимах, соответствующих его работе в процессе выполнения технологических операций.

По результатам тарировки, используя метод наименьших квадратов, определялись текущие значения отдельного тарировочного коэффициента  $\mu_i$  для каждого измеряемого параметра.

Точность измерения исследуемых процессов оценивалась по величине погрешностей, возникающих при тарировке измерительных каналов. Тарировка измерительных каналов проводилась два раза до и после испытаний МТА. Точность полученных экспериментальных данных определялась ошибкой непосредственных измерений и ошибкой последующей обработки полученных результатов.

Методиками испытаний предусмотрена минимум трехкратная повторность опытов, а в случае значительного отклонения непосредственно замеряемых величин от среднего уровня проводились дополнительные опыты. Результаты замеров дают не истинное, а приближенное значение вследствие погрешностей из-за несовершенства измерительных приборов и влияния на них различных факторов. Исходя из этого, принято оценку точности результатов опытов проводить по погрешностям.

При обработке реализаций определяли общую погрешность результатов измерений:

$$\delta_p = \delta_u + \delta_o + \delta_m \quad (3.1)$$

где  $\delta_u$  - погрешность измерительной тензометрической аппаратуры;

$\delta_m$  - погрешность тарировки.

Погрешность тензометрической аппаратуры:

$$\delta_u = \frac{\Delta h_{\text{сист}} + a \cdot \Delta h_{\text{случ}}}{h_{\text{ср}}} \quad (3.2)$$

где  $\Delta h_{\text{сист}}$  - систематическая погрешность измерения;

$\Delta h_{\text{случ}}$  – случайная погрешность;

$a$  - постоянный коэффициент (при доверительной вероятности  $P=0,95$   $a=2$ ).

Систематическая погрешность измерения:

$$\Delta h_{\text{сист}} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \Delta h_{i1} \quad (3.3)$$

Случайная погрешность измерения:

$$\Delta h_{\text{случ}} = \left[ (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n \Delta h_{i2} \right]^{0,5} \quad (3.4)$$

Погрешность тарировки:

$$\delta_m = \frac{1}{n_c} \left( \sum_{i=1}^n \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{h_c} + \sum_{i=1}^n \frac{h_c k_m - Y_c}{Y_{\text{max}}} \right) * 100 \quad (3.5)$$

где  $n_c$  - число ступеней нагрузки;

$k_m$  - масштаб записи;

$k_c$  - численное значение ординаты одной ступени измеряемого параметра;

$Y_c$  - абсолютное значение измеряемой величины на данной ступени.

Случайная погрешность измерений других параметров оценивалась на основе положений математической статистики и теории ошибок. При массовых замерах одной величины оценку ее значения дают по среднему арифметическому, а ошибку опыта определяют средним квадратическим отклонением (стандартом). Известно, что распределение ошибок близко к нормальному закону, а максималь-

ная погрешность равна трем стандартам. Исходя из этого, с некоторыми допущениями, можно принять стандарт в единичном опыте равным одной трети предельной ошибки.

При расчетах относительной ошибки использовали формулу коэффициента вариаций или следующее выражение погрешности результатов:

$$v = \frac{\Delta i}{3} * 100\% \quad (3.6)$$

где  $\Delta i$  - предельная ошибка,  $i$  -той замеряемой величины определения погрешности производительности агрегата.

Результаты расчетов вероятностей относительной ошибки определяемых величин представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Погрешности основных параметров в результате испытаний

Параметры	Обозначения	Относительная ошибка измерения, %	Вероятностно относительная ошибка %
Тяговое усилие	$P_{кр}$	4,9	1,63
Момент на ведущих колесах	$M_k$	4,6	1,53
Момент на валу муфты сцепления	$M_c$	4,6	1,53
Число оборотов пятого колеса	$n$	4,3	1,43
Частота вращения ведущих колес	$n_k$	3,9	1,3
Расход топлива двигателем	$G_T$	4,9	1,63

### 3.4 Программа и методика проведения полевых сравнительных испытаний

С целью сравнения технико-экономических показателей трактора с технологическим модулем и трактора аналога были проведены сравнительные испытания согласно с ГОСТ 24055-88. Испытания были осуществлены на основной энергоёмкой технологической операции: отвальной вспашке с плугами ПЛН-3-35 и ПЛН-4-35 МЭС на базе трактора МТЗ-82 на полях Брянской ГСХА на стерне колосовых текущего года.

Сравнительные опыты проводились на одном поле, с сохранением настройки орудий. Поле подготавливалось к испытаниям, для чего проводилась разбивка поля на загоны и отбивка поворотных полос. При проведении зачетных опытов регистрировалось глубина обработки почвы, в соответствии с ГОСТом 20915-75 брались пробы грунта на анализы и определялась плотность почвы согласно ГОСТу 7057-81.

Дополнительно измерялось время проведения опыта с помощью секундомера с погрешностью не более 1%. Расход топлива определялся объемным способом с использованием объемного расходомера топлива.

Данные испытаний заносились в протокол испытаний. В нем регистрировались: метеорологические условия, результаты хронометрирования, пройденный путь и расход топлива.

### 3.5 Методика обработки результатов исследований

Основной задачей обработки экспериментальных данных является выделение и подготовка необходимой информации для дальнейшего анализа. Это установление законов распределения параметров и проведение корреляционного и спектрального анализа. Основным материалом для обработки экспериментальных данных являются файлы с непрерывной записью исследуемых показателей, полученных при лабораторно-полевых испытаниях.

Длина реализации при обработке выбиралась с целью обеспечения стационарности и эргодичности процесса, то есть, чтобы  $\bar{m}_x = const$ ,  $D_x = const$  и  $R_x = inv$ . Учитывая опыт подобных исследований на технологических операциях длина была выбрана 50-100 секунд. Частота верхней гармоники процесса принимаемая в расчет, для МТА при анализе тяговой нагрузки составляет 20-22 Гц.



При этом объем выборки составлял 100000 точек с шагом квантования  $\Delta t = 0,0005$  с. Реализации обрабатывались методом ординат. Мгновенные значения измеряемых показателей находились по зависимости

$$x_i = \mu_{cp} h_{zi}, i = 1, 2, 3 \dots 100000 \quad (3.7)$$

где  $\mu_{cp}$  - коэффициент масштаба записи параметров, определяемой по тарифовочному графику;

$h_{zi}$  - величина ординаты показателя по реализации.

В соответствии с основными задачами работы в качестве основных числовых характеристик, которые использовались при анализе случайных процессов, были выбраны математические ожидания, дисперсия, стандарт, коэффициент вариации, корреляционная функция, спектральная плотность и распределение случайных величин.

Среднее значение случайной величины (оценка математического ожидания) определялась по формуле

$$\bar{m}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.8)$$

где  $x_i$  - текущая ордината реализации;  $N$  - объем числовых массивов.

Дисперсия случайной величины или оценка центрального момента второго порядка определялась по выражению

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{m}_x)^2 \quad (3.9)$$

Среднеквадратическое отклонение или стандарт случайной величины

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} \quad (3.10)$$

Коэффициент вариации случайной величины

$$v_x = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (3.11)$$

Корреляционная функция

$$R_x(\tau) = (N - m) \sum_{k=1}^{N-m} x_k x_{k+m} \quad (3.12)$$

Спектральная плотность определялась обратным преобразованием Фурье корреляционной функции:

$$S_x(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\tau_{max}} R_x(\tau) f(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (3.13)$$

где  $m=0,1,2,\dots$  - число, определяющее величину сдвига до оси абсцисс;

$x_k$  - текущая центрированная ордината реализации процесса в момент времени  $t_k$ ;

$x_{k+m}$  - центрированная ордината процесса в момент времени  $t_{k+m}$ .

Буксование:

$$\delta = \frac{n_p - n_x}{n_p} * 100\% \quad (3.14)$$

где  $n_x$  - число оборотов колес при холостом заезде на поверхности без нагрузки на крюке;

$n_p$  - число оборотов колес при рабочем заезде (длина зачетного гона в обоих случаях была одинаковой).

Чистая производительность, то есть техническая производительность за 1 час работы без учета затрат времени на повороты и остановки, определялась по формуле

$$W_m = 0,36BV_0 \quad (3.15)$$

где  $B$  - рабочая ширина захвата, м;

$V_0$  - скорость МТА, м/с.

Погектарный расход топлива определялся:

$$g_w = \frac{G_m}{W_m} \quad (3.16)$$

где  $G_m$  - часовой расход топлива, кг/ч.

### 3.7 Выводы

1. Для исследования эффективности применения технологического модуля с упругодемпфирующими свойствами проводились лабораторно-полевые испытания МТА при выполнении боронования с тяжелой дисковой бороной БДТ-7. В процессе испытаний комплекс АЦП регистрировал следующие показатели: крутящие моменты на валу муфты сцепления, левого и правого колес заднего моста трактора и технологического модуля; число оборотов колес трактора и технологического модуля и пятого колеса; тяговое усилие на навеске трактора и технологического модуля; расход топлива; продолжительность опыта. Предварительно измерительное оборудование тарировалось.

2. Разработан измерительный комплекс регистрации данных при проведении лабораторно-полевых испытаний МТА на базе энергетического модуля с технологическим модулем и с сельскохозяйственным орудием, позволяющий вести запись в цифровой форме и на конечное устройство в режиме реального времени с высокими частотами дискретизации, достигающими 2000 Гц без предварительной аналоговой фильтрации, что позволяет более детально исследовать все частотные составляющие сигналов.

3. Проведены оценки измеряемых параметров, на основании описанной методики в разделе 3.4 выявлено, что относительные ошибки измерения не превышают 5%.

4. С целью сравнения технико-экономических показателей МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и МТА на базе трактора МТЗ-82 без технологического модуля были проведены сравнительные полевые испытания МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и плугом ПЛН-4-35 и на базе трактора МТЗ-82 с плугом ПЛН-3-35.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Определение влияния упругодемпфирующих свойств технологического модуля на стабилизацию момента сопротивления на входе в двигатель

Для исследований влияния упругодемпфирующих свойств технологического модуля на стабилизацию момента сопротивления на входе в двигатель трактора с учетом модели МТА с технологическим модулем (2.6) была использована среда Simulink.

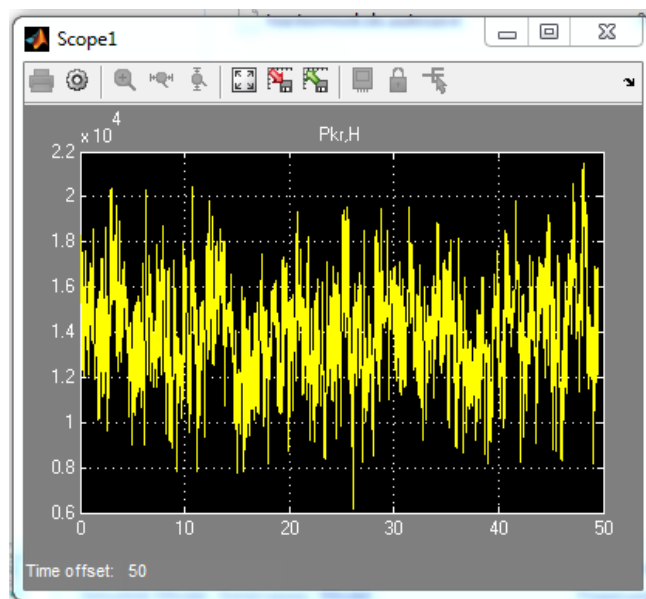
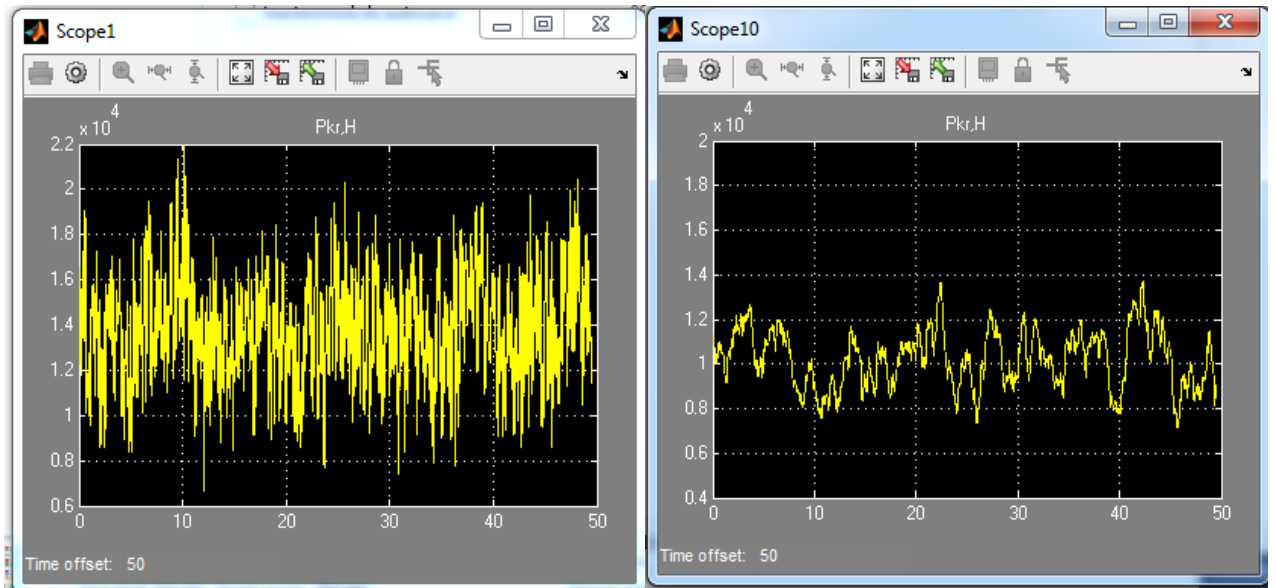


Рисунок 4.1 - Результаты моделирования тягового усилия трактора при выполнении МТА технологической операции дискование

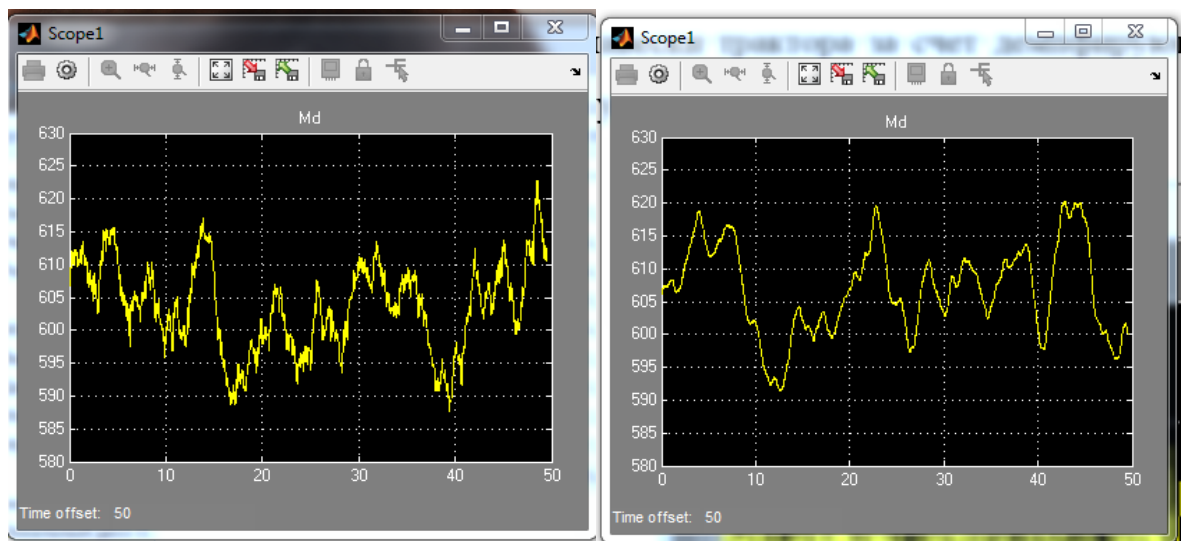
Анализ результатов моделирования работы МТА с тяжелой дисковой бороной БДТ-7 позволяет сделать следующие выводы. При одинаковых входных воздействиях со стороны орудия в виде случайного сигнала, на тракторе с технологическим модулем наблюдается сглаживание высокочастотных колебаний на навески трактора за счет упругодемпфирующих свойств технологического модуля (рисунки 4.2).



а

б

Рисунок 4.2 - Результаты моделирования работы трактора МТЗ-82 с технологическим модулем при выполнении МТА технологической операции дискование: а – сопротивление орудия; б – тяговое усилие трактора



а

б

Рисунок 4.3 - Результаты моделирования момента сопротивления на входе в двигатель трактора МТЗ-82 в составе МТА при выполнении технологической операции дискование: а – без технологического модуля; б – с технологическим модулем

В результате упругодемпфирующих свойств технологического модуля происходит сглаживание высокочастотных колебаний момента сопротивления на входе в двигатель (рисунок 4.3 б) в сравнении с трактором без технологического модуля (рисунок 4.3 а).

Максимальные значения спектральной плотности (энергии) момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем (рис. 4.4) при частотах 0...0,25 Гц в 3 раза меньше чем процесса момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем снижается и для других частот и практически имеет небольшую энергию по сравнению с спектральной плотностью момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Это говорит о стабилизации момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем и подтверждает гипотезу о наличии упругодемпфирующих свойств технологического модуля.

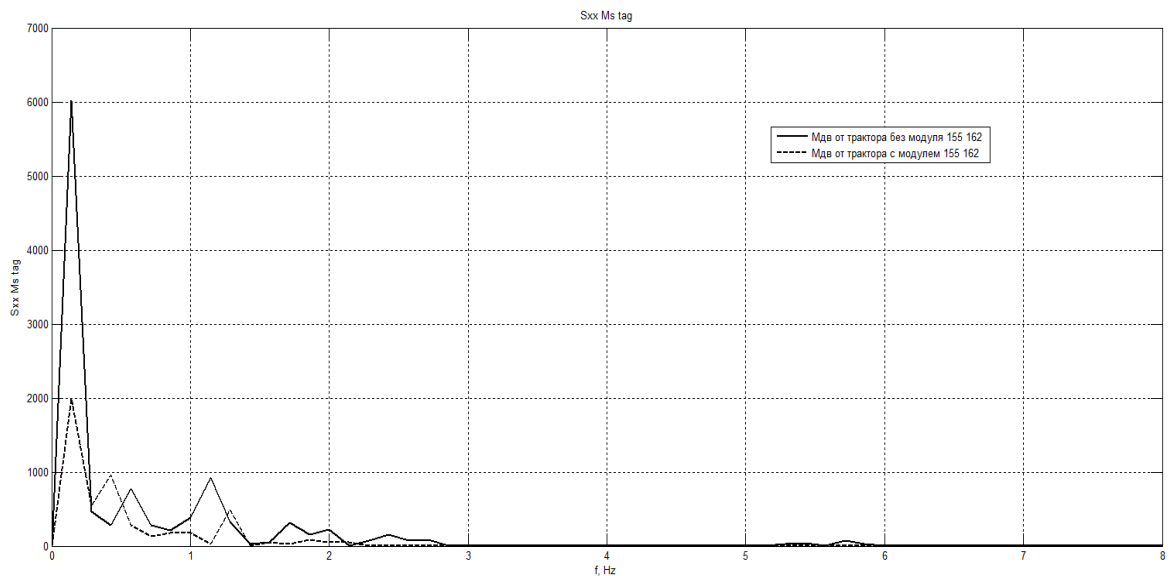


Рисунок 4.4 - Нормированные оценки спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель по результатам моделирования работы трактора МТЗ-82 при выполнении МТА технологической операции дискование:

————— - без технологического модуля;  
 - - - - - с технологическим модулем.

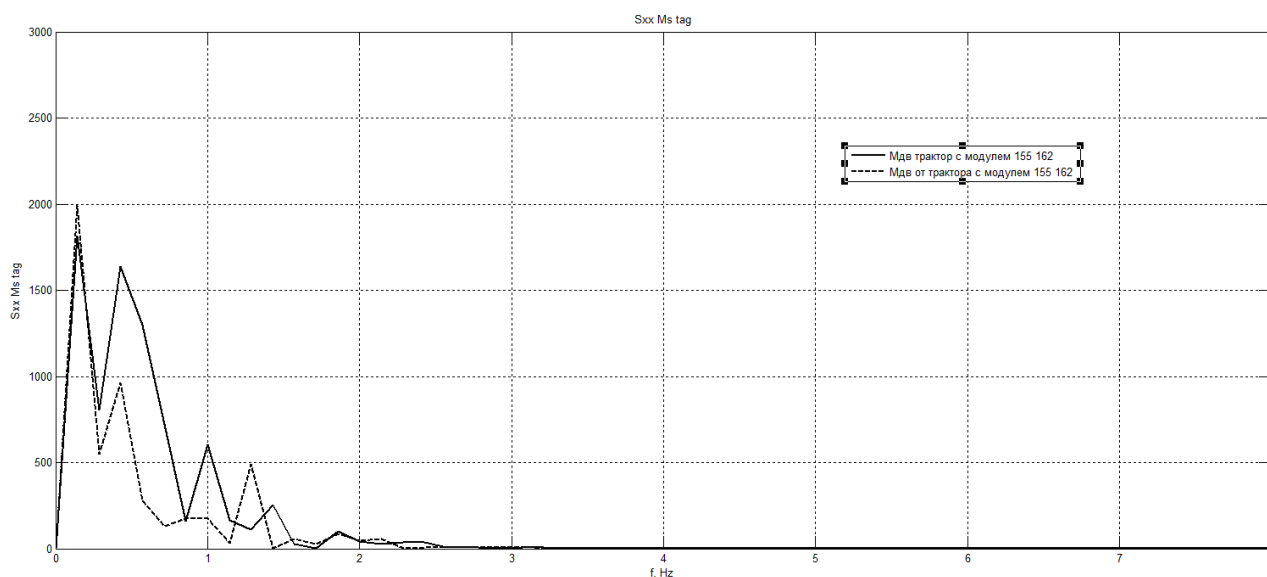


Рисунок 4.5 - Нормированные оценки спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора МТЗ-82 с технологическим модулем при выполнении МТА технологической операции дискование (БДТ-7):

\_\_\_\_\_ - по результатам моделирования;  
 - - - - - по экспериментальным данным.

На рисунках 4.5 приведены теоретические и экспериментальные спектральные плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем, визуальное сравнение которых позволяет наглядно судить о совпадении основных частот спектральной плотности. Оценка по минимуму суммы квадратов разности амплитуд теоретических и экспериментальных реализаций момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели МТА на базе трактора с технологическим модулем. Теоретические и экспериментальные реализации процессов хорошо согласуются и расхождение составляет в пределах 8...16%.

## 4.2 Исследование упругодемпфирующих свойств технологического модуля с позиции теории случайных процессов

Исследование упругодемпфирующих свойств технологического модуля проводилось при выполнении МТА технологической операции рыхления почвы тяжёлой дисковой бороной БДТ-9.

Полученные экспериментальные данные, записанные на ноутбук бинарные файлы с расширением \*.dat преобразовывались с помощью программы Converter в файлы форматов \*.txt для дальнейшей статистической обработки. Применение программного продукта Microsoft Excel позволяет провести необходимую фильтрацию и последующую статистическую обработку полученных реализаций. Программный продукт Microsoft Excel позволил представить полученные данные в виде привычных реализаций (рисунок 4.6).

Анализ реализаций горизонтальных составляющих усилий на крюке и крутящих моментов на осях ведущих колес технологического модуля и трактора позволяет отметить следующее. Горизонтальные колебания на навеске технологического модуля значительно выше колебаний нагрузки на навеске трактора. Уменьшение колебаний нагрузки на навеске трактора при выполнении машинно-тракторным агрегатом технологической операции позволяет снизить колебание нагрузки на полуосях трактора (рисунок 4.6). Для более глубокого анализа динамики процесса был применен аппарат теории стационарных случайных функций (корреляционный и спектральный анализ), поскольку структура и микро профиль поверхности обрабатываемого поля с точки зрения их воздействий на элементы машинно-тракторного агрегата является случайными процессами.



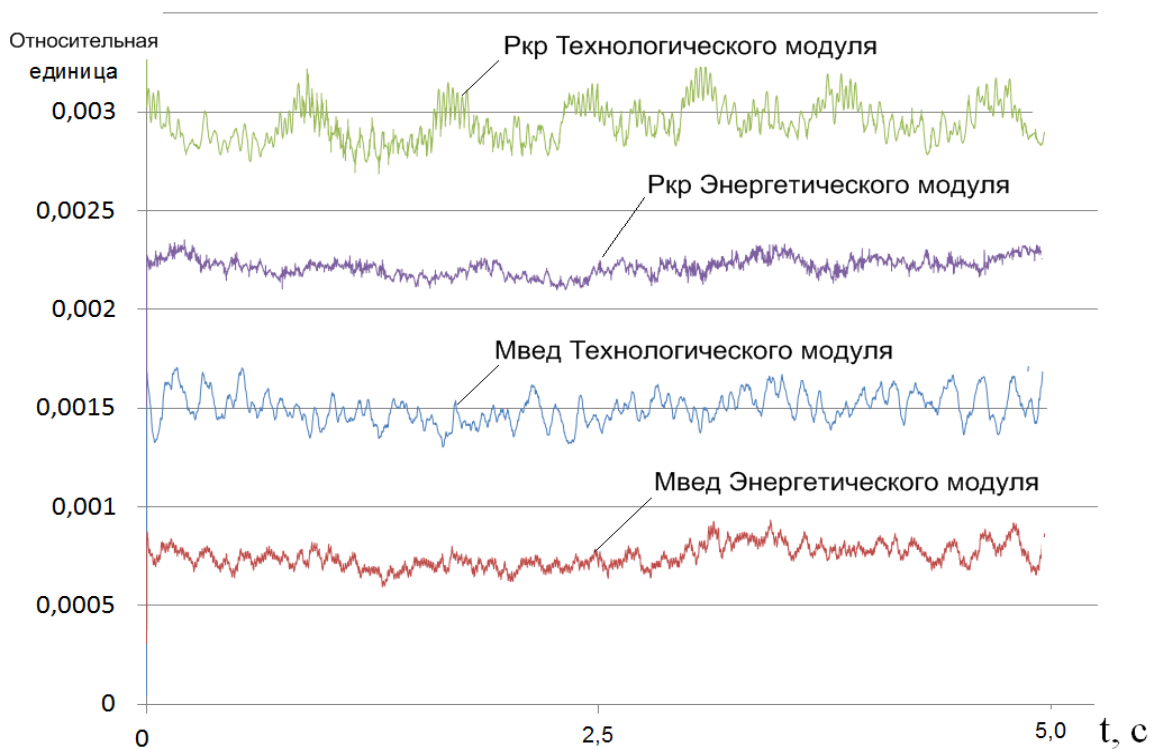
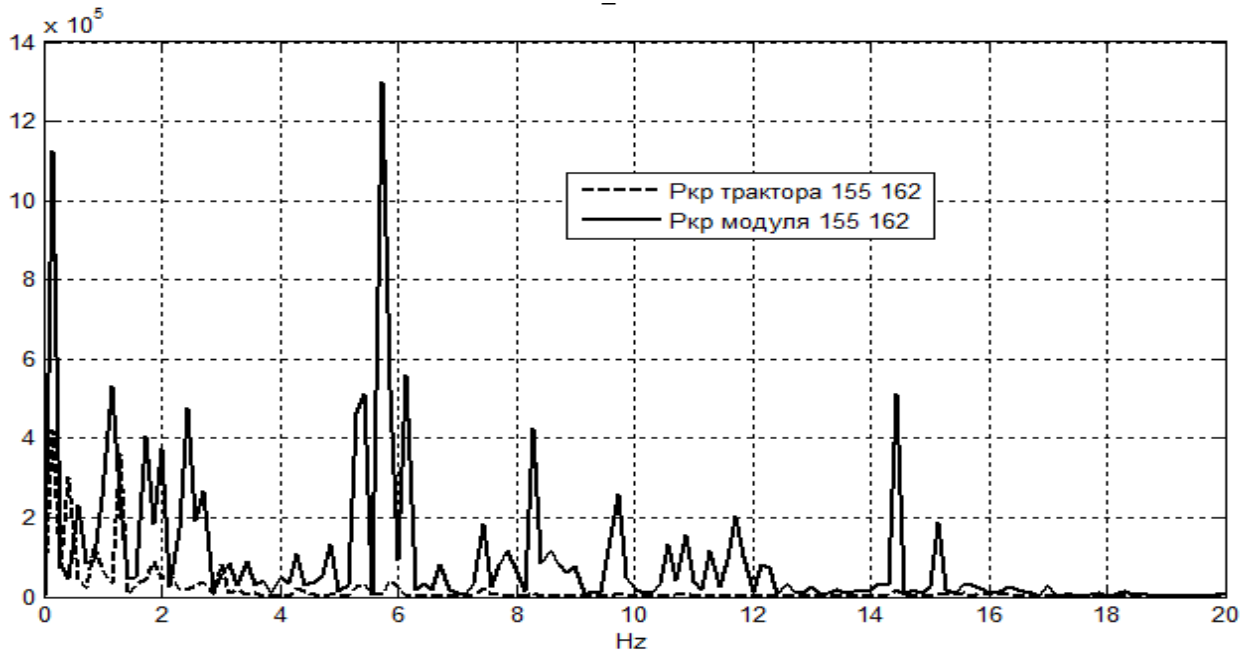


Рисунок 4.6 - Реализация горизонтальных составляющих усилий на крюке и крутящих моментов на осях ведущих колес технологического модуля и трактора

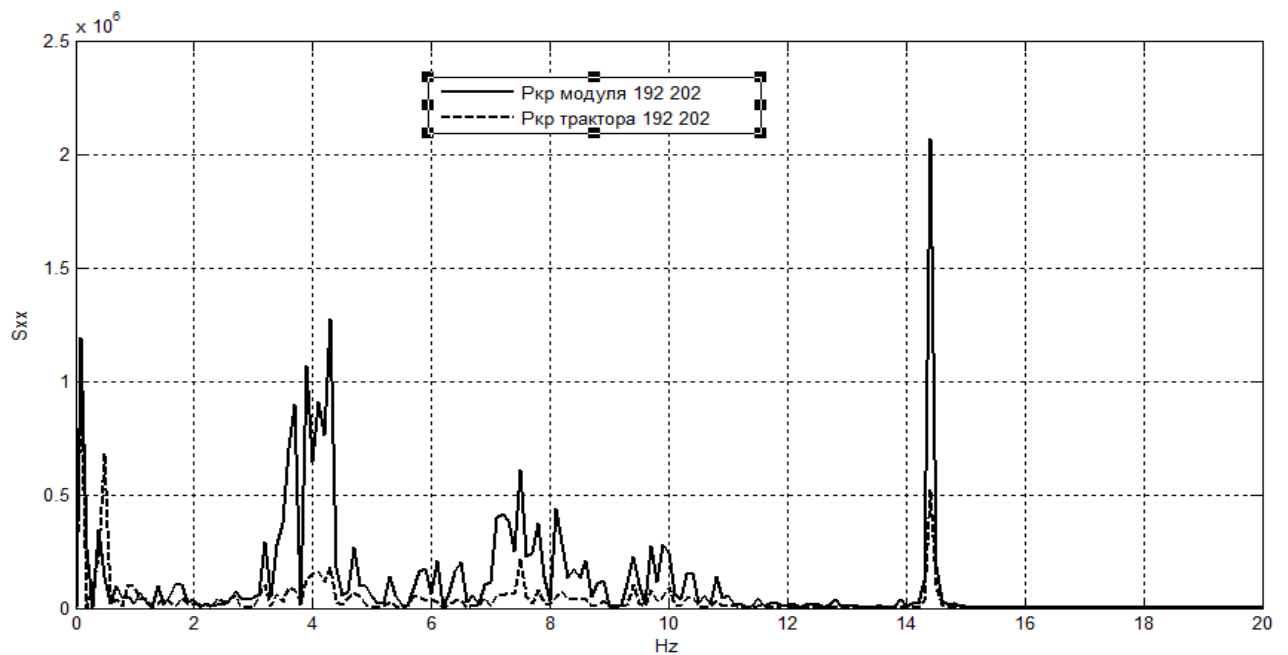
Одной из важнейших характеристик стационарных случайных процессов является спектральная плотность. Данная характеристика показывает распределение энергии (мощности) соответствующего воздействия в соответствующем частотном диапазоне. Если случайное воздействие проходит через динамическое звено, которым является технологический модуль, то по изменению спектральной плотности можно судить каким образом осуществляется трансформация энергии (нагрузки) на его выходе.

Спектральная плотность тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески технологического модуля в горизонтальной плоскости имеет несколько диапазонов определяющих частот: 0...0,5 Гц, 0,5...1,5 Гц, 1,5...3,0 Гц, 3,0...5,5 Гц, 5,5...6,5 Гц, 7,0...9,0 Гц, 9,0...10,0 Гц, 11...12 Гц и 14,5...15,5 Гц. Максимальные значения спектральной плотности (энергии) тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора в горизонтальной плоскости находится в области низких частот 0...3,0 Гц и более высоких частот

5,5...6,5 Гц (рисунок 4.7 а).



а



б

Рисунок 4.7 - Оценки спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески в горизонтальной плоскости:

----- - трактора;

\_\_\_\_\_ - технологического модуля;

а – с включённым приводом колес технологического модуля;

б – при выключенном приводе технологического модуля.

При этом, максимальные значения спектральной плотности (энергии) тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора в горизонтальной плоскости при частотах 0...0,25 Гц в 2,5 раза меньше чем процесса нагружения навески технологического модуля. Значения спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора снижается и для других частот и практически имеет небольшую энергию по сравнению с спектральной плотностью тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески технологического модуля в горизонтальной плоскости со стороны орудия. Это говорит о стабилизации горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора и подтверждает гипотезу о наличии упругодемпфирующих свойств технологического модуля.

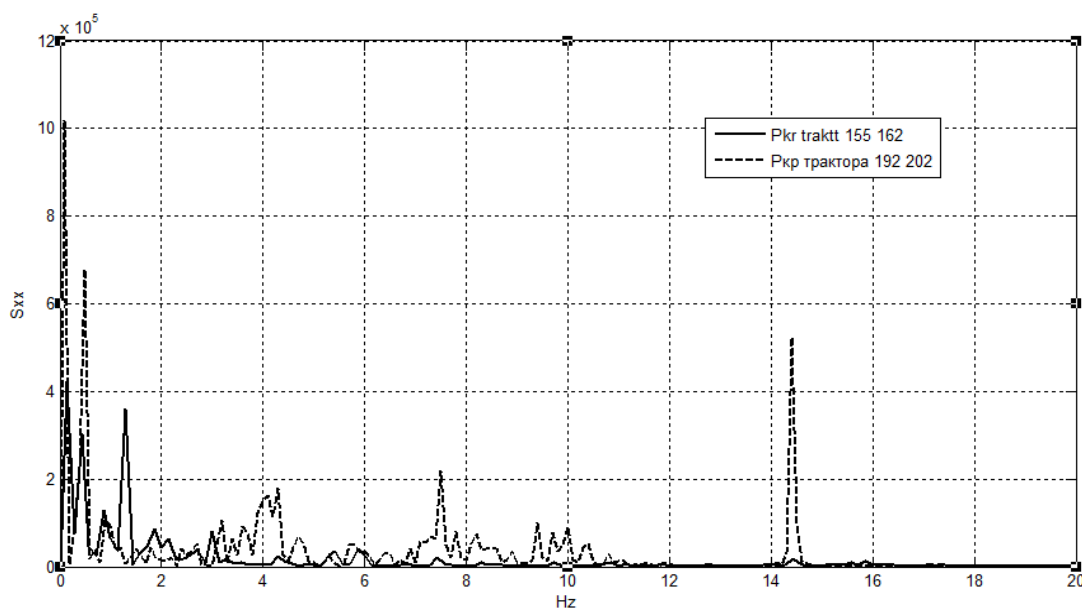


Рисунок 4.8 - Оценки спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора в горизонтальной плоскости:

- \_\_\_\_\_ - с включённым приводом колес технологического модуля;  
----- - при выключенном приводе технологического модуля

При отключенном приводе колес технологического модуля так же наблюдается снижение значений спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора в горизонтальной плоскости (рисунок 4.7 б). Однако имеется значительная плотность высокочастотной составляющей

щей (14,5 Гц) и в целом плотность основных частот 3,0...5,0 Гц, 7,0...9,0 Гц, 9,0...11,0 Гц значительно выше по сравнению с работой МТА с включенным приводом технологического модуля (рисунок 4.8). При этом высокочастотная составляющая (14,5 Гц) усилия на навеске трактора при выключенном приводе колес технологического модуля соответствуют частоте усилия на навеске технологического модуля как при включенном, так и при включенном приводе колес технологического модуля.

Вывод о стабилизации горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора при использовании технологического модуля подтверждают и нормированные корреляционные функции (рисунок 4.9).

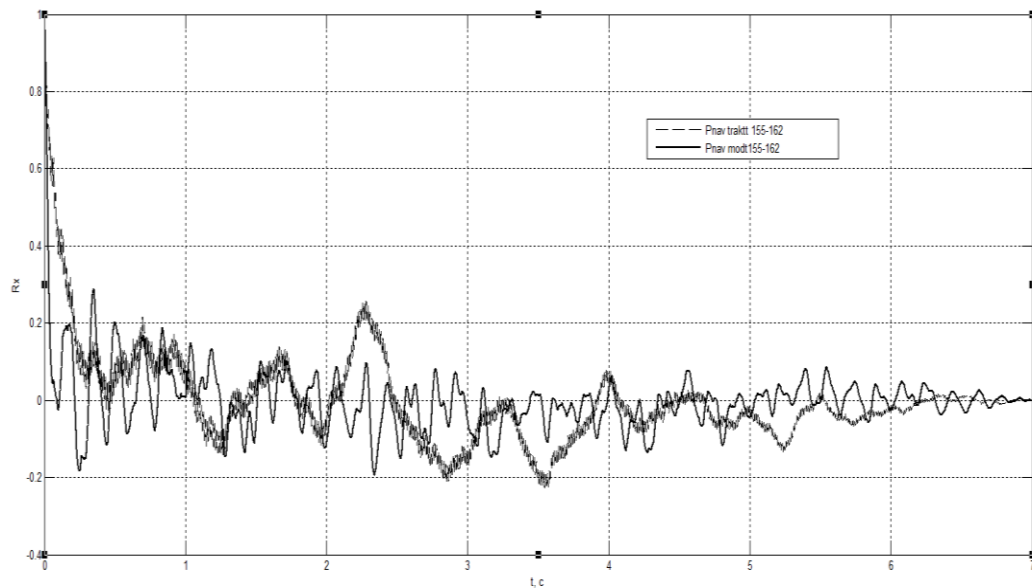


Рисунок 4.9 - Нормированные оценки корреляционной функции тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески в горизонтальной плоскости:

\_\_\_\_\_ - технологического модуля;  
 - - - - - - - - трактора

Время спада корреляционной функции горизонтальной составляющей тягового усилия на навеске трактора больше в 6 раз и составляет 1,0 с, в то время как на навески технологического модуля составляет 0,17 с, то есть высокочастотная составляющая в 6,0 Гц, имеющаяся в спектре усилия на навеске модуля на навеске трактора отсутствует.

Максимальные значения спектральной плотности (энергии) процесса нагружения полуосей трактора при частотах 0...0,75 Гц (рисунок 4.10 и 4.11) практически соответствует максимальному значению спектральной плотности процесса нагружения полуосей технологического модуля 0...1,0 Гц, но величина ее ниже в 2,0 и более раз.

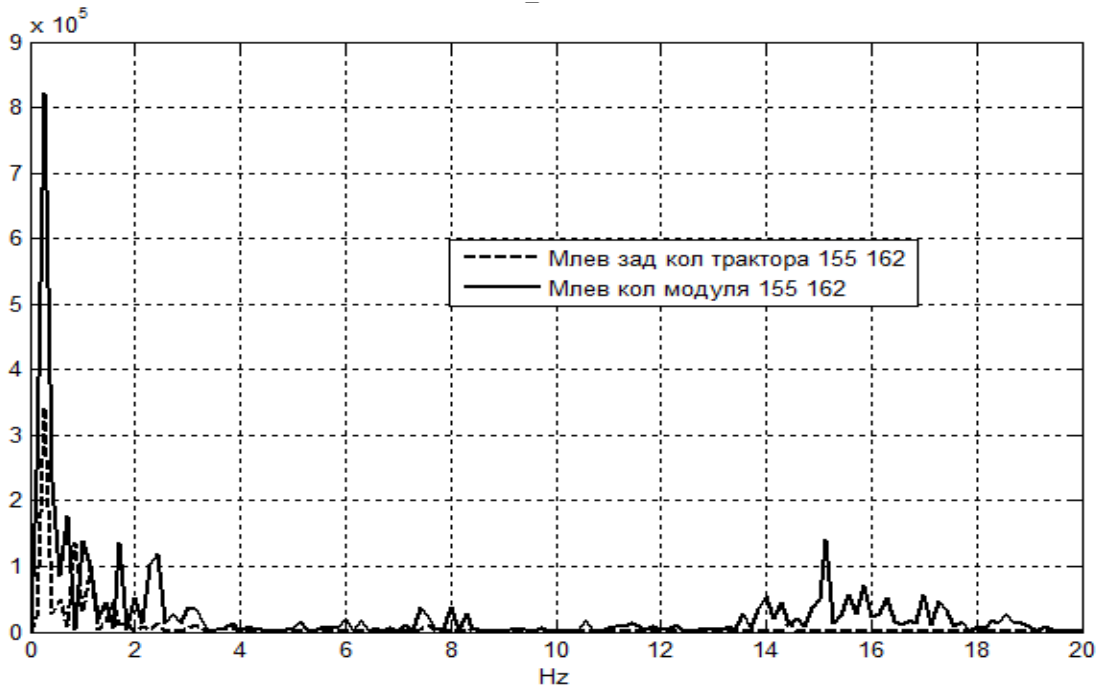


Рисунок 4.10 - Нормированные оценки спектральной плотности крутящего момента:

- \_\_\_\_\_ - на левом колесе технологического модуля;
- - на заднем левом колесе трактора

При этом значения спектральной плотности из области высоких частот смещаются в область низких частот. Так в спектральной плотности процесса нагружения полуосей трактора отсутствуют частоты 13,5...18,0 Гц, которые имеются в спектральной плотности процесса нагружения полуосей технологического модуля.

Происхождение частот 13,5...18,0 Гц в спектральной плотности процесса нагружения полуосей технологического модуля можно объяснить наличием аналогичных частот в спектральной плотности процесса нагружения навески модуля со стороны орудия (рисунки 4.12 и 4.13).

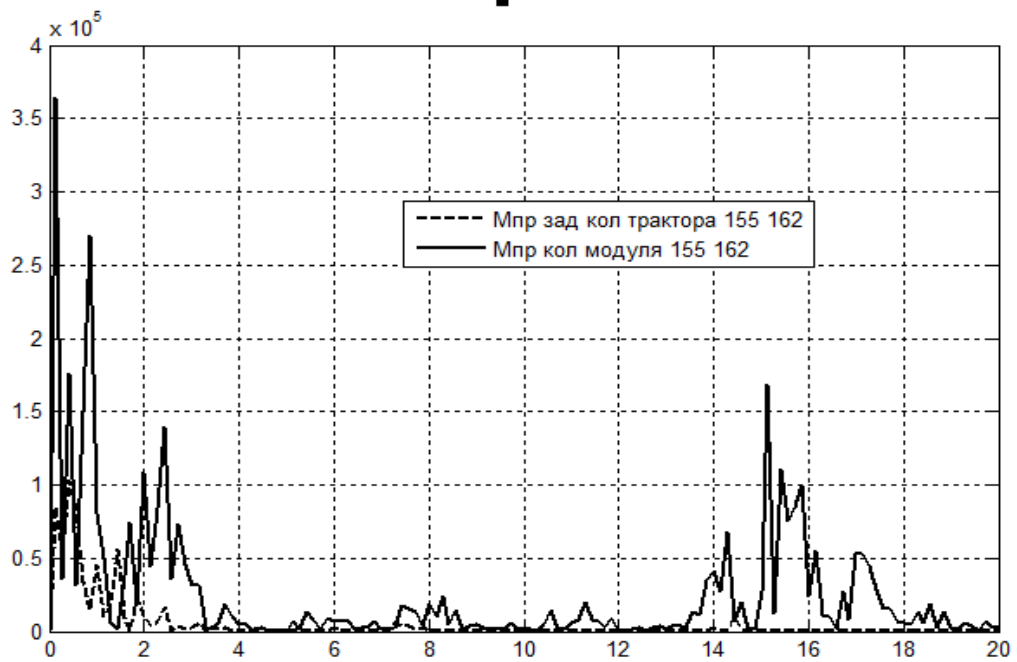


Рисунок 4.11 - Нормированные оценки спектральной плотности крутящего момента:  
 \_\_\_\_\_ - на правом колесе технологического модуля;  
 - - - - - на заднем правом колесе трактора

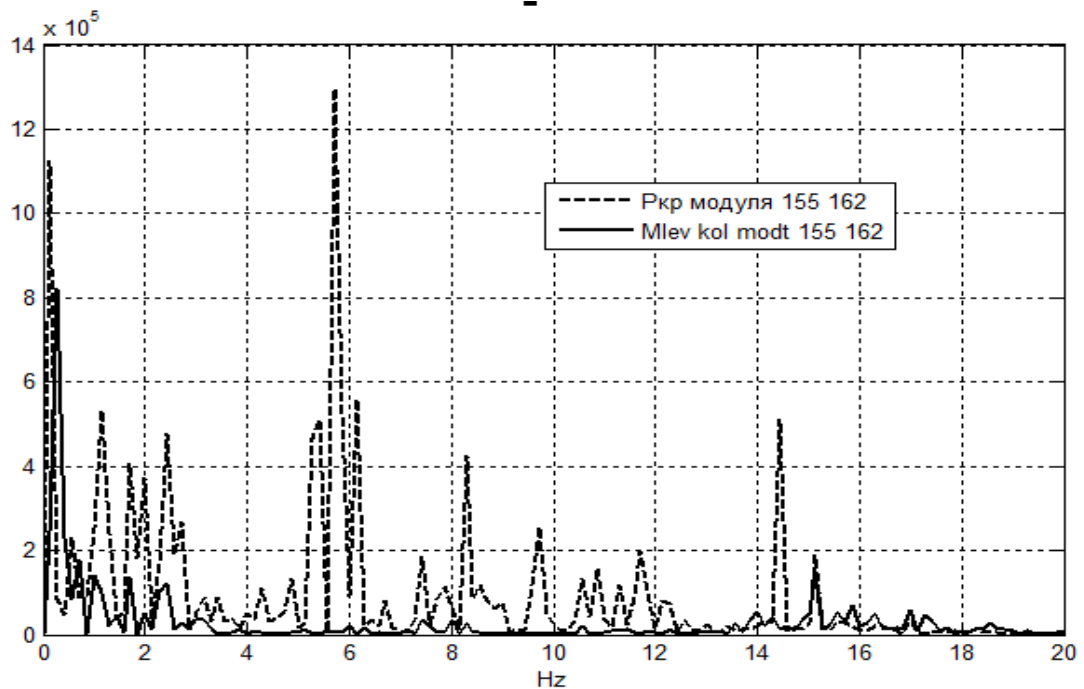


Рисунок 4.12 - Нормированные оценки спектральной плотности:  
 \_\_\_\_\_ - крутящего момента на левом колесе технологического модуля;  
 - - - - - тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески технологического модуля в горизонтальной плоскости.

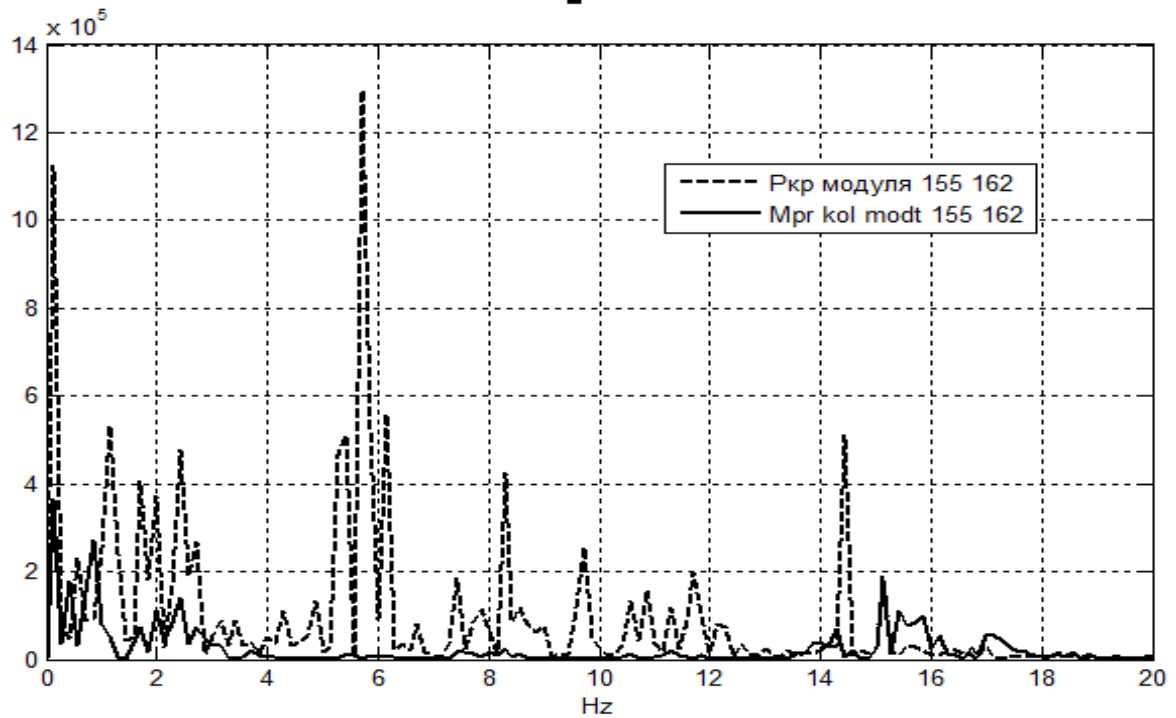


Рисунок 4.13 - Нормированные оценки спектральной плотности:

- \_\_\_\_\_ - крутящего момента на правом колесе технологического модуля;  
 - - - - - тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески технологического модуля в горизонтальной плоскости.

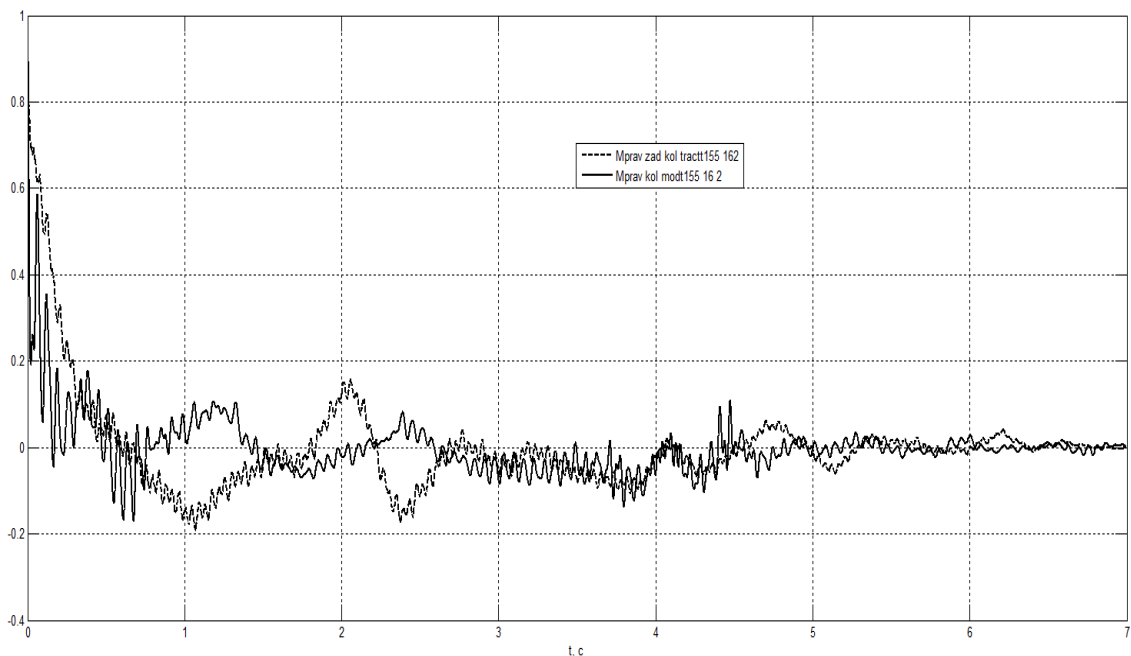


Рисунок 4.14 - Нормированные оценки корреляционной функции крутящего момента:

- \_\_\_\_\_ - на правом колесе технологического модуля;  
 - - - - - на заднем правом колесе трактора

Время спада корреляционной функции крутящих моментов на полуосях трактора составляет 0,6...0,8 с, в то время как на полуоси технологического модуля составляет 0,07 с (рисунки 4.14). Что говорит, о более стабильной нагрузке, приложенной на полуоси трактора при использовании технологического модуля.

Проведенный анализ экспериментальных данных методами статистической динамики подтверждает, что транспортно-технологический модуль служит упругодемпфирующим элементом, воспринимающим на себя наиболее существенную часть колебаний, возникающих в результате взаимодействия рабочего орудия с почвой.

#### 4.3 Результаты сравнительных полевых испытаний

Результаты полевых сравнительных испытаний на стерне зерновых (при влажности агрофона в сдое 0...15 см - 19%) при выполнении МТА отвальной вспашки на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и трактора МТЗ-82 (таблица 4.7).

Таблица 4.7 - Результаты полевых сравнительных испытаний на стерне зерновых при выполнении МТА на базе МТЗ-82 с технологическим модулем и трактора МТЗ-82 отвальной вспашке

Комплектация МТА	Буксование колес						Скорость, м/с
	пер. лев.	пер. пр.	зад. лев.	зад. пр.	мод лев.	мод пр.	
МТЗ-82+ ПЛН-3-35	13,6	4,11	10,8	6,41	-	-	2,0
МТЗ-82+ТМ+ ПЛН-4-35	7,89	7,01	10,8	6,81	10,0	11,40	1,87



Продолжение таблицы 4.7

Комплектация МТА	Скорость, м/с	Чистая производи- тельность, га/ч	Расход топлива	
			кг/ч	кг/га
МТЗ-82+ПЛН-3-35	2,0	0,76	12,0	15,8
МТЗ-82+ТМ+ПЛН-4-35	1,87	0,95	13,0	13,6

Анализ таблиц позволяет сделать вывод, что повышение чистой производительности пахотного агрегата на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составило 25,0 % в сравнении с пахотным агрегатом на базе трактора МТЗ-82 (чистая производительность МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем - 0,95 га/ч). Снижение погектарного расхода топлива МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составило 13,9% в сравнении с трактора МТЗ-82 (погектарный расход топлива МТА на базе МЭС - 13,6 кг/га).

#### 4.4 Выводы

1. Для установления взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель было проведено электронное моделирование в программе Simulink среды Matlab с использованием разработанной математической модели МТА на базе трактора с технологическим модулем. Электронное моделирование в программе Simulink среды Matlab позволило спрогнозировать спектральные плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем. Максимальные значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем при частотах 0...0,25 Гц в 3 раза меньше максимальных значений спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с техноло-

гическим модулем снижается и для других частот и практически имеют меньшую энергию по сравнению с спектральной плотностью момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Это говорит о стабилизации момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем и подтверждает гипотезу о наличии упругодемпфирующих свойств технологического модуля.

2. Лабораторно-полевые испытания подтвердили адекватность теоретической гипотезы, что применение технологического модуля с ведущими колесами оказывает существенное влияние на стабилизацию режима нагружения трактора. При максимальной спектральной плотности процесса нагружения навески технологического модуля при частотах 5...6,5 Гц и 14,5...15,5 Гц максимальная спектральная плотность дисперсии процесса нагружения навески трактора наблюдается при частотах 0...2 Гц. Время спада корреляционной функции горизонтальной составляющей усилия на навески трактора увеличилось в 6 раз и составило 1,0 с, в то время как на навески технологического модуля составляет 0,17 с и время спада корреляционной функции крутящего момента на полуоси трактора увеличилось до 0,6...0,8 с, в то время как на полуоси технологического модуля составляет 0,07 с.

3. Сравнительные полевые испытания МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и МТА на базе трактора МТЗ-82 без технологического модуля показали, что применение технологического модуля с трактором МТЗ-82 дает повышение чистой производительности пахотного агрегата на 25,0% (чистая производительность МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составила- 0,95 га/ч) и снижение погектарного расхода топлива на 13,9% (погектарный расход топлива МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составил 13,6 кг/га).

## 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Проведенный выше анализ теоретических и экспериментальных исследований показывает, что формирование МТА по модульному принципу агрегатирования обеспечивает в условиях сельскохозяйственной эксплуатации наиболее полную реализацию энергетических возможностей дизеля энергонасыщенного трактора, повышает его универсальность и годовую загрузку.

Как показали сравнительные испытания на техническую производительность МТА при модульном агрегатировании с технологическим модулем и без него, применение ТМ с трактором МТЗ-82 дает прирост производительности на энергоемких сельскохозяйственных технологических операциях на 25,0 % и снижение погектарного расхода топлива на 13,6 % и дает экономический эффект.

Расчет экономической эффективности проводим на примере машинно-тракторных агрегатов на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и без него.

Годовой экономический эффект на один МТА определяем по выражению:

$$\mathcal{E}_Г = [(I_B + E_H \cdot K_B) - (I_H + E_H \cdot K_H)] A_n, \quad (5.1)$$

где  $K_б$  и  $K_n$  - удельные капитальные вложения потребителя при использовании базового и нового МТА, руб/га;

$I_б$  и  $I_n$  - удельные эксплуатационные затраты потребителя при использовании базового и нового МТА, руб/га;

$A_2$  - годовой объем работ, выполненных МТА на базе нового трактора, га;

$E_n$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15.

Годовые эксплуатационные затраты потребителя рассчитываем по зависимости

$$I = S_a + S_{кр} + S_{тр} + S_{то} + S_{зн} + S_{гсм}, \quad (5.2)$$

где  $S_a$ ,  $S_{кр}$ ,  $S_{тр}$  и  $S_{то}$  - затраты на амортизацию, капитальный и текущий ремонты, техническое обслуживание по всем элементам МТА;

$S_{зн}$  - затраты на заработную плату;

$S_{гсм}$  - затраты на топливо и смазочные материалы.

Амортизационные отчисления на полное восстановление машин, входящих в состав МТА определяются по формуле:

$$S_a = \frac{B_i H_a T_m}{100 T_{год}} \quad (5.3)$$

где  $B_i$  - балансовая стоимость машин, входящих в МТА, руб;

$H_a$  - нормы амортизационных отчислений, %;

$T_{год}$  и  $T_m$  - годовая загрузка МТА и машины, входящей в МТА, час.

Оплата труда механизаторов на выполнение единицы работы

$$Z_{nn} = \frac{C_{мар} \cdot L}{W_{ч}}, \quad (5.4)$$

где  $C_{мар}$  - часовая тарифная ставка механизатора с надбавками и начислениями, руб/час;

$W_{ч}$  - часовая техническая производительность агрегата, га/час.

$L$  - число обслуживающего персонала.

В отчислениях на социальные нужды включаются выплаты на социальные страхование, в государственный фонд занятости, пенсионный фонд (для сельскохозяйственных предприятий) фонд медицинского страхования от всех выплат в виде оплаты труда.

Затраты на топливо и смазочные материалы

$$Z_{гсм} = G_m T_{год} u_2, \quad (5.5)$$

где  $G_m$  - часовой расход топлива, кг/час;

$u_2$  - комплексная цена 1 кг топлива, руб/кг.

Годовой объем работ, выполненных МТА, вычисляем по зависимости

$$A_2 = W_ч T_{год} \tau_{см}, \quad (5.6)$$

где  $\tau_{см}$  - коэффициент использования времени смены.

Техническая производительность и расход топлива приняты по результатам экспериментальных исследований трактора с ТМ и без на отвальной вспашке.

Таблица 5.1 - Исходные технико-экономические данные для расчета удельных приведенных затрат

Показатели	Обозн. един. изм.	Трактор МТЗ-82		Орудие	
		без ТМ	с ТМ	ПЛН-3-35	ПЛН-4-35
Цена завода изготовителя с НДС	$Ц_B$ , тыс. руб	960	1210	39	42
Нормы амортизационных отчислений: - на реновацию - на капитальный ремонт - текущие ремонт и техническое обслуживание	$a_p$ , %	11,1	11,1	11,0	11,0
	$a_{кр}$ , %	6,5	6,5	-	-
	$a_{тр.то}$ , %	22,0	22,0	27,0	27,0
Часовая тарифная ставка с надбавками и начислениями	$З_ч$ , руб/ч	-	-	300	300
Комплексная цена 1 кг топлива	$Ц_z$ , руб	33,0	33,0	-	-
Годовая загрузка	$T_z$ , ч	945	945	240	240
Коэффициент использования времени смены	$\tau_{см}$	0,85	0,85	0,85	0,85
Техническая производительность МТА в агрегате с: ПЛН-3-35 ПЛН-4-35	$W_ч$ , га/ч	0,76		-	-
			0,99	-	-
Часовой расход топлива МТА в агрегате с: ПЛН-3-35 ПЛН-4-35	$G_ч$ , кг/ч	12,0		-	-
			13,6	-	-

Таблица 5.2 Результаты расчета экономической эффективности

Показатели	Отвальная вспашка ПН-3-35	Отвальная вспашка ПН-4-35
	МТЗ-82 без ТМ	МТЗ-82 с ТМ
Удельные капитальные затраты на: трактор, руб/га; орудие, руб/га.	235,88 37,73	237,85 32,51
Удельные эксплуатационные затраты, руб/га.	1726,06	1557,33
Затраты на реновацию, тыс. руб	31,35	38,73
Затраты на капитальный ремонт, тыс.руб.	15,85	19,97
Затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание трактора, тыс. руб.	53,64	67,61
Затраты на ремонт, техническое обслуживание СХМ, тыс. руб	10,53	11,34
Затраты на заработную плату, тыс. руб.	61,20	61,20
Затраты на топливо и смазочные материалы, тыс. руб.	95,04	102,96
Эксплуатационные затраты, тыс. руб.	267,61	301,81
Удельные приведенные затраты, руб/га.	1999,68	1827,69
Годовой экономический эффект на 1 МТА, тыс. руб.		33,33
Срок окупаемости дополнительных вложений, лет		2,64

На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также выполненного экономического расчета можно сделать вывод о том, что применение модульной системы агрегатирования с технологическим модулем является одним из эффективных средств повышения эффективности применения сельскохозяйственного МТА сформированного на базе трактора тягово-энергетической концепции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате обзорных исследований установлено, что заложенный резерв мощности двигателя энергонасыщенных трактор может быть реализован в силу тяги двумя основными вариантами: путем балластирования трактора или присоединением к трактору технологического модуля, который позволяет повысить тяговое усилие за счет реализации резерва мощности через дополнительный ведущий мост.

2. Проведенные теоретические изыскания позволили обосновать компоновку модульного построения МТА для энергонасыщенных трактора класса 1,4 с технологическим модулем и разработать функциональную схему, которая обеспечит согласованную кинематическую и силовую передачу полной мощности двигателя, маневренность и агрегатирование полного комплекса сельскохозяйственных машин для универсально пропашных тракторов двух тяговых классов 1,4 и 2.

3. Разработан экспериментальный образец технологического модуля для модульного построения МТА на базе универсально пропашного энергонасыщенного трактора тягового класса 1,4 в виде технологического модуля с ведущими колесами, обеспечивающего совмещение увеличения тягового усилия трактора и снижения колебаний внешней нагрузки, при уменьшении удельного расхода топлива. Оптимальные значения коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес технологического модуля для трактора тягового класса 1,4 составляет 120000 Нм/рад и коэффициента продольной деформации шины ведущих колес технологического модуля составляет 180000 Н/рад, коэффициенты демпфирования шины ведущих колес технологического модуля не имеют явно выраженных оптимумов. Значения коэффициентов соответствуют характеристикам шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,08 МПа.

4. Предложенная в работе методика по определению мощности двигателя трактора тягово-энергетической концепции и рационального веса технологического модуля, позволила определить, что для использования трактора в двух смежных тяговых классах необходимо обеспечить энергонасыщенность трактора



с технологическим модулем такую же как у трактора в данном тяговом классе без модуля (1,59...1,65 кВт/кН), а сам трактор, к которому подсоединяется технологический модуль должен обладать энергонасыщенностью (2,0...2,41 кВт/кН).

5. В результате разработки и исследования математической модели МТА на базе трактора с технологическим модулем получены спектральные плотности процессов нагружения навески и полуосей трактора, которые показали, что за счет применения технологического модуля их амплитудные максимумы могут быть снижены более чем в 2,5...3 раза и сдвинуты в более низкую область частот до 0...2,5 Гц.

6. Имитационное моделирование в программе Simulink среды Matlab позволило получить спектральные плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем. Установлено, что максимальные значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем при частотах 0...0,25 Гц в 3...3,5 раза меньше максимальных значений спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Также значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем снижается и для других частот и практически имеют меньшую энергию по сравнению с спектральной плотностью момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Проведенные в работе изыскания подтвердили гипотезу о наличии упругодемпфирующих свойств технологического модуля.

7. Результаты лабораторно-полевых испытаний подтвердили адекватность теоретической модели и доказали, что применение технологического модуля с ведущими колесами оказывает существенное влияние на стабилизацию режима нагружения трактора. При максимальной спектральной плотности процесса нагружения навески технологического модуля при частотах 5...6,5 Гц и 14,5...15,5 Гц максимальная спектральная плотность дисперсии процесса нагружения навески трактора наблюдается при частотах 0...2 Гц. Время спада корреляционной

функции горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора увеличилось в 6 раз и составило 1,0 с, в то время как на навеске технологического модуля составляет 0,17 с и время спада корреляционной функции крутящего момента на полуоси трактора увеличилось до 0,6...0,8 с, в то время как на полуоси технологического модуля составляет 0,07 с.

8. Сравнительные полевые испытания МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и МТА на базе трактора МТЗ-82 без технологического модуля показали, что применение технологического модуля с трактором МТЗ-82 дает повышение производительности пахотного агрегата на 25,0% (чистая производительность МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составила- 0,95 га/ч) и снижение погектарного расхода топлива на 13,9% (погектарный расход топлива МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составил 13,6 кг/га).

9. Оценка экономической эффективности показала, что применение технологического модуля позволяет получить годовой экономический эффект 33330 руб. на один МТА при выполнении вспашки и срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составит 2,64 года.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кычев, В.Н. Проблемы и пути реализации потенциальных возможностей машинно-тракторных агрегатов при увеличении энергонасыщенности тракторов: учебное пособие / В. Н. Кычев. - Челябинск: ЧИМЭСХ, 1989. - 84 с.
2. Кутьков, Г.М. Энергонасыщенность и классификация тракторов / Г.М. Кутьков // Тракторы и сельхозмашины. - 2009. - №5. - С.11-14.
3. Поливаев, О.И. Снижение уплотнения почвы движителями мобильных энергетических средств / О.И. Поливаев, В.С. Воищев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – Воронеж: ВГАУ, 2013. - №1 (36).-С. 57-59,
4. Ерохин, М.Н. Исследование динамических нагрузок гусеничной машины на почву / М.Н. Ерохин, В.В Стрельцов, В.П. Лапик // Техника и оборудование для села. - 2015. - № 2 (212). - С. 9-11.
5. ГОСТ 26953-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. - М.: Издательство стандартов. 1986. - 18 с.
6. Астафьев, В.Л. Совершенствование технической оснащённости села с учетом уплотняющего воздействия МТА на почву / В.Л. Астафьев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2002. -№ 9.- С.11-12.
7. Русанов, В.А. Эффективность снижения воздействия движителей на почву / В.А. Русанов // Тракторы и сельхозмашины. - 1996. -№ 7. - С.9-13.
8. Окунев, Г.А. Показатели эффективности тракторов типа РТМ-160 / Г.А. Окунев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2006. - № 9. - С.5-6.
9. Юшин, А.А. Перспективы развития мобильной энергетики / А.А. Юшин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. - 1978. - № 11. - С. 8-11.
10. Судин, Ж.М. Самоходные машины для химизации / Ж.М. Судин, Б.А. Грицик // Тракторы и сельхозмашины. – 1989. - № 7. - С. 40-42.

11. Гумилевский, Ю.Н. Трехосный трактор «Valmet 1502» / Ю.Н. Гумилевский // Тракторы и сельхозмашины. – 1978. – №2. - С.39-40.
12. Интеллектуальная технология для королевского класса // Современная сельхозтехника и оборудование. – 2008. - вып. 1. - С. 26-28.
13. Беляев, Н.М. Мощные и сверхмощные колесные сельскохозяйственные тракторы за рубежом / Н.М. Беляев // Тракторы и сельхозмашины. – 1986. – №5. – С. 52-58.
14. 600 л.с. на 8 колесах // Современная сельхозтехника и оборудование. – 2010. - вып. 1. - С. 20-22.
15. Евтенко, В.Г. Универсализация сельскохозяйственных тракторов и блочно-модульный метод создания мобильных агрегатов / В.Г. Евтенко // Тракторы и сельхозмашины. – 1989. - №10.- С. 15-19.
16. Годжаев, З.А. Исследование давления колесного движителя на почву с учетом характеристики шины / З.А. Годжаев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. - 2016. - № 1. - С. 5-10.
17. Юдкин, В.В. Оптимизация скорости движения и ширины захвата почвообрабатывающих агрегатов / В.В. Юдкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. - №4. - С.45-49.
18. Попов, В.Н. Пути повышения эффективности использования мощности двигателей гусеничных тракторов в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03 / В.Н. Попов: - Челябинск, 1974. - 49 с.
19. Шалягин, В.Н. Комплексное повышение эффективности МТА с энергонасыщенными тракторами / В.Н. Шалягин // Тракторы и сельхозмашины. – 1988. - №5. – С.9-13.
20. Ворохобин, А.В. Эффективность регулирования степени балластирования колесных тракторов при работе с навесными машинами / А.В. Ворохобин, В.П. Гребнев // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - №10. - С.19-21.

21. Парфенов, А.П. К вопросу о балластировании колесного сельскохозяйственного трактора / А.П. Парфенов // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. - №7. - С.16-19
22. Гумилевский, Ю.Н. Трактор «МВ трак 1300» / Ю.Н. Гумилевский // Тракторы и сельхозмашины. – 1979. - №8. - С.39-40.
23. Ксенович, И.П. Некоторые тенденции тракторостроения за рубежом / И.П. Ксенович, С.Е.Либцис, А.П. Парфенов // Тракторы и сельхозмашины. – 1991 - №7. - С.45-52.
24. Гольцяпин, В.Я. Новые тракторы зарубежных фирм / В.Я Гольцяпин // Тракторы и сельхозмашины. – 2008. - № 10. - С. 50-56.
25. Гольцяпин, В.Я. Новые интегральные тракторы JCB / В.Я Гольцяпин // Тракторы и сельхозмашины. – 2005. - №4. - С.40-44.
26. Коцарь, Ю.А. От трактора Блинова до интегральной модели / Ю.А. Коцарь [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2005. - № 5. - С. 9-11.
27. Басин, В.С. Направления совершенствования тракторной техники / В.С. Басин // Тракторы и сельхозмашины. – 2006. - №9.- С. 3-5.
28. Кабаков, Н.С. Трактор ЛТЗ-155 для возделывания пропашных культур / Н.С. Кабаков, А.Г. Пономарев // Тракторы и сельхозмашины. – 2000. - № 1.- С. 7-9.
29. Волков, Б.Г. Модульное энергетическое средство и его агрегатирование / Б.Г. Волков [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. - 1988. - № 1. - С. 44-47.
30. Окунев, Г.А. Показатели эффективности тракторов типа РТМ-160 / Г.А. Окунев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2006. - №9.- С. 5-6.
31. Липкович, Э.И. Производство тяжелых сельскохозяйственных тракторов: состояние и перспективы / Э.И. Липкович // Тракторы и сельхозмашины. – 2006. - № 1. - С. 3-9.
32. Надыкто, В.Т. Перспективное направление создания комбинированных и широкозахватных МТА / В.Т. Надыкто // Тракторы и сельхозмашины. – 2008. - № 3. - С. 26-30.

33. Надыкто, В.Т. Перспективы использования трактора ХТЗ-120 / В.Т. Надыкто [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 1995. - № 10.- С. 15-18.
34. Шуринов, В.А. Кормоуборочный комплекс «Полесье» / В.А. Шуринов // Тракторы и сельхозмашины. – 1989. - №9.- С. 45-47.
35. Кутьков, Г.М. Блочномодульные МТА / Г.М. Кутьков, И.П. Ксеневиц // Тракторы и сельхозмашины. – 1990. – №1. –С. 8 – 10.
36. Нехаев, Е.Н. Анализ функциональных возможностей и конструктивных особенностей мобильной техники / Е.Н. Нехаев // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Сборник научных трудов. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. - № 45. - С. 54-60.
37. Гурылев, Г.С. К выбору конструктивно-компоновочной схемы селекционного энергосредства на базе самоходного шасси класса 0,6 / Гурылев Г.С., Шевцов В.Г., Русанов А.В. // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. - 2014. - С. 316-320.
38. Соловейчик, А.А. Теория и расчет мобильных агрегатов с активными рабочими органами, совмещающими функции движителей / А.А. Соловейчик, Н.М. Орлов, В.Г. Шевцов. – М.: ВИМ, 2008. – 184 с.
39. Алакин, В.М. Энергетические параметры прицепного очесывающего адаптера / В.М. Алакин, В.Ю. Савин // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. - №11. - С. 7-8.
40. Ксеневиц, И.П. Выбор концепции создания энергетических средств и модульное их конструирование / И.П. Ксеневиц // Техника в сельском хозяйстве. – 1991. - №2. - С. 9-12.
41. Евтенко, В.Г. Развитие модульного принципа создания мобильных энергетических средств / В.Г. Евтенко, А.Н. Лысенко // Техника в сельском хозяйстве. – 1991. - №2.- С. 13-14.
42. Писаренко, А.Е. Метод формирования модульной техники с помощью математических моделей / А.Е. Писаренко // Техника в сельском хозяйстве. –

2003. - №2. - С. 23-27.

43. Гольтяпин, В.Я. Результаты испытаний зарубежных тракторов / В.Я. Гольтяпин // Тракторы и сельхозмашины. – 1999. - № 1.- С. 37-38.

44. Алферов, Г.С. Концепция развития комплекса машин на базе ВЭМ для возделывания и уборки картофеля / Г.С. Алферов, Г.Д. Петров, В.И. Славкин // Тракторы и сельхозмашины. – 2003. - №11. - С. 28-30.

45. Кутьков, Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства: Учебник / Г.М. Кутьков. — М.: ИНФРА-М, 2014. — 506 с.

46. Кутьков, Г.М. Исследования модульного энерготехнологического средства / Г.М. Кутьков // Тракторы и сельхозмашины. – 1989. – № 12. – С. 3-9.

47. Попов, А.Г. Некоторые результаты экспериментальных исследований МЭС-150 / А.Г. Попов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины: сборник научных трудов. - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина. – 1993. - С. 107-119.

48. Кабаков, Н.С. Тяговые показатели трактора МТЗ-52 с приставным ведущим мостом / Н.С. Кабаков, Л.И. Чурсин, Е.С. Рожков, // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. - №12.-С.13-14.

49. Иофинов, С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов. -М.: Колос, 1974. - 480 с.

50. Кутьков, Г.М. Тяговая динамика трактора / Г.М. Кутьков. -М.: Машиностроение, 1980. - 215 с.

51. Агеев, Л.Е. Основы расчета оптимальных и допустимых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев. -Л.: Колос, Ленингр. отд-ние, 1978. - 296 с.

52. Болтинский, В.Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке / В.Н. Болтинский. - М.: Сельхозгиз, 1949. - 216 с.

53. Болтинский, В.Н. Предварительные результаты сравнительных производственных испытаний МТА, работающих на скоростях 9...15 и 5...9 км / В.Н. Болтинский // Научные основы повышения рабочих скоростей МТА. - М.: 1965. - С. 3-21.

54. Болтинский, В.Н. Мощность тракторного двигателя при работе с неустановившейся нагрузкой и ее определение // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1959. - №2. - С.3-8,

55. Киртбая, Ю.К. Резервы в использовании машинно-тракторного парка. - М.: Колос, 1982. - 319 с.

56. Киртбая, Ю.К. Основы теории использования машин в сельском хозяйстве. - Киев-М.: Матгиз, Укр. отд-ние, 1957. - 278 с.

57. Юшин, А. А., Евтенкос В.Г., Вернигор В.А. Исследование на математической модели показателей работы тракторного двигателя // Тракторы и сельхозмашины. - 1973. -№11. - С. 7-10.

58. Демченко, Е.М. Исследование энергетических параметров МТА при вероятностном характере нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. -Л.-Пушкин, 1970. - 20 с.

59. Юлдашев, А.К. Динамика рабочих процессов двигателя машинно-тракторных агрегатов. - Казань: Татарское кн. изд-во, 1980. - 142 с.

60. Ждановский, Н.С., Николаенко А В., Шкрабак В. С. и др. Режимы работы двигателей энергонасыщенных тракторов. -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. - 240 с.

61. Любарец, В. А. Улучшение эксплуатационных показателей МТА путем совершенствования режимов загрузки двигателя с газотурбинным наддувом: автореф...дис. ... канд. техн. наук. - Челябинск, 1979.- 20 с.

62. Грачев, В.С. Исследование динамических характеристик тракторного дизеля с газотурбинным наддувом и рациональные пути их улучшения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Л.: 1977.- 25 с.

63. Рафиков, О.С. Улучшение качества регулирования угловой скорости двигателя трактора для мелиоративных работ: автореф. дис. ...канд. техн. наук. - Челябинск, 1979- 19 с.

64. Кутьков, Г.М., Сидоров, В.Н. Тягово-динамическая характеристика трактора // Чтения академика В.Н. Болтинского: Материалы выездного научно-



технического семинара в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана 15-июня 2007 г.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - С.

65. Хрушков, П.П. Влияние эксплуатационных режимов тракторного двигателя на износостойкость основных его деталей. -Записки ЛСХИ, 1971, т. 174, вып. 156, С. 70-74.

66. Жидков, Г.И. Повышение эффективности работы МТА на базе энергонасыщенного трактора класса 3 путем применения упругой связи в механизме навески: дис. ...канд. техн. наук. Волгоград, 1989. - 146 с.

67. Нуржаунов, А.Н., Коденко М.Н. Влияние упругой сцепки на динамику тракторного агрегата // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1975. - №8. - С.45-46,

68. Гневковский, В.Г. Исследование процесса тракторного поезда с упругой связью в сцепке // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1968. - №4. - С.14-18,

69. Григорьянц, Р.А. Повышение эффективности работы МТА на базе трактора класса 3 с ДПМ путем применения упругой связи в механизме навески: дис. ... канд. техн. наук: Волгоград, 1992. - 138 с.

70. Кузнецов, Н.Г., Кривов, В.Г., Дегтярев, Ю.П. Влияние упругих элементов в сочленениях МТА на работу дизеля постоянной мощности // Повышение надежности и эффективности использования сельскохозяйственной техники // Сб. науч. тр. / Волгоградский с.-х. ин-т. Волгоград, 1992. С.24-28,

71. Ключев, А.И., Коблов, С.П. О возможности увеличения загрузки двигателя при упругом креплении корпусов плуга к раме // Сб. науч. тр. Волгоград: СХИ. - 1985. - Т91. - С.42-47,

72. Поливаев, О.И. Снижение динамических нагрузок в машинно-тракторных агрегатах / О.И. Поливаев, А.П. Полухин. – Воронеж: ВГАУ, 2000. – 197 с.

73. Поливаев, О.И. Снижение динамической нагруженности мобильных энергетических средств от внешних воздействий и повышение их тягово-

динамических показателей / О. И. Поливаев, В.К. Астанин, Н.В. Бабанин // Лесотехнический журнал. - 2013. - №3. - С. 150-156

74. Строков, В.Л., Карсаков, А.А., Макарова, Т.И. Об эластичном приводе ведущих колес трактора // Тракторы и сельхозмашины. - 1974. - №8. - С. 8-10

75. Жутов, А.Г. Горизонтальная жесткость ведущих колес трактора и его тяговые показатели /А.Г. Жутов, Н.Г. Кузнецов, Н.В. Караваяев // Тракторы и сельхозмашины. - 2005. - №11. - С. 15-16

76. Панков, А.В. Повышение эффективности использования МТА за счет применения пневмогидравлического упругодемпфирующего привода ведущих колес трактора класса 1,4: дис. ... канд. техн. наук: Волгоград, 2009 - 145 с.

77. Шляхов, А.А. Стабилизация режимов нагружения колесного трактора в составе МТА путем применения пневмогидравлической навески: дис. ... канд. техн. наук. - Волгоград, 2002- 172 с.

78. Анохин, В.И. Применение гидротрансформаторов на скоростных гусеничных сельскохозяйственных тракторах. - М.: Машиностроение, 1972. - 303 с.

81. Черпак, Ф.А., Розеноер, М.Г., Молчанов, В.М. Тенденции развития и конструктивные особенности тракторных гидротрансформаторов. -М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1973, С. 3-107.

82. Дьячков, Е.А., Шаров, М.А. Исследование тяговых показателей скоростного гусеничного трактора с гидромеханической трансмиссией. - Сборник тр.: Автомобили и тракторы. - Волгоград, 1971.- С. 151-157.

83. Султанов, Ж.И. Исследование стабилизации нагружения тракторного двигателя применением гидротрансформатора: автореф. дис ... канд. техн. наук.- Челябинск, 1976.- 28 с.

84. Борисов, С.Г. Оценка эффективности крутильных колебаний на ведомых дисках муфты сцепления двигателя СМД /С.Г. Борисов, С.А. Лапшин // Тракторы и сельхозмашины. - 1973. - №1, С. 11-14

85. Геккер, Ф.Р. Исследование влияния основных параметров упругофрикционного демпфера на крутильные колебания силовой передачи трактора / Ф.Р.

Геккер // Автомобильная промышленность. - 1969. - №2. - С.15-18

86. Барский, И.Б. Сцепление тракторных и тяговых машин / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. - М.: Машиностроение, 1989. - 344

87. Шупляков, В.С. Колебания и нагруженность трансмиссии автомобиля. - М.: Транспорт, 1974. - 326 с.

88. Касап, И.Ф. Пути и средства стабилизации нагрузочных режимов и снижение динамической нагруженности гусеничных тракторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Волгоград, 1986- 26 с.

89. Котляков, В.В. Исследование процесса разгона МТА с податливой связью в трансмиссии трактора / В.В. Котляков, Ю.И. Деянов // Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства. - зерноград; ВНИПТИМЭСХ, 1973. Вып. 16. - С. 47-57

90. Кравченко, В.А. Исследование и обоснование оптимальных параметров и режимов работы машинно-тракторного пахотного агрегата на базе трактора класса 50 кН: дис. ... канд. техн. наук. - зерноград, 1982- 209 с.

91. Толстухов, Ю.С. Исследование влияния упругого элемента в трансмиссии на динамические показатели колесного трактора: дис. ... канд. техн. наук: зерноград, 1981- 189 с.

92. Сенькевич, А.А. Повышение эффективности функционирования посевного машинно-тракторного агрегата путем установки в трансмиссию трактора класса 1,4 упругодемпфирующего механизма: дис. ... канд. техн. наук: зерноград, 2008 - 179 с.

93. Грунауэр, А.А. Исследование фрикционного привода регулятора топливного насоса / А.А. Грунауэр, Б.Б. Чагар, В.А. Диков // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1961. - №1. - С.22-29,

94. Болоев, П.А. Повышение эффективности использования трактора в составе сельскохозяйственного МТА путем стабилизации цикловой подачи топлива.: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Челябинск, 1984- 23 с.

95. Сидоров, М.В. Упругодемпфирующие свойства транспортно-технологического модуля в составе сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. - №10-2 (41). – С.119-121.

96. Кузнецов, Н.Г. Составление математических моделей машинно-тракторных агрегатов с упругими звеньями в сочленениях и их исследование методами теории случайных функций: Учебное пособие / Н.Г. Кузнецов, В.Г. Кривов, Ю.П. Дегтярев, Г.И. Жидких. - Волгоград, 1989. – 101 с.

97. Жутов, А.Г. Математическая модель МТА / В.И Авромов, А.А. Карсаков // Тракторы и сельхозмашины. - 2010. -№2. - С. 24-25.

98. Панков, А.В. Повышение эффективности использования МТА за счет применения пневмогидравлического упругодемпфирующего привода ведущих колес трактора класса 1,4: дис. ... канд. техн. наук: Воронеж, 2009- 143 с.

99. Ксенович, И.П. Тракторы: Проектирование, конструирование и расчет: Учебник / И.П.Ксенович, В.В.Гуськов, И.Ф.Бачеров и др. – М.: Машиностроение, 1991. - 554 с.

100. Кравченко, В.А. Повышение эффективности функционирования сельскохозяйственного машинно-тракторных агрегатов на базе колесных тракторов: дис. ... докт. техн. наук: зерноград, 2012- 437 с.

101. Кравченко, В.А. Математическая модель машинно-тракторного агрегата с УПД в трансмиссии трактора / В.А. Кравченко, Л.В. Кравченко, В.В. Серегина // Журнал Кубанского ГАУ. - 2014.- №103. – С.251-261.

102. Кравченко, В.А. Повышение динамических и эксплуатационных показателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов: монография / В.А. Кравченко. – зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 224 с.

103. Яровой, В.Г. Шина как упругодемпфирующее звено сельскохозяйственного трактора / В.Г. Яровой, А.П.Шарапов. // Вестник аграрной науки Дона. – зерноград.– 2010. - №3 – С. 25-30.

104. Лурье, А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 1970. – 375 с.

105. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения \ Г. Дженкинс, Д. Ваттс.- М.: Мир, 1971, выпуск 1.- 316 с.

106. Вентцель, Е.С. Теория вероятности и ее инженерное приложение / Е.С. Вентцель. М.: Наука, 1988. – 489 с.

41.ГОСТ-20915-75. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1975.

116. ГОСТ 23729-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированных машин. - М.: Изд-во стандартов, 1988.

117. ГОСТ 24055-80. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационной технологической оценки. - М.: Изд-во стандартов, 1980.

118. ГОСТ 7057-86. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1991.

120. Осиненко, П.В. Совершенствование методики обработки данных испытаний наземных транспортных средств // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. - №7.- С. 19-22.н

121. Сидоров, В.Н. Повышение производительности машинно-тракторного агрегата применением промежуточного энергетического модуля / В.Н. Сидоров, О.В. Локтик, М.В. Сидоров, // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – Брянск: Изд-во БГСХА, 2002. –С. 109-112.

122 Сидоров, М.В. Обеспечение оптимальных режимов загрузки тракторного двигателя применение ЦАП-АЦП / М.В. Сидоров, Д.А. Безик, И.С. Лабузько, // Повышение производительности и эффективности использования машинно-тракторного парка и автотранспорта. - С-Пб.: Изд-во С-ПбГАУ, 2002. –С. 205-207.

123 Сидоров, М.В. Моделирование энергетических показателей двигателя тягово-приводного агрегата при вероятностной нагрузке // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – Брянск:

Издательство БГСХА, 2003. –С. 97-102.

124 Сидоров, М.В. Повышение производительности машинно-тракторного агрегата применением ведущих колес сельхозмашины / М.В. Сидоров, В.А. Воронин // Молодые ученые – аграрной науке и производству. – Брянск: Издательство БГСХА, 2003. –С. 110-111.

125 Сидоров, В.Н. Проблемы повышения эффективности использования трактора в составе сельскохозяйственного МТА / В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров, В.А. Воронин // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 2-4 декабря 2003 г., т.1.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003 –С. 235-237.

126 Сидоров, В.Н. Повышение эффективности использования энергонасыщенного трактора в составе сельскохозяйственного МТА / В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров, В.А. Воронин, М.М. Иванюга // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо - и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 7-9 декабря 2004 г., т.1.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. –С. 230-231.

127 Сидоров, М.В. Формирование реализации внешней нагрузки как случайной функции // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо - и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 6-8 декабря 2005 г., т.1.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. –С. 177-178.

128. Сидоров, М.В. Методика исследования тягово-технологического модуля / М.В. Сидоров, В.А. Воронин, В.С. Федоров // Научные технологии в приборо-и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 5-7 декабря 2006 г., т.1.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. –С. 126-128.

129 Сидоров, М.В. Моделирование работы трактора в среде simulink / М.В. Сидоров, А.А. Рогоза // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо - и машиностроении: Материалы региональной научно-технической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 20-22 апреля 2007 г., т.1.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. –С. 163-164.

130 Сидоров, М.В. Моделирование работы регулятора топливного насоса высокого давления в среде simulink / М.В. Сидоров, В.А. Воронин, И.В. Лисовский // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо - и машиностроении: Материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 20-22 апреля 2007 г., т.1.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. –С. 155-156.

131. Осиненко, П.В. Усовершенствованная измерительная система для наземно-транспортных средств / П.В. Осиненко, В.А. Воронин, М.В. Сидоров // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2012. - №1. – С.27-29.

132. Кутьков, Г.М. Теория и расчет полноприводного трактора / Г.М. Кутьков, А.А. Соловечик, М.В. Сидоров // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. - №2. – С.8-14.

133. Кутьков, Г.М. Тяговый расчет трактора тягово-энергетической концепции // Г.М. Кутьков, М.В. Сидоров // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. - №4. – С.13-18.

134. Сидоров, М.В. Измерительная система для исследования упругодемпфирующих свойств транспортно-технологического модуля / // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. -№10-5. – С.187-193.

135. Осиненко, П.В. Динамическая модель модульного энергетического средства / П.В. Осиненко, М.В. Сидоров, Г.М. Кутьков, В.Н. Сидоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. - №10-5. – С.187-193.

136. Кутьков, Г.М. Исследование демпфирующих свойств транспортно-технологического модуля сельскохозяйственного трактора / Г.М. Кутьков, В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров // Современные проблемы науки и образования. – 2015. - №2-1. – С. 197. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20808>.

137. Кутьков Г.М. Расчет мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции/ Г.М. Кутьков, В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров // Электронный журнал: наука, техника и образование, 2016, №2 (6). – С.37-46. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/0d44dc9c8f00efabcb16c065f294ff41.pdf>.

138. Der Nachfolger des MB Trac last noch auf sich warten// Landtechnic. -1989. - №7/8. - P. 22-24.

139. Van Putten, S. Improvement of handling characteristics of “eco”-tires through measures within the wheel subsystem / S. Van Putten, J. Kubenz, H. Abel, G.Prokop, R. Clauß. // FISITA World Automotive Congress, Maastricht, 2.-6. Juni 2014. - P. 1-10.

140. Jokiniemi, T. Simple and cost effective method for fuel consumption measurements of agricultural machinery / T. Jokiniemi, H. Rossner, J. Ahokas // Agronomy Research Biosystem Engineering Special Issue. – 2012. P. 97 – 107.

141. Xu, C. Field real-time testing system for measuring work dynamic parameters of suspension agricultural implement / C. Xu, L. Li, D. Zhao, X. Li// Nongye Jixie Xuebao / Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery Volume 44, Issue 4, April 2013. P. 83-88



## Приложение А

## Программа построения целевой функции минимизации колебаний момента на оси колеса модуля и нахождения аргументов при минимуме целевой функции

Установка пределов и шага изменения параметров

```
[ C912M, K912M ] = meshgrid([ 50000 : 10000 : 200000 ], [ 1000 : 100
: 4000 ]);
CF=0;
for m=1:length(C912M(1,:))
    for k=1:length(K912M(:,1))
        c912=C912M(1,m);
        k912=K912M(k,1);
        ishodnye_dannye_poverkhnost;
        rresult1;
        CelevayaFun;
        CF(m,k)=F;
    end
end
figure;
surf(C912M, K912M,CF')
xlabel('c912');
ylabel('k912');
[row,col]= find(CF'==min(min(CF')));
c912min=C912M(row,col)
k912min=K912M(row,col)
```

Исходные данные для расчета ishodnye\_dannye\_poverkhnost;

```
fchast=f(2:151);
w=2*pi*fchast;
dw=fchast(2)-fchast(1);
s=j*w;
J9=80;
J12=40;
Q1=J9*s.^2+k912*s+c912;
Q2=J12*s.^2+k912*s+c912;
P1=k912*s+c912;
W=(P1.* P1-Q1* Q2)./(P1.*(P1-Q1));
Aw2=abs(W).^2;
```

Определение спектральной плотности функции отклика rresult1;

```
SnnM_kol_tr155_162_poverch=(SnnMsmkrtr155_162(1:150)).*abs(W.^2);
Определение целевой функции CelevayaFun;
D=sum(SnnM_kol_tr155_162_poverch)*dw;
K=max(SnnM_kol_tr155_162_poverch)/D;
F=D+K;
```

Расчет спектральной плотности момента касательных сил взаимодействия колес технологического модуля с почвой

```
close all
fchast=f(2:151);
w=2*pi*fchast;
s=j*w;
J9=80;
J12=40;
k912=1800;
c912=1/0.852*1e5;
Q1=J9*s.^2+k912*s+c912;
Q2=J12*s.^2+k912*s+c912;
P1=k912*s+c912;
Snn-
Msumtr155_162=SnnMlev_kol_modt155_162(1:150)+SnnMprav_kol_modt155_162(1:150);
W=(P1.*(P1-Q1)./(P1.* P1-Q1* Q2));
SnnMsmkrtr155_162=(SnnMsumtr155_162(1:150)') .*abs(W.^2);
```

Исходные данные и результаты расчетов нахождения целевой функции

Name	Value
Aw2	1x150 double
C811M	31x16 double
c912	200000
c912min	120000
CF	16x31 double
col	8
Cop	1.1737e+05
D	1.2279e+06
dw	0.1429
f	1x14000 double
F	6.8336e+09
fchast	1x150 double
J12	40
J6	20
J9	80
k	31
K	0.6967
K811M	31x16 double
k912	4000
k912min	1800
Kop	1800
L	6.8324e+09
m	16
M_kol_modt155_162	14001x1 double
Mlev_kol_modt155_162	14001x1 double
Mprav_kol_modt155_162	14001x1 double
N	14001
P1	1x150 complex double
Q1	1x150 complex double
Q2	1x150 complex double
RnnMlev_kol_modt155_162	14000x1 double
RnnMprav_kol_modt155_162	14000x1 double
row	9
Rx	28003x1 double
Rx_prav_polovina	14000x1 double
s	1x150 complex double
SnnMlev_kol_modt155_162	14000x1 double
SnnMprav_kol_modt155_162	14000x1 double
SnnMprav_zad_kol_trakt155_162	14000x1 double
SnnMsmkrtr155_162	1x150 double
SnnMsumtr155_162	150x1 double
Sx	14000x1 double
T	510500x1 double
tau	1x14000 double
w	1x150 double
W	1x150 complex double
x	14001x1 double

**Приложение Б****Программа построения целевой функции минимизации колебаний усилия на навеске трактора и нахождения аргументов при минимуме целевой функции**

Установка пределов и шага изменения параметров

```
[ C112M, K112M ] = meshgrid([ 50000 : 10000 : 300000 ], [ 1000 : 1000 : 4000 ]);
```

```
CF=0;
```

```
for m=1:length(C112M(1,:))
    for k=1:length(K112M(:,1))
        c112=C112M(1,m);
        k112=K112M(k,1);
        ishodnye_dannye_poverkhnost;
        rresult1;
        CelevayaFun;
        CF(m,k)=F;
    end
end
```

```
end
```

```
figure;
```

```
surf(C112M, K811M, CF')
```

```
xlabel('c122');
```

```
ylabel('k122');
```

Нахождение параметров при минимуме целевой функции

```
[row,col]= find(CF'==min(min(CF')));
```

```
C112min=C112M(row,col)
```

```
K112min=K112 M(row,col)
```

Исходные данные для расчета ishodnye\_dannye\_poverkhnost;

```
fchast=f(2:151);
```

```
w=2*pi*fchast;
```

```
dw=fchast(2)-fchast(1);
```

```
s=j*w;
```

```
g=9.81;
```

```
r=0.72;
```

```
m0=1450;
```

```
Rm=m0*g;
```

```
beta=25;
```

```
Q1=m0*s.^2;
```

```
Q2=Rm+(k122*s+c122)*r;
```

```
P1=(k122*s+c122);
```

```
P2=s+beta;
```

```
W=(Q1.*P2-P1)./Q2);
```

```
Aw2=abs(W).^2;
```

Определение спектральной плотности функции отклика rresult1;

```
SnnPkr_tr155_162_poverch=(
```

```
SnnPkr_modt155_162(1:150)'+(SnnMsmkrtr155_162(1:150)).*abs(W.^2);
```

Определение целевой функции CelevayaFun;

```
D=sum(SnnPkr_tr155_162_poverch)*dw;
```

```
K=max(SnnPkr_tr155_162_poverch)/D;
```

```
F=D+K;
```

## Приложение В

Значения постоянных коэффициентов уравнений двигателя Д243 с ТНВД

№	Коэффициенты	Обозначение	Единицы измерения	Значение
1	2	3	4	5
1.	Момент инерции двигателя	$J_1$	$кг \cdot м^2$	2,8
2.	Коэффициенты регрессии уравнений двигателя	$a_0$ $a_1$ $a_2$ $a_3$ $a_4$ $a_5$ $b_0$ $b_1$ $b_2$ $b_3$ $b_4$ $b_5$	$H \cdot м$ $H \cdot м \cdot с$ $H \cdot м \cdot с^2$ $H \cdot м / мм$ $H \cdot м \cdot с / мм$ $H \cdot м / мм^2$ $г / кДж$ $г \cdot с / кДж$ $г \cdot с^2 / кДж$ $г / (кДж \cdot мм)$ $г \cdot с / (кДж \cdot мм)$ $г / (кДж \cdot мм^2)$	187,235 1,07554 $-3,39733 \cdot 10^{-3}$ -28,1077 $-5,41269 \cdot 10^{-3}$ -2,47209 0,0926257 $3,00036 \cdot 10^{-4}$ $9,53763 \cdot 10^{-7}$ -0,0295186 $5,02435 \cdot 10^{-5}$ $7,13964 \cdot 10^{-3}$
3.	Отклонение рейки ТНВД	$h$	мм	$3,57 \cdot z$
4.	Коэффициент поддерживающей силы	$A(\tau)$	$H \cdot с / мм$	0,00195
5.	Передаточное число привода вала регулятора	$i_p$	-	2
6.	Приведенная к муфте жесткость пружины регулятора	$c_p$	$H / мм$	28,2
7.	Приведенная к муфте жесткость пружины корректора	$c_k$	$H / мм$	287
8.	Усилие затяжки пружины регулятора	$F(\gamma)$	$H$	257,88
9.	Начальное усилие затяжки пружины корректора	$F_{k0}$	$H$	257,88

УТВЕРЖДАЮ



Директор

КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана

А.В. Царьков

6 2016г.

## СПРАВКА

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
в учебном процессе Калужского филиала МГТУ имени Н.Э. Баумана

Результаты диссертационной работы Сидорова Максима Владимировича «Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата за счет применения технологического модуля с ведущими двигателями для трактора тягового класса 1.4», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, включены в материалы лекционного курса и лабораторных работ дисциплин «Тракторы и автомобили», «Эксплуатация машинно-тракторного парка» изучаемых студентами специальности 110301.65 – Механизация сельского хозяйства и дисциплин «Теория автомобиля и трактора», «Эксплуатация и ремонт автомобиля и трактора», «Технологические свойства трактора» специальности 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства, а также при выполнении НИРС и выпускных квалификационных работ.

В частности, задействованы материалы диссертационной работы, связанные с методикой расчета мощности энергонасыщенного трактора и комплектования МТА на базе тракторов с технологическим модулем, что позволило повысить уровень преподавания данных дисциплин и дать студентам более глубокие знания в области эксплуатации МТА и энергонасыщенных тракторов.

Зам. заведующего кафедрой К4-КФ  
«Автомобиле- и тракторостроение»,  
к.т.н., доцент

А.И. Пономарев

**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО Брянский государственный  
аграрный университет, доктор  
сельскохозяйственных наук, профессор  
В.Е. Ториков  
«17» 06 2016 г.

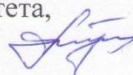
**СПРАВКА**

о внедрении результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук в учебном процессе ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет

Результаты диссертационной работы Сидорова Максима Владимировича «Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата за счет применения технологического модуля с ведущими движителями для трактора тягового класса 1,4», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, включены в материалы лекционного курса и лабораторных работ дисциплин «Тракторы и автомобили», «Эксплуатация МТП», изучаемых студентами при подготовке бакалавров по направлению 35.03.06.- Агроинженерия и выпускных квалификационных работ.

Используются материалы диссертационной работы, по расчету мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции, моделирование динамических процессов трактора и комплектование МТА с учетом технологического модуля, что позволило повысить уровень преподавания данных дисциплин и дать студентам более глубокие знания в области повышения технологических свойств техники сельскохозяйственного назначения и качества ее эксплуатации.

Декан инженерно-технологического факультета,  
доктор технических наук, профессор



А.И. Купреенко



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА**  
 имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА  
 (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)  
**КАЛУЖСКИЙ ФИЛИАЛ**

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Калужского филиала

РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

С.В. Золотарев

« 6 » 09 2016г.

**СПРАВКА**

о внедрении результатов диссертации на соискание ученой степени  
 кандидата технических наук в учебном процессе  
 Калужского филиала РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

Результаты диссертационной работы Сидорова Максима Владимировича «Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата за счет применения технологического модуля с ведущими движителями для трактора тягового класса 1.4», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, включены в материалы лекционного курса и лабораторных работ дисциплин «Тракторы и автомобили», «Эксплуатация машинно-тракторного парка», «Технологические свойства техники сельскохозяйственного назначения», изучаемых студентами при подготовке бакалавров по направлению 35.03.06 – Агроинженерия и выпускных квалификационных работ.

В частности, задействованы материалы диссертационной работы, связанные с методикой расчета мощности и веса энергонасыщенного трактора и комплектования МТА на базе тракторов с технологическим модулем, что позволило повысить уровень преподавания данных дисциплин и дать студентам более глубокие знания в области повышения технологических свойств техники сельскохозяйственного назначения и ее эксплуатации.

Декан агрономического факультета  
 доцент

С.Д. Малахова

УТВЕРЖДАЮ  
Председатель СХА  
«Колхоз «Маяк»  
Еремеев В.И.  
« 16 » \_\_\_\_\_ 2015 г.



## АКТ

о внедрении результатов  
научно-исследовательской работы

Результаты научно-исследовательской работы Сидорова М.В. по теме «Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата за счет применения технологического модуля с ведущими движителями для трактора тягового класса 1,4», выполняемой под руководством к.т.н. Алакина В.М. внедрены на предприятии по производству сельскохозяйственной продукции «Сельскохозяйственная артель «Колхоз «Маяк».

Сельскохозяйственная артель «Колхоз «Маяк» предоставила производственные площади для проведения испытаний экспериментального образца технологического модуля. В период с 2009 по 2015 год на предприятии с помощью экспериментального образца технологического модуля были проведены лабораторно-полевые эксперименты и эксплуатационные испытания. За время эксплуатационных испытаний выполнена обработка почвы на площади 20 (двадцать) гектаров тяжелой бороной БДТ-7.

Ожидаемый годовой экономический эффект от использования в «Сельскохозяйственной артели «Колхоз «Маяк» технологического модуля в составе одного машинно-тракторного агрегата составит 33,33 тыс. рублей.

Считаем целесообразным рекомендовать применение данного технологического модуля в сельскохозяйственных предприятиях и фермерских хозяйствах страны.





“УТВЕРЖДАЮ”

Глава КФХ “Ягодное”

*В.Н. Ожерельев* В.Н. Ожерельев

“15” *сентября* 2006 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты научно-исследовательской работы Кутькова Г.М., Сидорова М.В., Голубиной С.В. и Rogozy A.A.. “Создание и внедрение модульных энерготехнологических средств сельскохозяйственного назначения переменного тягового класса” внедрены в крестьянском (фермерском) хозяйстве “Ягодное»” в 2006 г.

На основании результатов исследований, полученных при выполнении работы, в крестьянском (фермерском) хозяйстве “Ягодное»” была выполнена глубокая плантажная вспашка под закладку плантации ягодных кустарников (малина, смородина) на площади 5 (пять) гектар.

Члены фермерского хозяйства

*Н.В. Ожерельева*  
*М.В. Ожерельева*

Н.В. Ожерельева

М.В. Ожерельева