

На правах рукописи



ГУБАЙДУЛИН ДАНИЯР САМАТОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЧИЗЕЛЬНО-ДИСКОВОГО
АГРЕГАТА ЗА СЧЕТ АКТИВАЦИИ РАБОЧИХ СЕКЦИЙ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет»

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент
Косульников Роман Анатольевич

Официальные оппоненты: **Васильев Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», кафедра «Робототехника и прикладная механика», заведующий кафедрой;

Василенко Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», кафедра «Прикладная механика», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Аграрный научный центр «Донской»

Защита диссертации состоится « 14 » 2024 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.505.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова» по адресу: 358000, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. А.С. Пушкина, д. 9, ауд. 102. С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «КалмГУ» и на официальных - www.kalmgu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Курепина
Наталья Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из главных задач в технологиях производства сельскохозяйственных культур является подготовка почвенного фона. Данная составляющая технологического процесса направлена на формирование благоприятных почвенных условий для развития и роста семенного материала, сохранение и повышение плодородия почвенного фона.

В качестве основного критерия при комплектовании почвообрабатывающего агрегата принято использовать минимум приведенных затрат на выполнение заданной технологической операции обработки почвы. Данный критерий по своей сути является интегральным показателем, характеризующим: металлоемкость машинно-тракторного агрегата (вес трактора и почвообрабатывающего орудия); расход топлива; затраты труда и сохранение плодородия почвенного фона.

К основным направлениям снижения приведенных затрат можно отнести изменение принятой технологии возделывания сельскохозяйственных культур (нулевая или минимальная технология); оптимизацию параметров машинно-тракторного агрегата (эксплуатационная масса трактора, ширину захвата, скорость движения); использование комбинированных агрегатов; активация рабочих секций почвообрабатывающих машин за счет применения вибраций и колебаний.

Достоинством последнего направления считается его всеобъемлющий характер, т. к. данное направление может развиваться как отдельно, так и комбинированно с любыми другими мероприятиями, направленными на минимизацию приведенных затрат.

В связи с этим повышение производительности комбинированных машинно-тракторных агрегатов за счет активации рабочих секций почвообрабатывающего орудия является актуальной задачей, составляющей основу данного исследования.

Степень разработанности темы

Исследованием процессов взаимодействия упругозакрепленной рабочей секции почвообрабатывающего орудия с почвенным фоном занимались следующие отечественные ученые: *С.А. Васильев, Д. С. Гатич, И. В. Игнатенко, С. В. Левицкий, В.А. Эвиев, Н. И. Джабборов, А. С. Кушнарев, Н. Г. Кузнецов, С.И. Камбулов, Г. Н. Синеоков, Е. А. Дубровский, А. Б. Кудзаев, В. Р. Мухамедов, И. В. Трофимов, С. Г. Мударисов, М. А. Донченко, С. Е. Федоров, С. Ю. Дмитриев, С.В. Василенко и др.*

В работах перечисленных авторов установлена взаимосвязь между жесткостью крепления рабочей секции и её тяговым сопротивлением, при этом в качестве упругого элемента в креплении рабочей секции выступали либо пружины цилиндрической формы, либо конструкция крепления секции почвообрабатыва-

ющего орудия сама обеспечивала необходимую подвижность системы. Такие конструктивные элементы обладают существенным недостатком – сложностью регулировки жесткости системы, что резко снижает эффективность её работы в изменяющихся условиях нагружения. Использование в качестве упругих элементов гидравлических систем позволяет повысить эффективность применения вибрации, а самое главное, создавать на их основе адаптивные системы, позволяющие автоматически настраиваться системе на оптимальные режимы работы.

Объект исследования – чизельно-дисковый агрегат с гидравлической защитой рабочих секций.

Предмет исследования – закономерности изменения эксплуатационных показателей чизельно-дискового агрегата на резонансных режимах работы рабочих секций.

Целью исследования является – повышение производительности чизельно-дискового агрегата, оборудованного гидравлической защитой чизельных секций, за счет генерации вибрации секций.

Задачи исследования:

1) изучить опыт применения вибрации рабочих органов почвообрабатывающих орудий с точки зрения снижения энергоемкости технологических операций и конструктивного исполнения узлов крепления рабочих органов;

2) теоретически обосновать основные параметры гидравлической защиты секций чизельно-дискового орудия, позволяющие настраивать секции на резонансный режим работы;

3) разработать математическую модель движения секции чизельно-дискового орудия в обрабатываемой среде, на основании которой оценить возможность возникновения устойчивых колебаний в системе «рабочая секция-почва»;

4) разработать адаптивную систему регулирования жесткости в гидравлической системе защиты секций чизельно-дискового орудия;

5) провести экспериментальные исследования чизельно-дискового орудия с гидравлической защитой секций. В результате которых установить влияние резонансного режима работы секций на энергетические показатели агрегата;

6) обосновать экономическую целесообразность использования резонансного режима работы секций чизельно-дискового орудия.

Научная новизна работы заключается:

— в обосновании применимости конструкции гидравлической защиты секций чизельно-дискового орудия в качестве системы способной обеспечивать настройку секций на резонансный режим работы;

— разработке адаптивной системы регулирования жесткости в гидравлическом контуре защиты секций чизельно-дискового орудия;

— результатах теоретических и экспериментальных исследований оценки эффективности применения резонансного режима работы секций чизельно-дискового орудия.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели движения секции чизельно-дискового орудия в обрабатываемой среде, позволяющей оценить возможность возникновения устойчивости колебаний в системе «рабочая секция-почва».

Практическая значимость работы заключается в разработке адаптивной системы регулирования жесткости в гидравлической системе защиты секций чизельно-дискового орудия.

Методология и методы исследования

Методология исследования базировалась на поиске и обосновании критериальных пороговых ограничений, способствующих разработать эффективные методы повышения эксплуатационных показателей объекта исследования.

Методы исследования базируются на теоретическом обосновании предложенных мер, выполненного с применением классических законов земледельческой механики, прикладной механики, теории колебаний твердых тел и методов статистической обработки экспериментальных данных, и экспериментальной их верификацией в реальных условиях эксплуатации.

Положения выносимые на защиту:

- 1) теоретическое обоснование основных параметров гидравлической защиты секций чизельно-дискового орудия, позволяющих настраивать секции на резонансный режим работы;
- 2) математическая модель движения секции чизельно-дискового орудия в обрабатываемой среде;
- 3) адаптивная система регулирования жесткости в гидравлической системе защиты секций чизельно-дискового орудия;
- 4) результаты экспериментальных исследований чизельно-дискового орудия с гидравлической защитой секций на резонансном режиме работы.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов проведенного исследования подтверждается использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры в процессе проведения натурных испытаний, а также высокой сходимостью теоретических данных и данных, полученных экспериментальным путем.

Основные положения работы были представлены и обсуждены на конференциях различного уровня, среди них:

— Перспективные тенденции развития научных исследований по приоритетным направлениям модернизации АПК и сельских территорий в современных

социально-экономических условиях. Национальная научно-практическая конференция 15 декабря 2021 г. Волгоград.

— Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. Материалы Международной научно-практической конференции 9-11 февраля 2022 г. Волгоград.

— Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию победы в Сталинградской битве г. Волгоград, 16-17 февраля 2023 г.

— Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию со дня основания ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ 08-09 февраля 2024 г.

Структура и объем диссертации

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11.-2011 Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. Текст диссертации включает в себя: введение (введение, глава 1); основную часть (главы 2,3,4,5); заключение; список литературы. Текст диссертации представлен на 128 страницах, включает в себя 69 иллюстраций, 4 таблицы и 5 приложений.

По теме диссертационного исследования опубликовано 12 научных работ, 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 2 патента на изобретение. Объем опубликованных работ составляет 5,62 п.л., из них 2,05 п.л. принадлежит лично автору.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, показана степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, а также приведены данные по публикациям материалов исследования, описаны структура и объём диссертации.

В первой главе «Обзор работ, посвященных применению вибрации рабочих органов почвообрабатывающих машин» проанализированы кинематические и принципиальные схемы рабочих секций почвообрабатывающих машин с различным исполнением предохранительных упругих звеньев, устанавливаемых в местах крепления секций к раме орудия; представлены результаты экспериментов по оценке генерирующих способностей различных почвенных фонов и почвенных фонов с различным процентным содержанием частиц песка и глины; оценена энергетическая эффективность применения вибрации рабочего органа почвообрабатывающего орудия при обработке почв; рассмотрены конструкторские решения

упругого крепления рабочих секций в комбинированных почвообрабатывающих агрегатах; отмечены проблемные вопросы использования упругих связей в креплении рабочих секций комбинированных почвообрабатывающих машин.

По результатам литературного анализа сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе «Теоретическое обоснование возможности генерации устойчивых колебаний секций чизельно-дискового агрегата»

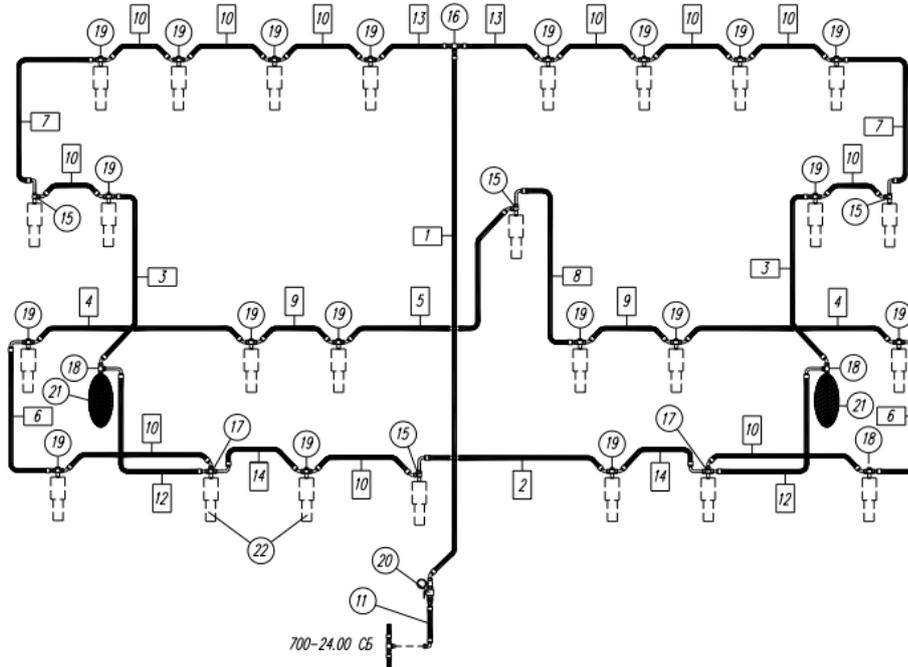


Рисунок 1 – Гидравлическая схема защиты чизельных секций ЧДА-5:
1-14 рукав гидравлический; 15-16, 18-19 тройник; 20 узел манометра;
21 гидроаккумулятор; 22 гидроцилиндр

Рассмотрена гидравлическая схема защиты чизельных стоек чизельно-дискового орудия ЧДА - 5 (рисунок 1). Показано, что при определенных условиях работы секции способны совершать вынужденные колебания под действием внешней возмущающей силы.

Аналитическая оценка генерации периодических установившихся колебаний чизельной секции на резонансном режиме

Для решения данной задачи получено дифференциальное уравнение движения отдельной секции чизельно-дискового орудия (рисунок 2), решение которого дает общее представление о возможности возникновения вынужденных колебаний секции в заданных условиях работы.

Дифференциальное уравнение рабочей секции чизельно-дискового орудия, совершающей вынужденные крутильные колебания относительно оси подвеса, имеет вид:

$$\frac{d^2}{dt^2} \varphi(t) + 2 \cdot \xi \cdot \frac{d}{dt} \varphi(t) + k_0^2 \cdot \varphi(t) = \frac{M(t)}{J_z}, \quad (1)$$

где: $\varphi(t)$ – угол поворота секции относительно оси подвеса, rad/c ;

$\xi = \frac{\eta}{2 \cdot m}$ – коэффициент затухания колебаний секции культиватора, $Гц$;

η – коэффициент линейного вязкого сопротивления почвы, $H \cdot c/m = кг/с$;

m – масса рабочего органа, $кг$;

k_0 – циклическая (круговая) частота собственных колебаний рабочего органа относительно оси подвеса (собственная частота секции), $рад/с$;

$M(t)$ – абсолютная величина возмущающего момента силы сопротивления почвы, $H \cdot м$; $M(t) = R(t) \cdot L$;

L – расстояние от режущего конца (лезвия) секции до оси подвеса (оси Oz), $м$;

$R(t)$ – результирующая сила сопротивления почвы, равная горизонтальной составляющей тягового сопротивления, H ;

J_z – осевой момент инерции культиваторной секции относительно оси подвеса (Oz), $кг \cdot м^2$.

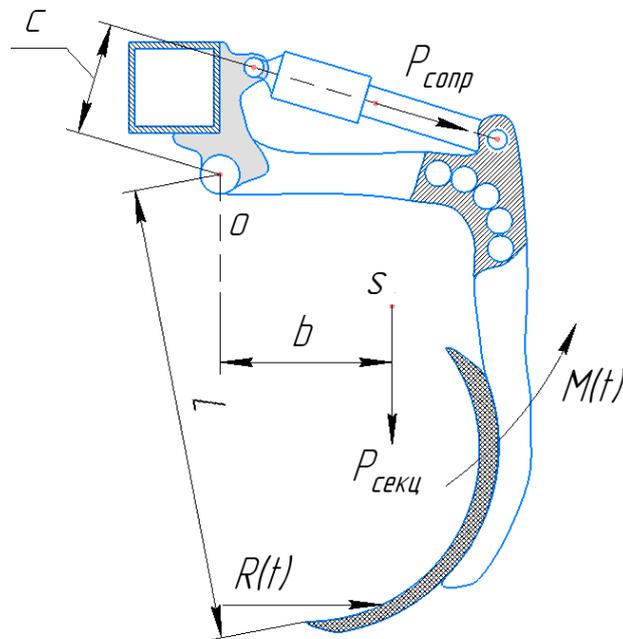


Рисунок 2 – Расчетная схема чизельной секции чизельно-дискового орудия. $\vec{R}(t)$ – результирующая сила сопротивления почвы, H

Момент $M(t)$ измерен в дискретные моменты времени: $t_s = t_0 + s \cdot \Delta t$, где $t_0 = 0$; $\Delta t = 2 \cdot 10^{-3} с$; $s = 0, 1, \dots, N$. Объем экспериментальной выборки (точек) составляет $N = 32351$. В результате вычислений получена дискретная последовательность $M_s = M(t_s)$. Реализация возмущающего момента показана на рисунке 3.

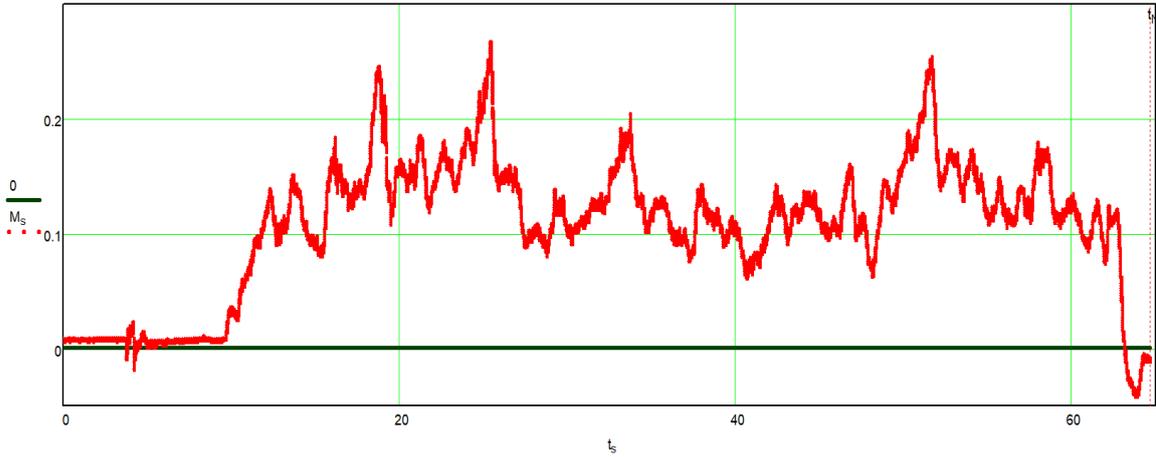


Рисунок 3 – Реализация возмущающего воздействия на чизельную секцию

Уравнение 1 решалось численно, используя метод разностной аппроксимации. В уравнении (1) непрерывная функция $\varphi(t)$ заменена дискретной последовательностью, элементы которой $\psi_s \approx \varphi(t_s)$.

Производные первого и второго порядков (угловую скорость и угловое ускорение) представлены выражениями:

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_s \approx \frac{\psi_s - \psi_{s-1}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right)_s \approx \frac{\psi_{s+1} - 2 \cdot \psi_s + \psi_{s-1}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

В результате разностной аппроксимации производных (2) и (3) дифференциальное уравнение (1) приведено к разностной схеме:

$$\frac{\psi_{s+1} - 2 \cdot \psi_s + \psi_{s-1}}{\Delta t^2} + 2 \cdot \xi \cdot \frac{\psi_s - \psi_{s-1}}{\Delta t} + \omega_0^2 \cdot \psi_s = \frac{M_s}{J_z} \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно ψ_{s+1} , получена рекуррентная формула:

$$\psi_{s+1} = \left(\frac{M_s}{J_z} - \omega_0^2 \cdot \psi_s\right) \cdot \Delta t^2 - 2 \cdot \xi \cdot (\psi_s - \psi_{s-1}) \cdot \Delta t + 2 \cdot \psi_s - \psi_{s-1} \quad (5)$$

После раскрытия скобок и перегруппировки слагаемых формула (5), получено:

$$\psi_{s+1} = \psi_s \cdot \left(2 \cdot (1 - \xi \cdot \Delta t) - \omega_0^2 \cdot \Delta t^2\right) + \psi_{s-1} \cdot (2 \cdot \xi \cdot \Delta t - 1) + \frac{M_s}{J_z} \cdot \Delta t^2 \quad (6)$$

Применяя рекурсию (5) или (6), определено угловое положение секции в последующие моменты времени. Количество шагов (итераций) примем равным объёму N экспериментальной выборки момента. Результаты расчетов углового положения стойки для выбранных начальных условий представлены на рисунке 4.

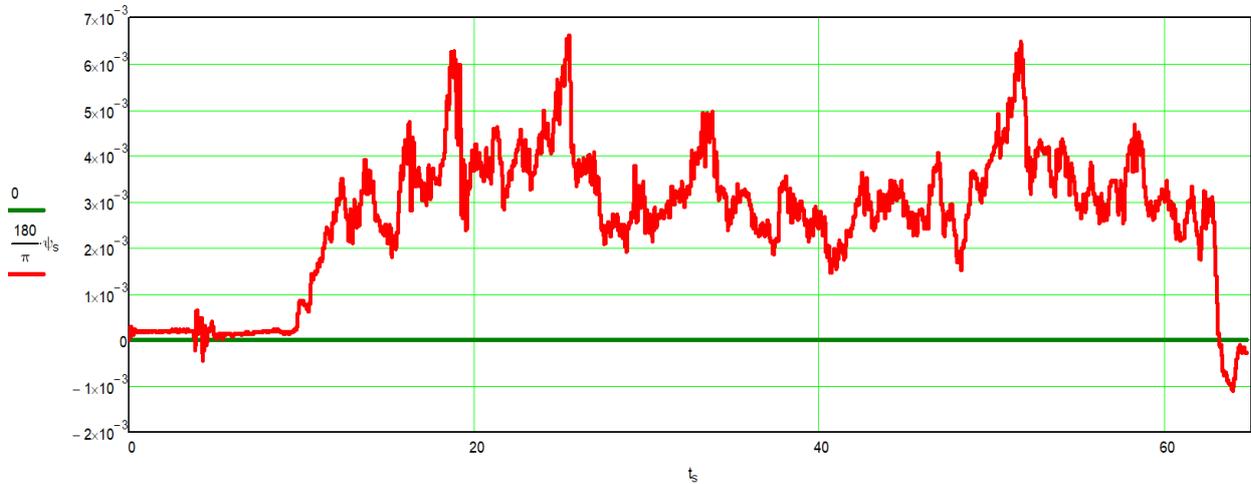


Рисунок 4 – Расчетная реализация угла (в градусах) поворота чизельной секции от времени

Модуль угловой скорости на каждом шаге определяется производной угла поворота по времени. Эта производная приближённо вычисляется с помощью конечно-разностного отношения:

$$\omega_s = \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)_s \approx \frac{\psi_s - \psi_{s-1}}{\Delta t} \quad (7)$$

Реализация угловой скорости секции показана на рисунке 5.

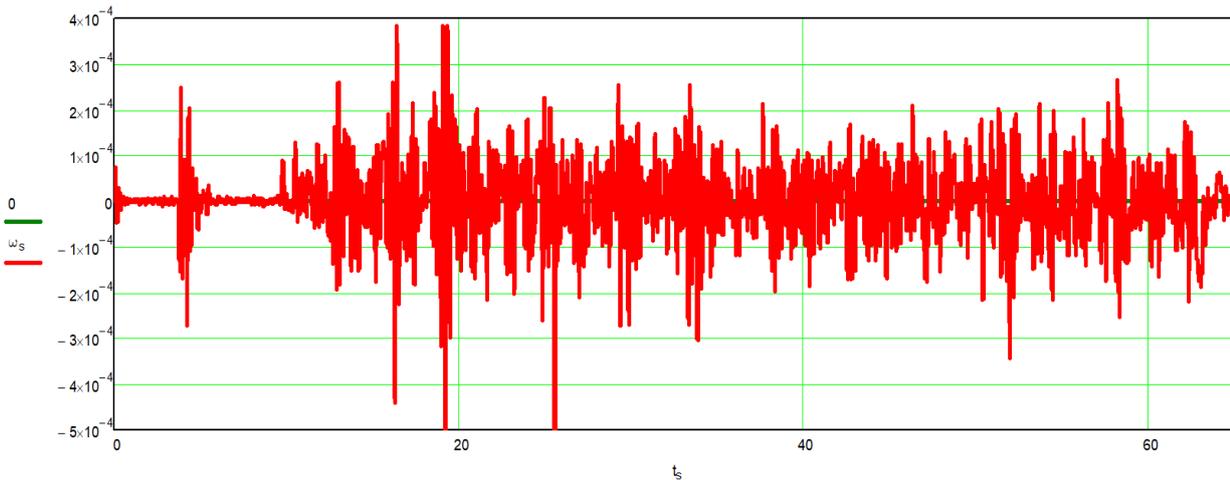


Рисунок 5 – Реализация угловой скорости секции (в рад/с) от времени

Модуль горизонтальной составляющей углового ускорения секции культиватора на каждом шаге определяется производной модуля угловой скорости секции по времени:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_s \approx \frac{\omega_s - \omega_{s-1}}{\Delta t} \quad (8)$$

Процесс изменения модуля горизонтальной составляющей углового ускорения секции показан на рисунке 6.

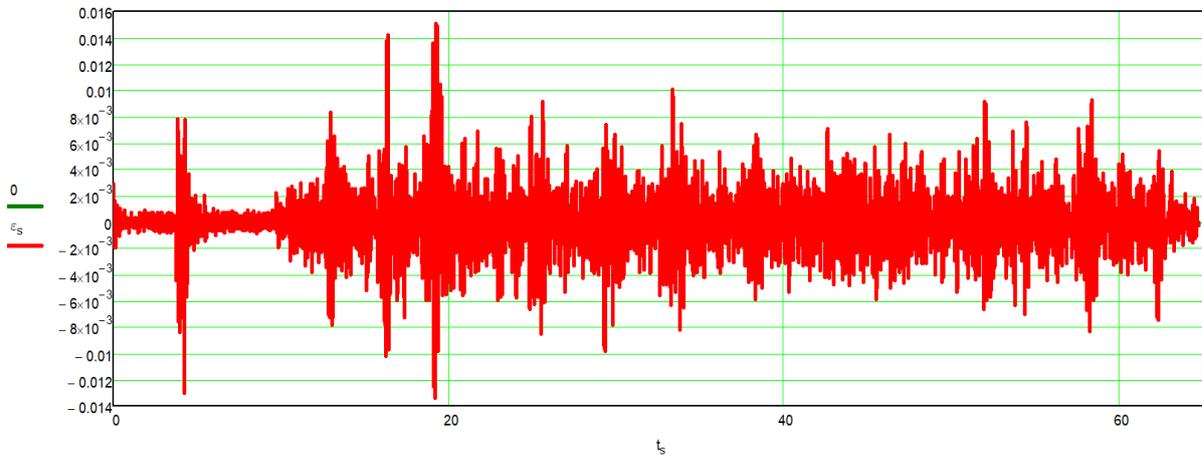


Рисунок 6 – Реализация зависимости углового ускорения чизельной секции от времени

Для дальнейшего анализа поведения рассматриваемой механической системы использован метод представления колебаний на фазовой плоскости. Фазовые траектории, соответствующие экспериментальной выборке возмущающего воздействия, представлены на рисунках 7-8.

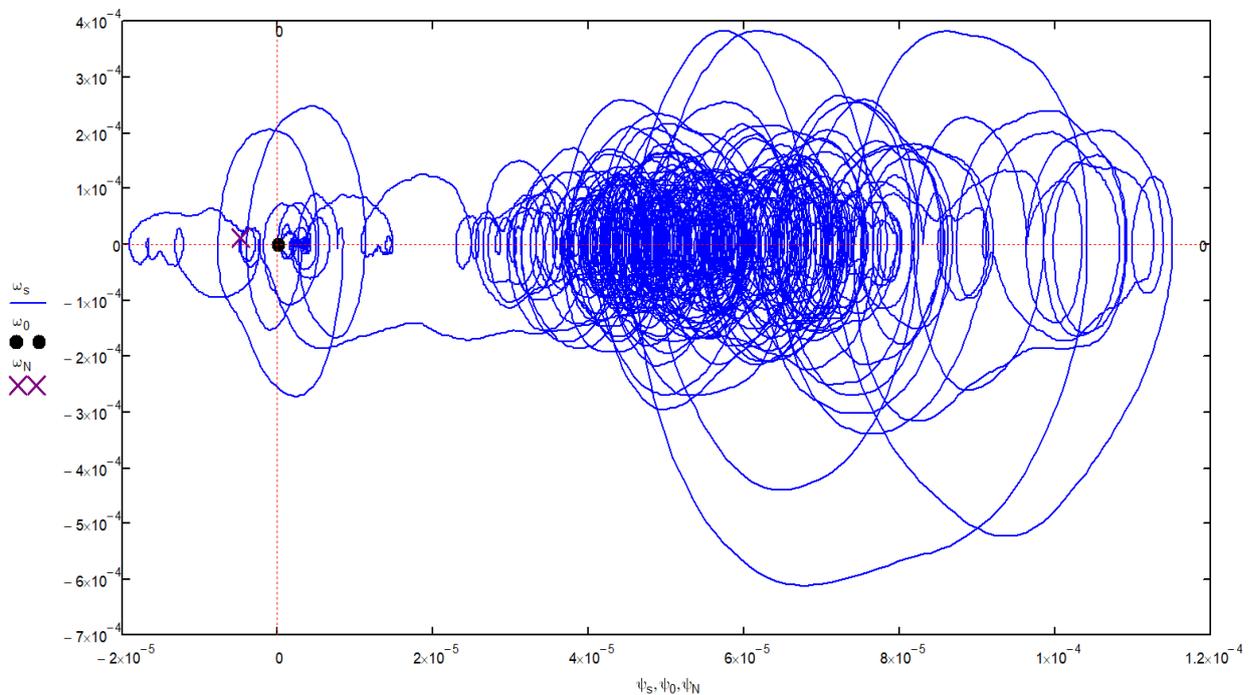


Рисунок 7 – Фазовая траектория в плоскости $\psi O\omega$ (угол поворота в радианах – угловая скорость в рад/с)

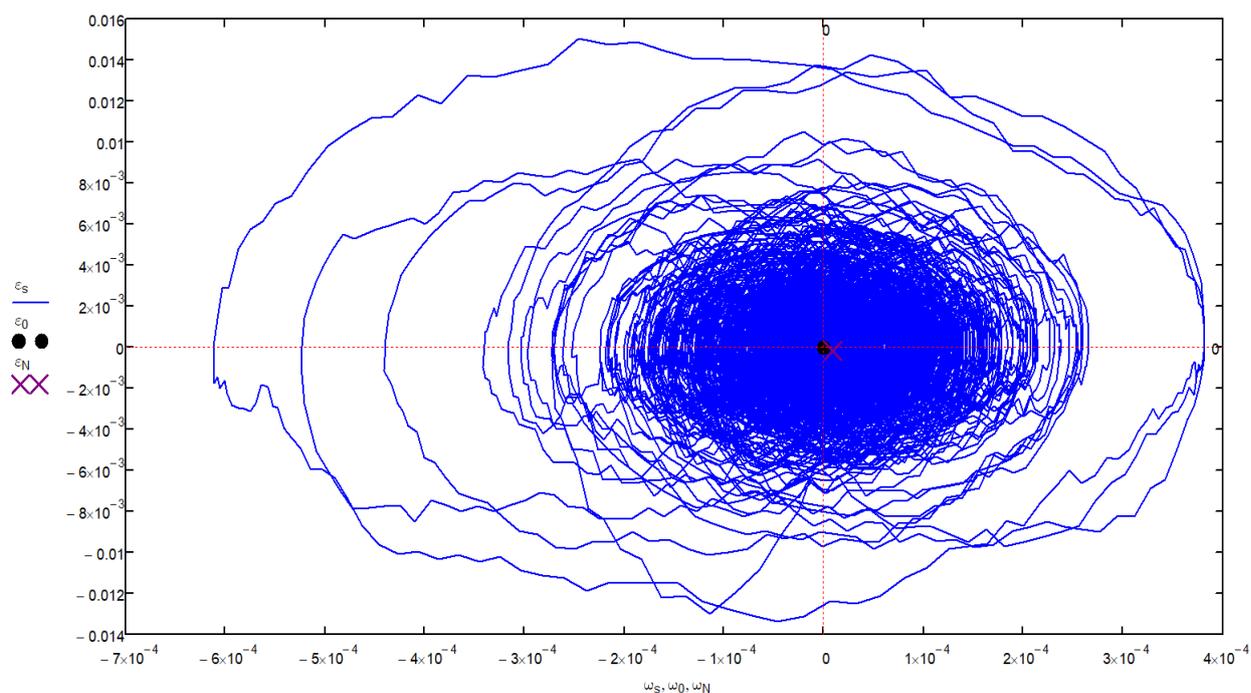


Рисунок 8 – Фазовая траектория в плоскости $\omega O \varepsilon$
(угловая скорость в рад/с – угловое ускорение в рад/с²)

Конец фазовой траектории, отмеченный символом «x», не совпадает с началом координат из-за остаточных нагрузок на секцию культиватора со стороны почвы, в которой осталась нижняя часть секции культиватора. В конце фазовой траектории остаётся деформация секции, которая характеризуется угловым смещением секции относительно исходного ненапряжённого состояния.

Сложная форма фазовой траектории является следствием неравномерности и неперIODичности возмущающих воздействий, что вызвано неравномерностью почвы.

Наличие на фазовой плоскости замкнутых фазовых траекторий (например, эллипсов в окрестностях рассмотренной описывающей точки) указывает на существование периодических движений.

Полученные фазовые портреты указывают, что в окрестностях особой точки, отвечающей минимуму потенциальной энергии, происходят периодические движения с эллиптическими фазовыми траекториями, соответствующими гармоническими колебаниями. Таким образом, рассматриваемая система может совершать близкие к гармоническому виду колебания.

В третьей главе «Программа экспериментальных испытаний чизельно-дискового агрегата» описаны программа, объект и предмет исследований, а также перечень и общий вид оборудования, использованного при испытаниях.

В качестве объекта испытаний выбран чизельно-дисковый агрегат ЧДА-5, в качестве энергетического средства трактор 4К4 Versatile 2375. (рисунок 9).



Рисунок 9 – Экспериментальный МТА

В работе предлагается гидравлическую систему защиты секций дополнить адаптивной системой регулировки давления в гидравлическом контуре, позволяющей автоматически настраивать рабочие секции на режим резонанса.

Предлагаемая адаптивная система включает в себя следующие основные блоки.

1. Тензометрическая секция чизеля. Штатная конструкция чизельной секции комплектуется датчиком ускорения (акселерометром), позволяющим в процессе работы фиксировать значения ускорения секции в продольном горизонтальном направлении.

2. Узел манометра с гидравлическим краном, оборудованным системой сервопривода. Используется штатный узел, в конструкцию которого добавлен клапан с электромагнитным управлением VAS-80NG.

3. Собственно система управления, состоящая из блока питания, микроконтроллера типа ESP8266, рисунок 10.

На предлагаемую адаптивную систему регулировки давления в гидравлическом контуре получены два патента на изобретение № 2823649 и № 2823650.

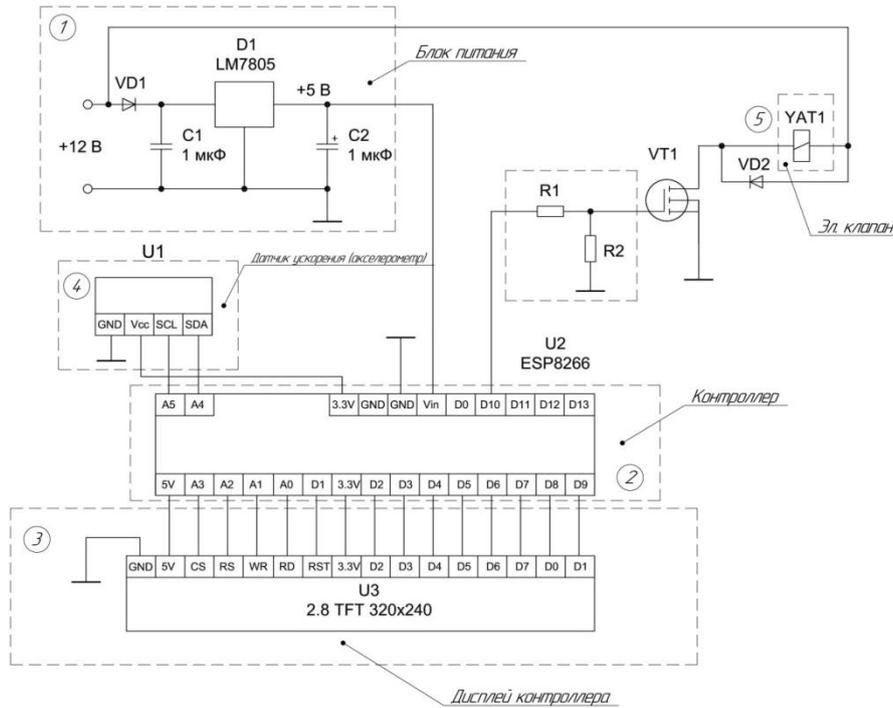


Рисунок 10 – Схема адаптивной системы управления жесткостью рабочих секций ЧДА-5

В четвёртой главе «*Результаты экспериментальных исследований чизельно-дискового агрегата при различной величине давления в контуре гидравлической защиты стоек*» приведены результаты экспериментальных исследований чизельно-дискового агрегата ЧДА-5 при различном давлении в гидравлическом контуре защиты стоек.

Спектральный анализ тягового сопротивления чизельно-дискового орудия проводился с целью сравнительной оценки динамичности процесса нагружения трактора на двух характерных режимах чизельных секций: 1 – статический режим; 2 – резонансный режим, рисунок 11.

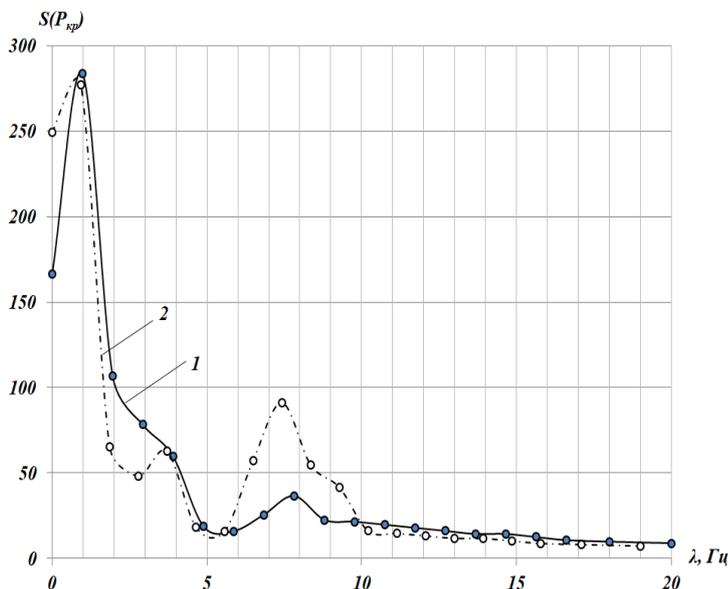


Рисунок 11 – Спектральная плотность тягового сопротивления чизельно-дискового орудия
1 – статический режим работы чизельных секций
2 – резонансный режим работы чизельных секций
Почвенный фон «залежь многолетних трав»

Анализ экспериментальных данных показывает, что при использовании резонансного режима работы процесс нагружения трактора становится более динамичным.

Результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить влияние давления в контуре гидравлической защиты секций на величину тягового сопротивления агрегата в целом, показаны на рисунке 12.

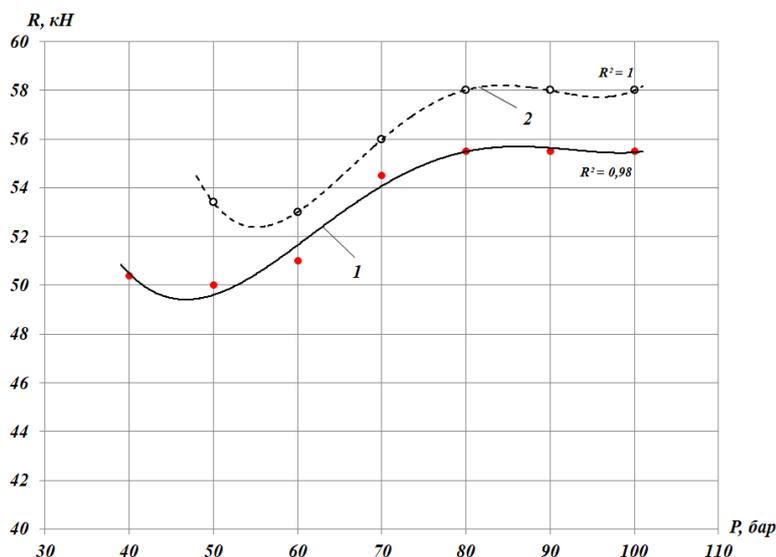


Рисунок 12 – Экспериментальная зависимость тягового сопротивления чизельно-дискового орудия от величины давления в контуре гидравлической защиты стоек

1 – почвенный фон «залежь многолетних трав»

2 – почвенный фон «дернина»

Общее снижение тягового сопротивления чизельно-дискового орудия, при таком режиме работы, составило: на почвенном фоне «залежь многолетних трав» - 9,9 %; на почвенном фоне «дернина» - 8,6%.

Анализ полученных графических зависимостей свидетельствует, что использование резонансного режима работы секции существенно влияет на величину устойчивости хода рабочего органа в вертикальной плоскости. В целом рассматриваемый диапазон величин давлений в гидравлическом контуре защиты секций обеспечивает устойчивое движение рабочего органа чизеля в вертикальной плоскости, рисунок 13. Поэтому можно отметить, что снижение силовой нагруженности чизельно-дискового орудия вызвано не выглублением рабочих секций, т.е. не уменьшением заданной глубины обработки, а за счет изменения прочностных характеристик почвы под воздействием вибрации.

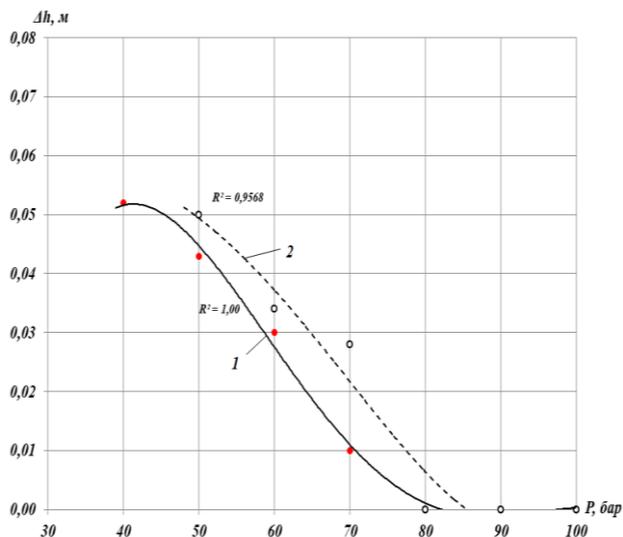


Рисунок 13 – Отклонение глубины обработки от среднего значения в функции давления в контуре гидравлической защиты чизельных стоек

1 – почвенный фон «залежь многолетних трав»

2 – почвенный фон «дернина»

На рисунке 14 приведены экспериментальные данные изменения коэффициента буксования экспериментального трактора Versatile 2375 от величины давления в гидравлическом контуре защиты секций.

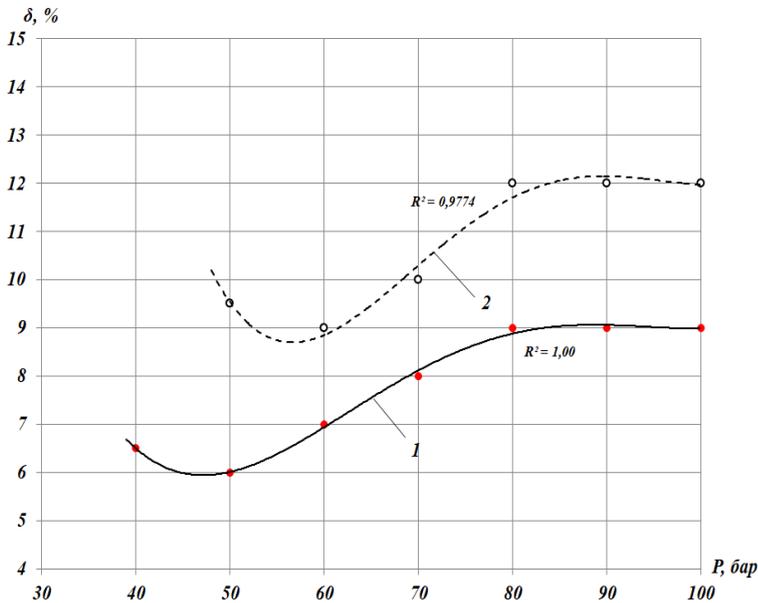


Рисунок 14 - Зависимость коэффициента буксования трактора Versatile 2375 от величины давления в гидравлическом контуре защиты секций

1 – почвенный фон «залежь многолетних трав»

2 – почвенный фон «дернина»

Общее снижение коэффициента буксования трактора при использовании резонансного режима работы составило 3%.

Использование резонансного режима работы чизельных секций приводит к снижению среднего значения тягового сопротивления чизельно-дискового орудия и повышению скорости движения агрегата, что позволяет увеличить производительность агрегата в целом, рисунок 15. Увеличение производительности чизельно-дискового агрегата составило, на почвенном фоне «залежь многолетних трав» - 12,8%; на почвенном фоне «дернина» - 9,5%.

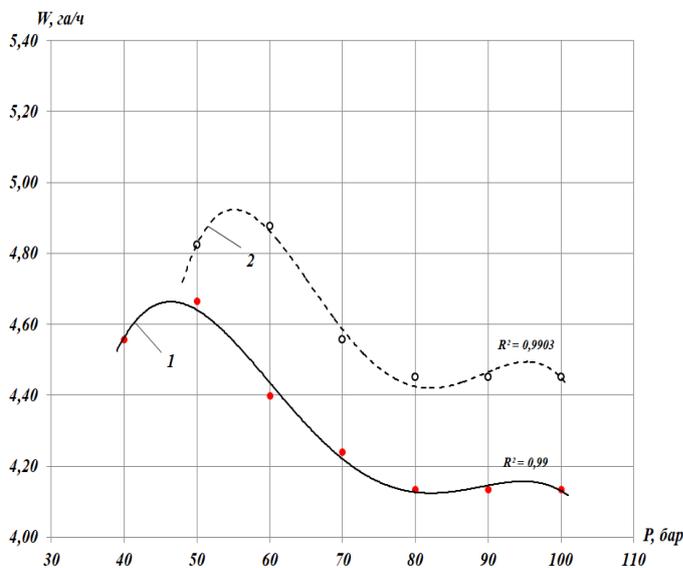


Рисунок 15 - Зависимость производительности чизельно-дискового агрегата от величины давления в гидравлическом контуре защиты секций

1 – почвенный фон «залежь многолетних трав»

2 – почвенный фон «дернина»

В пятой главе дана экономическая оценка эффективности применения резонансного режима работы рабочих секций чизельно-дискового агрегата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ конструктивных особенностей комбинированных почвообрабатывающих орудий показал, что в их конструкциях сохранены общие, принятые для отдельных почвообрабатывающих агрегатов принципы защиты механизмов и устройств, которые, в свою очередь, при определенных условиях могут рассматриваться как колебательные контуры, способные совершать вынужденные колебания при воздействии внешних нагрузок, изменяющихся во времени.

2. Полученные аналитические зависимости могут использоваться при оптимизации конструкторских параметров отдельных элементов гидравлической системы защиты чизельных стоек, при условии, что задана величина реакции почвенного фона на рабочий орган. На основании разработанных математических выражений получена общая теоретическая характеристика применяемой модели пневмогидроаккумулятора в диапазоне действующих усилий и заданных величин давления; получено аналитическое выражение, позволяющее определить величину давления в контуре гидравлической защиты секций, при котором может возникнуть резонанс системы.

3. На основании дифференциального уравнения движения отдельной секции чизельно-дискового орудия разработана математическая модель, описывающая движения секции в обрабатываемой среде. Используя метод представления колебаний на фазовой плоскости, доказано, что в окрестностях особой точки, отвечающей минимуму потенциальной энергии, происходят периодические движения с эллиптическими фазовыми траекториями, соответствующими гармоническими колебаниями, что доказывает возможность рассматриваемой системы совершать близкие к гармоническому виду колебания.

4. Предложена адаптивная система регулирования значения давления в гидравлическом контуре защиты стоек, позволяющая производить автоматическую настройку секций чизеля на резонансный режим работы.

5. Использование резонансного режима работы чизельных секций чизельно-дискового орудия позволяет:

- снизить тяговое сопротивление секции на почвенном фоне «залежь многолетних трав» на 18,2 %, на почвенном фоне «дернина» на 16%;
- снизить тяговое сопротивление чизельно-дискового орудия на почвенном фоне «залежь многолетних трав» на 9,9 %, на почвенном фоне «дернина» на 8,6%;
- снизить коэффициент буксования трактора на 3%;

- увеличить производительность чизельно-дискового агрегата на почвенном фоне «залежь многолетних трав» на 12,8%, на почвенном фоне «дернина» на 9,5%.

6. Экономический эффект от применения резонансного режима работы чизельных секций чизельно-дискового орудия составляет 63173,34 рублей на 100 гектар при обработке почвенного фона «залежь многолетних трав».

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

В сельскохозяйственных предприятиях, имеющих в составе чизельно-дисковые агрегаты, оборудованных гидравлической защитой секций, использовать предложенную адаптивную систему регулировки давления в гидравлическом контуре.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование конструкции адаптивной системы регулировки давления в гидравлическом контуре чизельно-дискового орудия. Необходимо добиться того, чтобы предлагаемая система могла работать не только в сторону уменьшения давления в гидравлическом контуре, но и в сторону его увеличения. Обеспечивая тем самым настройку системы на резонансный режим работы в широком диапазоне изменения физико-механических характеристик почвенного фона.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. Губайдулин Д. С., Швабауэр Ю. А., Гапич Д. С. Результаты экспериментальных исследований силовой нагруженности чизельного агрегата // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее проф. образование. – 2024. – № 1 (57). – С. 357-365. (0,6/0,2)

2. Гапич Д. С., Швабауэр Ю. А., Субботин С. И., Губайдулин Д. С. Снижение тягового сопротивления чизельных орудий // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее проф. образование. – 2023. – № 4 (56). – С. 398-409. (0,7/0,17)

3. Губайдулин Д.С., Гапич Д.С., Моторин В. А. Адаптивная система управления жесткостью крепления рабочих секций чизельно-дискового орудия // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2024.- Том 16, № 1.- С. 87-95. (0,7/0,23)

4. Косульников Р. А., Гапич, Д. С., Черноусов П.С., Губайдулин Д.С. Снижение силовой нагруженности почвообрабатывающего МТА за счет активации рабочих органов // Сельский механизатор. 2024. № 5. С. 14-16. (0,4/0,1)

5. Косульников Р. А., Черноусов П.С., **Губайдулин Д.С.**, Гапич Д. С. Исследование тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия с вибрирующими рабочими секциями // Сельский механизатор. 2024. № 6. С. 13-17. (0,4/0,1)

6. Гапич Д. С., Капля Е.В., Черноусов П.С., **Губайдулин Д.С.** Динамика стойки культиватора с пружинными предохранителями // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее проф. образование. – 2024. – № 3 (75). – С. 330-339. (0,72/0,23)

- в патентах РФ:

7. Патент № 2823649 Российская Федерация, СПК А01В 61/046 (2024.01); А01В 63/32 (2024.01); А01В 49/02 (2024.01). Адаптивная система управления жесткостью крепления рабочих секций чизельно-дискового орудия: № 2024104049: заявл. 16.02.2024 : опубл. 26.07.2024 / Гапич Д.С., Моторин В.А., **Губайдулин Д.С.**; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ // <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=b384b797c7abe718d13d69d7ca28295a>. (0,3/0,1)

8. Патент № 2823650 Российская Федерация, СПК А01В 61/046 (2024.01); А01В 63/32 (2024.01); А01В 49/02 (2024.01). Система регулирования жесткости крепления рабочих секций чизельно-дискового орудия: № 2024104053: заявл. 16.02.2024 : опубл. 26.07.2024 / Гапич Д.С., Моторин В.А., **Губайдулин Д.С.**; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ // <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=be51631a3444d00730bb50c1ca8a52b3>. (0,3/0,1)

- в прочих изданиях:

9. Гапич Д. С., **Гуйбадулин Д. С.**, Швабауэр Ю. А., Субботин С. И. Тяговое сопротивление глубокорыхлителя ESOLO-TIGER 870 на различных кинематических режимах. Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию победы в Сталинградской битве, г. Волгоград, 16-17 февраля 2023 г. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2024. – Том IV. – 364 с. (0,43/0,2)

10. Черноусов П. С., **Гуйбадулин Д. С.**, Швабауэр Ю. А., Субботин С. И. Технологическая адаптация почвообрабатывающего орудия к зональным условиям эксплуатации. Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий: материалы Национальной научно-практической конференции, г. Волгоград, 9 ноября 2022 г. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2023. – Том III. – С. 416-421. (0,22/0,2)

11. Гапич Д.С., **Губайдулин Д.С.**, Швабауэр Ю.А., Субботин С.И. Оптимизация геометрии рабочего органа почвообрабатывающего орудия В сборнике:

инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоградский государственный аграрный университет. Волгоград, 2023. С. 164-170. (0,42/0,21)

12. Гапич Д.С., Губайдулин Д.С., Швабауэр Ю.А., Субботин С.И. Концептуальная модель секции почвообрабатывающего орудия адаптивного принципа действия. В сборнике: Перспективные тенденции развития научных исследований по приоритетным направлениям модернизации АПК и сельских территорий в современных социально-экономических условиях. Материалы Национальной научно-практической конференции. Волгоград, 2021. С. 404-409. (0,43/0,21)

Подписано в печать ____ . ____ Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ ____ .
Издательско-полиграфический комплекс
ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ «Нива»
400002, Волгоград, Университетский пр-т, 26