

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Системы автоматического управления»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_/ С.Г. Воронин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_/ В.И. Ширяев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ НАВЕСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА  
ПОДВИЖНОМ ОБЪЕКТЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы

проф. каф. КГМ, д.т.н.

\_\_\_\_\_/ С.В. Кондаков

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор работы

студент группы КЭ-534

\_\_\_\_\_/ В.В. Лихатов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер

доц. каф. САУ, к.т.н.

\_\_\_\_\_/ О.О. Павловская

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Лихатов В.В. Система стабилизации навесного оборудования на подвижном объекте: ЮУрГУ (НИУ), ВШ ЭКН; 2018, 42 с. 27 ил., библиогр. список – 24 наим., 14 листов слайдов презентации ф. А4.

Проведено исследование существующих моделей гидравлической системы и систем автоматического управления рабочим органом подвижного объекта. Проведено имитационное моделирование получившейся модели управления с применением различных способов регулирования. Представлены результаты моделирования и синтез регуляторов с помощью пакета прикладных программ MATLAB & Simulink.

|                  |                        |                 |                |             |   |                              |             |               |
|------------------|------------------------|-----------------|----------------|-------------|---|------------------------------|-------------|---------------|
|                  |                        |                 |                |             | <b>24.05.06.2018.283.00 ПЗ</b>  |                              |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i>            | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |   |                              |             |               |
| <i>Разраб.</i>   | <i>Лихатов В.В.</i>    |                 |                |             | <b>Система стабилизации навесного оборудования на подвижном объекте</b> | <i>Лит.</i>                  | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   | <i>Кондаков С.В.</i>   |                 |                |             |   | Д                            | 4           | 42            |
| <i>Реценз.</i>   | <i>Воронин С.Г.</i>    |                 |                |             |   | <b>ЮУрГУ<br/>Кафедра САУ</b> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> | <i>Павловская О.О.</i> |                 |                |             |   |                              |             |               |
| <i>Утверд.</i>   | <i>Ширяев В.И.</i>     |                 |                |             |   |                              |             |               |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....   | 6  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 7  |
| 1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ.....  | 10 |
| 1.1 Общие сведения о машине .....  | 10 |
| 1.2 Навесное оборудование бульдозерного агрегата .....                   | 12 |
| 1.3 Анализ требований к точности обработки земляного полотна .....       | 17 |
| 1.4 Обзор существующих систем управления рабочим органом .....           | 18 |
| 1.5 Анализ математических моделей гидравлической системы .....           | 19 |
| 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ .....                          | 21 |
| 2.1 Общий вид системы управления .....                                   | 21 |
| 2.2 Математическая модель электрогидравлического преобразователя.....    | 21 |
| 2.3 Математическая модель гидросистемы .....                             | 22 |
| 2.4 Математическая модель рабочего оборудования .....                    | 24 |
| 2.5 Датчика угла наклона .....   | 24 |
| 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....                                | 26 |
| 3.1 Моделирование основной части системы.....                            | 26 |
| 3.2 Разработка системы управления положением.....                        | 29 |
| 3.3 Разработка системы управления положением с ПИ-регулятором.....       | 32 |
| 3.4 Разработка системы управления положением с нечетким регулятором..... | 35 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 39 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....   | 41 |

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БА – Бульдозерный агрегат;

РО – Рабочий орган;

СУ – Система управления;

ЗУ – задающее устройство;

ВВ – возмущающее воздействие;

ДОС – Датчик обратной связи;

ГЦ – Гидроцилиндр;

ЭГП – Электрогидравлический преобразователь;

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 6    |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |

## ВВЕДЕНИЕ

Завод «ДСТ-Урал» - это современное предприятие по производству бульдозеров и спецтехники на базе гусеничного трактора В настоящее время выпускаются бульдозеры 5 тяговых классов массой до 40 тонн. Техника используется как крупными предприятиями добывающих отраслей России, так и небольшими частными компаниями, работающими в горнодобывающей сфере, дорожном строительстве, золотодобыче, коммунальном хозяйстве.

История завода «ДСТ-УРАЛ» берет начало в 1999 году. Семь лет успешной деятельности и накопленный опыт в сфере ремонта и модернизации тракторной техники позволили компании начать проектирование бульдозера ТМ-10. В 2007-м предприятие стало поставлять новые машины в крупнейшие Российские компании.

Применение высоких технологий с максимальной автоматизацией, исключающих негативное проявление человеческого фактора — основа организации производства на ДСТ-УРАЛ. В конструкции ТМ-10 заложен принцип использования самых надежных, экономичных и ремонтпригодных агрегатов отечественного и зарубежного производства.

В скором времени появились и первые машины нового поколения. Конструкционно они во многом уникальны. Переход с механической трансмиссии на гидростатическую повысил надежность и улучшил потребительские свойства бульдозера. Выбор типа трансмиссии был определен опытом использования этой технологии ведущими мировыми производителями. Гусеничный бульдозер с гидростатической трансмиссией лишен многих недостатков, а использование распространенного двигателя Ярославского моторного завода усилил успех предприятия.

На технике предприятия для управления рабочим органом используются силовые гидроцилиндры, которые имеют преимущества перед остальными исполнительными механизмами из-за относительно высокой развиваемой мощности на единицу массы – масса гидропривода на порядок меньше массы электрической машины той же мощности. При этом большинство гидроприводов, используемых в различных машинах, являются неавтоматизированными.

Применение электронной-вычислительной технике, которую возможно установить в качестве микроконтроллера на бульдозерный агрегат позволяет внедрять возможность использования систем управления различного применения, что влечет за собой повышение качества работ.

Современные требования к качеству обработки земляного полотна достаточно высоки. В связи с этим на планировочные землеройно-транспортные машины устанавливаются дополнительные элементы, для автоматизации процессов и

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 7    |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |

совершенствования технических характеристик машины. Использование рабочего органа бульдозера для высокоточной обработки земляного покрова может позволить сократить размер парка дорожно-строительной техники на рабочей площадке, исключив автогрейдер и другие планировочные машины на базе колесных тракторов. Для эффективного использования бульдозерного оборудования в планировочных работах необходимо оснастить его соответствующими устройствами для контроля и управления положением рабочего органа.

Совместно с сокращением парка рабочей техники к плюсам внедрения системы управления можно отнести снижение требуемой квалификации к человеку-оператору, что обязательно скажется на повышении производительности совершаемых работ и сокращения затрачиваемых средств.

В разработке системы управления для повышения эффективности дорожно-строительной техники возникает проблема синтеза оптимальных параметров, которые невозможно решить без применения вычислительной техники, так как оптимизация параметров является сложным вычислительным процессом. Внедрение систем автоматизации проектирования в машиностроительные отрасли позволит облегчить путь решения этой технической проблемы.

Разработка и применения подобных систем на базе дорожно-строительной технике предоставляет для потребителя ряд плюсов в экономии средств и времени, а для производителя возможность выйти на новый уровень конкуренции на рынке строительной технике.

Целью, данной выпускной квалификационной работы является синтез системы управления положением навесного оборудования подвижного объекта.

В соответствии с указанной целью в работе решаются следующие задачи:

1. Ознакомление с устройством бульдозерного агрегата на базе гусеничной машины, изучение устройства и возможностей навесного оборудования и системой его управления.
2. Ознакомление с математическими моделями гидравлических систем и выбором одной из них для решения задачи.
3. Разработка системы стабилизации навесного оборудования с применением двух типов регуляторов и сравнении их друг с другом.

Объект исследования: принципы построения моделей гидравлических систем с возможностью внедрения в них систем автоматического управления.

Предмет исследования является система стабилизации рабочего оборудования бульдозерного агрегата

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             | 8    |

Методы исследования, проводимые в работе, основаны на комплексов использования приобретенных знаний в ходе изучения теории автоматизированного управления, систем автоматизированного проектирования, теоретической механики, теории гидросистем, современных вычислительных пакетов.

Практическая ценность работы, заключается в том, что все аналогичные системы управления положением навесного оборудования, которые используются на сегодняшний день, тщательно скрываются фирмами изготовителями, так как это данная система значительно повышает конкурентоспособность производителя на рынка, а также стоимость подобных систем является достаточно высокой.

Для исследования и разработки системы управления положением использовался математический пакет Matlab r2016b и его внутренние библиотека Simulink.

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 9    |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |

## 1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

### 1.1 Общие сведения о машине

Объектом управления, является навесное оборудование, управляемое гидравлической системой. Данное оборудование устанавливается на гусеничной машине, прототипом которой стал промышленный бульдозер (рис 1.1) производства ОАО «ДСТ–УРАЛ», г. Челябинск.



Рисунок 1.1 – Промышленный бульдозер TM10-GST10

Технические характеристики TM10 представлены в таблице 1.1:

Таблица 1.1 – Технические характеристики

|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| Двигатель               | ЯМЗ 238M2/DEUTZ BF06M        |
| Мощность                | 176 кВт                      |
| Удельных расход топлива | 214/204/кВт                  |
| Рабочий объем двигателя | 14,86/7,15л                  |
| Крутящий момент         | 883 Нм                       |
| Электростартер          | Ст25.3708-01/8,1 кВт         |
| Генератор               | 24В/80А                      |
| Аккумулятор             | 2x12В/360 Ач                 |
| Катки                   | 6 опорных и 2 поддерживающих |

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

10



|  |  |
|--|--|
| Гусеничная лента/ширина башмака/грунтозацеп    | 44 башмака с каждой стороны/500мм/65мм |
| Механизм натяжения гусениц                     | Гидравлический                         |
| Трансмиссия                                    | Гидростатическая BOSH-REXROTH          |
| Бортредукторы                                  | Планетарные                            |
| Управление                                     | Электро-Гидросервированное             |
| Тормозная система                              | Гидравлическая                         |
| Система управления навесным оборудованием      | Гидравлическая, отдельно-агрегатная    |
| Гидронасос                                     | Тандемный НШ-100                       |
| Максимальное давление                          | 18 Мпа                                 |
| Гидрораспределитель                            | Четырехсекционный                      |
| Управление движением                           | 4-х позиционный джойстик               |
| Управление навесным оборудованием              | 4-х позиционный джойстик               |
| Система охлаждения ДВС                         | 60 л                                   |
| Топливный бак                                  | 310 л                                  |
| Система смазки ДВС                             | 21 л                                   |
| Гидросистема трансмиссии                       | 100 л                                  |
| Гидросистема навесного оборудования            | 100 л                                  |
| Масса трактора                                 | 20 т                                   |
| Болотное исполнение                            | 21,5 т                                 |
| Эксплуатационная масса бульдозера с рыхлителем | 23,5 т                                 |
| Удельное давление на грунт                     | 0,075 мПа                              |
| Предельные скорости вперед                     | 11 км/ч                                |

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

11

Бульдозерный агрегат – землеройная машина, предназначенная для послойного срезания грунта, его перемещения на небольшое расстояние и разравнивания. Бульдозеры широко используют в различных отраслях гражданского, промышленного, гидротехнического и мелиоративного строительства, при прокладке железных и автомобильных дорог, в аэродромном строительстве, в горнодобывающей промышленности. [11]

Базой бульдозера является гусеничный движитель, в отличие от колесного, обеспечивает передвижение трактора не непосредственно по грунту, а по промежуточной замкнутой гусеничной ленте. Поэтому гусеница имеет значительно большую опорную поверхность, чем площадь контакта колеса колесного трактора. Что обеспечивает гусеничной машине высокие тяговые качества при значительно меньшем буксовании его движителей, проходимость по мягким и влажным грунтам, меньшие потери мощности на самопередвижение, а следовательно, и большую экономичность его работы.

Бульдозерный агрегат общего назначения выполняет копание и разработку грунтов, пород и грунтовых материалов в средних и умеренных климатических условиях с температурой окружающего воздуха от -40 до +40 оС, а также планировку строительных площадок, разработку песчано-гравийных карьеров, котлованов, выемок и траншей, сооружения каналов, прудов и водоемов, возведения насыпей, дамб и плотин, на вскрышных работах при добыче полезных ископаемых открытым способом, обратную засыпку траншей и котлованов, расчистку территорий от снега, камней, кустарника, пней, мелких деревьев и строительного мусора. [21]

Специальные БА предназначены для таких работ, как прокладка путей, пионерных дорог, сгребания торфа, подземная или подводная разработка материалов, а также работы в особых климатических условиях, при низких отрицательных температурах, местах с повышенной влажностью. На специальные БА устанавливают отвалы различных типов, соответствующих их назначению. [21]

К зарубежным ведущим фирмам-производителям выпускающие гусеничные бульдозеры преимущественно тяжелого относятся: США – Caterpillar, Италия – Fiat-Allis, Германия – Liebherr и Япония – Komatsu.

К ведущим отечественным производителям БА относятся: ОАО «Промтрактор» (Т9.01Я/И, Т11.01Я/К, Т15.01Я/К), ООО «ЧТЗ-Уралтрак» (Б10М, Б15, ДЭТ-320Б1Р2), ЗАО «Челябинские строительные машины» (ТС-10, ДЗ-240С).

## 1.2 Навесное оборудование бульдозерного агрегата

Бульдозер состоит из базовой машины и навесного бульдозерного оборудования, расположенного спереди. Основными элементами навесного оборудования (рис 1.2) являются: отвал, толкающие брусья или толкающая рама,

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 12   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |

гидроцилиндры подъема/опускания отвала, а также механизмы поворота отвала в поперечной, горизонтальной плоскостях и изменения угла резанья.

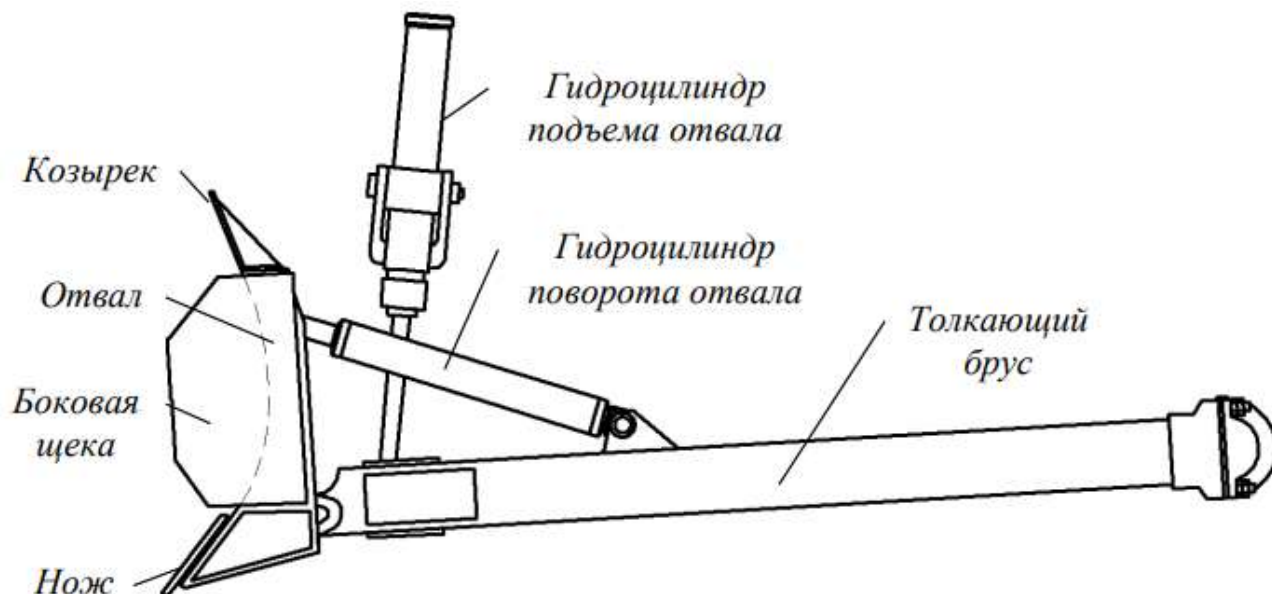


Рисунок 1.2 – Общий вид навесного оборудования

Отвал бульдозера представляет собой жесткую сварную металлоконструкцию коробчатого типа с лобовым листом криволинейного профиля. Последний обеспечивает быстрое заполнение отвала материалом. Чтобы предотвратить пересыпание грунта при работе на несвязных и рыхлых грунтах, к средней части отвала приваривают козырек, а торцы закрывают двумя боковыми щеками. Вдоль нижней кромки отвала с помощью болтов крепят режущие ножи. При изнашивании острой кромки ножа его разворачивают и режут вторым острым концом. Толкающее устройство состоит из балок коробчатого сечения. Передняя часть толкающего устройства шарнирно соединена с отвалом бульдозера, а задняя — также шарнирно с опорами, расположенными на базовом тракторе [11].

Основными геометрическими параметрами отвала бульдозера являются (рис 1.3):

- Ширина отвала  $L_n$ ;
- Высота отвала  $H_0$ ;
- Высота козырька  $H_1$ ;
- Угол перекоса  $\beta_{PO}$ ;
- Угол внешнего и внутреннего трения грунта  $\rho_{Г}$ ;
- Угол резанья  $\alpha_P$ ;
- Угол наклона отвала  $\varepsilon_{Г}$ ;
- Угол опрокидывания  $\psi$ ;

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
|      |      |          |         |      |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

13

- Угол установки козырька  $\psi_1$ ;
- Радиус цилиндрической поверхности отвала  $R_{\Gamma}$ .

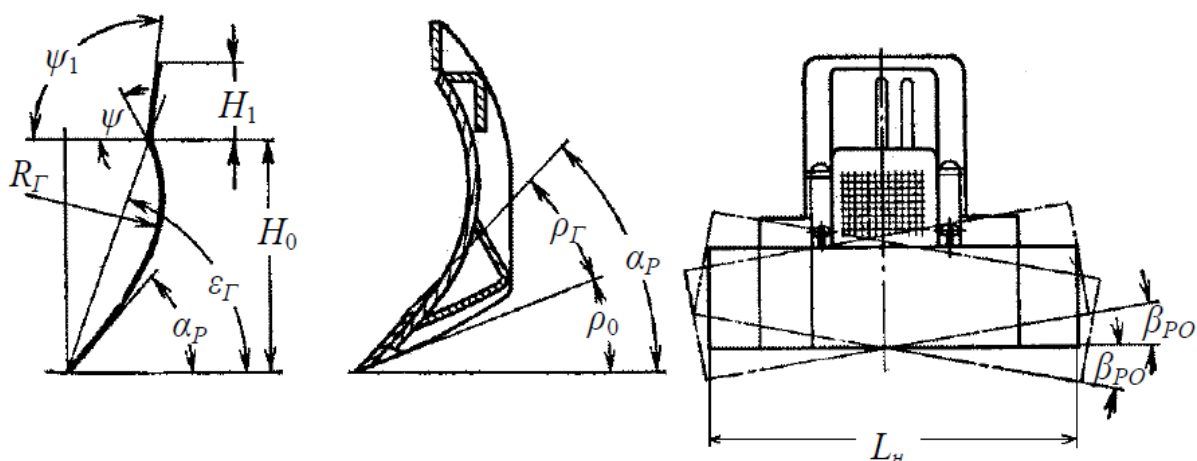


Рисунок 1.3 – Геометрические параметры отвала бульдозерного агрегата

Управление отвалом происходит с помощью гидроцилиндров и системы управления, расположенной на базовой машине. Этими гидроцилиндрами управляют с помощью рычагов гидрораспределителя, установленного в кабине машиниста.

Существует несколько типов отвалов, отличающихся по своей форме, поворотным возможностям и специализированные виды отвалов [20]. К первым относятся: прямой, полусферический и сферический отвалы (рис. 1.4).

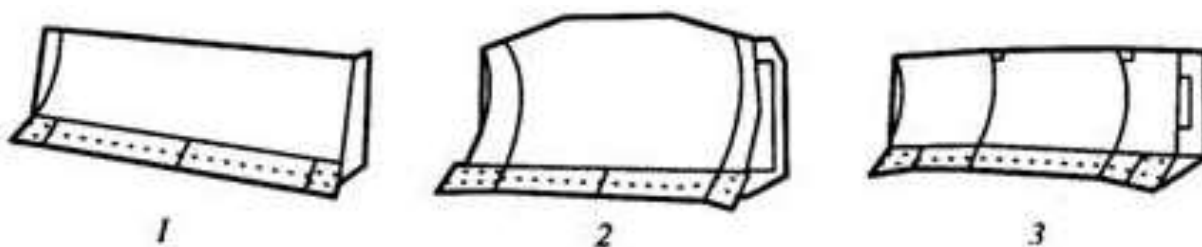


Рисунок 1.4 – Типы бульдозерных отвалов. 1 – прямой, 2 – полусферический, 3 – сферический

По поворотным возможностям выделяют:

- Неповоротный отвал (рис. 1.5) располагается перпендикулярно ходовой части машины, поднимается и опускается при работе и не может поворачивать в плане;

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

14

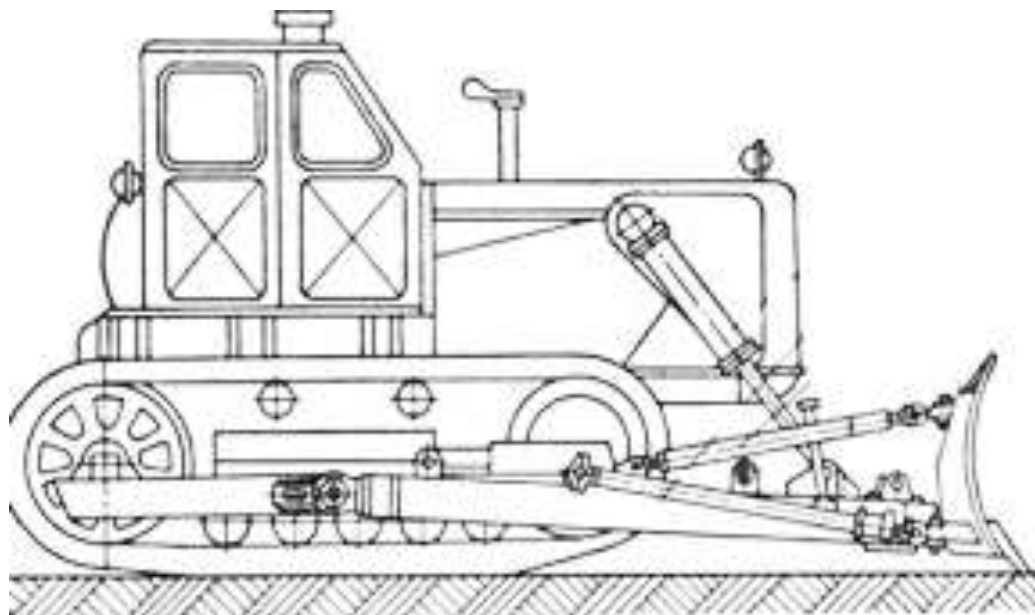


Рисунок 1.5 – Бульдозер с неповоротным отвалом

- Поворотный отвал можно разделить по количеству возможных поворотов. Отвал может только изменять перекос (рис. 1.6), или выполнять только поворот в плане, а может совмещать оба поворота, в таком случае его называют трехстепенным (рис. 1.7, 1.8). С таким отвалом машина становится более мобильной и способной решать большее количество задач.

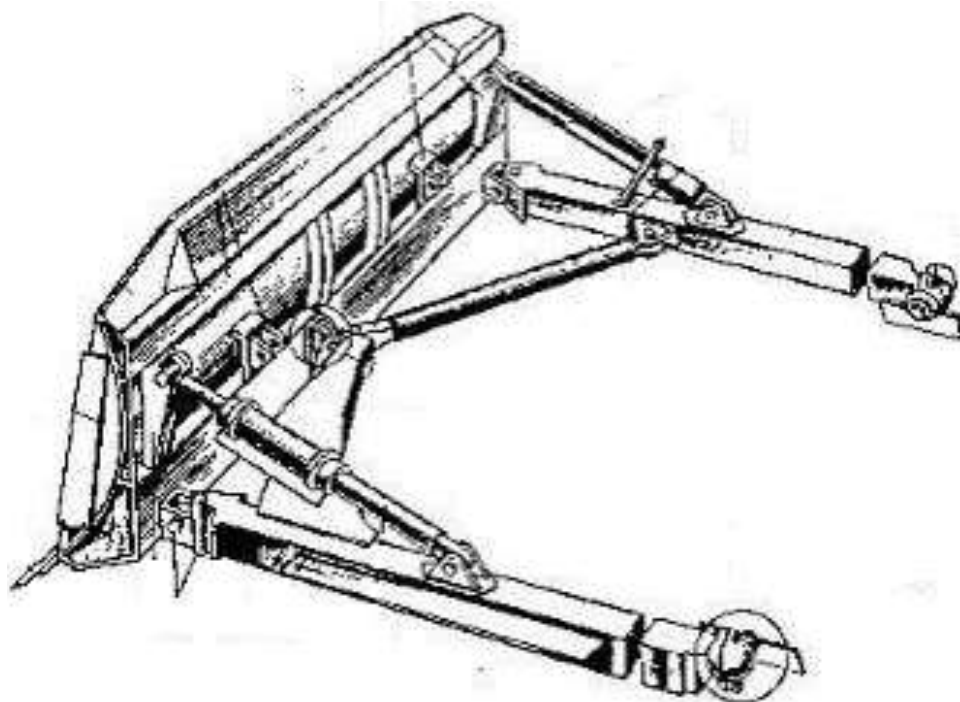


Рисунок 1.6 – Поворотный отвал с возможностью перекоса

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

15

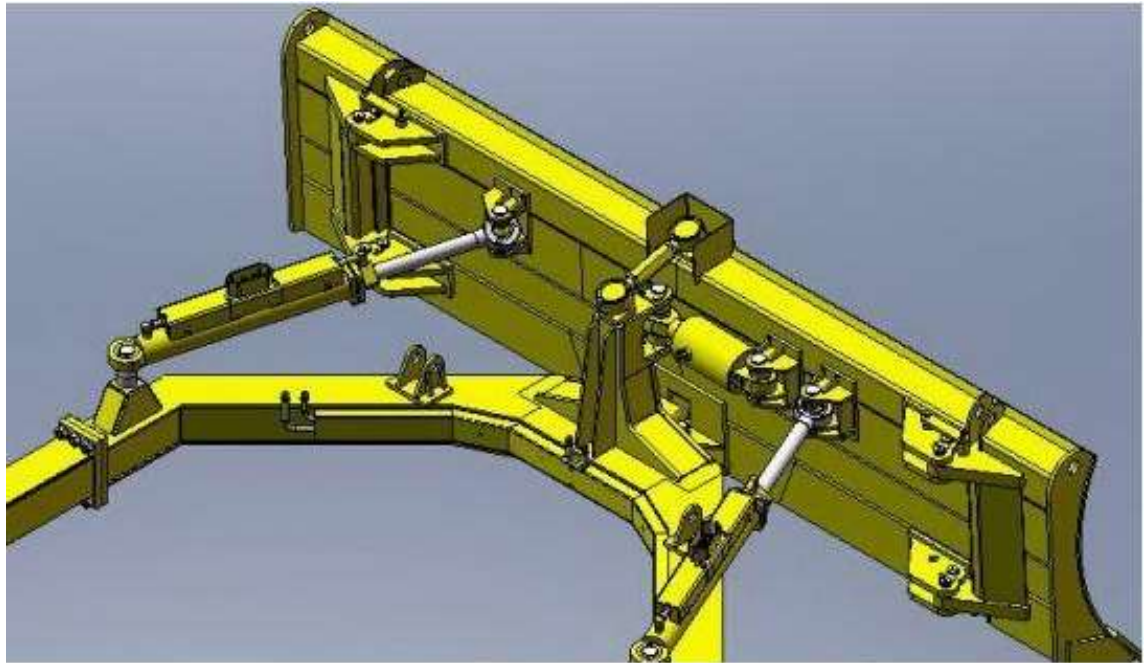


Рисунок 1.7 – Поворотный трехступенной отвал

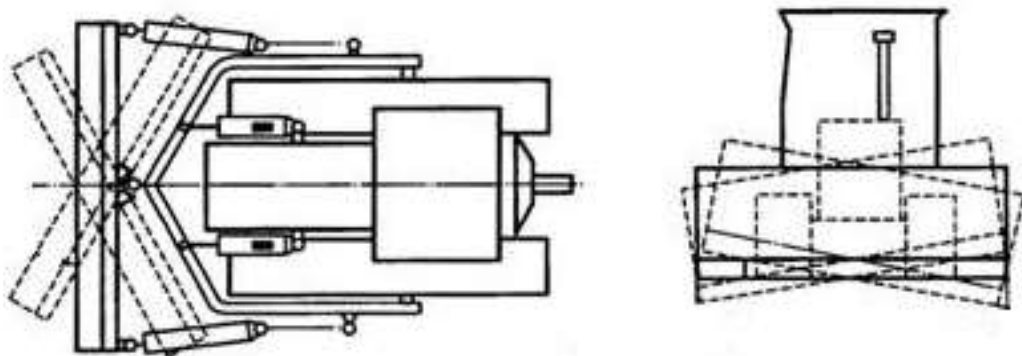


Рисунок 1.8 – Возможности поворотов отвала

Помимо основных видов отвала, существуют и специализированные [20]:

- Буферный отвал – применяется при толкании скреперов и зарезании их в грунт.
- Угольный – для перевозки угля или щепы;
- Рекультивационный – для срезания и переноса плодородного слоя почвы;
- Кусторезный – для расчистки территории под застройку, имеет v-образную форму;
- Торфяной – для перемещения торфа на удобряемых полях;
- Корчеватель – для корчевания пней и расчистки территории, имеет зубья.

Таким образом, учитывая вышеприведенное описание конструкции бульдозера и наличия управления положением отвала с помощью гидросистемы, можно сделать вывод о возможности внедрения различных систем управления и

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

16

автоматического регулирования положения рабочего органа.

### 1.3 Анализ требований к точности обработки земляного полотна

Одно из основных мест среди критериев качества в строительстве занимает критерий, характеризующий геометрическую точность сооружения. Необходимость точного соблюдения этого критерия связана с тем, что при нарушении данных параметров в дорожно-земляных работах приводит к перерасходу гравийно-песчаных смесей и других материалов, что влечет за собой дополнительные затраты.

Планировочные работы являются завершающим этапом возведения земляных сооружений, поэтому являются наиболее ответственными, трудоемкими и требующими высокой квалификации человека-оператора. Основными параметрами, характеризующими качество таких работ, являются продольные высотные отметки и поперечные уклоны. В таблице 1.2 приведены регламентируемые показатели качества обработки земляного полотна по СНиП 3.06.03-85. [17]

Таблица 1.2 – Регламентированные показатели качества земляного полотна

| Контролируемый параметр              | Условия оценки       |                   |   |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------|---|
|                                      | Количество измерений | Предел отклонений | Среднеквадратическое отклонение, $\sigma$ |
| Высотные отметки продольного профиля | >90%                 | «Хорошо»          |   |
|                                      |                      | $\pm 50$ мм       | $\pm 30,3$ мм                             |
|                                      | >95%                 | «Отлично»         |   |
|                                      |                      | $\pm 50$ мм       | $\pm 25,5$ мм                             |
| Поперечные уклоны                    | >90%                 | «Хорошо»          |   |
|                                      |                      | $\pm 0,010$ рад   | $\pm 0,00606$ рад                         |
|                                      | >95%                 | «Отлично»         |   |
|                                      |                      | $\pm 0,010$ рад   | $\pm 0,0051$ рад                          |

Таким образом, технические возможности землеройно-транспортных машин должны соответствовать высоким требованиям строительных норм и правил, предъявляемых к геометрическим параметрам земляных сооружений.

Физиологические возможности человека-оператора, управляющего машиной, позволяют лишь визуально оценить геометрические параметры формируемого земляного сооружения, но оператор не способен самостоятельно проконтролировать и обеспечить параметры земляного покрытия по всей протяженности рабочего участка. с соответствующей точностью. Затраты на

переделку или доведение земляных работ в современном строительстве, в связи с недостаточной точностью их проведения, могут достигать большой суммы.

Таким образом, внедрение устройств управления в БА позволит повысить качество получаемой поверхности и сокращением затрат на работы по возведению земляных сооружений.

#### **1.4 Обзор существующих систем управления рабочим органом**

В настоящее время в мире существует множество систем управления положением РО, основанных на различных элементных базах и выполняют различные функции. Анализ литературных источников и работ, посвященных данному направлению позволяет классифицировать СУ РО БА по способу контроля информационных параметров:

- Автономные СУ, характеризуются тем, что их датчики (маятники, гировертикали и пр.) фиксируют смещение РО относительно гравитационной вертикали (системы «Профиль1», «Профиль10И»);
- Копирные системы характеризуются тем, что датчик определяет положение РО относительно внешнего ориентира (направляющая, лазерный луч и пр.) (системы «Профиломат 1-6»);
- Комбинированные системы совмещают в себе предыдущие методы, где для контроля углового положения РО применяется угловой датчик, а для определения по высоте используют копир (системы «Профиль 2», «Профиль 20», «Дорога», «СКАТ-4» и пр.).

В данных системах используются отрицательные обратные связи с датчиками положения, установленными на РО. Система постоянно измеряет положение рабочего оборудования и вырабатывает сигнал рассогласования между измеренной и заданной величиной, который после преобразования передается на силовые гидроцилиндры, изменяющие положение РО, до приведения его к желаемому результату.

Копирные системы возможно использовать с применением бесконтактных – лазерных и GPS приборов, что является прогрессивным направлением развития СУ РО БА. Использование таких бесконтактных систем открывает новые возможности для дорожно-строительной техники, такие как удаленное управление техникой, управление одновременно группой машин, возможность проводить работы в темное время суток или сложных метеорологических условиях и т.д.

На данный момент существует множество лазерных и GPS СУ РО, различающихся структурой и алгоритмами управления, но постоянных на аналогичных элементных базах. Подобные системы естанавливаются на машинах зарубежных производителей.

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 18   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |



Американская фирма «Caterpillar» производит собственные машины, под названием «Cat», с возможной установкой нескольких вариантов системы профилирования. [15]

Технологии «GRADE» сочетают в себе цифровые данные о проекте, индикаторы для помощи машинисту и систему автоматического управления положением отвала. Система может включать в себя лазеры для 2D контроля планировки и формирования откосов, глобальную навигационную спутниковую систему для сложных трёхмерных проектов и системы на базе роботизированного тахеометра для финишного профилирования.

Компания «Trimble», находящаяся также в США, производят системы автоматического управления рабочих органов бульдозера с применением аналогичных устройств. [16]

Машина оборудована отражателем на телескопической мачте, закрепленной на отвале. На стройплощадке устанавливают роботизированный тахеометр с радиоканалом, который следит за машинным отражателем и измеряет два угла и дальность до него. Далее положение отражателя блок управления машины пересчитывает в положение и направление движения режущей кромки отвала.

Блок управления сравнивает эти данные с проектными и выдает управляющие сигналы на органы управления навесным оборудованием. Система берет на себя управление положением отвала машины. Оператор может самостоятельно, не выходя из машины, контролировать качество работ.

Ни одна из фирм не предоставляет в открытом доступе принципов работы и схем, используемых ими систем управления, что приводит к необходимости разрабатывать собственные системы профилирования.

На бульдозерах, предприятия «ДСТ-Урал», устанавливаются микроконтроллеры и система определения координат машины посредством GPS/ГЛОНАСС, что в свою очередь дает возможность добавления системы управления рабочим органом бульдозерного агрегата.

### **1.5 Анализ математических моделей гидравлической системы**

В настоящее время все БА оснащены гидроцилиндрами для управления РО. Не смотря на разнообразие схем гидросистем, количество элементов, входящих в них не так велико: силовой гидроцилиндр, гидрораспределитель, гидролиния, гидроклапан, насос и др.

Существует большое количество работ, связанных с методами математического описания модели работы объемного гидропривода, в некоторых из них принимаются некоторые допущения относительно работы гидросистемы, в других стараются провести учет все допущений.

|             |             |                 |                |             |                                    |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|------------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <b>24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                    | 19          |

В своей работе [9] В.В. Беляев предложил общую передаточную функцию гидропривода, так как объёмный гидропривод обладает такими качествами, как время запаздывания и постоянная скорость перемещения штоков гидроцилиндра в установившемся режиме и торможения. Можно выделить характерные стадии для чистого запаздывания, когда шток находится в покое после включения распределителя, стадию разгона до номинальной скорости и стадию установившегося движения.

Выделенным стадиям можно присвоить три последовательно соединенных звена: звено чистого запаздывания, апериодическое звено первого порядка и интегрирующее звено.

В работе В.С Щербакова [22] предлагается методика составления математической модели гидропривода на основе представления гидроэлементов в виде многомерных динамических объектов используя векторно-матричную форму записи уравнений. Динамические свойства многомерных объектов полностью характеризуются их уравнениями движения, связывающими входные и выходные величины объектов, которые составляются на основе законов физики при рассмотрении процессов преобразования передачи информации.

Таким образом, проведенный анализ математического описания показал, что элементы объемного гидропривода достаточно хорошо изучены и представлены с теми или иными допущениями в виде передаточных функция или дифференциальных уравнений. Имеющийся математический аппарат может быть использован для решения поставленных в работе задач.

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 20   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

### 2.1 Общий вид системы управления

Математическая модель системы состоит из нескольких объектов (рис 2.1): рабочего оборудования, силовых гидроцилиндров, золотникового гидрораспределителя, датчика угла РО, который является датчиком обратной связи, и регулятора.

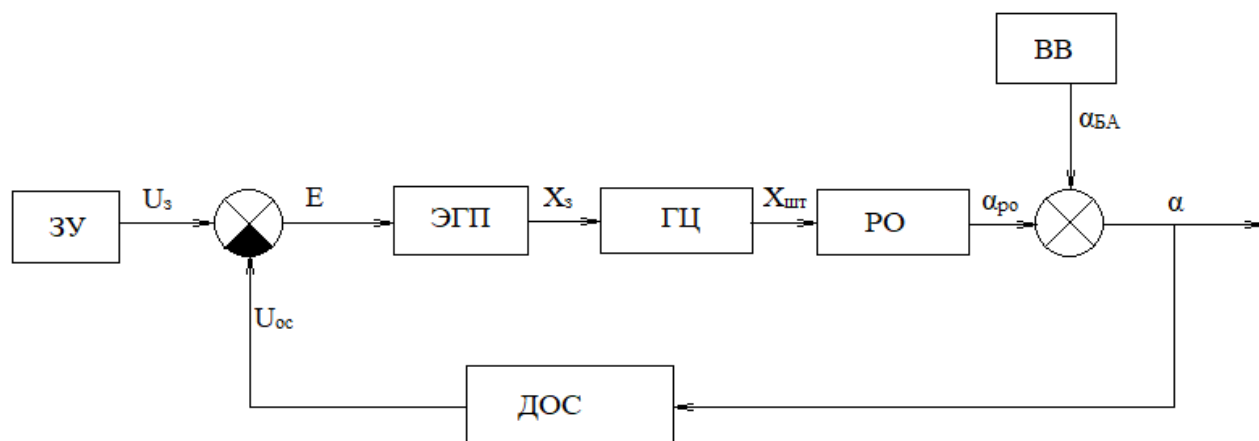


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы управления РО

Задающее устройство формирует электрический сигнал в зависимости от необходимого угла наклона формируемого земляного полотна, на сумматор поступает электрический сигнал с датчика угла, который отслеживает положение РО относительно местного горизонта, рассогласование этих сигналов поступает на электрогидравлический преобразователь, который перемещает золотник гидрораспределителя, что влияет на перемещение гидроцилиндра, а в следствии и поворота рабочего органа, который формирует угол  $\alpha_{po}$  между бульдозером и отвалом. Возмущающее воздействие представляет собой отклонение БА от горизонтальной плоскости на угол  $\alpha_{БА}$ . Сумма этих углов образует положение РО относительно горизонтальной плоскости.

### 2.2 Математическая модель электрогидравлического преобразователя

Динамика перемещения золотника описывается уравнением:

$$m_{зол} \frac{d^2 x_{зол}}{dt^2} + c_2 \frac{dx_{зол}}{dt} + c_3 x_{зол} = c_1 i_{зол}, \quad (2.1)$$

где  $c_1$  – линеаризованный коэффициент пропорциональности между током в обмотках электромагнита и силой тяги электромагнита;  $c_2$  – коэффициент вязкого трения и силой тяги электромагнита;  $c_3$  – коэффициент упругой деформации пружин, удерживающих золотник в нейтральном положении;  $m_{зол}$  – масса сердечника электромагнита и золотника;  $i_{зол}$  – управляющий ток обмоток золотника.

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

21

Передаточная функция перемещения золотника электрогидравлического преобразователя выглядит следующим образом:

$$W_{\text{зол}} = \frac{x_{\text{зол}}(s)}{i_{\text{зол}}(s)} = \frac{k_1}{T_{\text{зол1}}^2 s^2 + T_{\text{зол2}} s + 1} \quad (2.2)$$

где  $k_1$  – коэффициент усиления;  $T_{\text{зол1}}$  и  $T_{\text{зол2}}$  – постоянные времени.

$$k_1 = \frac{c_1}{c_3}; \quad (2.3)$$

$$T_{\text{зол1}} = \frac{m_{\text{зол}}}{c_3}; \quad (2.4)$$

$$T_{\text{зол2}} = \frac{c_2}{c_3}. \quad (2.5)$$

### 2.3 Математическая модель гидросистемы

При описании модели гидропривода были приняты следующие допущения:

- Объемный модель упругости рабочей жидкости не изменяется с течением времени;
- Инерционные свойства потока рабочей жидкости не учитываются;
- Подача гидронасоса не меняется со временем;
- Сжимаемость, утечки жидкости и силы сухого трения в гидроцилиндре не учитываются.

Типовая схема гидравлической системы (рис. 2.2), состоящей из силового гидроцилиндра, золотникового гидрораспределителя, насоса и бака, для хранения и подпитки системы рабочей жидкости.

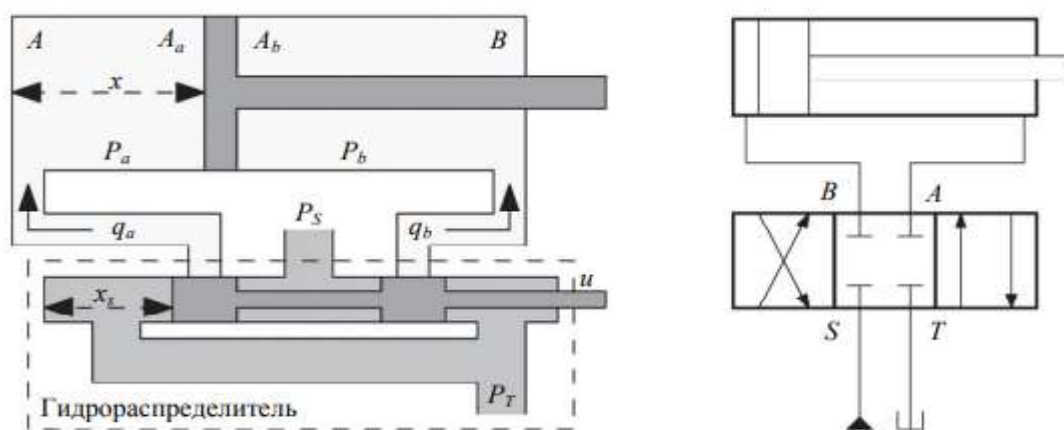


Рисунок 2.2 – Схема гидравлического цилиндра с гидрораспределителем.

Силовой гидроцилиндр состоит из двух рабочих камер  $A$  и  $B$ , имеющими соответствующие давления  $P_a$  и  $P_b$ , площади воздействия жидкости на подвижную часть гидроцилиндра  $A_a$  и  $A_b$  и расходы  $q_a$  и  $q_b$  между гидрораспределителем и рабочими камерами.

К гидрораспределителю подведены четыре гидролинии. Гидролинии  $A$  и  $B$  соединены с соответствующими камерами гидроцилиндра. Гидролиния  $S$  является

напорной, потому что к ней подключен насос. Гидролиния  $T$  является сливной и подключена к баку с рабочей жидкостью.

Управление золотниковым гидрораспределителем осуществляется при изменении входного тока на соленоид золотника. В нейтральном положении ( $x_3=0$ ) золотник перекрывает оба рабочих канала, при  $x_3>0$  образуются связи между гидролиниями  $A-S$  и  $B-T$ , что соответствует выдвиганию штока цилиндра, а при  $x_3<0$ ,  $A-T$  и  $B-S$ , что соответствует втягиванию штока.

Тогда потоки между гидрораспределителем и гидроцилиндром описываются следующими выражениями:

$$q_a = \begin{cases} c_a S(u) \sqrt{|P_S - P_a|} \operatorname{sign}(P_S - P_a) & \text{при } u \geq 0, \\ c_a S(u) \sqrt{|P_a - P_T|} \operatorname{sign}(P_a - P_T) & \text{при } u < 0, \end{cases} \quad (2.6)$$

$$q_b = \begin{cases} -c_b S(u) \sqrt{|P_b - P_T|} \operatorname{sign}(P_b - P_T) & \text{при } u \geq 0, \\ -c_b S(u) \sqrt{|P_S - P_b|} \operatorname{sign}(P_S - P_b) & \text{при } u < 0, \end{cases}$$

где  $c_a>0$  и  $c_b>0$  – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств рабочей жидкости, геометрии золотника и иных физических параметров;  $S(u) \in [-1;1]$  – функция, описывающая открытие рабочего окна, такая, что  $S(u)>0$  при  $u>0$ ,  $S(u)<0$  при  $u<0$  и  $S(u)=0$  при  $u=0$ . Значение  $S(u)$  соответствует площади открытия рабочего окна.

Для гидроцилиндра справедливы следующие уравнения динамики давлений:

$$\dot{P}_a = \frac{\beta}{V_{a0} + x A_a} (q_a - \dot{x} A_a), \quad (2.7)$$

$$\dot{P}_b = \frac{\beta}{V_{b0} - x A_b} (q_b + \dot{x} A_b),$$

где  $\beta$  – модуль объемного сжатия рабочей жидкости,  $x$  – перемещение поршня гидроцилиндра,  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  – объемы камер  $A$  и  $B$  соответственно при нулевом смещении поршня. Движение поршня описывается следующими выражениями:

$$F_h = P_a A_a - P_b A_b, \quad (2.8)$$

$$m \ddot{x} = F_h - F_{ex},$$

где  $m$  – масса штока и приложенной к нему нагрузки,  $F_{ex}$  – совокупная внешняя сила, приложенная к штоку,  $F_h$  – гидравлическая сила, созданная гидроцилиндром.

## 2.4 Математическая модель рабочего оборудования

Гидроцилиндр с одной стороны закреплен на толкающих брусках, а с другой стороны непосредственно с отвалом (рис. 2.3). При изменении положения штока будет изменяться угол наклона отвала, называемый углом перекоса.

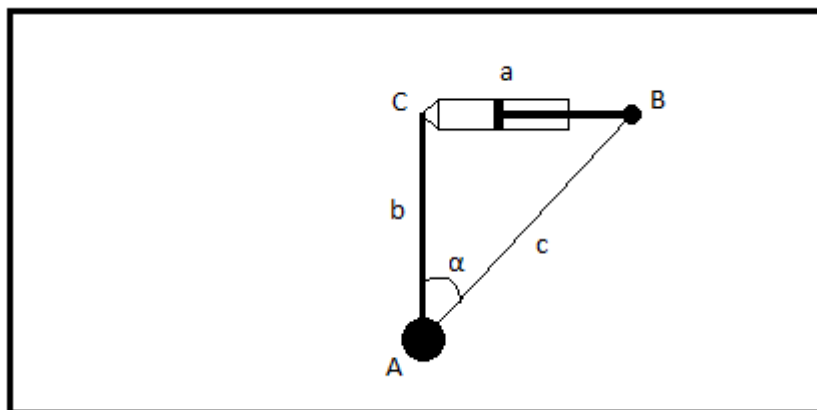


Рисунок 2.3 – Схематичное представление крепления цилиндра

На представленном рисунке опорная балка  $AC$  шарнирно соединена с отвалом в точке  $A$  и с гидроцилиндром в точке  $B$ . Гидроцилиндр  $CB$  шарнирно соединен с отвалом в точке  $B$ . Очевидно, что стороны  $b$  и  $c$  не изменяют своих параметров, а сторона  $a$  изменяется в зависимости от положения штока  $x$ , при этом  $a=a_0+x$ ,  $\alpha=\alpha_0+\Delta\alpha$ , где  $a_0$  и  $\alpha_0$  геометрические параметры, при нулевом перекосе  $\Delta\alpha=0$  и среднем положении штока  $x=0$ . Угол  $\Delta\alpha$  показывает перекоп отвала относительно рабочей машины.

Соотношение между перемещением штока и углом можно представить с помощью следующего выражения:

$$\Delta\alpha = a \cos\left(\frac{b^2+c^2-(a_0+x)^2}{2bc}\right) - \alpha_0, \quad (2.9)$$

## 2.5 Датчика угла наклона

Датчик наклона выполненный по технологии микромеханики может применяться в системах контроля и управления, такой датчик содержит пузырьковый уровень, положение которого измеряется непрерывно. Существуют подобные инклинометры с возможностью определения точного положения до десятых значений градусов.

Представим датчик белорусского производства РФ711 (рис 2.4):

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |



Рисунок 2.4 – Датчик наклона РФ711

К характеристикам данного устройства относятся:

- Выходной сигнал: аналоговый [0; 5] В или цифровой RS-232;
- Диапазон измеряемой величины [- 90°; +90°]
- Постоянная времени не более 0,1 с;
- Абсолютная точность: 0,1°;
- Степень защиты: IP65;
- Рабочая температура: - 40...+50°;
- Вес 0.3 кг.
- Габариты 80x40x36 мм

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

25

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

#### 3.1 Моделирование основной части системы

Моделирование системы будет осуществляться с помощью математического пакета Simulink. Благодаря обширной библиотеки программы можно создавать сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданные математические модели.

Представим модель определения расходов от величины смещения золотника (рис 3.1):

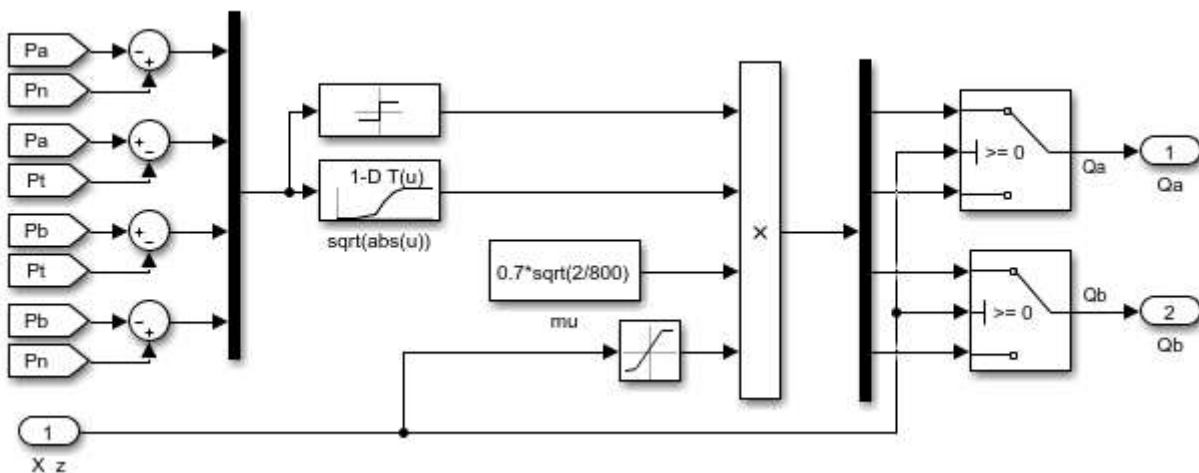


Рисунок 3.1 – Структурная схема модели определения расходов в среде Simulink

В данной схеме происходит расчет потоков рабочей жидкости в зависимости от величины и направления смещения золотника, а также величин давления в штоковой и поршневой полостях. Информация о величинах расходов передается в схему силового гидроцилиндра (рис 3.2).

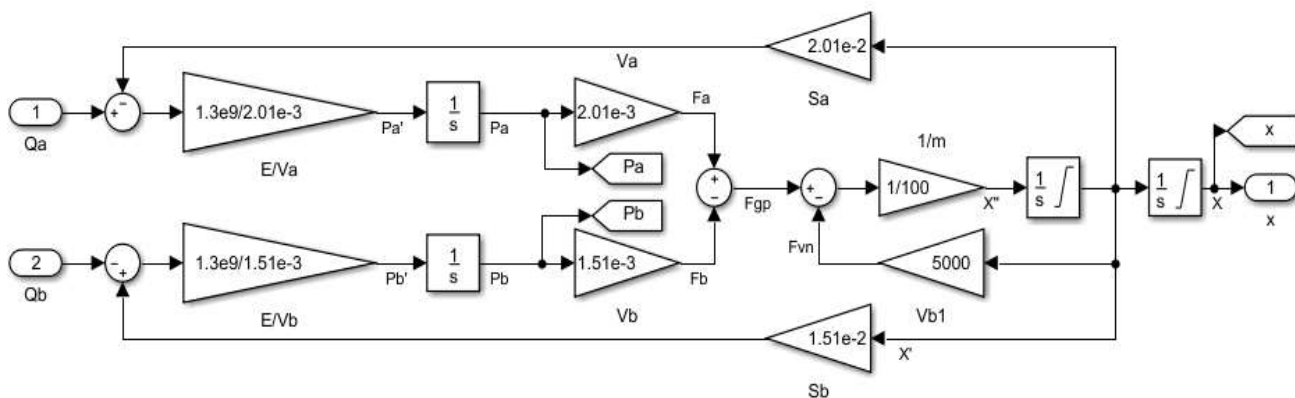


Рисунок 3.2 – Структурная схема модели гидроцилиндра в среде Simulink



В данной модели происходит расчет перемещения гидроцилиндра на основе его размерных параметров рабочих полостей, свойств рабочей жидкости и её расхода.

Гидроцилиндр присоединен к рабочему органу. Изменение положения штока изменяет наклон РО. Представим модель описывающую зависимость между изменением величины штока и углом наклона отвала (рис 3.3):

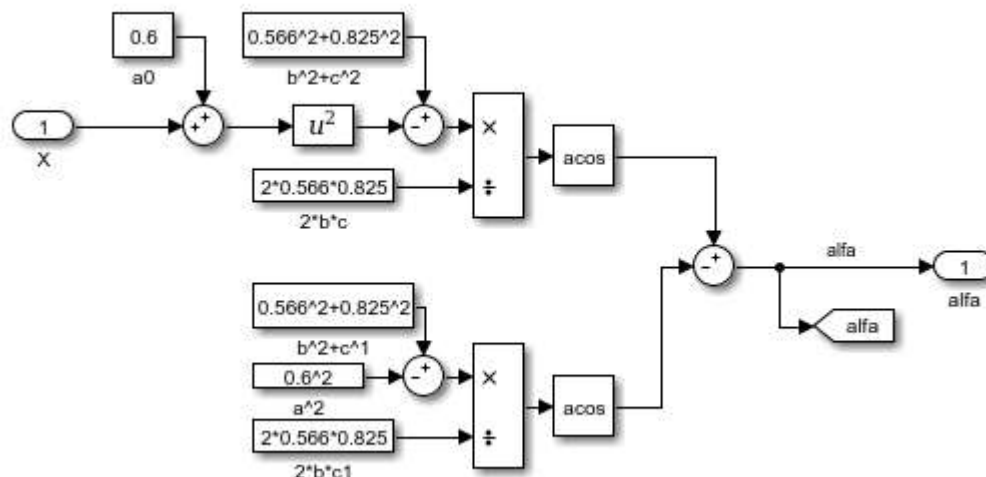


Рисунок 3.3 – Структурная схема модели изменения угла рабочего органа в среде Simulink

Объединим приведенные выше модели в единую систему (рис 3.4):



Рисунок 3.4 – Структурная схема объединённой модели в среде Simulink

К нашей системе прибавился блок описывающий работу электрогидравлического преобразователя. Модель определения расходов и модель гидроцилиндра объединена в макроблок «Гидросистема», а модель рабочего органа в макроблок «Отвал».

Подадим тестовый сигнал на нашу модель и посмотрим на полученные результаты (рис 3.5):

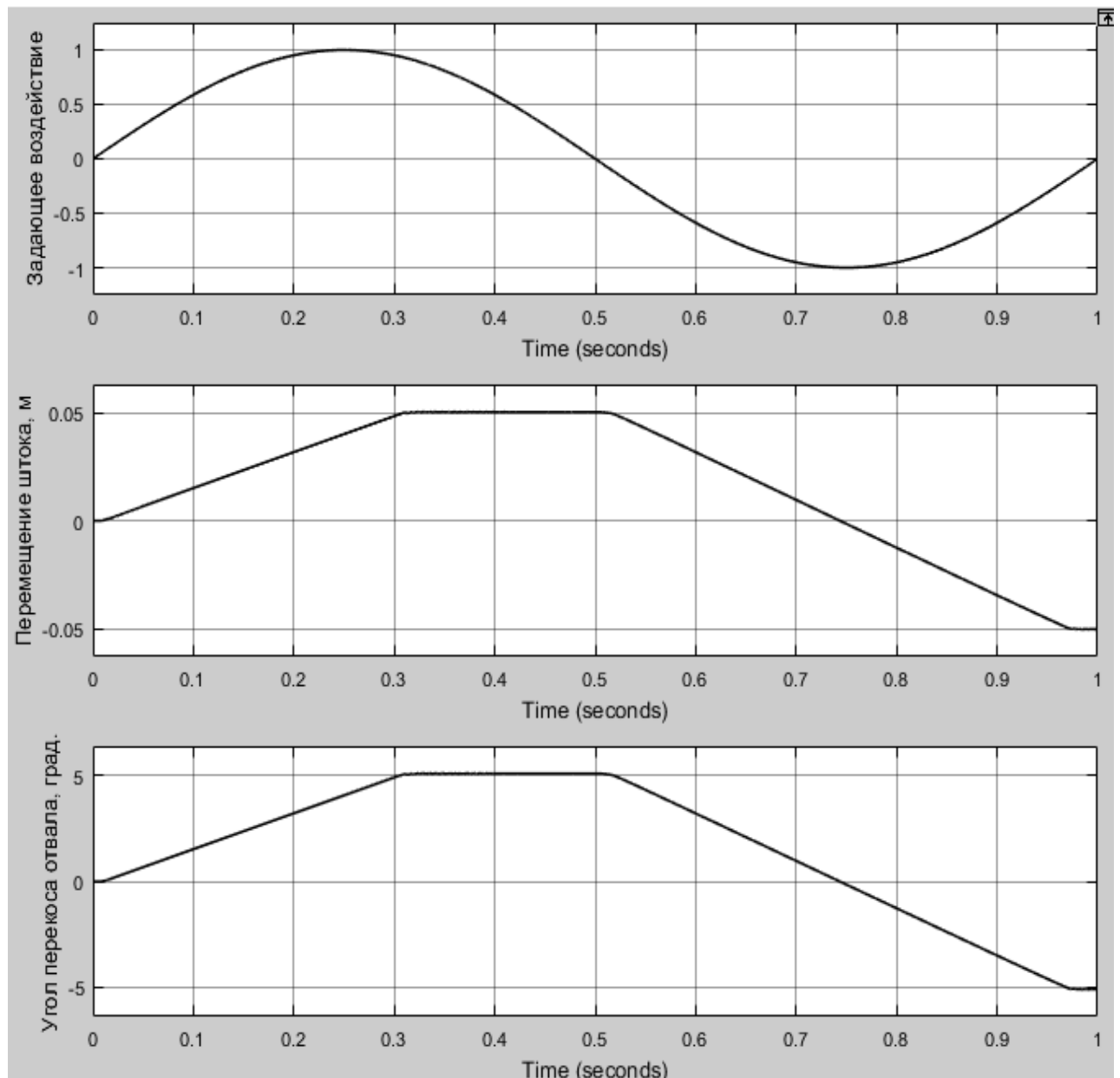


Рисунок 3.5 – Результаты моделирования в Simulink

По графику перемещения штока видно, что он выдвинулся до упора, а при смене знака задающего воздействия начал втягиваться, пока не достиг упора, с другой стороны.

Нулевому значению перемещения штока соответствует его нейтральное положение, при котором отвал находится в одной плоскости с бульдозером.

Отметим также что выдвигение штока из нейтрального положения до максимального значения заняло 0,3с., а втягивания обратно до нейтрального положения приблизительно 0,25с.. Это связано с тем, что объем штоковой полости несколько меньше объема поршневой полости, из-за чего заполнение жидкостью происходит быстрее.

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

28

### 3.2 Разработка системы управления положением

Для реализации минимальной системы управления необходимо создать обратную, отрицательную связь с датчиком угла положения рабочего органа (рис 3.6):

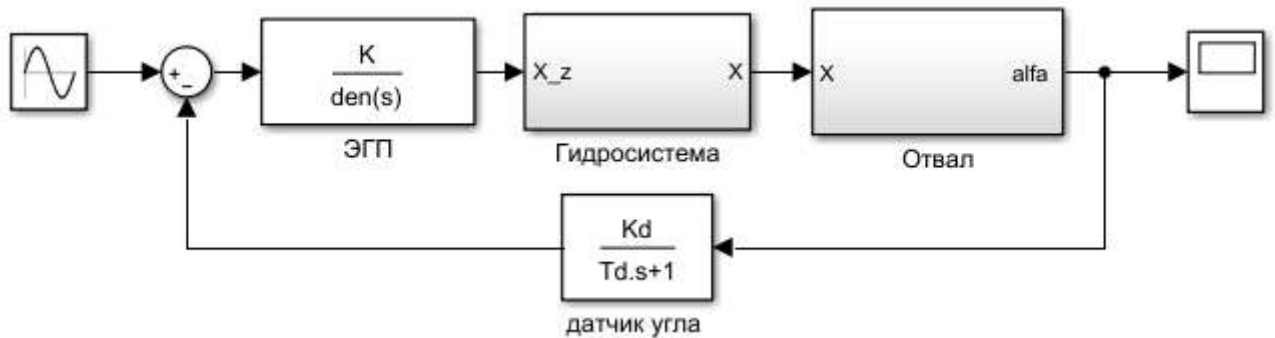


Рисунок 3.6 – Структурная схема системы управления положением рабочего органа в Simulink

В данной схеме задающее воздействие выполняет роль желаемого результата, и в какой-то мере пропорциональна углу положения рабочего органа. Это значение сравнивается на сумматоре с сигналом обратной связи и формирует ошибку управления, которая будет стремиться к нулю, так как при значении сигнала превышающего задающий получается отрицательная ошибка, которая соответствует сигналу о втягивании штока и уменьшении сигнала обратной связи, аналогично и в случае, если сигнал обратной связи будет меньше задающего значения.

Проведем моделирование и посмотрим на полученные результаты (рис 3.7, 3.8):

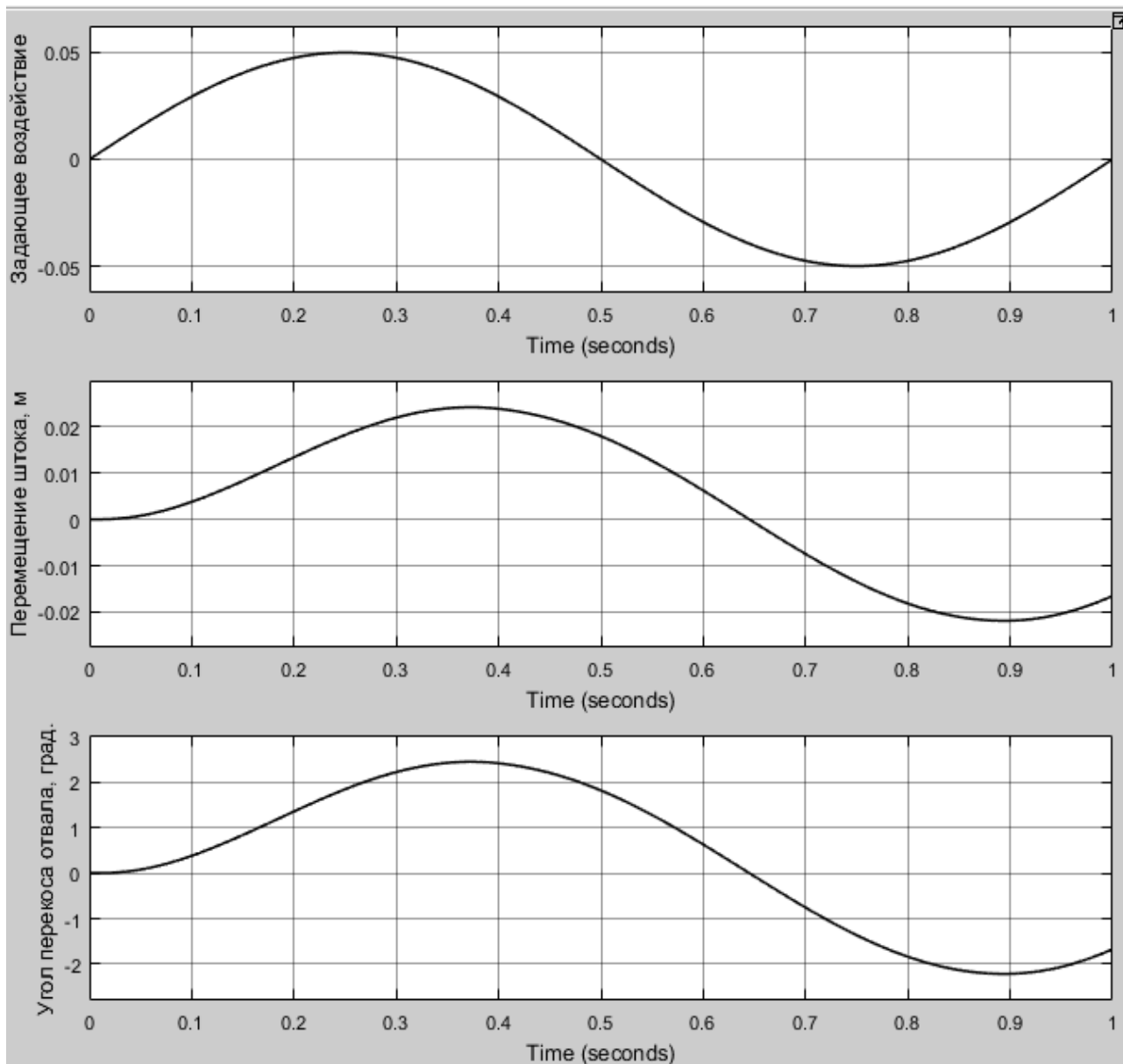


Рисунок 3.7 – Результаты моделирования в Simulink

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

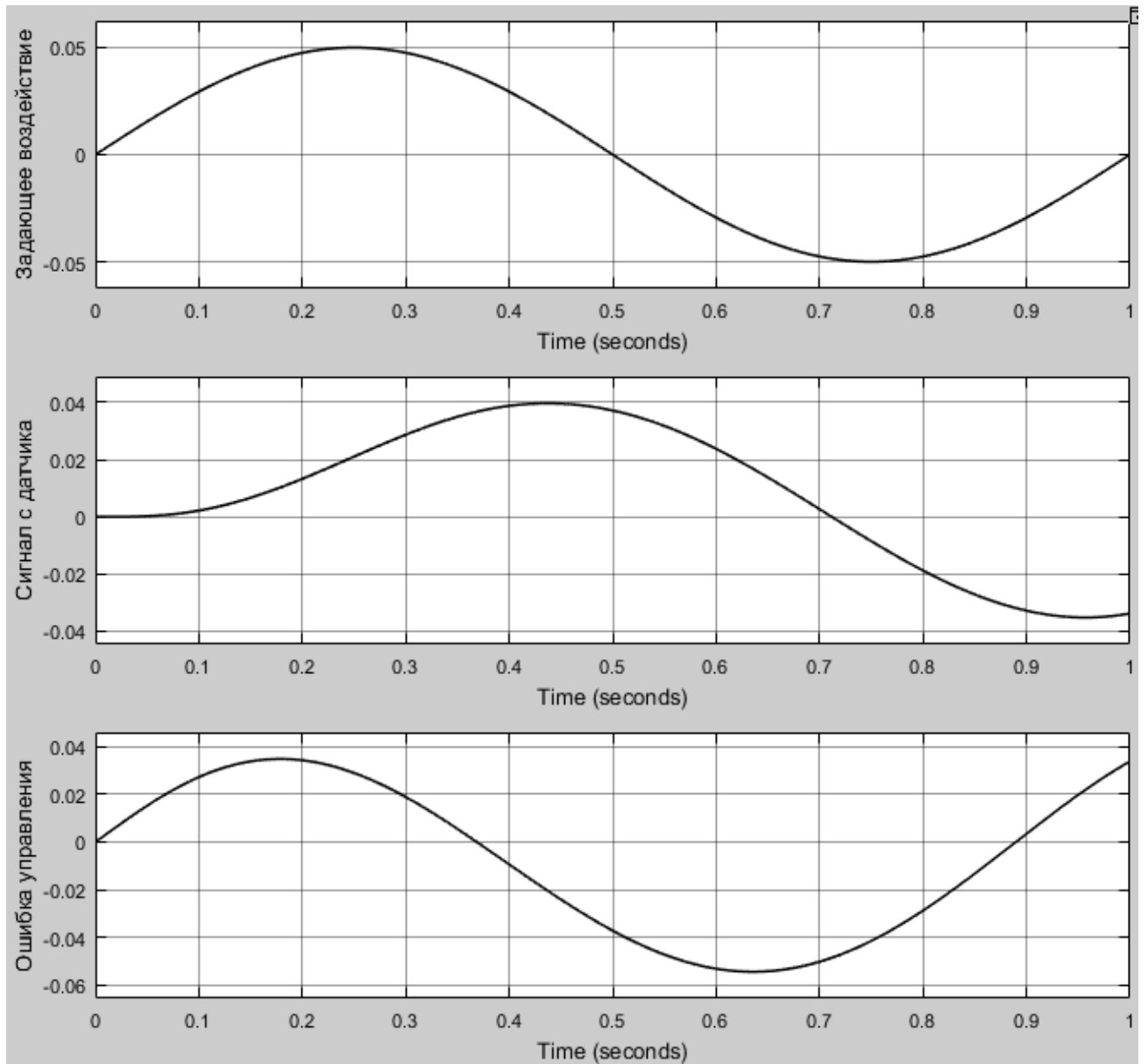


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования в Simulink

На графиках видно сильное рассогласование сигнала с датчика и задающего воздействия, и как следствие большой ошибки управления. Это означает, что в систему необходимо включение регулятора.

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

### 3.3 Разработка системы управления положением с ПИ-регулятором

Добавим в нашу систему классический пропорционально-интегральный регулятор, также подадим возмущения на положение отвала со стороны бульдозерного агрегата, вызванное неровностью рельефа (рис 3.9):

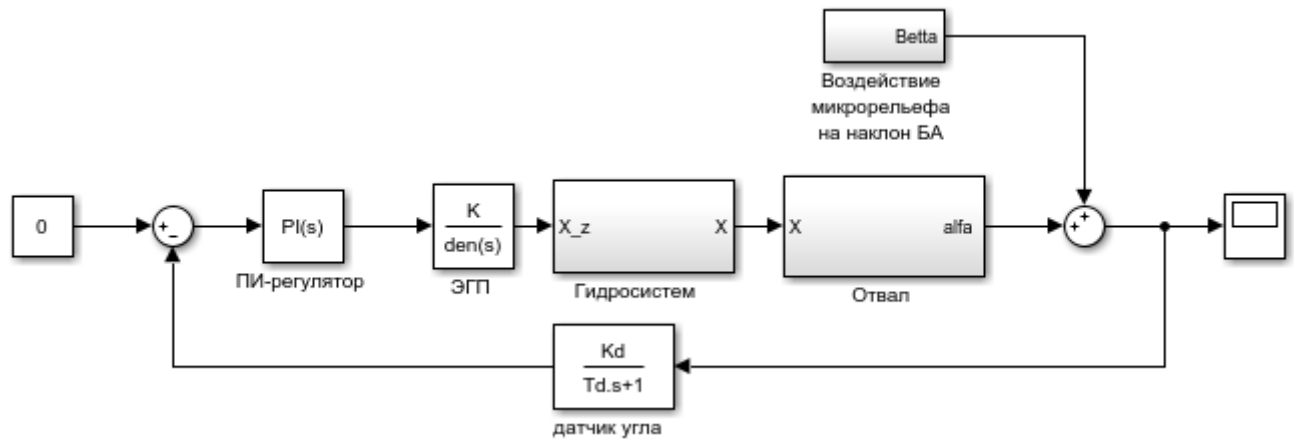


Рисунок 3.9 – Структурная схема системы управления положением рабочего органа с ПИ-регулятором в Simulink

Стоит отметить, что задающее воздействие является нулевым в том случае, если необходимо использовать систему для разглаживания поверхности в уровень горизонта.

Смоделируем систему и представим полученные результаты (3.10, 3.11):

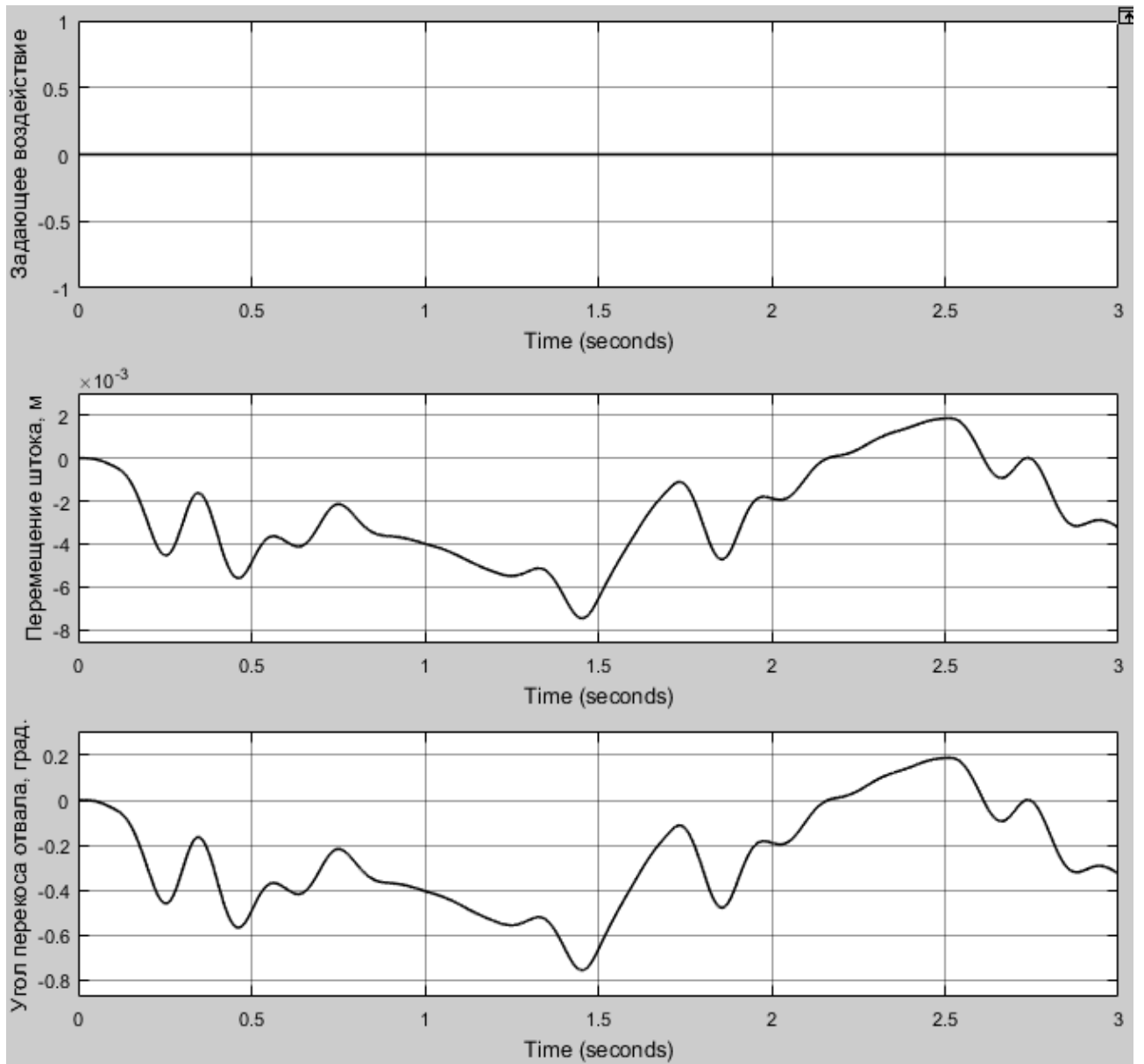


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования в Simulink

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

33

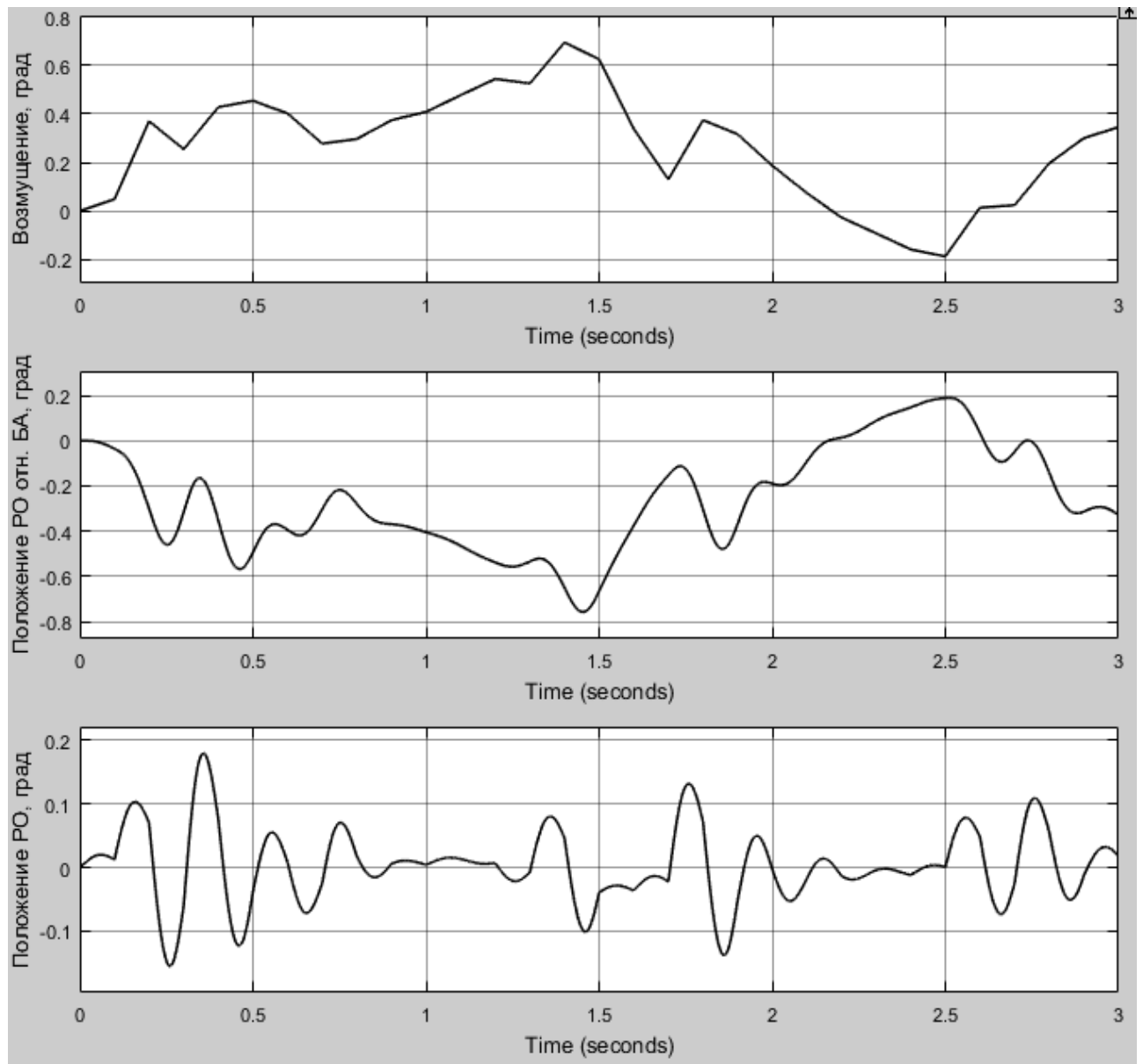


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования в Simulink

По представленным результатам видно, что отработка возмущающего воздействия производится с допустимой точностью. Максимальное отклонение от нулевого уровня составляет не более 0,2 градусов.

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

34



### 3.4 Разработка системы управления положением с нечетким регулятором

В основе данного метода нечеткой логики лежит понятие нечеткого множества и функции принадлежности некоторых элементов к такому множеству. Для упрощения понимания сложных систем вводят понятия лингвистической переменной, применяемой для описания поведения трудно определяемых систем. Это достигается за счет возможности принимать значения фраз естественного или искусственного языка. Вводятся процедуры фаззификации для перевода количественных данных в качественные понятия и процедура дефаззификации, выполняющая обратную функцию.

Преимуществом регулятора на основе нечёткой логики является то, что с помощью естественных языковых высказываний-правил «Если – то», с последующей их формализацией средствами теории нечётких множеств, можно сколь угодно точно отразить произвольную взаимосвязь «входы-выходы» без использования аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемых при построении управления. Это становится важным тогда, когда сложно по-другому описать процесс управления, а также при зависимости управляемого параметра от большого количества переменных.

Представим схему с нечетким регулятором (рис 3.12):

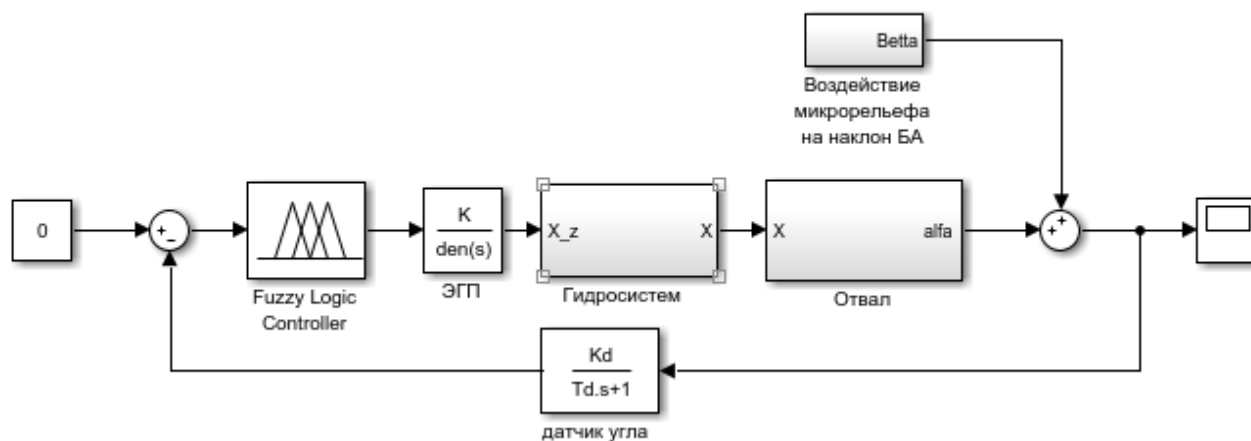


Рисунок 3.12 – Структурная схема системы управления положением рабочего органа с нечетким регулятором в Simulink

Нечеткий регулятор Simulink реализуется с помощью создания правил (рис 3.13):

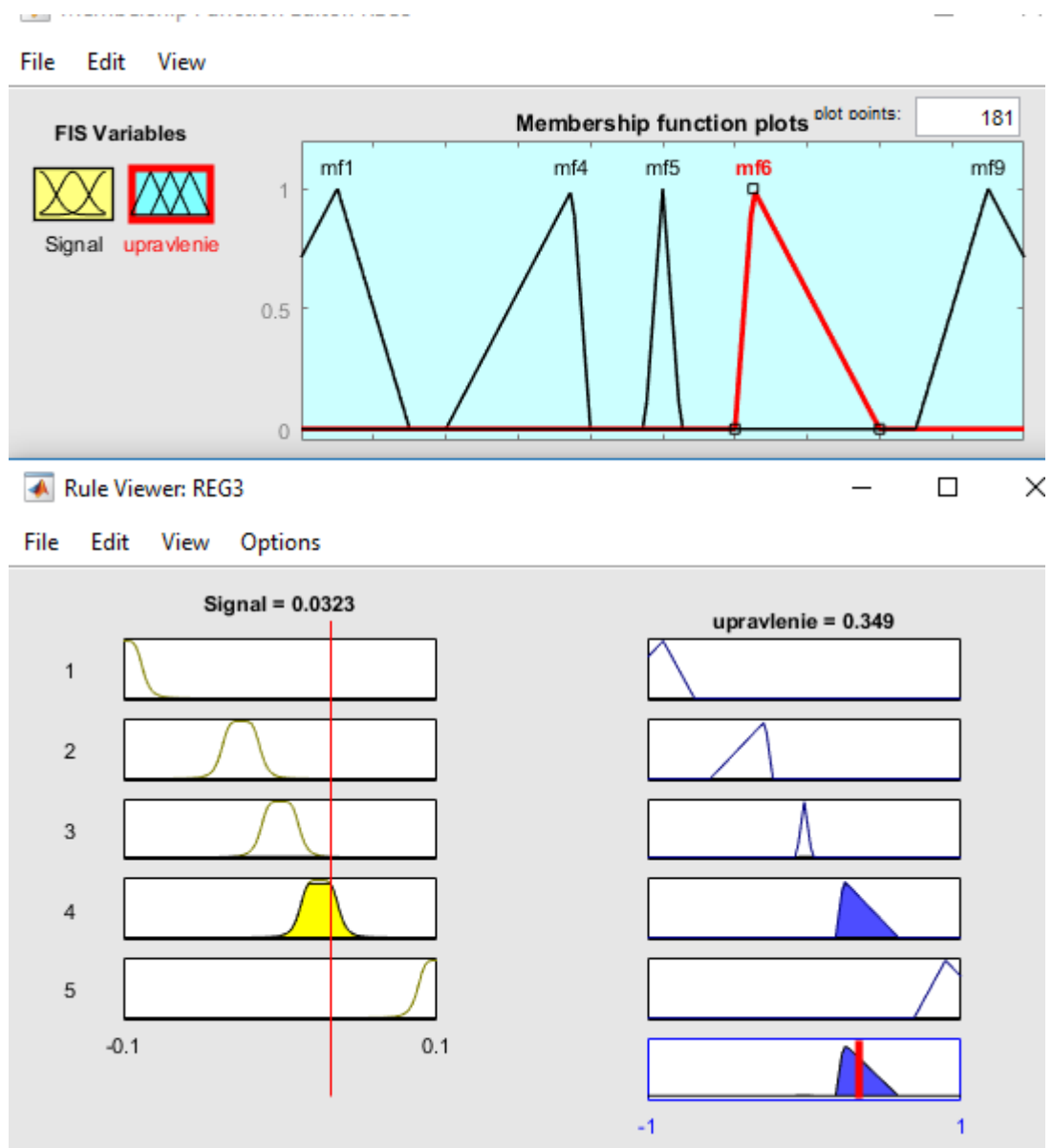


Рисунок 3.13 – Создание правил нечеткого регулятора в Simulink

Представим результаты моделирования с нечетким регулятором (рис 3.14, 3.15):

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

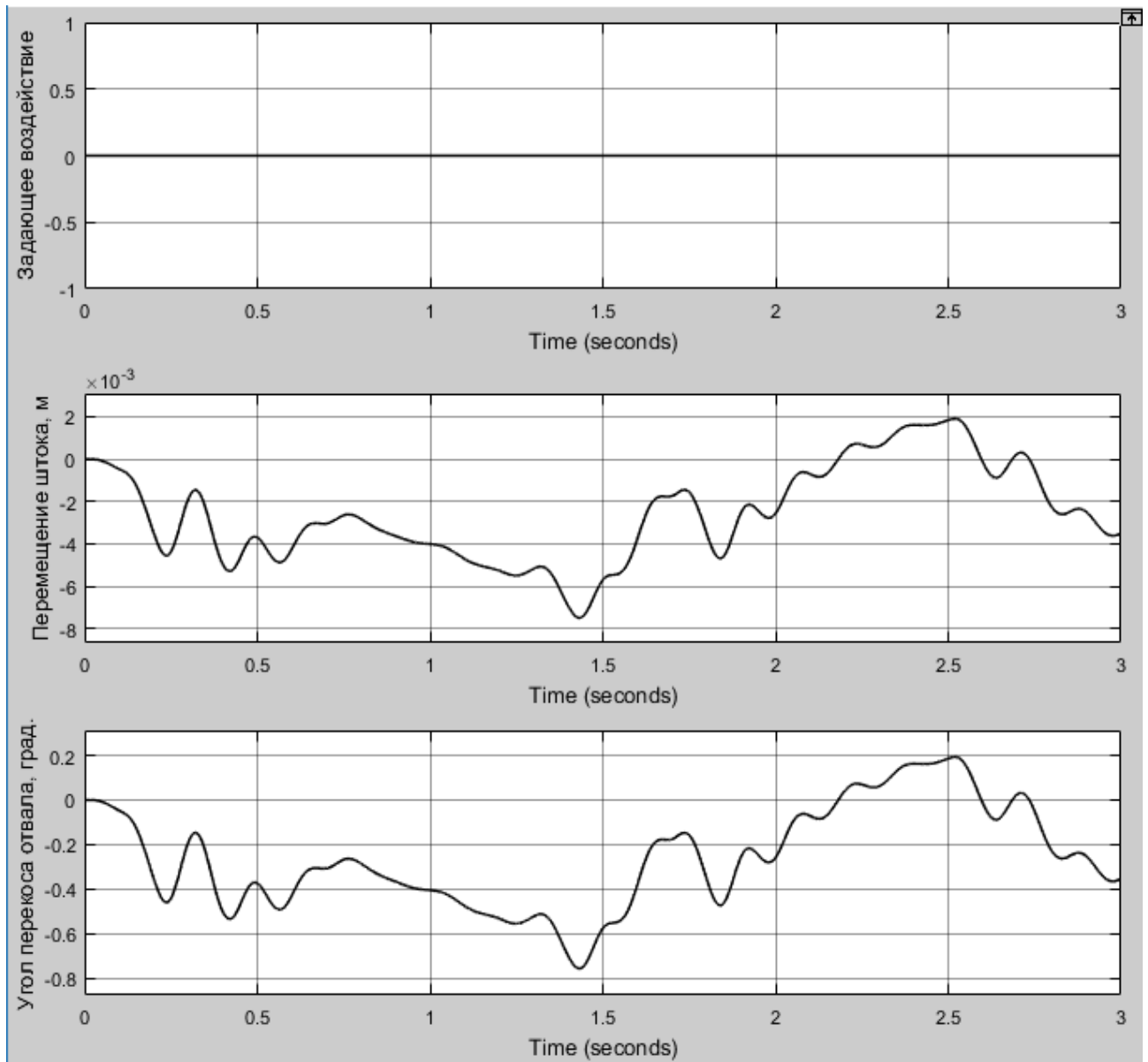


Рисунок 3.14 – Результаты моделирования в Simulink

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

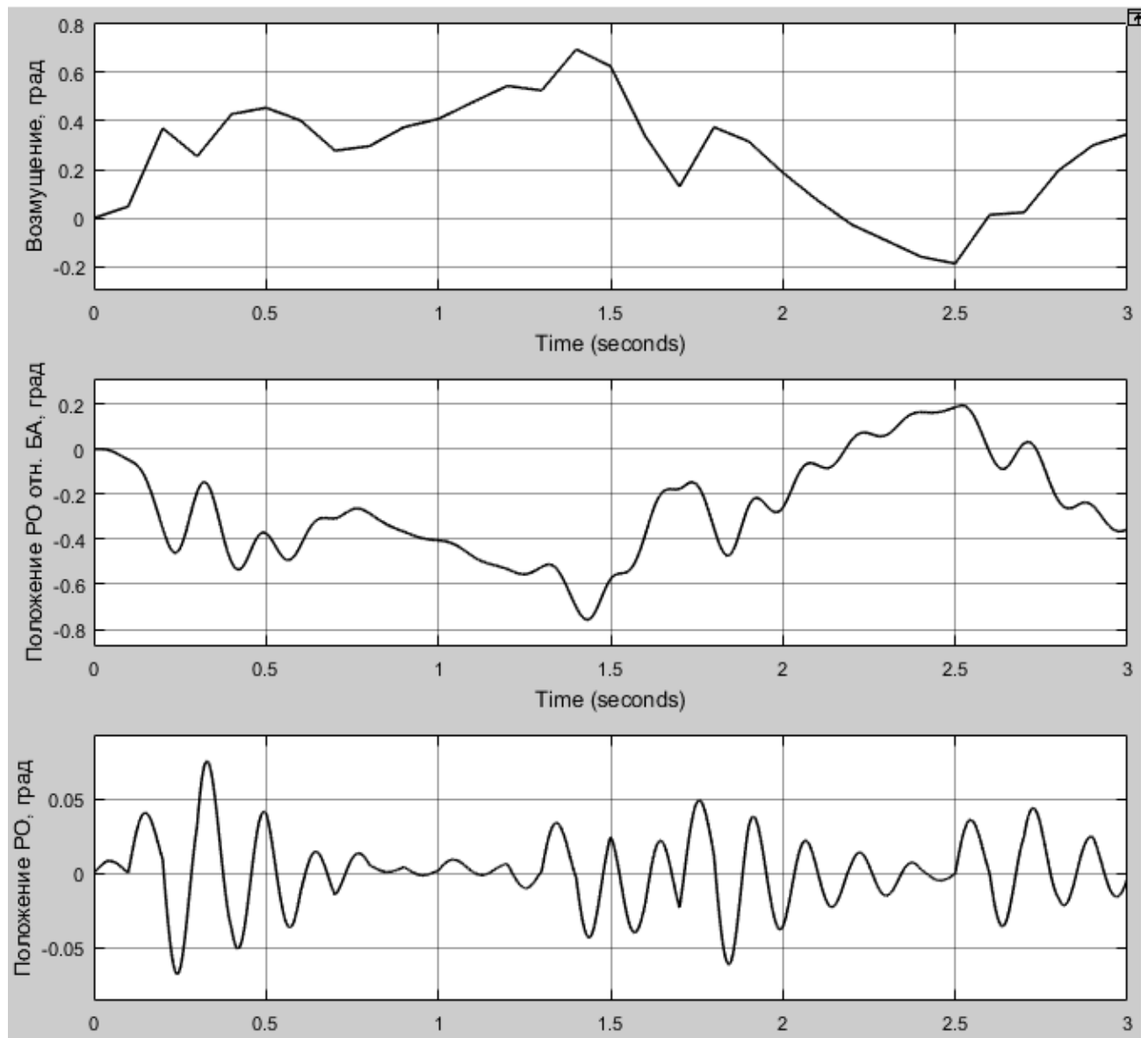


Рисунок 3.15 – Результаты моделирования в Simulink

По представленным результатам видно, что отработка возмущающего воздействия производится с допустимой точностью. Максимальное отклонение от нулевого уровня составляет не более 0,1 градусов.

Очевидно, что применение нечеткого регулятора повышает точность системы. Но для системы управления рабочим органом приемлемо применение как ПИ-регулятора, так и нечеткого регулятора.

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР

Лист

38

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель гидравлической системы, состоящей из силового гидроцилиндра и золотникового гидрораспределителя. Модель гидросистемы описана дифференциальными уравнениями с наложением ограничений по перемещению штока цилиндра и золотника кидрораспределителя.

2. Проведены моделирования работы гидросистемы, созданной с помощью уравнений, описывающих динамические процессы в системе, а также с использованием встроенных в математический пакет Simulink блоков, описывающих поведение элементов гидросистемы.

3. Разработана система стабилизации навесного оборудования под влиянием внешнего воздействия со стороны микрорельефа.

4. Произведено регулирование системы с использованием ПИ-регулятора и отработка влияние возмущающего воздействия. ПИ-регулятор показал себя пригодным для использования не превысив отклонения от заданного положение более чем на 0.2 градуса, что является допустимым для предназначенных работ системы.

5. Произведено регулирование системы с использованием нечеткого регулятора и отработка влияние возмущающего воздействия. Система улучшила показатели точности по сравнению с ПИ-регулятором, не превысив отклонение более чем на 0.1 градус от заданного.

6. Из полученных результатов можно сделать вывод, что использования систем стабилизации на бульдозерный агрегат является возможным и вполне осуществимым.

7. Представленная в работе система стабилизирует навесное оборудование только в плоскости перекоса. Для создания полноценной системы профилирования местности необходимо учесть положение навесного оборудования по высоте, а также возможность применения более точных измерительных приборов и датчиков.

Для рабочей системы не только стабилизации навесного оборудования, но и в целом системы профилирования местности необходимо применение большего количества датчиков на бульдозерном агрегате, применение датчиков давления в полостях гидроцилиндра, для исключения возмущающей силы со стороны срезаемого грунта. Использование систем GPS/ГЛОНАСС и лазерных излучателей и приемников для более точного позиционирования рабочего оборудования и формирования таким образом наиболее «гладкого» земляного полотна.

Разработка систем управления положения рабочего оборудования – это перспективное направление в промышленности, на которую уже имеется спрос на рынке, что, в свою очередь, означает необходимость развивать данную тему дальше

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             | 39   |

за пределы дипломной работы. Вопросы, связанные с созданием полноценной системы требуют большое количество времени, интеллектуального ресурса и доступа к экспериментальным данным с возможностью создания базового прототипа системы для его последующего совершенствования и доведения до реально применимой системы профилирования местности.

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 40   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bonchis A., Corke P.I., Rye D.C. Experimental evaluation of position control methods for hydraulic systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, vol. 10, no. 6, pp. 876–882. doi: 10.1109/TCST.2002.804128
2. Guan C., Pan S. Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters. Control Engineering Practice, 2008, vol. 16, no. 11, pp. 1275–1284. doi: 10.1016/j.conengprac.2008.02.002
3. Komsta J., van Oijen N., Antoszkiewicz P. Integral sliding mode compensator for load pressure control of die-cushion cylinder drive. Control Engineering Practice, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 708–718. doi: 10.1016/j.conengprac.2011.12.006
4. Sohl G.A., Bobrow J.E. Experiments and simulations on the nonlinear control of a hydraulic servosystem. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, vol. 7, no. 2, pp. 238–247. doi: 10.1109/87.748150
5. Абрамов Е.И. Элементы гидропривода: справочник / Абрамов Е.И., Колесниченко К.А., Маслов В.Т., Киев: Техника, 1977. – 320 с.
6. Александров Ю.В. Основы автоматики и автоматизации процессов в дорожном строительстве: учеб. пособие / Ю.В. Александров. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1974. – Ч. 1. – 231 с.
7. Алексеева, Т.В. Дорожные машины. Ч.1. Машины для земляных работ. – 3-е изд., перераб. и доп./ Т.В. Алексеева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг и др. – М.: Машиностроение, 1972.– 504с.
8. Арановский С.В., Лосенков А.А., Васкез К. Система слежения для промышленного гидропривода с компенсатором давления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 615–622.
9. Беляев, В.В. Основы оптимизационного синтеза при проектировании землеройно-транспортных машин. – 2-е изд., доп. и перераб. / В.В. Беляев. – Омск: – Изд-во ОТИИ, 2006. – 143 с 15
10. Долбенков В.И. Simulink в задачах систем автоматического управления: учеб. пособие / В.И. Долбенков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Юж.-Урал. гос. ун-т, каф. "Системы упр.". – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 224 с.
11. Дорожные машины. Часть I. Машины для земляных работ / Т.В. Алексеева [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972 . 504 с. 1
12. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к понятию приближённых решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
13. Лазута И.В. Система автоматической стабилизации рабочего органа

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             | 41   |

бульдозера / И.В. Лазута. – С. 176 – 178 // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Омск: СибАДИ, 2007. – Вып.4, ч. 1: Общие и комплексные проблемы технических и прикладных наук. – 338с.

14. Наумов, Е.С. Рабочее оборудование тракторов: учебное пособие для студентов специальности 150100 "Автомобиле- и тракторостроение"/ Е.С. Наумов, В.М. Шарипов, И.М. Эглит. – М.: МАМИ, 1999. – 89 с.

15. Система нивелирования Caterpillar. – [https://www.cat.com/ru\\_RU/articles/dozer-d6k2.html](https://www.cat.com/ru_RU/articles/dozer-d6k2.html) 4

16. Система нивелирования Trimble. – [http://www.geoprofi.ru/news/News\\_3550\\_86.aspx](http://www.geoprofi.ru/news/News_3550_86.aspx) 5

17. СНиП 3.06.03 – 85: Автомобильные дорожно-строительные машины. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 89с.

18. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений /под общ. ред. В. Г. Потемкина. - М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 259 с.

19. Ш 522 Шестопалов, К.К. Машины для земляных работ: учеб. пособие / К.К.Шестопалов; МАДИ – М., 2011. – 145 с.

20. Шестопалов, К.К. Строительные и дорожные машины / К.К. Шестопалов. – М. : ИЦ Академия, 2008. – 384 с. 3

21. Щербаков В.С. Щ 61 Автоматизация проектирования основных параметров устройства управления рабочим органом бульдозерного агрегата: монография / В.С. Щербаков, И.В. Лазута, Е.Ф. Денисова. – Омск: СибАДИ, 2012. – 128 с. 14

22. Щербаков, В.С. Анализ алгоритмов управления рабочим органом технологической машины / В.С. Щербаков, М.А. Гольчанский, В.В. Титенко // Труды. – Омск: СибАДИ, 2002. – Вып. 4, ч. 4: Дорожные и строительные машины (исследования, испытания и расчёт). – 345 с. 16

23. Щербаков, В.С. Анализ алгоритмов управления рабочим органом технологической машины / В.С. Щербаков, М.А. Гольчанский, В.В. Титенко // Труды. – Омск: СибАДИ, 2002. – Вып. 4, ч. 4: Дорожные и строительные машины (исследования, испытания и расчёт). – 345 с.

24. Щербаков, В.С. Составление структурных схем землеройно-транспортных машин как объектов автоматизации: учебное пособие / В.С. Щербаков. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – 47 с.

|      |      |          |         |      |                             |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | 24.05.06.2018.283.00 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |          |         |      |                             | 42   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                             |      |