

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет «Автотракторный»  
Кафедра «Колесные и гусеничные машины»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

Бондарь В.Н.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Разработка и исследование новой механической трансмиссии  
промышленного трактора

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Руководитель работы  
профессор, к.т.н.

Костюченко В. И.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор работы  
студент группы П-206

Гатауллин А.Ф.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтроллер  
доцент, к.т.н.

Дуюн В.И.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск 2017

## АННОТАЦИЯ

Гатауллин А.Ф. «Разработка и исследование новой механической трансмиссии промышленного трактора» — Челябинск: ЮУрГУ, П-206, 2017, 108 с., 28 илл., 15 табл., Библиографический список — 20 наименований, 3 листа чертежей ф. А1

Цель выпускной квалификационной работы повысить надежность, производительность и экономичность бульдозерного агрегата, а также снизить себестоимость и затраты на эксплуатацию.

В результате работы были выполнены:

- расчет на производительность бульдозерных агрегатов, для оценки и выбора наиболее эффективной моторно-трансмиссионной установки.
- расчет новой системы на крутильные колебания;
- разработан гаситель крутильных колебаний новой механической трансмиссии промышленного трактора;
- расчет на прочность элементов конструкции;
- тяговый расчет бульдозерно-рыхлительного агрегата.

Разработана технология дообработки полумуфты под тензомодуль для бесконтактной записи крутящего момента на валу упругой муфты.

Произведен анализ результатов исследования с оценкой динамических моментов и выявлением возможных резонансных частот колебаний в трансмиссии трактора;

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	Разработка и исследование новой механической трансмиссии промышленного трактора	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Гатауллин</i>						
<i>Провер.</i>		<i>Костюченко</i>					3	108
<i>Т. контр.</i>						<i>ЮУрГУ НИУ</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Дуюн</i>				<i>Кафедра КГМ</i>		
<i>Утв.</i>		<i>Бондарь</i>						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТИПА ВЫБРАННОЙ МОТОРНО- ТРАНСМИССИОННОЙ УСТАНОВКИ.....	7
1.1 Сравнение производительности бульдозерных агрегатов тягового класса 10 тонн с различными типами моторно-трансмиссионных установок.....	7
1.2 Перечень обозначений и сокращений.....	7
1.3 Постановка задачи .....	10
1.4 Потенциальные тяговые характеристики БА на стадиях копания и транспортирования .....	12
1.5 Уточненные математические модели процессов копания и транспортирования .....	13
1.6 Общий метод расчета максимальной производительности БА .....	14
1.7 Зависимости для расчета максимальной производительности БА с автоматическими МТУ (ГМТ, МТ и ДПМ, ГСТ с автоматическим управлением подачей гидронасосов) .....	17
1.8 Зависимости для расчета максимальной производительности БА с МТ и обычным дизелем .....	19
1.9 Зависимости для расчета максимальной производительности БА с ГСТ ручного управления .....	20
1.10 Результаты расчетов .....	22
1.11 Выводы по расчетам производительности.....	25
1.12 Описание схемы МТУ .....	26
1.13 Преимущества трактора Б10 с упругой муфтой .....	29
1.14 Перспективы применения трактора Т-10 с упругой муфтой .....	31
2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ .....	33
2.1 Расчет МТУ на крутильные колебания.....	33
2.2 Детальная разработка гасителя крутильных колебаний .....	38
2.3 Тяговый расчет трактора с упругой муфтой.....	45
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ .....	48
3.1 Программа-методика экспериментальных исследований МТУ трактора Б10.0800-1Ес упругой муфтой.....	48
3.2 Разработка и отладка тензомодуля для записи крутящего момента .....	48

									Лист
									4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	23.04.02.2017.083.00 ПЗ				

3.2.1 Назначение измерительного преобразователя .....	48
3.2.2 Конструкция устройства .....	50
3.2.3 Описание работы устройства .....	52
3.2.4 Схема подключения .....	56
3.2.5 Технические характеристики ИПТ .....	57
3.2.6 Условия эксплуатации .....	59
3.2.7 Программное обеспечение базовой ЭВМ устройства записи .....	59
3.3 Калибровка.....	66
3.4 Проведение исследований.....	67
3.5 Обработка результатов .....	67
3.5.1 Обработка спектральной плотности .....	67
3.5.2 Этапы расчета.....	68
3.5.3 Сглаживание по частотам.....	69
3.5.4 Осреднение по отрезкам реализации.....	70
3.5.5 Комбинированный способ осреднения.....	71
3.6 Анализ результатов.....	71
3.6.1 Обработка результатов на холостом ходу без нагрузки при различных частотах вращения коленчатого вала двигателя .....	71
3.6.2 Обработка результатов при переключении передач.....	72
3.6.3 Обработка результатов при основных операциях бульдозирования.....	72
3.7 Тяговые испытания .....	73
3.8 Испытания на производительность.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	86
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	89

## ВВЕДЕНИЕ

В сложившейся экономической ситуации важным свойством машины является конкурентоспособность. Повышение технико-экономических показателей машины способствует выживанию предприятия в рыночных условиях.

Для разработки эффективных машин конкретного назначения в частности бульдозерные агрегаты, требуется сравнительная оценка применения различных моторно-трансмиссионных установок

В настоящее время на промышленных тракторах применяются различные моторно-трансмиссионные установки: механическая трансмиссия, гидромеханическая трансмиссия, гидростатическая трансмиссия, электромеханическая трансмиссия.

Важнейшей задачей при проектировании является выбор оптимального варианта применяемых моторно-трансмиссионных установок для конкретных видов агрегатов.

Выпускной квалификационной работе поставлена цель, выбрать наиболее перспективный вариант моторно-трансмиссионной установки промышленного трактора с бульдозерным оборудованием класса 10, по критерию производительности.

Поставленная цель предполагает решение ряда теоретических и экспериментальных задач, таких как расчетная оценка производительности агрегатов с различными моторно-трансмиссионными установками, выбор оптимального варианта, разработка схемы моторно-трансмиссионной установки.

Решение задач: обеспечение работоспособности выбранного варианта, в том числе прочностные, тяговые расчеты, расчеты на крутильные колебания, а так же экспериментальное подтверждение правильности сделанного выбора.

Повышение надежности, производительности, экономичности – все это повышает конкурентоспособность машины и способствует улучшению благосостояния, как предприятия, так и потребителя.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТИПА ВЫБРАННОЙ МОТОРНО-ТРАНСМИССИОННОЙ УСТАНОВКИ

## 1.1 Сравнение производительности бульдозерных агрегатов тягового класса 10 тонн с различными типами моторно-трансмиссионных установок

В основу разработанного метода расчетной оценки максимальной производительности бульдозерного агрегата положены уточненные математические модели его работы на режимах копания и транспортирования грунта, учитывающие основные особенности тяговой динамики. Дано сравнение производительности бульдозерных агрегатов тягового класса 10 тонн с различными типами традиционных и перспективных моторно-трансмиссионных установок (механическая трансмиссия и обычный дизель, механическая трансмиссия и дизель с коэффициентом приспособляемости 1,25 и выше, гидромеханическая трансмиссия, гидростатическая трансмиссия с ручным и автоматическим управлением подачи насосов) при различных вариантах технологического процесса. Показана наилучшая эффективность бульдозерного агрегата с дизелем, имеющим коэффициент приспособляемости не менее 1,25, и с механической трансмиссией на базе современной, например, планетарной коробки передач.

## 1.2 Перечень обозначений и сокращений

БА – бульдозерный агрегат;

МТУ – моторно-трансмиссионная установка;

МТ – механическая трансмиссия;

ГМТ – гидромеханическая трансмиссия;

ГТР – гидротрансформатор;

ГСТ – гидростатическая трансмиссия;

ДПМ – двигатель постоянной мощности;

КП – коробка передач;

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$\eta_o$  – удельная динамическая (реальная) тяговая мощность, развиваемая БА на стадии копания, с учетом основных факторов тяговой динамики;

$\eta_{TP}$  – удельная динамическая тяговая мощность, развиваемая БА на стадии транспортирования;

$\eta_{ст}$  – удельная статическая тяговая мощность;

$f_o$  – динамический коэффициент сопротивления передвижению;

$f_{ст}$  – статический коэффициент сопротивления передвижению;

$\Delta f$  – увеличение коэффициента сопротивления передвижению в динамике;

$\varphi_K$  и  $\varphi_{K_{\max}}$  – удельное и максимальное удельное касательные усилия БА;

$\varphi_{KP}$  и  $\varphi_{KP_{\max}}$  – удельное и максимальное удельное статические тяговые усилия БА;

$\varphi_{KPo}$  – удельное динамическое тяговое усилие, развиваемое БА на стадии копания;

$\varphi_{TP}$  – удельное динамическое тяговое усилие, развиваемое БА на стадии транспортирования;

$\varphi_B$  – удельное вертикальное усилие, действующее на БА при копании;

$\varphi_{BTP}$  – удельное вертикальное усилие, действующее на БА при транспортировании;

$\dot{X}_o$  – динамическая скорость БА при копании;

$\dot{X}_{TP}$  – динамическая скорость БА при транспортировании;

$\dot{X}_{ст}$  – статическая скорость БА;

$\dot{X}_T$  – теоретическая скорость БА;

$\delta_o$  – динамический коэффициент буксования;

$\delta_{ст}$  – статический коэффициент буксования;

$K_V$  – коэффициент, учитывающий снижение скорости БА при копании;

$K_{VTP}$  – коэффициент, учитывающий снижение скорости БА при транспортировании;

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$G_B$  – удельный вес бульдозерного оборудования;

$K$  – коэффициент сопротивления резанию;

$\gamma$  – объемный вес грунта;

$F$  – удельная площадь вырезаемой стружки;

$q$  – удельный объем набираемой призмы грунта;

$\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты трения грунта по грунту и грунта по отвалу;

$\delta_p$  – угол резания бульдозера;

$\Pi, \Pi_{\max}$  – производительность и максимальная производительность БА;

$\Pi_{\text{кав}}$  – производительность при работе по технологии с отсыпкой грунта в кавальер;

$\Pi_{\text{св}}$  – производительность при работе по технологии с отсыпкой грунта в свал;

$T_{\text{ц}}$  – продолжительность рабочего цикла БА;

$T_K, \bar{T}_K$  – продолжительность и средняя продолжительность стадии копания;

$T_{\text{ТР}}, \bar{T}_{\text{ТР}}$  – продолжительность и средняя продолжительность стадии транспортирования;

$\bar{T}_{\text{ТР}}^{\text{ТРАН}}$  – средняя продолжительность транспортирования в траншее;

$\bar{T}_{\text{ТР}}^{\text{КАВ}}$  – средняя продолжительность транспортирования на кавальере;

$T_{\text{ХХ}}, \bar{T}_{\text{ХХ}}$  – продолжительность и средняя продолжительность холостого хода;

$T_{\text{ост}}$  – продолжительность технологических остановок;

$L, L_{\text{КАВ}}$  – длины забоя (траншеи) и кавальера;

$L_K, \bar{L}_K$  – дистанция и средняя дистанция копания;

$L_{\text{ТРмин}}^{\text{ТРАН}}, L_{\text{ТРмакс}}^{\text{ТРАН}}$  – минимальная и максимальная дистанция транспортирования в траншее;

$\alpha, \alpha_{\max}$  – угол и максимальный угол наклона кавальера к горизонту;

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



$q_{мин}, \bar{q}, q_{макс}$  – минимальный, средний и максимальный удельный объем призмы грунта, набираемой в траншее;

$P_{q.макс}$  – вероятность набора максимальной призмы;

$P_q$  – вероятность набора призмы ниже максимальной;

$\varphi_{КР\partialнач}, \varphi_{КР\partialкон}$  – удельные динамические тяговые усилия при копании, соответствующие нижней и верхней границе диапазона силового регулирования МТУ  $\varphi_{КРнач} \dots \varphi_{КРкон}$  по статической тяговой характеристике;

$\varphi_{ТР\partialнач}, \varphi_{ТР\partialкон}$  – удельные динамические тяговые усилия при транспортировании, соответствующие нижней и верхней границе диапазона силового регулирования МТУ  $\varphi_{КРнач} \dots \varphi_{КРкон}$  по статической тяговой характеристике;

$\varphi_{ТРмакс}, \varphi_{ТРмин}$  – удельные динамические усилия транспортирования в траншее максимальной и минимальной призмы;

$\varphi_{ТР}^{КАВ}$  – удельное динамическое усилие при транспортировании на кавальере;

$\dot{X}_{ТРнач}, \dot{X}_{ТРкон}$  – скорости БА при транспортировании, соответствующие нижней и верхней границе диапазона силового регулирования МТУ  $\varphi_{КРнач} \dots \varphi_{КРкон}$  по статической тяговой характеристике;

$\dot{X}_{ТРqмакс}$  – скорость БА при транспортировании максимальной призмы в траншее;

$\bar{X}_{ТР}^{ТРАН}$  – средняя скорость транспортирования в траншее;

$\bar{X}_{ТР}^{КАВ}$  – средняя скорость транспортирования на кавальере.

### 1.3 Постановка задачи

Производительность БА на базе промышленного трактора, в существенной степени зависит от типа и параметров применяемой МТУ.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Ведущими фирмами, производящими промышленные тракторы, доказана необходимость применения автоматических МТУ, обеспечивающих бесступенчатую приспособляемость к внешнему тяговому сопротивлению. Теоретическое обоснование это получило в последние десятилетия, благодаря развитию основных положений теории промышленного трактора. Так, например, в работе показано, что рост производительности от коэффициента приспособляемости, независимо от типа автоматической МТУ, носит характер кривой “насыщения” с практическим достижением максимума при коэффициенте, равном 1,6.

Помимо наиболее широко применяемой на промышленных тракторах ГМТ, в последние годы ведущие фирмы (“Liebherr”, “Caterpillar”) начали выпуск тракторов с автоматической ГСТ, а также с автоматической МТУ, обеспечивающей необходимый высокий коэффициент приспособляемости за счет ДПМ и имеющей механическую трансмиссию (“Komatsu”, коэффициент приспособляемости ДПМ 1,6). В ОАО “ЧТЗ” создан и испытан опытный образец трактора Т-170 с ДПМ, обеспечивающим коэффициент приспособляемости 1,55. Отечественные производители начали также выпуск тракторов с ГСТ, имеющей ручное управление гидронасосами (Б10.10Е и Б2000 ОАО “ЧТЗ” и ДЗ-240С1 ЗАО “ЧЗК”). Получает дальнейшее развитие и традиционная ГМТ. С целью повышения эффективности в блоке с ГТР устанавливается дифференциальный ряд, обеспечивающий более высокие КПД и прозрачность трансформаторного блока, а также используется сочетание “ДПМ-ГТР”.

В связи с большим разнообразием типов применяемых МТУ, имеющих различные характеристики, в частности по КПД, коэффициенту приспособляемости и управлению, существенный интерес для производителей и потребителей промышленных тракторов представляет сравнительная оценка производительности БА с различными типами МТУ.

Разработанный авторами метод оценки максимальной производительности позволяет не только оценить потенциальные возможности БА с различными

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

типами МТУ, но и оптимизировать параметры последних на стадии проектирования. В основу метода положены уточненные математические модели работы бульдозерного агрегата на режимах копания и транспортирования грунта, учитывающие основные особенности его тяговой динамики и технологии работы, в том числе: наличие и закономерности вертикальных усилий, действующих на БА на рабочем ходу, увеличение сопротивления передвижению при копании, реальные закономерности горизонтальной составляющей сопротивления копанию, различие динамических тяговых характеристик на стадиях копания и транспортирования грунта и др. Учет данных особенностей является необходимым, поскольку определяет вид и параметры оптимального рабочего процесса БА и, как следствие параметры МТУ.

#### 1.4 Потенциальные тяговые характеристики БА на стадиях копания и транспортирования

Потенциальную динамическую тяговую характеристику на стадии копания, выраженную через параметры статической тяговой характеристики, определяемой в обычных тяговых расчетах, представим в виде:

$$\eta_{\delta} = (\eta_{CT} - \Delta f \dot{X}_{CT}) K_V (1 + \varphi_B). \quad (1.1)$$

Здесь  $\Delta f = f_{\delta} - f_{cm}$ ,

где  $f_{\delta} = f_m (1 - 0,375(1 - \varphi_K / \varphi_{Kmax})^C)$ ,  $f_m = 0,15 + 0,1\dot{X}_T$ ,  $C = 0,08 + 0,0035\dot{X}_T$ ,  $\dot{X}_T$  - в км/ч,  $f_{cm} = 0,08$ ;

$$K_V = \frac{1 - \delta_{\delta}}{1 - \delta_{CT}}, \quad \text{где} \quad \delta_{CT} = 1 - (1 - \varphi_{KP} / \varphi_{KPmax})^{0,05}, \quad \delta_{\delta} = 1 - (1 - \varphi_{KP} / \varphi_{KPmax} (\varphi_B))^{0,15},$$

$\varphi_{KPmax} = (-442,67\varphi_B^4 - 204,38\varphi_B^3 - 26,01\varphi_B^2 + 0,1588\varphi_B + 1)\varphi_{KPmax} (\varphi_B = 0)$  - экспериментальная зависимость для БА с полужесткой подвеской;

$\varphi_B = a\varphi_{Kp\delta} + \varphi_1$  - согласно экспериментальным регрессионным зависимостям между удельными вертикальными усилиями и динамическими тяговыми

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

усилиями при копании [3], где  $a = 0,0192$  и  $\nu_l = -0,0663$  - для грунта I категории,  $a = 0,3253$  и  $\nu_l = -0,3034$  - для грунта II категории,  $a = 0,32$  и  $\nu_l = -0,3637$  - для грунта III категории плотности,  $\varphi_{KPo} = (\varphi_{KP} - \Delta f)(1 + \varphi_B)$ .

Потенциальная динамическая тяговая характеристика на стадии транспортирования, определяется выражением:

$$\eta_{TP} = (\eta_{CT} - \Delta f \dot{X}_{CT}) K_{VTP} (1 + \varphi_{BTP}) . \quad (1.2)$$

По экспериментальным данным  $\varphi_{BTP} = 0$ - для грунта I категории,  $\varphi_{BTP} = -G_B$  - для грунта II и III категорий [3].

### 1.5 Уточненные математические модели процессов копания и транспортирования

Из теоретических исследований процесса копания [2] известно выражение для тягового сопротивления  $\varphi_C$ :

$$\varphi_C = \varphi_{KPo} = KF + \mu_\delta \gamma q \quad (1.3)$$

Исходя из работы Б.М. Позина [2], уточненные (по входящим в них показателям соответствующих динамических тяговых характеристик) математические модели процессов копания и транспортирования представляются в следующем виде:

$$\text{Процесс копания: } q(t) + \mu_\delta \gamma / K \dot{X}_o q(t) = 1 / K \eta_o(\dot{X}_o) , \quad (1.4)$$

$$\text{где } q = 1 / K e^{-\mu_\delta \gamma / K L_K} \int_0^{T_R} \eta_o(\dot{X}_o) e^{\mu_\delta \gamma / K X_o} dt ; \quad (1.5)$$

$$\text{Процесс транспортирования: } \eta_{TP}(\varphi_{TP}) = (\eta_{CT} - \Delta f \dot{X}_{CT}) K_V (1 + \varphi_{BTP}) , \quad (1.6)$$

где  $\varphi_{TP} = \mu_\delta \gamma q$ .

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## 1.6 Общий метод расчета максимальной производительности БА

Процесс копания в соответствии с уточненной моделью (1.4) имеет ряд возможных решений (1.5) со своими законами  $X_o(t)$  и  $\dot{X}_o(t)$  и с множеством начальных условий по скорости и набираемой призме, а процесс транспортирования определяется величиной набранной на стадии копания призмы. Следовательно, при расчете производительности БА целесообразно находить ее максимальную величину, что эквивалентно задаче нахождения оптимального, то есть обеспечивающего максимум производительности, рабочего процесса БА. Вне привязки к конкретной технологии задача формулируется следующим образом:

$$\Pi = q/T_{\text{ц}} = q/(T_K + T_{TP} + T_{OCT} + T_{XX}) = q/[L_K(1/\dot{X}_o - 1/\dot{X}_{TP}) + L/\dot{X}_{TP} + T_{OCT} + T_{XX}] \rightarrow \max.$$

Для максимизации функционала производительности при равных условиях (одинаковой  $q$  и следовательно  $\dot{X}_{TP}$ , а также одинаковых  $T_{OCT}, T_{XX}, L$ ) необходимо обеспечить максимум средней скорости рабочего хода или минимизировать показатель  $[L_K(1/\dot{X}_o - 1/\dot{X}_{TP})]$ . Задача нахождения процесса с максимальной средней скоростью рабочего хода решается в соответствии с системой:

$$\begin{aligned} \dot{X}_o(L_{Ki}) &\Rightarrow \max_i(L_{Ki}) = \dot{X}_{o\text{макс}}; \\ L_{Ki} &\in ]0, L]; i \in N; \\ \Pi_{\text{макс}} &= \Pi\{\min[L_{Ki}(1/\dot{X}_{o\text{макс}} - 1/\dot{X}_{TP})]\}. \end{aligned}$$

Таким образом, поиск оптимального рабочего процесса БА проводится на всех возможных дистанциях копания  $L_{Ki}$ , для каждой из которых ищется процесс копания, обеспечивающий максимум средней скорости  $\dot{X}_{o\text{макс}}$  на данной дистанции, а из всех процессов копания, оптимальных на конкретных дистанциях, окончательно выбирается процесс, обеспечивающий максимум средней скорости

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

рабочего хода. Данную систему можно решить прямым способом как для БА с автоматической МТУ (ГМТ, МТ и ДПМ, автоматической ГСТ), использующего определенный участок потенциальной тяговой характеристики, так и для БА с МТ и обычным дизелем и с ГСТ с ручным управлением, работающих при копании на стационарном скоростном режиме.

Для БА с автоматической МТУ, во-первых, исходя из модели копания (1.4) и ее решения (1.5), выделяется класс движений, который на малых дистанциях копания является единственно оптимальным, определяемым методами вариационного исчисления путем максимизации функционала  $\int_0^{T_K} \eta_{\delta}(\dot{X}_{\delta}) e^{\mu_{\delta} \gamma / \kappa X_{\delta}} dt$ :

$$\eta''_{\delta \dot{X}_{\delta}} \ddot{X}_{\delta} + \mu_{\delta} \gamma / \kappa \eta'_{\delta \dot{X}_{\delta}} \dot{X}_{\delta} + \mu_{\delta} \gamma / \kappa \eta_{\delta} = 0. \quad (1.7)$$

Во-вторых, из всех других классов непрерывных движений при копании, которые могут обеспечить максимум средней скорости рабочего хода, выделяются движения с постоянной скоростью (стационарные процессы), максимизирующие длину копания.

Проведенный анализ и численные расчеты для БА с автоматической МТУ показали, что вследствие более низких показателей динамической тяговой характеристики на стадии копания по сравнению со стадией транспортирования, скорость транспортирования всегда выше скорости копания. Установлено, что для достижения максимума производительности необходимо выполнять копание на малой дистанции и как можно большую часть забоя проходить в быстром транспортном режиме, что дает только эйлеровский процесс (1.7). Для модели максимальной производительности, не учитывающей наличие основных факторов тяговой динамики и различие тяговых характеристик БА на стадиях копания и транспортирования, оптимальны стационарные процессы копания. Таким образом, экстремали, удовлетворяющие процессами (1.7) и проверенные на общую оптимальность в сравнении со стационарными

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

процессами, являются оптимальными процессами копания БА с автоматической МТУ.

Задача нахождения максимальной производительности  $\Pi_{\text{макс}}$  для БА с автоматической МТУ связана с поиском наилучших начальных условий  $\dot{X}_{\text{нач}}$  и  $q$  (т.е. оптимального диапазона  $\varphi_{\text{КР}\delta\text{нач}} \dots \varphi_{\text{КР}\delta\text{кон}}$  и  $\varphi_{\text{КРнач}} \dots \varphi_{\text{КРкон}}$ ) – из системы (1.8), а для БА с МТ и обычным дизелем и с ГСТ ручного управления - с поиском оптимальных постоянных скоростей  $\dot{X}_{\delta}$  (удельных тяговых усилий  $\varphi_{\text{КР}\delta}$  и  $\varphi_{\text{КР}}$ ) – из систем (1.9), (1.10). Таким образом, представленные ниже системы (1.8-1.10) отражают метод расчета максимальной производительности БА.

Для автоматических МТУ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta''_{\delta\dot{X}_{\delta}} \ddot{X}_{\delta} + \mu_{\delta}\gamma / K\eta'_{\delta\dot{X}_{\delta}} \dot{X}_{\delta} + \mu_{\delta}\gamma / K\eta_{\delta} = 0; \\ q = 1 / Ke^{-\mu_{\delta}\gamma / KL_K} \int_0^{T_R} \eta_{\delta}(\dot{X}_{\delta}) e^{\mu_{\delta}\gamma / KX_{\delta}} dt; \\ X_{\delta i} = X_{\delta i}(t); \dot{X}_{\delta i} = \dot{X}_{\delta i}(t); \dot{X}_{\delta i}(0) = \dot{X}_{\delta\text{нач}i} \in \dot{X}_{\delta}(\eta_{\delta}); \\ \dot{X}_{\text{ТР}j} = \dot{X}_{\text{ТР}}(q_j) \in \dot{X}_{\text{ТР}}(\eta_{\text{ТР}}); i, j \in N; \\ \Pi_{\text{макс}} = \max \Pi_{ij} [\dot{X}_{\delta\text{нач}i}, q_j, \dot{X}_{\text{ТР}j}] \end{array} \right. \quad (1.8)$$

Для МТ с обычным дизелем:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_j = \eta_{\delta}(1 - e^{-\mu_{\delta}\gamma / KX_{\delta}}) / \mu_{\delta}\gamma \dot{X}_{\delta i}; \\ X_{\delta i} = \text{const} \in \dot{X}_{\delta}(\eta_{\delta}); \\ \dot{X}_{\text{ТР}i} = \dot{X}_{\delta i} K_{\text{ВТР}} / K_V; i, j \in N; \\ \Pi_{\text{макс}} = \max \Pi_{ij} [\dot{X}_{\delta i}, q_j, \dot{X}_{\text{ТР}i}] \end{array} \right. \quad (1.9)$$

Для ГСТ ручного управления:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_j = \eta_{\delta}(1 - e^{-\mu_{\delta}\gamma / KX_{\delta}}) / \mu_{\delta}\gamma \dot{X}_{\delta i}; \\ X_{\delta i} = \text{const} \in \dot{X}_{\delta}(\eta_{\delta}); \\ \dot{X}_{\text{ТР}j} = \dot{X}_{\text{ТР}}(q_j) \in \dot{X}_{\text{ТР}}(\eta_{\text{ТР}}); i, j \in N; \\ \Pi_{\text{макс}} = \max \Pi_{ij} [\dot{X}_{\delta i}, q_j, \dot{X}_{\text{ТР}j}] \end{array} \right. \quad (1.10)$$

Для проведения численного решения указанные системы были конкретизированы для базовой технологии с отсыпкой грунта в кавальер (с

учетом снижения набираемой призмы при росте угла кавальера) и для технологии с отсыпкой в свал. Ниже представлены расчетные зависимости для различных типов МТУ.

1.7 Зависимости для расчета максимальной производительности БА с автоматическими МТУ (ГМТ, МТ и ДПМ, ГСТ с автоматическим управлением подачей гидронасосов)

При траншейной технологии с отсыпкой грунта в кавальер особенность состоит в том, что для транспортирования призмы грунта по кавальеру, имеющего определенный угол наклона к горизонту, требуется развивать большее усилие по сравнению с усилием транспортирования призмы в траншее. Для агрегата, имеющего определенный диапазон силового регулирования МТУ, существует предельный угол  $\alpha_{пред}$  наклона кавальера, при котором тяговое усилие транспортирования на кавальере достигнет предельного значения, после чего для углов  $\alpha > \alpha_{пред}$  необходимо снижать набираемую в траншее призму.

В приведенных ниже зависимостях для элементов, составляющих производительность при данной технологии, принято равномерное распределение (возрастание) угла  $\alpha$  кавальера от цикла к циклу, а также равномерное распределение вероятности дистанции транспортирования в траншее от минимального ( $L_{ТРмин}^{ТРАН} = 0$ ) до максимально возможного

$$(L_{ТРмакс}^{ТРАН} = L - \bar{L}_K).$$

Процесс транспортирования в траншее для малых призм, усилия транспортирования которых ниже значений усилий, относящихся к диапазону регулирования МТУ, осуществляется не на потенциальной тяговой характеристике.

Принимается, что скорость транспортирования для тяговых усилий  $\varphi_{ТР} < \varphi_{ТР.нач}$  равна скорости при  $\varphi_{ТР.нач}$ , то есть  $\dot{X}_{ТРнач}$ .

Таким образом, производительность БА записывается в виде:

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



$$P_{кав} = \frac{\bar{q}}{\bar{T}_K + \bar{T}_{TP}^{ТРАН} + \bar{T}_{TP}^{КАВ} + T_{ОСТ} + \bar{T}_{ХХ}}. \quad (1.11)$$

$$\text{Здесь } \bar{q} = P_{q_{макс}} q_{макс} + P_q \frac{1}{(\varphi_{TP_{макс}} - \varphi_{TP_{мин}}) \mu_\delta \gamma} \int_{\varphi_{TP_{мин}}}^{\varphi_{TP_{макс}}} \varphi d\varphi = q_{макс} - \frac{tg \alpha_{макс}}{2} \left( \frac{q_{макс}}{\mu_\delta} - \frac{1}{\mu_\delta \gamma} \right),$$

$$\text{где } P_{q_{макс}} = \frac{\varphi_{TP_{кон}} - \varphi_{TP_{макс}}}{tg \alpha_{макс} (\gamma q_{макс} + 1)} - \text{вероятность набора максимальной призмы } q_{макс},$$

равной призме, набираемой при  $\alpha = 0$ .

Вероятность набора призмы максимального объема при углах  $\alpha > 0$  связана с тем, что усилие  $\varphi_{TP_{макс}}$  при  $\alpha = 0$  находится внутри диапазона усилий, относящихся к диапазону регулирования  $\varphi_{TP_{нач}} \dots \varphi_{TP_{кон}}$  и существует возможность набора  $q_{макс}$  до достижения усилия транспортирования на кавальере величины  $\varphi_{TP_{кон}}$  при угле  $\alpha_{пред} > 0$  (условие ограничения призмы по кавальеру). При этом, удельное усилие  $\varphi_{TP}^{КАВ}$ , развиваемое при транспортировании призмы на кавальере, по сравнению с усилием  $\varphi_{TP}$  транспортирования такой же призмы в траншее (на горизонте) увеличивается в соответствии с соотношением:

$$\varphi_{TP}^{КАВ} = \varphi_{TP} \left( 1 + \frac{tg \alpha}{\mu_\delta} \right) + tg \alpha. \quad (1.12)$$

$$P_q = 1 - P_{q_{макс}}; \quad \varphi_{TP_{макс}} = \mu_\delta \gamma q_{макс}; \quad \varphi_{TP_{мин}} = \mu_\delta \gamma q_{мин},$$

$$\text{где } q_{мин} = \frac{\varphi_{TP_{кон}} - tg \alpha_{макс} (\gamma q_{макс} + 1)}{\mu_\delta \gamma};$$

$$\bar{T}_K = P_{q_{макс}} T_{q_{макс}} + P_q \frac{1}{q_{макс} - q_{мин}} \int_{q_{мин}}^{q_{макс}} T_K(q) dq;$$

$$\bar{L}_K = P_{q_{макс}} L_{Kq_{макс}} + P_q \frac{1}{q_{макс} - q_{мин}} \int_{q_{мин}}^{q_{макс}} L_K(q) dq;$$

$$\bar{T}_{TP}^{ТРАН} = \frac{L - \bar{L}_K}{2} \cdot \frac{1}{\bar{X}_{TP}^{ТРАН}} = \frac{L - \bar{L}_K}{2}.$$

$$\cdot \left( P_{q_{макс}} \frac{1}{\dot{X}_{TP_{q_{макс}}}} + P_q \left( \frac{\varphi_{TP_{нач}} - \varphi_{TP_{мин}}}{\varphi_{TP_{макс}} - \varphi_{TP_{мин}}} \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP_{нач}}} + \frac{1}{\varphi_{TP_{макс}} - \varphi_{TP_{мин}}} \int_{\varphi_{TP_{нач}}}^{\varphi_{TP_{макс}}} \frac{1}{\dot{X}_{TP}}(\varphi) d\varphi \right) \right),$$

где  $\bar{X}_{TP}^{ТРАН}$  - средняя скорость транспортирования в траншее,  $L$  - длина траншеи,

$$\dot{X}_{TP,q,макс} = \frac{\eta_{TP}}{\varphi_{TP,q,макс}} = \frac{\eta_{TP}}{\mu_{\delta} \gamma Q_{макс}}, \quad \varphi_{TP,нач} = \frac{\varphi_{КР\partial,нач}}{\vartheta + \alpha \varphi_{КР\partial,нач}} (1 + \varphi_{В,TP}),$$

$$\varphi_{TP,кон} = \frac{\varphi_{КР\partial,кон}}{\vartheta + \alpha \varphi_{КР\partial,кон}} (1 + \varphi_{В,TP});$$

$$\bar{T}_{TP}^{КАВ} = L_{КАВ} \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP}^{КАВ}} = L_{КАВ} \left( P_{q,макс} \int_{\varphi_{TP,макс}}^{\varphi_{TP,кон}} \frac{1}{\dot{X}_{TP}(\varphi)} d\varphi + P_q \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP,кон}} \right);$$

$$T_{XX} = \left( \bar{L}_K + \bar{L}_{TP}^{ТРАН} + L_{КАВ} \right) \cdot \frac{1}{\dot{X}_{XX}} = \left( \frac{\bar{L}_K + L}{2} + L_{КАВ} \right) \cdot \frac{1}{\dot{X}_{XX}}.$$

Технология с отсыпкой грунта в свал не накладывает ограничение на объем набираемой призмы, поэтому на каждом цикле набирается максимальная призма, определяемая емкостью рабочего органа (здесь обозначим ее просто как  $q$ ). Поэтому:

$$П_{СВ} = \frac{q}{T_K + \bar{T}_{TP} + T_{ОСТ} + \bar{T}_{XX}},$$

где

$$\bar{T}_{TP} = \frac{L - L_K}{2} \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP}}, \quad \bar{T}_{XX} = (L_K + \bar{L}_{TP}) \cdot \frac{1}{\dot{X}_{XX}} = \frac{L_K + L}{2} \cdot \frac{1}{\dot{X}_{XX}}.$$

Следовательно,

$$П_{СВ} = \frac{q}{T_K - \frac{L_K}{2} \left( \frac{1}{\dot{X}_{TP}} - \frac{1}{\dot{X}_{XX}} \right) + \frac{L}{2} \left( \frac{1}{\dot{X}_{TP}} + \frac{1}{\dot{X}_{XX}} \right) + T_{ОСТ}}. \quad (1.13)$$

### 1.8 Зависимости для расчета максимальной производительности БА с МТ и обычным дизелем

При траншейной технологии с отсыпкой грунта в кавальер для БА с МТ и дизелем также существует вероятность работы с максимальной призмой при углах наклона кавальера  $\alpha > 0$ . Это связано с тем, что до достижения определенного угла

										Лист
										19
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	23.04.02.2017.083.00 ПЗ					

наклона кавальера  $\alpha_{пред}$ , при котором усилие транспортирования на кавальере возрастет до  $\varphi_{ТР}^{КАВ} = \varphi_{ТР}^* = \varphi_{КР\delta}(1 + \varphi_{ВТР}) / (\epsilon + a\varphi_{КР\delta}) > \varphi_{ТР} = \mu_{\delta}\gamma q$ , агрегат способен набирать максимальную призму. Для углов  $\alpha > \alpha_{пред}$  набираемая при копании призма в каждом последующем цикле постепенно снижается. Однако, в отличие от агрегата с автоматической МТУ, транспортирование при  $\alpha > \alpha_{пред}$  агрегатом с МТ и дизелем осуществляется не на потенциальной характеристике. Таким образом, скорость транспортирования  $\dot{X}_{ТР}$  для этого агрегата всегда ниже и равна скорости при  $\varphi_{ТР}^*$ . На этой скорости осуществляется транспортирование при всех углах  $\alpha$ .

Следовательно для данной технологии:

$$P_{КАВ} = \frac{\bar{q}}{\bar{T}_K + \bar{T}_{ТР} + \bar{T}_{ост} + \bar{T}_{ХХ}}. \quad (1.14)$$

Для стационарного процесса копания:

$$\begin{aligned} \bar{T}_K = P_{q.макс} T_K + P_q \frac{1}{q_{макс} - q_{мин}} \cdot \frac{k\eta_{\delta}}{(\mu_{\delta}\gamma)^2 \dot{X}_{\delta}^2} \cdot \\ \cdot \left[ \left( 1 - \frac{\mu_{\delta}\gamma q \dot{X}_{\delta}}{\eta_{\delta}} \right) \ln \left( 1 - \frac{\mu_{\delta}\gamma q \dot{X}_{\delta}}{\eta_{\delta}} \right) - \left( 1 - \frac{\mu_{\delta}\gamma q \dot{X}_{\delta}}{\eta_{\delta}} \right) \right] q_{макс}, \end{aligned} \quad (1.15)$$

где  $T_K = -\frac{K}{\mu_{\delta}\gamma \dot{X}_{\delta}} \ln \left( 1 - \frac{\mu_{\delta}\gamma q_{макс} \dot{X}_{\delta}}{\eta_{\delta}} \right)$ , а  $P_{q.макс}$ ,  $P_q$ ,  $q_{мин}$  и  $\bar{T}_{ХХ}$  рассчитываются по

соответствующим зависимостям для БА с автоматической МТУ;

$$T_{ТР} = \left( \frac{L - \bar{L}_K}{2} + L_{КАВ} \right) \cdot \frac{1}{\dot{X}_{ТР}(\varphi_{ТР}^*)}, \text{ где } \bar{L}_K = \bar{T}_K \cdot \dot{X}_{\delta}. \quad (1.16)$$

Зависимости для расчета  $P_{СВ}$  для БА с МТ и дизелем и с автоматической МТУ аналогичны.

1.9 Зависимости для расчета максимальной производительности БА с ГСТ ручного управления

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

БА с ГСТ ручного управления, как показывает практика испытаний тракторов Б10.32Е (ОАО “ЧТЗ”) и ДЗ-240С1 (ЗАО “ЧЗК”), при копании также как и БА с МТ и дизелем работает на стационарном скоростном режиме. Однако, транспортирование как в траншее, так и на кавальере, в отличие от последнего, для БА с ГСТ осуществляется на потенциальной тяговой характеристике, при этом оператором практически мгновенно осуществляется изменение режима подачи насосов в момент перехода с копания на транспортирование (увеличение подачи) и в момент выезда на кавальер (снижение подачи). В связи с возможностью бесступенчатого изменения подачи при выезде на кавальер БА с ГСТ ручного управления может работать с максимальной призмой при достаточно высоких углах наклона кавальера  $\alpha > 0$ . Ограничение набираемой призмы по кавальеру для данного БА определяется его максимальными сцепными качествами при движении по кавальеру.

Итак, для кавальерной технологии имеем:

$$P_{каб} = \frac{\bar{q}}{\bar{T}_K + \bar{T}_{TP}^{TPAH} + \bar{T}_{TP}^{KAB} + T_{OCT} + \bar{T}_{XX}}. \quad (1.17)$$

Здесь  $\bar{T}_K$ ,  $\bar{T}_{XX}$  рассчитываются по соответствующим зависимостям, приведенным в предыдущем разделе.

$$\bar{T}_{TP}^{TPAH} = \left( \frac{L - \bar{L}_K}{2} \right) \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP}(\varphi_{TP})}, \quad \bar{L}_K = \bar{T}_K \cdot \dot{X}_\delta; \quad (1.18)$$

$$\bar{T}_{TP}^{KAB} = L_{KAB} \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP}^{KAB}} = L_{KAB} \left( P_{q, макс} \int_{\varphi_{TP, макс}}^{\varphi_{TP, кон}} \frac{1}{\dot{X}_{TP}}(\varphi) d\varphi + P_q \cdot \frac{1}{\dot{X}_{TP, кон}} \right), \quad (1.19)$$

где  $\varphi_{TP, кон}$  - максимальное тяговое усилие по сцеплению при транспортировании.

Расчетные зависимости  $P_{CB}$  для БА с ГСТ ручного управления и БА с МТ и дизелем аналогичны, за исключением того, что транспортирование для БА с ГСТ выполняется на потенциальной тяговой характеристике.

## 1.10 Результаты расчетов

Рассмотрим результаты численной оценки производительности БА по указанным выше зависимостям, выполненной для наиболее типичного грунта II категории. В качестве типичных технологий работы БА приняты: разработка 40-метровой траншеи с отсыпкой грунта в 20-метровый кавальер (базовая технология), а также разработка грунта в свал на дистанциях 40, 20 и 10м. Сравнению подвергались БА со следующими вариантами МТУ:

- МТ (муфта сцепления, коробка передач, имеющая механическое управление) и обычный дизель;

- ГСТ ручного управления подачей насосов;

автоматические МТУ (ГМТ, автоматическая ГСТ, МТ и ДПМ). Для МТ и ДПМ рассмотрено три варианта МТУ – ДПМ с коэффициентом приспособляемости  $K_3=1,25$ , трансмиссия с муфтой сцепления и с коробкой передач, имеющей механическое управление; ДПМ с коэффициентами приспособляемости 1,25 и 1,4, трансмиссия без муфты сцепления и с коробкой передач, например, планетарной, имеющей гидравлическое (электрогидравлическое) управление.

Максимальные значения КПД трансмиссии рассматриваемых МТУ приняты по результатам испытаний и составляли: для МТ - 0,851, для ГМТ - 0,76, для ГСТ – 0,684.

На рисунках 1.1 - 1.4 представлены результаты расчетов максимальной производительности БА тягового класса 10 тонн с различными типами автоматических МТУ в зависимости от емкости отвала при разных технологиях работы. На рисунке 1.5 представлены результаты расчета максимальной производительности БА с МТ и обычным дизелем и с ГСТ ручного управления при работе по базовой технологии.

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		22

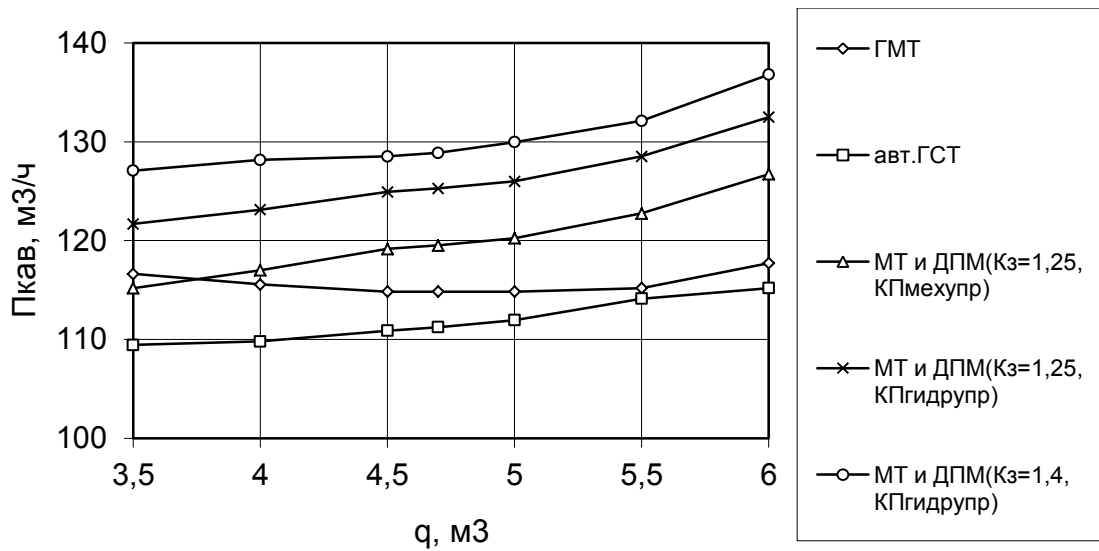


Рисунок 1.1 – Производительность БА с различными типами автоматических МТУ при траншейной технологии (40м) с отсыпкой грунта в кавальер(20м). Грунт II категории.

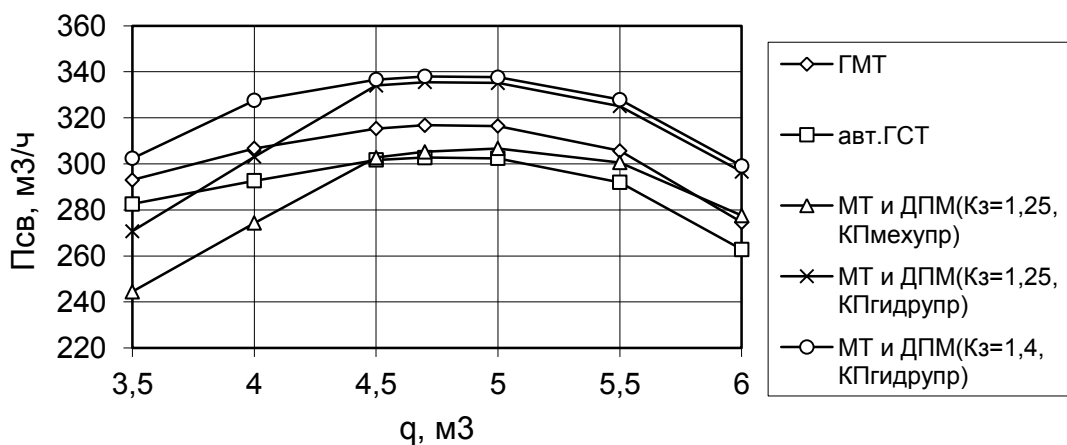


Рисунок 1.2 – Производительность БА с различными типами автоматических МТУ при свальной технологии (40м). Грунт II категории.

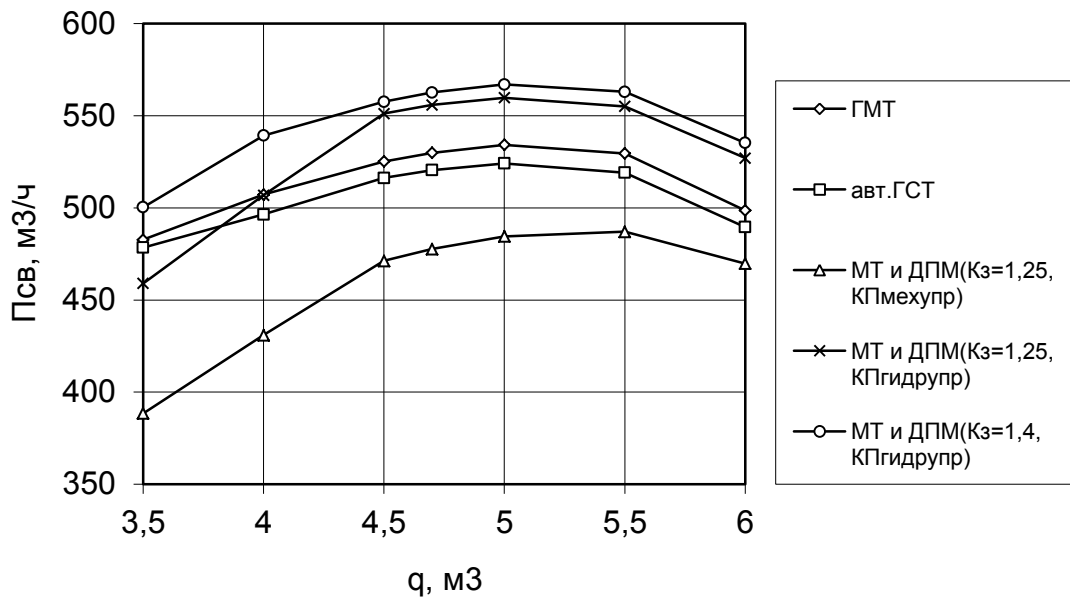


Рисунок 1.3 – Производительность БА с различными типами автоматических МТУ при свальной технологии (20м). Грунт II категории.

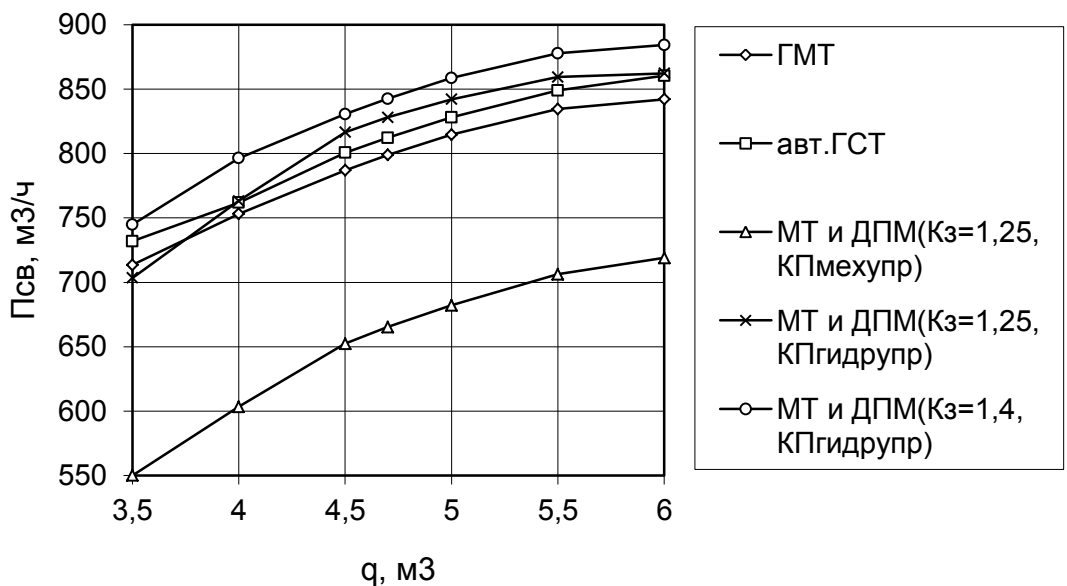


Рисунок 1.4 – Производительность БА с различными типами автоматических МТУ при свальной технологии (10м). Грунт II категории.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

24

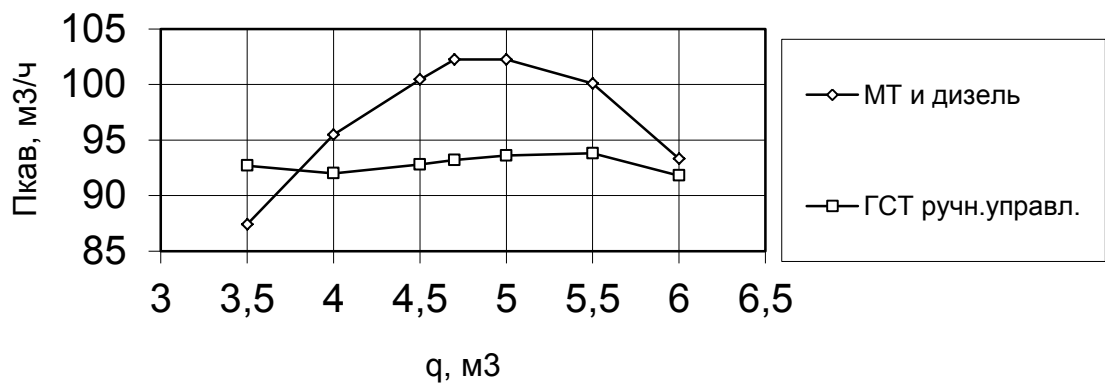


Рисунок 1.5 – Производительность БА с МТ и дизелем и с ГСТ ручного управления при траншейной технологии (40м) с отсыпкой грунта в кавальер (20м). Грунт II категории.

### 1.11 Выводы по расчетам производительности

1. Наименее эффективными МТУ для БА являются ГСТ ручного управления и МТ с обычным дизелем. Производительность БА с ГСТ ручного управления самая низкая при всех технологиях, за исключением короткой 10-метровой свальной технологии.

Производительность БА с ГСТ ручного управления и с МТ и дизелем ниже, чем с другими типами МТУ для разных технологий – на 16-38% и на 8-40%, соответственно.

2. Производительность БА с МТ (с муфтой сцепления и коробкой передач, имеющей механическое управление) и ДПМ ( $K_3=1,25$ ) при работе по базовой технологии выше, чем у БА с автоматической ГСТ на 7% и практически равна производительности БА с ГМТ. Для 40-метровой свальной технологии - ниже на 4%, чем у БА с ГМТ и практически равна производительности БА с автоматической ГСТ. Для коротких свальных технологий – ниже, чем у БА с ГМТ и с автоматической ГСТ – на 8-17%.



3. Производительность БА с ГМТ и автоматической ГСТ близки. При работе по базовой и 40-метровой свальной технологиям производительность БА с ГМТ выше на 5%, при коротких свальных технологиях – производительности практически равны.

4. МТУ с МТ (без муфты сцепления и с коробкой передач, имеющей гидравлическое управление) и ДПМ ( $K_z=1,25$  и выше) для БА самая эффективная. Производительность БА с такой МТУ при коэффициенте приспособляемости ДПМ  $K_z=1,25$  выше, чем с ГСТ ручного управления на 34-58%, с МТ и обычным дизелем - на 23-67%, с МТ (с муфтой сцепления и коробкой передач, имеющей механическое управление) и ДПМ ( $K_z=1,25$ ) - на 5-24%, с автоматической ГСТ – на 3-13%, с ГМТ – на 4-7%. Увеличение коэффициента приспособляемости ДПМ с 1,25 до 1,4 для такой МТУ повышает производительность БА еще на 3%.

#### 1.12 Описание схемы МТУ

Моторно-трансмиссионная установка (см. рисунок 1.6) включала:

- серийный двигатель Д-180М (коэффициент запаса по моменту 1,25);
- серийная планетарная КП трактора Т-10.0000 с передаточным числом цилиндрической пары 1,25;
- серийные агрегаты заднего моста (главная передача, бортовые фрикционы) и серийные бортовые редукторы.

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		26

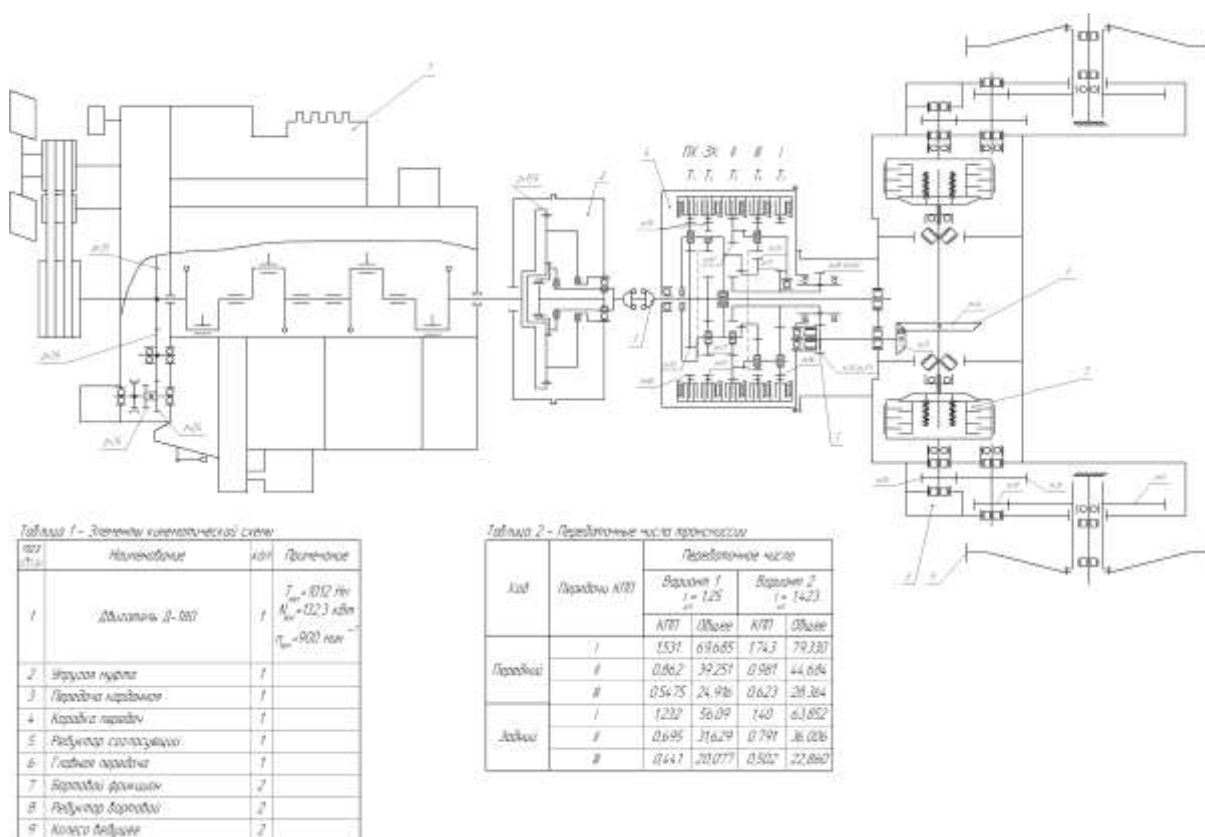


Рисунок 1.6 – Кинематическая схема трансмиссии трактора.

В отличие от трактора Т-10 с механической трансмиссией замена старой КПП на современную серийную планетарную КПП трактора Т-10.0000 позволяет отказаться от целого агрегата - муфты сцепления и достаточно сложного механизма ее управления. Роль муфты сцепления, как на тракторе Т-10.0000, играют два фрикциона реверса КПП (I и II планетарных рядов). Современное гидравлическое управление КПП позволяет проводить быстрое и легкое, в отличие от механической КПП трактора Т-170, переключение передач и реверсирование агрегата. Для снижения динамических усилий при включении (переключении) передач в трансмиссии применена упругая муфта на базе торсионного вала, устанавливаемого за маховиком двигателя. Муфта проста, не управляема, т.е. не требует механизмов управления и какого-либо обслуживания. Для проведения испытаний с целью быстрой проверки технического решения опытный образец муфты был собран в корпусе серийного ГТР-480.

Двигатель с упругой муфтой и КП соединяется через серийный карданный вал, что позволяет исключить сложную и трудоемкую операцию центровки двигателя, а также установить двигатель на амортизаторы, так же как на тракторе Т-10.0000, и снизить вибрацию на рабочем месте оператора.

Гидравлическая схема управления питания и смазки трансмиссии, а также пост управления трактором полностью унифицированы с трактором Т-10.0000.

Применение современного поста управления трактором позволило также полностью унифицировать с трактором Т-10.0000 кабину (диван), существенно улучшающую условия труда оператора.

*В отличие от серийного трактора Т-10 с ГМТ (Т-10.0000) новая трансмиссия превращается в современную механическую трансмиссию. По сравнению с ГМТ она имеет на 18,6-21,5 % более высокий КПД, обеспечивает прирост производительности при бульдозировании до 3,2-7,9 % при снижении расхода топлива на 9,5-16,8 %. При этом исключается (заменяется на упругую муфту) достаточно дорогой (175 т.р.) и сложный ГТР-480, производства ЧТЗ. Следует отметить что, в отличие от ГТР-410 с покупной колесной системой, устанавливаемого на тракторы с двигателем ЯМЗ, ГТР-480 из-за качества исполнения колесной системы имеет более низкий КПД, что приводит к низкой производительности машины Т-10.0000 с ГМТ и высокому расходу топлива.*

Для более плавного трогания трактора (более медленного нарастания давления в бустерах КП) в гидросистеме управления (серийном блоке клапанов КП) установлен дроссель меньшего сечения (1 мм), чем у серийного.

Новая трансмиссия по сравнению с ГМТ – «холодная», ее применение позволяет уйти от ряда серьезных моментов по системе охлаждения на тракторах с ГМТ. В связи с более низкими тепловыми режимами в трансмиссии появляется возможность отказаться от более дорогого и менее надежного латунного радиатора ГМТ и применить стальной радиатор. По результатам испытаний температура трансмиссии со стальным радиатором в летний период не превышала 55 °С.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

### 1.13 Преимущества трактора Б10 с упругой муфтой

Они заключаются в повышении технического уровня и надежности, улучшении условий труда оператора, простоте конструкции и обслуживания трактора, высокой унификации и снижении стоимости серийного производства тракторов класса 10 с механической и гидромеханической трансмиссиями.

а) Увеличение производительности и снижение расхода топлива бульдозерного агрегата.

Эффективность применения ГМТ на тракторах класса 10 и ниже нивелируется по сравнению с тракторами с механической трансмиссией, на которых устанавливаются двигатели с запасом крутящего момента не ниже 1,25. Это, прежде всего, связано с более высоким КПД механической трансмиссии. Установка современной КП на тракторах с механической трансмиссией позволяет достигнуть еще большей эффективности агрегата за счет более быстрого реверсирования и снижения утомляемости оператора.

По сравнению с Б10.0000Е с ГМТ прирост производительности нового трактора при траншейной технологии с отсыпкой грунта в кавальер составил 3,2 %.

По абсолютному часовому расходу топлива агрегат с упругой муфтой близок к Б170 и на 9,5-16,8 % экономичнее, чем агрегат Б10 с ГМТ (загрузка топливу по результатам испытаний составляет около 70-75 % против 80-85 % у агрегата с ГМТ).

б) Улучшение условий труда оператора. Применение унифицированной кабины типа «диван» позволяет резко снизить уровень вибрации на рычагах управления КП и механизмами поворота до нормы (по результатам испытаний на тракторе Т-10 с механической трансмиссией уровень вибрации на частотах 16-63,5 Гц превышает норму в отличие от трактора Т-10.0000), а также снизить усилия на рычагах управления КП (с 100-120 до 60 Н);

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		29

– исключение двух колонок управления серийной КП трактора Т-10 с механической трансмиссией позволяет привести в норму систему доступа на рабочее место;

– исключение тяжелой (270 Н) педали муфты сцепления;

– исключение необходимости при каждом реверсе последовательно манипулировать двумя тяжелыми рычагами КП (передачи и реверса) с отжимом педали муфты сцепления, что существенно снизит утомляемость оператора при работе;

– исключение центровки двигателя и КП и соединение их с помощью карданного вала позволяет установить двигатель на амортизаторы и снизить влияние его вибрации на рабочем месте оператора.

в) Унификация и снижение стоимости серийного производства тракторов класса 10 с механической и гидромеханической трансмиссиями.

– унификация выпуска коробок передач для всех тракторов - выпуск только планетарной КП трактора Т-10.0000. Эта КП достаточно современна, надежна, отработана конструктивно и давно освоена в серийном производстве. Реализация оптимальных передаточных чисел трансмиссии на любых модификациях и комплектациях только за счет изменения числа зубьев цилиндрической пары КП;

– исключение сложных в изготовлении и эксплуатации, дорогостоящих агрегатов - муфты сцепления, ее сервомеханизма и механизма управления. Отказ от выпуска ГТР-480.

– выпуск тракторов с ГМТ только с современными высокооборотными дизелями типа ЯМЗ, Камминз, Сису и др, имеющих унифицированный ГТР-410 с покупной колесной системой высокого качества;

– применение на всех тракторах единой серийной кабины с постом управления типа «диван»;

– выпуск тракторов с двигателем Д-180 только с упругой муфтой и планетарной КП в качестве массового «дешевого» бульдозера, при этом на данном тракторе дополнительно к сказанному:

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

– используются только серийные узлы и агрегаты, за исключением упругой муфты;

– исключается жесткая центровка двигателя относительно КП, а двигатель с КП соединяется серийным карданным валом трактора Т-10.0000;

– используется надежный и более дешевый стальной радиатор трансмиссии.

г) Простота конструкции и обслуживания, повышение надежности.

Исключение муфты сцепления для трактора Б10 с механической трансмиссией позволяет:

– сократить операции ТО по ее обслуживанию (свободный ход штока сервомеханизма, установка лапок и зазора между фланцем и отжимной муфтой, регулировка давления в сервомеханизме), а также исключить точки смазки муфты и соответствующие детали.

– аннулировать габаритные и сложные корпусные детали муфты сцепления, ее сервомеханизм, блокировочный механизм, тяги и педаль управления;

– исключить известные отказы муфты сцепления (износ ползуна муфты выключения, разбивание отверстия в кожухах под стакан выжимного рычага, течи по сервомеханизму и др.)

Исключение ГТР-480 для трактора Б10 с ГМТ позволяет:

– сократить трубопроводы и рукава подвода и отвода масла, клапана входа и выхода, контрольные датчики давления и температуры ГТР;

– аннулировать ненадежный латунный радиатор ГМТ;

– исключить известные отказы по ГТР и ГМТ (повышенные утечки по тору ГТР, переполнение корпуса ГТР, перегрев ГМТ и др.).

Снижение габаритов и массы трансмиссии позволяет улучшить компоновочные возможности серийного трактора.

#### 1.14 Перспективы применения трактора Т-10 с упругой муфтой

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Наиболее перспективным является применение такого трактора в виде легких комплектаций для массового потребителя, а именно с 5-катковой тележкой, двигателем Д-180, с бульдозерным оборудованием без рыхлителя, т.е. в качестве «дешевого» трактора, но с более высоким техническим уровнем и условиями труда оператора, чем у серийного трактора Б10 с механической трансмиссией.

Перспективным также является комплектация такого трактора с дефорсированным двигателем Д-160 мощностью 160 л.с., что должно повысить надежность машины.

При комплектации такого трактора с бульдозером и рыхлителем желательно изменять передаточное число цилиндрической пары КП с 1,25 на 1,42 (вариант КП для ЯМЗ).

Перспективным направлением является применение таких трансмиссий на тракторах класса 8 (типа Т-140) и ниже.

Трактор не имеет каких-либо проблем при установке серийного планетарного бортового редуктора. При этом изменяются только передаточное число цилиндрической пары КП (0,913).

В целом машина имеет ограничение по применяемости в классах более 10 и не должна быть альтернативой тракторам с ГМТ и другим более тяжелым машинам.

Вывод по разделу один:

Выполнен сравнительный расчет по производительности в зависимости от типа моторно-трансмиссионной установки. По результатам расчетов выбрана наиболее эффективная трансмиссия. Она применима для тракторов класса 10. Требуемая проверки на прочность, надежность, а так же выбора передаточного числа.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## 2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Расчет МТУ на крутильные колебания

Применяющаяся динамическая система требует проверки на наличие резонансных колебаний в рабочей зоне оборотов. Для нашего случая это зона составляет 700... 1300 мин<sup>-1</sup>.

Все расчеты производились с помощью программы Analiz с использованием данных расчетно-аналитического отдела ГСКБ-ЧТЗ.

Все данные для расчета отображены на следующих страницах в виде распечатки с текстового файла результатов расчета и дают представление о работе программы.

Результаты расчета представлены в таблицах А.1 – А.5 для двух вариантов динамической системы: без торсиона и с торсионом (рабочая длина 250 мм, диаметр стержня 30 мм).

Рисунок 2.1 показывает динамическую систему МТУ, окружности с номерами - это инерционные массы, а соединяющие их линии — жесткости между массами (валы, шлицевые соединения, зубчатые зацепления).

Объясним характеристические данные и обозначения.

Моменты инерции масс, приведенные к маховику двигателя, загружены в соответствующий массив, где:

1-4 – моторные массы,

5 – масса маховика совместно с валом-фланцем (рассчитана на чертежу и составляет 5,55 кг·м<sup>2</sup>);

6 – кардан;

7 – первичный вал, солнечные шестерни 1, 2 рядов, эпицикл с дисками 2-го ряда, сателлиты 1, 2 рядов;

8 – эпицикл и сателлиты первого ряда;

9 – корпус трактора;

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		33



10 - первое водило, сателлиты 1, 2, 3, 4 рядов, солнечная шестерня и эпицикл 4-го ряда;

11 – эпицикл с дисками и сателлиты 3-го ряда;

12 – солнце и сателлиты 3-го ряда;

13 – второе водило, сателлиты 4, 5 рядов;

14 – солнце и сателлиты 5-го ряда;

15 – эпицикл с дисками 5-го ряда;

16 – корпус трактора;

17 – ведущая шестерня согласующего редуктора;

18 – ведомая шестерня и выходной вал согласующего редуктора;

19 – главная передача;

20, 24 – правый и левый бортфрикцион;

21, 25 – ведомые массы бортфрикционов;

22, 26 – правый и левый бортовой редуктор;

23, 27 — ведущая звездочка, гусеница,  $\frac{1}{2}$  части поступательно прямолинейно движущейся массы БРА. ( $m_{БА} = 20150$  кг).

Данные по номерам в массиве характеристических данных:

- 1) .400E+01 идентично 4 – число цилиндров;
- 2) 1,69 кг/см<sup>2</sup> – давление наддува на номинальных оборотах;
- 3) 14,5 – степень сжатия;
- 4) 10,3 см – радиус кривошипа;
- 5) 0.27 – отношение радиуса кривошипа к длине главного шатуна;
- 6) 0 . – отношение радиуса прицепа к длине прицепного шатуна;
- 7) 0 . – отношение радиуса кривошипа к длине прицепного шатуна;
- 8) 6,22 кг – вес поршня в сборе;
- 9) 9,13 кг – вес главного шатуна;
- 10) 0 .кг – вес прицепного шатуна;
- 11) 1250 мин<sup>-1</sup> – номинальные обороты двигателя;
- 12) 103 кг-м – номинальный крутящий момент;

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

- 13)  $900 \text{ мин}^{-1}$  – обороты максимального крутящего момента;
- 14) 129 кг-м – максимальный крутящий момент;
- 15)  $600 \text{ мин}^{-1}$  – минимальные обороты холостого хода;
- 16)  $1280 \text{ мин}^{-1}$  – максимальные обороты холостого хода;
- 17)  $m=2$  для четырехтактного двигателя;
- 18)  $0^\circ$ . – угол, равный углу прицепа минус угол развила;
- 19) 15 см – диаметр цилиндра;
- 20)  $0^\circ$ . – угол поворота коленчатого вала между вспышками в прицепном и главном цилиндре;
- 21)  $50 \text{ 1/с}^2$  – угловое ускорение двигателя при запуске.

Цель расчета – установка целесообразности применения торсиона. Момент инерции маховика имеет значение, удовлетворяющее условию устойчивой работы двигателя (по счету заводского применения) также нежелательна чрезмерно большая маховая масса во избежание больших углов закрутки. Параметры торсиона отчасти выбраны по конструктивным соображениям (рабочая длина 250 мм, из габаритов узла), диаметр (30 мм) по опыту других конструкций (в частности на тягачах КЗКТ применяются торсионы от 32 до 45 мм). Податливость такого торсиона составляет  $7400 \cdot 10^{-8} (H \cdot M)^{-1}$ .

Так как в итоге расчета (см. таблицы А.2, А.3, А.4 Приложения А) мы получили большое количество резонансных оборотов (при возмущающих моментах от двигателя) нужно выяснить какие обороты являются самыми опасными для прочности конструкции. При расчете крутильных систем с поршневыми двигателями практическое значение имеют 3-5 форм колебаний[14].

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

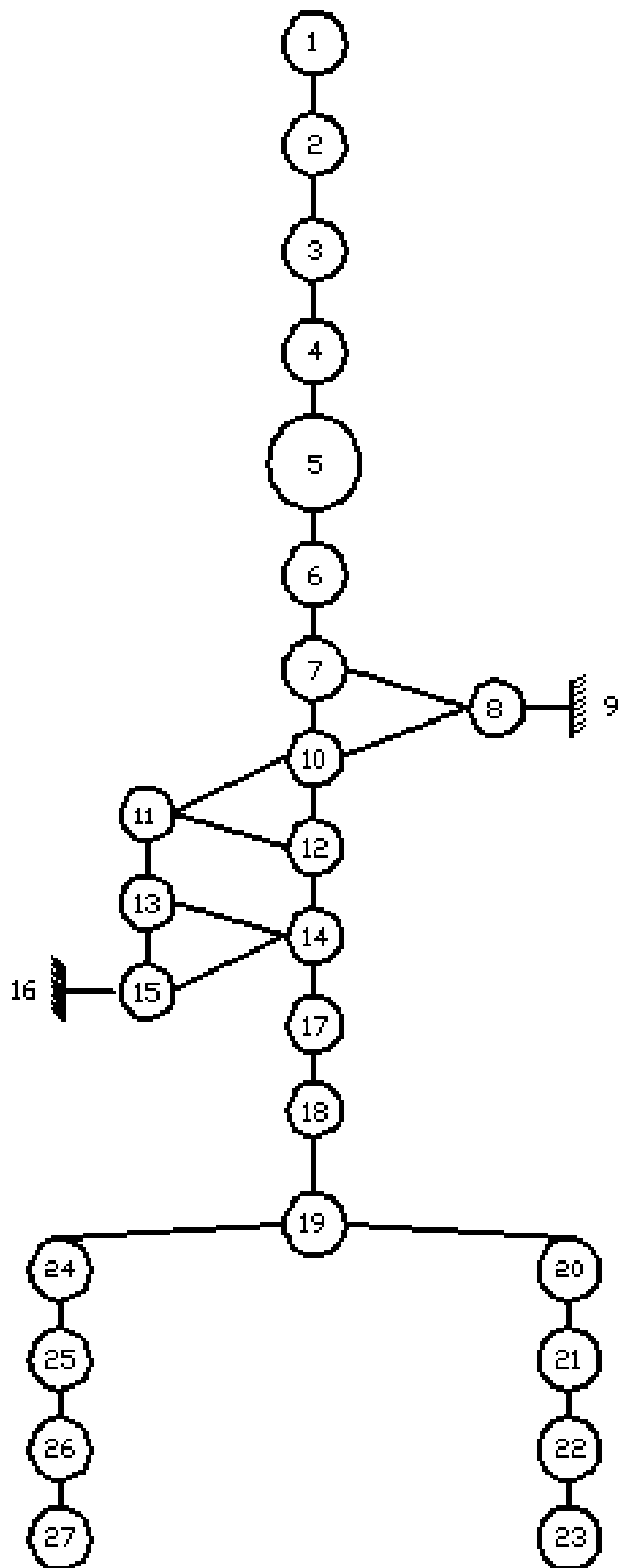


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема крутильных колебаний МТУ (1 передача, ПХ)

Выясним какие частоты резонансных колебаний опасны для трансмиссии без установки торсиона (таблицы А.4, А.5 Приложение). Эти обороты:

а)  $1038,2 \text{ мин}^{-1}$  (7 узлов колебаний, резонансная гармоника  $K=1,5$ , упругие моменты в соединениях 5-6, 6-7, 7-8, 8-9 высокие, а в соединении 5-6 превышают допустимую нагрузку в  $322 \text{ кг-м}$ );

б)  $778,7 \text{ мин}^{-1}$  (7 узлов колебаний, резонансная гармоника  $K=2$ , упругие моменты выше на порядок по сравнению с предыдущими оборотами;

в)  $845,7 \text{ мин}^{-1}$  (резонансная гармоника  $K=4$ , упругие моменты в соединениях 5-6, 7-8, 6-7 превышают допустимый уровень ( $322 \text{ мм}$  при коэффициенте динамичности  $K_3=3$ ).

Найдем опасные обороты для варианта трансмиссии с торсионом (податливость  $7400-10^8 \text{ (Н}\cdot\text{м}^{-1})$ ).

Судя по упругим моментам значения этих оборотов составляют:  $1120,8 \text{ об/мин}$  (резонансная гармоника  $K=4$ , 9 узлов колебаний, опасный уровень напряжения в соединении 7-8 (зубчатая передача).

Таким образом, применение торсиона позволило избавиться от трех резонансных частот, но появилась другая опасная частота, причем другой формы колебаний.

Стоит заметить, что опасные резонансные обороты при варианте с торсионом менее опасны, чем обороты в варианте трансмиссии без него.

Отметим, что соединение 5-6 это либо торсион, либо более жесткий вал, соединяющий кардан с маховиком; соединение 6-7 соединительная муфта, первичный вал.

Наиболее сильный источник возмущений в трансмиссии это двигатель (проведенный расчет учитывает эти возмущения). Но существуют другие возмущения, например, от бульдозерного отвала при проведении процесса копания. Но так как эти возмущения не столь значительны, расчеты по ним не производились.

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		37

## 2.2 Детальная разработка гасителя крутильных колебаний

Данный узел устанавливается вместо муфты сцепления, то есть крепится к кожуху маховика. Габаритный размер по длине выдерживается постоянным, что позволяет использовать серийный кардан от трактора Т-10.02.

Узел состоит (см. рисунок 2.2) из сборного вала, внутри которого установлен торсион, в свою очередь сборный вал передает крутящий момент на кардан через серийную полумуфту.

Сборный вал состоит из вала-фланца, крепящегося на маховике, и выходного вала, соединенного с полумуфтой кардан. Обе половинки вала имеют возможность поворачиваться относительно друг друга. Для повышения надежности добавлено три опоры (шариковые радиальные подшипники). Конструкция опор валов позволяет регулировать зазор при стыковке половинок и не допускает их соприкосновения. Регулировка зазоров в опорах производится установкой (удалением) прокладки. Торсион имеет возможность перемещаться и, благодаря бочкообразной форме продольного профиля шлицев, допускается перекося при работе. Торсион упирается в крышки с уплотнениями, а сама полость гасителя заполнена смазкой.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

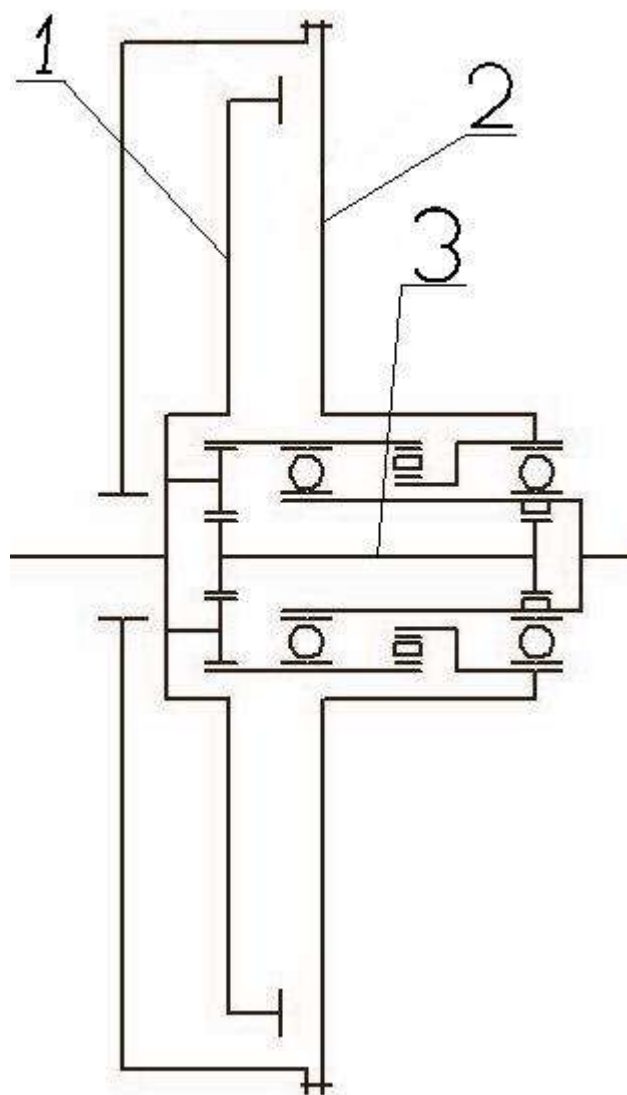


Рисунок 2.2 – Гаситель крутильных колебаний:

1 – маховик двигателя; 2 – корпус; 3 – торсион.

Сборный вал помещается в корпусе, состоящем из двух частей. Место разъема сборного вала и корпусов допускает разборку узла без его демонтажа с трактора. Половинка корпуса, которая закрепляется на кожухе маховика, имеет все серийные присоединительные размеры, а также все необходимые кронштейны для установки серийных узлов (например, кронштейн для прикрепления педального узла и пр.). Появился дополнительный кронштейн для закрепления

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

39

масляного фильтра в измененном положении (развернут на 90° и смещен к лонжерону).

Конструкция узла допускает установку пары мокрого трения для дополнительного рассеивания энергии при резонансных колебаниях, если в ходе испытаний они будут иметь место.

Необходимо провести расчет на прочность самого торсиона (при предельной нагрузке).

Торсион изготовлен по ГОСТ 4543–71 [11], из стали 45ХН2МФА с пределом прочности при

кручении  $\tau_T = 1200$  Мпа. Диаметр рабочей части торсиона  $d=30$  мм.

Торсион рассчитывали на кручение по формуле:

$$\tau_T = \frac{T_{\max}}{W_{кр}} \leq [\tau], \quad (2.1)$$

где  $\tau_T$  – касательное напряжение в стержне торсиона,  
 $T_{\max}$  -максимальный динамический момент,

$W_{кр} = 0,2d^3$  – момент сопротивления кручению,

$[\tau]=850$  Мпа (по рекомендации [5] предельное касательное напряжение).

Максимальный динамический момент равен 3160 Н·м (коэффициент динамичности  $K_3=2,5$ ).

Итак:

$$\tau_T = \frac{3160 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot (0,03)^3} = 585 \text{ Мпа} < [\tau]=850 \text{ Мпа (для стали 45ХН2МФА)}.$$

Условие статической прочности выполнено.

Ввиду значительного запаса по статической прочности расчет на сопротивление усталостным напряжениям можно не проводить[5].

Расчет на прочность шлицевых эвольвентных соединений

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

В разработанной конструкции необходимо проверить шлицевые соединения торсиона со сборным валом и зубчатого колеса с валом цилиндрической пары согласующего редуктора.

Шлицы выполнены по ГОСТ 6033-80 [12]. Размер шлицов для головки торсиона 50x2 (наружный диаметр  $D=50$  мм, модуль  $m=2$  мм).

Предел текучести материала рабочих поверхностей зубьев торсиона

$$\sigma_T = 350 \text{ Мпа.}$$

Рассчитаем шлицы на смятие (он предупреждает пластические деформации рабочих поверхностей зубьев при перегрузках).

Вычисляем напряжение смятия:

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot T_{\max}}{d_{cp} \cdot \ell \cdot h \cdot z}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma_{cp}$  - средний диаметр соединения,

$h$  - рабочая высота зубьев,

для эвольвентных зубьев:  $h \approx m$ ,  $d_{cp} = z \cdot m$ ,

$z$  - число зубьев (шлицов),

$m$  - модуль зуба соединения,

$\ell$  - длина рабочей поверхности шлицов,

$T_{\max}$  - максимальный крутящий момент.

Для торсиона:  $T_{\max} = 1315,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $\ell = 36 \text{ мм}$ ,  $d_{cp} = m \cdot z = 2 \cdot 24 = 48 \text{ мм}$ ,

$m = 2 \text{ мм}$ ,  $z = 24$ ,  $h = 2 \text{ мм}$ ,

тогда:  $\sigma_{см} = \frac{2 \cdot 1315,2}{0,048 \cdot 0,036 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 24} = 31,7 \text{ Мпа.}$

Вычислим допускаемое напряжение смятия:

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



$$[\sigma_{см}] = \frac{\sigma_T}{S \cdot K_3 \cdot K_{np} \cdot K_{II} \cdot K_D}, \quad (2.3)$$

где  $S$  - коэффициент запаса прочности,

$K_3$  - коэффициент неравномерности распределения нагрузки между зубьями,

$K_{np}$  - коэффициент продольной концентрации нагрузки,

$K_n$  - коэффициент концентрации нагрузки от погрешности изготовления,

$K_D$  - коэффициент динамичности нагрузки.

Для торсиона:  $S = 1,4$ ,  $K_3 = 1$  (передает только крутящий момент),

$$K_{np} = 1,08, \quad K_n = 1,3, \quad K_D = 2.$$

тогда: 
$$[\sigma_{см}] = \frac{350}{1,5 \cdot 1 \cdot 1,08 \cdot 1,3 \cdot 2} = 89 \text{ МПа},$$

Проверим условие: 
$$\sigma_{см} \leq [\sigma_{см}],$$

$$31,7 \text{ МПа} < 89 \text{ МПа},$$

условие выполняется.

Расчет на износ. Соединения, нагруженные только крутящим моментом, на износ не рассчитывают.

Ниже приведены фотографии отехнологиченного варианта упругой муфты.

Рисунок 2.3

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

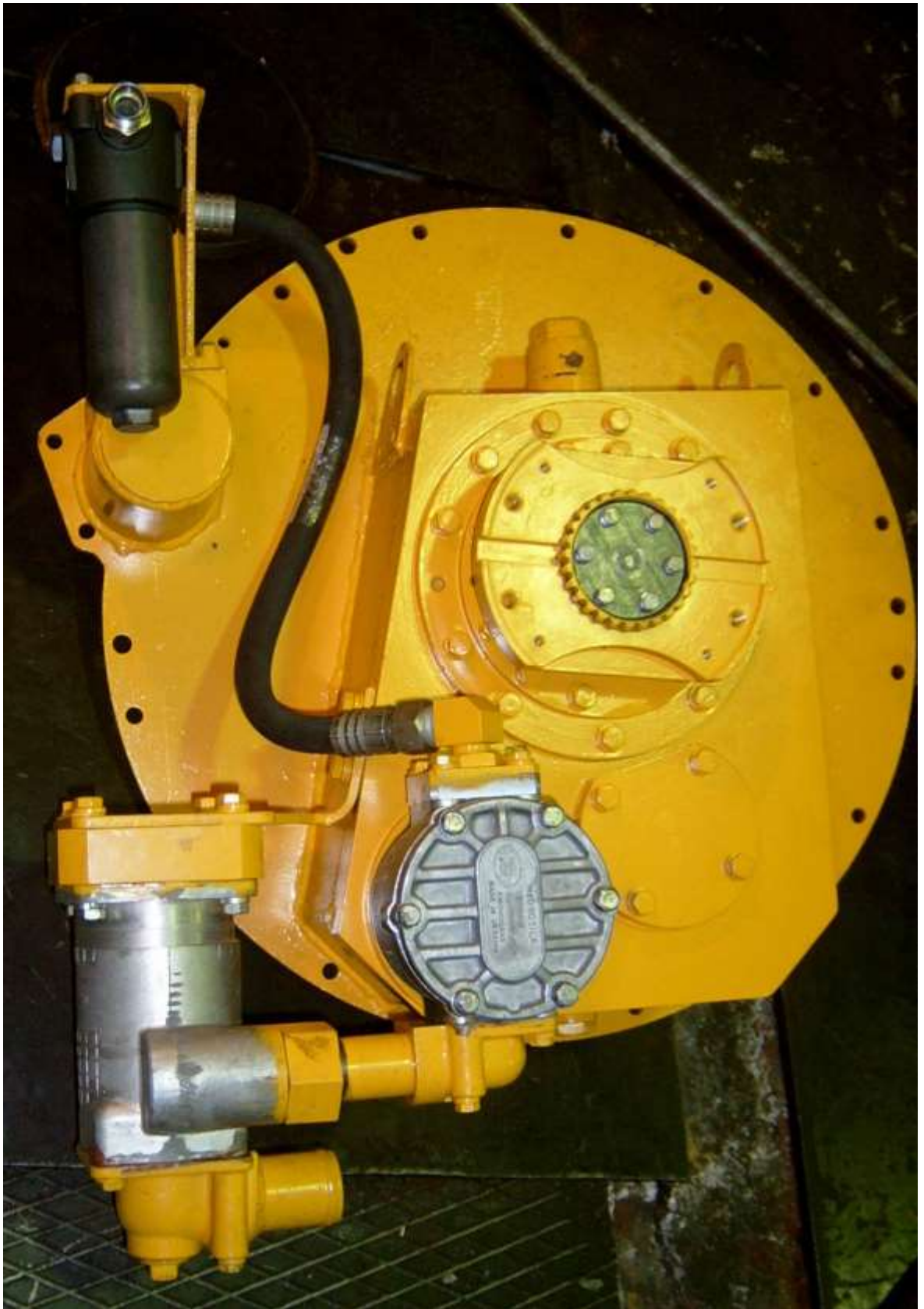


Рисунок 2.3 – Отехнологиченный вариант упругой муфты

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		43

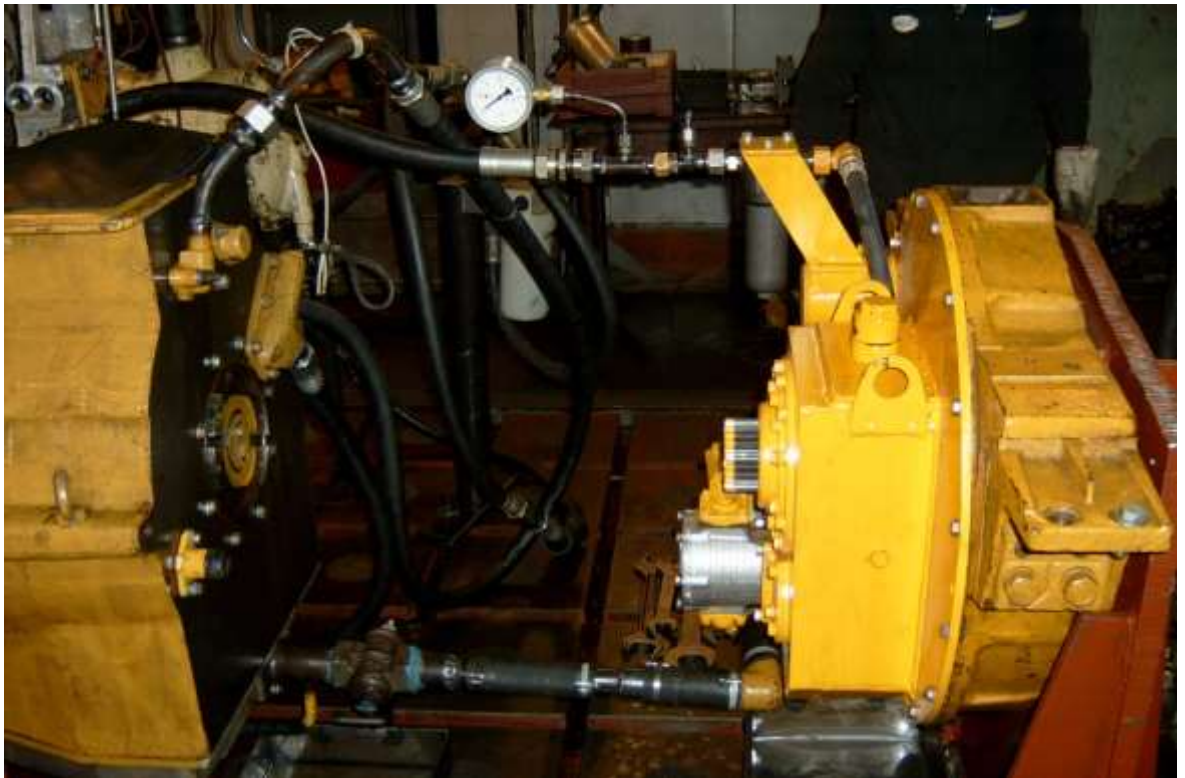


Рисунок 2.4 – Испытания отехнологиченного образца УМ на стенде



Рисунок 2.5 – Установка упругой муфты на двигатель

### 2.3 Тяговый расчет трактора с упругой муфтой

Целью тягового расчета является определение тягово-сцепных, скоростных и экономических качеств трактора при прямолинейном поступательном движении.

При проведении тягового расчета определяют мощность, подводимую к ведущим колесам, КПД, тяговый и мощностной баланс, диапазон скоростей движения, оценивают разгонные качества проектируемой машины.

В заключении расчета строят тяговую характеристику трактора, отражающую тягово-сцепные, скоростные и экономические показатели при различных установившихся режимах работы.

Все расчеты проводились с помощью методики, разработанной на ОАО «ЧТЗ». Расчет проведен для двигателя постоянной мощности с высоким коэффициентом запаса по крутящему моменту  $\approx 1,6$ . Исходные данные и остальные полученные величины занесены в таблицы и по ним строим график рисунок 2.6.

Расчетные формулы и обозначения.

Баланс мощности тракторного агрегата:

$$N_{кр} = N_e - N_{тр} - N_f - N_{\delta}, \quad (2.4)$$

где  $N_{кр}$  – мощность на крюке (л. с.);

$N_{тр}$  – механические потери мощности в трансмиссии (л. с.);

$N_f$  – потери мощности на самопередвижение (л. с.);

$N_{\delta}$  – потери мощности на буксование (л. с.);

$$N_{тр} = N_e(1 - \eta_{тр}), \quad (2.5)$$

где  $N_e$  – эффективная мощность двигателя с учетом независимого отбора (л. с.)

$N_n$  – мощность на нососе (л. с.);

$\eta_{тр}$  – КПД трансмиссии;

$$\eta_{тр} = \eta_{кпп} \cdot \eta_{кп} \cdot \eta_{бр}, \quad (2.6)$$

где  $\eta_{кпп}$  – КПД механической коробки передач;

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$\eta_{кп}$  - КПД конической пары;

$\eta_{бр}$  - КПД бортового редуктора;

$$N_{\delta} = P_{кр}(V_T - V_D)/270, \quad (2.7)$$

где  $P_{кр}$  – крюковое тяговое усилие (кг);

$V_T$  – теоретическая скорость движения (км/ч);

$V_D$  – действительная скорость движения (км/ч);

$$N_f = P_f \cdot V_T/270, \quad (2.8)$$

где  $P_f$  – сила сопротивления самопередвижению (кг);

$$P_f = f \cdot G, \quad (2.9)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления самопередвижению;

$G$  – вес;

$$V_T = (n_d \cdot Z_{вк} \cdot t_{гус} \cdot 60)/(1000 \cdot i_{тр}), \quad (2.10)$$

где  $n_d$  - частота вращения вала двигателя (об/мин);

$Z_{вк}$  – число звеньев гусеничной цепи, перематываемых за оборот ведущего колеса;

$t_{гус}$  – шаг гусеничной цепи (м);

$i_{тр}$  – передаточное число трансмиссии по передачам;

$$V_D = V_T \cdot (1 - \delta), \quad (2.11)$$

где  $\delta$  - коэффициент буксования гусеничного движителя;

$$P_{кр} = P_k - P_f, \quad (2.12)$$

где  $P_k$  – касательное тяговое усилие на гусенице (кг);

$$P_k = (M_D \cdot i_{тр} \cdot \eta_{мп} \cdot \eta_{гус})/R_{вк}, \quad (2.13)$$

где  $M_D$  – крутящий момент на валу двигателя (кг·м);

$\eta_{гус}$  - КПД гусеничного движителя;

$R_{вк}$  – радиус ведущего колеса (м);

$$R_{вк} = Z_{вк} \cdot t_{гус}/6,28. \quad (2.14)$$

Условный тяговый КПД трактора:

$$\eta_{тяг} = N_{кр}/N_e. \quad (2.15)$$

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## Тяговый расчет

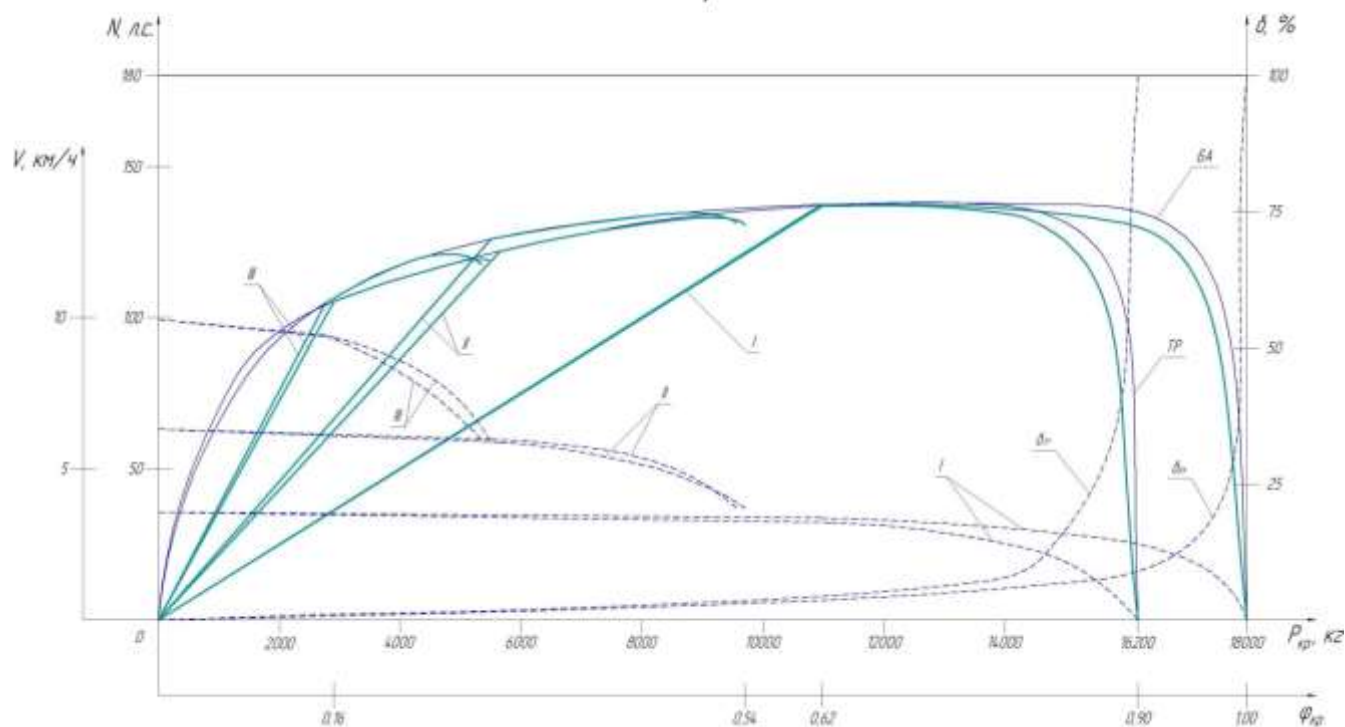


Рисунок 2.6 – Тяговый расчет

Вывод по разделу два:

Выполнен расчет МТУ на крутильные колебания, проведена оценка тяговой характеристики.

Анализ схемы на крутильные колебания показала прямое, жесткое соединение двигателя и коробки невозможно, связи с наличием крутильных колебаний с опасными частотами. Работоспособность трансмиссии обеспечено, за счет применения упругой муфты (гасителя крутильных колебаний) позволяющий исключить резонансные колебания. Это требует экспериментальной проверки, а так же экспериментальное подтверждение эффективности агрегатов трансмиссии в условиях лабораторно полигонных испытаний.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

47

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Программа-методика экспериментальных исследований МТУ трактора Б10.0800-1Ес упругой муфтой

Исследования заключаются в экспериментальной оценке упругих моментов при работе МТУ. Оценка величины упругих моментов осуществляется методами тензометрии в предполагаемой опасной зоне – на выходе упругой муфты.

#### 3.2 Разработка и отладка тензомодуля для записи крутящего момента

Тензомодуль выполнен на базе полумуфты карданного вала (см. рисунок 3.1 а), устанавливаемую вместо серийной полумуфты и изготовленную в соответствии с эскизом (рисунок 3.1 б). Общий вид тензомодуля представлен на рисунке 3.2.

Измерительная часть тензомодуля содержит тензодатчики, измерительный преобразователь ИПТ, выполненный в виде печатной платы, элемент питания емкостью 250мАч (рисунок 3.3а,б), приемник сигнала (рисунок 3.4), устанавливаемый в ноутбук. На рабочую поверхность полумуфты наклеены тензодатчики для измерения крутящего момента, соединенные в полумост.

Общий вид графического интерфейса программного обеспечения представлен на рисунке 3.5.

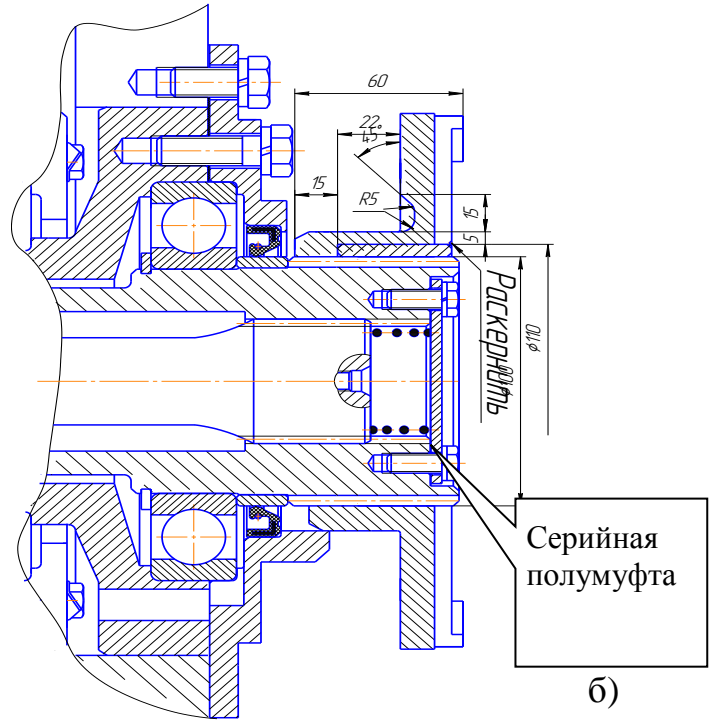
##### 3.2.1 Назначение измерительного преобразователя

Измерительный преобразователь ИПТ предназначен для измерения разностного сигнала с выхода резистивных полумостовых тензодатчиков и передачи результатов измерения по интерфейсу RS-232.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.1 – Полумуфта тензомодуля



Рисунок 3.2 – Тензомодуль

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

49





а)



б)

Рисунок 3.3 – Элемент питания преобразователя ИПТ



Рисунок 3.4 – Приемник сигнала

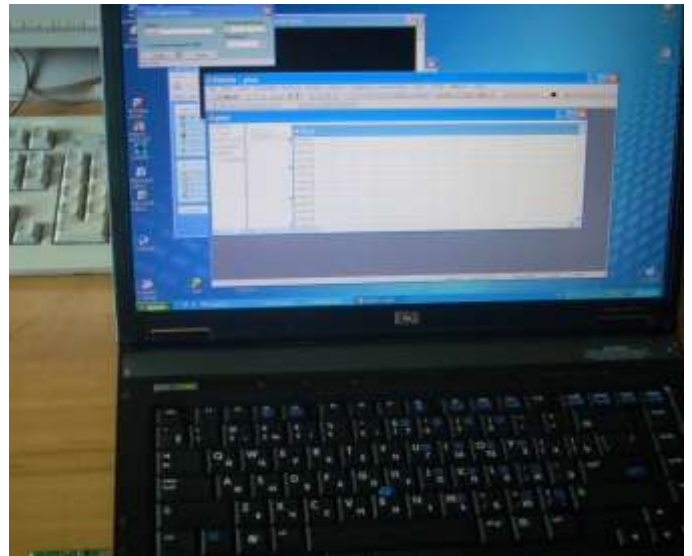


Рисунок 3.5 – Графический интерфейс программного обеспечения

### 3.2.2 Конструкция устройства

Преобразователь выполнен в виде печатной платы – класс защиты IP00.

Схема расположения компонентов на плате и обозначение выходных клемм приведено на рисунке 3.6.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		50

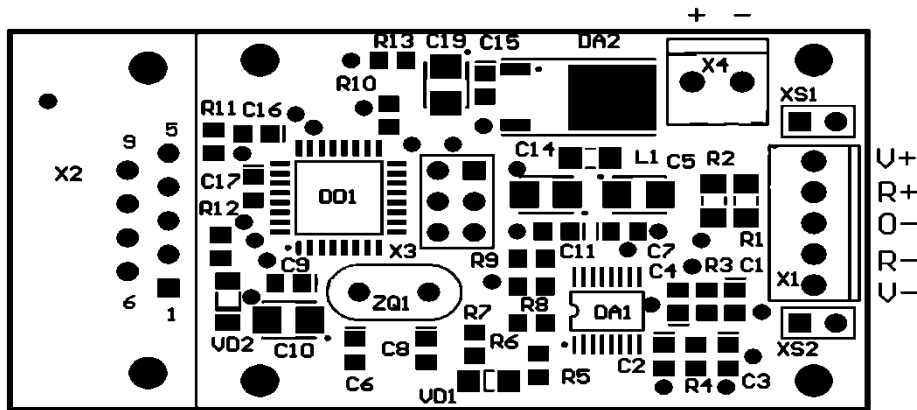


Рисунок 3.6 – Вид печатной платы измерительного преобразователя со стороны установки компонентов

Назначение контактов разъемов приведено в таблице 3.2.

Джамперы XS1 и XS2 предназначены для переключения между 3-х проводной и 5-ти проводной схемой переключения датчика. Установка этих джамперов соответствует 3-х проводной схеме, их отсутствие 5-ти проводной.

Таблица 3.2 – Назначение контактов разъемов ИПТ

Обозначение разъема	Обозначение контакта	Назначение
X1	V+	+U <sub>пит</sub> измеряемого полумоста
	R+	Вход измерения +U <sub>пит</sub>
	O-	Вход измерения средней точки полумоста
	R-	Вход измерения -U <sub>пит</sub> измеряемого полумоста
	V-	-U <sub>пит</sub> измеряемого полумоста
X2	+	+U <sub>пит</sub> устройства
	-	-U <sub>пит</sub> устройства
X3 <sup>1</sup>	1-9	Подключение интерфейса RS-232
X4	-	Служебный разъем, подключение не допускается

<sup>1</sup> – обозначения и номера контактов и уровни напряжений на входах и выходах соответствуют стандарту интерфейса RS-232. Применяемый тип разъема DB-9.

### 3.2.3 Описание работы устройства

Измерительная часть преобразователя построена на 24-разрядном  $\Delta\Sigma$  аналогово-цифровой преобразователе (АЦП) AD7799 (Analog Devices). Цифровая часть устройства выполнена на 8-ми разрядном микроконтроллере ATmega 16 (ATMEL), который связан с АЦП по интерфейсу SPI. Преобразование уровней между интерфейсом RS-232 и микроконтроллером осуществляет микросхема ADM101.

Измерительная схема, использованная в преобразователе, изображена на рисунке 3.7.

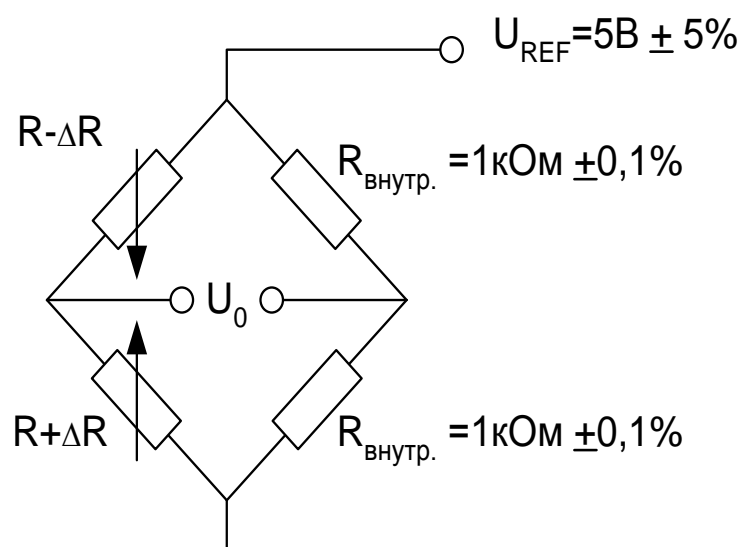


Рисунок 3.7 – Схема для измерения разностного сигнала с выхода полумостового тензопреобразователя

Вторая половина мостового измерителя выполнена с помощью делителя на прецизионных резисторах  $R_{\text{внутр}}$  ( $R_1$  и  $R_2$  на принципиальной схеме). Измеряемые резисторы должны быть одинакового номинала.

От погрешности неравенства резисторов  $R_{\text{внутр}}$ , а также от погрешности

неравенства величин измеряемых резисторов, можно избавиться откалибровав «0» перед началом измерения.

Разностное напряжение с выхода мостового преобразователя, если пренебречь перечисленными выше погрешностями, можно записать следующим образом:

$$U_0 = \frac{U_{REF}}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right], \quad (3.1)$$

где  $U_0$  – разностное напряжение с выхода моста;

$R$  – измеряемое сопротивление;

$U_{REF}$  – напряжение питания моста и одновременно опорное напряжение АЦП.

Напряжение биполярного и униполярного режимов может быть вычислено по формулам (2) и (3) соответственно.

$$\text{Code}_B = 2^{N-1} \times \left[ U_0 \times \frac{\text{GAIN}}{U_{REF}} + 1 \right], \quad (3.2)$$

$$\text{Code}_U = 2^N \times \left[ U_0 \times \frac{\text{GAIN}}{U_{REF}} \right], \quad (3.3)$$

где  $N=24$  – разрядность преобразователя AD7799;

$\text{GAIN}$  – коэффициент усиления внутреннего усилителя АЦП, может выбираться из ряда 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128.

При измерении преобразователем напряжения  $U_0$ , на результате измерения прямым образом сказываются погрешности опорного напряжения  $U_{REF}$ , поэтому пользоваться результатами этого измерения можно только с учетом этих погрешностей.

При использовании преобразователя в качестве измерителя напряжения на входе О- необходимо учитывать, что измеряемое напряжение должно находиться в пределах от потенциала точки U- до потенциала точки U+ ( $0 \dots U_{REF}$ ), в противном случае возможен выход из строя .

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Основное назначение преобразователя – измерение относительного отклонения тензорезисторов  $\frac{\Delta R}{R}$ .

Сопротивление тензорезистора можно вычислить по формуле:

$$R_T = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.4)$$

где  $l$  – длина проводника;

$S$  – поперечное сечение проводника;

$\rho$  – удельное сопротивление материала, из которого изготовлен тензорезистор.

Продифференцировав (2.4), получаем:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta l}{l}(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta l}{l}(1 + 2\nu + K_\rho), \quad (3.5)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Выражение (3.5) можно записать в виде

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + K_\rho)\varepsilon = K \cdot \varepsilon, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  – деформация;

$K$  – коэффициент тензочувствительности – приводится в паспорте данных на тензорезистор.

Подставив (2.1) в (2.2) и (2.3), получим зависимость кода на выходе АЦП для биполярного и униполярного режимов измерения соответственно:

$$\text{Code}_B = 2^{N-1} \times \left[ \frac{\Delta R}{R} \times \frac{\text{GAIN}}{2} + 1 \right], \quad (3.7)$$

$$\text{Code} = 2^N \times \left[ \frac{\Delta R}{R} \times \frac{\text{GAIN}}{2} \right]. \quad (3.8)$$

Погрешность от изменения  $U_{REF}$  при данном способе измерения отсутствуют.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Коэффициент усиления и частота преобразования могут выбираться при помощи программы управления. Частота преобразования может выбираться из ряда 4,17 Гц; 8,33 Гц; 16,7 Гц; 33,3 Гц; 62,5 Гц; 125 Гц; 250 Гц; 500 Гц.

Шумы АЦП зависят от установленной частоты преобразования и коэффициента усиления.

В таблице 2.3 приведены разрешения с учетом среднего значения шума. В скобках приведены разрешения с учетом пикового значения шума.

Таблица 3.3 – Значения шума

Частота преобр., Гц	Коэффициент усиления							
	1	2	4	8	16	32	64	128
4,17	23 (20,5)	22 (19,5)	22,5 (20)	22,5 (20)	22 (19,5)	22 (19,5)	21,5 (19)	20,5 (18)
8,33	22 (19,5)	21,5 (19)	22 (19,5)	22 (19,5)	21,5 (19)	21,5 (19)	20,5 (18)	20 (17,5)
16,7	21,5 (19)	20,5 (18)	21,5 (19)	21 (18,5)	20,5 (18)	20,5 (18)	20 (17,5)	19,5 (17)
33,3	21 (18,5)	20 (17,5)	21 (18,5)	20,5 (18)	20 (17,5)	20 (17,5)	19,5 (17)	19 (16,5)
62,5	20,5 (18)	19,5 (17)	20,5 (18)	20 (17,5)	19,5 (17)	19,5 (17)	19 (16,5)	18,5 (16)
125	20 (17,5)	19 (16,5)	20 (17,5)	19,5 (17)	19 (16,5)	19 (16,5)	18,5 (16)	18 (15,5)
250	18,5 (16)	18 (15,5)	18,5 (16)	18 (15,5)	18 (15,5)	18,5 (16)	18 (15,5)	17 (14,5)
500	18,5 (16)	18 (15,5)	18,5 (16)	18,5 (16)	18 (15,5)	18,5 (16)	17,5 (15)	16,5 (14)

Данные получены при  $U_{REF} = 2,5$  В. На рисунке 3.8 приведена зависимость среднего шума, приведенного ко входу от опорного напряжения.

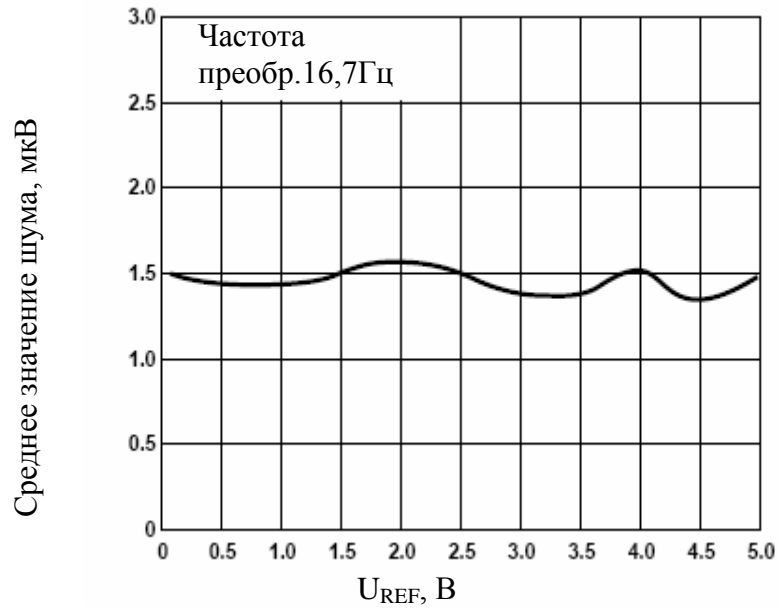


Рисунок 3.8 – Зависимость среднего шума от опорного напряжения

### 3.2.4 Схема подключения

Рекомендуется использовать две схемы подключения преобразователя к измеряемым тензорезисторам, представленные на рисунках 3.9 и 3.10.

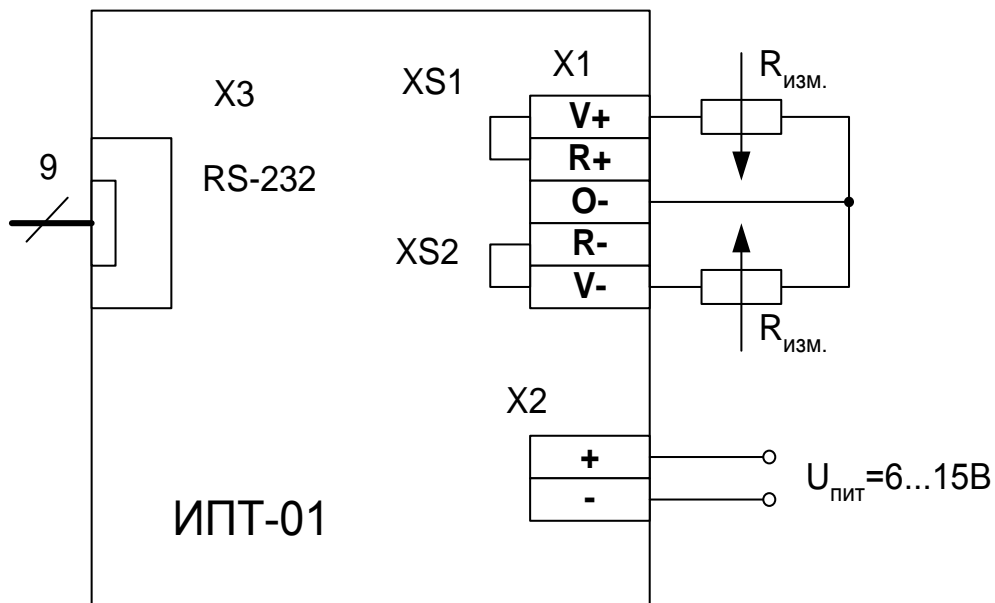


Рисунок 3.9 – Трехпроводная схема подключения измеряемого полумоста  
Джамперы XS1, XS2 – замкнуты

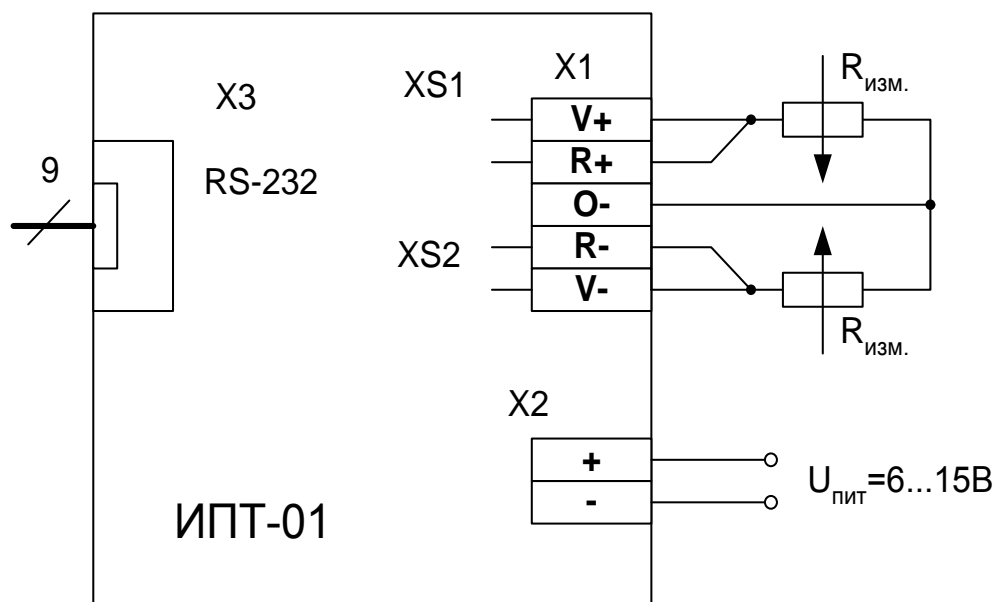


Рисунок 3.10 – Пятипроводная схема подключения измеряемого полумоста  
Джамперы XS1, XS2 – разомкнуты.

Основное отличие пятипроводной схемы от трехпроводной заключается в том, что с ее помощью удастся избежать погрешности, вызванной сопротивлением подводящих проводов.

### 3.2.5 Технические характеристики ИПТ

Характеристики ИПТ представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики ИПТ.

Характеристики	Значение	Единицы измерения
Минимальное напряжение питания, $U_{\text{пит мин}}$	6	В
Максимальное напряжение питания, $U_{\text{пит max}}$	15	В



Окончание Таблица 3.4

Ток потребления, $I_{\text{потр max}}^{(1)}$	20	мА
Опорное напряжение, $U_{\text{ref}}$	$5 \pm 5\%$	В
Температурный коэффициент $U_{\text{REF}}$	150	ppm/°C
Изменение опорного напряжения в зависимости от нагрузки $\Delta U_{\text{REF}}$ , не более	0,4	%
Измерительный ток $I_{\text{изм.}}$ , не более	30	мА
Измеряемое сопротивление $R_{\text{min}}^{(2)}$	175	Ом
Измеряемое сопротивление $R_{\text{max}}^{(3)}$	20	кОм
Измеряемое напряжение $U_{\text{min}}$	$U(V-) + 100 \text{ мВ}$	
Измеряемое напряжение $U_{\text{max}}^{(4)}$	$U(V+) - 100 \text{ мВ}$	
Разрядность АЦП	24	бит
Габаритные размеры	30 x 65 x 15	мм

(1). Без учета потребления измеряемой цепи.

(2). Сопротивление всего измеряемого полумоста.

(3). При больших значениях измеряемых сопротивлений преобразователь не тестировался.

(4). При использовании усилителя с коэффициентом усиления  $\geq 4$ , входное напряжение должно быть ограничено до  $0,9 \times \frac{U_{REF}}{GAIN}$ .

### 3.2.6 Условия эксплуатации

Степень защиты	IP00;
Рабочая температура	- 20...+ 100°C;
Температура хранения	- 40...+ 60°C;
Относительная влажность	не более 93%, отсутствие конденсата;
Прочие условия	отсутствие смазки и агрессивных веществ.

### 3.2.7 Программное обеспечение базовой ЭВМ устройства записи

#### Общая информация

Программное обеспечение (ПО) записи предназначено для использования с соответствующим аппаратным обеспечением – устройством записи (УЗ). ПО позволяет:

- задавать темп аналого – цифрового преобразования УЗ от 16,7 Гц до 500 Гц;
- задавать коэффициент усиления АЦП УЗ от 1 до 128, что соответствует диапазонам измерения напряжения от +/- 5В до +/- 39мВ;
- осуществлять визуальный контроль данных, поступающих от УЗ;
- осуществлять запись поступающих от УЗ данных в файл.

#### Системные требования ПО

ПО предназначено для эксплуатации на компьютере IBM PC с тактовой частотой более 700 МГц, с объемом оперативной памяти более 64 Мб под управлением операционной системы Microsoft Windows 2000 или XP. Для работы ПО требуется чтобы директория установки ПО была доступна на запись (это

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		59

необходимо для того, чтобы ПО могло сохранять пользовательские настройки в конфигурационном файле).

#### Файлы конфигурации ПО

Файлы конфигурации ПО хранятся в формате YAML ([www.yaml.org](http://www.yaml.org)), но знание его не обязательно, т.к. этот формат достаточно интуитивен.

ПО использует два конфигурационных файла:

**config.yml** – основной конфигурационный файл программы. В данном файле хранится множество настроек, таких как доступные темпы преобразования, доступные коэффициенты усиления, порты доступные для связи с УЗ и множество других. Данный файл содержит комментарии, поясняющие назначение и возможные значения параметров конфигурации.

**settings.yml** – в данном файле хранятся настройки выбранные пользователем, например выбранный порт для связи с УЗ, настройки графика и т.д. Этот файл каждый раз перезаписывается при выборе пользователем нового значения отслеживаемого параметра в ПО.

#### Использование ПО

Примерный вид окна ПО показан на рисунке 3.11.

#### Запуск ПО

Запуск ПО осуществляется файлом **bluegui.exe**

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		60

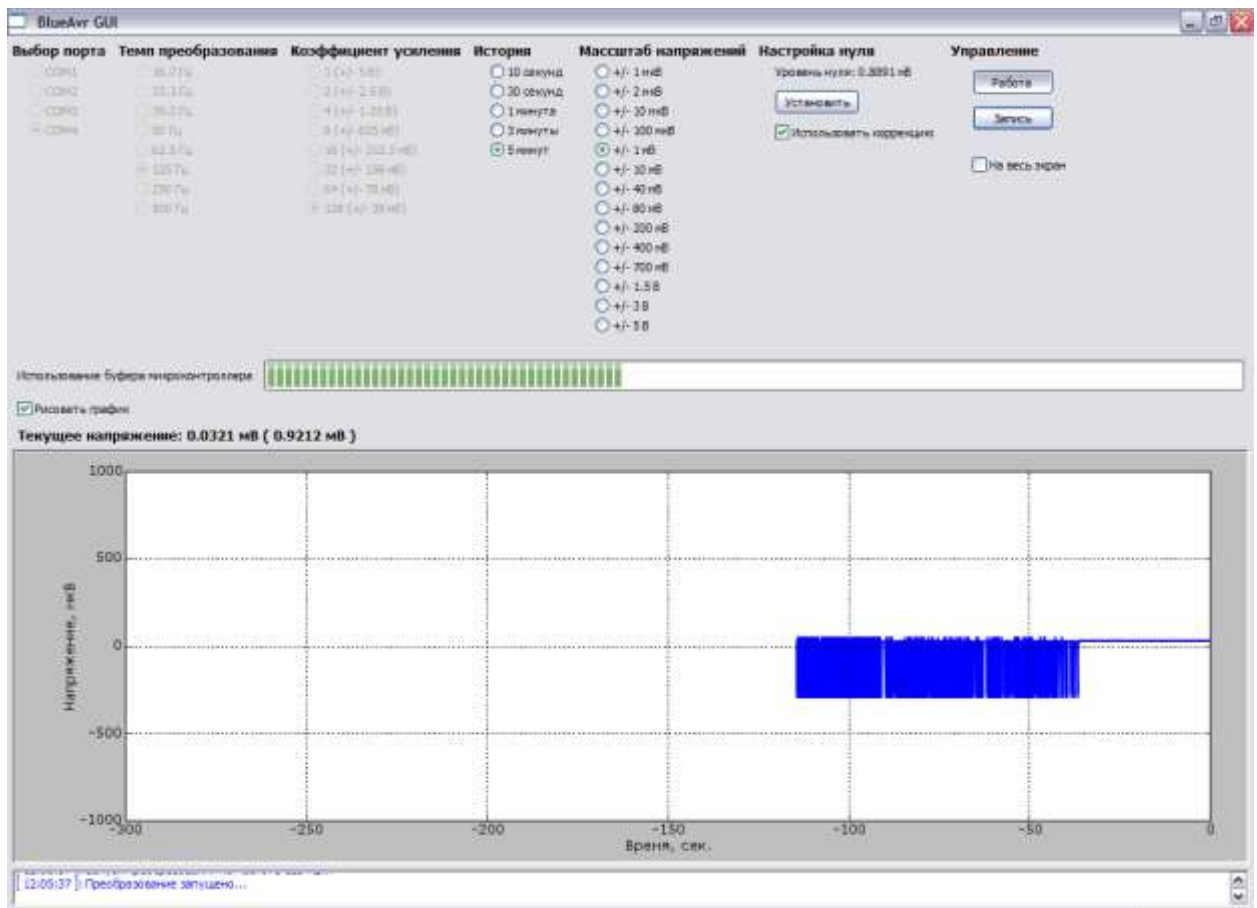


Рисунок – 3.11 Примерный вид окна ПО

### Запуск преобразования

Для запуска преобразования необходимо выполнить следующие шаги:

- выбрать порт для связи с УЗ;
- выбрать темп преобразования;
- выбрать коэффициент усиления;

нажать кнопку работа, при этом в текстовом поле внизу окна ПО (см. Рисунок – 3.1) появится сообщение о результате данного действия, например: «Преобразование запущено...». В случае успешного запуска преобразования кнопка «Работа» останется «вдавленной», а настройки выбора порта, темпа и коэффициента усиления станут неактивными.

При первом запуске преобразования после подключения адаптера Bluetooth к компьютеру запуск преобразования может занять значительное время (порядка 10 – 20 секунд), это связано с особенностями драйвера виртуального COM-порта, через который работает ПО.

## Остановка преобразования

Для остановки преобразования, нажмите ещё раз кнопку «Работа».

## Управление визуализацией в процессе работы

В процессе работы возможно выбрать глубину истории графика анализируемого сигнала и масштаб графика по напряжению. Список доступных глубин истории и масштабов графика задаётся в файле **config.yml**.

Для того чтобы отключить визуализацию (это может пригодиться для уменьшения ресурсов потребляемых ПО) отключите галочку «Рисовать график».

## Коррекция нуля

В ПО возможна программная коррекция нуля. Для того чтобы осуществить коррекцию нуля необходимо:

– установить уровень нуля, для этого нажмите кнопку «Установить» (см.Рисунок – 3.11). При этом текущее значение напряжения будет принято за уровень нуля;

– включить галочку «Использовать коррекцию» (см. Рисунок – 3.11). После этого на графике будет отображаться скорректированное напряжение, т.е. из измеренного напряжения будет вычтен установленный уровень нуля. В текстовом поле «Текущее напряжение:…» показывается текущее напряжение с коррекцией и за ней в скобках текущее напряжение без коррекции.

## Запись сигнала

Для записи сигнала в файл нажмите кнопку «Запись» в процессе работы ПО. При этом будет создан файл с именем заданным по текущей дате и времени, например: **2005-12-03-14-52-20. log**.

Для прекращения записи «отожмите» кнопку «Запись».

## Формат файла записи

Файлы записей ПО имеют текстовый формат, который удобно анализировать в специализированных программах, например в MatLab.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		62

Каждый отсчёт записывается в отдельной строке. В пределах одной строки различные параметры разделены пробелами. В каждую строку последовательно записывается следующая информация:

- время отсчёта с момента начала записи, сек.;
- напряжение с коррекцией (на момент записи отсчёта), В;
- напряжение без коррекции, В;
- кодовое слово АЦП УЗ;
- коэффициент усиления АЦП;
- отношение  $\frac{\Delta R}{R}$ .

Если кодовое слово равно нулю, или  $2^{24} - 1 = 16777215$ , или близок к нему, то это означает что АЦП находился в насыщении или близко к нему, и скорее всего, измеренное напряжение неверно.

Напряжение без коррекции может быть определено по следующей формуле:

$$V = \frac{V_{REF}}{G} \left( \frac{C}{2^{23}} - 1 \right). \quad (3.9)$$

Отношение  $\frac{\Delta R}{R}$  может быть определено как:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2}{G} \left( \frac{C}{2^{23}} - 1 \right), \quad (3.10)$$

где:

$V_{REF}$  – опорное напряжение принимается равным 5В;

$C$  – код АЦП;

$G$  – коэффициент усиления АЦП.

Обработка файла записей в пакете MatLab

Для обработки файлов записей удобно использовать пакет MatLab.

Ниже приведён пример файла, осуществляющего чтение данных из файла записи и построение графиков напряжений относительно времени.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

```

% processing_example.m
% Теперь data это прямоугольная матрица значений, считанных из
% указанного файла.
% Разумеется, надо задать имя существующего файла записи.
data = load('2005_11_17_13_33_12.log');
% Переменная log_time это вектор, т.е. столбец значений,
% со временем записи
log_time = data(:,1);
% В переменных voltage_corr и voltage_abs находятся вектора
значений
% напряжения с коррекцией и без коррекции соответственно
voltage_corr = data(:,2);
voltage_abs = data(:,3);
% В переменных adc_code и adc_gain находятся вектора значений
% кода АЦП и коэффициента усиления АЦП соответственно
adc_code = data(:,4);
adc_gain = data(:,5);
% Построение графика напряжения с коррекцией (синий)
% и без коррекции (красный)
plot( log_time, voltage_corr, 'b', log_time, voltage_abs, 'r' ), grid;
% Задание подписи на графиках
xlabel( 'Время, сек' );
        ylabel( 'Напряжение, В' )

```

3.2.7.13 Экспериментальное снятие шумовых характеристик устройства записи

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Было произведено экспериментальное снятие шумовых характеристик устройства записи в режиме работы с коэффициентом усиления АЦП 128 и частотой преобразования 250 Гц, т.е. в ожидаемом типовом режиме работы.

Было получено СКО измеренного напряжения:  $3.7057 \cdot 10^{-7}$  В. Экспериментальное распределение измеренных значений напряжения приведено на рисунке 3.13. Красной линией показано Гауссово распределение.

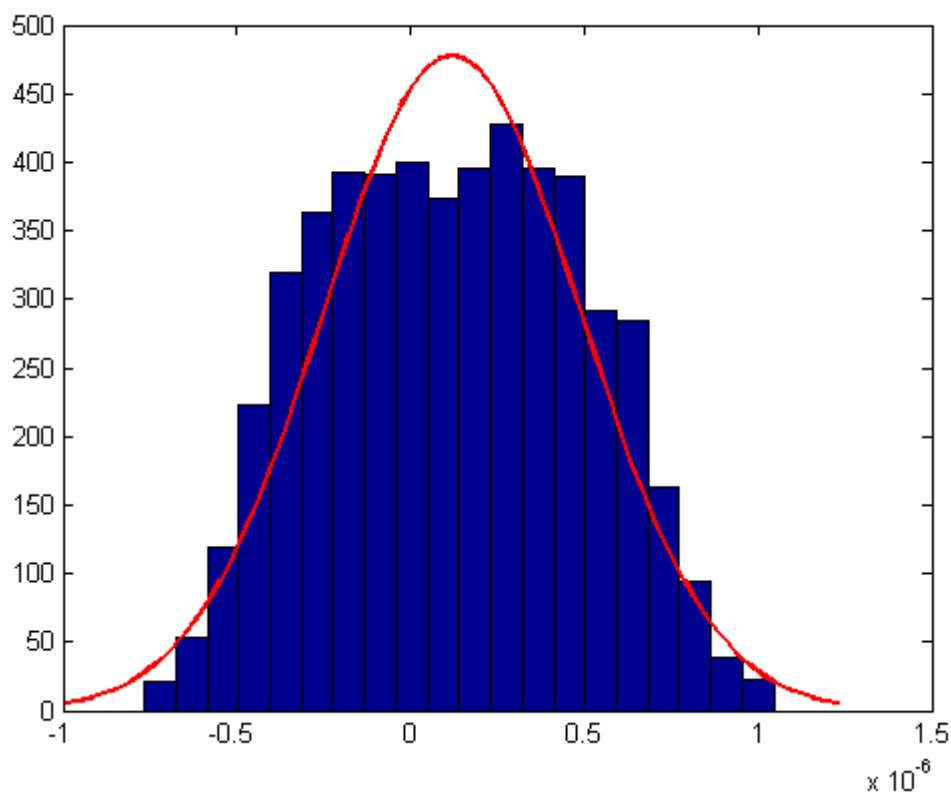


Рисунок 3.13 – Экспериментальное распределение измеренных отсчётов напряжения

Как видно из рисунка 3.13 получено распределение уже чем гауссово распределение, поэтому с можно считать что шум измерения с вероятностью 98,5% не превосходит 1,112 мкВ.

#### Результаты разработки тензомодуля

Разработанный тензомодуль обеспечивает запись крутящего момента, бесконтактный съём сигнала и его компьютерную обработку. Тензомодуль не требует никакого дополнительного оборудования, адаптирован под установку его



в трансмиссию трактора Б10М.0800-1Е в зоне наиболее выраженных упругих моментов.

### 3.3 Калибровка

Калибровка проводилась стандартным способом. Было изготовлено калибровочное приспособление кручения (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Калибровочное устройство

Которое включает в себя 2 стойки с подшипниковыми узлами, рычаг с плечом 0,552 м, редуктор с  $i_p=5,5$ . Нагружение на рычаге создавалось образцовым динамометром сжатия ДОСМ (3-1). Поправочный момент от веса рычага равен 16,357 кг×м.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

66

Калибровка тензоузла имеет линейную зависимость. Запись осуществлялась на компьютере в log файле. В дальнейшем она она обрабатывалась в Excel.

### 3.4 Проведение исследований

Испытания МТУ трактора Б10.0800-1Е с упругой муфтой проводились согласно разработанной программе-методике экспериментальных исследований.

### 3.5 Обработка результатов

#### 3.5.1 Обработка спектральной плотности

Обработка спектральной плотности проводилась методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). В пакете анализа данных Microsoft Excel 2003, инструмент – анализ Фурье. При оценке осреднение осуществлялось по 6 частотам и по отрезкам 6 полных реализаций рабочего и холостого ходов.

Первичная оценка спектральной плотности для отдельной реализации  $x(t)$  на частоте  $f$  имеет вид:

$$\tilde{G}_x(f) = \frac{2}{T} |X(f, T)|^2. \quad (3.11)$$

Так как  $T = Nh$ , то согласно обозначению:

$$X(f, T) = h \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp[-2\pi jfnh], \quad (3.12)$$

имеет вид:

$$X(f, T) = h \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-2\pi jfnh). \quad (3.13)$$

На стандартных дискретных значениях частоты:

$$f_k = \frac{k}{T} = \frac{k}{Nh}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.14)$$

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

которые получают при использовании метода БПФ, коэффициенты ряда Фурье определяются формулой:

$$X_k = \frac{X(f_k, T)}{h} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left[-j \frac{2\pi kn}{N}\right], \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.15)$$

$$X_k = \frac{X(f_k, T)}{h} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j \frac{2\pi kn}{N}), \quad (3.16)$$

Таким образом, как вытекает из соотношений (3.11) и (3.16), оценка спектральной плотности принимает вид:

$$\tilde{G}_k = \tilde{G}_x(f_k) = \frac{2}{Nh} |X(f_k, T)|^2 = \frac{2h}{N} |X_k|^2, \quad (3.17)$$

Следует подчеркнуть, что, за исключением случая  $N = 2m$ , дискретные значения частоты в формуле (3.14) не совпадают с частотами, которые фигурируют в формуле (3.18). Это означает, что при одинаковых значениях  $k$  формулы (3.17) и (3.19) в общем случае определяют оценки спектральной плотности на различных частотах [20].

$$f = \frac{kf_c}{m}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (3.18)$$

$$\tilde{G}_k = \tilde{G}_x\left(\frac{kf_c}{m}\right) = 2h \left[ \hat{R}_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} \hat{R}_r \cos\left(\frac{\pi rk}{m}\right) + (-1)^k \hat{R}_m \right], \quad (3.19)$$

### 3.5.2 Этапы расчета

Оценивание спектральной плотности методом БПФ рекомендуется проводить, используя следующую последовательность вычислений. Предположим, что исходный ряд наблюдаемых значений  $x_n$  имеет произвольную длину  $N$ .

1. Ряд наблюдаемых значений следует либо сократить, либо добавить нулевые точки с тем, чтобы удовлетворить равенству  $N = 2^p$ .
2. Полученную последовательность сгладить на концах с помощью косинусоидальной или другой подходящей сглаживающей функции.
3. Вычислить величины  $X_k$  по формуле (3.16) для  $k = 0, 1, \dots, N-1$ .

4. Вычислить по формуле (3.17) оценки  $\tilde{G}_k$  для  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ .

5. Ввести в эти оценки масштабный множитель, чтобы учесть сглаживание последовательности на концах. Если, например, используется косинусоидальная сглаживающая функция, то вместо оценок  $\tilde{G}_k$  следует взять величины  $(1/0,875) \tilde{G}_k$ .

Эти исправленные величины и есть первичные оценки спектральной плотности при  $B_e = 1/T$ , и они подчиняются очевидно, распределению  $\chi^2$  с 2 степенями свободы. Для получения окончательных сглаженных оценок, обладающей меньшей статической изменчивостью и пригодных для практического использования, следует провести дальнейшее сглаживание.

### 3.5.3 Сглаживание по частотам

Если найденный спектр близок к спектру ограниченного по частоте белого шума, то его оценки на частотах, разделенных промежутками  $1/T_r$ , будут в сущности некоррелированными. Поэтому если осреднить первичные оценки спектральной плотности на  $l$  смежных частотах, то полученная таким образом окончательная сглаженная оценка спектральной плотности  $\hat{G}_k$ , где вместо значка  $\sim$  используется значок  $\wedge$ , запишется в виде:

$$\hat{G}_k = \frac{1}{l} (\tilde{G}_k + \tilde{G}_{k+1} + \dots + \tilde{G}_{k+l-1}), \quad (3.20)$$

Как вытекает из теоремы о распределении суммы независимых случайных величин, оценка  $\hat{G}_k$  подчиняется распределению  $\chi^2$  примерно с  $n = 2l$  степенями свободы. Таким образом, эффективная разрешающая способность оценки составляет теперь приблизительно  $B' = lB_e$ , где  $B_e = 1/T_r$ . Следовательно, при описанном выше способе сглаживания по частотам:

$$\begin{aligned} B' &= lB_e = 1/T_r, \\ n &= 2B'_e T_r = 2l, \end{aligned} \quad (3.21)$$

Нормированная стандартная ошибка:

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{1}{B_e' T_r}} = \sqrt{\frac{1}{l}}, \quad (3.22)$$

В том случае, когда фильтр для полосы  $B_e$  имеет треугольную форму, фильтр для полосы  $B_e'$  принимает после сглаживания трапецеидальную форму. Можно считать, что оценка  $\hat{G}_k$  относится к центральной точке интервала частот с границами  $f_k$  и  $f_{k+l-1}$ . Общее число таких возможных оценок составляет  $N/l$ .

### 3.5.4 Осреднение по отрезкам реализации

Второй способ заключается в осреднении оценок спектральной плотности, полученным по отдельным отрезкам реализации длиной  $T_r'$  каждый (общая длина реализации  $T' = qT_r'$ ). Окончательная сглаженная оценка спектральной плотности имеет вид:

$$\tilde{G}_k = \frac{1}{q} (\tilde{G}_{k,1} + \tilde{G}_{k,2} + \dots + \tilde{G}_{k,q}), \quad (3.23)$$

где  $\tilde{G}_{k,q}$  - первичная оценка спектральной плотности на частоте  $f_k$ , полученная по  $q$ -му отрезку реализации. Величина  $\hat{G}_k$  подчиняется распределению  $\chi^2$  примерно с  $2q$  степенями свободы. Эффективная разрешающая способность составляет приблизительно  $1/T_r'$ . Итак, при осреднении по отдельным отрезкам:

$$B_e'' = \frac{1}{T_r'} = \frac{q}{T_r}, \quad (3.24)$$

$$n = 2B_e'' T_r = 2q, \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_r = \sqrt{1/q}, \quad (3.26)$$

Фильтр, соответствующий полосе пропускания  $B_e''$ , имеет треугольную форму, как и фильтр. Однако в результате замены величины  $\pm 1/T_r$  и на  $\pm q/T_r$ , ширина его полосы возрастает. Форма этого фильтра для каждого из отрезков такая же, как и для среднего, полученного по  $q$  отрезкам, поскольку при осреднении по отрезкам величина  $T'$  не меняется. Оценку  $\hat{G}_k$  можно отнести к

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

центральной точке частотного интервала  $B_e''$ . Общее число оценок такого рода составляет  $N/q$ .

Для того чтобы можно было применить описанный способ осреднения в алгоритме Кули и Тьюки, необходима выборка общим объемом  $N = q \cdot 2^p$ . Таким образом, длина каждого участка составляет  $2^p$ . Число  $q$  не обязательно должно быть равно целой степени числа 2. Если для доведения объема выборки до числа  $N$  необходимо добавить некоторое число нулей, то для того, чтобы обеспечить прежнее число степеней свободы для каждого из этих отрезков, к каждому из них следует добавить соответствующее число нулевых точек.

### 3.5.5 Комбинированный способ осреднения

При использовании этого способа (осреднение и по частотам, и по отрезкам) окончательная эффективная разрешающая способность равна примерно:

$$B_e''' = \frac{lq}{T_r}, \quad (3.27)$$

а полученная таким путем оценка  $\hat{G}_k$  подчиняется распределению  $\chi^2$  с числом степеней свободы:

$$n = 2B_e'''T_r = 2lq, \quad (3.28)$$

Нормированная стандартная ошибка этой оценки:

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{1}{lq}}, \quad (3.29)$$

## 3.6 Анализ результатов

### 3.6.1 Обработка результатов на холостом ходу без нагрузки при различных частотах вращения коленчатого вала двигателя

Резонансных колебаний в ходе данных испытаний не было получено, была лишь получена частота второй гармоники с упругими моментами не более 10 кгм (таблица 3.5).

					<i>23.04.02.2017.083.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						71
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 3.5 – Амплитуды моментов, соответствующих гармоникам двигателя.

Гармоника	Частота вращения двигателя, об/мин							
	650	750	850	950	1050	1150	1250	1300
1	3	4,4	3,1	6,5	6,5	6,5	2,2	3,1
2	9,2	8	7,7	9,2	10	3,7	7,4	4,1
3	6,7	7,8	6,1	3,2	8,2	4,1	5,6	9,9
4	2,3	4,6	6,1	6,4	4,3	2,5	3,8	6
5	6,6	6,9	6,7	4,9	2,5	2,2		
6	5,3	3,7	2,6	4,1				

### 3.6.2 Обработка результатов при переключении передач

Переключение передач является динамически нагруженным моментом в ходе работы трактора. Особенно при переключении на максимальных оборотах с передней на заднюю передачу. В этом случае момент достигает с 132 до 196 кгм (таблица 3.6). Однако он находится в пределах коэффициента, так как максимальный крутящий момент равен 135 кгм.

### 3.6.3 Обработка результатов при основных операциях бульдозирования

В ходе исследований оказалось, что также источником возбуждения является кинематическое возбуждение гусеничного движителя (частота звенчатости).

На рабочем ходу было получено 2 частоты (42,3 Гц и 4,2 Гц). На откате частоты 4,2 Гц не оказалось, но появилась другая частота равная 13,6 Гц (таблица 3.7).

Частота 42,3 Гц, источником ее возбуждения является двигатель, частота второй гармоники, амплитуда упругих моментов равна 9,4 кгм.

Частота 4,2 Гц, частота второй гармоники, характерна на рабочем ходу. Источником возбуждения является двигатель и кинематическое возбуждение

гусеничного движителя (частота звенчатости). Амплитуда упругих моментов составляет 4,8 кгм.

Частота 13,6 Гц, частота второй гармоники, присутствует при откате. Источником возбуждения является двигатель и кинематическое возбуждение гусеничного движителя (частота звенчатости). Амплитуда упругих моментов, за счет динамики и большой скорости, составляет 10,5 кгм.

Выявлены 3 частоты практически не вызывающие резонанс.

### 3.7 Тяговые испытания

Результаты тяговых испытаний трактора Б10.0000-1Е (Б10УМ) с  $i_{cp}=1,09$ .

Результаты испытаний представлены:

- в таблице 3.6 – основные тяговые показатели;
- в таблицах 3.7 – 3.9 тяговые характеристики на 1, 2 и 3 передачах;
- на рис. 3.15 – графики тяговых характеристик на 1, 2 и 3 передачах.

Из представленных результатов следует:

Максимальная тяговая мощность составила 135,5 л.с. и получена на 1 передаче.

Значения показателей при этом составили:

тягового КПД (отношение максимальной тяговой мощности к соответствующей при этом режиме мощности двигателя) – 0,734;

тягового усилия – 12341 кгс;

скорости – 2,96 км/ч;

буксования – 0,9%;

частоты вращения коленчатого вала двигателя – 1105 об/мин.

– Максимальная тяговая мощность на 2 и 3 передачах составили соответственно 113 и 92,1 л.с.;

– Максимальное тяговое усилие агрегата (на 1 передаче) составило 14428 кгс. Оно ограничено по крутящему моменту двигателя;

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						73
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



– Максимальное тяговое усилие на 2 и 3 передачах ограничено характеристикой двигателя и составило 7052 кгс и 4005 кгс (частота вращения двигателя – 1028 и 838 об/мин), соответственно.

Максимальные скорости движения холостого хода бульдозера при отсутствии буксования составили по передачам:

вперед 1 – 3,51 км/ч; 2 – 6,27 км/ч; 3 – 9,51 км/ч;

назад 1 – 4,35 км/ч; 2 – 7,53 км/ч; 3 – 11,67 км/ч;

Таблица 3.6 – Основные тяговые показатели бульдозерного агрегата Б10УМ (иср=1,09)

Режим испытаний	Показатели	Размерность	Значение по передачам		
			1	2	3
Nкрмакс	Nкрмакс	л.с.	135,5	113,0	92,1
	Rкр	кгс	12341	6301	3944
	Vд	км/ч	2,96	4,84	6,30
	Буксован	%	0,9	2,0	0,6
	Gт	кг/ч	31,37	30,80	-
	gкр	г./л.с.ч	231,5	272,6	-
	KПДтяг	-	0,734	0,624	-
	нд	об/мин	1105	1028	838
Rкрмакс	Rкрмакс	кгс	14428	7052	4005
	Vд	км/ч	2,32	3,90	5,83
	Nкр	л.с.	124,0	101,9	86,5
	Буксован	%	2,5	0,6	3,4
	Фкрмакс	-	0,80	0,39	0,22
	нд	об/мин	880	818	798
Vхх	вперед	км/ч	3,51	6,27	9,51
	назад	км/ч	4,35	7,53	11,67

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

74

Таблица 3.7 – Тяговая характеристика бульдозерного агрегата Б10УМ (i<sub>ср</sub>=1,09) на 1 передаче

№ опыта	V <sub>Д</sub> км/ч	V <sub>Т</sub> км/ч	Буксован. %	R <sub>кр</sub> кгс	P <sub>f</sub> кгс	N <sub>кр</sub> л.с.	N <sub>букс</sub> л.с.	N <sub>f</sub> л.с.	нд об/мин	G <sub>т</sub> кг/ч	g <sub>кр</sub> г./л.с.ч
1	3,45	3,47	0,6	880	1440	11,2	0,1	18,5	1281	-	-
2	3,41	3,45	1,3	1638	1440	20,7	0,3	18,4	1276	-	-
3	3,42	3,42	0,0	3641	1440	46,1	0,0	18,2	1259	23,23	503,7
4	3,35	3,41	1,6	5006	1440	62,2	1,0	18,2	1259	23,23	373,6
5	3,37	3,39	0,8	6331	1440	78,9	0,6	18,1	1254	24,84	314,7
6	3,31	3,33	0,6	9355	1440	114,8	0,7	17,8	1232	30,94	269,6
7	3,19	3,24	1,6	10697	1440	126,5	2,0	17,3	1199	31,25	247,1
8	3,14	3,17	1,0	11355	1440	132,0	1,3	16,9	1171	31,30	237,1
9	2,96	2,99	0,9	12341	1440	135,5	1,2	16,0	1105	31,37	231,5
10	2,51	2,54	1,4	13624	1440	126,6	1,8	13,6	940	29,36	232,0
11	2,37	2,46	3,3	14279	1440	125,6	4,3	13,1	907	28,60	227,8
12	2,32	2,38	2,5	14428	1440	124,0	3,2	12,7	880	27,78	224,0
13	2,04	2,08	2,1	14368	1440	108,5	2,4	11,1	770	-	-

Таблица 3.8 – Тяговая характеристика бульдозерного агрегата Б10УМ (i<sub>ср</sub>=1,09) на 2 передаче

№ опыта	V <sub>Д</sub> км/ч	V <sub>Т</sub> км/ч	Буксование %	R <sub>кр</sub> кгс	P <sub>f</sub> кгс	N <sub>кр</sub> л.с.	N <sub>букс</sub> л.с.	N <sub>f</sub> л.с.	нд об/мин	G <sub>т</sub> кг/ч	g <sub>кр</sub> г./л.с.ч
1	6,01	6,04	0,5	1456	1440	32,4	0,2	32,2	1258	-	-
2	5,93	6,06	2,1	2245	1440	49,3	1,1	32,3	1256	-	-
3	5,53	5,64	2,0	4490	1440	91,9	1,9	30,1	1174	31,16	339,1
4	5,42	5,52	1,8	5428	1440	108,9	2,0	29,4	1149	31,20	286,4
5	5,26	5,28	0,5	5790	1440	112,7	0,5	28,2	1100	31,21	276,8
6	4,84	4,94	2,0	6301	1440	113,0	2,3	26,3	1028	30,80	272,6
7	4,33	4,39	1,3	6691	1440	107,4	1,4	23,4	914	28,57	266,1
8	3,90	3,00	0,6	7052	1440	101,9	0,7	21,0	818	-	-
9	3,55	3,57	0,5	6872	1440	90,5	0,4	19,0	743	-	-

Таблица 3.9 – Тяговая характеристика бульдозерного агрегата Б10УМ (i<sub>ср</sub>=1,09) на 3 передаче

№ опыта	V <sub>Д</sub> км/ч	V <sub>Т</sub> км/ч	Буксование %	R <sub>кр</sub> кгс	P <sub>f</sub> кгс	N <sub>кр</sub> л.с.	N <sub>букс</sub> л.с.	N <sub>f</sub> л.с.	нд об/мин	G <sub>т</sub> кг/ч	g <sub>кр</sub> г./л.с.ч
1	8,83	9,26	4,6	2124	1440	69,4	3,4	49,4	1223	31,38	452,1
2	8,45	8,50	0,5	2730	1440	85,5	0,5	45,3	1123	31,31	366,3
3	7,28	7,53	3,3	3398	1440	91,7	3,1	40,2	995	30,74	335,4
4	6,30	6,34	0,6	3944	1440	92,1	0,5	33,8	838	-	-
5	5,83	6,04	3,4	4005	1440	86,5	3,1	32,2	798	-	-

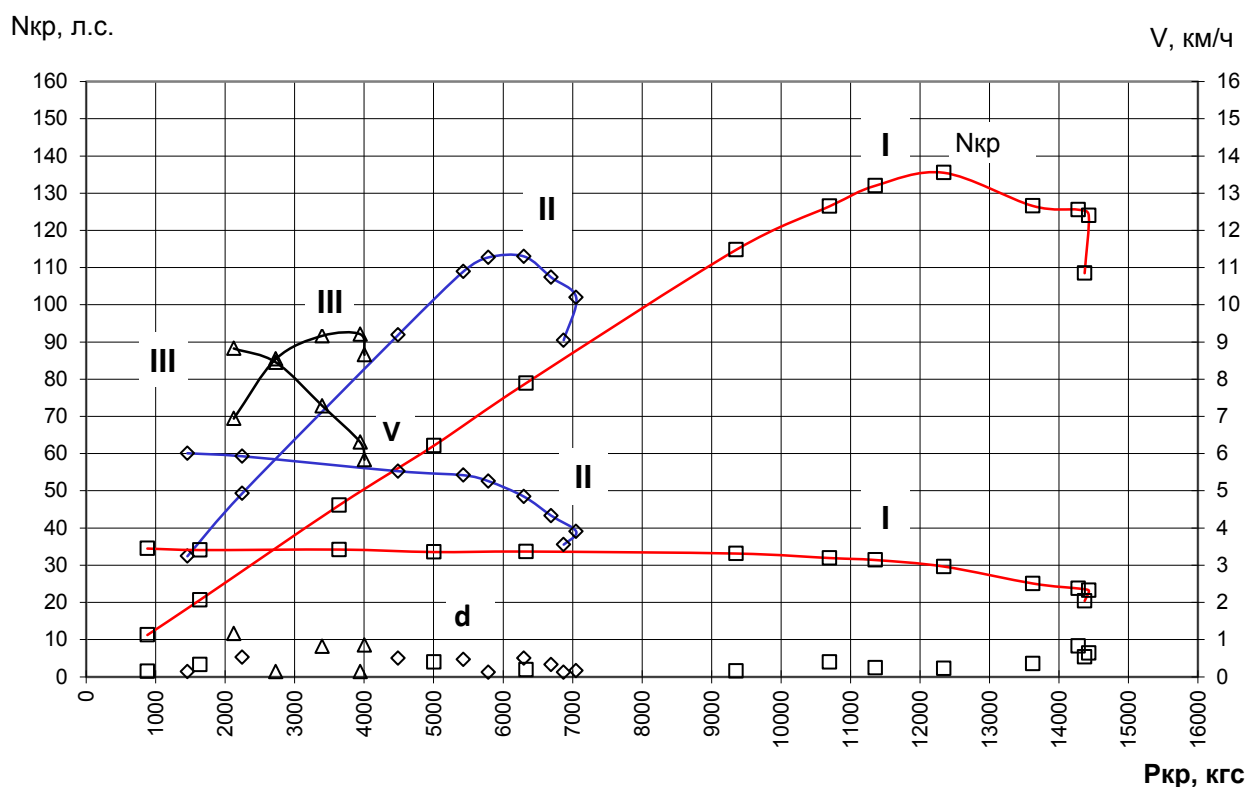


Рисунок 3.15 – Тяговая характеристика бульдозерно-рыхлительного агрегата Б10УМ ( $i_{cp}=1,09$ )

Результаты тяговых испытаний трактора Б10УМ с  $i_{cp}=1,25$ .

Результаты испытаний представлены:

- в таблице 3.10 – основные тяговые показатели;
- в таблицах 3.11 – 3.12 тяговые характеристики на 1, 2 и 3 передачах;
- на рис. 3.16 – графики тяговых характеристик на 1, 2 и 3 передачах.

Из представленных результатов следует:

Максимальная тяговая мощность составила 125,1 л.с. и получена на 1 передаче.

Значения показателей при этом составили:

- тягового КПД (отношение максимальной тяговой мощности к соответствующей при этом режиме мощности двигателя) – 0,727;

тягового усилия – 13994 кгс;

скорости – 2,41 км/ч;

буксования – 2,3%;

частоты вращения коленчатого вала двигателя – 1047 об/мин.

– Максимальная тяговая мощность на 2 и 3 передачах составили соответственно 114,8 и 100,8 л.с.;

– Максимальное тяговое усилие агрегата (на 1 передаче) составило 1551 кгс. Оно ограничено по крутящему моменту двигателя;

– Максимальное тяговое усилие на 2 и 3 передачах ограничено характеристикой двигателя и составило 8172 кгс и 4469 кгс (частота вращения двигателя – 792 и 943 об/мин), соответственно.

Максимальные скорости движения холостого хода бульдозера при отсутствии буксования составили по передачам:

вперед 1 – 3,14 км/ч; 2 – 5,56 км/ч; 3 – 8,59 км/ч;

назад 1 – 3,86 км/ч; 2 – 6,82 км/ч; 3 – 10,68 км/ч;

Увеличение передаточного числа согласующего редуктора КПП Б10УМ привело к незначительному снижению тягового КПД (на 1 %), но возросло на 7,2 % максимальное тяговое усилие трактора, что положительно скажется на технической производительности трактора и запасе на дополнительные отборы мощности.

Таблица 3.10 – Основные тяговые показатели бульдозерного агрегата Б10УМ ( $i_{cp}=1,25$ )

Режим испытаний	Показатели	Размерность	Значения по передачам		
			1	2	3
Нкрмакс	Нкрмакс	л.с.	125,1	114,8	100,8
	Ркр	кгс	13994	7605	4441
	Вд	км/ч	2,41	4,08	6,13
	Буксован	%	2,3	3,8	2,2
	Гт	кг/ч	32,30	32,29	31,21
	гкр	г./л.с.ч	258,1	281,1	309,6
	КПДтяг	-	0,727	0,696	0,637
	нд	об/мин	1047	991	949
Ркрмакс	Ркрмакс	кгс	15511	8172	4469
	Вд	км/ч	1,74	3,27	6,22
	Нкр	л.с.	100,2	99,1	100,4
	Буксован	%	4,0	1,4	2,5

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

77

## Окончание таблицы – 3.10

Ркрмакс	Фкрмакс	-	0,86	0,45	0,25
	нд	об/мин	769	792	943
V <sub>хх</sub>	вперед	км/ч	3,14	5,56	8,59
	назад	км/ч	3,86	6,82	10,68

Таблица 3.11 – Тяговая характеристика бульдозерного агрегата Б10УМ (i<sub>ср</sub>=1,25) на 1 передаче

	V <sub>д</sub>	V <sub>т</sub>	Буксован	Ркр	Pf	Nкр	Nбукс	Nf	нд	Gт	гкр
№ опыта	км/ч	км/ч	%	кгс	кгс	л.с.	л.с.	л.с.	об/мин	кг/ч	г./л.с.ч
1	3,04	3,04	0,0	1968	1440	22,2	0,0	16,2	1274	-	-
2	3,02	3,02	0,0	3457	1440	38,6	0,0	16,1	1274	-	-
3	2,92	2,99	2,2	4441	1440	48,1	1,1	16,0	1268	-	-
4	2,99	2,99	0,0	5680	1440	62,9	0,0	16,0	1261	-	-
5	2,98	2,98	0,0	6727	1440	74,2	0,0	15,9	1255	24,97	336,6
6	2,98	2,98	0,0	8087	1440	89,2	0,0	15,9	1249	26,91	301,8
7	2,84	2,92	2,5	10584	1440	111,5	2,9	15,6	1236	30,69	275,4
8	2,72	2,77	1,6	12022	1440	121,2	2,0	14,8	1173	32,32	266,6
9	2,66	2,71	1,9	12444	1440	122,4	2,4	14,4	1148	32,44	265,0
10	2,55	2,62	2,7	13064	1440	123,3	3,4	14,0	1110	32,55	263,9
11	2,55	2,65	3,8	13121	1440	123,8	4,9	14,1	1123	32,51	262,5
12	2,41	2,47	2,3	13994	1440	125,1	2,9	13,2	1047	32,30	258,1
13	2,29	2,35	2,4	14643	1440	124,4	3,1	12,5	996	32,21	258,9
14	1,74	1,82	4,0	15511	1440	100,2	4,1	9,7	769	-	-
15	1,74	1,83	4,7	15346	1440	99,1	4,9	9,8	776	-	-
16	1,73	1,79	3,1	15150	1440	97,1	3,1	9,5	757	-	-

Таблица 3.12 – Тяговая характеристика бульдозерного агрегата Б10УМ (i<sub>ср</sub>=1,25) на 2 передаче

	V <sub>д</sub>	V <sub>т</sub>	Буксован	Ркр	Pf	Nкр	Nбукс	Nf	нд	Gт	гкр
№ опыта	км/ч	км/ч	%	кгс	кгс	л.с.	л.с.	л.с.	об/мин	кг/ч	г./л.с.ч
1	5,31	5,34	0,6	1349	1440	26,5	0,2	28,5	1275	-	-
2	5,19	5,30	2,0	2136	1440	41,1	0,8	28,3	1265	-	-
3	5,19	5,27	1,5	2979	1440	57,3	0,8	28,1	1257	24,27	423,7
4	5,12	5,22	1,9	3879	1440	73,6	1,4	27,9	1247	27,58	374,7
5	5,12	5,15	0,6	5172	1440	98,1	0,5	27,5	1229	32,44	330,7
6	5,07	5,09	0,4	5878	1440	110,4	0,4	27,1	1215	32,46	294,0
7	4,59	4,63	0,9	6642	1440	112,8	1,0	24,7	1105	32,76	290,3
8	4,08	3,00	3,8	7605	1440	114,8	4,5	22,6	991	32,29	281,1
9	3,27	3,32	1,4	8172	1440	99,1	1,4	17,7	792	-	-
10	3,23	3,30	2,1	8030	1440	96,1	2,1	17,6	789	-	-

Таблица 3.13 – Тяговая характеристика бульдозерного агрегата Б10УМ ( $i_{cp}=1,25$ ) на 3 передаче

	$V_D$	$V_T$	Буксован	$R_{кр}$	$P_f$	$N_{кр}$	$N_{букс}$	$N_f$	$n_d$	$G_T$	$g_{кр}$
№ опыта	км/ч	км/ч	%	кгс	кгс	л.с.	л.с.	л.с.	об/мин	кг/ч	г./л.с.ч
1	8,10	8,27	2,1	1377	1440	41,3	0,9	44,1	1254	25,45	615,9
2	7,98	8,20	2,7	2333	1440	69,0	1,9	43,7	1242	29,03	420,9
3	7,15	7,25	1,3	3513	1440	93,0	1,3	38,6	1098	32,84	353,0
4	7,07	7,34	3,6	3738	1440	97,9	3,7	39,1	1112	32,80	335,2
5	6,13	6,26	2,2	4441	1440	100,8	2,2	33,4	949	31,21	309,6
6	6,06	6,22	2,5	4469	1440	100,4	2,6	33,2	943	31,05	309,4
7	5,07	5,18	2,1	4244	1440	79,7	1,7	27,6	785	-	-

Тяговые испытания трактора Б10УМ с разными передаточными числами согласующего редуктора КПП показали следующее.

Максимальные тяговые усилия, тяговые мощности и скорости составили по передачам:

Для  $i_{cp}=1,25$ :

I – 15511 кгс, 125,1 л.с., 3,14 км/ч;

II – 8172 кгс, 114,8 л.с., 5,56 км/ч;

III – 4469 кгс, 100,8 л.с., 8,59 км/ч.

Максимальный коэффициент сцепления трактора Б10УМ составил 0,8 и 0,86 для  $i_{cp}=1,25$ . Максимальный тяговый КПД – 0,734 и 0,727.

Сравнение тяговых характеристик агрегатов Б10УМ, Б10№37, Б10М2.0000ЕР показало следующее.

Тяговая мощность Б10УМ ( $i_{cp}=1,25$ ) в диапазоне 9–15 тс больше на 1-17 л.с., чем у Б10.0001ЕР №37 и в диапазоне 3–15 тс больше на 5-16 л.с., чем у Б10М2.0000ЕР;

Так как отсутствует GMT, повысилось тяговое КПД (на 18,6 – 21,5 %), что улучшит показатели топливной экономичности. Увеличение передаточного числа согласующего редуктора КПП Б10УМ привело к незначительному снижению тягового КПД (на 1 %) при росте максимального тягового усилия на 7,8 %.

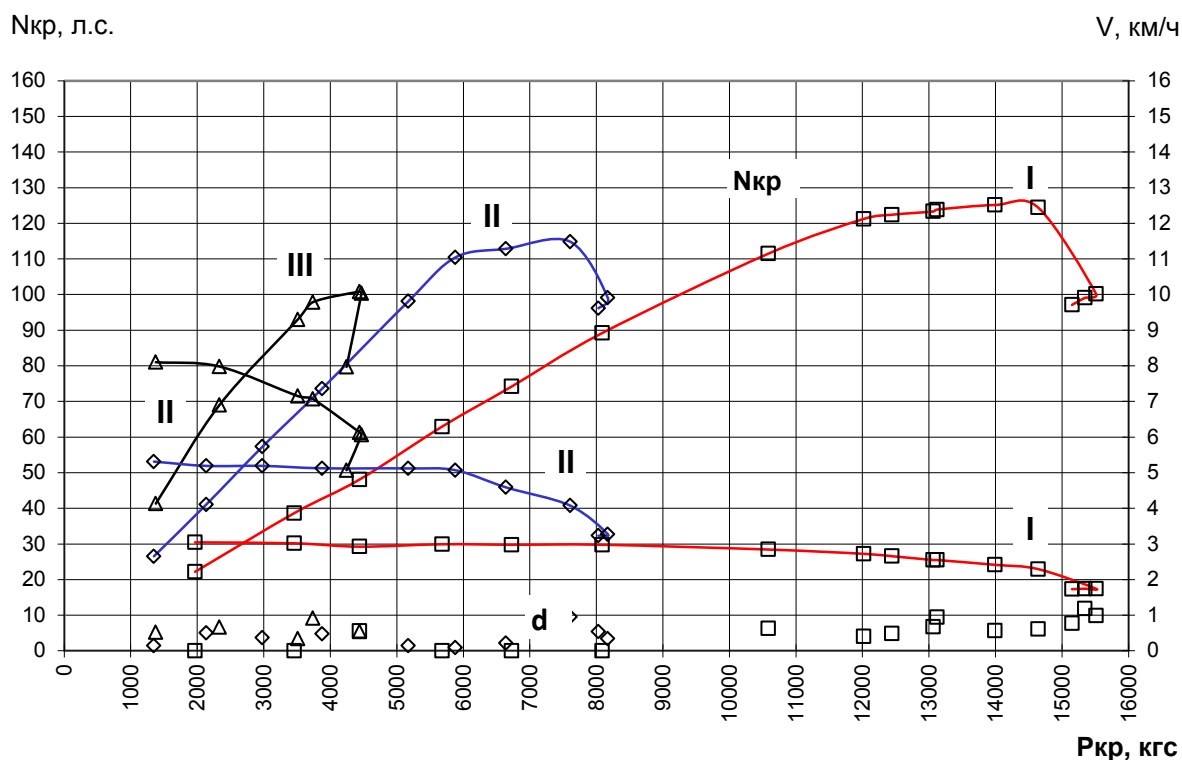


Рисунок 3.16 – Тяговая характеристика бульдозерно-рыхлительного агрегата Б10УМ ( $i_{cp}=1,25$ )

### 3.8 Испытания на производительность

Техническая производительность трактора Б10УМ с разными передаточными числами согласующего редуктора КПП ( $i_{cp}=1,09$  и  $1,25$ ) на траншейной разработке грунта.

Плотность грунта II категории (легкая глина)  $C=5-10$  уд. по ударнику ДорНИИ.

Испытания проводились при разработке 40-метровых траншей на горизонтальном участке с отсыпкой грунта в кавальер длиной 25м.

В процессе проведения опытов контролировались температуры масла в трансмиссии и тосола в системе охлаждения двигателя трактора Б10УМ. При температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$  через час работы, температуры масла в трансмиссии и тосола в системе охлаждения со-ставили  $50^{\circ}\text{C}$  и  $75^{\circ}\text{C}$  соответственно.

В качестве аналогов использовались серийные трактора Б10.0001ЕР №37 (вместо рыхлителя установлено ЖПУ) и Б10М2.0000ЕР.

Для варианта Б10УМ с  $i_{cp}=1,09$  аналог Б10.0001ЕР №37, для варианта Б10УМ с  $i_{cp}=1,25$  аналог Б10М2.0000ЕР.

Результаты сравнительной технической производительности тракторов Б10УМ и аналогов представлены в таблицах 3.14 и 3.15

Производительность тракторов Б10УМ ( $i_{cp}=1,09$ ) и Б10.0001ЕР №37 на суглинке II категории (нормальном и переувлажненном).

Показатели производительности приведены к дальности рабочих ходов  $L=37$  м, к скорости холостого хода  $V_{xx} = 7$  км/ч и времени остановок  $T_{ост} = 4$  с.

Приведенные значения производительности, составили:

На нормальном грунте II категории:

- для Б10УМ - 144,9 м<sup>3</sup>/ч (103,2%);
- для Б10.0001ЕР №37 - 140,3 м<sup>3</sup>/ч (100 %).

На переувлажненном грунте II категории:

- для Б10УМ - 123, м<sup>3</sup>/ч (107,9 %);
- для Б10.0001ЕР №37 - 114,1 м<sup>3</sup>/ч (100 %).

При практически равной производительности сравниваемых тракторов на нормальном грунте II категории значения призм волочения и рабочих скоростей этих агрегатов имеют отличие.

При большей на 1,3 % призме волочения у трактора Б10УМ, скорость рабочего хода у него на 4 % меньше, чем у агрегата Б10.0001ЕР №37.

На переувлажненном грунте II категории призма волочения и скорость рабочего хода у Б10УМ больше, чем у Б10.0001ЕР №37 на 6,5 % и 8,3 %, соответственно.

Часовой расход топлива у трактора Б10УМ для двух видов грунтов на 14,9 % и 8 % (пере-увлажненный грунт) ниже, чем у аналога Б10.0001ЕР №37.

На нормальном грунте II категории:

Удельные показатели трактора Б10УМ лучше, чем у Б10.0001ЕР №37 на:

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						81
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



- 16,8 % по расходу топлива на 1 м<sup>3</sup>;
- 4 % по производительности на 1 л.с.;
- 11,8 % по производительности на 1 тонну массы агрегата.

На переувлажненном грунте II категории:

Удельные показатели трактора Б10УМ лучше, чем у Б10.0001ЕР №37 на:

- 17,1 % по расходу топлива на 1 м<sup>3</sup>;
- 8,7 % по производительности на 1 л.с.;
- 16,9 % по производительности на 1 тонну массы агрегата.

Производительность тракторов Б10УМ ( $i_{cp}=1,25$ ) и Б10М2.0000ЕР на суглинке II категории.

Показатели производительности, приведенные к дальности рабочих ходов  $L=38$  м, к скорости холостого хода  $V_{xx}=9$  км/ч, и времени остановок  $T_{ост}=4$  с. По причине поломки Б10М2.0000ЕР было отработано 20 циклов. Ниже сравниваются показания при одинаковом БО (от Б10УМ), в силу того, что ножи БО Б10М2.0000ЕР имели меньшую степень заточки.

Приведенные значения производительности составили:

- для Б10УМ - 151,8 м<sup>3</sup>/ч (100,1%);
- для Б10М2.0000ЕР (БО от Б10УМ) - 151,6 м<sup>3</sup>/ч (100%).

При практически равной производительности сравниваемых тракторов работа агрегата Б10УМ сопровождается меньшей на 4,9 % призмой волочения, но с большей на 9,6 % скоро-стью рабочего хода по сравнению с аналогом.

Часовой расход топлива у трактора Б10УМ на 1,8% ниже, чем у аналога Б10М2.0000ЕР.

Удельные показатели трактора Б10УМ лучше, чем у Б10М2.0000ЕР на:

- 9,5 % по расходу топлива на 1 м<sup>3</sup>;
- 2,3 % по производительности на 1 л.с.;
- 19,6 % по производительности на 1 тонну массы агрегата.

Основные показатели технической производительности тракторов Б10М2.0000ЕР и Б10УМ на грунте II категории

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						82
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Таблица 3.14 – Основные показатели технической производительности тракторов Б10М2.0000ЕР и Б10УМ на грунте II категории

Наименование показателя	Б10М2.0000ЕР	Б10УМ
Плотность С, удар.	5,8	5,5
Мощность двигателя, Neo, л.с.	184,3	180,3
%	102,2	100,0
Часовой расход топлива G <sub>T</sub> , кг/ч	29,8	31,0
Кз дв, %	35,0	25,1
Ma, т	21,5	18,0
%	119,4	100,0
Производительность П, м <sup>3</sup> /ч	154,0	160,4
%	96,0	100,0
Средняя призма q, м <sup>3</sup>	3,78	3,60
%	105,2	100,0
Скорость рабочего хода V <sub>рх</sub> , км/ч	2,30	2,52
%	91,3	100,0
Скорость холстого хода V <sub>хх</sub> , км/ч	8,79	9,13
%	96,2	100,0
Время остановок за цикл T <sub>ост</sub> , с	3,66	3,83
L <sub>рх</sub> , м	43	42
Часовой расход топлива G <sub>T</sub> , кг/ч	25,4	24,0
%	106,1	100,0
Расход топлива на 1м <sup>3</sup> g, кг/м <sup>3</sup>	0,165	0,149
%	110,5	100,0
Коэф-нт загрузки двигателя по топливу	0,85	0,77
%	110,3	100,0
Приведенная производительность П* <sub>пр</sub> , м <sup>3</sup> /ч	151,6	151,8
%	99,9	100,0
удельная производительность П* <sub>пр.уд.</sub> , м <sup>3</sup> /ч л.с.	0,823	0,842
%	97,7	100,0
на 1т массы агрегата, м <sup>3</sup> /ч т	7,05	8,43
%	83,6	100,0
q x V, м <sup>3</sup> км/ч	8,72	9,09
%	96,0	100,0

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

83

Таблица 3.15 – Основные показатели технической производительности тракторов Б10М2.0000ЕР и Б10УМ на грунте II категории

Наименование показателя	Б10 №37	Б10УМ	Б10 №37	Б10УМ
Категория грунта	II		II - увлажненный	
Плотность С, удар.	5,7	6,0	5,1	5,5
Мощность двигателя, Neo, л.с.	181,7	180,3	181,7	180,3
%	100	99,2	100	99,2
Часовой расход топлива G <sub>т</sub> , кг/ч	31,8	31,0	31,84	30,95
K <sub>з дв</sub> , %	21,6	25,1	21,6	25,1
Ma, т	19,5	18,0	19,5	18
%	100	92,3	100	92,3
Производительность П, м <sup>3</sup> /ч	137,8	142,1	114,2	126,7
%	100	103,1	100	110,9
Средняя призма q, м <sup>3</sup>	2,96	3,00	2,55	2,72
%	100	101,3	100	106,5
Скорость рабочего хода V <sub>рх</sub> , км/ч	2,52	2,42	2,48	2,69
%	100	96,0	100	108,3
Скорость холстого хода V <sub>хх</sub> , км/ч	6,64	7,86	6,55	6,83
%	100	118,3	100	104,3
Время остановок за цикл T <sub>ост</sub> , с	3,3	4,6	3,6	4,8
L <sub>рх</sub> , м	37,6	36,8	38,40	38,82
Часовой расход топлива G <sub>т</sub> , кг/ч	26,0	22,1	25,21	23,20
%	100	85,1	100	92,0
Расход топлива на 1м <sup>3</sup> g, кг/м <sup>3</sup>	0,187	0,156	0,221	0,183
%	100	83,2	100	82,9
Коэффициент загрузки двигателя по топливу K <sub>загр</sub>	0,82	0,71	0,792	0,749
%	100	87,5	100	94,6
Приведенная производительность* П <sub>пр Lрх</sub> , м <sup>3</sup> /ч	140,3	144,9	114,1	123,0
%	100	103,2	100	107,9
Приведенная удельная производительность* П <sub>пр.уд</sub> , на 1 л.с., м <sup>3</sup> /ч л.с.	0,772	0,803	0,628	0,682

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

23.04.02.2017.083.00 ПЗ

Лист

84

Окончание таблицы – 3.15

%	100	104,0	100	108,7
на 1т массы агрегата, м <sup>3</sup> /ч т	7,2	8,0	5,85	6,83
%	100	111,8	100	116,9
q*V, м <sup>3</sup> км/ч	7,46	7,25	6,33	7,30
%	100	97,2	100	115,4

Выводы по разделу три:

Увеличение передаточного отношения согласующего редуктора КПП положительно сказалось на производительности Б10УМ.

По производительности трактор Б10УМ с обоими вариантами передаточного отношения согласующего редуктора КПП не уступает тракторам-аналогам с ГМТ.

По топливной экономичности (по расходу топлива на 1 м<sup>3</sup> разработанного грунта) Б10УМ превосходит аналоги на 9,5 – 16,8 % за счет более высокого КПД трансмиссии.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		85

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе разработан гаситель крутильных колебаний перспективной моторно-трансмиссионной установки трактора класса 10.

В выпускной квалификационной работе проведены расчеты на крутильные колебания и доказано, что перспективная моторно-трансмиссионная установка перспективного трактора неработоспособна из-за возникновения больших крутильных колебаний, что приводит к разрушению всего агрегата. В связи с этим разработан узел, который позволяет существенно снизить возникающие крутильные колебания.

Был изготовлен тензомодуль, позволяющий считывать крутящий момент, с установкой на трактор при эксплуатационных испытаниях, что позволяет значительно ускорить их. В ходе испытаний резонансные явления не были выявлены, что подтверждает работоспособность трансмиссии. Определены основные источники колебаний – это двигатель (частота второй гармоники), а также кинематическое возбуждение гусеничного движителя (частота звенчатости). Упругие моменты указанных частот незначительны и находятся в пределах нормы. Максимальные динамические моменты характерны при переключениях передач, особенно на максимальных оборотах и переключении с передней на заднюю передачу.

Гаситель крутильных колебаний упрощен в изготовлении. Ввиду этого производство не требует больших затрат, как по времени, так и по финансовым затратам.

Цель работы была достигнута благодаря применению беспроводных технологий считывания сигналов с тензодатчиков, применению современной компьютерной техники для сбора и обработки информации эксперимента.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		86

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Гинзбург, Ю.В. Промышленные тракторы: Учебник / Ю.В. Гинзбург, А.И. Швед, А.П. Парфенов – М.: Машиностроение, 1986. – 293 с.

2 Позин, Б.М. Совершенствование параметров промышленных тракторов (теория, эксперимент, внедрение): дисс.докт.техн.наук/ Б. М. Позин – М.: МАДИ, 1991. – 285 с.

3 Костюченко, В.И. Разработка критериев и методов оценки эффективности промышленных тракторов: дисс.канд.техн.наук/ В.И. Костюченко – Челябинск: ЮУрГУ, 2000 г. – 148 с.

4 Пинигин, Б.Н. Теория трактора. Исследование свойств гусеничных движителей: Учебное пособие/ Б.Н. Пинигин – Челябинск: ЧПИ, 1985.-96 с.

5 Ксеновича, И. П Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет: Учебник / И.П. Ксеновича – М.: Машиностроение. 1991.- 218 с.

6 Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: Справочник/ А. Г. Косиловой, Р. К. Мещеряковой – М.: Машиностроение, 1972.- 293 с.

7 Косилова, А.Г. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: Справочник технолога/ А.Г. Косилова – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

8 Гинзбург, Ю. В. Новый расчетный и экспериментальный критерии оценки технического уровня промышленных тракторов. Тракторы и сельхоз машины: дисс.канд.техн.наук/ Ю.В. Гинзбург – Челябинск 1985, № 2.- 264 с.

9 Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. – 158 с.

10 Миллер, Э.Э. Техническое нормирование труда в машиностроении. М.: Машиностроение, 1972. – 189 с.

11 ГОСТ 4543 –71. Прокат из легированной стали. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 39 с.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		87

12 ГОСТ 6033 – 80. Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шлицевые эвольвентные с углом профиля 30 град. Размеры, допуски и измеряемые величины. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 86 с.

13 Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х томах: Справочник/ В. И. Анурьев М.: Машиностроение,- 1979. – 67с.

14 Маслов, Г. С. Расчеты колебаний валов: Справочник/ Г.С. Маслов – М.: Машиностроение, 1980. – 268 с.

15 Чернавский, С.А. Проектирование механических передач: Учебник/ С.А Чернавский, Г.А. Снесарев – М.: Машиностроение , 1984. – 234 с.

16 Звонарева, Л. М. Режимы резания для технического нормирования работ на металлообрабатывающих станках. Часть первая: Учебное пособие/ Л.М. Звонарева – Челябинск, 2004. – 234 с.

17 Миллер, Э.Э. Техническое нормирование труда в машиностроении: Учебник/ Э.Э Миллер – М.: Машиностроение, 1972. – 248 с.

18 Станочные приспособления: Справочник в 2-х т. Под редакцией Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатылова. М.: Машиностроение, 1984. – 214 с.

19 Костюченко, В.И. и др. Закономерности производительности бульдозерных агрегатов с различными типами моторно-трансмиссионных установок. Вестник ЮУрГУ. Серия машиностроение. Выпуск 3 № 1 (17), 2003 – 123-133с.

20 Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов: Учебник/ Дж. Бендат, А. Пирсол – Москва, 1974. – 463 с.

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

ПРИЛОЖЕНИЕ

					23.04.02.2017.083.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		89