

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Кафедра «Проектирование и управление в технических системах»**

**Методические рекомендации для  
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

**Основы автоматического управления механизмами мобильных энергетических  
систем**

**Направление подготовки (специальность)** 27.03.04 Управление в технических системах

**Профиль образовательной программы** «Системы и средства автоматизации технологических процессов»

**Форма обучения** очная

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций</b> .....	3
<b>1.1 Лекция № 1</b> Общие сведения. Измерение действительной скорости. Догрузка ведущих колёс.....	3
<b>1.2 Лекция № 2</b> Задачи автоматического управления самоходными машинами. Методы ориентации движущихся объектов .....	13
<b>1.3 Лекция № 3</b> Технические требования к системам автоматического управления самоходными машинами .....	17
<b>1.4 Лекция № 4</b> Рекомендации по применению элементов систем автоматического управления самоходными машинами .....	27
<b>1.5 Лекция № 5</b> Общие сведения. Требования. Классификация. Виды контроля .....	46
<b>1.6 Лекция № 6</b> САК уборочных машин .....	50
<b>1.7 Лекция № 7</b> Методы регулирования. Система регулирования движения рабочих органов в продольно-вертикальной плоскости .....	67
<b>1.8 Лекция № 8</b> Системы регулирования загрузки рабочих органов и двигателей .....	86
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ</b> .....	99
<b>2.1 Лабораторная работа № ЛР-1</b> Включение переднего ведущего моста. Переключение передач. Автоматическое управление направлением движения трактора .....	99
<b>2.2 Лабораторная работа № ЛР-2</b> Гусеничная машина как объект управления.....	110
<b>2.3 Лабораторная работа № ЛР-3</b> Колёсная машина как объект управления.....	115
<b>2.4 Лабораторная работа № ЛР-4</b> Исследование динамики колёсной машины и выбор оптимального закона управления на электронной модели.....	126
<b>2.5 Лабораторная работа № ЛР-5</b> САК почвообрабатывающих машин .....	138
<b>2.6 Лабораторная работа № ЛР-6</b> САК посевных машин .....	148
<b>2.7 Лабораторная работа № ЛР-7</b> Системы автоматического прореживания и обработки растений.....	154
<b>2.8 Лабораторная работа № ЛР-8</b> САР загрузки льноуборочных и других машин .....	161
<b>3. Методические указания по проведению практических занятий</b> .....	165
<b>3.1 Практическое занятие № ПЗ-1</b> Комплексная автоматизация МТА.....	165
<b>3.2 Практическое занятие № ПЗ-2</b> Системы дистанционного управления.....	165
<b>3.3 Практическое занятие № ПЗ-3</b> Аппаратура для автоматического вождения гусеничных и колёсных машин.....	165
<b>3.4 Практическое занятие № ПЗ-4</b> Аппаратура для автоматического вождения гусеничных и колёсных машин.....	165
<b>3.5 Практическое занятие № ПЗ-5</b> Следящие устройства в приводах.....	166
<b>3.6 Практическое занятие № ПЗ-6</b> Классификация систем автоматического Вождения.....	166
<b>3.7 Практическое занятие № ПЗ-7</b> Контроль и аварийная защита. Некоторые специфические задачи управления тракторами.....	166

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1. 1 Лекция № 1 (2 часа).

**Тема:** «Общие сведения. Измерение действительной скорости. Догрузка ведущих колёс»

### 1.1.1 Вопросы лекции:

1. Общие сведения.
2. Радарные датчики измерения.
3. Высотное регулирование. Силовое регулирование. Позиционное регулирование.

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов:

- 1 Общие сведения.

Современные тракторы представляют собой достаточно сложные и дорогие машины, которые используются в различных отраслях производства на ответственных операциях. Поэтому в эффективном использовании тракторов в равной степени заинтересованы как пользователи, так и производители. Для последних обеспечение такого использования является признаком высокой конкурентоспособности, позволяющей не только удерживать, но и укреплять свои позиции на рынке.

Однако практика показывает, что в реальной эксплуатации наблюдается разрыв между возможностями, которые заложены в конструкции тракторов, например, по мощности двигателя, и реальными результатами, в частности, в виде производительности. Особенно заметен такой разрыв в сельскохозяйственном производстве, где тракторы являются основной энергетической базой растениеводства. Это видно по такому показателю, как степень использования мощности двигателя, которая для тракторов разных тяговых классов на различных операциях составляет от 40 до 88 %.

Такие же разрывы имеют место и по таким показателям, как расход топлива, трудоёмкость ремонта и обслуживания, условия труда. Причины этого разрыва достаточно разнообразны. Часть из них связана с недостатками самой конструкции трактора того или иного свойства. Следующая часть происходит от несовершенной организации работ, в которых используются тракторы. Наконец, очень существенными являются причины, связанные с наличием так называемого «человеческого фактора», т.е. с тем, что тракторы управляются людьми со свойственными им недостатками, проявляющимися в недостаточном качестве управления.

В свою очередь, недостаточное качество управления может объясняться двумя причинами. Первая связана с недостаточной квалификацией водителя (тракториста) или с недостаточно подробной инструкцией по эксплуатации. Такая причина легко устранима, и многие производители уделяют ей серьёзное внимание.

Другая причина носит более сложный характер. Она связана с тем, что управление как вид деятельности человека опирается на наличие информации об условиях, в которых выполняется работа, и о характере её выполнения. И то, и другое изменяются в широких пределах, в результате чего водитель получает эту информацию в виде потока, имеющего вполне определённую интенсивность. И здесь оказывается, что чаще всего интенсивность информационного потока не совпадает с возможностями человека, в результате чего возникает информационный дисбаланс (дискомфорт), затрудняющий человеку управление, которое должно наилучшим образом соответствовать изменяющимся условиям работы.

Информационный дисбаланс может иметь два вида. В одном случае поток информации недостаточен, и человек не получает её в таком объёме, который необходим для адекватного реагирования на изменение условий и результатов работы. Понятно, что в этом случае управление будет существенно отличаться от оптимального. Такая ситуация возникает, например, в задаче стыковки смежных проходов широкозахватного агрегата или при попытке «на слух» оценивать нагрузку двигателя трактора по крутящему моменту.

В другом случае поток информации настолько интенсивен, что человек просто не успевает отвечать на неё адекватной психомоторной реакцией (или слишком быстро устаёт от такой работы). Примером такой ситуации является междурядная обработка пропашных культур, при которой водитель просто физически не может долго работать на скорости выше 7 – 8 км/ч., хотя агротехнический предел этой операции может достигать и до 12 км/ч. Неоптимальное управление и приводит к тому, что появляются потери и перерасходы, снижающие эффективность использования трактора. Для повышения качества управления вплоть до оптимального необходимо в первую очередь стремиться к существенному снижению, а ещё лучше – к полному устранению информационного дисбаланса. Наиболее действенным средством здесь является применение средств автоматизации.

Под автоматизацией принято понимать выполнение всех или части управленческих операций с помощью аппаратных (инструментальных) средств. Для понимания такого определения придётся рассмотреть состав этих операций. Прежде всего человек посредством своих органов чувств воспринимает первичную информацию. Затем она преобразуется в сигналы, характеризующие протекание реального процесса. Далее происходят логические операции, позволяющие оценить текущую ситуацию и выявить необходимость принятия соответствующих решений. Эти решения принимаются и в конечном итоге исполняются в виде управляющих воздействий, которые прикладываются к органам управления объектом. Наконец, происходит оценка результата управления по изменению состояния объекта в виде той же самой первичной информации (обратная связь).

Все или часть этих операций могут выполняться аппаратными средствами. В первом случае управление принято называть автоматическим. В остальных случаях, когда приложение управляющих воздействий (и, возможно, часть предшествующих операций) осуществляется непосредственно человеком, управление называют автоматизированным. В таких случаях аппаратные средства в первую очередь воспринимают первичную информацию и выполняют с ней те действия, от которых освобождён человек. Понятно, что при таком управлении информационный дисбаланс может быть существенно снижен и даже полностью устранён. При недостаточности информации, воспринимаемой органами чувств человека, аппаратные средства могут снабдить его дополнительной информацией, которая позволит ему более точно управлять объектом или процессом. При избыточности информации аппаратные средства могут взять на себя выполнение определённых функций, вплоть до автоматического управления отдельными процессами или механизмами, благодаря чему человек может более легко справляться с остальными функциями.

В составе автоматизированного управления объектом или процессом стоит особо отметить функцию контроля. Она заключается в том, что с помощью аппаратных средств человеку (в нашем случае – водителю) сообщается информация о текущих значениях некоторых физических величин, характеризующих ход процесса или состояние объекта. При этом такая информация может подвергаться некоторой обработке, например, сравниваться с заданными значениями.

Приведение интенсивности потока информации в соответствие с возможностями человека, т.е. уменьшение или полная ликвидация информационного дисбаланса, позволяет ожидать, что при соответствующей квалификации водителя и при ожидаемом действии средств автоматизации будет обеспечено такое управление машинно-тракторным агрегатом, которое в данных условиях работы даст наилучшие результаты с точки зрения всех или некоторых качеств, по которым оценивается эффективность его использования. В их числе:

1. Производительность как объём выполняемой работы за единицу времени (час, смена, сезон) или как количество продукта на единицу ресурса (например, урожай на единицу земельной площади). Во втором случае производительность проявляется также и как следствие качества выполнения работы.

2. Экономичность как количество израсходованных ресурсов (горюче-смазочные и другие эксплуатационные материалы, семена, химикаты, запасные части и материалы для обслуживания и ремонта) на единицу работы или количество продукта. Здесь также может просматриваться связь с качеством работы.

3. Экологичность как уровень вредных воздействий на окружающую среду (почва, атмосфера, грунтовые воды, урожай).

4. Комфорт и безопасность труда персонала.

Исходя из этого, можно определить цели автоматизации МТА как стремление максимально уменьшить потери и перерасходы, вызванные информационным дисбалансом, за счёт применения соответствующих аппаратных средств, уменьшающих или совсем ликвидирующих этот дисбаланс.

Отсюда задачи автоматизации могут быть сформулированы как выявление причин информационного дисбаланса и его влияния на результаты работы МТА, определение возможности и целесообразности снижения или ликвидации этого дисбаланса и изыскание необходимых для этого аппаратных (инструментальных) средств.

Следует подчеркнуть, что для подавляющего большинства областей применения МТА задача полной автоматизации, т.е. обеспечение работы МТА без человека-водителя на борту, не ставится. Современные технические средства принципиально такую возможность не исключают, однако организационные трудности пока оставляют под вопросом эффективность использования МТА-роботов в обычных производственных условиях. Речь может идти только об особых случаях, в которых главным фактором является безопасность персонала.

Теоретические основы автоматизации МТА базируются на двух видах источников. Первый относится к общим положениям автоматического управления и регулирования и состоит из обширного списка пособий и монографий этого раздела науки и техники, например, [1] и [2]. Второй непосредственно относится к данному конкретному направлению, и здесь наиболее полным и близким к современным представлениям является [3].

2. Радарные датчики измерения.

Аппаратные средства автоматического контроля и управления предназначены для выполнения необходимых функций в соответствии с теми задачами, которые должны быть решены в каждом конкретном случае.

При этом выполняемые функции имеют достаточно общий характер, что позволяет разделить аппаратные средства на ряд специфических групп.

Характер этих групп, в свою очередь, определяется действиями в составе управленческой деятельности, описанной в предыдущем разделе. Необходимо принять во внимание, что правильный выбор аппаратных средств по существу является желаемым результатом разработки той или иной системы автоматического контроля или управления. Он достигается в итоге специальных опытно-конструкторских работ, которые чаще всего требуют предварительного проведения работ научно-исследовательского характера. Следует сразу же отметить, что современные аппаратные средства

автоматического контроля и управления на тракторах по способам действия

и по устройству основаны на преимущественном использовании современных достижений электроники, а точнее – микроэлектроники. В отдельных случаях применяются и чисто механические, и гидромеханические, и чисто гидравлические средства, однако это не более чем частные случаи, и в некоторых из них существуют чёткие тенденции замены на средства электронные. Примерами таких тенденций могут служить регуляторы подачи топлива дизельных двигателей и системы регулирования положения навесных устройств (подробнее эти объекты будут рассмотрены дальше). Микроэлектронные средства привлекательны по целому ряду свойств.

Прежде всего, как следует из самого термина, устройства на их основе имеют достаточно малые габариты и массу. При этом, особенно в последнее время, их

возможности по приёму и обработке информации лавинообразно возрастают, что позволяет осуществлять сколь угодно сложные алгоритмы автоматического контроля и управления. Они обладают низким энергопотреблением и высокой надёжностью. Наконец, их стоимость постоянно и существенно снижается благодаря бурному развитию микроэлектронных технологий.

Микроэлектронные средства могут работать с информацией, которую несут величины электрических напряжений в разных точках электрической схемы. Эти напряжения подвергаются таким операциям, как арифметические, интегрирование или дифференцирование, логические соотношения, ограничения и т.д. Схемы, работающие по такому принципу, называются аналоговыми. С их помощью могут быть решены простейшие задачи контроля или управления.

Другой вид схем работает с информацией в виде напряжений или токов, которая сразу же после входа в схему преобразуется в форму цифрового сигнала с помощью так называемых аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). Такие схемы называют цифровыми, и с их помощью можно решать несколько более сложные задачи. Для каждой задачи такая схема (как и аналоговая) проектируется специально.

Однако преимущества микроэлектроники особенно значимы при использовании таких средств, как микропроцессоры, особенно в форме однокристальных микро-ЭВМ (так называют большие и сверхбольшие интегральные схемы, которые содержат микропроцессор и некоторые периферийные устройства типа таймеров, ОЗУ, ПЗУ и т.д.). В этом случае серьёзно упрощается проектирование управляющих логических устройств (их принято называть микропроцессорными контроллерами), которые имеют стандартизированные и типизированные схемы, отличающиеся для каждой задачи только характером и средствами сопряжения с объектом (интерфейс) и выполняемой программой.

В рамках данной дисциплины вопросы устройства и подробностей работы электронных устройств не рассматриваются. Здесь будет рассматриваться только номенклатура аппаратных средств автоматического контроля и управления, и такие особенности некоторых из них, которые в сводном виде в других источниках не описаны.

Описание этих средств логично начать с тех, которые используются для приёма и преобразования первичной информации. Она состоит из физических величин, отражающих состояние объекта, а также режимы и качественные показатели его работы. Для использования этой информации в системах контроля или управления она должна быть преобразована в электрические сигналы, передаваемые по проводным линиям связи.

Эти функции выполняют устройства, называемые датчиками (в некоторых источниках – первичными измерительными преобразователями). Общие сведения о датчиках приведены в указанном выше источнике. Здесь стоит только перечислить основные физические величины, которые могут измеряться в целях контроля или управления, и дать некоторые общие сведения о принципах измерения этих величин.

Давления жидкостей или газов измеряются достаточно легко и являются довольно ценной информацией. С этой точки зрения величины давлений масла в системе смазки двигателя или в гидравлической системе трансмиссии свидетельствуют об отсутствии или наличии нарушений в работе этих систем. Достаточное давление воздуха в пневмосистеме трактора позволяет начать движение с колёсным прицепом. Можно контролировать давление воздуха на выходе системы турбонадува и давление топлива в промежуточных линиях системы питания. В то же время вряд ли целесообразен контроль давления в гидросистеме навесного устройства или в гидроусилителе рулевого управления.

Датчики давления в основном устроены на основе мембран, перемещение которых передаётся на подвижную часть (ползун) переменного сопротивления. В перспективных конструкциях датчиков предполагается

применение кремниевых мембран с тонкоплёночными полупроводниковыми тензопреобразователями. Для порогового измерения при совместной работе с сигнализаторами мембраны связываются с контактами (нормально разомкнутыми или нормально замкнутыми).

Температуры жидкостей, газов или деталей трактора также довольно информативны в целях контроля. С одной стороны по ним определяется готовность к работе – достаточность прогрева двигателя и других узлов и систем. С другой стороны чрезмерное повышение какой-либо температуры является признаком либо отказа, либо чрезмерно тяжёлых режимов работы.

В датчиках температуры используются биметаллические элементы, деформация которых от нагрева передаётся на ползун переменного сопротивления или на контакт (для сигнализатора). Более современные конструкции представляют собой термосопротивления или специальные термочувствительные микросхемы.

Уровни масел, топлива или охлаждающей жидкости также контролируются с двух точек зрения. Положение уровня жидкостей во всех ёмкостях (картеры, баки, радиатор) указывает на потребность в дозаправке или её отсутствие. Динамика снижения уровня, особенно в безрасходных ёмкостях, является косвенным признаком состояния того или иного узла (износ, потеря герметичности).

Как правило, контроль уровня возможен только до начала работы (запуска двигателя, начала движения). Во время работы в большинстве ёмкостей контролировать уровень жидкости невозможно.

Датчики уровня в основном устроены с использованием поплавков, перемещение которых воздействует на ползуны переменных сопротивлений или на контакты. Однако имеются разработки и на основе других физических признаков – изменение диэлектрической постоянной между пластинами конденсатора, изменение теплового баланса термоэлектрического моста и т.д.

Перепады давлений несут информацию о состоянии таких элементов, как фильтры различных систем. Если фильтр собрал некоторое количество грязи, его сопротивление потоку жидкости или воздуха возрастает, и это вызывает рост перепада давлений между входом и выходом фильтра (у воздухоочистителей растёт разрежение). Понятно, что этот эффект проявляется только во время работы на режимах, когда потоки жидкостей или газов возрастают до расчётных значений (жидкости прогреты в достаточной степени и их вязкость не превышает расчётного предела).

Контроль перепадов давления в принципе возможен с помощью дифференциальных датчиков, сравнивающих давления на входе и на выходе контролируемого элемента и устроенных аналогично датчикам давления. Однако в практике на тракторах (и автомобилях) такие датчики не используются. Состояние фильтров может контролироваться с помощью обычных датчиков давления в том случае, если фильтр установлен на сливе в бак или картер и на его выходе давление равно атмосферному.

Контроль по перепаду давлений пригоден только для пассивных фильтров с фильтрующими элементами. Активные фильтры типа циклонов и центрифуг требуют других приёмов контроля.

Частоты вращения зависят только от режимов работы, однако в некоторых случаях могут характеризовать и техническое состояние. Так, если частота вращения вала двигателя резко снижается даже при незначительной нагрузке, можно считать, что по каким-то причинам существенно снизилась мощность двигателя.

На тракторах, кроме упомянутой частоты вращения вала двигателя, можно контролировать частоту вращения какого-то вала трансмиссии, жёстко связанного с ведущими колёсами. Она (с учётом расчётного радиуса ведущих колёс) характеризует теоретическую (без учёта буксования) скорость трактора. Частота вращения независимого вала отбора мощности (ВОМ) контролируется тогда, когда он может иметь разные режимы включения (на современном тракторе их может

быть до четырёх – нормальные с номинальными частотами 540 и 1000 об/мин и экономические с номинальными частотами 750 и 1500 об/мин). Правда, и в таком случае вместо частоты вращения ВОМ может контролироваться только положение органов включения, так как частота вращения независимого ВОМ пропорциональна частоте вращения вала двигателя, и режим включения определяет пропорцию между ними.

Датчики частоты вращения могут быть двух видов. Аналоговые датчики в основном устроены в виде генераторов напряжения, пропорционального частоте вращения. Импульсные датчики выдают импульсы с частотой, пропорциональной частоте вращения. При этом формирование импульсов может происходить на различной физической основе – электромагнитная индукция, эффект Холла, фотоэлектрические эффекты.

Взаимные перемещения деталей в основном измеряются в качестве косвенных оценок других физических величин. В частности, угол поворота верхнего вала навесного устройства относительно остова трактора измеряют для оценки положения навесного орудия. Перемещение рейки топливного насоса относительно его корпуса измеряют для оценки так называемой относительной загрузки двигателя (эта необходимость более подробно будет рассмотрена ниже).

Датчики взаимного перемещения в основном бывают двух видов. В одном взаимное перемещение приводит к смещению ползуна переменного сопротивления. В другом используются индукционные эффекты типа взаимодействия подвижного якоря из ферромагнитного материала с обмотками, через которые пропускается переменный ток.

Усилия, действующие на детали, как правило, оцениваются по деформациям этих деталей. Так, например, измеряют горизонтальную составляющую тягового сопротивления орудия для регулирования положения навесного устройства (подробнее этот вопрос также будет рассмотрен ниже). Теоретически таким способом, по закрутке какого-либо вала, можно измерить величину крутящего момента.

Деформации измеряют аналогично взаимным перемещениям. Однако вследствие малости этих перемещений используют в основном высокочувствительные датчики индуктивного типа. Принципиально возможно использование и прямых эффектов преобразования усилия, действующего на деталь, в электрический сигнал – пьезоэффект или эффект магнитострикции.

Разумеется, этот список не является исчерпывающим. В некоторых случаях эти величины измеряются для того, чтобы по их текущим значениям оценить значения других физических величин, важных для контроля или управления, но трудных для прямого измерения (примеры таких случаев приведены выше). Иной раз для измерения некоторых величин используются специальные устройства или особые подсистемы. Более подробно эти случаи будут рассмотрены ниже. Здесь остановимся только на двух специфических величинах.

Крутящий момент нагрузки на двигатель является одним из главных параметров, определяющих режим работы трактора. Однако, несмотря на существование устройств для измерения этой величины по закрутке передающего её вала, особенности конструкции силовых передач трактора затрудняют возможность применения таких устройств. Поэтому прибегают к косвенной оценке этой величины с помощью различных способов, причём в основном ведётся относительное измерение, при котором оценивается отношение текущей величины момента нагрузки к её номинальному значению.

Наиболее распространёнными являются оценки по положению рейки (муфты, грузов регулятора) топливного насоса. Считается, что когда наблюдается её контакт с упором корректора, нагрузка равна номинальной. Отход от упора соответствует уменьшению нагрузки, а сжатие пружины корректора – увеличению. Здесь возможны как прямые измерения с помощью датчиков положения, так и косвенные – по относительной длительности впрыска форсунки. Оно, в



свою очередь, может определяться по давлению в топливопроводе или по подъёму иглы форсунки.

Известны предложения оценивать нагрузку по температуре выхлопных газов, по давлению турбонаддува, по среднему значению задресселированного давления газов в цилиндре и другим величинам. Однако они не получили распространения из-за серьёзных недостатков.

Расход топлива также является одним из важных показателей режима работы. Так, его мгновенное значение с большой точностью пропорционально мгновенному значению мощности, развиваемой двигателем. Знание суммарного расхода за какой-то период позволяет оценить запас времени до очередной заправки и сопоставить количество израсходованного топлива с выполненной работой для оценки правильности выбранных режимов. Однако пока надёжных и точных средств измерения расхода топлива, пригодных для эксплуатационного использования, не существует. Средства, применяемые при испытаниях, для этого непригодны.

Тем не менее и здесь возможно применить косвенные приёмы. В частности, удовлетворительные результаты дают оценки суммарной длительности впрысков за некоторый интервал времени. Для этого могут использоваться указанные выше средства оценки относительной длительности.

Следующей важной группой аппаратных средств являются средства обработки полученной информации. Состав и особенности действия этих средств также описаны в указанном источнике. Здесь нужно только повторить, что в основном эти средства в современных системах выполняются в виде электронных блоков, которые в системах контроля работают совместно со средствами предъявления информации, а в системах управления – с исполнительными устройствами. При необходимости в состав этих средств входят пульты управления.

Более подробно рассмотрим исполнительные устройства, обязательные в составе систем автоматического управления. Они обеспечивают приложение к механизмам и узлам трактора управляющих воздействий в соответствии с решаемой задачей. Сами эти задачи в дальнейшем будут рассмотрены подробно, в том числе с особенностями устройства соответствующих систем, так что здесь остановимся на общих принципах действия исполнительных устройств.

Механизмы и узлы трактора, посредством которых обеспечивается обычное ручное управление, отличаются тем, что для их действия необходимо осуществлять значительные перемещения порядка нескольких сантиметров, преодолевая усилия порядка нескольких десятков или даже сотен ньютонов. В некоторых случаях существенно, чтобы эти действия происходили с минимальной задержкой и с достаточно высокой скоростью.

Отсюда следует, что исполнительные устройства автоматического управления должны в некоторых случаях обладать достаточно высокой мощностью на уровне до нескольких киловатт. При этом в ряде случаев приходится считаться с габаритными ограничениями, особенно при создании системы автоматического управления для ранее разработанной модели трактора.

Анализ возможных принципов создания исполнительных устройств целесообразно начать с анализа источников энергии, которая может быть использована для их действия при работе трактора.

Современные тракторы (за исключением некоторых малогабаритных моделей) оснащены системой электрооборудования постоянного тока с номинальным напряжением 12 или 24 Вольта. Однако при этом доступная мощность не превосходит нескольких сот ватт в импульсе и нескольких десятков ватт в режиме постоянного потребления (оно, как правило, свойственно электронным устройствам). В ряде случаев этот уровень является достаточным для использования устройств на базе электрических двигателей, непосредственно

воздействующих на тот или другой механизм или узел трактора через соответствующий редуктор.

Если же необходимое качество автоматического управления достигается при более высоком уровне мощности исполнительного устройства, приходится использовать электропривод только для приведения в действие более мощных гидравлических или пневматических устройств. В этом случае электропривод, как правило, имеет вид электромагнитного устройства, действующего на соответствующее гидравлическое или пневматическое устройство посредством элементов типа клапанов или золотниковых распределителей. Здесь потребная электрическая мощность не превышает нескольких десятков ватт.

Электромагнитные устройства могут работать в релейном или пропорциональном режимах. В первом случае могут быть только два состояния устройства – включено или выключено – и соответственно два состояния гидравлического или пневматического устройства. Во втором случае состояние электромагнитного устройства и сопряжённых с ним гидравлических или пневматических устройств определяется уровнем тока через обмотку электромагнита. Возможно также импульсное действие, при котором чередование двух состояний релейного режима имеет вид импульсов с изменяющимися частотой следования или шириной (или и тем, и другим вместе), благодаря чему сопряжённые устройства могут иметь различные состояния, как и в пропорциональном режиме.

Для приведения в действие гидравлических исполнительных устройств в современных тракторах могут использоваться штатные гидросистемы. Они в основном предназначены для обслуживания навесных систем (на многих моделях присутствуют также отдельные системы для обслуживания рулевого управления и других механизмов и систем трактора) и могут иметь мощность, достигающую до 15 - 20 кВт или более на мощных тракторах. Подключение исполнительных устройств автоматического управления к штатным гидросистемам является чисто конструктивной задачей, в которой принципиальных затруднений не имеется. При этом благодаря тому, что в современных гидросистемах тракторов развивается давление жидкости до 20 МПа, необходимые для воздействия на механизмы и узлы трактора усилия обеспечиваются приемлемыми габаритами исполнительных устройств. Кроме того, сочетание электрического управления и гидравлического исполнения легко обеспечивает достаточно высокое быстродействие, которое для некоторых случаев автоматического управления является гарантией требуемого качества.

В некоторых моделях тракторов имеются гидравлические системы с более низким уровнем давления. Как правило, они обслуживают механизмы тракторных трансмиссий типа мокрых многодисковых фрикционных муфт, сжатых давлением жидкости. Здесь можно рассчитывать на мощность не более 1 - 2 кВт, но в ряде случаев, особенно для автоматического управления узлами самой трансмиссии, этого достаточно.

Некоторым недостатком гидравлического исполнения является обязательность выполнения достаточно жёстких требований при конструировании, производстве и эксплуатации. Эти требования направлены на обеспечение необходимой надёжности и долговечности элементов гидравлических систем.

Гидравлическое исполнительное устройство состоит в основном из двух частей. Первая из них – это упомянутое сочетание электрического элемента типа электромагнита и элемента вида клапана или золотникового распределителя. Вторая – силовой орган в виде цилиндра для поступательного перемещения или гидромотора для вращательного перемещения. Эти части могут быть выполнены и как самостоятельные узлы, установленные на некотором удалении друг от друга, и как моноблочный узел.

Если исполнительное устройство предназначено для воздействия на узел трактора, в котором имеется гидравлический привод (гидроусилитель рулевого управления, навесная система, трансмиссия с гидроуправляемыми элементами),

появляется возможность использовать некоторые элементы этого привода (насос, силовой орган) для отработки управляющих воздействий системы автоматического управления. Кроме того, в последнее время всё чаще встречаются примеры использования для обычного ручного управления теми или иными механизмами трактора таких устройств, как электроуправляемые гидравлические распределители (особенно в механизмах трансмиссий). В этом случае автоматическое управление вообще не требует отдельных исполнительных устройств и осуществляется подачей электрических сигналов на эти распределители. Пневматические исполнительные устройства могут применяться на тракторах, оснащённых пневмосистемами (компрессор и ресивер со вспомогательными элементами). По действующим правилам такое оснащение обязательно, если предусмотрена работа трактора с колёсными прицепами, которые должны иметь пневматические тормоза. В основном это колёсные тракторы, начиная с некоторого уровня мощности (в отечественной практике это тракторы класса 0,9 и выше).

Структурно пневматические исполнительные устройства аналогичны гидравлическим – управляющий орган типа клапана или золотника с электромагнитом и силовой орган в виде цилиндра (здесь в отличие от гидравлических цилиндры могут быть не только поршневыми, но и мембранными, а вращательное перемещение практически не используется). Однако развиваемые усилия связаны с ограниченным давлением воздуха в системе – порядка 0,6 - 1 МПа. Кроме того, сжимаемость воздуха как рабочего тела несколько ограничивает быстроедействие такого привода.

Определённым преимуществом пневмопривода является его меньшая чувствительность к некоторым возможным повреждениям. Так, небольшая негерметичность не прекращает работу такого привода, хотя может несколько ухудшить её качество.

Характер действия исполнительных устройств зависит от того, на какой механизм или узел трактора они установлены для автоматического управления. Если этот механизм или узел управляются положением некоторого элемента, которое может быть любым между крайними состояниями, на выходе исполнительного устройства также должна обеспечиваться возможность остановки в любом промежуточном положении. Если этот элемент должен иметь несколько фиксированных позиций (и, соответственно, шагов между ними), исполнительное устройство должно быть шаговым, обеспечивающим точное попадание этого элемента в нужные позиции. Наконец, этот элемент может быть двухпозиционным («включено» – «выключено»), что требует от исполнительного элемента только обеспечения этих позиций.

Описание аппаратных средств можно завершить упоминанием о кабельных линиях связи между блоками систем. В отличие от обычной электрической проводки здесь в ряде случаев (в линиях связи датчиков с электронными блоками) приходится считаться с тем, что передаваемые в виде напряжений или токов сигналы имеют довольно малую величину порядка милливольт или миллиампер. В этом случае внешние электромагнитные поля способны навести в этих линиях помехи с амплитудными значениями, существенно превышающими уровни полезных сигналов. Для устранения этих помех такие кабели изготавливают из экранированных проводов с заземлением.

### 3. Высотное регулирование. Силовое регулирование. Позиционное регулирование.

Эффект догрузки ведущих колес трактора положительно проявился уже при ручной настройке, которую начали использовать вместе с применением на тракторе навесной системы, и значительно повысился после применения регулирования реакций под колесами трактора и сельскохозяйственной машины. По данным всесоюзного научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства (ВИМ), применение автоматического регулирования догрузки ведущих колес с помощью гидравлического навесного устройства снижает их буксование и повышает производительность МТА примерно на 13 % по сравнению с ручным догрузателем.

Следует отметить, что на буксование движителей и показатели работы МТА влияют так же способы регулирования глубины обработки почвы,

1. Эксплуатационно-технологические показатели трактора при различном способе регулирования глубины.

Способ регулирования	Давление подпора, МПа	Рабочая скорость, км/ч	Коэффициент буксования, %	Тяговая мощность, кВт	Удельный расход топлива г/(кВт·ч)	Догрузка ведущего колеса, кН
Высотный Силовой	-	5,5	15,9	16,7	454	4,92
	10	5,65	13,3	17,6	430	5,5
	20	5,57	12,2	17,1	442	5,47
Позиционный	-	5,76	13,1	18,2	422	5,9

осуществляемые через навесную систему, с помощью которой повышают сцепной вес трактора. В таблице 1 приведены данные о влиянии способа регулирования глубины обработки почвы тягово-сцепные и энергетические показатели работы трактора.

**Высотное регулирование** – это предварительная настройка на определенную глубину хода рабочих органов сельскохозяйственной машины относительно ее опорного колеса. В отличие от силового и позиционного способов регулирования при высотном регулировании гидравлическая система выполняет только функцию подъемника.

**Силовое регулирование** – применяют для поддержания постоянной силы тягового сопротивления орудия. При изменении тягового сопротивления в процессе работы МТА автоматическая система увеличивает или уменьшает глубину хода рабочего органа, поддерживая  $R_{кр}$  постоянным. Вследствие стабилизации тягового сопротивления средняя скорость движения агрегата и его производительность увеличиваются при силовом регулировании (по сравнению с высотным). Повышается также топливная экономичность, но при этом возрастает отклонение от заданной глубины пахоты.

**Позиционное регулирование** - предназначено для поддержания заданного положения орудия относительно трактора и применяется, как правило, при работе трактора с полунавесными плугами. Колебания глубины пахоты при таком способе регулирования достигают таких значений, что, агротехнические требования могут быть выдержаны только на очень выровненных полях. Поэтому применяют комбинацию силового и позиционного регулирования и получают удовлетворительное агротехническое качество работ при достаточно высоких производственных показателях МТА.

Наиболее эффективный по агротехническим показателям высотный способ регулирования глубины обработки почвы оказывается наименее выгодным по производственным показателям. При этом способе регулирования самое высокое буксирование движителей, крайне низкая тяговая мощность и самый большой расход топлива вследствие очень низкой догрузки ведущих колес. Свойство этого способа регулирования обеспечивать высокую точность глубины хода рабочего органа наиболее существенно для технологических операций мало энергоёмких, с неглубокой обработкой почвы (культивация и др.), при которых не требуется высокое значение силы тяги. На пахоте и других энергоёмких видах обработки почвы можно использовать более эффективные в производственном отношении и менее требовательные к допуску на регулирование глубины обработки – силовой и высотный.

## **1. 2 Лекция № 2 (2 часа).**

**Тема:** «Задачи автоматического управления самоходными машинами. Методы ориентации движущихся объектов»

### **1.2.1 Вопросы лекции:**

1. Движение самоходной машины по постоянной трассе.
2. Движение самоходной машины по трассе, где происходит многорядное движение.
3. Движение самоходной машины по переменной траектории.
4. Копирующие устройства.

### **1.2.2 Краткое содержание вопросов:**

- 1 Движение самоходной машины по постоянной трассе.

Под автоматическим вождением понимаются выполняемые без участия водителя действия по траекторному управлению МТА. Главным образом оно предназначается для сельскохозяйственных МТА, выполняющих полевые операции растениеводства.

При выполнении этих операций, как правило, МТА должен двигаться по траекториям, близким к прямым линиям. Обычно эти траектории направлены параллельно одной из сторон обрабатываемого участка поля, на концах которого производятся развороты. При этом МТА должен двигаться, чередуя эти траектории в порядке, определяемом технологией выполнения операции – всвал, вразвал или челночно.

Автоматическое вождение может ограничиваться движением МТА только по этим траекториям (на гоне). В некоторых случаях оно может охватывать и развороты, управляя движением МТА для чередования траекторий.

Задача автоматизации вождения и предложения по её решению появились достаточно давно. У нас особое внимание к этому направлению возникло на базе попыток организовать полностью автоматическое управление работой МТА, сняв с него водителя. Понятно, что при этом в первую очередь МТА необходимо обеспечить именно таким оборудованием, которое управляет траекторией МТА.

Главным вопросом, который приходится решать при этом, является вопрос получения информации о текущем положении МТА относительно заданной траектории. Эта информация по своему качеству должна отражать довольно жёсткие требования сельскохозяйственного производства по точности траекторного управления. Так, при вспашке траекторная ошибка не должна превосходить 5 см в любую сторону, чтобы было обеспечено требуемое качество обработки. Этот вопрос может решаться по двум направлениям.

Первое заключается в том, что положение МТА определяется относительно выбранной неподвижной системы координат и сравнивается с тем, каким оно должно быть при выполнении заданной программы движения, содержащей сведения о необходимых траекториях, записанные в память в этой же системе координат. Такое направление можно назвать программным или координатным, и его реализация требует наличия устройств, позволяющих в каждый момент времени знать текущие координаты объекта в этой системе с погрешностью не более нескольких сантиметров.

Наиболее обоснованные попытки создания таких устройств опирались на использование радиотехнических средств. В частности, пока наилучшим решением является применение двух радиодальномеров, позволяющих знать текущие значения расстояний от установленной на тракторе антенны до двух неподвижных ретрансляторов, по которым могут быть рассчитаны и сравнены с заданными текущие значения координат МТА.

В последнее время в зарубежной литературе появились предложения по автоматизации вождения МТА и самоходных сельскохозяйственных машин на основе информации, получаемой с помощью спутниковых навигационных систем. Однако нужно понимать, что для этого необходима специальная аппаратура, гораздо более дорогая, чем простые приёмники с предъявлением карт. Более того, точность измерения координат

объекта, необходимая для автоматического вождения, достигается только при наличии специальных наземных ретрансляторов с очень сложным и дорогим оборудованием.

### 3.2 Движение самоходной машины по трассе, где происходит многорядное движение.

Второе направление связано с тем, что положение МТА определяется не абсолютно, а относительно некоторого имеющегося ориентира, свойственного выполняемой операции. В своём движении МТА копирует (или отслеживает) этот ориентир, поэтому такое направление называют копировальным или следовым. Как правило, и сам этот ориентир является следом или предшествующего прохода, или предшествующей операции. Копирование следа может быть основано на различных физических принципах в зависимости от того, что он представляет собой. Следы типа борозды при вспашке или ряда растений при междурядной обработке могут копироваться механически. Известны попытки различать раздел между обработанной и необработанной поверхностями при той же вспашке или на других операциях по яркостному контрасту с помощью оптико-электронных средств. Предлагались способы бесконтактного слежения за стенкой пахотной борозды с помощью ультразвука и емкостных датчиков. Рядки растений отслеживались электроконтактным способом.

Кроме естественных следов, которые можно использовать только при определённых операциях, были попытки организовать искусственные для использования на всех операциях. Здесь наиболее успешным было применение уложенного под землю кабеля, через который пропускался переменный ток звуковой частоты. Образующееся при этом вокруг кабеля электромагнитное поле улавливалось установленными на тракторе катушками, благодаря чему можно было определять расстояния от них до кабеля и отслеживать его, в том числе на некотором удалении от линии его заложения.

Требования к системам, осуществляющим автоматическое вождение, зависят от способа получения исходной информации. Для систем, использующих координатные способы и копирование следа предыдущей операции, они полностью аналогичны требованиям, предъявляемым к следящим системам автоматического управления. Ключевым здесь является требование точности, связанное с качеством выполнения работы. При механическом копировании ограничено рассогласование, связанное с отклонениями трактора от копируемого следа.

В системах, работающих по принципу копирования следа предыдущего прохода, приходится выполнять дополнительно ещё одно специфическое требование. Оно связано с тем, что идеальное копирование следа принципиально невозможно, да и не нужно. Однако нельзя, чтобы получающийся при каждом проходе след, который будет копироваться при следующем проходе, имел большую кривизну, чем копируемый. С этим явлением, которое назвали прогрессирующим искривлением, столкнулись практически сразу, и в конечном итоге установлено, что для его предотвращения амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы не должна превосходить единицы ни при какой частоте.

Выполнение такого требования при проектировании систем обеспечивается расчётом с использованием методов теории автоматического управления. Для этого необходимо в соответствии с ними составить уравнения, описывающие работу всех звеньев системы.

Следует учесть, что рассогласование между фактическим положением трактора и заданной траекторией, которая должна отслеживать и устранять система автоматического вождения, определяется по координате некоторой точки. Её поперечное смещение от заданной ей траектории состоит из двух слагаемых по зависимости

$$\Delta Y = Y_0 + L \cdot \varphi,$$

где  $Y_0$  – поперечное смещение мгновенного центра поворота трактора (МПВТ) от заданной ему траектории;

$L$  - расстояние от МПВТ до отслеживаемой точки (вынос вперёд);

$\varphi$  - курсовой угол между продольной осью трактора и заданной

траекторией, определяемый как интеграл угловой скорости поворота  $\omega$  (он считается достаточно малой величиной, при которой можно принять, что  $\sin \varphi \cong \varphi$ ).

Отметим, что в этом выражении необходимо учитывать правило знаков. Оно заключается в том, что положительное (или отрицательное) направление по величине курсового угла должно быть таким, чтобы при сохранении его величины в процессе движения величина поперечного смещения также увеличивалась (или уменьшалась).

Далее должны быть указаны уравнения, описывающие поведение трактора, как объекта управления поворотом.

Такие уравнения составляются на основе динамических соотношений (по принципу Даламбера с учётом инерции или на базе уравнений Лагранжа). При этом появляется необходимость описывать особенности ходовой системы трактора и её взаимодействие с почвой, а также взаимодействие трактора с навесным или прицепным орудием. Здесь нельзя обойтись без допущений и приближений, что в итоге требует проверки специальными экспериментами.

В конечном итоге принято, что поведение трактора как объекта управления поворотом при больших радиусах достаточно близко описывается дифференциальным уравнением вида

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega = k\alpha,$$

где  $T$  – постоянная времени;

$\omega$  – угловая скорость поворота;

$k$  – коэффициент передачи;

$\alpha$  – управляющее воздействие.

### 3.3 Движение самоходной машины по переменной траектории.

В нём для гусеничного трактора управляющим воздействием  $\alpha$  является поворачивающий момент, создаваемый механизмом поворота, а для колёсного – угол поворота передних управляющих колёс или слома полурам при шарнирно-сочленённой конструкции. Величины постоянной времени и коэффициента передачи зависят от параметров трактора, почвы и

вида орудия. Для гусеничных тракторов такая зависимость является следствием допущения о том, что во время поворота на элемент опорной поверхности гусеницы действует поперечная сила, пропорциональная произведению вертикальной нагрузки на него и скорости его поперечного перемещения, а вектор равнодействующей тягового сопротивления составляет с продольной осью трактора угол, пропорциональный угловой скорости поворота  $\omega$ . Для колёсных тракторов такая зависимость получается в связи с боковой деформацией и поперечным скольжением шин.

Важно отметить, что у колёсных тракторов управляющее воздействие  $\alpha$  может рассматриваться как непрерывно изменяющаяся величина. В гусеничных тракторах оно появляется прерывисто при срабатываниях механизма поворота, а между ними равно нулю. Далее следует упомянуть, что в гусеничных тракторах механизмы поворота могут быть двух видов. В одном, который можно назвать разностно-тяговым, поворачивающий момент образуется за счёт перераспределения тяговых усилий (механизмы фрикционного типа или планетарные). В этих механизмах зависимость образуемого поворачивающего момента от воздействия в виде перемещения некоторого органа является существенно нелинейной и имеет вид кусочно-линейной характеристики с зоной нечувствительности и насыщением, причём и то, и другое зависят от действующей тяговой нагрузки, а наклон линейной части зависит от конструкции механизма (рис. 5).

Другой тип механизмов поворота можно назвать разностноскоростным. В них по управляющему воздействию водителя появляется разница угловых скоростей вращения

ведущих колёс. Она может быть ступенчатой вследствие установления разных передаточных отношений от вала двигателя к валам ведущих колёс, как на тракторе Т-150. Она может изменяться непрерывно при использовании такого решения, как сдвоенный дифференциал и реверсивный регулируемый гидравлический привод, как на некоторых моделях тракторов фирмы «Катерпиллар» или на экспериментальных тракторах НАТИ-91, НАТИ-92 и НАТИ-04. В этом случае прикладываемый к остову трактора поворачивающий момент зависит как от способа передачи воздействия от органа управления на соответствующий механизм, так и от скорости приложения этого воздействия.

Преобразование измеренного отклонения  $\Delta Y$  в управляющее воздействие  $\alpha$  производится так, чтобы выполнялись предъявляемые к системе и описанные выше требования. Это является результатом действий, которые называются синтезом. При этом необходимо учитывать, что само воздействие  $\alpha$  прикладывается к механизмам трактора через исполнительный механизм, устройство которого зависит от типа трактора и особенностей его конструкции.

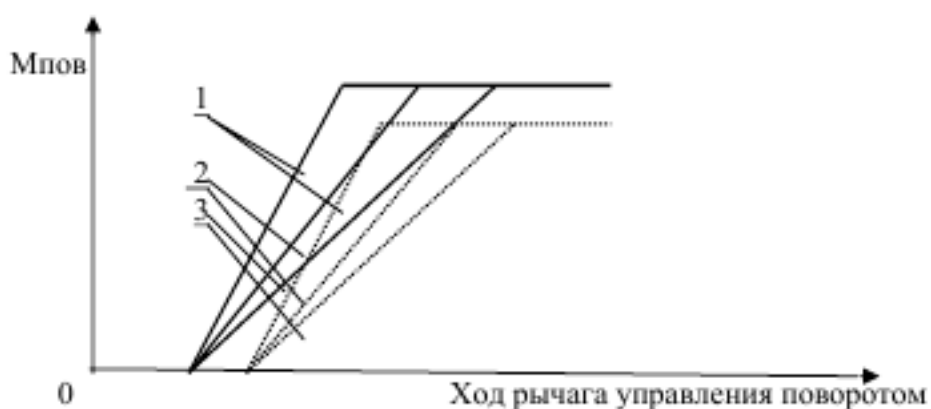


Рис. 1. Статические характеристики разностно-тяговых механизмов поворота гусеничных тракторов (сплошные линии – при полной тяговой нагрузке, штриховые – при частичной тяговой нагрузке, 1 – планетарный с ленточным самозатягивающимся тормозом, 2 – планетарный с закрепленным за один конец ленточным тормозом, 3 – фрикционный).

### 3.4 Копирующие устройства.

В колёсных тракторах, которые оснащаются системой автоматического вождения, как правило, присутствует гидравлический привод рулевого управления. В этом случае, как указано выше в разделе об аппаратных средствах автоматизации, для управления поворотом трактора используется дополнительный электроуправляемый распределитель. Он может быть релейного действия, при котором повороты колёс или изменение угла между полурамами в обе стороны происходят с постоянной скоростью, и величина изменения управляющего воздействия  $\alpha$  зависит от длительности включения распределителя. Известны распределители пропорционального действия, которые обеспечивают скорость поворота пропорционально приложенному электрическому сигналу. Самым рациональным является использование релейных распределителей в импульсном режиме с широтной модуляцией, при которой импульсы включения следуют с постоянной частотой, а их относительная длительность зависит от приложенного сигнала.

В гусеничных тракторах известны только решения для разностно-тяговых механизмов поворота. Здесь трудно организовать регулируемое воздействие, и исполнительные устройства имеют вид гидроприводов, релейно, хотя и с определённой скоростью, перемещающих орган управления на полный ход (заметим, что в тракторах с фрикционными механизмами в виде гидроуправляемых муфт можно управлять давлением жидкости, сжимающим эти муфты, в любых пределах до полного сброса).



Применительно к разностно-скоростным механизмам опыта разработки исполнительных устройств автоматического вождения не было. Однако можно считать, что это чисто конструктивные задачи, которые в каждом случае имеют разумное решение.

В настоящее время задачи автоматизации вождения тракторов не относят к первоочередным. Это связано с тем, что найденные в своё время решения либо при конструктивной и аппаратной простоте могли применяться только на отдельных операциях, либо при абсолютной универсальности были достаточно сложны. Тем не менее достоверно установлено, что автоматизация вождения сельскохозяйственных МТА обеспечивает вполне весомые эффекты.

Прежде всего она является мощным средством облегчения условий труда на тракторе. На траекторное управление приходится более 80 % затрат нервно-мышечных усилий водителя, и освобождение его от этих действий даже только на гоне благотворно сказывается на всех медико-биологических показателях жизнедеятельности.

В ряде случаев автоматизация вождения не только обеспечивает повышение качества обработки по стабильности ширины захвата, но и может дать существенное повышение производительности и сокращение расхода семян и средств химизации. В частности, такие эффекты наблюдались при грядо-гребневой технологии, на некоторых широкозахватных агрегатах и т.п.

Наконец, автоматизация вождения остаётся базой возможной роботизации тракторов. Хотя эта задача на повестке дня пока не стоит, в принципе она вполне реализуема по техническим возможностям современной техники. Понятно, что в составе аппаратуры такого трактора должна обязательно находиться система траекторного управления, обеспечивающая движение трактора-робота в соответствии с заданной программой.

### **1. 3 Лекция № 3 (2 часа).**

**Тема:** «Технические требования к системам автоматического управления самоходными машинами»

#### **1.3.1 Вопросы лекции:**

1. Автоматическое управление.
2. Системы автоматического управления.

#### **1.3.2 Краткое содержание вопросов:**

- 1 Автоматическое управление.

Моторно-трансмиссионные установки (МТУ) тракторов являются их энергетической основой. Как следует из самого термина, МТУ состоит из двигателя и силовой передачи, обеспечивающей подвод развиваемой двигателем мощности к ведущим колёсам трактора. Управление МТУ состоит из задания и поддержания требуемого режима работы двигателя, что обеспечивается соответствующей настройкой системы регулирования подачи топлива; необходимого изменения передаточного отношения от вала двигателя к валам ведущих колёс; а также перераспределения потоков мощности при наличии двух и более ведущих колёс.

Регулирование подачи топлива в двигатель является самой первой задачей автоматического управления, поставленной и решённой достаточно давно и успешно. Сейчас подавляющее большинство тракторных двигателей составляют дизельные двигатели, у которых в основном регулирование подачи топлива осуществляется всережимными регуляторами механического типа с центробежными чувствительными элементами. Разнообразные конструкции таких регуляторов выпускаются в массовых количествах и практически достигли совершенства. Однако уже просматриваются проблемы, которые, как считается многими специалистами, требуют перехода на другую основу – регулирование с помощью электронных средств. Эти проблемы связаны с ужесточением экологических требований к двигателям, в том числе

по токсичности выхлопных газов. Признано, что единственным способом выполнения этих требований является совершенствование процесса впрыска с подъёмом значений давления начала подачи на уровень не менее 1000 МПа в сочетании с электронным регулированием. Особенности последнего заключаются в том, что наряду с более стабильным и точным регулированием количества подаваемого топлива («дозы») оно позволяет более точно регулировать угол опережения впрыска («фазу»), что является обязательным для выполнения упомянутых требований.

Регулирование подачи топлива не является единственным примером применения на двигателях автоматических устройств. В частности, такие устройства имеются в системах охлаждения, особенно жидкостных. Во-первых, это термостаты, открывающие доступ охлаждающей жидкости в радиатор только после прогрева двигателя после запуска до определённой температуры. Во-вторых, это устройства, включающие привод вентилятора по такому же условию.

Автоматическое устройство имеется в механизме привода от пускового двигателя (электростартера или бензинового) к валу дизеля. Это центробежные автоматы («бендиксы»), после пуска основного двигателя выключающие этот привод во избежание поломки пускового двигателя.

По имеющейся информации, в последнее время появляются ещё более сложные автоматические устройства. Есть сведения об удачных решениях по регулированию турбонаддува (как с помощью перепуска, так и за счёт регулирования геометрии турбин или компрессоров). Появляются двигатели с регулированием фаз газораспределения.

Электронные средства автоматического регулирования, как правило, устанавливаются фирмами-изготовителями двигателей в качестве штатного или заказного оборудования. При этом обязательно предусматривается возможность работы такого оборудования совместно с другими электронными системами, в первую очередь – с системами, управляющими механизмами трансмиссии.

Стратегия управления МТУ основана на установление наиболее выгодных режимов работы. Они связаны как с наилучшим использованием мощности двигателя и поддержанием наименьшего удельного расхода топлива, так и с устранением некоторых возможных потерь. При этом первое может проявляться в двух возможных целях. Если трактор выполняет операцию, характерную большим тяговым сопротивлением и отсутствием ограничений по скорости, для получения максимально возможной производительности двигатель выводят на внешнюю характеристику и стараются удерживать его режимы вблизи точки максимальной мощности, чтобы обеспечить максимально возможную производительность МТА. Если же тяговое сопротивление при выполнении данной операции сравнительно невелико, и по технологии её выполнения скорость не должна выходить за некоторый верхний предел, управление МТУ должно обеспечивать близость скорости трактора к этому пределу, а режим двигателя должен быть максимально экономичным по удельному расходу. Обе цели достигаются при соответствующем управлении как настройкой регулятора топливного насоса дизельного двигателя, так и передаточным числом трансмиссии.

При этом управление движением трактора для водителя сводится к заданию скорости движения некоторым органом, например, педалью. Переход с одной цели на другую может происходить автоматически в зависимости от сочетания задаваемой скорости и текущего значения тяговой нагрузки. Их произведение определяет потребную мощность, и если она меньше максимальной мощности двигателя, управление МТУ идёт по второму принципу – заданная скорость обеспечивается наиболее экономично. Если же потребная мощность больше максимальной мощности двигателя, управление идёт по первому принципу, а скорость трактора не достигает заданного значения, а устанавливается на максимально возможном уровне в зависимости от величины тяговой нагрузки (при этом двигатель выведен на внешнюю регуляторную характеристику).

Как видно, основной задачей управления механизмами трансмиссии является в этих случаях установление в ней необходимого передаточного отношения от вала двигателя к валу ведущих колёс. Рассмотрение принципов решения такой задачи целесообразно начать на примере ступенчатых трансмиссий. Понятно, что для самой её постановки трансмиссия должна допускать переключение на ходу под нагрузкой без разрыва потока мощности. На современных тракторах трансмиссии такого типа распространены достаточно широко, и их основой является применение фрикционных муфт с гидравлическим сжатием. Переключение с одной ступени на другую обеспечивается тем, что в ранее включённой муфте сжатие уменьшается до нуля, а во включаемой увеличивается от нуля до значения, обеспечивающего требуемый запас. Этот переход производится с перекрытием по времени, благодаря которому поток мощности не разрывается.

Возможности МТУ при ступенчатой трансмиссии хорошо иллюстрируются её характеристикой, которую в отличие (или по аналогии) от тяговой характеристики трактора можно назвать крутильной (рис. 1). Она изображает зависимости мощности на выходном валу (это не обязательно вал ведущих колёс) от крутящего момента нагрузки на этом валу при включении различных передач (ступеней). Для её построения используется внешняя регуляторная характеристика двигателя в координатах «крутящий момент – мощность», которая перестраивается с учётом передаточного отношения от вала двигателя к принятому валу и к.п.д. передачи между ними.

На крутильной характеристике хорошо видна преимущественная логика автоматического управления в режиме стремления к максимальной мощности при выполнении работ с большой тяговой нагрузкой. Понимая, что потребность в таковом возникает из-за того, что эта нагрузка изменяется в достаточно широких пределах (принято считать, что при обычной вспашке колебания тягового сопротивления могут достигать до 25 % от среднего значения, а при вспашке клеверниц или подъёме целины и до 40 %), этот факт будет выглядеть, как изменение аргумента этой характеристики в таком же диапазоне. Допустив, что оно происходит достаточно медленно, и можно пренебречь всякими переходными процессами, легко показать, что максимальное среднее значение мощности будет получено тогда, когда переключение передач будет производиться при значениях аргумента, соответствующих пересечениям кривых характеристики. Понятно, что при этом с увеличением нагрузки переключаются на более низкую ступень и с уменьшением – на более высокую.

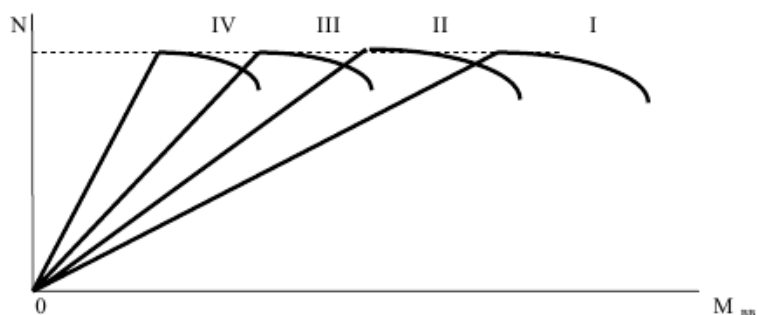


Рисунок 2. Крутильная характеристика моторно-трансмиссионной установки (римскими цифрами обозначены условные номера ступеней)

Так как нагрузку измеряют по двигателю, необходимо отыскать на его характеристике значения действующего крутящего момента, соответствующие этим значениям аргумента крутильной характеристики. Оказывается, если передаточные отношения соседних ступеней образуют геометрическую прогрессию (что и рекомендуется теорией), то все пересечения кривых крутильной характеристики соответствуют двум точкам на характеристике двигателя – одной на регуляторной ветви (порог недогрузки) и одной на корректорной ветви (порог перегрузки). Если же в трансмиссии трактора принцип геометрической прогрессии не соблюден, то

расположение пороговых значений нагрузки будут зависеть от того, какая передача включена в данный момент времени.

При этом отмечаются два обстоятельства. В силу неизбежных погрешностей измерения и регулирования точное выполнение условия переключений в пороговых точках затруднено. Особенно неприятно производить при изменении внешней нагрузки переключение до того, как её текущее значение совпадёт с точкой пересечения кривых. В этом случае может возникнуть автоколебательный процесс («звонковое» переключение). Эта опасность устраняется, если переключение производить чуть позже этого

пересечения, однако при этом будет теряться какая-то часть мощности. Второе обстоятельство заключается в том, что в связи с изложенными выше соображениями требуемая точность измерения нагрузки при автоматическом управлении довольно высока. Напоминая приведенный выше анализ способов и средств её измерения, отметим, что далеко не все косвенные приёмы пригодны в данном случае. Далее необходимо учесть, что даже при идеальном измерении построение и использование крутильной характеристики и нахождение пороговых значений предполагает знание точного протекания регуляторной характеристики двигателя. И здесь нельзя обходиться типовыми представлениями. Двигатели для тракторов при выпуске имеют довольно большие разбросы характеристик, а в ходе эксплуатации по таким неизбежным причинам, как износы, усадки регулирующих пружин и т.п., эти характеристики изменяются (сначала в ходе приработки мощность может даже возрасти, но затем падает). В связи с этим при разработке систем автоматического управления ищут способы самонастройки на текущее состояние характеристики двигателя. Большинство таких приёмов опирается на одновременное измерение двух величин – показателя нагрузки и частоты вращения вала.

Двухпараметровое измерение является необходимым и для решения более общей задачи – всережимного автоматического управления. Оно производится при необходимости реализовывать и второй принцип – минимизацию расхода топлива при выполнении работ с ограниченной скоростью и небольшим тяговым сопротивлением. Здесь используются свойства всережимных регуляторов тракторных двигателей. Они заключаются в том, что при необходимости работать с ограниченной мощностью, определяемой произведением ограниченной скорости и тяговой нагрузки, выгодно перевести двигатель на частичную характеристику и повышенную передачу. При этом скорость может быть приближенной к допустимому пределу.

Не останавливаясь на подробном теоретическом анализе способа такого управления, отметим два важных признака. Первый состоит в том, что поле возможных характеристик двигателя разбивается на три зоны. В координатах «частота вращения – крутящий момент» верхняя левая часть будет считаться зоной перегрузки, нижняя правая – зоной недогрузки, а срединная – зоной нормальной работы (рис. 2).

Второй связан с тем, что управление производится как переключением передач, так и изменением настройки регулятора двигателя. Для этого в составе системы должны быть два исполнительных механизма соответствующего назначения. Понятно, что при использовании для переключения передач электрогидравлических устройств и при электронном регулировании подачи топлива этот вопрос решается гораздо проще.

Теперь рассмотрим особенности автоматического управления МТУ при бесступенчатых трансмиссиях. При этом сразу же исключим из рассмотрения гидродинамические трансмиссии, в основном применяемые на мощных промышленных тракторах, которые обладают некоторыми свойствами автоматического регулирования, однако оно относится только к нагрузке двигателя, чего, однако, на этих объектах вполне достаточно.

Для понимания особенностей автоматического управления такими

МТУ обратимся к описанному выше об МТУ со ступенчатыми трансмиссиями. Указанное разбиение поля характеристик двигателя на зоны в них зависит от того, насколько «плотно» расположены ступени. Чем меньше отличаются друг от друга передаточные отношения соседних ступеней, тем уже зона нормальной работы. Если считать трансмиссию с бесступенчатым изменением передаточного отношения пределом, к которому стремится ступенчатая с неограниченным ростом количества ступеней, то при достижении этого предела эта зона стянется в линию. Она будет соответствовать таким сочетаниям нагрузки на двигатель и частоты вращения его вала, которые при каждом возможном значении развиваемой мощности реализуются с наименьшим удельным расходом топлива (рис. 3).

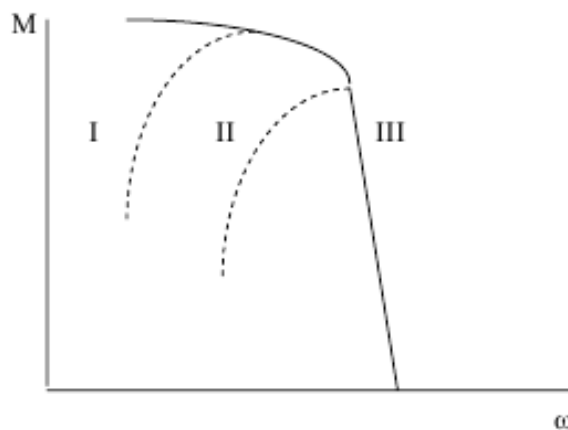


Рисунок 3. Разбиение поля характеристик двигателя на зоны (I – зона перегрузки, II – зона нормы, III – зона недогрузки)

При этом возникает и принципиальное различие между ступенчатыми и бесступенчатыми трансмиссиями. Если в первых передаточное отношение изменяется разовыми переключениями, понятно, что частота таких действий должна быть ограничена хотя бы из соображений сохранения ресурса механизмов. Такое ограничение лучше всего достигается соответствующей обработкой информации об измеренных текущих значениях нагрузки, благодаря которой система управления не реагирует на кратковременные отклонения этих значений от некоторого среднего, а учитывает только достаточно длительные изменения. При бесступенчатой трансмиссии изменение её передаточного отношения теоретически можно вести непрерывно, хотя на практике и в этом случае измерения сопровождаются такой же обработкой.

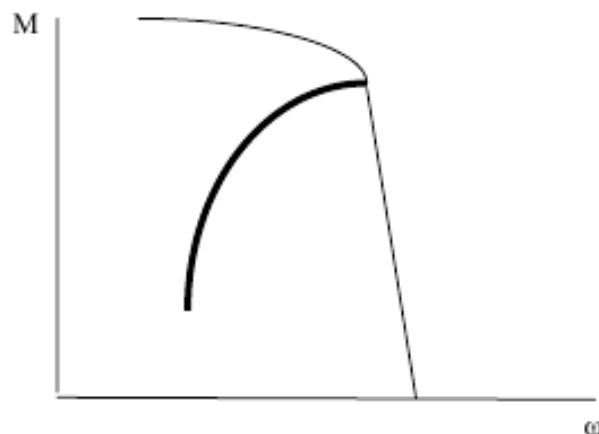


Рисунок 4. Линия регулирования при бесступенчатой трансмиссии

Бесступенчатые механические трансмиссии на тракторах распространения не получили, поэтому можно их особенности не рассматривать. Гидрообъёмные трансмиссии (полнопоточные и двухпоточные) нуждаются во внешнем автоматическом управлении. В таких трансмиссиях передаточное отношение регулируется изменением рабочих объёмов регулируемых насосов или моторов (или и тех, и других). Часто для этой цели применяются машины со встроенным электрическим управлением.

Электрические трансмиссии на тракторах встречаются довольно редко в силу объективных причин, однако современные возможности и развитие электропривода, в частности, привода на переменном токе с частотным регулированием, могут привести к более широкому распространению таких трансмиссий. Их особенностью является то, что и измерение нагрузки, и управляющие воздействия имеют вид электрических параметров – сила тока или частота переменного тока. Это несколько облегчает сопряжение с электронной аппаратурой управления и исключает необходимость в некоторых компонентах. При этом требуют учёта некоторые специфические особенности электропривода.

Общим признаком систем автоматического управления при таком назначении является их построение в виде двух контуров. Первый контур за счёт регулирования подачи топлива обеспечивает работу двигателя на заданной характеристике – внешней или какой-нибудь частичной. Второй контур изменяет передаточное отношение трансмиссии. В результате происходит управление частотой вращения её выходного вала. Структурная схема такого двухконтурного регулирования показана на рис. 5.

Отметим, что современное тракторостроение всё шире использует различные решения по автоматизации управлением МТА. Этому способствует также и то, что в зарубежных тракторах стали всё чаще применяться для управления включением гидродожимных фрикционных муфт специальные электрогидравлические аппараты – электроуправляемые пропорциональные редуцирующие клапаны. Они позволяют за счёт регулирования величины тока через обмотку электромагнита получать на выходе регулируемое давление рабочей жидкости, направляемое на поршень муфты. Тем самым можно управлять не только состоянием муфты, но и самим процессом её включения (при необходимости – и выключения), обеспечивая требуемую плавность.



Рисунок 5. Структурная схема двухконтурного управления моторно-трансмиссионной установкой трактора

Следующей задачей автоматического управления МТУ является управление распределением потоков мощности. Она возникает на колёсных тракторах.

Большей частью их ведущие мосты имеют дифференциалы, призванные перераспределять подвод мощности к ведущим колёсам при повороте трактора. Однако при прямолинейном движении могут возникать обстоятельства, когда наличие дифференциала резко снижает тяговые возможности машины. С этой целью практикуется блокирование дифференциалов с помощью фрикционных или зубчатых муфт. Признаком необходимости блокирования могут являться факт движения трактора по прямой (управляемые колёса находятся в среднем положении), скорость движения ниже некоторого предела, опущенное положение навесного орудия и т.п. Соответственно, исчезновение этих условий требует деблокирования дифференциалов выключением этих муфт.

На многих современных тракторах такое управление происходит автоматически по сигналам типа указанных выше. При этом на полноприводных тракторах оно, как правило, сопровождается автоматическим управлением включением и выключением привода одного из мостов (в основном – переднего). Это управление ведётся и по признакам включения – выключения блокировки дифференциалов, и по некоторым дополнительным. Так, при движении трактора с разблокированными дифференциалами и выключенным приводом переднего ведущего моста последний может автоматически включиться при торможении, что позволяет тормозам заднего моста тормозить и передний.

Частично к этому направлению примыкает задача управления включением некоторых механизмов трансмиссии. К ним могут относиться так называемый быстрый реверс или привод ВОМ. Здесь необходимо управлять темпом замыкания фрикционной муфты для обеспечения плавности включения, особенно с целью упрощения исполнительных устройств.

Автоматическое управление МТУ относится к наиболее эффективным направлениям автоматизации. Оно обеспечивает довольно ощутимые эффекты следующего вида:

1. При выполнении энергоёмких работ повышается производительность трактора.
2. При выполнении работ с ограниченной потребной мощностью снижается расход топлива на единицу выполненной работы.
3. Снижаются динамические нагрузки на механизмы трактора и износы некоторых узлов и деталей.
4. Облегчается управление трактором, в том числе появляется возможность организации программного управления в некоторых случаях, например, на разворотах.

### 3.2 Системы автоматического управления.

В составе МТА различного назначения могут находиться различные машины и орудия. Некоторые из них довольно сложны и часто имеют собственные средства автоматического контроля и управления. Более простые в таковом не нуждаются, и их работа обеспечивается надлежащим сопряжением с рабочим оборудованием трактора. Оно в данном случае и становится объектом автоматического управления, призванного обеспечить необходимое качество работы.

Для сельскохозяйственных МТА основным элементом рабочего оборудования является навесное устройство трактора. С его помощью навесное орудие переводится из рабочего положения в транспортное и наоборот. При этом в рабочем положении должна обеспечиваться требуемая точность поддержания такого важного по требованиям агротехники параметра, как глубина обработки.

До настоящего времени главным средством решения этой задачи в отечественной практике является применение на орудиях опорных колёс. Для перевода в рабочее положение распределитель навесной системы трактора ставится в положение

«плавающее», и орудие под действием собственного веса опускается до касания опорного колеса с почвой.

Глубина обработки регулируется изменением положения опорного колеса относительно рамы орудия и поддерживается довольно точно. Однако при этом опорное колесо давит на почву суммарным усилием от веса орудия и вертикальной составляющей его сопротивления, вследствие чего появляется дополнительное сопротивление движению МТА. При этом сама установка опорного колеса добавляет к массе орудия значительную величину.

Для устранения этих недостатков достаточно давно предложено осуществлять автоматическое регулирование положения навесного устройства с целью поддержания заданной глубины обработки без установки на орудия опорных колёс. Однако до сих пор приемлемых решений по измерению главного здесь параметра – глубины – или равнозначного ему положения рамы орудия над почвой не найдено. Поэтому эту задачу решают с помощью косвенных измерений.

Наиболее простым способом здесь можно считать регулирование положения навесного устройства относительно остова трактора. Такое регулирование называют позиционным. Однако оно даёт удовлетворительные результаты только при отсутствии заметных неровностей опорной поверхности. При их наличии точность поддержания заданной глубины обработки резко ухудшается.

Более сложным является регулирование глубины по горизонтальной составляющей тягового сопротивления орудия, измеряемой в нижних или в верхней тягах навесного устройства. Для этого в них устанавливаются силоизмерительные элементы, а само регулирование называют силовым.

Главным недостатком этого способа является то, что тяговое сопротивление зависит не только от глубины обработки, но и от состояния почвы, ширины захвата орудия и скорости движения МТА.

Первые системы автоматического регулирования положения навесного устройства были гидромеханическими. В них составляющая тягового сопротивления измерялась через деформацию пружины, которая сравнивалась с настроенным значением, что определяло величину рассогласования, передаваемую на регулирующий распределитель. Позиционная ошибка также могла передаваться на этот же распределитель, а переключение с одного вида регулирования на другой осуществлялось механическим переключателем. Такие системы устанавливались на тракторы МТЗ.

При относительной простоте устройства таких систем они обладали серьёзными недостатками. Их было трудно применить на шарнирносочленённых колёсных тракторах. Они во многих случаях не обеспечивали необходимую точность, в том числе в них нельзя было осуществить смешанное или комбинированное управление. Оно заключается в том, что сигнал ошибки, действующий на распределитель, делают смешанным из отклонений как по усилию, так и по позиции.

Поэтому в настоящее время основным направлением в этих системах является измерение усилия и позиции электрическими датчиками, электронная обработка сигналов датчиков и электрическое управление распределителем. При этом в кабине трактора устанавливается пульт управления, с которого водитель даёт команды перевода навесного устройства из рабочего положения в транспортное и обратно, задаёт глубину обработки и вид регулирования, причём при комбинированном регулировании устанавливается изменяемое соотношение между силовым и позиционным факторами.

Устройство таких систем, которые называют электронногидравлическими, в основном одинаково. Они содержат датчики усилия, передаваемого на остов трактора через тяги навесного устройства, чаще всего нижние. Их обычно выполняют в виде полых пальцев – осей соединительных шарниров, внутри которых помещены чувствительные элементы для восприятия поперечных усилий и электронные схемы формирования выходных сигналов. Датчики



позиции в основном устанавливаются вблизи верхнего вала навесной системы и реагируют на его поворот. В электронном блоке размещается логическая часть системы, соединённая с упомянутым выше пультом. Наконец, гидравлический распределитель имеет электромагниты для приёма команд системы на изменение положения навесного устройства.

На мировом рынке такие системы являются, как правило, продуктом специализированного производства. Главным производителем этих систем для многих европейских и американских фирм является фирма «Бош» (Германия).

Необходимо заметить, что и в этих системах сохраняются определённые принципиальные недостатки. И в них основной параметр – глубина – задаётся косвенно, и настройка системы на него довольно сложна и может сбиться при изменении такого условия работы, как состояние почвы. Поэтому здесь сохраняется интерес к совершенствованию, которое направлено на упрощение настройки системы и поиск средств, позволяющих надёжно и не слишком сложно измерять саму глубину или хотя бы высоту рамы орудия над почвой.

Наличие на тракторе электронно-гидравлической системы регулирования положения навесного устройства позволяет осуществить ещё некоторые полезные функции. Снаружи трактора в его задней части с одной или с обеих сторон устанавливают кнопки, которыми можно подавать команды на подъём или опускание навесного устройства. Это облегчает и делает более безопасными действия по снятию или навешиванию навесного орудия.

Управление навесным устройством при наличии такой системы может быть введено в состав программного управления механизмами трактора на развороте, когда водителю в ограниченное время нужно выполнять целый ряд последовательных действий. Такое управление организуют в отдельной системе, имеющей два режима работы. В режиме обучения она запоминает выполняемые водителем действия при окончании гона и заезде в новый гон, а в режиме основной работы воспроизводит запомненную последовательность. Такая система, например, устанавливается на тракторы «Джон Дир» серии 8000.

В последнее время ряд зарубежных фирм сообщает, что в состав функций регулирования включается функция гашения колебаний навесного устройства с поднятым орудием на транспортных переездах. Приёмы такого регулирования и достигаемые результаты не сообщаются, поэтому здесь пока полной ясности не имеется. Возможно, в последующем этот вопрос получит более полное освещение, в том числе и на базе более близкого ознакомления с зарубежными моделями.

В нашей практике принято, что системы регулирования положения навесных устройств должны реализовывать при необходимости функцию гидроувеличителя сцепного веса (иногда употребляется термин «корректор вертикальных нагрузок»). Такая функция полезна при работе с навесными орудиями, имеющими опорные колёса, и заключается в том, что в цилиндре навесной системы создаётся и поддерживается давление, несколько меньшее того, что необходимо для подъёма орудия. Благодаря этому большая часть вертикальной нагрузки переводится с опорного колеса орудия на остов трактора, увеличивая прижатие его колёс к почве и уменьшая буксование. Настройка на заданное значение давления производится водителем вручную.

Эффективность применения таких систем определяется двумя факторами. Первый уже по существу рассмотрен и вытекает из отказа от использования на навесных орудиях опорных колёс. Второй тоже связан с этим фактом и обусловлен тем, что при работе с навесным орудием в режиме автоматического регулирования положения вертикальные нагрузки на орудие полностью воспринимаются трактором и увеличивают его сцепной вес, благодаря чему снижаются потери на буксование.

Задача управления рабочим оборудованием актуальна и для тракторов

промышленного назначения, работающих в агрегате с бульдозерным или грейдерным оборудованием, воздействующим на почву. Здесь могут ставиться две принципиально различные цели ведения работ.

В одном случае цель заключается в удалении почвы с одного места и перемещении её на другое. Это чисто землеройная работа, встречающаяся при строительстве различных объектов или при подготовке месторождения полезных ископаемых к добыче открытым способом. В этом случае требуется максимально возможная производительность по объёму перемещённого грунта за единицу времени.

В другом случае цель заключается в придании обрабатываемому участку земли вида плоскости, наклонённой под заданным углом к горизонту. Такие задачи встречаются в дорожном, аэродромном, мелиоративном и других видах строительства. Здесь требуется как можно точнее выполнить эту работу, называемую планировкой, чтобы свести к минимуму возможный ручной труд корректировки.

Эти задачи решаются разными способами. Однако общим в них является то, что управление положением рабочего органа – отвала бульдозера или ножа грейдера – должно производиться посредством приложения электрического сигнала к гидравлической системе рабочего оборудования, как и для рассмотренного выше регулирования в сельскохозяйственных МТА. Разница заключается в принципе выработки управляющего сигнала.

Проще начать анализ со второй задачи – планировки. Для её решения необходимо создать базу для ориентирования нижней кромки рабочего оборудования относительно требуемого расположения задаваемой плоскости.

Первые попытки решения такой задачи опирались на механическое копирование искусственного ориентира в виде стальной проволоки, натянутой с помощью геодезических инструментов параллельно заданной плоскости. На рабочем органе устанавливался щуп с датчиком линейного или углового перемещения, нулевой сигнал которого соответствовал заданному положению нижней кромки. При наличии отклонения сигнал датчика вызывал срабатывание гидросистемы в нужную сторону.

Такое решение обеспечивало нужное качество, однако требовало проведения трудоёмких подготовительных работ по установке ориентирующей проволоки. Их приходилось повторять после обработки полосы с шириной, равной ширине рабочего органа.

Более удобным и эффективным оказалось применение оптических средств. Нужное положение заданной плоскости обозначалось круговым вращением источника излучения (последние и наиболее отработанные решения – лазер в инфракрасном диапазоне) вокруг оси, наклонённой под заданным углом к горизонту. На рабочем органе устанавливался приёмник этого излучения, способный выдавать сигнал об отклонении от плоскости вращения (сканирования) луча от источника. По этому сигналу гидросистема точно так же корректировала положение рабочего органа.

При чисто землеройной работе максимальная производительность достигается при соблюдении двух условий. Первое заключается в том, что двигатель трактора должен развивать максимально возможную мощность, для чего необходимо обеспечивать должное управление моторно-трансмиссионной установкой по принципам, рассмотренным выше. Второе заключается в том, что потери мощности должны быть минимальны, и здесь ключевым фактором является буксование ходовой системы, на которое можно влиять через управление тяговой нагрузкой.

Для этого необходимо следить за процессом копания, который состоит из двух этапов. На первом происходит заглубление рабочего органа и формирование так называемой призмы волочения. На втором эта призма толкается трактором до места, где она будет оставлена. Объём и масса этой

призмы и характер грунта определяют усилие, которое должно обеспечиваться ходовой системой. Так как каждому его значению на данном грунте соответствуют определённые значения величины буксования и тягового к.п.д., управляя формированием призмы через управление заглублением рабочего органа, можно вести процесс так, чтобы он происходил как можно ближе к максимальному значению тягового к.п.д., а, значит, с максимальной тяговой мощностью и производительностью.

Понятно, что необходимая для такого управления информация должна характеризовать работу МТУ и ходовой системы. Первое может быть получено способами, аналогичными описанным выше применительно к управлению МТУ. При этом можно учесть, что большинство промышленных тракторов имеют гидродинамическую трансмиссию, в которой несколько легче получать информацию, используя, например, скольжение гидротрансформатора.

Что касается второго, то здесь не обойтись без измерения действительной скорости трактора относительно грунта. Средства для такого измерения будут рассмотрены ниже.

Следует добавить, что при регулировании заглубления отвала по максимуму тягового к.п.д. должно быть наложено ограничение на давление в гидросистеме, т.е. на усилие вдавливания отвала в грунт. Если оно будет слишком большим, произойдёт вывешивание ходовой системы, которое резко ухудшит тяговые возможности трактора.

В заключение этого раздела необходимо упомянуть ещё одну задачу управления. Она относится к такому устройству, как вал отбора мощности.

В современных тракторах всё чаще включение его привода производят с помощью гидроуправляемых фрикционных муфт и электроуправляемых распределителей. Это даёт возможность заменить механическую передачу управляющего воздействия на привод ВОМ электрическим, облегчая решение компоновочных задач. Кроме того, такое управление легко вводится

в состав комплексного программного управления при развороте МТА, описанного выше.

Так как при этом желательно, чтобы можно было использовать более простые распределители релейного действия с резким включением по давлению, возникает задача обеспечения плавности включения муфты. Для этого необходимо управлять темпом нарастания давления, сжимающего диски муфты. Ограничение темпа роста давления можно производить по жёсткой программе, с наложением обратной связи по включению или с комбинацией обоих этих приёмов.

#### **1.4 Лекция № 4 (2 часа).**

**Тема:** «Рекомендации по применению элементов систем автоматического управления самоходными машинами»

##### **1.4.1 Вопросы лекции:**

1. Чувствительные элементы.
2. Усилительные и преобразующие устройства.
3. Исполнительные элементы.

##### **1.4.2 Краткое содержание вопросов:**

###### **1 Чувствительные элементы.**

Они предназначены для измерения регулируемого параметра и должны обладать высокой точностью измерения, иметь широкую полосу частот пропускания, линейную статическую характеристику и т. д.

Выбор чувствительного элемента определяется назначением системы регулирования. В большинстве случаев в применяемых чувствительных элементах используются электрические методы измерения регулируемых параметров. Это объясняется простотой преобразования и усиления сигналов постоянного и переменного тока.

Значительные трудности возникают при построении чувствительных элементов, определяющих положение объектов относительно заданной траектории, так как они

должны преобразовать информацию нескольких координат и объекта в один сигнал, который после преобразования и усиления воздействует на механизм поворота.

В настоящем параграфе, в основном, приводятся результаты работ С. А. Литинского, Д. Баррика и авторов по разработке индукционных чувствительных элементов ( ч. э. ).

Рассмотрим методику расчёта и принципы построения индукционных ч. э. Траектория движения задаётся одиночным проводом, по которому протекает ток  $i = I \cdot \sin \omega t$ , а в качестве индукционного ч. э. (датчика) используется горизонтальный виток провода (плоскость витка параллельна плоскости движения). При этом принимается, что магнитное поле тока, протекающего по проводу, является квазистационарным, т. е. За промежуток времени, необходимый для распространения электромагнитной энергии на расстояние  $r$ . Магнитное поле вблизи датчика существенно не изменится. Это предположение справедливо, поскольку при автоматическом вождении величина  $r$  составляет не более нескольких метров, а частота тока в проводе меньше 10 кГц (диапазон звуковых частот). Поэтому при расчете можно считать, что в ориентирующем проводе протекает как бы постоянный ток  $I$ . Кроме того, можно пренебречь влиянием среды (грунта, в котором находится ориентирующий провод), поскольку в указанном диапазоне частот интенсивность поглощения незначительна даже при сравнительно большой проводимости грунта. Например на частоте 10 кГц среда с удельным сопротивлением 100 ом/м уменьшает амплитуду поля в 2,718 раза лишь на глубине 50 м. Тогда в рассматриваемой области вблизи провода напряжённость магнитного поля ориентации

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1)$$

где  $r$  - расстояние от провода, имеющего радиус

Если горизонтальный виток находится точно над проводом, то в витке не наводится э. д. с., так как на рис. 1, а видно, что наводимые в частях 11' и 22' э. д. с. равны между собой, а поскольку они включены навстречу, то результирующая э. д. с. равна нулю. То же самое, очевидно, получится, если над проводом расположить симметрично два одинаковых витка провода. При этом не обязательно, чтобы плоскости витков были горизонтальными. Достаточно, чтобы их контуры являлись зеркальными отображениями друг друга (балансная схема устройства ориентации, показанная на рис. 1). Разнообразные варианты индукционных устройств ориентации построены по указанному принципу. Однако вместо одиночных витков используются плоские многовитковые рамки различной формы (прямоугольные, квадратные, круглые), а в последнее время – стержневые датчики, т.е. катушки с ферромагнитными сердечниками (рис. 2). Поскольку многовитковые датчики представляют собой совокупность элементарных витков, то их расчет производится на основе наложения характеристик одиночных витков.

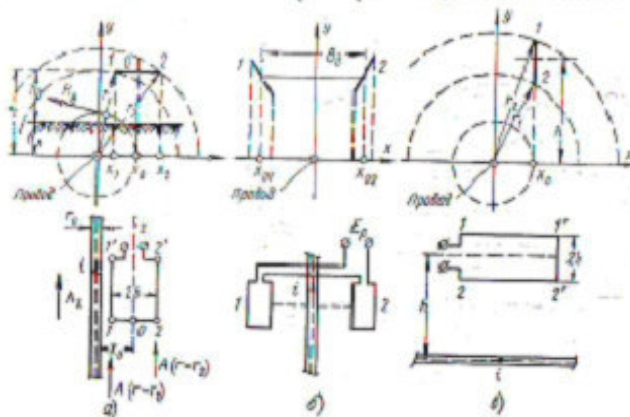


Рисунок 1. Принцип действия индукционного устройства ориентации: а – горизонтальный виток и магнитное поле одиночного привода; б – балансное устройство с двумя наклонными витками; в – вертикальный виток-датчик опорного сигнала.

Из рис. 1, а, видно что если поместить в магнитное поле провода горизонтальный виток таким образом, чтобы расстояние  $r_1$  и  $r_2$  не были равны между собой, то на выходе ч. э.

Возникает результирующая э. д. с. Характеристику датчика (ч. э.)  $E_T = f(x_0)$  можно найти следующим образом. Магнитный поток, пронизывающий виток, определяется выражением

$$\dot{O} = \oint_l A dl \quad (2)$$

где  $A$  – векторный потенциал магнитного поля.

С другой стороны,

$$\text{rot} A = [\nabla A] = B \quad (3)$$

где  $B$  – вектор магнитной индукции :

$$B = \mu_0 H \quad (4)$$

здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная абсолютной магнитной проницаемости ферромагнитных материалов.

Подставляя из уравнения (1)  $H$  в уравнение (4), из уравнения (3) находим

$$\text{rot} A = B_0 l_0 \quad (5)$$

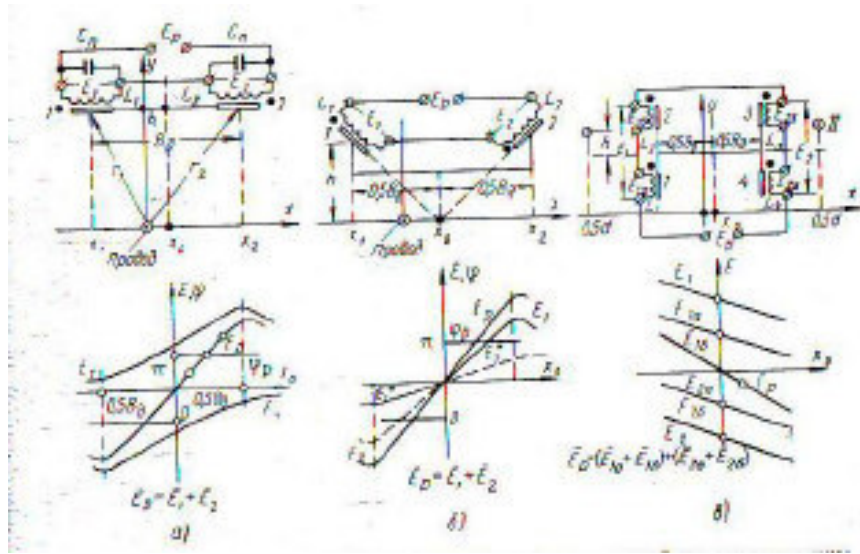


Рисунок 2. Схемы и характеристики балансных устройств ориентации: а – с электробалансировкой; б – с комбинированной электромеханической балансировкой; в – электробалансировкой для компенсации высотных погрешностей.

Из выражения для ротора в цилиндрических координатах, используемых в рис. 2,а, определяем

$$-\frac{\partial A_z}{dr} = B_0 = \frac{\mu_0 l}{2\pi r} \quad (6)$$

т. е. вектор  $A$  направлен по оси провода и его величина изменяется обратно пропорционально  $r$ .

Интегрируя выражение (6), получаем

$$A_z = -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln r + \text{const} \quad (7)$$

Теперь можно найти магнитный поток, пронизывающий контур витка, для чего воспользуемся выражением (2), найдя предварительно величины  $A$  для поверхностей с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\left. \begin{aligned} A_{(r=r_1)} &= -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln r_1 + \text{const} \\ A_{(r=r_2)} &= -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln r_2 + \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

При интегрировании по формуле (2) учитываем направления векторов  $A$  и  $dl$ : части интеграла, взятые по лобовым отрезкам контура витка, равны нулю, поскольку векторы  $A$  и  $dl$  взаимно перпендикулярны. В результате получаем:

$$\hat{O} = [-A_{(r=r_1)} + A_{(r=r_2)}]l = \frac{\mu_0 l l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (9)$$

На основании закона электромагнитной индукции находим э.д.с. витка

$$e_{\hat{a}} = -\frac{d\hat{O}}{dt} \left( \frac{\mu_0 \omega l l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \sin \omega t = E_{\hat{a}} \sin \omega t$$

Для анализа характеристики ч. э. введем обозначения:

$$E_{\hat{a}} = \hat{E}_{\hat{a}} \delta_{\hat{a}}; \quad \hat{E}_{\hat{a}} = \frac{\mu_0 \omega l l}{2\pi}; \quad \delta_{\hat{a}} = \ln \frac{r_2}{r_1}$$

где  $K_e$  - коэффициент усиления ч. э. :

$p_e$  - характеристический параметр ч. э.

Коэффициент усиления ч. э. можно увеличивать либо за счет размеров витка (увеличение длины  $l$ ), либо за счет параметров ориентирующего тока (увеличение частоты и амплитуды тока). Увеличением магнитной проницаемости внутри контура витка можно также повысить коэффициент усиления ч. э.  $K_e$ , но для плоскости рамок, в которых отношение высоты намотки катушки  $h_k$  к ее ширине  $2b$  находится в пределах

$$\nu = \frac{h_e}{2b} \ll 1 \quad (10)$$

такой прием практического значения не имеет в следствие эффекта размагничивания. При  $\nu \ll 1$  действующая абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_{a.д} \rightarrow \mu_0$ .

В плоских рамках удастся получить большие значения  $K_e$  за счет увеличения числа элементарных витков  $\omega_n$ , э. д. с. которых суммируются. Тогда коэффициент усиления.

$$\hat{E}_{\hat{a}} = \omega_n \frac{\mu_0 \omega l l}{2\pi}$$

Аналогичное явление, конечно, происходит и в стержневом датчике, но поскольку витки датчика распределены по сердечнику и поэтому имеют разные  $r_{1n}$  и  $r_{2n}$  относительно ориентирующего провода, то выражение для  $K_e$  получается другим.

Эффективным приемом увеличения коэффициента усиления является настройка датчика с помощью дополнительного конденсатора  $C_n$  (рис. 2).

Увеличение коэффициента усиления  $K_e$  происходит в  $Q$  раз, причём:

$$Q = \frac{1}{r_e} \sqrt{\frac{L_e}{\tilde{N}_e}} \quad (11)$$

где  $Q$  - добротность контура;

$r_k$  - активное сопротивление контура датчика;

$L_k$  - индуктивность датчика;

$C_k = C_N + C_L$  ( $C_L$  - собственная емкость датчика).

Преимущества датчика в этом случае объясняется тем, что эквивалентная схема его представляет собой последовательное соединение источника э. д. с., индуктивности и емкости. На резонансной частоте напряжение на емкости (или индуктивности), увеличивается в  $Q$  раз.

Проанализируем характеристический параметр  $p_r$ . Знак  $p_r$  зависит от знака  $x_0$ . Если  $r_2 > r_1$ , то  $\ln \frac{r_2}{r_1} > 0$ , а если  $r_2 < r_1$  то  $\ln \frac{r_2}{r_1} < 0$ .

Перемена знака  $p_r$  свидетельствует, что фаза э. д. с. датчика изменяется на  $180^\circ$ . Таким образом, устройство ориентации с горизонтальным витком является фазочувствительным (фазочувствительным является любое балансное устройство ориентации, в котором применены два одинаковых смещенных датчика). Фаза разностной э. д. с. датчиков остаются неизменными.

Зависимость амплитуды э. д. с. горизонтального витка от величины  $X$  можно найти, введя следующие обозначения (рис. 1, в) :

$$r_1 = \sqrt{h^2 + x_1^2} \quad (12)$$

$$r_2 = \sqrt{h^2 + x_2^2} \quad (13)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  (абсциссы точек 1 и 2) удобно выразить так:

$$x_1 = |x_0| - (\text{sign} x_0) b \quad (14)$$

$$x_2 = |x_0| + (\text{sign} x_0) b \quad (15)$$

причём  $\text{sign} x_0 = \frac{x_0}{|x_0|}$  и при  $x_0 = 0$  также обращается в нуль.

Производя подстановку в уравнение (9), находим

$$\delta_a = \ln \sqrt{\frac{h^2 [|x_0| - (\text{sign} x_0) b]^2}{h^2 + [|x_0| + (\text{sign} x_0) b]^2}} \quad (16)$$

Поскольку рассматриваемая система симметрична, характеристика  $p_r = f(x_0)$  (рис. 3) должна иметь две одинаковые симметричные ветви. Кроме того, каждая ветвь должна иметь один максимум, ( $p_r = 0$  при  $x_0 = 0$  и при  $x_0 = \infty$ ). Найдем точки  $+x_0$  и  $-x_0$  в которых  $p_r$  максимально. Для этого решим уравнение

$$\frac{dr_a}{dx_a} = 0$$

Корни этого уравнения

$$x_0 = \pm \sqrt{b^2 + h^2} \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что для увеличения динамического диапазона  $D_o$  такого устройства ориентации необходимо увеличивать  $b$  и  $h$ . Первое особенно удобно осуществляется в балансном устройстве ориентации (см. рис. 1, б). Увеличение  $h$  невыгодно, поскольку приводит к росту погрешностей, возникающих при переездах машины через неровности почвы. Из рис. 3 видно, что характеристика  $p_r = f(x_0)$  практически линейная в диапазоне  $x_0 \ll 0,3x_0$ .

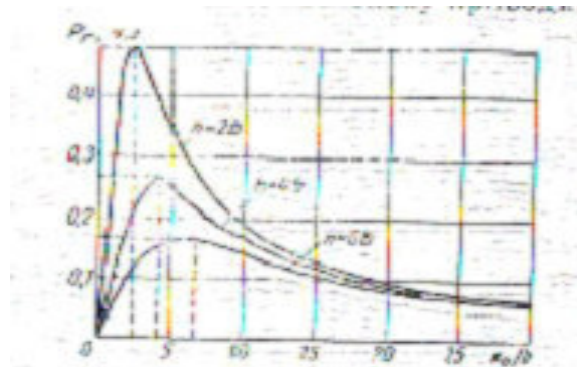


Рисунок 3.  
характеристики

Расчётные  
горизонтального витка

Полученные  
когда

выражения справедливы и  
горизонтальный виток

имеет форму кольца (аналитический расчёт в данном случае встречает большие трудности). Эксперименты, проведенные С. А. Литинским, показали, что характеристику кольцевого витка можно рассчитывать по формуле (16), принимая  $l = 2R_v$  и  $l = R_v$  ( $R_v$  – радиус витка) и вводя постоянный поправочный коэффициент, равный 0,763 при условии, что  $R_v/h < 0,25$ .

Таким образом, горизонтальный квадратный виток имеет такую же характеристику, как вписанный в него горизонтальный кольцевой виток, но выходной сигнал последнего меньше в 0,763 раза. Сигнал ошибки определяется с помощью амплитудно-разностной (рис. 4, а) или амплитудно-фазовой схемы.



4.

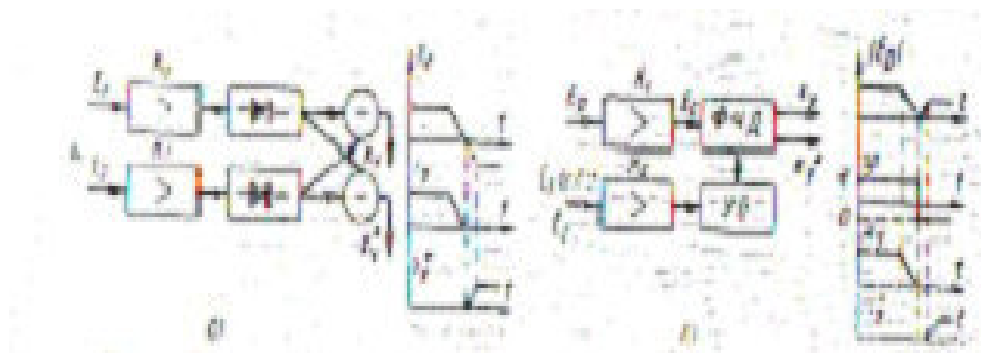


Рисунок  
Схемы и

характеристики чувствительных  
элементов: а – амплитудно-резонансная; б – амплитудно-фазовая

В первом варианте эта задача решается с помощью двух усилителей, каждый из которых усиливает сигнал своего индукционного датчика. После выпрямления (детектирования) сигналы поступают на вход суммирующего (разностного) устройства и далее - на входы исполнительного элемента. Такая амплитудно-разностная схема не обеспечивает высокой стабильности привязки  $C_n$ , поскольку неизбежны случайные колебания коэффициентов усиления  $K_1$  и  $K_2$  усилителей  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Данная схема приемлема лишь в тех случаях, когда амплитуда ориентирующего тока  $I$  достаточно велика и, следовательно, можно при эксплуатации обеспечить  $K_1$  и  $K_2$  поскольку требуемые значения коэффициентов усиления незначительны.

В амплитудно-фазовой схеме индукционного устройства ориентации (рис. 4) сигнал  $x_0$  усиливается и поступает в фазочувствительный детектор, куда вводится также опорный сигнал прямоугольной формы, фаза и величина которого постоянны и не зависят от  $x_0$ .

В случае балансного устройства ориентации с двумя симметричными датчиками (рис. 2) опорный сигнал снимается с одного из них и усиливается в  $K_2$  раз опорным усилителем - ограничителем (УО).

Если же сигнал  $x_0$  воспринимается горизонтальным рамочным датчиком, то в устройство ориентации вводится дополнительный вертикальный рамочный датчик (рис.1, б), который можно располагать в любой точке машины. Фаза э. д. с. такого датчика не зависит от знака  $x_0$ , а амплитуда мало зависит от величины  $x_0$ .

Введем обозначения (см. рис. 1, б):

$$r_1 = \sqrt{(h-b)^2 + x_0^2} \quad (18)$$

$$r_1 = \sqrt{(h+b)^2 + x_0^2} \quad (19)$$

Подставляя в уравнение (9) выражения (18) и (19), находим характеристический параметр вертикального витка:

$$p_0 = \ln \sqrt{\frac{(h+b)^2 + x_0^2}{(h-b)^2 + x_0^2}} \quad (20)$$

Поскольку при любом значении  $x_0$  подкоренное выражение не зависит от знака  $x_0$ , то фаза э. д. с. такого витка не зависит от  $x_0$ . Из уравнения (20) видно также, что с увеличением  $h$  влияние изменений  $x_0$  падает, т. е. Зависимость  $p_0 = f(x_0)$  сглаживается.

На рис. 5 показано семейство характеристик вертикального витка, построенных по формуле, (20). Преимущества амплитудно-фазовой схемы перед амплитудно-разностной схемой индукционного устройства ориентации следующие:

- обеспечивается более высокая стабильность привязки  $C_n$ , поскольку коэффициентов усиления  $K_1$  и  $K_2$  сигнального и опорного усилителей не влияют на положение объекта относительно опорной траектории;



- фазочувствительный детектор повышает помехоустойчивость системы ориентации, подавляя несинхронные помехи тем эффективнее, чем больше амплитуда опорного напряжения, а форма его ближе к прямоугольной.

Относительное приращение сигнала, вызванное помехой,

$$\delta_a = -\frac{1}{4} \left( \frac{U_n}{U_0} \cdot \frac{\tau_\phi}{T_n} \right)$$

где  $U_n$  - амплитуда помехи в канале сигнального усилителя;

$U_0$  - амплитуда опорного сигнала;

$T_n$  - период повторения опорного сигнала, можно уменьшить, увеличивая  $U_0$  и уменьшая  $\tau_\phi$

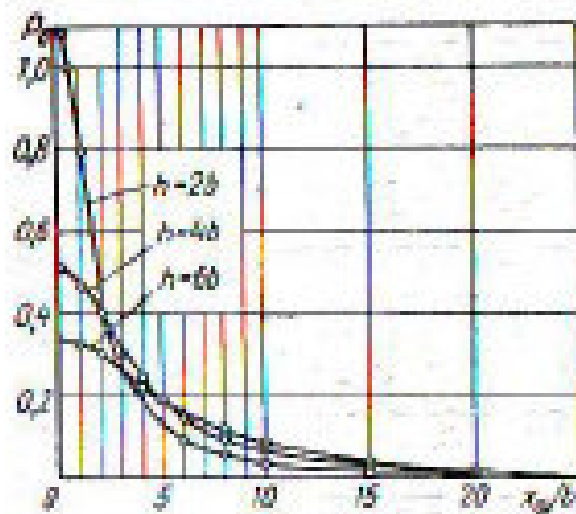


Рисунок 5. Расчётные характеристики вертикального витка

Помехи поступают также и в опорный сигнал и вызывают случайные сдвиги фронтов опорного сигнала. Поэтому на практике повышение помехоустойчивости оказывается из-за этого меньше. Когда последующие элементы САВ, а именно электронные реле срабатывают от сигналов одинаковой полярности, используются два фазочувствительных детектора (рис. 6).

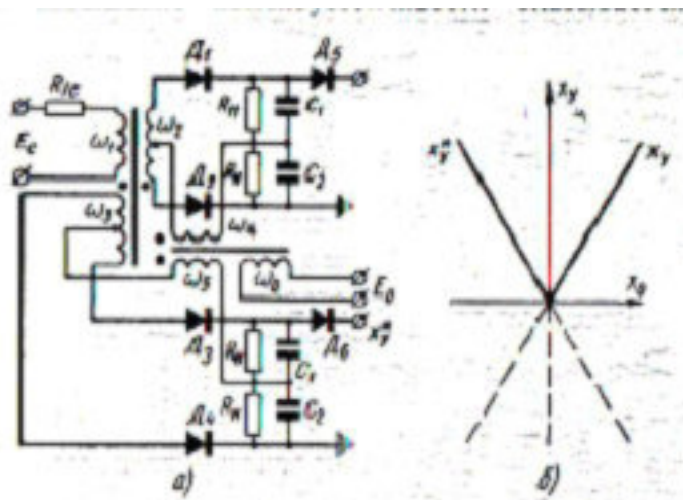


Рисунок 6. Сдвоенный фазочувствительный детектор:  
а – схема; б - характеристика

Выбор фильтрующих емкостей на выходе фазочувствительного детектора определяется требованием к полосе пропускания САВ. Поскольку самоходные машины не реагируют на сигнал с частотой выше 5 - 10 кГц, то полосу пропускания детектора можно значительно сузить и тем самым повысить помехоустойчивость. Дополнительное повышение помехоустойчивости обеспечивает резонансная настройка датчиков устройства ориентации.

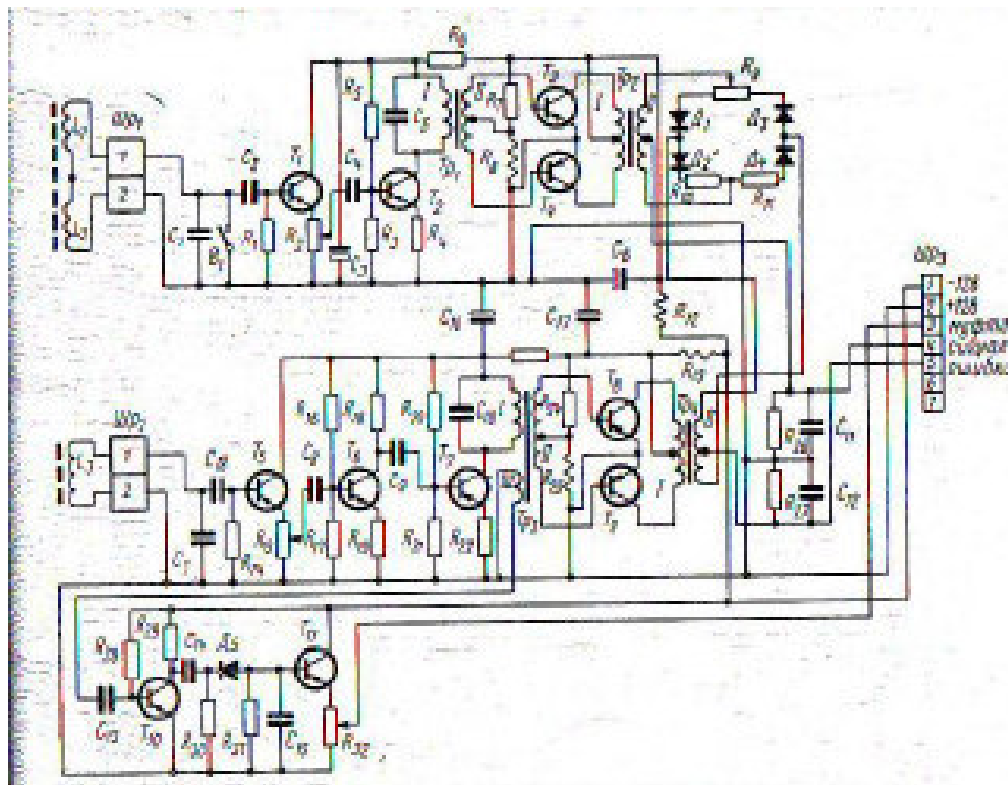


Рисунок 7. Принципиальная схема чувствительного элемента

Повышение помехоустойчивости в фазочувствительном детекторе и диапазон захвата системы ориентации тем больше, чем больше отношение амплитуды опорного напряжения к амплитуде сигнального напряжения. Поэтому опорный усилитель рассчитывают на большую выходную мощность, чем сигнальный. Например, если применяется фазочувствительный детектор однополупериодным выпрямителем, то требуемое отношение выходных мощностей усилителей должно быть не менее 5 - 10. Усилители, как правило, выполняются на транзисторах. Схема чувствительного элемента показана на рис. 7.

Катушки  $L_1$  и  $L_2$  расположены в горизонтальной плоскости на расстоянии 0,7 м от продольной оси самоходной машины. Если эта ось находится над проводом, то напряжение на выходе датчика равно нулю. При отклонении машины в ту или иную сторону от провода на одной катушке напряжение увеличивается, а на другой уменьшается и на выходных концах появляется разностное напряжение, фаза которого зависит от отклонения вправо или влево.

Катушки  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  изготовлены на сердечниках из трансформаторной стали. Они помещены в эбонитовые кожухи и залиты церезином, благодаря чему достигается требуемая механическая прочность и влагоизоляция.

С катушек  $L_1$  и  $L_2$  напряжение поступает на эмиттерный повторитель  $T_1$ . Большое входное сопротивление триода обеспечивает высокую добротность контура  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C_1$ , резонансная кривая которого представлена на рис. 8.

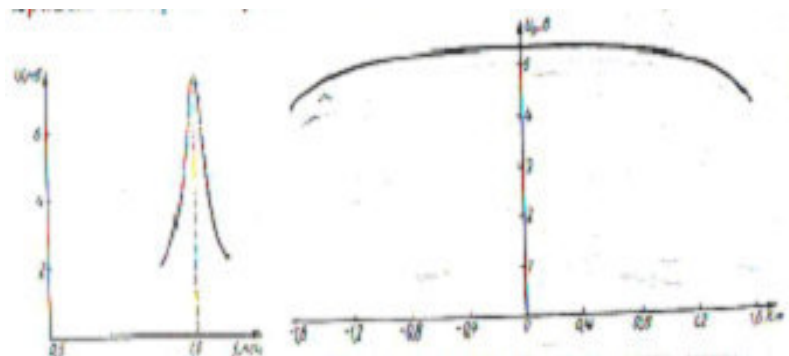


Рисунок 8. Частотная характеристика датчика

Рисунок 9. Характеристика опорного канала

Нагрузкой эмиттерного повторителя служит потенциометр  $R_2$ , с помощью которого изменяется коэффициент усиления сигнального канала. Далее сигнал усиливается каскадом, собранным на триоде  $T_2$ . Коллекторной нагрузкой каскада служит трансформатор  $Tr_2$ . Температурная стабилизация и выбор рабочей точки производится сопротивлением  $R_3, R_4, R_5$ . Первичная обмотка настроена на частоту 1000 Гц.

Усилитель мощности собран на триодах  $T_3$  и  $T_4$  и работает в режиме «В». Нагрузкой усилителя мощности служит кольцевой детектор на диодах  $D_1-D_4$ . Опорный канал собран на триодах  $T_8$  и  $T_9$ .

Триоды  $T_7, T_8, T_9$  ограничивают напряжение синусоидальной формы, преобразуя сигналы в прямоугольное колебание 1000 Гц. Благодаря этому величина опорного напряжения в пределах рабочей полосы отклонения не изменяется по амплитуде (рис. 9). Прямоугольное напряжение поступает на кольцевой детектор  $D_1-D_4$ , обеспечивающий высокую помехозащищенность схемы и разделение сигналов отклонения по фазе. Для балансировки моста в схеме предусмотрен потенциометр  $R_9$ . Балансировка чувствительного элемента производится при закороченном входе сигнального канала (тумблером  $B_2$ ). Опорное напряжение равно 5 В. При этом напряжении диоды полностью открываются в соответствующие периоды.

На рис. 10, а и б показаны выходные характеристики чувствительного элемента при разной высоте  $h$  катушек над проводом и различном расстоянии между сигнальными катушками (ток в линии 400 мА).

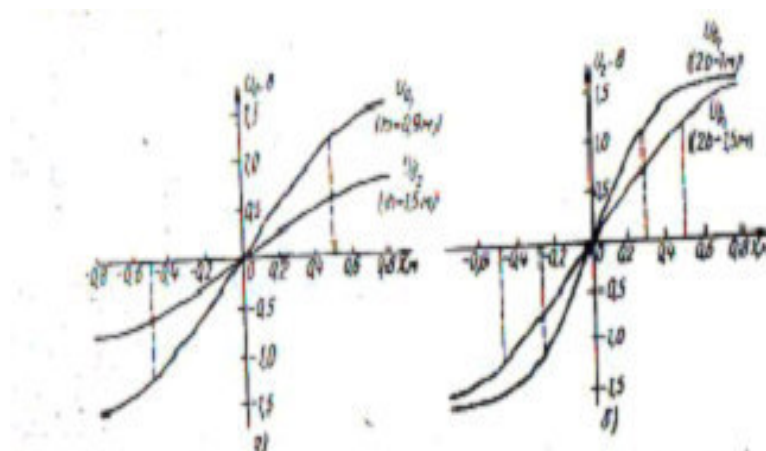


Рисунок 10. Выходные характеристики чувствительного элемента:

а – при разной высоте катушек над проводом;

б – при различном расстоянии между сигнальными катушками

Из этих графиков видно, что с уменьшением расстояния между катушками уменьшается зона линейности между  $U_a$  и расстоянием отклонения от центра  $x_0$ . В

пределах отклонения  $x < 0,5$  м чувствительный элемент можно линеаризовать и считать его линейным звеном ( $U_o = kx$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности;  $x$  - отклонение от провода).

Таким образом в чувствительном элементе вырабатывается электрическое напряжение, которое характеризует величину и направление отклонения машины от заданной траектории.

Рассмотрим принцип работы индукционного чувствительного элемента для дороги, вдоль которой проложены витки провода, возбуждающиеся за счет генератора на самоходной машине. В этом случае катушки чувствительного элемента и возбудители расположены во взаимно перпендикулярных осях. Причем катушка возбудителя имеет магнитную ось, перпендикулярную полотну дороги (вдоль оси  $z$ ), а катушки чувствительного элемента — перпендикулярную направлению движения (вдоль оси  $x$ ).

Для того чтобы упростить анализ, выбрана система координат с началом в центре витка. Кроме того, предполагается, что элементы, образующие витки, имеют незначительный диаметр и магнитная проницаемость постоянна.

При неизменном токе возбуждения можно допустить, что величина тока  $I$  пропорциональна  $G$ . Аналогично величина сигнала на выходе чувствительного элемента  $U_x$  будет пропорциональна  $B_n$  или  $Fl$ .

Следовательно, 
$$U_x = kFG,$$
 где  $k$  - коэффициент пропорциональности.

На рис. 11 показаны относительные величины амплитуды сигнала  $U_x/U_{max}$  как функции и  $x/a$  при различных  $z/a$ . Сигнал будет симметричен относительно нулевого положения и изменять свою фазу на  $180^\circ$  при переходе через нуль. Максимум сигнала будет в точке, где  $x/a < l$ . Величина  $U_{max}$  зависит от  $z/a$ . Это необходимо учитывать, так как имеются магнитные поля («шум»), создаваемые другими металлическими предметами.

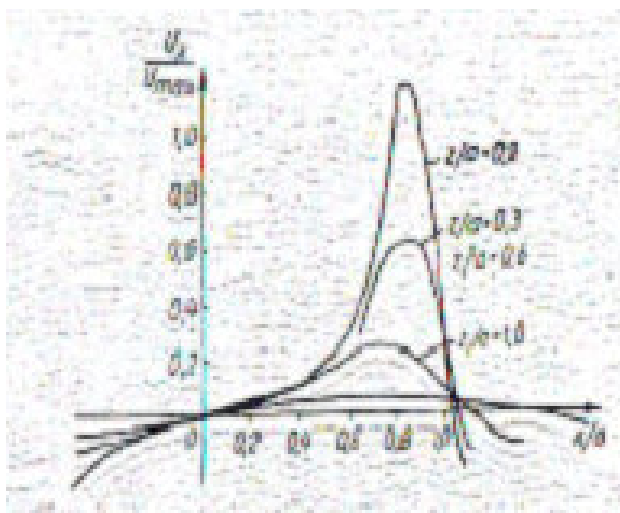


Рисунок 11. Характеристика чувствительного элемента

Если расположить третью катушку с магнитной осью вдоль оси  $y$ , то в ней будет наводиться э. д. с., пропорциональная скорости. Сигнал скорости равен нулю, когда катушка находится на продольной оси симметрии относительно петли, изменяя свою фазу на  $180^\circ$  при пересечении точки симметрии.

Рассмотренные чувствительные элементы вырабатывали сигнал ошибки, пропорциональный расстоянию одной из точек самоходной машины от заданной траектории. Однако эта входная координата не определяет полностью положение машины относительно заданной траектории. Несмотря на то, что сигнал ошибки, определенный в точке  $X$ , равен нулю, положение самоходной машины не соответствует заданному. Оно

будет известно, если дополнительно определены координаты  $x_1$  и  $x_2$  или координата  $x_1$  и угол альфа между касательной к траектории и рамой машины (рис. 12, а и б).

Для машины с управляемыми передними колесами наряду с координатами  $x_1$  и  $x_2$ , (или  $\alpha$ ) важное значение имеет угол  $\varphi$  между передними колёсами и рамой машины.

Для колёсной машины с шарнирно-сочленённой рамой, кроме координат  $x_1$  и  $x_2$ , должен быть определён угол слома.

Сложность вождения самоходной машины заключается в том, что у нее имеется один орган управления, который должен фактически изменить несколько выходных координат. На практике сигнал ошибки определяется несколькими способами.

По первому способу сигнал ошибки определяется с помощью чувствительных элементов, которые измеряют отклонения точки на продольной оси симметрии машины, вынесенной вперед на расстояние  $i_1$  относительно центра тяжести. Тогда сигнал ошибки будет равен (см. рис. 12).

$$s(t) = f(x, \alpha)$$

где  $x$  – координата центра тяжести.

$$x = x_0 + R \sin \alpha$$

а при малых значениях  $\alpha$

$$x = x_0 + R \alpha$$

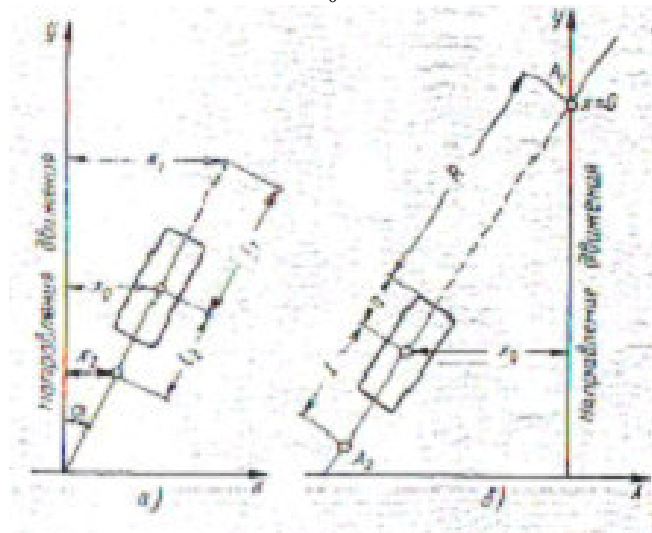


Рисунок 12. Схема движения объекта относительно заданной траектории: а – первое положение; б – второе положение

Таким образом, сигнал ошибки зависит как от поперечного смещения машины, так и от угла между продольной осью объекта и касательной к его траектории.

На рис. 12, б показано второе положение машины, когда сигнал ошибки равен нулю, несмотря на то, что объект не находится на траектории (ось Y).

Другой способ определения сигнала ошибки заключается в раздельном измерении отклонения одной из точек машины и непосредственного измерения курсового угла  $\alpha$ .

Курсовой угол можно вычислить следующими методами:

1. Угол  $\alpha$  определяется с помощью устройства, блок-схема которого показана на рис. 12. Отсюда следует, что

$$\sin \alpha = \frac{x_1 - x_2}{a} \text{ и } a = O_1 O_2$$

при малых углах  $\sin \alpha = \alpha$  и  $\alpha = \frac{x_1 - x_2}{a}$

2. При индукционной системе ориентации курсовой угол определяется с помощью катушки, у которой плоскость витка, как показано на рис. 12, перпендикулярна кабелю (направлению движения).

Напряжение в этой катушке

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{\kappa h}{d^2 + h^2} \sin \beta \cos \omega t$$

$$\kappa = \frac{\mu g I \omega}{2\pi}$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость воздуха;

$I$  – амплитуда тока в линии;

$\omega$  – частота тока в линии;

$\nu$  – число витков в катушке;

$d$  – расстояние витка от опорной линии;

$h$  – расстояние центра витка от провода;

$\beta$  – угол между витком и направлением движения.

При  $\beta \ll 10$   $\sin \beta \approx \beta$ . Поэтому напряжение в катушке пропорционально курсовому углу. Напряжение на выходе этой катушки зависит от отклонения катушки от опорной линии (рис. 11).

Рассмотрим следующий способ получения сигналов ошибки для систем автоматического вождения.

Обозначим расстояние передней и задней антенн объекта от заданной траектории через  $x_1$  и  $x_2$ , расстояние от ц. т. до задней антенны —  $l_2$  соответственно рис. 12, а;

Величины  $x_1$  и  $x_2$  позволяют полностью определить положение объекта относительно заданной траектории

$$x = \frac{x_1}{1 + \frac{l_1}{l_2}} + \frac{x_2}{1 + \frac{l_2}{l_1}}; \quad a = \frac{x_1 - x_2}{l_1 + l_2}$$

Рассмотренный способ определения положения объекта позволяет довольно просто получить информацию о величинах

$$x; \quad \frac{dx}{dt}, \quad \alpha \text{ и } \int \alpha dt$$

Рассмотрим сигнал  $\varepsilon = \kappa_1 x_1 - \kappa_2 x_2$

где  $\kappa_1, \kappa_2$  – коэффициенты пропорциональности.

Из рис. 13, а видно, что

$$\varepsilon = \kappa_1(x + l_1\alpha) - \kappa_2(x - l_2\alpha) = (\kappa_1 - \kappa_2)x + (\kappa_1 l_1 + \kappa_2 l_2)\alpha$$

Учитывая поступательное движение объекта

$$\alpha \approx \frac{1}{U} \cdot \frac{dx}{dt}$$

получим окончательно

$$\varepsilon = (k_1 - k_2) \cdot x + \frac{k_1 l_1 + k_2 l_2}{U} \cdot \frac{dx}{dt}$$

Следовательно, при таком способе вырабатывается сигнал, состоящий из двух компонентов, пропорциональных отклонению и скорости отклонения с коэффициентами,

соответственно равными  $(k_1 - k_2)$  и  $\frac{k_1 l_1 + k_2 l_2}{U}$

Применительно к вращательному движению при таком способе вырабатывается сигнал

$$\varepsilon = (k_1 l_1 + k_2 l_2)\alpha + (k_1 - k_2)U \int \alpha dt$$

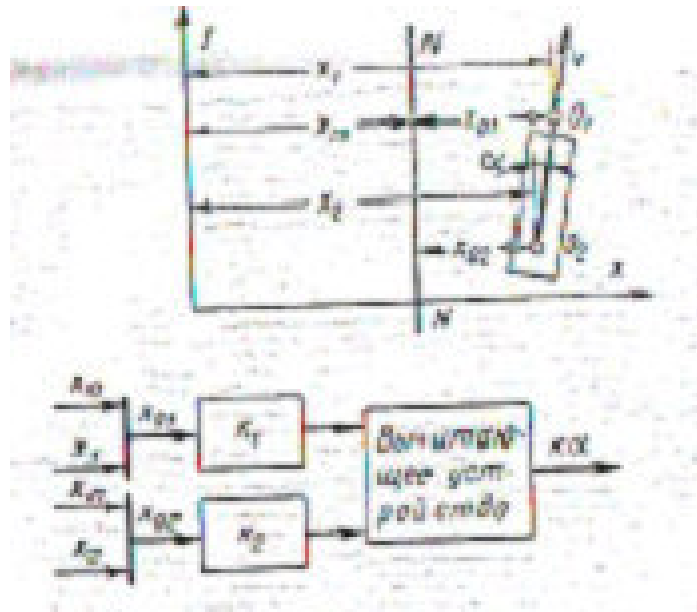


Рисунок 13. Способ неавтономного определения курсового угла

Следовательно, сигнал также состоит из двух компонентов, пропорциональных угловому отклонению и интегралу от него с коэффициентами пропорциональности соответственно равными  $(k_1 l_1 - k_2 l_2)$  и  $(k_1 - k_2)U$ .

Рассмотрим, какой должна быть траектория движения объекта, чтобы в любой точке  $\varepsilon = 0$  при различных соотношениях коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ .

**1 случай.** Если  $k_1 > k_2$ , то, получив возмущение  $x(0) \neq 0$ , для удовлетворения равенства объект должен перемещаться так, чтобы ц. т. двигался по экспоненте асимптотически приближаясь к заданной траектории. В этом случае уравнение движения имеет вид

$$\frac{k_1 l_1 + k_2 l_2}{U} \cdot \frac{dx}{dt} + (k_1 - k_2) \cdot x = 0$$

Следовательно, если система регулирования будет стремиться к выполнению такого движения, при котором ошибка  $\varepsilon = 0$ , то объект опишет траекторию, близкую к экспоненте.

**2 случай.** Если  $k_1 = k_2$ , то, получив возмущение  $x(0) \neq 0$ , для удовлетворения равенства  $\varepsilon = 0$  объект должен перемещаться так, чтобы ц. т. двигался по линии, параллельной заданной траектории:

$$\frac{k_1 l_1 + k_2 l_2}{U} \cdot \frac{dx}{dt} = 0$$

Следовательно, если система регулирования будет стремиться к выполнению такого движения, при  $\varepsilon = 0$  котором, то ц. т. объекта опишет траекторию, параллельную заданной и отстоящую от нее на величину  $x(0)$ .

**3 случай.** Если  $k_1 < k_2$ , то по мере движения объект будет уходить от заданной траектории (система расходится). Поэтому этот случай интереса не представляет.

Рассмотрим способ установки датчиков для получения сигналов ошибки, при котором передняя антенна поворачивается вместе с передними колесами.

Обозначим расстояние передней и задней антенн объекта от заданной траектории через  $x_1$  и  $x_2$ , расстояние от передней оси  $a$ , расстояние от ц. т. до задней антенны  $l$  (рис. 13, б).

В этом случае величины  $x$  и  $a$  имеют следующие значения:

$$\tilde{o} = \tilde{o}_2 + \frac{(\tilde{o}_1 + R \sin \varphi - x_2) \cdot (a + R)}{a + R + l}$$



$$a = \frac{\ddot{\alpha}_1 + R \sin \varphi - x_2}{a + R + l}$$

Рассмотрим сигнал  $\varepsilon = k_1 x_1 - k_2 x_2$ , где  $k_1, k_2$  – коэффициенты пропорциональности. Из рис. 14, б видно, что

$$\varepsilon = (k_1 + k_2) \cdot x + [k_1 \cdot (a + R) + k_2 l] \cdot \alpha - R\varphi$$

Ввиду малости  $\alpha$  принимаем  $\sin \alpha \approx \alpha$ . Учитывая поступательное движение объекта  $\alpha \approx \frac{1}{U} \cdot \frac{dx}{dt}$  получаем

$$\varepsilon = (k_1 - k_2) \cdot x + \left[ \frac{k_1 \cdot (a + R) + k_2 l}{U} \right] \cdot \frac{dx}{dt} - R\varphi$$

Следовательно, при таком способе вырабатывается сигнал с коэффициентами пропорциональности

$$(k_1 - k_2); \quad \frac{k_1 \cdot (a + R) + k_2 l}{U}; \quad R$$

Рассмотрим, какой должна быть траектория движения объекта, чтобы в любой точке при различных соотношениях  $k_1$  и  $k_2$  выполнялось равенство  $\varepsilon = 0$ .

Запишем условие движения для этого случая (рис. 15)

$$\frac{k_1 \cdot (a + R) + k_2 l}{U} \cdot \frac{dx}{dt} + x = \frac{R}{k_1 - k_2} \cdot \varphi$$

Другой способ определения положения объекта относительно заданной траектории показан на рис. 16.

Здесь входным сигналом является угол между продольной осью машины и линией видимости к точке А на расстоянии  $l$  заданной траектории. Эта система типа радар, определяющая будущее положение самоходной машины, напоминает действие водителя. Реализация этого способа на практике связана с большими трудностями и экономически нецелесообразна.

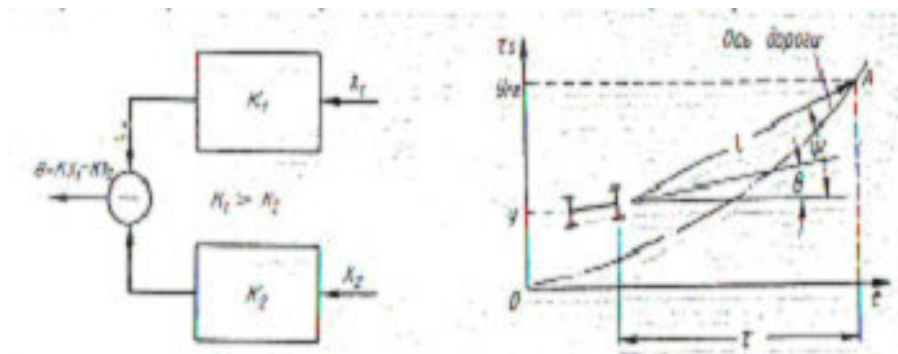


Рисунок 15.  
Блок-схема

экспоненциального измерительного устройства

Рисунок 16. Схема системы типа радар

Выбор способа построения чувствительного элемента связан с требуемым диапазоном рабочих скоростей движения. При скорости самоходной машины до 20 - 28 км/ч хорошие результаты можно получить с чувствительным элементом, работающем по первому способу. На более высоких скоростях целесообразно применять чувствительные элементы, построенные по второму и третьему способам. Экспотенциальный чувствительный элемент позволяет осуществлять автоматическое вождение даже при скоростях 90 - 100 км/ч.

### 3.2 Усилительные и преобразующие устройства.



Чувствительные элементы вырабатывают сигналы, которые характеризуют величину и направление отклонения самоходной машины от заданной траектории. В гусеничных машинах эти сигналы должны преобразовываться в механическую энергию, необходимую для перемещения рычагов управления, а в колесных машинах - в механическую энергию поворота передних колес. Поэтому эти слабые сигналы от чувствительных элементов необходимо усиливать.

Как известно, усилительные устройства могут быть разделены на механические, пневматические, электрические, гидравлические и комбинированные.

При выборе того или иного усилительного устройства необходимо руководствоваться практическими соображениями о простоте конструкции, надежности, ресурсе и условиях его работы.

При решении задачи автоматизации вождения самоходных машин необходимо рассмотреть источники энергии для них. На большинстве современных гусеничных и колесных машин имеются гидравлические насосы, генераторы постоянного и переменного тока и компрессоры. Мощность гидравлических насосов находится в пределах 1,2 – 8 кВт. Мощность генераторов постоянного тока обычно не более 400 Вт. Поэтому в качестве усилителей мощности целесообразно применять электрогидравлические устройства. Вместе с тем, во многих случаях целесообразно использовать электромеханические приводы. Например, переключение передач на самоходной машине иногда производится с помощью электродвигателей (работы НАМИ).

Усиление и преобразование маломощных сигналов производится в основном с помощью электронных схем.

Сигналы большинства чувствительных элементов, применяемых в автоматике, как правило, представляют собой медленно изменяющиеся потенциалы, спектры частот которых простираются в области низких и инфранизких частот, занимая примерно диапазон  $10^{-2} - 10^{-4}$  Гц. Наиболее освоены, надёжны и просты усилители, которые работают в диапазоне  $10 - 10^4$  Гц. Поэтому становится необходимым перенести спектр сигнала в область более высоких частот. Такое преобразование низкочастотного сигнала в сигнал более высокой частоты осуществляется модуляторами.

Среди различных способов построения модуляторов в схемах автоматики получили широкое распространение электромеханические вибраторы, схемы с магнитными, ламповыми, диодными и транзисторными модуляторами.

Для сравнения заметим, что ламповые модуляторы могут преобразовывать напряжение постоянного тока порядка 100 мВ и выше, диодные — сигналы порядка 100 мВ. Транзисторные модуляторы хорошо работают при входных напряжениях порядка 1 - 5 мВ и, наконец, вибропреобразователи могут использоваться для преобразования единиц и долей микровольт.

Низкочастотные сигналы из модулированного колебания проще всего выделить с помощью выпрямителя. Высокочастотные составляющие отделяются фильтром. Изменение на  $180^\circ$  фазы модулированного напряжения (т. е. изменение полярности входного сигнала модулятора) можно определить сравнивая фазу модулированного напряжения с напряжением опорной частоты того же источника, от которого питается модулятор. В системах автоматики чаще всего применяются выпрямители, у которых полярность выходного напряжения должна зависеть от фазы, а величина от амплитуды входного напряжения. Подобного рода демодуляторы называют фазочувствительными выпрямителями или фазочувствительными усилителями-выпрямителями.

Так же, как и в схемах модуляторов, для построения фазочувствительных выпрямителей используют контактные вибропреобразователи, вакуумные и полупроводниковые диоды и триоды.

Важным преимуществом фазочувствительного детектора является то, что он повышает помехоустойчивость, подавляя несинхронные помехи тем больше, чем больше амплитуда опорного напряжения и форма его ближе к прямоугольной. Поэтому они нашли широкое применение в системах автоматического вождения самоходных машин.

В системах автоматического вождения используются импульсные элементы. Так мультивибраторы применяются как генераторы импульсов почти прямоугольной формы сравнительно большой длительности. Они используются как задающие генераторы, делители частоты и т. д.

Полупроводниковые триггеры широко применяются в качестве электронных реле, формирователей напряжения прямоугольной формы, схем сравнения и т. п.

Основными специфическими требованиями, предъявляемыми к триггерам, являются надежность пуска, устойчивость его двух состояний и быстродействие.

Первое требование удовлетворяется правильным выбором схемы пуска и параметров пускающих импульсов; второе - выбором транзисторов, схемы и правильным расчетом параметров триггера в статическом режиме; третье - выбором транзисторов и правильным расчетом параметров элементов схемы триггера, определяющих его динамические свойства.

В импульсных системах автоматического управления самоходными машинами применяют управляемые генераторы. Основные преимущества генераторов пилообразного напряжения - высокая линейность, большой динамический диапазон - позволяют применять их в системах автоматического управления применение гидроусилители типа сопло -заслонка.

Получение пилообразного напряжения с помощью полупроводниковых генераторов основано на заряде конденсатора почти постоянным по величине током. Различают заторможенные (ждущие) генераторы и генераторы, работающие в режиме автоколебаний. Заторможенные генераторы делятся на управляемые и запускаемые. Первые управляются импульсами прямоугольной формы с длительностью, равной времени рабочего хода, а вторые запускаются короткими синхронизирующими импульсами.

Высокоэффективные генераторы с управляемыми транзисторами представляют собой усилители постоянного тока, в цепи обратной связи которых включены интегрирующие цепи  $RC$ .

В качестве усилителей широкое распространение получили гидравлические и электрогидравлические золотники, а также струйные трубки. В системах автоматики находят также применение гидроусилители типа сопло-заслонка.

Гидроусилитель типа сопло-заслонка отмечается высокой чувствительностью, быстродействием, стабильностью характеристики при изменении температуры и большим давлением для преодоления нагрузок при смещении золотника. Недостатком такого гидроусилителя является значительный расход жидкости через сопло, что приводит к увеличению мощности нагнетающей гидросистемы и снижению к. п. д.

К достоинствам гидроусилителей следует отнести: высокие динамические свойства, непропускание возмущающих реакций гидродинамических сил в обратном направлении, компактность и простоту конструкции, надежность и высокий коэффициент усиления.

Пневматические золотниковые усилители по устройству и принципу действия не отличаются от аналогичных гидравлических золотниковых усилителей. Золотниковые усилители применяются либо в виде однокаскадных или двухкаскадных золотников, либо в виде отслеживающего золотника в двухкаскадном струйном усилителе. Эти усилители отличаются простой конструкцией, имеют высокий коэффициент усиления по мощности. Схемы струйных пневматических усилителей, работающих на сжатом газе, не отличаются от схем гидравлических струйных усилителей, а характеристики и методика их расчета отличается от них существенно.

Пневматические усилители до последнего времени применяли реже, чем гидравлические. За последние годы разработана универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭПА).

Применение элементного принципа дает возможность реализовать управление любой сложности: строить разнообразные управляющие устройства непрерывного и дискретного действия, собирать сложные релейные схемы.

Система состоит из усилителей, реле, сопротивлений, емкостей и других аналогов электрической и электронной аппаратуры. Все эти элементы выполняют лишь простейшие функции и не содержат внутренних коммутаций, поэтому они малогабаритны, довольно просты по устройству, их легко наладить. Монтаж элементов в схемы ведут на специальных коммутационных пластинах (платах), внутри которых проходят каналы, необходимые для соединения всех элементов в единую схему. Для крепления, коммутирования с платой и, если нужно, подключения контрольных приборов во время наладки все элементы снабжены коммуникационными ножками.

Наряду с этим разработана система модулей струйной техники (СМСТ), предназначенные для построения различных дискретных и аналоговых пневматических систем автоматики. Принципы струйной автоматики, называемой также пневмоникой, коренным образом отличаются от всех известных ранее принципов построения пневматических приборов и систем автоматики. Приборы пневмоники имеют высокую надежность эксплуатации, достигаемую тем, что все операции в приборах выполняются на потоках без использования подвижных механических частей.

Счетчик, построенный на СМСТ, имеет ресурс работы более 100 млн переключений и низкое давление питания - 100 - 200 мм вод. ст. Мощность, потребляемая одним элементом, порядка 0,02 Вт.

Изменение рабочих температур допускается в широких пределах при обеспечении пожаро- и взрывобезопасности. Быстродействие СМСТ составляет величину порядка 1 кГц. Приборы пневмоники собирают из конечного числа блоков функционального назначения - модулей, построенных на струйных элементах. Каждый из элементов модуля выполняет такую же функцию, как и соответствующий элемент системы УСЭППА.

### 3.3 Исполнительные элементы.

Они служат для осуществления регулирующего воздействия, прикладываемого к регулирующему органу объекта регулирования. Можно считать, что исполнительные элементы состоят из трех основных частей: сервомотора, источника питания и нагрузки. В зависимости от вида сервомотора они разделяются на электрические исполнительные элементы (с двигателем постоянного тока, с двигателем переменного тока, с электромагнитными муфтами), гидравлические и пневматические.

В системах автоматического управления в качестве исполнительных элементов широко используются гидравлические или пневматические сервомоторы — силовые элементы, преобразующие энергию потока жидкости или газа (воздуха) в механическую энергию перемещения поршня, поворота лопасти или вращения выходного вала.

Гидравлические и пневматические сервомоторы просты по конструкции, надежны в работе, они отличаются небольшими размерами, долговечностью и наряду с этим обеспечивают весьма большие перестановочные усилия. Такие сервомоторы имеют небольшую инерционность, так как масса их подвижных частей мала. Полоса пропускания частот гидравлических и пневматических сервомоторов достаточно велика. Наконец, в них легко достигается любое изменение скорости их перемещения - от нулевой до максимальной расчетной. Благодаря перечисленным свойствам сервомоторы удобны для использования в системах автоматического регулирования. Из гидравлических сервомоторов наиболее распространены поршневые, лопастные и роторные.

#### Корректирующие устройства.

Для обеспечения устойчивости и надлежащего качества переходного процесса в систему автоматического вождения включают корректирующие устройства. Корректирующие звенья могут вводиться в систему автоматического вождения различными способами: последовательно, параллельно.

На рис. 17, а представлена схема введения в цепь регулирования корректирующего устройства последовательного типа.

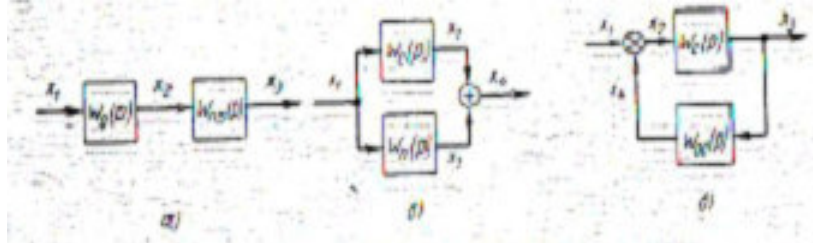
В этом случае результирующая передаточная функция имеет вид

$$W_{\tilde{n}e}(\delta) = \frac{x_3}{x_1} = \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{x_3}{x_2} = W_c(p) \cdot W_i(\delta)$$

где  $W_c(p)$  - передаточная функция части цепи регулирования;

$W_i(p)$  - передаточная функция последовательного корректирующего звена.

На рис. 17, б представлена схема введения в цепь регулирования корректирующего устройства



параллельного типа, имеющего передаточную функцию  $W_n(p)$ .

Рисунок 17. Схема соединения корректирующих звеньев

Результирующая передаточная функция в этом случае имеет вид

$$W_{\tilde{n}e}(\delta) = \frac{x_4}{x_1} = \frac{x_2}{x_1} + \frac{x_3}{x_4} = W_c(p) + W_i(\delta)$$

Рассмотрим корректирующее устройство, выполненное в виде местной обратной связи (рис. 17, в), на вход звена с передаточной функцией  $W_c(p)$  поступает сигнал  $x_2$  равный сумме или разности входного сигнала  $x_1$  и сигнала  $x_4$ , поступающего по цепи обратной связи  $x_2 = x_1 \pm x_4$ .

Знак плюс соответствует положительной обратной связи, а знак минус - отрицательной. Сигнал обратной связи

$$x_4 = W_c(p) \cdot x_3$$

Поэтому

$$x_4 = W_c(p) \cdot x_2 = W_c(p) \cdot [x_1 \pm W_{ci}(p) \cdot x_3]$$

или

$$x_3 = [1 \pm W_c(p) \cdot W_{ci}(p)] = W_c(p) \cdot x_1$$

Отсюда можно найти результирующую передаточную функцию

$$W_{\tilde{n}e}(\delta) = \frac{x_3}{x_1} = \frac{W_c(p)}{1 \pm W_c(p) \cdot W_{ci}(\delta)}$$

В этом выражении знак минус соответствует положительной обратной связи, а знак плюс отрицательной.

Использование того или иного типа корректирующего устройства (последовательных и параллельных звеньев или обратных связей) определяется удобством их технического осуществления.

Звенья последовательного типа удобно применять в тех случаях, когда в системе регулирования используется электрический сигнал в виде напряжения постоянного тока, величина которого функционально связана с сигналом ошибки  $u = f(x)$ , например линейной зависимостью  $u = kx$ . Тогда корректирующее звено может быть осуществлено при помощи  $R$ ,  $C$ ,  $L$  - элементов. Для последовательных корректирующих устройств улучшение динамических свойств отдельных элементов или всей системы регулирования связано с введением в закон управления воздействия по первой и высшей производным.

Звенья параллельного типа применяют, когда необходимо осуществить сложный закон регулирования с ведением интегралов и производных от сигнала ошибки. Для параллельных корректирующих устройств улучшение динамических свойств одного или группы элементов основано на уменьшении влияния постоянных времени и коэффициентов усиления. Кроме того можно использовать внутренние отрицательные обратные связи для улучшения динамических характеристик отдельных элементов путем относительного дифференцирования.

Наиболее широко применяются обратные связи. Это объясняется тем, что на вход обратной связи поступает сигнал высокого уровня, часто даже непосредственно с выхода системы регулирования, промежуточного серводвигателя или выходного каскада усилителя.

Кроме того, корректирующие устройства различного типа оказывают различное влияние на содержание в системе нелинейности. Если обратная связь охватывает участок канала регулирования, содержащий какую-либо нелинейность, например силы трения, зону нечувствительности и т. п., то влияние этой нелинейности на протекание процессов в системе автоматического вождения меняется существенным образом. Отрицательные обратные связи обладают свойством уменьшать влияние нелинейности тех участков цепи регулирования, которые ими охватываются.

Из корректирующих звеньев последовательного типа применяются: пассивное интегрирующее звено, пассивное дифференцирующее звено, пассивное интегродифференцирующее звено, а из звеньев параллельного типа - изодромные устройства.

Звенья дифференцирующего типа включают параллельно основной цепи для обеспечения устойчивости.

Введение параллельных корректирующих звеньев, представляющих собой интеграторы, соответствуют поднятию нижних частот. Введение параллельных корректирующих звеньев, представляющих собой дифференциаторы, соответствуют поднятию верхних частот.

Далее рассмотрим обратные связи. Как уже отмечалось выше, обратные связи могут быть положительными и отрицательными. Кроме того, обратные связи могут быть жесткими и гибкими. Гибкая обратная связь действует только в переходных режимах, а в установившемся режиме они как бы отключаются. Если обратная связь действует не только в переходном, но и в установившемся режиме, то её называют жесткой.

Можно выделить три основных вида отрицательных обратных связей:

1. Обратные связи, подавляющие высокие частоты (аналоги пассивного последовательного интегрирующего звена).
2. Обратные связи, подавляющие низкие частоты (аналоги пассивного последовательного дифференцирующего звена).
3. Обратные связи, подавляющие средние частоты (аналоги пассивного последовательного интегродифференцирующего звена).

Установить аналогию обратной связи с тем или иным последовательным корректирующим звеном можно при помощи формул перехода. Особенно важно иметь возможность перехода от последовательного корректирующего звена к эквивалентной обратной связи. Это определяется тем, что расчетным путем наиболее просто определить параметры последовательного корректирующего звена, а точки зрения технического осуществления наиболее удобны обратные связи.

Отрицательные корректирующие обратные связи очень часто используются для охвата исполнительных двигателей.

Положительные обратные связи находят значительно меньшее распространение как корректирующие средства по сравнению с отрицательными. Положительные обратные связи применяются в качестве так называемых корректоров ошибки, а также в магнитных усилителях для уменьшения постоянных времени последних при сохранении коэффициента усиления по мощности.

В системах автоматического управления самоходными машинами применяются также различные логические переключающие устройства, выполняемые на электронных элементах.

### **1.5 Лекция № 5 (2 часа).**

**Тема:** «Общие сведения. Требования. Классификация. Виды контроля»

#### **1.5.1 Вопросы лекции:**

1. Требования к САК.
2. Классификация САК.
3. Виды контроля САК.

#### **1.5.2 Краткое содержание вопросов:**

##### **1 Требования к САК.**

Требования к САК вытекают из особенностей работы МСХМ, а также условий получения и использования информации. В общем виде их можно сформулировать так.

Системы должны быть максимально унифицированными и универсальными, чтобы номенклатура их была минимальной. От этого зависят условия эксплуатации, обслуживания и ремонта.

Развитие их должно основываться на универсализации, введении новых элементов и блоков, а не на замене новыми системами. Они должны контролировать максимальное число объектов.

Быть пригодными к работе с машинами, содержащими различные по числу и параметрам рабочие органы. Небольшое число объектов должно контролироваться малым числом датчиков.

Выдавать информацию, необходимую для принятия немедленных (или на ближайший период) решений.

Информация должна быть максимально обработана и минимальна по объему. При возможности должна выдаваться двоичная информация. При нарушении контролируемого параметра она должна поступать без вмешательства оператора; большая по объему информация может выдаваться по запросу.

Индикаторы должны размещаться на рабочем месте оператора. При большом числе контролируемых объектов часть индикаторов может располагаться вблизи объектов.

Обязательно должны использоваться звуковые индикаторы. (Они привлекают внимание оператора к визуальной информации, подаваемой САК, что дает возможность наблюдать за параметрами, не контролируемые САК.) Уровень звукового сигнала должен превышать уровень шума минимум на 6 дБ, т. е. быть выше 75 дБ. Предпочтителен сигнал с частотой 2 - 3 кГц, амплитудно или частотно модулированный.

С визуальных индикаторов должна подаваться качественная и количественная информация от объекта или группы объектов. Для воспроизведения качественной информации типа «да-нет» следует применять световые индикаторы (лампы, светодиоды), которые нужно размещать в затемненных местах и снабжать экранами, поскольку их яркость при прямом солнечном освещении недостаточна. (Хорошо воспринимается информация с мигающих индикаторов.) Если цифровые индикаторы используются для количественной информации (как индикаторы номера объекта, попавшего в аварийную ситуацию), то при большом числе контролируемых объектов существует вероятность одновременного высвечивания номеров нескольких объектов. В этом случае показания индикатора становятся неопределёнными.

Надежность САК должна значительно превышать надежность МСХМ, для которых она предназначена. При определении максимального срока службы САК необходимо исходить из ресурса МСХМ. С учетом того, что МСХМ работают сезонно, ресурс сеялок, например, составляет около 1500 ч, уборочных машин - 3000 ч.

Оператор МСХМ должен иметь возможность проверять и контролировать работу САК. Такую проверку нужно проводить в начале рабочего дня и при выявлении

отклонений. Желательно для контроля САК оснастить простым и надежным тестирующим устройством.

Информация о дефектах, выявленных при работе МСХМ, должна сохраняться, фиксироваться во время остановки машины до устранения дефекта и стираться, когда машина придёт в движение.

При аварийной остановке МСХМ все контрольные каналы САК, кроме сработавшего, должны быть заблокированы, чтобы предотвратить индикацию ложной информации, получаемой из-за прекращения работы МСХМ.

Легко монтироваться и демонтироваться (особенно на прицепных и навесных машинах, с которых она должна демонтироваться после каждой кампании).

## 2. Классификация САК.

Признаками классификации могут служить характер контролируемого процесса (периодический, квазипериодический, случайный), вид его функционирования рабочих органов, высев, потери и т. п.), принцип построения системы (дискретный, аналоговый), использованная элементная база.

САК можно классифицировать также в зависимости от характеристик объектов МСХМ или самих САК. Примем первый способ классификации, так как он связан с более общими особенностями САК. Но чтобы можно было одновременно охватить и разделить конкретные САК, в некоторых случаях следует использовать и второй способ. При этом надо иметь в виду, что одна система, как правило, обслуживает более одного объекта. За тип объекта принят самый массовый.

САК можно классифицировать в зависимости от вида МСХМ так (рис. 1): для почвообрабатывающих машин; сеялок; машин для внесения удобрений и гербицидов, для опрыскивания посевов (для краткости — машины для внесения материалов); уборочных машин, тракторов.

## 3. Виды контроля САК.

САК должны контролировать большое число однотипных (или однотипно контролируемых) объектов. (Среднее число таких объектов, например, на уборочных машинах составляло в 1980 г.  $n_{\text{ср}}=9$ ).

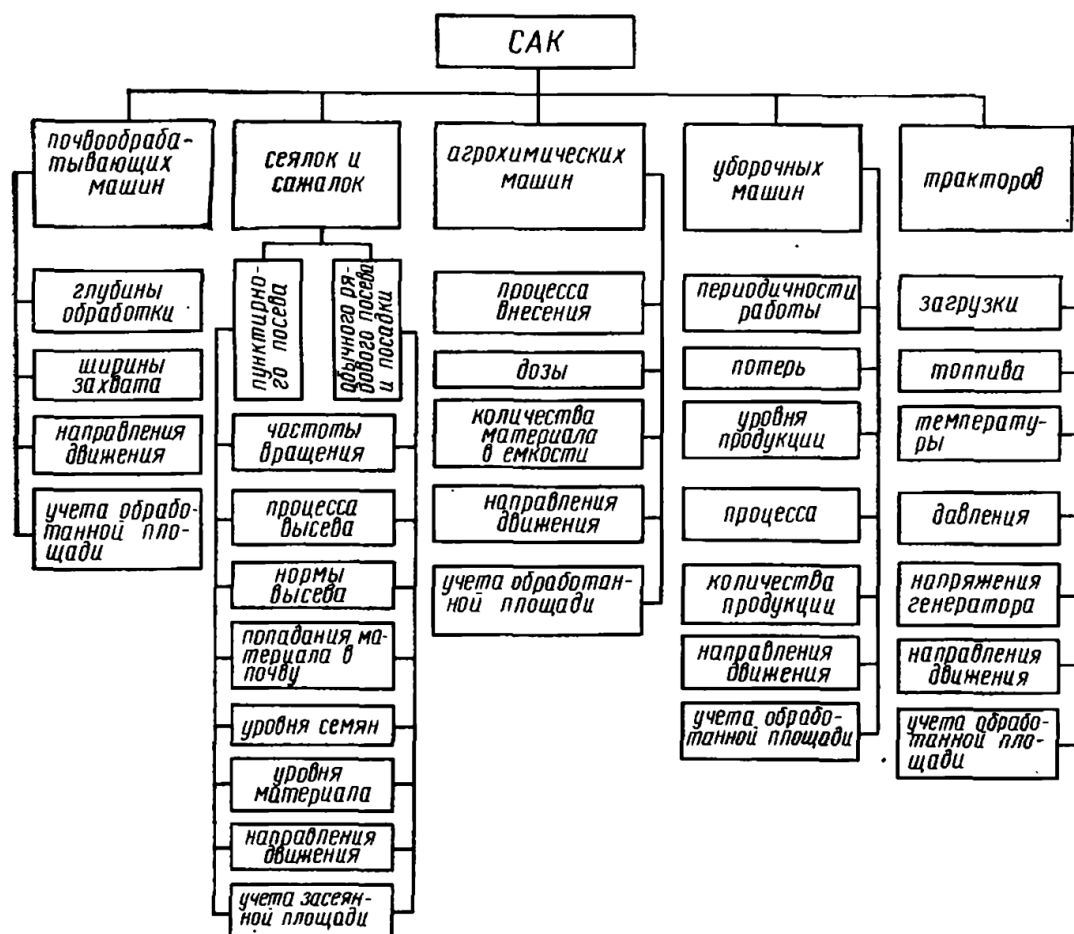


Рисунок 1. Классификация САК для пяти основных классов МСХМ.

Технико-экономические показатели системы в значительной степени зависят от вида контроля (последовательный или параллельный). Для его определения могут быть применены различные критерии: временной, экономический, критерий «надежности» и т. д. в зависимости от характера процесса, выполняемого контролируемым объектом (МСХМ).

Для примера рассмотрим уборочные машины (основной контролируемый параметр их - верхний предел периода функционирования рабочих органов), используя временной критерий. Он может быть выражен интервалом  $T_{ост}$ , равным времени от возникновения необходимости остановки до ее реализации:

$$T_{ост} = T_{сак} + T_{в} + T_{упр} + T_{и}$$

где  $T_{сак}$  - интервал времени прохождения через САК информации о необходимости остановки;

$T_{в}$  - интервал времени приема информации до остановки;

$T_{упр}$  - интервал управляющего воздействия для остановки МСХМ;

$T_{и}$  - интервал движения МСХМ по инерции после торможения.

В уборочных машинах контролируемые рабочие органы снабжены предохранительными устройствами (штифтовыми, фрикционными и т. п.), которые приводятся в действие при перегрузке рабочих органов. Время их срабатывания должно быть минимальным, чтобы перегрузки не отразились на МСХМ. Кроме того, в интервал  $T_{ост}$  МСХМ практически не убирает продукцию, что ведет к потерям.

Из составляющих  $T_{ост}$  только интервал  $T_{сак}$  зависит от типа системы контроля, поэтому его влияние на  $T_{ост}$  нужно уменьшить до минимума:

$$T_{сак} < (T_{в} + T_{упр} + T_{и})$$

Так как значения  $T_{в}$ ,  $T_{упр}$  и  $T_{и}$  в сумме не превышают 30 %, то

$$T_{сак} < 0,3 (T_{в} + T_{упр} + T_{и}).$$



Определим значения компонентов этого неравенства.

Обычно сигнал остановки принимает оператор МСХМ. Все САК подают звуковой сигнал при отклонении параметров контролируемого объекта. В некоторых системах (например, УСАК-Б и УСАК-В) номер объекта, в котором обнаружена неисправность, оператор запоминает, в более современных системах (например, УСАК-К, УСАК-КМ и др.) это делается автоматически.

Следовательно, в общем случае

$$T_{\text{во}} + T_{\text{взв}} + T_{\text{всв}}$$

где  $T_{\text{во}}$  - интервал приёма оператором (равный 0 - 0,45 с);

$T_{\text{взв}}$  - интервал приема звукового сигнала (0,15 с);

$T_{\text{всв}}$  - интервал поиска, восприятия и запоминания светового сигнала (0,30 с).

При автоматическом управляющем воздействии (исполнительный орган электромеханический или электрогидравлический)  $T_{\text{упр}} \sim 0,1$  с.

Интервал  $T_{\text{и}}$  зависит от массы  $M$ , скорости движения  $x$  в момент начала торможения и тормозного усилия  $F_{\text{тор}}$ .

Значение  $T_{\text{и}}$  может быть определено исходя из тормозного пути. Как известно, величины  $F_{\text{тор}}$ ,  $M$  и ускорение  $a$  связаны зависимостью

$$F_{\text{тор}} = M a.$$

Поскольку  $M$  постоянна, то с достаточной для расчетов точностью можно принять  $F_{\text{тор}} = \text{const}$  при  $a = \text{const}$ .

Режим торможения машины при скорости  $x$

$$dx = -a dt.$$

После интегрирования с учетом исходных условий

$$x = x_0 - a t.$$

На основании формулы (11) тормозной путь  $s_{\text{тор}}$  можно определить из выражения

$$ds_{\text{тор}} = (x_0 - a t) dt;$$

после интегрирования с учетом исходных условий

$$s_{\text{тор}} = \frac{1}{2} a T_{\text{и}}^2$$

На основании зависимости при  $x=0$  и  $t=T_{\text{и}}$  имеем

$$x_0 = a T_{\text{и}}$$

Обозначив  $X_0$ ,  $T_{\text{и}}$  и  $s_{\text{тор}}$  - параметры торможения при транспортировании, а  $X_0''$ ,  $T_{\text{и}}''$  и  $s_{\text{тор}}''$  - то же при работе, получим:

$$T_{\text{и}}'' = 2x_0'' / (x_0')^2 s_{\text{тор}}';$$

$$s_{\text{тор}}'' = s_{\text{тор}}' (x_0'' / x_0')^2$$

Найденные таким образом интервал торможения и тормозной путь значительно превышают фактические. Причина в том, что значение  $F_{\text{тор}}$  для рабочего режима больше, чем для транспортного.

Определим значения  $T_{\text{и}}''$  и  $s_{\text{тор}}''$  для комбайна КСС-100 при уборке на силос. У него  $s_{\text{тор}}' = 6$  м,  $x_0' = 20$  км/ч и  $x_0'' = 10$  км/ч. Используя выражения, получим  $T_{\text{и}}'' = 1,08$  с,  $s_{\text{тор}}'' = 1,5$  м.

В рассматриваемых САК контролируются как линейная  $x$  так и угловая  $\omega$  скорости рабочих органов, представляющие собой аналоговые величины, почти постоянные при нормальной работе и значительно уменьшающиеся при перегрузках. По некоторым причинам, в том числе экономическим, величины  $x$  и  $\omega$  контролируют с помощью параметра  $T_{\text{рон}}$  номинального периода рабочего органа.

При определении  $T_{\text{сак}}$  принимают во внимание следующее.

Максимальное значение  $T_{\text{рон}}$ , для которого целесообразен контроль рабочего органа.

Наличие предаварийной ситуации и ее особенности. Она характеризуется быстрым снижением частоты вращения рабочего- органа, которое происходит из-за перегрузки. Чтобы установить предаварийную ситуацию, принимается, что предаварийный период  $T_{\text{роа}} = (1,2 \dots 2,0) T_{\text{рон}}$ .

Метод контроля, заложенный в САК. Для этого можно использовать метод определения интервала  $T_v$  между двумя последовательными импульсами, возникающими из-за наличия характерных элементов в рабочем органе. С увеличением числа  $b$  этих элементов значения  $T_{\text{сак}}$  и  $T_{\text{вн}}=T_{\text{роа}}/b$  снижаются.

В некоторых случаях можно использовать несколько элементов, но по конструктивным соображениям их число обычно не превышает десяти. Исходя из изложенного временной интервал прохождения сигнала через САК при параллельной схеме контроля

$$T_{\text{сак пар}} = (1,2 \dots 2,0) T_{\text{рон}}/b;$$

при последовательной схеме контроля

$$T_{\text{сак посл}} = n T_{\text{сак пар}}$$

Параметры формулы варьируют в определенных границах. При оптимальных условиях, когда  $b=10$ , максимальное отклонение  $T_{\text{роа}}=2T_{\text{рон}}$  и значения  $T_v$ ,  $T_{\text{упр}}$ ,  $T_{\text{и}}$  максимальны. С помощью выражений получим

$$2 \cdot 1/10n < 0,3(0,45+1,0+1,1),$$

т. е.  $n_{\text{max посл}} < 3,9$ , из чего следует, что с точки зрения временного критерия системы с последовательным контролем использовать на уборочных машинах нецелесообразно, поскольку  $n_{\text{ср}} > n_{\text{max посл}}$ . Отсюда можно заключить, что большую часть рассматриваемых в этой работе САК целесообразно использовать как системы с параллельным контролем.

## 1.6 Лекция № 6 (2 часа).

**Тема:** «САК уборочных машин»

### 1.6.1 Вопросы лекции:

1. Система контроля потерь

### 1.6.2 Краткое содержание вопросов:

1 Система контроля потерь.

#### САК УБОРОЧНЫХ МАШИН

Большая часть этих систем (УСАК) предназначена для контроля верхнего предела периодического движения рабочих органов уборочных машин. Имеются системы для контроля потерь убираемой продукции, контроля уровня накопленного в бункерах материала и т. п. Разрабатываются системы комплексного характера, которые выполняют две и более контроль-но-измерительные функции. Рассмотрим наиболее характерные системы УСАК.

### СИСТЕМЫ, ПОСТРОЕННЫЕ НА АНАЛОГОВЫХ ПРИНЦИПАХ

#### УСАК-Б

Такая система может быть выполнена в двух вариантах в зависимости от числа ОК: УСАК-6Б (шесть ОК) и УСАК-13Б.

Рабочие импульсы в систему подают датчики В1, В2, В13 (рис. 1). В контрольном блоке 2 период рабочих импульсов сравнивается с эталонным и результаты сравнения обрабатываются, после чего поступают в индикаторный блок 3. Приспособляемость системы к различным МСХМ обеспечивает задающий блок 1, ее исправность - блок самоконтроля 4, необходимое напряжение - блок питания 5.

**Датчики**, используемые в индукционно-генераторного типа. Для их функционирования необходимо постоянное магнитное поле, наводимое в обмотке с питанием от источника постоянного тока.

**Контрольный блок.** Так как рассматриваемая система представляет собой систему с параллельным контролем, то число контрольных устройств в ней равно числу ОК. Примененный в контрольном устройстве аналоговый принцип выражается в преобразовании периода в напряжение, которое затем сравнивается с предварительно заданным. В электрической схеме для реализации этого принципа (рис. 2)  $U_0$  - постоянное

напряжение;  $K_d$  - электронный ключ, который срабатывает в такт с импульсом, поступающим от датчика;  $S$  - пороговый элемент с пороговым напряжением  $U_{гр}$ .

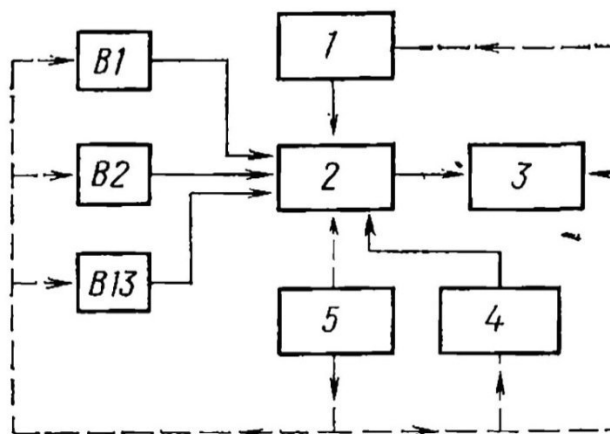


Рисунок 1. Функциональная схема УСАК-Б

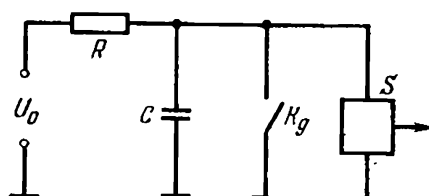


Рисунок 2. Электрическая схема устройства контроля УСАК-Б

На временной диаграмме действия электрической схемы (рис. 3) видно, как поступают импульсы от датчика (рис. 3, а). Предельный (максимально допустимый) период равен  $T_{гр}$ . При размыкании ключа  $K_d$  напряжение  $U_c$  на конденсаторе  $C$  увеличивается согласно формуле

$$U_{\bar{n}} = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

В период  $T_{гр}$  величина  $U_c$  равна

$$U_{\bar{a}D} = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_{\bar{a}D}}{\tau}}\right)$$

Когда  $T_1 < T_{гр}$  (рис. 3, а, б), то, прежде чем напряжение  $U_c$  достигнет  $U_{гр}$ , от датчика поступит импульс, в результате чего сработает ключ и разрядится конденсатор  $C$ .

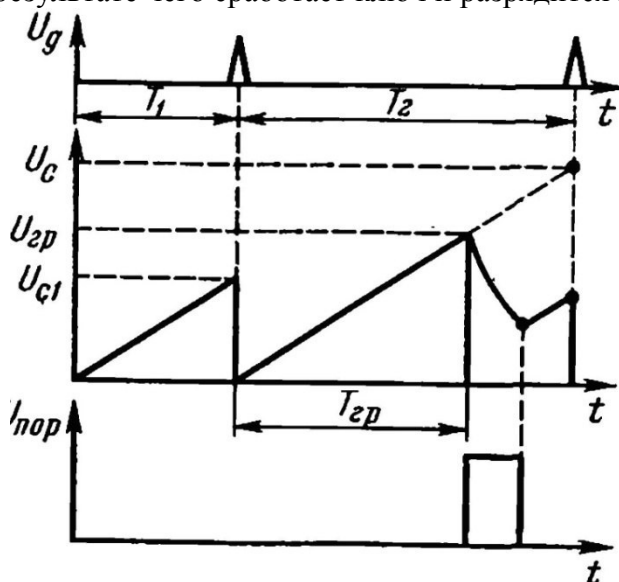


Рисунок 3. Временная диаграмма действия электрической  
схемы устройства контроля УСАК-Б

При  $T_2 > T_{гр}$  значение  $U_c$  достигает  $U_{гр}$  и вызывает срабатывание (появление  $U_{пор}$ ) порогового устройства (рис. 3, в).

Ключ  $K_d$  состоит из двух каскадов, выполненных на транзисторах VT1 и VT2 (рис. 4). Первый каскад усиливает импульсы, поступающие с датчика, до уровня срабатывания второго каскада. Резистор R4 ограничивает силу тока разрядки конденсатора C1, предохраняющего транзистор VT2 от теплового пробоя.

**Индикаторный блок** включает в себя световые и звуковые индикаторные устройства. В световом индикаторной устройстве используются тиратроны (газонаполненные ламповые триоды) типа МТХ 80 в диодном включении (анод-сетка соединены), которые одновременно играют роль порогового устройства.

При  $U_c = U_{гр}$  (см, рис. 3, б) вследствие включения тиратрона начинается разрядка конденсатора C до напряжения затухания  $U_{зат}$ , т. е. схема работает как релаксатор до поступления следующего импульса от датчика. Под действием контрольного устройства световая индикация для каждого ОК получается в виде хорошо различимых периодов зажигания тиратронов. Световые индикаторы рассматриваемых систем расположены в поле зрения оператора МСХМ. Кроме того, предусмотрена акустическая сигнализация, выполненная по схеме ИЛИ (рис. 5).

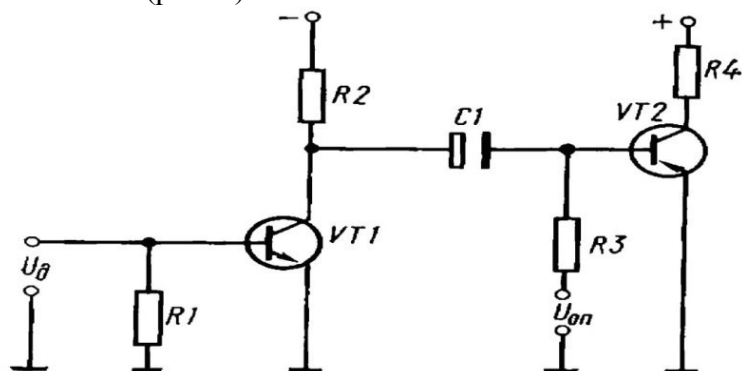


Рисунок 4. Электрическая схема электронного ключа  
устройства контроля УСАК-Б

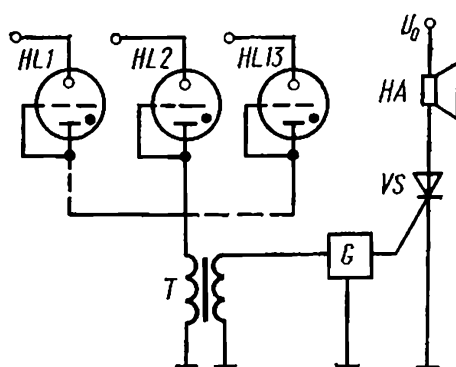


Рисунок 5. Электрическая схема звуковой сигнализации УСАК-Б

Акустическая сигнализация срабатывает от тиратронов HL1, HL2, HL13, которые вызывают импульсы тока в первичной обмотке трансформатора T и возбуждают мультивибратор G. Последний периодически открывает тиристор VS, обеспечивая срабатывание звукового сигнализатора (ЭС) HA.

В схеме ИЛИ используется трансформатор для защиты цепи ЭС, расположенной вне системы, от высокого напряжения тиратронов. Мультивибратор обеспечивает заданный период срабатывания ЭС. **Задающий блок** приспособливает систему к различным МСХМ, отличающиеся числом ОК и периодов их функционирования. Число

ОК задается переключателем, благодаря которому соответствующие контрольные устройства получают постоянное напряжение питания. При этом два первых контрольных устройства не выключаются, так как минимальное число ОК, обслуживаемых системой, равно двум.

Период  $T_{гр}$  устанавливают для разных ОК двумя способами. Один основан на использовании различного числа элементов - выступов на ОК (например, на валу барабана), причем разное число выступов соответствует разным ОК, другой позволяет задавать предельный период путем изменения напряжения  $U_c$ :

$$T_{AB} = RC \ln \left( \frac{U_0}{U_0 - U_{AB}} \right)$$

Значение  $U_0$  дискретное (задается с помощью переключателя), поэтому и период  $T_{гр}$  можно определить как дискретную величину.

**Блок питания.** Так как период  $T_{гр}$  в определенной степени зависит от  $U_0$ , то, чтобы в процессе эксплуатации сохранить значение  $T_{гр}$ , напряжение  $U_0$  должно быть постоянным. Стабильное напряжение (даже с более низким коэффициентом стабильности) необходимо поддерживать в большинстве электронных элементов. Для этого блок питания снабжен транзисторным стабилизатором и трансформатором, повышающим напряжение до уровня, необходимого при работе пороговых устройств УСАК-Б (в пределах 90 - 220 В).

**Блок самоконтроля.** С помощью такого блока можно в процессе работы проверять состояние основных блоков УСАК-Б. Для этой же цели служит генератор, работающий на частоте, превышающей частоту контролируемой системы. При подаче напряжения с такой частотой одновременно на входы всех каналов появляется сигнал «отсутствие отклонений», указывающий на нормальную работу электронной схемы (за исключением датчиков и кабеля).

#### УСАК-Б1

Система представляет собой модификацию УСАК-Б. В ее датчиках используется постоянный магнит, а не подмагничивающая обмотка, что улучшает энергетические характеристики системы, уменьшает число соединительных линий между датчиками и электронными блоками (два вместо трех) и упрощает режим работы блока питания. Имеются некоторые изменения и в других элементах схемы.

#### УСАК-В

Система выполняется в двух вариантах (по числу контролируемых каналов): УСАК-6В и УСАК-13В. Она включает в себя контрольные каналы (в них входят усилители-формирователи), транзисторные ключи, времязадающие контуры, тиратроны, стабилизатор напряжения, формирователь звуковых сигналов, преобразователь напряжения, выпрямитель, генератор и действует так же, как УСАК-Б. Различаются они способами работы транзисторных ключей в каналах и подачей напряжения на времязадающие контуры.

В системе используется транзистор КТ601А с n – p – n проводимостью. К базе транзистора подключен диод, исключающий влияние отрицательных импульсов датчика. С ключом связаны анод – сетка сигнального тиратрона, катод которого соединен с импульсным трансформатором.

Питающее напряжение на задающий контур подается от выпрямителя. Чтобы уменьшить колебания напряжения при изменении потребляемого тока, к нему подключен нагрузочный резистор. Для получения необходимых напряжений (чтобы задать граничный период) используется секционная вторичная обмотка трансформатора. Через отдельную обмотку подается напряжение смещения на мультивибратор и на ключ.

УСАК-В в отличие от УСАК-Б – моноблочная система (все элементы схемы размещены в одном блоке). Лицевая панель по размерам, форме и компоновке соответствует лицевой панели индикаторного блока в УСАК-Б. Рациональное расположение элементов схемы на унифицированных по размерам печатных схемах позволило уменьшить размеры блока почти в 2 раза. На задней панели размещены органы

настройки по числу подключаемых датчиков и предельных периодов, клеммы питания («+» и «-») и ЭС, двухпозиционный ключ для самоконтроля (положение «И» - нормальная работа системы, положение «К» - самоконтроль) и разъем датчиков.

**Датчики** относятся к типу индукционных генераторных; необходимое для их функционирования магнитное поле создает постоянный магнит.

**Контрольный блок** принципиально решен так же, как в УСАК-Б; отличается он лишь техническими решениями в схеме.

**Индикаторный блок** аналогичен используемому в УСАК-Б. **Задающий блок** идентичен блоку, применяемому в УСАК-Б.

**Блок питания** имеет некоторые изменения в схеме и ее элементах; существенно уменьшено энергопотребление благодаря отсутствию подмагничивающих обмоток в датчиках.

**Блок самоконтроля** идентичен блоку, используемому в УСАК Б.

#### УСАК-К

Функциональная схема системы полностью аналогична УСАК Б. Добавлен лишь блок управления.

**Датчики** используются унифицированные индукционные генераторные, как и в УСАК-Б1 и УСАК-В.

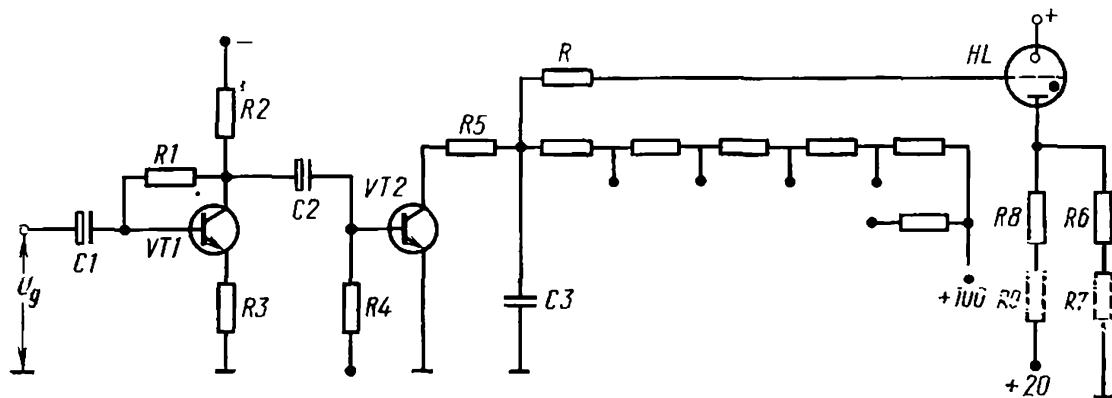


Рисунок 6. Электрическая схема блока контроля УСАК-К.

**Контрольный блок** (рис. 6) имеет транзисторы VT1 (работает как усилитель) и VT2 (как ключ). Эти функции перенесены в УСАК-К с контрольного блока УСАК-Б.

Тиратрон работает на триодном режиме. При этом RC контур подключен к его сетке, что позволяет осуществлять «запоминание» без дополнительных элементов, поскольку газовый триод, включаемый при положительном напряжении сетки, не выключается при последующих изменениях напряжения сетки, которое существенно колеблется при работе тиратрона в диодном режиме (см. рис. 3, б).

Напряжение  $U_{зак}$  тиратронов варьирует в широких пределах (60 - 80 В). Из уравнения следует, что так как  $U_{зак} = U_{гр}$ , то такое равенство влияет на точность значения  $T_{гр}$  (на точность работы контрольного устройства). Чтобы обеспечить необходимую точность, напряжение катодной сетки подбирают индивидуально для каждого тиратрона. Это производят делители R6, ..., R9, которые подают компенсирующее напряжение. Значение его определяется комбинированием (по месту) резисторов-делителей R6, ..., R9 с фиксированными значениями. Ток сетки тиратрона ограничивает резистор R, а ток коллектора VT2 - резистор R5.

**Задающий блок.** Его особенность — цепи RC. На основании выражения (16) можно записать

**Задающий блок.** Его особенность – цепи RC.

На основании выражения можно записать

$$T_{\dot{A}D} = RC \ln \left( \frac{1}{1 - \frac{U_{\dot{A}D}}{U_0}} \right) \quad (1)$$

Отсюда видно, что период  $T_{гр}$  можно задавать соответствующим изменением значений  $R$ ,  $C$  и  $U_0$ .

Исходя из зависимости (1)

$$dT_{\dot{A}D} = \frac{\partial T_{\dot{A}D}}{\partial R} dR + \frac{\partial \dot{O}_{\dot{A}D}}{\partial \dot{N}} dC + \frac{\partial \dot{O}_{\dot{A}D}}{\partial U_0} dU_0 + \frac{\partial T_{\dot{A}D}}{\partial U_{\dot{A}D}} dU_{\dot{A}D}$$

После соответствующих преобразований, получим:

$$\frac{dT_{\dot{A}D}}{T_{\dot{A}D}} = \frac{RC}{T_{\dot{A}D}} \cdot \left[ \left( \ln \left( \frac{U_0}{U_0 - U_{\dot{A}D}} \right) \right) \cdot \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta C}{C} \right) - \frac{U_0}{U_0 - U_{\dot{A}D}} \cdot \left( \frac{\Delta U_0}{U_0} - \frac{\Delta U_{\dot{A}D}}{U_{\dot{A}D}} \right) \right]$$

Примем  $\frac{U_{\dot{A}D}}{U_0} = \alpha \quad (2)$

$$\frac{\Delta U_{\dot{A}D}}{U_{\dot{A}D}} - \frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{\Delta U}{U}$$

$$\left[ \ln(1 - \alpha)^{-1} \cdot (1 - \alpha) \right]^{-1} = \beta$$

В результате чего с учётом выражения 1 будем иметь:

$$\frac{\Delta T_{\dot{A}D}}{\dot{O}_{\dot{A}D}} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\beta \Delta U}{U}$$

Из анализа зависимости  $\beta = f\alpha$  (рис. 7) следует: чтобы величина  $\beta$ , а значит, и ошибка  $T_{гр}$  были минимальны, значение  $\alpha$  должно быть 0,4 - 0,8. Если программирование осуществлять изменением напряжения  $U_0$ , то максимальный период  $T_{гр}$ , исходя из формул (1) и (2) определится так:

$$\frac{\Delta T_{\dot{A}D\max}}{\dot{O}_{\dot{A}D\min}} = \frac{\ln(1 - \alpha_{\min})}{\ln(1 - \alpha_{\max})} \approx 3 \quad (3)$$

При этом  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$  обратно пропорциональны, согласно выражению (2),  $U_{0\max}$  и  $U_{0\min}$ .

Полученный диапазон  $T_{гр}$  намного уже необходимого. В связи с этим рекомендуется использовать резисторные или конденсаторные элементы, которые могут существенно влиять на диапазон  $T_{гр}$ .

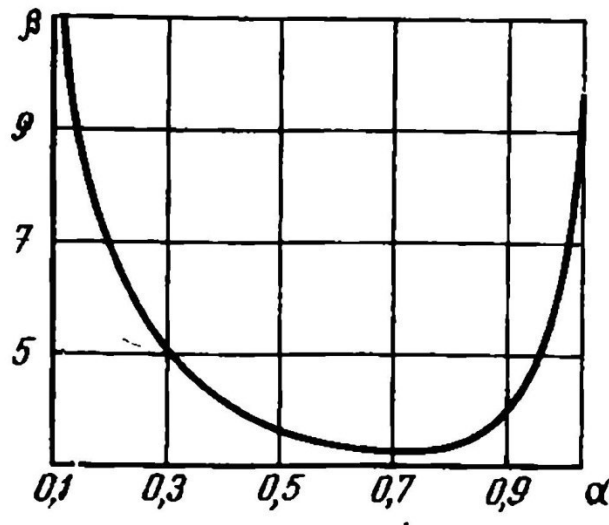


Рисунок 7. Зависимость  $\beta = f(\alpha)$

По эксплуатационным причинам необходимо программировать дискретные значения  $T_{гр}$ . Самые подходящие для этого - переключаемые дискретные элементы: резисторы (предпочтительнее) и конденсаторы.

Число положений задающих элементов обуславливается следующим: дискретное программирование сопровождается ошибкой в работе контрольного устройства, которая определяется шагом  $\alpha$  программирования; допустимая ошибка программирования в нашем случае не должна превышать  $\pm 3\%$ ; для программирования нужны удобные в эксплуатации, надежные и дешевые элементы.

Относительная ошибка программирования будет постоянна во всем диапазоне, если граничные периоды при этом изменяются по геометрической прогрессии:

$$\frac{T_{\dot{A}D1}}{\dot{O}_{\dot{A}D2}} = \frac{T_{\dot{A}D2}}{\dot{O}_{\dot{A}D3}} = \dots = \frac{T_{\dot{A}D(k-1)}}{\dot{O}_{\dot{A}Dk}} = \dots = \frac{T_{\dot{A}D(n-1)}}{\dot{O}_{\dot{A}Dn}} = a$$

Шаг  $a$  и относительная ошибка  $\Delta T/T_k$  программирования связаны так:

$$a = 1 + \frac{2\Delta T}{\dot{O}_k} = 1 + \frac{T_{(k-1)} - T_k}{T_k} \quad (4)$$

Значение  $a$  определяется диапазоном программирования  $T_{гр}$  и числом положений переключателя:

$$a = \sqrt[n-1]{\frac{T_{\dot{A}D1}}{\dot{O}_{\dot{A}Dn}}}$$

Широко распространенные переключатели имеют девять положений. Тогда для принятого диапазона  $T_{гр}$   $a = \sqrt[4]{40} \approx 1,6$ .

Если воспользоваться формулой (4) и выразить  $\Delta T/T_k$  в процентах, то получим  $100 \Delta T/T_k = \pm 30\%$ . Эта ошибка намного превышает допустимую.

Уменьшить ее можно, если использовать специальные элементы. В УСАК-Б, УСАК-В и УСАК-К предусмотрено ступенчатое программирование напряжения  $U_0$  для контрольных каналов. Диапазон изменения  $T_{гр}$  в зависимости от  $U_0$  согласно выражению (3) выходит за пределы, определяемые шагом  $a = 1,6$ . Напряжение программируется ступенчатым переключателем.

**Блок управления.** Основная функция его - запоминать на некоторое время информацию «период выше допустимого» для каждого ОК. При срабатывании одного канала остальные блокируются (так исключается ложная информация о дефектах при остановке МСХМ).

При отсутствии сигнала ждущий мультивибратор находится в постоянно устойчивом состоянии (рис. 8). При появлении сигнала он переходит во временно устойчивое состояние и остается в нем некоторое время, после чего возвращается в постоянно устойчивое состояние. Одно плечо мультивибратора образовано пороговыми тиратронами HL1, ..., HL13, соединенными анодами, и их общим анодным резистором R1. Другое плечо образует тиратрон HL14, который сигнализирует о включении электронного блока и его анодного резистора R2.



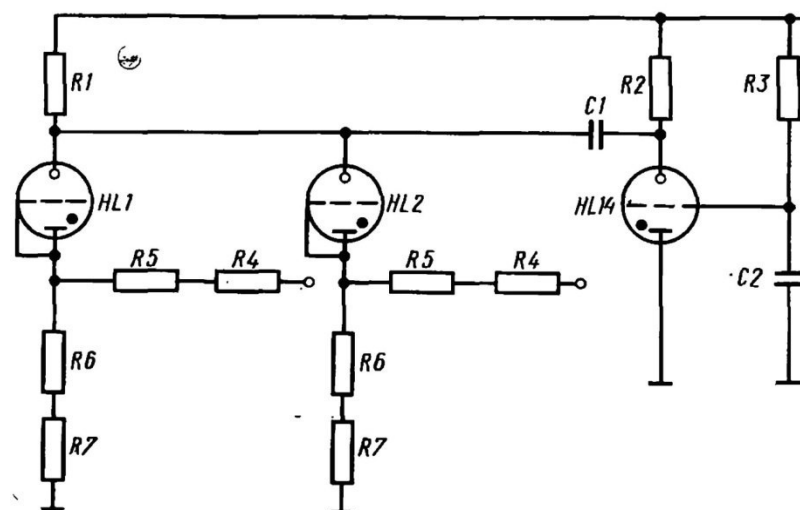


Рисунок 8. Электрическая схема блока управления УСАК-К

При отсутствии индикации тиратрон HL14 зажен и в цепи его анода и сетки протекает ток.

При зажигании одного из тиратронов в общей цепи анодов HL1, ... , HL13 формируется отрицательный импульс, который с помощью конденсатора C1 гасит тиратрон HL14. При этой анодное напряжение тиратронов падает ниже напряжения зажигания и зажигание второго тиратрона становится невозможным. Одновременно начинает заряжаться конденсатор C2. Когда его напряжение становится равным напряжению  $U_{\text{зж}}$  тиратрона на сетке, отрицательный импульс через конденсатор C1 гасит один из тиратронов группы HL1, ... , HL13 и схема возвращается в исходное положение. Запоминание составляет около 10 с и равно времени увеличения напряжения на конденсаторе C2 от значения  $U_{\text{гаш}}$  до  $U_{\text{зж}}$  на сетке тиратрона HL14.

Блок управления обеспечивает также срабатывание источника звука при выходе ОК из рабочего режима. Одновременно с этим подается сигнал для автоматического торможения МСХМ. По истечении определенного времени накопленная информация аннулируется.

**Индикаторный блок.** Функции его аналогичны функциям индикаторных блоков рассмотренных систем. Но в нем применены не тиратроны типа МТХ-90 с непрерывным свечением (что ухудшает индикацию), а система интегральной акустической индикации. Для неё разработан ЭС типа ИРТ-25, который рас полагается в электронном блоке так, что его рупор выведен на переднюю панель электронного блока. Это намного улучшает условия восприятия акустического сигнала. Для питания ЭС используется трансформатор блока питания, рабочая частота которого около 2,5 кГц.

**Блок питания** обеспечивает, как и в УСАК-Б и УСАК-В, постоянное напряжение не  $U_0$ , необходимое для работы каналов, с помощью стабилизатора постоянного напряжения (12 В) от электросети МСХМ. Стабилизированное напряжение преобразуется в нужное переменное напряжение. Затем оно выпрямляется не фильтруется.

Высокое постоянное напряжение  $U_0$  стабилизируется и по отношению к силе тока, которая может изменяться при выключении части контрольных устройств или по другим причинам. Все электронные ступени системы, параметры которых зависят от напряжения, в том числе  $U_0$ , подаваемого на катоды порогово-индикаторных тиратронов, питаются через стабилизатор.

**Блок самоконтроля** действует при выключении анодного напряжения тиратронов в контрольных каналах. В этой режиме тиратроны работают в качестве диодов, а функции анода исполняет сетка, поэтому, когда рабочие импульсы превышают допустимые, например из-за остановки МСХМ, все тиратроны подают световые мигающие сигналы «недопустимое отклонение», тогда как источник звука остается не включенным. Это

свидетельствует о нормальном состоянии блока самоконтроля. Состояния электрической сети и датчиков таким способом контролировать нельзя.

На лицевой стороне блока самоконтроля размещены тиратроны-индикаторы, пронумерованные в соответствии с номерами ОК, трехпозиционный включатель всей системы («включено», «выключено», самоконтроль»), каналные переключатели для задания значений  $T_{гр}$ , общий (диапазонный) переключатель.

Все они закрыты крышкой, которую открывают только для изменения значения  $T_{гр}$ . На внутренней стороне крышки имеется табличка с указанием положения переключателей для разных машин. Предельные значения периодов для различных положений переключателей приведены в паспорте системы. На лицевой панели размещены тиратрон-индикатор положения «включено» и решётка ЗС. На задней стенке блока самоконтроля имеются предохранитель для защиты системы от перегрузок по току, клеммы, к которым подключается питание системы, клемма вывода устройства для автоматической остановки МСХМ при аварийной ситуации (другой вывод устройства подключён к клемме «минус») В блоке предусмотрен разъём для соединения с датчиками.

На печатной плате каждого программного переключателя находятся все элементы блока самоконтроля и соответствующего порогово-индикаторного тиратрона. Каждый такой «канал», представляющий собой самостоятельный элемент, собирается, настраивается и контролируется самостоятельно.

Основа блока самоконтроля – пакетный набор «каналов», что облегчает общий монтаж и замену дефектного «канала». Схема управления занимает отдельную печатную плату.

В электрической схеме системы УСАК-К однотипные каналы K201 ... K213 получают питание через стабилизатор (состоит из VT101, VT102 и VD102), который используется также как источник напряжения  $U_0$  для регулятора (VT103, VT104 и VT301), управляющего преобразователем (VT105 и VT106). Обратная связь между выпрямителем (VDB105, ... , VD108) и триодом VT103 обеспечивает стабильность высокого напряжения при изменении силы тока нагрузки от 0 до 30 мА и входного напряжения от 10,8 до 14,4 В.

Источником звука и наружным исполнительным органом, напоминанием и стиранием зарегистрированной в канале информации управляют транзисторный ключ VT201, эмиттерный повторитель VT202 и двухкаскадный усилитель VT203 и VT204.

Эталонные граничные значения  $T_{гр.эт}$  для всех каналов задают комбинацией резисторов каналным переключателем.

Поступающие от датчика импульсы, усиленные схемой с VT1 (рис. 6), воздействуют на транзисторный ключ VT2, который разряжает конденсатор СЗ.

Когда напряжение конденсатора СЗ превысит напряжение зажигания тиратрона, тиратрон зажётся. Его анодный ток обуславливает напряжение на общем анодном резисторе R205. При таком напряжении транзистор VT201 насыщается, но не пробивается, так как в его коллекторную цепь включен стабилитрон VD201.

Напряжение на резисторе R208, подаваемое на повторитель VT202, питает усилители VT203 и VT204, которые управляются импульсами от преобразователя частотой 2,5 кГц. Указанное напряжение, поданное на базу ключа с VT2 (рис. 6), разряжает все задающие конденсаторы СЗ (во всех каналах) и одновременно питает транзистор VT302, эмиттерный резистор которого служит исполнительным органом.

Продолжительность ЗС, включение исполнительного органа и световая индикация определяются постоянной времени, которая формируется конденсатором С201 и резистором R203, управляющими дополнительным сигнальным тиратроном VT302. Зажигание сигнального тиратрона вызывает отрицательный импульс в резисторе R204, который через конденсатор С202 передаётся на аноды каналных тиратронов. При этом зажжённый тиратрон гаснет – восстанавливается режим «контроль»

#### НЕДОСТАТКИ СИСТЕМЫ

В рассмотренных системах контролируемый период функционирования рабочих органов преобразуется в напряжение. Однако при этом возникают затруднения, связанные с зависимостью периода  $T_{гр}$  от параметров элементов схемы. Ошибка преобразования периода  $T_{гр}$  в напряжение может быть выражена так:

$$\frac{\Delta \dot{O}_{\dot{A}D}}{\dot{O}_{\dot{A}D}} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta C}{C} + \beta \cdot \left( \frac{\Delta U_{\dot{A}D}}{U_{\dot{A}D}} - \frac{\Delta U_0}{U_0} \right)$$

Необходимой точности преобразования ( $\pm 3\%$ ) можно достигнуть, если в контрольных устройствах использовать точные резисторы и конденсаторы. При использовании RC элементов нормальной точности их приходится сортировать, что усложняет технологический процесс.

Поскольку напряжение  $U_{зж}$  на некоторых тиратронах варьирует в пределах 60 – 80 В, а  $U_{зж} = U_{гр}$ , то чтобы свести его влияние к минимуму, принимают соответствующие меры. Например, в УСАК-Б, УСАК-Б1 и УСАК-В тиратроны подразделяют на группы в соответствии с  $U_{зж}$  через 1 В и в одном индикаторном блоке применяют тиратроны только одной группы. В системе УСАК-К индивидуально настраивают все каналы в зависимости от  $U_{зж}$  используемых в них тиратронов.

Чтобы стабилизировать тиратроны по  $U_{зж}$ , их «тренируют» в течение нескольких часов, что также сказывается на технологическом процессе.

И наконец, чтобы исключить вредное влияние колебаний питающего напряжения, в схему вводят стабилизатор.

Другой недостаток УСАК, построенных на аналоговом принципе, заключается в изменении периода  $T_{гр}$  в контрольных каналах, что связано с изменением напряжения  $U_{зж}$  тиратронов при изменении условий освещённости. Кроме того, при работе усложняется замена дефектных тиратронов с учётом их напряжения зажигания.

К несовершенству УСАК-Б, УСАК-Б1 и УСАК-В можно отнести также следующее.

В случае повреждения одного из контрольных каналов прекращают действовать все каналы с большими номерами (из-за высокой надёжности датчиков такая ситуация возникает редко). Среднее число неповреждённых, но выключенных датчиков составляет для шестиканальной системы два-три, для 13-канальной – пять.

При использовании ЗС в качестве звукового индикатора на прицепных уборочных машинах приходится изменять электрическую цепь трактора. Кроме того, неудобно, когда ЗС звучит вне кабины.

Перед остановкой МСХМ для устранения предаварийной ситуации, индуцируемой САК, оператор должен запомнить номер зафиксированного объекта.

Чтобы задать одинаковый период  $T_{гр}$  для всех каналов, требуется различное число характерных элементов в датчиках ОК. Погрешности при этом в некоторых случаях превышают допустимые.

Диапазон контролируемого периодического движения составляет 0,12 – 1,2 с, что исключает возможность контроля рабочих органов с периодом ниже 0,12 с и затрудняет его, если он выше 1,2 с.

Указанные недостатки в значительной степени устранены в УСАК-К.

#### СИСТЕМЫ, ПОСТРОЕННЫЕ НА ДИСКРЕТНЫХ ПРИНЦИПАХ УСАК-ВМ

В системах этого типа применён принцип работы контрольного блока, позволяющий сохранить качества тиратрона как порогового и индикаторного элемента (в том числе большую яркость свечения при незначительной потребляемой мощности).

Функциональная схема УСАК-ВМ включает в себя датчики, контрольный блок, индикаторный блок, блок эталонного генератора, задающий блок и блок питания.

**Датчики** такие же, как и у УСАК-В.

В контрольном блоке сравниваются частоты рабочих импульсов  $U_d$  датчика и эталонного генератора  $U_{эт}$ . Если  $T_1 < T_{эт}$  (рис. 9, а, б), то на период рабочего импульса

приходится не более одного эталонного импульса. При  $T_2 > T_{\text{эт}}$  за период рабочего импульса поступает более одного эталонного импульса, вследствие чего на выходе контрольного устройства появляется сигнал  $U_{\text{вых}}$  (рис. 9, в) – действует дискретный принцип.

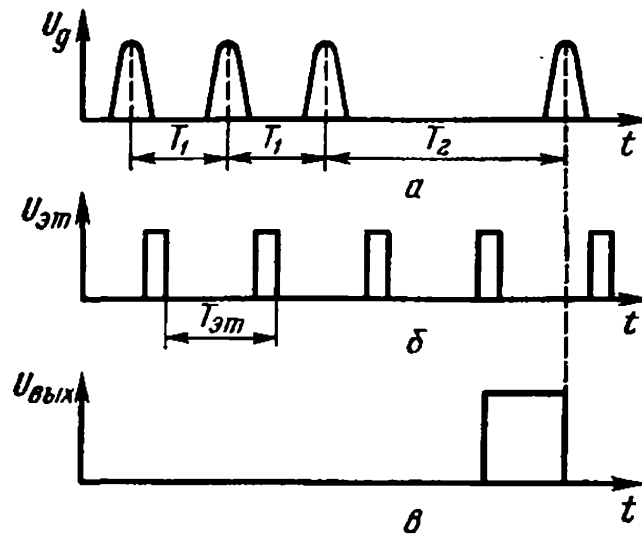


Рисунок 9. Временная диаграмма работы контрольного блока УСАК-ВМ

Схема реализации критериев, определяющих принадлежность  $n$  (число эталонных импульсов, возникающих за период рабочего импульса) к группе, - аналоговая:  $n \leq 1$  ( $U_{\text{вых}} = 0$ ) или  $n > 1$  ( $U_{\text{вых}} = 1$ ).

При этом используются пороговые свойства тиратрона НЛ (рис. 10). Если  $n \leq 1$ , то на тиратрон подаётся напряжение  $U_1 < U_{\text{зак}}$ ; при  $n > 1$  – напряжение  $U_2 > U_{\text{зак}}$ .

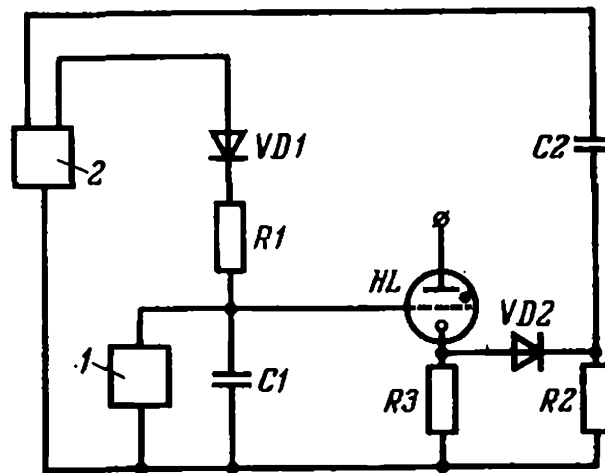


Рисунок 10. Принципиальная электрическая схема одного канала контрольного блока УСАК-ВМ

Рассмотрим подробнее принципиальную электрическую схему канала контрольного блока (рис. 10) и временную диаграмму (рис. 11, а, б, в), поясняющую её работу.

Импульсы  $U_d$  от датчика поступают на вход ключа 1, который синхронного разряжает конденсатор  $C1$ . Зарядка производится через резистор  $R1$  ( $R1$ - $C1$  образуют интегрирующую цепь) от плюсового выхода генератора прямоугольных импульсов 2, поэтому напряжение  $U_c$  на конденсаторе и, следовательно, на сетке тиратрона НЛ возрастает экспоненциально. Одновременно от минусового выхода импульсного генератора через дифференцирующую цепь  $C2$ - $R2$  на катод тиратрона поступает импульс  $U_{\text{эт}}$ . Если в начальной стадии конденсатор  $C1$  разряжен, то (рис. 11, в) максимальное напряжение  $U_{(c-k)1}$ . Если интервал между импульсами датчика  $T_2 > T_{\text{эт}}$ , то второй

эталонный положительный импульс не влияет на значение  $U_c$ , но отрицательный эталонный импульс на катоде тиратрона суммируется с  $U_c$  и на катоде – сетке тиратрона появляется напряжение  $U_{(c-k)2} = U_2$ . Так как пороговое напряжение  $U_{np}$  меньше  $U_2$ , то тиратрон зажигается.

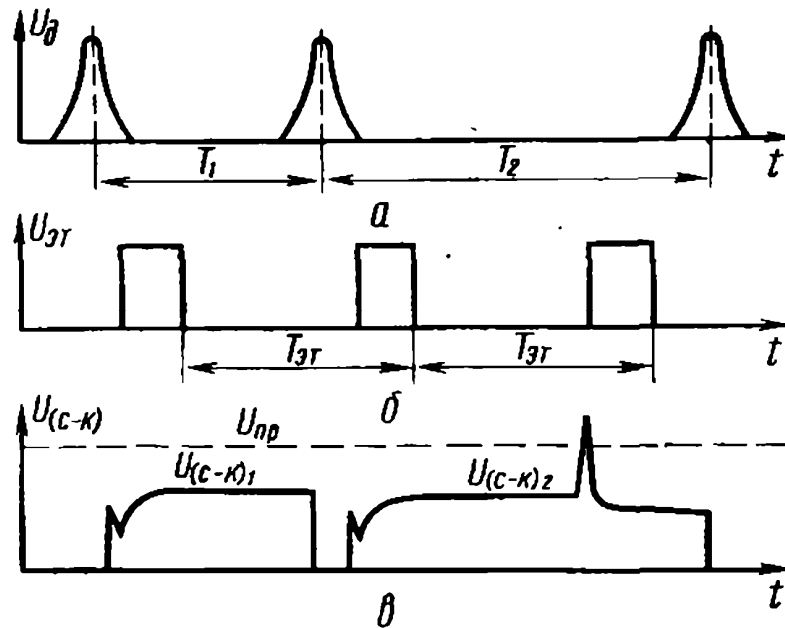


Рисунок 11. Временная диаграмма работы принципиальной электрической схемы одного канала контрольного блока УСАК-ВМ

Диод VD1 препятствует разрядке C1 через импульсный генератор, а диод VD2 – поступлению обратного импульса от дифференцирующей цепи в катод тиратрона.

Между  $U_{зак}$  и импульсным напряжением эталонного генератора существует зависимость

$$\frac{U_{\text{зае}}}{2} < U_{\text{yo}} < U_{\text{зае}}$$

Которую можно представить так:

$$U_{\text{зак}} = (1 \dots 2)U_{\text{эт}}$$

Другими словами, требования к точности значений напряжения зажигания тиратронов невысоки, что позволяет исключить процессы «тренирования» и сортирования тиратронов. Допуски элементов дифференцирующих и интегрирующих групп могут быть достаточно велики, что существенно не влияет на качество работы контрольного блока.

**Индикаторный блок.** Для световой индикации используются тиратроны МТХ-90. Невысокие требования к их пороговым качествам не влияют на индикацию. Акустическим индикатором служит ЗС МСХМ. Функция ИЛИ в системе выполняется без участия трансформатора.

**Блок эталонного генератора.** Эталонный генератор 1 (рис. 12) вырабатывает серии электрических импульсов (рис. 13, а, б), необходимых для работы контрольного устройства. Продолжительность положительных прямоугольных импульсов  $T_1 = 10 - 20$  мс с периодом повторения  $T_2$ , который может изменяться (задаваться) в широких пределах (0,3 – 1,25 с); амплитуда напряжения  $U_{\text{вых } 1}$  около 50 В. Отрицательные электрические импульсы чередуются с положительными.

Генератор должен обеспечить стабильный период повторения положительных импульсов. В рассматриваемой схеме длительность генерируемых импульсов почти постоянно независимо от периода их повторения, поэтому специальное формирующее устройство излишне.

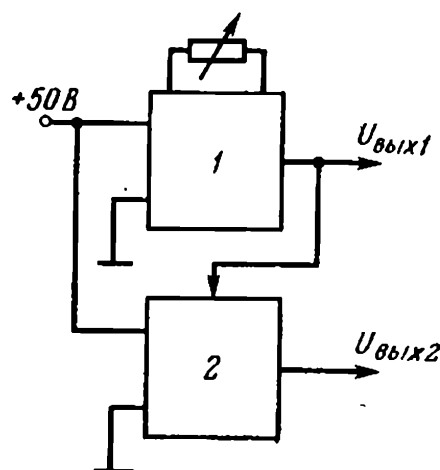


Рисунок 12. Блок-схема эталонного генератора УСАК-ВМ

Отрицательные импульсы поступают от формирователя 2 (рис. 13), на вход которого подаются положительные импульсы, в связи с чем для каждого контрольного устройства нет необходимости в специальной дифференцирующей цепи.

**Задающий блок.** Период  $T_{гр}$  задаётся изменением частоты эталонного генератора, что происходит путём изменения запирающего напряжения времязадающего транзистора блока эталонного генератора, с помощью делителя из резисторов. Диапазон изменения периода  $T_2 = 350 - 1250$  мс включает десять ступеней.

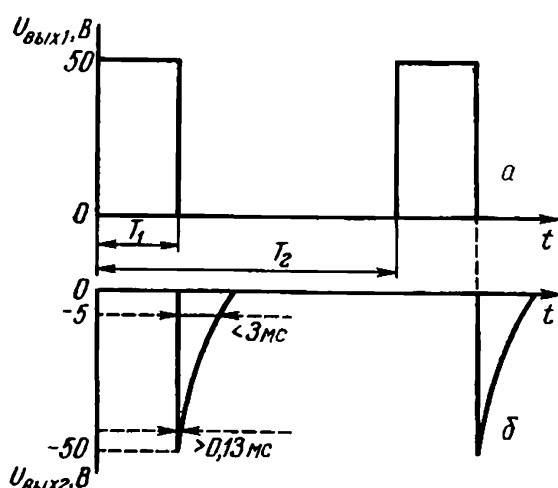


Рисунок 13. Форма эталонных импульсов, вырабатываемых на двух выходах эталонного генератора УСАК-ВМ

**Блок управления** предназначен для включения ЗС при возникновении сигнала в контрольном канале. При этом вход ждущего мультивибратора подключается к общей точке соединения катодов порогово-индикаторных тиратронов. Это соединение гальваническое, оно «удлиняет» входной сигнал до 1,5 с, достаточных, чтобы различить аварийный сигнал, даже при кратковременном срабатывании контрольного канала. Выходом мультивибратора управляет тиристорный ключ, который осуществляет питание ЗС от бортовой электрической системы МСХМ.

**Блок питания** включает в себя стабилизатор (он поддерживает стабильное напряжение 8,5 – 10,5 В) и преобразователь (обеспечивает необходимое высокое напряжение).

Конструктивно система УСАК-ВМ почти не отличается от УСАК-В. Однако электрическая схема имеет некоторые особенности. Канальные усилители-ключи выполнены на транзисторах VT311, ... , VT361 и VT313, ... , VT363. Вторые транзисторы защищены диодами VD312, ... , VD362, от подачи на их базу обратного высокого

напряжения. Интегрирующие группы, состоящие из R317 – C312 и R367 – C362, одновременно подключаются к транзисторным ключами сеткам тиратронов HL511, ... , HL516. Резисторы R314, ... , R364 ограничивают силу тока, проходящего через транзисторные ключи. Если число ОК меньше максимального, с помощью переключателя SA-1 лишние каналы выключаются путём закорачивания цепи сеток и анодов соответствующих тиратронов диодами VD411, ... , VD364.

Исправность системы проверяют с помощью ключа K1, при размыкании которого на входы канальных усилителей подаются импульсы от эталонного генератора. Если система исправна, сигнал «недопустимое отклонение» не возникает.

Эталонный генератор выполнен на транзисторах VT201, VT203 и VT204. Транзисторы VT203 и VT204 образуют пару (соединена по схеме Дарлингтона) благодаря использованию высоковольтных биполярных структур типа Р. Генератор работает так: при отпирании транзисторов VT203 и VT204 транзистор VT201 отпирается (через резистор R206) и через цепь эмиттера и диода VD202 заряжает конденсатор C201, который заряжается также через резисторы R207 и R411, ... , R420. Поскольку сопротивление постоянно включенного резистора R207 (300к) значительно превышает сопротивление резистора R204 (1к), то зарядка не влияет на длительность импульсов на коллекторе транзистора VT204. Продолжительность этого положительного импульса, амплитуда которого почти равна питающему напряжению (+50 В), 10 – 20 мс.

Когда напряжение на конденсаторе C201 становится приблизительно равным напряжению делителя, транзистор VT201 запирается через триммер потенциометра R212 (около +30 В), в результате чего запираются транзисторы VT203, VT204 и диод VD202. Последний предохраняет от пробоя цепь эмиттер – база транзистора VT201 и не допускает разрядки конденсатора C201 через эту цепь. В период между импульсами конденсатор C203 заряжается через резистор R213 и диод VD207 до напряжения, близкого к напряжению питания (+50 В). При отпирании транзистора VT206 потенциал общей точки конденсатора C203 и диода VD207 приобретает значение -50 В и через диод VD208 подаётся на спаренные катоды тиратронов HL511, ... , HL516. Диод VD208 служит для разделения выхода эталонного генератора и входа блока управления.

Блок управления выполнен на транзисторах VT211 и VT212, образующих мультивибратор с гальваническим входом, защищённым диодом VD210. Выход ждущего мультивибратора включает посредством резистора R215 управляющую цепь тиристора VS111. Любой тиратрон при зажигании остаётся включенным до поступления первого импульса от датчика. При этом через общую точку спаренных катодов протекает ток, вызывающий отпирание транзистора VT212. Через резистор R218 отпирается и транзистор VT211, и через резистор R215 на управляющий электрод тиристора VS111 подаётся напряжение. Начинается зарядка конденсатора C204 через резистор R213 и цепь база – эмиттер транзистора VT212. Если

тиратрон гаснет раньше, чем зарядка конденсатор C204 (время зарядки около 1,5 с), схема сохраняет прежнее состояние.

После зарядки конденсатора C204 при отсутствии тока в катодах тиратронов транзисторы VT211 и VT212 запираются, подача выходного сигнала на тиристоры прекращается. Конденсатор C204 заряжается через диод VD209 резистора R215 и управляющую цепь тиристора.

Конденсатор C205 служит для защиты схемы управления от случайных электрических импульсов, возникающих, например, при включении и выключении ЗС (НА).

Для защиты тиристора от перенапряжения вследствие индуктивного характера ЗС параллельно ему включены диод VD415 и конденсатор C411.

#### ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСАК

Возможность контроля неперiodических процессов

Иногда на МСХМ и УСАК необходим автоматический контроль не основных функций, например положения рабочих органов (находится или не находится рабочий

орган в заданном положении), контроль уровня загрузки бункера, уровня потерь продукции (его можно считать критерием технического состояния МСХМ и качества технологического процесса).

УСАК можно использовать для определения принадлежности контролируемых параметров к одному из состояний: «допустимо» или «недопустимо» и для их индикации. Тогда в наиболее элементарных случаях индикатором служит датчик с контактным выходом, который при состоянии «допустимо» разомкнут, а при состоянии «недопустимо» замкнут. Выход датчика может быть подключен к любому свободному входу разъёма УСАК-К. Работа других систем типа УСАК в этом случае возможна, когда получаемый от датчика сигнал преобразуется в импульсную последовательность, период которого пропорционален контролируемой величине.

Датчик, выдающий информацию, например, о потерях при уборке сахарной свеклы имеет некоторые особенности. Если в системах типа УСАК

Критерий принадлежности к состоянию «нормально» - период меньше, чем предельный, то уменьшение периода сигналов, поступающих от такого датчика (при увеличении количества несобранных корнеплодов), признак состояния «ненормально». Для этого за датчиком включают преобразователь (рис. 14), который обеспечивает обратную пропорциональность периода выходного сигнала при потерях (несобранные корнеплоды). Чтобы согласовать выход датчика со следующей ступенью – операционным компаратором А2, необходим входной операционный усилитель А1.

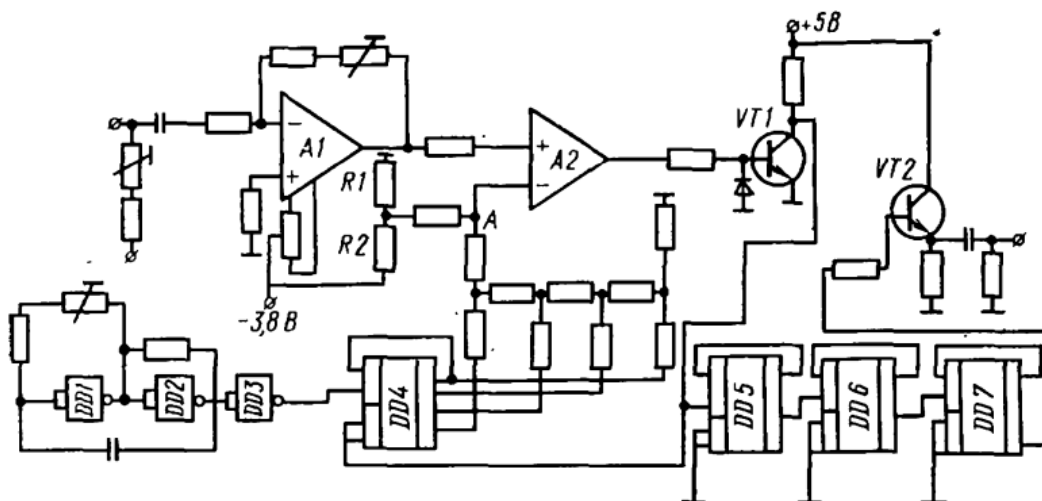


Рисунок 14. Электрическая схема согласующего блока для включения датчика контроля потерь корнеплодов к УСАК

Усиление подбирают так, чтобы сигнал, подаваемый на компаратор, составлял 0,1 – 1,2 В. На другой вход компаратора подают напряжение от генератора ступенчатого сигнала. Он включает задающий генератор, представляющий собой мультивибратор, выполненный на логических элементах И – НЕ (DD1, DD2, DD3). Частота генератора 16 кГц и согласована по периоду прохождения датчика над корнеплодом минимальных размеров при максимальной скорости движения. Такое условие определяется необходимостью получения за этот период от генератора ступенчатого сигнала минимум одного цикла.

Время прохождения датчика над корнеплодом размером  $D_{\min}$  при скорости движения МСХМ  $x_{\max}$

$$t = \frac{D_{\min}}{x_{\max}}$$

Отсюда частота задающего генератора



$$f \geq \frac{N_1}{t}$$

где  $N$  – число состояний бинарного счётчика DD4.

Выходы бинарного счётчика (на вход которого поступают импульсы от задающего генератора) соединены с резисторной матрицей типа R-2R, преобразующей код в напряжение. В результате в точке А на схеме возникает ступенчатое напряжение, изменяющееся от  $U_{\min} = 0,375$  В до  $U_{\max} = 3,375$  В. Остаточное напряжение генератора компенсируют делители R1, R2.

На временной диаграмме работы согласующего блока (рис. 15, а) показаны усиленные сигналы датчика, поступающие на первый (рис. 14) вход компаратора. Сигналы высокого уровня соответствуют наличию корнеплодов, остальные сигналы – шумовой фон. На второй вход компаратора подаётся ступенчатое напряжение  $U_{\text{ст}}$  (рис. 15, б). Когда амплитуда сигнала на втором входе компаратора (от генератора ступенчатого сигнала) совпадает с амплитудой сигнала на первом входе (от датчика), на выходе компаратора резко возрастает отрицательное напряжение. При этом запирается транзистор VT1, сигналом от коллектора сбрасывается счётчик DD4 (рис. 14) и компаратор возвращается в исходное положение.

Таким образом, на выходе компаратора, если шумовые сигналы датчика после усиления достаточно слабы (менее 0,375 В), формируется серия импульсов с частотой задающего генератора (рис. 15, в). При появлении сигнала от корнеплода амплитудное совпадение сигналов на двух входах компаратора получается при большем интервале, чем в первом случае, и, следовательно, уменьшается частота сбрасывания компаратора и серии импульсов на его выходе. Цель достигнута: индикация корнеплода ведёт к снижению частоты на выходе согласующего блока.

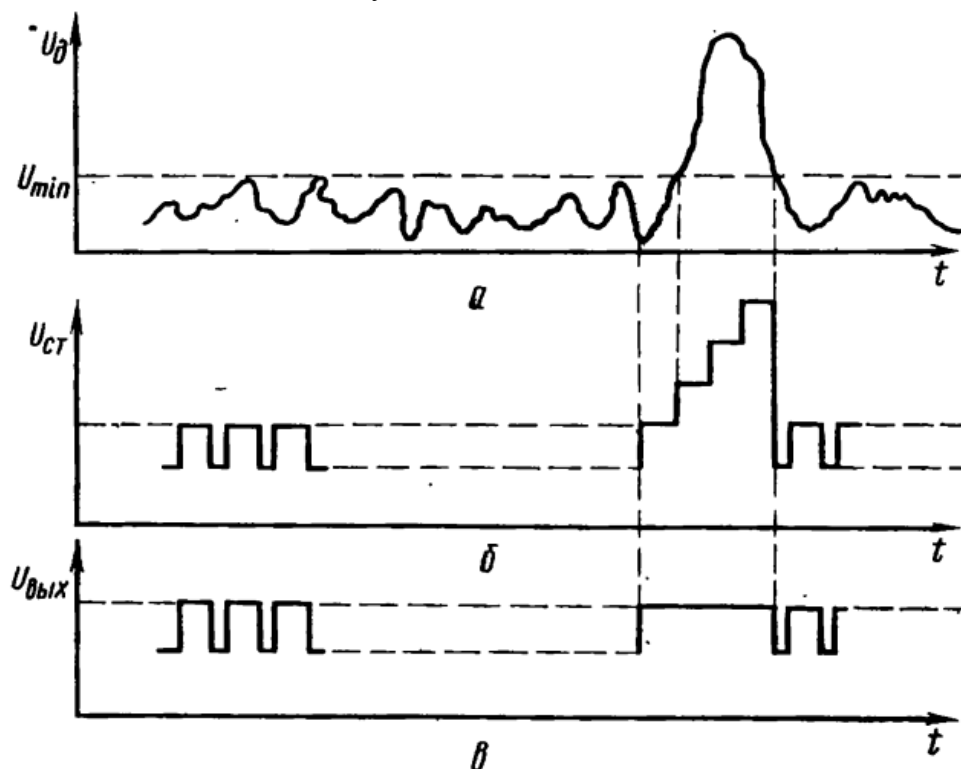


Рисунок 15. Временная диаграмма работы согласующего блока для включения датчика контроля потерь корнеплодов к УСАК:  $U_d$  – напряжение датчика;  $U_{\text{ст}}$ ,  $U_{\text{вых}}$  – ступенчатое (эталонное), выходное напряжение

Цифровой делитель частоты, выполненный с использованием счётных схем DD5, DD6, DD7 (рис. 15), играет вспомогательную роль: с его помощью основная частота (при отсутствии индикации корнеплода) на выходе компаратора доводится до рабочей частоты

системы УСАК. Вспомогательное значение имеет и эмиттерный повторитель с транзистором VT2: согласовывает высокоомный выход делителя с относительно низкоомным входом системы УСАК. Различный уровень потерь в системе УСАК задаётся периодом  $T_{гр}$ .

#### Определение числа характерных элементов на ОК

Чтобы приспособить УСАК к рабочим органам МСХМ с различным периодом работы, необходимо определить число характерных элементов в них и эталонный граничный период. Критерием служит минимальное число таких элементов при заданной (допустимой) погрешности. Максимальное число элементов определяется, как правило, из конструкторских соображений.

Обозначим  $T_1, T_2, \dots, T_n$  – граничные периоды функционирования рабочих органов, обслуживаемых УСАК;  $B_1, B_2, \dots, B_n$  – число характерных элементов соответствующих рабочих органов;  $T_{эт}$  – эталонный период, с которым сравниваются периоды  $T_{гр}$ .

При этом должно соблюдаться условие

$$T_1 \leq T_2 \leq T_3 \leq \dots \leq T_k \leq \dots \leq T_n$$

откуда следует, что

$$B_1 \leq B_2 \leq B_3 \leq \dots \leq B_k \leq \dots \leq B_n$$

Чтобы свести к нулю погрешности при задании, необходимо выполнить условие

$$\frac{T_k}{B_k} = T_{\dot{\gamma}\dot{o}}$$

Это условие может быть удовлетворено случайно, так как период  $T_k$  – случайная величина, а  $B_k$  – число натурального ряда (с ограничением по  $B_{\max}$ ),  $T_{эт}$  – общий для всех рабочих органов.

Отсюда следует, что при задании периода для каждого рабочего органа получается ошибка  $\Delta T_k$ , поэтому

$$\frac{T_k + \Delta T_k}{B_k} = T_{\dot{\gamma}\dot{o}}$$

Нас интересует не абсолютное значение погрешности  $\Delta T_k$ , а относительное:

$$\delta_k = \frac{\Delta T_k}{T_k} = \frac{B_k \cdot T_{\dot{\gamma}\dot{o}} - T_k}{T_k} \quad (1)$$

При определении  $T_{эт}$  и  $B_1, \dots, B_n$  воспользуемся методом последовательных приближений.

$$T_{\dot{\gamma}\dot{o}} = T_1$$

Примем далее, что  $B_k$  – любое положительное число (оно может быть и не целым). Промежуточные значения  $B$  будут такими:

$$B_2 = \frac{T_2}{T_1}; \quad B_3 = \frac{T_3}{T_1}; \quad B_n = \frac{T_n}{T_1}$$

Значение  $B$  округлим до целого числа, стремясь при этом к минимальной погрешности, которую вычислим по формуле (1). Найдём максимальные отклонения со знаком плюс и минус ( $\delta_+$  и  $\delta_-$ ) и определим среднее значение

$$\delta_{\dot{\gamma}\dot{o}} = \frac{\delta_+ + \delta_-}{2}$$

Найдём значение  $T'_{\dot{\gamma}\dot{o}}$  по формуле

$$T'_{\dot{\gamma}\dot{o}} = \frac{(1 + \delta_k) \cdot T_k}{B_k}$$

в которой  $\delta_k$  имеет знак плюс при  $\frac{T_k}{B_k} < T_{\dot{\gamma}\dot{o}}$

Если окажется, что  $\delta_{\text{ср}} \leq \delta_{\text{доп}}$ , где  $\delta_{\text{доп}}$  – максимально-допустимая ошибка задания, то принимаем вычисленные значения  $B_1, \dots, B_n$  и  $T_{\text{эт}}$ .

Если  $\delta_{\text{ср}} > \delta_{\text{доп}}$ , то переходим к следующему этапу: принимаем  $B_1 = 2$  и  $\Delta T_1 = 0$ , причём  $T_{\text{эт}} = T_1$ .

Затем вычисления повторяем, как на первом этапе. Если результаты окажутся удовлетворительными, то проверяем, можно ли реализовать ещё  $B_n$ .

## 1.7 Лекция № 7 (2 часа).

**Тема:** «Методы регулирования. Система регулирования движения рабочих органов в продольно-вертикальной плоскости»

### 1.7.1 Вопросы лекции:

1. Алгоритмы управления.
2. Требования к системам автоматического регулирования глубины обработки почвы.

### 1.7.2 Краткое содержание вопросов:

- 1 Алгоритмы управления.

Под методами регулирования понимают совокупность принципов, способов, операций, приемов, с помощью которых МСХМ выполняет требуемый алгоритм функционирования (АФ). Для этого в условиях постоянно действующих на машину внутренних и внешних возмущений нужно организовать управляющие (регулирующие) воздействия, соответствующие алгоритму управления (АУ).

Специально организованные воздействия в МСХМ до последнего времени осуществляли с помощью управляющих (регулирующих) воздействий со стороны человека-оператора (механизатора). Совокупность ОР, регулирующего устройства и человека-оператора, воздействующего на это устройство, представляет собой систему ручного регулирования (СРР). В последнее время человека-оператора все чаще наделяют функциями контролера системы, в которой регулятором служит автоматическое устройство. Совокупность ОР и устройства автоматического регулирования (УАР) представляет собой систему автоматического регулирования (САР).

Каковы основные требования к УАР для воздействия на ОР?

Если согласно алгоритму функционирования (АФ) необходимо, чтобы выходной контролируемый (регулируемый) параметр  $Y$  процесса имел постоянное значение  $Y = Y_0 = \text{const}$ , где  $Y_0$  - заданная регулируемая величина, то УАР должно обеспечить стабилизирующее воздействие  $X$  на ОР, т. е.

$$Y = Y_0 = f[X = X(\Phi)] = \text{const}$$

где  $\Phi = \Phi(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$  - вектор контролируемых возмущающих воздействий.

Методы стабилизации осуществляется САР, называемой стабилизирующей. Она реализуется в разомкнутом или замкнутом виде. Первый основан на методах регулирования по возмущению (инвариантные системы или САР с компенсацией внешних воздействий по принципу Понселе — Щипанова). Но если внешние воздействия на объект  $F(f_1, f_2, \dots, f_n) \neq 0$  не контролируются и не могут быть измерены, а свойства объекта и его динамические характеристики известны не полностью, то регулирование по возмущению не может обеспечить стабилизацию регулируемой величины. Тогда применяют методы Ползунова - Уатта регулирования по отклонению, основанные на принципе отрицательной обратной связи. Такое регулирование реализуется в замкнутой системе, которая делает контролируемую (регулируемую) величину  $Y$  практически не зависящей от внешних возмущений. Для этого с помощью УАР организуют такое регулирующее воздействие  $X$ , которое в присутствии неконтролируемых  $F(f_1, f_2, \dots, f_n)$  возмущающих воздействий учитывает отклонение  $Y$  от  $Y_0$ , т. е.

$$\xi = Y_0 - Y = f(X) - F$$

стремясь уменьшить рассогласование  $\xi$ .

Сочетание регулирования по возмущению с регулированием по отклонению реализуется методами комбинированного регулирования, которые повышают точность автоматического регулирования, так как учитывают как контролируемые  $\Phi(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ , так и неконтролируемые  $F(f_1, f_2, \dots, f_n)$  возмущающие воздействия, минимизируя рассогласование т. е.

$$\xi = Y_0 = [f(X) - (F + \Phi)] \rightarrow \min$$

Такие методы регулирования осуществляют комбинированные САР.

Если согласно АФ необходимо, чтобы регулируемая величина  $y$  процесса изменялась по закону

$$y = y_0(t)$$

то с помощью уравнений, описывающих объект, можно вычислить требуемый закон изменения управляющей величины

$$x = x_0(t)$$

и поручить УАР методами слежения выполнить эту программу. Такую систему будем называть системой программного регулирования или управления или следящей системой. Она может быть разомкнутой (с жесткой программой), если известно математическое описание объекта регулирования и отсутствуют неконтролируемые воздействия на объект  $F(f_1, f_2, \dots, f_n) = 0$ . В ином случае ( $F \neq 0$  и точного описания объекта нет) строят замкнутую систему программного регулирования, поручая УАР вырабатывать сигнал  $x(t)$ , зависящий от рассогласования:

$$\xi(t) = y_0(t) - y(t)$$

Системы автоматической стабилизации (по возмущению или по отклонению) - частный случай программных систем регулирования, но только в первых в отличие от вторых программа не зависит от времени, т. е.  $y_0(t) = \text{const}$ , и, таким образом, можно говорить об одном классе методов программирования с двумя подклассами методов стабилизации [ $y_0(t) = \text{const}$ ] и слежения [ $y_0(t) \neq \text{const}$ ].

Второй класс составляют методы адаптации (самоприспособления) САР, позволяющие сохранить работоспособность системы в условиях непредвиденного изменения свойств регулируемого объекта, цели регулирования или условий окружающей среды путем изменения АУ или поиска оптимального режима функционирования. Исходя из этого определения, методы адаптации можно разделить на подкласс методов, предусматривающих изменение алгоритма управления, и подкласс методов, предусматривающих оптимизацию режима функционирования.

Первый подкласс включает группы методов самонастройки и самообучения; второй наряду с этим предусматривает использование группы методов самоорганизации. Самонастройка - это приспособление к случайно изменяющимся условиям путем автоматического изменения параметров настройки или автоматического поиска оптимальной настройки в основном вследствие количественных изменений параметров системы. Самообучение - вырабатывание и совершенствование АУ в процессе работы системы путем «проб» и «ошибок» до достижения наилучших результатов или до начала ухудшения процесса управления. Самоорганизация - один из видов адаптации путем качественных изменений АУ или структуры системы. При использовании методов адаптации непрерывно изучают свойства объекта управления и состояния окружающей среды, накопленную информацию применяют для непосредственного воздействия на объект.

Методы адаптации используют при автоматизации МСХМ. Так, на основании этих методов установлено, что принципиальный недостаток существующих САУ зерноуборочных комбайнов — субъективность настройки регулятора подачи хлебной массы в зависимости от условий уборки. Сотрудники СибИМЭ предложили использовать принципы построения самонастраивающейся и даже самоорганизующейся системы (с переменной структурой), которая реализует стратегию функционирования комбайна как звена в уборочно-транспортном комплексе, и разработали функциональную схему системы автоматической оптимизации работы такого

комбайна.

По сложности алгоритмов управления методы регулирования разделяют в зависимости от вида управляющих воздействий на методы непрерывного регулирования (между величинами на входе и выходе элементов автоматической системы организуются непрерывные контрольно-управляющие воздействия), импульсного регулирования (изменение внутренних параметров системы или внешние воздействия представляют собой импульсные сигналы, квантуемые по времени), релейного регулирования (входной сигнал управляющего устройства квантуется по уровню).

По степени закономерности процессов в автоматических системах методы регулирования разделяют на детерминированные, когда связь между входами и выходами (между причинами и следствиями) в автоматической системе легко проследить с вероятностью, равной единице; стохастические -(или вероятностные), при использовании которых между входами и выходами (причинами и следствиями) устанавливаются соотношения с вероятностью больше 0,5, но меньше единицы.

По форме представления информации могут быть методы регулирования с аналоговой формой (информация представляется с помощью бесконечного числа значений контролируемого параметра, составляющих сплошное множество), с дискретной (с помощью конечного числа фиксированных значений характеризующего параметра), с аналогово-дискретной.

По виду используемого математического аппарата различают методы регулирования, основанные на математическом описании систем линейными дифференциальными уравнениями, нелинейными дифференциальными уравнениями, существенно нелинейными (релейными) зависимостями (типа идеального реле, идеального реле с зоной нечувствительности, двух- и трехпозиционной релейной характеристики с петлей гистерезиса и др.).

В зависимости от числа регулируемых величин существуют методы регулирования одной величины (одномерные методы), двух и более величин (многомерные методы). Последние могут быть, в свою очередь, методами несвязанного и связанного регулирования. При несвязанном регулировании различными переменными управляют независимо, при связанном обеспечивают определенное взаимодействие регуляторов отдельных параметров, причем если удастся добиться при связанном регулировании независимости изменения одной регулируемой величины от изменения остальных, то такое регулирование называют автономным.

## СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ В ПРОДОЛЬНО-ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ **ТРЕБОВАНИЯ К САР ГЛУБИНЫ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

При вспашке обычно требуется, чтобы рабочие органы плуга, точнее нижние обрезы лемехов, колювали рельеф дна борозды, и следовательно, рельеф поля. Считают, что при выполнении этого требования выдерживается постоянная глубина обработки почвы. Однако это верно лишь при ровной поверхности поля. Действительно, если представить идеальную по точности поля. Действительно, если представить идеальную по точности копирования рельефа поля автоматическую систему пахотного агрегата, при которой глубина обработки  $z = \text{const}$ , среднее квадратическое отклонение её от среднего значения  $\sigma_z = 0$ , то при неровной поверхности поля такая система непригодна по агротехническим показателям: она точно копирует микро-, мезо- и макронеровности поля, образует изрытое, неровное дно борозды, что создает неблагоприятные, неодинаковые условия для развития семян.

Другое требование к качеству вспашки по глубине — выравнивание дна борозды, оцениваемая автокорреляционной функцией  $R_z(\tau)$ . Таким критерием следует пользоваться осторожно. Система, полностью отвечающая этому критерию, должна быть противоположна по динамическим качествам рассмотренной: она не должна реагировать

на внешние возмущения, и только тогда дно борозды будет идеально ровным. Но при этом она не удовлетворит агротехнические требования, поскольку толщина слоя почвы над дном борозды будет различной, что скажется на развитии растений.

Чтобы «примирить» эти два противоречивых требования, предложено для случая, когда автокорреляционные функции поверхности поля (обозначены индексом п.п) и дна борозды (д.б) описываются выражениями:

$$R_{i.i}(\tau) = D_{i.i} \tilde{a}^{-\tilde{a}_1}(\tau)$$

$$R_{\bar{a}.i}(\tau) = D_{\bar{a}.i} \tilde{a}^{-\tilde{a}_2}(\tau)$$

коэффициент  $a_2$  сводить к минимуму при ограничении дисперсии  $D_{д.б}$ . Можно представить систему, которая при относительно ровной поверхности поля активно реагирует на изменение физико-механических свойств почвы (силовая система), но такая система также неприемлема.

Речь может идти о создании оптимальной САР, которая должна точно копировать неровности поля с большим периодом колебаний (20 м и более), т. е. реагировать на изменения макрорельефа поля и полностью срезать высокочастотные колебания (с периодом 1,4 м и менее), связанные с микрорельефом. Средние по частоте колебания с периодом 1,4 - 20 м, вызванные изменениями мезорельефа, должны пропускаться с некоторыми искажениями (тем большим, чем меньше период колебаний). В результате получатся достаточно ровные дно борозды и поверхность поля.

В общем виде частотный критерий  $K_{\omega z}$  качества обработки почвы по глубине выполняется при  $L_{д.б} \geq L_{п.п}$  или  $\omega_{д.б} \leq \omega_{п.п}$ , где  $L_{д.б}$ ,  $\omega_{д.б}$  - период и частота колебаний рельефа дна борозды;  $L_{п.п}$ ,  $\omega_{п.п}$  - то же поверхности поля.

Конкретнее

$$K_{\omega z} = \begin{cases} \omega_{\bar{a}.i} = \omega_{i.i} & \text{и } \omega_{i.i} \leq \frac{\tilde{\sigma}}{L_{i.i} \in L_{\max}^{\square}} \\ \omega_{\bar{a}.i} \leq \omega_{i.i} & \text{и } \omega_{i.i} = \frac{\tilde{\sigma}}{L_{i.i} \in L_{mes}^{\square}} \\ \omega_{\bar{a}.i} < \omega_{i.i} & \text{и } \omega_{i.i} \geq \frac{\tilde{\sigma}}{L_{i.i} \in L_{\min}^{\square}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $x$  - скорость движения агрегата на учётной делянке;

$L_{\max}^{\square}$ ,  $L_{mes}^{\square}$ ,  $L_{\min}^{\square}$  - области больших, средних и малых периодов колебаний рельефа поля.

Критерий  $K_{\omega z}$  обуславливает требования к логическим и динамическим качествам систем в частотной области, тем самым в значительной степени предопределяются и амплитудные показатели систем. Однако наряду с ним, во-первых, следует использовать предельно допустимое отклонение среднего арифметического значения фактической глубины  $M_z$  обработки почвы от заданного (установленного) значения  $z_3$ :

$$\Delta M_z = 100 \cdot \frac{M_z - z_3}{z_3} \leq \pm 5 \%$$

Это значит, что, например, при  $z_3 = 20$  см  $\Delta M_z = \pm 1$  см.

Во-вторых, необходимо применять оценки вариационной статистики: корреляционную функцию и функцию спектральной плотности.

Оптимальная в указанном смысле динамическая система должна так перерабатывать входной сигнал, чтобы нулевое значение корреляционной функции на выходе  $R(\tau)_{\text{вых}}|_0$  (дисперсия  $D_{\text{вых}}$  выхода) оказывалось всегда не больше, чем на входе, а время спада  $\tau_{\text{СП}}$

корреляционной функции выхода до нуля (точнее до попадания в 5 % -ную зону) всегда превышать время ее спада на входе, т. е.:

$$\left. \begin{aligned} R(\tau)_{\dot{a}\dot{u}\dot{o}}|_0 = D_{\dot{a}\dot{u}\dot{o}} \leq R(\tau)_{\dot{a}\dot{o}}|_0 = D_{\dot{a}\dot{o}} \\ \tau_{\dot{u}\dot{o}} \succ \tau_{\dot{a}\dot{o}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из анализа формулы (2) следует, что корреляционная функция выхода  $R(\tau)_{\text{вых}}$  должна быть более пологой, чем  $R(\tau)_{\text{вх}}$  входа. Функция спектральной плотности выхода, наоборот, должна быть более крутой, т. е. спектр дисперсий выхода должен быть сосредоточен в области инфранизких частот:  $S(\omega)_{\text{max}} \leq 0,22$  Гц. При соблюдении условий (1) и (2) локальная система плоскости будет реализовывать функцию оптимального фильтра, в результате чего дно борозды и микрорельеф поля будут выровненными.

Для реализации оптимальной системы необходимо изучить существующие ОР. В частности, вероятность выхода глубины обработки  $z(t)$ , или  $z(x)$ , где  $x = xt$ , за пределы  $\pm \Delta M_z$  можно определить из выражения:

$$P[|z(t)| \geq \Delta M_z] = 2 \int_{\Delta M_z}^{\infty} f(z) dz$$

где  $f(z)$  - плотность распределения глубины обработки.

Согласно нормальному закону распределения, которому подчиняются колебания глубины обработки (проверка проведена по критериям Колмогорова и Пирсона):

$$f(z) = (\sigma_z \sqrt{2\pi})^{-1} \exp - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \quad (3)$$

Отсюда вероятность выхода глубины обработки за пределы  $\pm \Delta M_z$

$$P[|z(t)| \geq \Delta M_z] = 1 - \hat{O} \left[ \frac{\Delta M_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right]$$

где  $\hat{O} \left[ \frac{\Delta M_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right]$  - интегральная функция Лапласа.

Среднее время пребывания случайной функции вне сегмента  $[-\Delta M_z; \Delta M_z]$  в течение общего времени работы агрегата

$$T(\Delta M_z) = \int_0^T \int_{\Delta M_z}^{\infty} f(z) dz dt$$

С учётом зависимости (3)

$$T(\Delta M_z) = T \cdot \left[ 1 - \hat{O} \left( \frac{\Delta M_z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right) \right]$$

Вероятное число выходов  $n(\Delta M_z)$  глубины вспашки за пределы  $\pm \Delta M_z$  в единицу времени может быть определено с помощью двумерной плотности вероятности  $f(z, z')$  случайной функции  $z(t)$  и производной этой функции  $\dot{z}(t)$ :

$$n(t) = 2 \int_0^{\infty} z' f(z, z') dz'$$

Отсюда общее число превышений границ  $\pm \Delta M_z$

$$N_z = Tn(z) = 2T \int_0^{\infty} z' f(z, z') dz'$$

При условии, что процессы  $z(t)$  и  $\dot{z}(t)$  не коррелированы,  $f(z, \dot{z}) = f(z)f(\dot{z})$ . Для нормального закона распределения

$$f(z, z') = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{(2\sigma_z^2)}} \cdot \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z')^2}{(2\sigma_z^2)}}$$

где  $\sigma_z = \sqrt{|R''(0)|}$  - среднее квадратическое отклонение скорости изменения процесса.

Если задана дифференцируемая корреляционная функция  $R(\tau)$ , то значение  $\sigma_z$  может быть найдено по второй производной  $R''(\tau)$ . Тогда

$$N_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{|R^{IV}(0)|}{|R''(0)|} \right)^{\frac{1}{2}}$$

где  $R^{IV}(0)$  – производная четвёртого порядка от корреляционной функции процесса глубины обработки.

Математическое ожидание числа максимумов функции  $z(t)$ , превышающих в единицу времени  $z_3$ , можно было бы определить, вычислив интеграл

$$\dot{I}(z_3^+) = \int_{z_3}^{\infty} g(z) dz = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{z_3}^{\infty} f(z, 0, z'') z'' dz'' dz$$

Но поскольку при нормальном законе распределения этот интеграл не решается, то для определения  $M(z_3^+)$  можно использовать с достаточной точностью приближенное выражение:

$$\dot{I}(z_3^+) \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{|R''(0)|}{R(0)} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{z_3^2}{2R(0)}\right)$$

В результате полевых исследований динамики гусеничного пахотного агрегата (трактор ДТ-75 и пятикорпусный прицепной плуг «Труженик») получены реализации по глубине вспашки. На ЦВМ «Минск-22» по этим реализациям вычислены корреляционные функции, которые аппроксимированы дифференцируемыми выражениями

$$R(\tau) \approx \sigma^2 \left( \frac{4}{3} e^{-\alpha\tau} - \frac{1}{3} e^{-4\alpha\tau} \right)$$

Результаты аппроксимации корреляционных функций показывают, что более 60 % времени плуг движется вне полосы шириной  $\pm 1$  см; вероятное число  $n(1)$  выходов; орудия из нее (частота выходов) 0,34 - 0,72 Гц, среднее время пребывания вне полосы  $\theta = 1,4 \dots 1,8$  с, число максимумов в секунду  $M(1+) = 0,36 - 0,58$ .

Рассмотренные критерии оценки динамических характеристик (внутренней структуры) случайного процесса позволяют наиболее полно анализировать качество вспашки. Полученные оценки указывают на большую динамичность процесса: колебания глубины обработки превышают допускаемые агротехническими требованиями. Численное значение выбросов при этом велико, а число и длительность их значительны. В связи с этим необходимо уточнить агротехнические допуски с учетом возможностей, раскрываемых теорией случайных функций.

Быстрота протекания процессов вызывает необходимость автоматического высотного регулирования глубины хода плуга. При отсутствии автоматического регулирования изменение значений  $M_z$  и  $\sigma_z$  приводит к снижению урожайности:

$$\Delta U = b \sigma_z$$

где  $b$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от вида культуры, фона поля и типа почвы.

С увеличением отклонений  $\sigma_z$  на 1 см урожайность снижается на 3,5 – 5 %. поэтому оптимальный технологический допуск на отклонение  $\sigma_{z\text{ опт}}$  должен быть 0,5 - 1 см при доверительной вероятности  $P = 0,95$ ; при  $P = 0,99$   $\sigma_{z\text{ опт}} = 0,7 \dots 0,9$  см.

2. Требования к системам автоматического регулирования глубины обработки почвы.



## САР РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ

Наиболее полно агротехническим требованиям соответствует способ регулирования по координате  $z(x)$  глубины обработки почвы. Однако способ высотного регулирования глубины вспашки, при котором плуг заглубляется под влиянием равнодействующей  $R_z$  сил сопротивления, а удерживается на заданной глубине опорным колесом, не всегда соответствует этим требованиям. Такие системы некоторые называют системами с разомкнутым циклом регулирования.

На самом деле в таких своеобразных системах цикл регулирования замкнут (рис. 1) двумя отрицательными обратными связями. Первая замкнута через опорное колесо. Действительно, при попытке заглубить плуг больше заданного эта обратная связь срабатывает и, воздействуя на плуг, не даёт ему заглубиться. При попытке плуга выглубиться (затупление лемехов, забивание и залипание корпусов) начинает действовать вторая цепь ограничительной отрицательной обратной связи веса плуга. Учитывая, что при таких способах и устройствах регулирование осуществляется, как писал академик В. П. Горячкин, в результате «игры сил», их более правильно было бы называть простейшими механическими способами и устройствами силового копирования. Но так как термины «силовой способ», «силовая система регулирования» уже используются, назовем этот обширный подкласс систем, в которых высотный способ регулирования происходит в результате суммирования силовых и кинематических параметров, влияющих на положение машины относительно поверхности поля,— высотными системами с аддитивным воздействием.

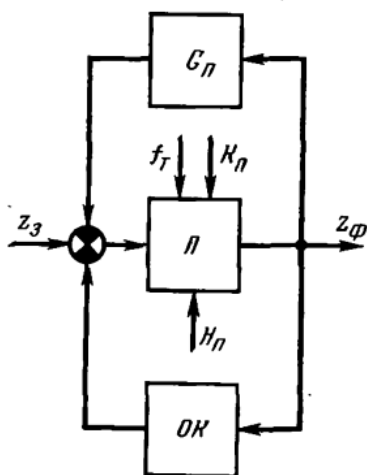


Рисунок 1. Функциональная схема серийной высотной системы регулирования глубины обработки почвы: П – плуг; ОК – опорное колесо;  $G_p$  – вес плуга;  $K_p$ ,  $H_p$ ,  $f_t$  – возмущающие воздействия;  $z_\phi$  – заданная и фактическая глубины обработки.

Почва имеет разную твердость и плотность, поэтому на мягких, рыхлых почвах опорное колесо «тонет», а на твердых «зависает» (плуг «всплывает»). Кроме того, при залипании колеса почвой и растительными остатками фактический радиус  $r_{к.ф}$  качения его становится существенно больше номинального  $r_{к.н}$  и плуг движется не на заданной глубине. Все это приводит к тому, что высотные системы с аддитивным воздействием не обеспечивают требуемого качества обработки по глубине: значение  $\Delta M_z$  вместо  $\pm 1$  см может быть  $\pm 2 \dots \pm 3$  см, а отклонение  $\sigma_z$  в зависимости от внешних условий (фона, микрорельефа, засоренности поля) составлять 2 - 4 см и более, т. е. текущие отклонения глубины обработки от заданного значения могут достигать  $\pm 8$  см и более при  $P = 0,95$  и  $\pm 12$  см при  $P = 0,99$  [при  $M_z = (20 \pm 1)$  см]. Аналогичные высотные системы регулирования имеют культиваторы, луцильники, сеялки, сажалки. Недостатки таких систем заставляют искать пути высотного же, но автоматического (с помощью ПП, УПУ и ИУ) регули-

рования глубины обработки почвы. Назовем подкласс таких систем высотными с параметрическим воздействием.

Пример высотной системы с параметрическим воздействием - система «Ganomag - Pilot» (ФРГ) с ПП, реагирующим на изменение глубины, в виде копирующего колеса, передающего информацию через тросик на пружину клапана, играющего роль дросселя, изменяющего давление масла на поршень цилиндра, регулирующего положение плуга. Аналогичная система, но с частичной компенсацией вредных возмущающих воздействий трактора на плуг и минимизацией давления плуга на опорную поверхность (поля и дна борозды) разработана в НПО «Агроприбор». Общая целевая функция такой системы:

$$C_z = \begin{cases} \Delta z \leq |1...2| \text{ и } \delta \dot{D} = 0,95 \\ \min Q_i = -R_z \end{cases}$$

где  $\Delta z$  - допуск на глубину вспашки;

$Q_{\Pi}$  - вертикальная составляющая силы, заглубляющей плуг;

$R_z$  - вертикальная составляющая силы сопротивления почвы перемещению рабочих органов.

Частные целевые функции:

глубина обработки

$$z = F_1(H_i, \dot{E}_i, \gamma_{i,\dot{\delta}}, \lambda_{\dot{A},\dot{\delta}}, D_1, D_2)$$

вертикальная составляющая силы, заглубляющей плуг

$$Q_i = F_2(H_i, \dot{E}_i, \gamma_{i,\dot{\delta}}, \lambda_{\dot{A},\dot{\delta}}, D_1)$$

возмущающее воздействие трактора на плуг

$$f_{\dot{\delta}} = F_3(\gamma_{i,\dot{\delta}}, \lambda_{\dot{A},\dot{\delta}}, D_1, D_2)$$

где  $H_{\Pi}$ ,  $K_{\Pi}$  – высоты неровностей поверхности поля и удельное сопротивление почвы;

$\gamma_{н.т}$  – угловое перемещение нижних тяг;

$\lambda_{в.т}$  – изменение длины верхней тяги;  $P_1$ ,  $P_2$  – рабочее давление в нижней и верхней полостях цилиндра.

Алгоритм регулирования глубины  $z$ :

$$U_z = \begin{cases} \left. \begin{matrix} \min P_1 \\ \max P_2 \end{matrix} \right\} \text{ и } \delta \dot{D} \quad z_{\delta} < z_3 \\ P_1 = P_2 \quad \text{и } \delta \dot{D} \quad z_{\delta} = z_3 \\ \left. \begin{matrix} \max P_1 \\ \min P_2 \end{matrix} \right\} \text{ и } \delta \dot{D} \quad z_{\delta} > z_3 \end{cases}$$

Алгоритм регулирования тягового сопротивления и догрузки (вертикальной силы  $Q_{\Pi}$ ):

$$U_Q = \begin{cases} \left. \begin{matrix} \min P_1 \\ \max P_2 \end{matrix} \right\} \text{ и } \delta \dot{D} \quad Q_i > R_z + r, \text{ и } \delta \dot{D} \quad z_{\delta} > z_3 \\ \left. \begin{matrix} P_1 = P^0 \\ \min P_2 \end{matrix} \right\} \text{ и } \delta \dot{D} \quad Q_i = R_z + r, \text{ и } \delta \dot{D} \quad z_{\delta} = z_3 \\ \left. \begin{matrix} \min P_1 \\ \max P_2 \end{matrix} \right\} \text{ и } \delta \dot{D} \quad Q_i < R_z + r, \text{ и } \delta \dot{D} \quad z_{\delta} < z_3 \end{cases}$$

где  $r$  – избыточная вертикальная сила, создающая плужную подошву и дополнительное сопротивление орудия (достигает  $5 \cdot 10^3$  Н).

Алгоритм компенсации:

$$U_f = \begin{cases} \min P_1 \\ \min P_2 \end{cases} \quad \text{if } \delta \dot{e} \quad f_{\dot{o}} \neq 0$$

$$\min P_{1,2} \leq E_{1,2} \quad \text{if } \delta \dot{e} \quad f_{\dot{o}} = 0$$

Реализация найденных алгоритмов и абстрактный синтез автоматического устройства осуществлены на основе теории k-значной логики. Для этого ввели аналогию между трехзначной k-логической переменной (с квантованием сигнала по трем уровням) и физическими характеристиками регулируемых параметров  $z$ ,  $Q_n$ , компенсируемого  $f_T$  и регулирующих  $P_1$ ,  $P_2$  воздействий:

давление в нижней полости цилиндра

$$\min P_1 \rightarrow 0;$$

$$P_1^0 \rightarrow 1$$

$$\max P_1 \rightarrow 2$$

давление в верхней полости цилиндра

$$\min P_2 \rightarrow 0;$$

$$\min P_2 = \min P_2^0 \rightarrow 0$$

$$\max P_2 \rightarrow 2$$

Для записи приведенной таблицы в аналитической форме использованы так называемые k-значные совершенные формы:

дизъюнктивная (КДСНФ)

$$\varphi(V_1, V_2, \dots V_n) = \bigvee_{j=0}^{k^n-1} F_j \varphi(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$$

конъюнктивная (ККСНФ)

$$\varphi(V_1, V_2, \dots V_n) = \bigwedge_{j=0}^{k^n-1} [\hat{O}_j V \varphi(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)]$$

где  $V_1, V_2, \dots V_n$  – переменные k-значной логики;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n$  – аргументы (состояния) переменных.

Конкретно для параметра  $z$  используют ККСНФ, для  $f_T$  – КДСНФ:

$$z(P_1, P_2) = \varphi_1(P_1) V \varphi_1(P_2) \quad (4)$$

$$f_{\dot{o}}(P_1, P_2) = \varphi_1(P_1) \Omega \varphi_1(P_2) \quad (5)$$

По этим элементарным функциям легко судить о работе системы.

Подставив в выражения (4) и (5) значения

$$z(P_1, P_2) = \bar{P}_1^0 V \min \bar{P}_2 = \bar{P}_1^0 V \max P_2$$

$$f_{\dot{o}}(P_1, P_2) = P^0 \Omega \min P_2$$

Получают логические функции, характеризующие работу системы. На основании их спроектирован регулятор (рис. 2), имеющий ПП 1 в виде ползка, копирующего колеса или дискретного датчика, гидромеханическое или электронно-гидравлическое УПУ 2, установленное на плуге 3 и

соединенное магистралями с насосом и гидроцилиндром 4 раздельно-агрегатной гидро-системы трактора. Система поддерживает установленную глубину, одновременно частично компенсирует влияние угловых колебаний трактора в продольно - вертикальной плоскости на плуг и благодаря некоторому подпору давления в нижней полости цилиндра снижает вертикальное давление плуга на почву. Однако опыты показали, что, хотя при повышении давления  $P^0$  более 2,8 МПа устойчивость движения трактора заметно не нарушается, коэффициент давления увеличивается по сравнению с плавающим положением на 0,066 и число управляющих воздействий для регулирования глубины

резко возрастает, причем поддерживать ее в нужном диапазоне становится затруднительно.

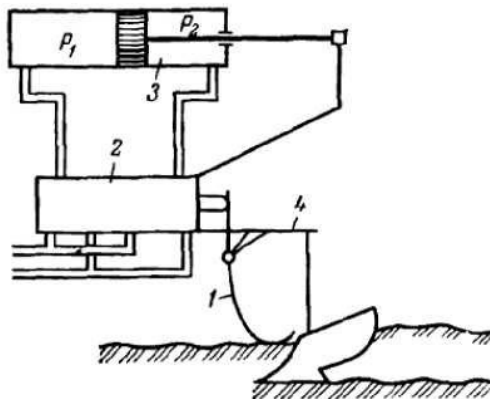


Рисунок 2. Принципиальная схема высотной системы с параметрическим воздействием для регулирования глубины обработки почвы

В высотных системах основной контролируемый и регулируемый параметр - глубина обработки почвы, в силовых — тяговое сопротивление орудия. Соответственно в качестве ПП применяют различного рода датчики усилий. В регуляторе УРН, например, используется датчик в виде фигурной пружины, деформация которой примерно пропорциональна изменению тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия. Для этого же регулятора в МИИСПе разработан и исследован гидростатический датчик с квазилинейной статической характеристикой:

$$l_{\bar{A}} = \hat{E}_{\bar{A}} P_{\bar{A}0}$$

где  $l_{\bar{d}}$  — ход штока датчика;

$K_{\bar{d}}$  — коэффициент усиления датчика;

$P_{\text{вх}}$  — подводимое давление.

Из анализа динамических характеристик такого датчика следует, что он представляет собой апериодическое звено:

$$W(s)_{\bar{A}} = \frac{l_{\bar{A}}}{D_{\bar{A}0}} = \frac{\hat{E}_{\bar{A}}}{\hat{O}_{\bar{A}}s + 1}$$

с постоянной времени  $T_{\bar{d}} = 0,16$  с и частотой среза  $\omega_c = 1$  Гц. Исследования такого датчика в комплексе с регулятором УРН показали, что он имеет большую чувствительность, чем механические ПП, и позволяет регулировать полосу пропускания входного сигнала, однако ему присущи утечки, которые можно уменьшить при прецизионном изготовлении, но полностью устранить нельзя.

В МАМИ разработан электрогидравлический силовой регулятор навесной системы на базе УРН-2. Навесная система трактора имеет специальную силоизмерительную тягу с ЧЭ магнитоанизотропного типа, защищенным от изгибающего момента, действующего на тягу при эксплуатации, что увеличивает точность измерений.

Силовой регулятор обычно совмещен конструктивно с позиционным. Последний представляет собой устройство, у которого распределительный золотник механически связан с одним из подъемных рычагов механизма навески, укрепляемым, например, на поворотном валу подъемного механизма. Позиционный регулятор позволяет устанавливать сельскохозяйственную машину в то или иное положение (позицию) по высоте относительно трактора. Однако при таком регулировании колебания остова трактора передаются на машину и снижают качество выполненной операции.

При использовании силовых САР улучшаются энергетические режимы работы агрегата, повышается производительность на 7 - 12 % (в зависимости от условий работы), уменьшается расход топлива на 4 - 10 %. Но при работе на полях с неровным рельефом и

различной плотностью (твёрдостью) почвы силовая САР, стабилизируя тяговое сопротивление, может нарушать основной технологический параметр - глубину обработки. Раздельно-агрегатные гидросистемы обеспечивают только подъем и опускание навесных, полунавесных и прицепных машин и их рабочих органов, которые в рабочем положении опираются на колеса, лыжи, башмаки, полозки, а гидросистема при этом находится в плавающем положении.

Преимущества силовых систем продолжают интересовать конструкторов. Наряду с постепенным внедрением позиционно-силовых регуляторов всё больше усиливается тенденция комбинирования высотно-силовых регуляторов. Такие попытки делались и раньше («Ganomag - Pilot», частично-инвариантная САР НПО «Агроприбор» и другие системы). Создан вариант высотно-силового электрогидравлического регулятора (рис. 3).

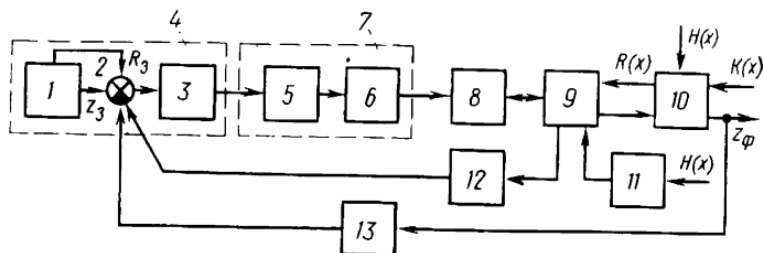


Рисунок 3. Функциональная схема высотно-силовой электрогидравлической САР глубины обработки почвы:

1 - ЗУ; 2 - блок сравнения; 3 - электронный усилитель; 4 - пульт управления; 5 - электромеханический преобразователь; 6 - гидравлический усилитель; 7 - электрогидравлическое УПУ; 8 - гидроцилиндр; 9 - механизм навески; 10 - сельскохозяйственная машина; 11 - трактор; 12, 13 - датчики усилия и глубины вспашки;  $H(x)$  - высота неровностей поверхности поля;  $K(x)$  - удельное сопротивление почвы;  $z_3$ ,  $z_\phi$  - заданная и фактическая глубины вспашки;  $R_z$ ,  $R_x$  - заданное и текущее тяговые сопротивления машины.

Исследование математической модели такого регулятора на ЭВМ ЕС10-22 показало, в частности, что допустимый перепад давления на его золотнике  $\Delta p \leq 1,0 - 1,2$  МПа. При соблюдении этого значения высотный контур регулирования (в описанной комбинированной системе он служит вспомогательным - коррелирующим) обеспечивает гарантированный допуск на среднее квадратическое отклонение глубины  $\sigma_z \leq 0,95\Delta z_3$ , а силовой - снижение среднего уровня тягового сопротивления МСХМ на 1,5 - 2,5 кН и амплитуды колебаний тягового сопротивления на 50 - 70 %.

Итак, наиболее перспективный способ регулирования почвообрабатывающих машин - комбинированный, в котором использован высотный контур регулирования. Будет ли он вспомогательным или главным, покажут дальнейшие исследования. По нашему мнению, этот контур должен быть главным. (Такого же мнения придерживается Р.Т. Абдрашитов.) Только при выдерживании заданной глубины обработки можно использовать избыток реактивной составляющей силы сопротивления для догрузки движителей с помощью корректоров вертикальных нагрузок (КВН), или, как их еще называют, гидроувеличителей сцепного веса (ГСВ), для выравнивания и снижения тягового сопротивления контурами силового регулирования, а также разгрузки опор плуга.

### САР ПОСЕВНЫХ И ПОСАДОЧНЫХ МАШИН

При посеве и посадке требования к математическому ожиданию  $M_z$  глубины заделки семян и стабильности ее поддержания  $\sigma_z$  зависят от вида культуры и типа семян. Как правило, для крупносемянных культур (картофель, кукуруза, хлопок)  $M_z = 6 - 12$  см, для среднесемянных (зерновые колосовые) - 4 - 6 см, для мелкосемянных (лен, редис) - 1,5 - 3 см. Причем чем меньше глубина заделки семян, тем жестче требования к  $\sigma_z$ . Однако и при большой и средней глубине отклонение среднего значения  $M_z$  от заданного в пределах  $\pm 2$  см снижает урожайность, например, зерновых культур на 10 - 12 %, льна - на 50 %.

Математическое ожидание урожайности зерновых культур в зависимости от глубины заделки семян

$$M\{U\} = A\{z\} - CD\{z\},$$

где  $A\{z\}$  - урожайность при оптимальной глубине заделки;

$C$  - коэффициент, характеризующий влияние дисперсии распределения семян по глубине на урожайность;

$D\{z\}$  - дисперсия распределения семян по глубине.

Установлено, что коэффициент  $C = 0,046$  при доверительном интервале его определения  $\delta(C) = 0,012$ . В этих условиях потери урожайности из-за колебаний значений  $\sigma_z$  в пределах  $\pm 2,5$  см для агрегата с сеялкой СУ-24А составляют 38 %. При установке на сеялке-культиваторе двухопорной подвески сошника значение  $\sigma_z$  снижается до 0,86 см (при одноопорной подвеске  $\sigma_z = 1,39$  см), а урожайность увеличивается на 6,8 % по сравнению с той, которая была получена при одноопорной подвеске, т. е. стабилизировать глубину заделки семян очень важно. Допустимое среднее квадратическое отклонение сошника  $\sigma_{z \text{ доп}}(H)$ , зависящее от высоты  $H_{\text{п.п}}$  и неровностей поверхности поля, было меньше или равно 0,35 см.

Сошник может отклоняться от заданной глубины не только из-за неровностей поверхности поля, но и в результате неравномерной плотности почвы. Колебания  $\sigma_{z \text{ доп}}(K)$  по этой причине не должны превышать для зерновых культур 0,54 см.

На качество заделки семян по глубине влияет скорость движения агрегата. С увеличением ее возрастают среднее квадратическое отклонение семян по глубине и средняя глубина заделки семян. Вероятность  $P_{cz}$  попадания семян на заданную глубину снижается: при скорости  $V = 6$  км/ч  $P_{cz} = 0,75$ , при  $V = 12$  км/ч  $P_{cz} = 0,5$ . В среднем с увеличением скорости на 1 км/ч (при равных условиях) сошники выглублялись на 3 - 4 % относительно установленной глубины. То есть стабилизацию глубины заделки семян необходимо сочетать с автоматизацией регулирования скоростных и загрузочных режимов посевного агрегата.

При посеве и посадке используют высотный способ регулирования глубины хода сошников с аддитивным воздействием. Этот простейший вариант регулирования имеет неиспользованные возможности повышения точности поддержания заданной глубины, что было показано на примере САР усилий пружин в системах подвески сошников сеялок и сажалок. Эту же задачу можно решить с помощью двухопорной балансирной подвески с параллелограммным креплением рабочего органа к раме сеялки (рис. 4).

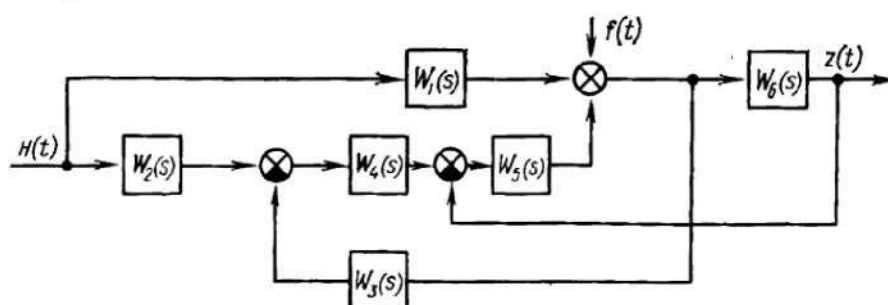


Рисунок 4. Структурная схема системы стабилизации движения сошника сеялки по глубине:

$W_1(s) \dots W_5(s)$  - передаточные функции, характеризующие влияние колебаний рамы сеялки на равномерность хода сошника, геометрические параметры колеса, воздействие колеса на почву, распределение параметров подвески в пространстве, реакцию почвы на воздействие колес подвески;

$W_6(s)$  - передаточная функция широкозахватного сошника.

Оптимальные параметры такой подвески рассчитаны (из условия минимизации дисперсии  $D_{\epsilon 0}$  ошибки рассогласования между идеальной и действительной глубиной

хода сошника по профилю поля и неравномерности плотности почвы) с помощью уравнения, которое решается методом Гаусса — Зейделя

$$D_{\varepsilon i} = \int [(L_i(\omega) - W_z(\omega)) \cdot (\bar{L}_i(\omega) - \bar{W}_z(\omega)) \cdot S_z(\omega) + (S_i(\omega) - W_f(\omega)) \cdot (S_i(\omega) - W_f(\omega)) \cdot (\bar{S}_i(\omega) - \bar{W}_f(\omega)) \cdot S_f(\omega)] d\omega \rightarrow \min$$

где  $L_i(\omega) = \frac{0,99155}{0,00691s + 1}$  и  $L_0(\omega) = 0,0224$  см/Н – частотные характеристики идеальных передаточных функций посевного агрегата по профилю поля и по возмущению.

$$W_z(\omega) = \frac{K_o \cos ls \cdot (T_2''\omega^2 + T_1'\omega + T_1')}{\dot{O}_3\omega^3 + \dot{O}_2\omega^2 + \dot{O}_1\omega + \dot{O}_i}$$

и

$$W_f(\omega) = \frac{K_o \cos ls \cdot (T_2''\omega^2 + T_1''\omega + 1)}{\dot{O}_3\omega^3 + \dot{O}_2\omega^2 + \dot{O}_1\omega + \dot{O}_i} - \text{частотные характеристики действительных}$$

передаточных функций посевного агрегата по профилю поля и по возмущению;  $K_o$  – коэффициент усиления;  $T_i', T_i'', T_i'''$  – постоянные времени двухколёсной балансирной подвески;  $i = 0, 1, 2, 3$ ,  $S_z(\omega)$ ,  $S_f(\omega)$  – спектральные плотности входных сигналов по профилю поля и плотности почвы.

Минимальное значение  $D_{\varepsilon 0}$  получено при радиусе опорного колеса подвески  $r_{к.п} = 0,22$  м, базе балансирной подвески  $l_{б.п} = 0,9$  м, ширине опорного колеса подвески  $B_{к.п} = 0,6$  м. Лабораторно-полевые испытания экспериментальной сеялки-культиватора при таких параметрах балансирной подвески показали, что вероятность сохранения заданной глубины заделки семян повышается почти в 2 раза по сравнению с серийными сеялками СУ-24 и СУК-24. Среднее квадратическое отклонение глубины заделки семян уменьшается с 1,39 до 0,86 см. Равномерность распределения семян по глубине увеличивается в среднем на 11 % по сравнению с сеялками СЗС-2,1 и на 6 % - с сеялками СУ-24. Вероятность пребывания сошника в заданном агротехническом допуске вместо 0,3 - 0,5 у сеялок с дисковыми сошниками становится равной 0,77 - 0,95 при скорости движения агрегата 1,36 - 3,35 м/с. В результате урожайность возрастает на 6,8 % по сравнению с сеялкой СЗС-2,1 и на 38 % по сравнению, с СУ-24А.

Во ВНИИЗХе применительно к таким сеялкам разработан механизм гидравлической подвески сошника (рис. 5), автоматически стабилизирующий глубину заделки семян. Он состоит из копирующего катка 1, сошника 6, грузов 2, гидроцилиндров 3 и 5, соединенных гибкими трубопроводами. Между гидроцилиндрами размещены гидроаккумуляторы 4 и 7. При изменении профиля поверхности поля копирующий каток 1 отклоняется и грузы 2 через систему рычагов воздействуют на поршень гидроцилиндра 3. Масло под действием поршня перетекает по трубопроводу в гидроаккумулятор 4 и гидроцилиндр 5. Поршень, а вместе с ним и сошник 6 перемещаются. В зависимости от почвенных условий характер движения сошника можно изменять предварительным натяжением пружин гидроаккумуляторов и грузами. Грузы и силу предварительного натяжения пружин выбирают из условия, чтобы изменение сопротивления почвы существенно не отражалось на колебаниях сошника в вертикальной плоскости.

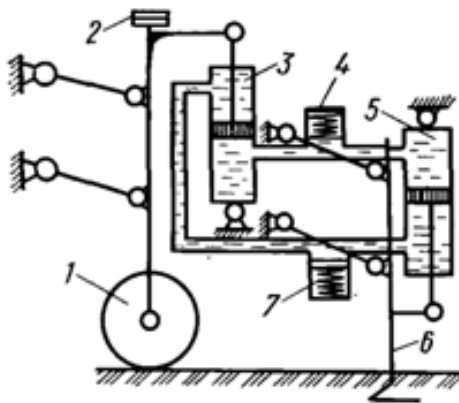


Рисунок 5. Схема механизма гидравлической подвески сошника.

Передаточная функция механизма гидравлической подвески сошника с достаточной для практики точностью описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Вид передаточной функции системы соответствует передаточной функции колебательного звена:

$$W(s) = \frac{K}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}$$

Коэффициенты, входящие в это уравнение, определяли в лабораторных условиях на специальном стенде и в почвенном канале ВНИИЗХа. При лабораторно-полевых испытаниях сошников с гидравлическим механизмом подвески контрольным вариантом служил сошник с шарнирным механизмом подвески. В процессе опытов определяли устойчивость хода сошника по глубине и глубину заделки семян. Установлено, что сошник с гидравлическим механизмом подвески работает более устойчиво по глубине, чем сошник с шарнирным механизмом. Равномерность глубины заделки семян сошником с гидравлическим механизмом подвески отвечает агротехническим требованиям ( $\sigma = 0,86 - 1,2$  см при скорости  $4,6 \dots 6,6$  км/ч). Стабильность глубины заделки семян обеспечивается благодаря сохранению постоянного (в пределах агротехнического допуска) расстояния между дном борозды и поверхностью почвы, т. е. при копировании сошником неровностей микропрофиля поля. По данным ВНИИЗХа, отклонение глубины заделки семян пшеницы от заданной (в условиях Целиноградской области) на 1 см снижает урожайность на 0,09 т/га.

Расчеты показывают, что при посеве зерновых культур сеялками-культиваторами с шарнирными механизмами подвески сошников урожайность снижается из-за неравномерной глубины заделки семян в среднем на 0,064 т/га при средней урожайности 0,1 т/га. Гидравлические механизмы подвески сошников позволяют улучшить равномерность глубины заделки семян и повысить урожайность зерновых культур на 0,028 т/га.

В АзНИИМЭСХе разработана система автоматической стабилизации глубины хода сошников полунавесной горной сеялки СГП-2,4. Для этого пришлось несколько изменить сошниковый вал сеялки, оборудовать ее электрогидравлическим подвесным устройством и установить на двух крайних сошниках (верхнем и нижнем по склону) два датчика для контроля отклонения глубины хода. Сигналы управления гидроцилиндрами, воздействующими на подвесной механизм, формирует электронное УПУ.

Если без устройства стабилизации при увеличении крутизны склона от  $0 - 2$  до  $10 - 12^\circ$  число не заделанных семян возрастает от  $10 - 11$  до  $23 - 24$  на 1 м, а количество всходов снижается более чем на 15 %, то с устройством стабилизации количество незаделанных семян сократилось на 40 - 50 %, а количество всходов увеличилось на 10 %.

Целесообразно разрабатывать параллельно САК и САР глубины заделки семян и внесения удобрений для сеялок всех типов, сеялок-культиваторов, сажалок и



комбинированных агрегатов. При этом ожидается, что урожайность повысится в среднем на 2 %, возрастет производительность и улучшатся условия труда механизаторов, сократится число сеяльщиков.

### САР КУЛЬТИВАТОРОВ

При междурядной обработке предъявляются определенные требования к глубине хода рабочих органов. Например, для культиватора-растениепитателя  $\Delta M_z \leq \pm 1,5$  см, для пропашного фрезерного культиватора при  $z_3 = 8$  см  $\Delta M_z = \pm 2$  см,  $\sigma_z = 1,65$  см. В качестве обобщенного статистического показателя колебаний глубины обработки почвы при работе фрезерного культиватора принята вероятность сохранения допуска в пределах заданного симметричного интервала

$$P_z = \frac{\Delta T}{T}$$

где  $\Delta T$  – время нахождения выходного процесса в поле допуска;

$T$  - продолжительность наблюдения.

Исходя из результатов многолетних испытаний фрезерных культиваторов значение  $P_{z\text{доп}}$  должно быть не менее 70 % (средний уровень для вновь проектируемой или испытываемой машины). Для автоматических устройств контроля качества работы фрезерных культиваторов по глубине введен параметр расстройки  $\Delta P_z$ . При  $\Delta P_z > 20$  % фрезе необходимо регулировать.

### САР УБОРОЧНЫХ МАШИН

При уборке зерновых культур основной параметр контроля в продольно-вертикальной плоскости - высота среза. Высота стерни не должна превышать 200 мм при раздельной уборке и 150 мм при прямом комбайнировании. Для районов повышенной влажности высота среза может быть больше; при уборке зернобобовых культур, как и трав, высота среза должна быть 50 - 60 мм. Допуски на отклонение номинальной высоты среза в агротехнических требованиях обычно не оговаривают. Однако для выбора способов и средств автоматического регулирования они необходимы, поэтому при исследовании уборочных машин как ОР высоты среза применяют статистические оценки. При этом в качестве основного критерия оптимальности высоты среза используют показатель, характеризующий потери урожая:

$$Q_n = [M(z) - z_a] \Delta u$$

где  $M(z) = z_{\max} - \sigma_z t(P_0)$  - математическое ожидание высоты среза;

$z_{\max}$  - максимально допустимая высота среза;

$\sigma_z$  - среднее квадратическое отклонение высоты среза;

$t(P_0)$  - обратная величина интеграла вероятности  $P_0$ ;

$P_0 = \Phi[z_{\max} - M(z)]/\sigma_z$  - интеграл вероятности попадания случайной величины  $z$  в диапазон 0 -  $z_{\max}$ ;

$z_a$  - задаваемая агротехническими требованиями высота среза;

$\Delta U$  - потери урожая (в процентах), приходящиеся на единицу длины растений.

Одновременно определяют характеристики спектральных плотностей  $S_{zL}(\omega)$  и  $S_{zB}(\omega)$  колебаний высоты среза, вызванных неровностями поверхности поля, соответственно в продольном (по пути  $L$ ) и поперечном (в пределах ширины захвата  $B$  жатки) направлениях уборочной машины:

$$S_{zL}(\omega) = [1 + 3 |A_L(\omega)|^2] S_L(\omega)$$

$$S_{zB}(\omega) = [1 + 3 |A_B(\omega)|^2] S_B(\omega)$$

где  $|A_L(\omega)|$ ,  $|A_B(\omega)|$  - модули АЧХ машин в продольно-вертикальной и поперечно-вертикальной плоскостях;

$S_L(\omega)$ ,  $S_B(\omega)$  – спектральные плотности высоты неровностей.

Аналогичные оценки применимы к работе кукурузоуборочных и силосоуборочных комбайнов.

Анализ указанных оценок и закономерностей их изменения совместно с математической моделью процесса регулирования позволяет характеризовать компоновочную схему и конструктивные параметры уборочной машины, предъявить требования к алгоритму управления, типу регулятора, его параметрам, изучить влияние условий работы на основные показатели, характеризующие высоту среза и полноту сбора урожая. В зерноуборочных комбайнах и жатках высоту среза поддерживают высотные системы с аддитивным воздействием.

Разработана САР высоты среза зерноуборочных комбайнов и МТА, составленного из реверсивного трактора и жатки. В такой системе датчики, расположенные по краям жатки, измеряют высоту расположения режущего аппарата относительно поверхности почвы. Сигналы от них усредняются в УПУ и сравниваются с программной высотой среза с учетом поля допуска. Команда на исполнительные гидроцилиндры подается при выходе фактической высоты среза за пределы поля допуска с упреждением, равным зоне, необходимой для исполнения команды.

**При уборке картофеля**, клубни которого располагаются в почве на глубине 10 - 30 см, агротехническими требованиями ограничено отклонение глубины хода подкапывающего лемеха от заданной в пределах  $\pm 2,0$  см. На комбайнах, оснащенных механическими системами копирования рельефа, этот показатель составляет  $\pm 3,0$  см и более. Отклонение глубины хода  $z_a(x)$  подкапывающего лемеха от заданной увеличивает число поврежденных клубней  $\eta_k$  и примесей  $\xi_n$ , а также потерь  $\Delta U_n$  в виде неподкопанных клубней, т.е.

$$\eta_e, \xi_i, \Delta U = f[z_e(\delta)]$$

Нестабильность хода рабочих органов по глубине снижает производительность комбайна, ухудшает качественные и энергетические показатели работы, нарушает технологический процесс. Всё это указывает на необходимость в автоматическом регулировании заданной глубины хода подкапывающего лемеха. Строго говоря, с учетом неравномерности высоты  $z_r(x)$  гнезда клубней и варьирования верхней  $z_B(x)$  и нижней  $z_H(x)$  границ его залегания нужна бы следящая система с параметром регулирования  $z_d(x) = f[z_r(x), z_B(x), z_H(x)]$ , но такую систему пока реализовать трудно и поэтому разрабатывают системы автоматической стабилизации глубины хода рабочих органов комбайна с параметром регулирования

$$z_e(\delta) = f[z_i(\delta) + \Delta z_i(\delta)]$$

где  $\Delta z_n(x)$  - толщина слоя почвы под наиболее глубоко залегающими клубнями.

Макетные образцы систем с максимальным использованием гидравлических элементов, выпускаемых промышленностью, созданы в БИМСХе для комбайна КСК-4 и в ВИСХОМе для комбайна ККУ-2А.

Рассмотрим систему конструкции ВИСХОМа для автоматического поддержания заданной глубины (САПГ) хода подкапывающего лемеха (рис. 6). Во время работы копирующие катки 10 (их два) катятся по гребням гряд, а передние опорные колеса 12 - по междурядьям. Сигналы от катков 10 передаются через параллелограммные механизмы 11, укрепленные на раме 2, усредняются и через тягу 3 поступают на рычаг 9, при помощи которого на золотник гидрораспределителя 6 передается как внешняя (от катков 10), так и внутренняя (от лемеха 8) отрицательная обратная связь. Сигнал от рычага 9 поступает на компенсатор 4, который в пределах полного хода золотника действует как жесткая тяга, а при больших перемещениях копирующих катков 10 - как гибкая, что исключает возможность поломки устройства. Далее сигнал с компенсатора 4 поступает на рычаг 5 и с него на золотник гидрораспределителя 6, направляющего масло в ту или иную полость гидроцилиндра 7 в зависимости от направления отклонения подкапывающего лемеха 8; если заглубление лемеха превышает предельное, сигнал от катков 10 «заставляет» гидроцилиндр 7 выглубить лемех 8; при чрезмерном выглублении подается сигнал (с помощью цепи внешней отрицательной обратной связи) гидроцилиндру заглубить лемех. Чтобы избежать перерегулирования, предусмотрена

внутренняя корректирующая обратная связь от лемеха 8 через рычаг 9, который вовремя компенсирует сигнал катков 10, перемещает золотник в нейтральное положение и останавливает поршень гидроцилиндра. В транспортное положение комбайн поднимается гидроцилиндром 1, при этом лемех 8 автоматически переводится гидроцилиндром 7 в крайнее верхнее положение.

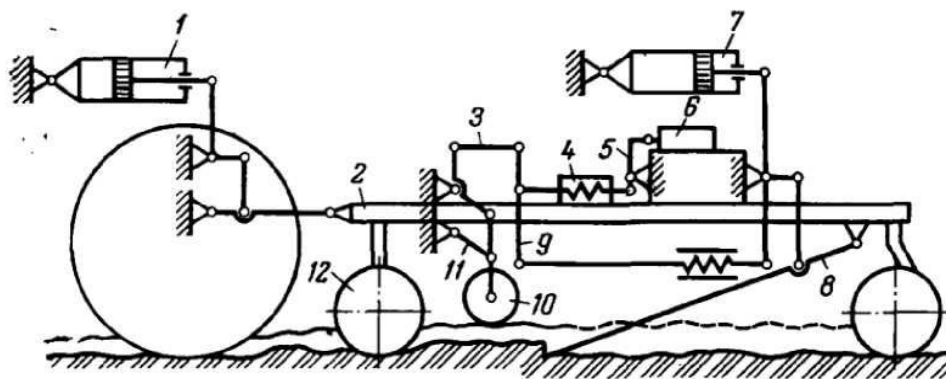


Рисунок 6. Принципиальная схема САПГ хода подкапывающего лемеха картофелеуборочного комбайна

**Уборка свеклы.** Корни свеклы имеют диаметр 30 - 40 мм. При положении головок относительно поверхности почвы от - 30 (головка располагается в почве) до + 70 мм с разностью в положении головок рядом стоящих (на расстоянии 120 - 240 мм) корней 50 - 60 мм по агротехническим требованиям необходимо подкопать не менее 98 % корней (повредить при этом можно не более 3 %), чисто срезать не менее 75 % головок. При этом отход сахаристой массы с ботвой не должен превышать 3 %.

Существует два принципиально различных типа свеклоуборочных комбайнов: ботвосрезающие и теребильные. Первые сначала срезают ботву, затем (при этом же или следующем проходе) извлекают корни из почвы. Вторые сначала извлекают корни из почвы, затем отделяют ботву от корней. В комбайнах первого типа главная проблема автоматизации процесса - копирование в продольно-вертикальной плоскости рядка корней, чтобы нож срезал только ботву с головками и не затрагивал продуктивную часть корня. Для этой цели в комбайнах применяют автоматическую систему с аддитивным воздействием (рис. 7), имеющую копирующий щуп-полозок 1 или каточек с параллелограммным механизмом 2 и пружиной 3, кинематическую связь 4 и нож 5. При подъеме или опускании полозка 1 (или каточкового копирующего щупа) нож 5 благодаря механизму 2 и связи 4 также поднимается и опускается, но на меньшее расстояние по высоте, чем то, которое может регулироваться звеном 4.

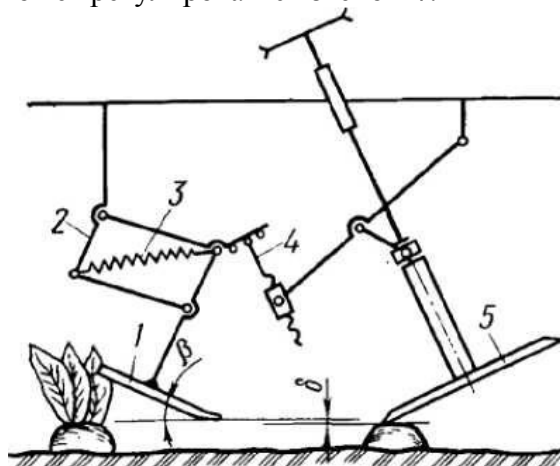


Рисунок 7. Автоматическая система с аддитивным

воздействием, копирующая рядок свеклы в  
продольно-вертикальной плоскости

Вертикальное перемещение каточкового копирующего щупа

$$S_z = H - r_e - L \sin \left\{ 90^\circ - \arctg \left( \frac{x_i t}{H} \right) - 2 \cdot \arccos \sqrt{\frac{\left[ L - \sqrt{H^2 + (x_i t)^2} + r_e + r_A \right] \cdot \left[ L + \sqrt{H^2 + (x_i t)^2} - r_e - r_A \right]}{4L \sqrt{H^2 + (x_i t)^2}}} \right\}$$

где  $H$  - расстояние от поверхности почвы до точки подвеса поводка копирующего щупа;  
 $r_r$  - радиус копируемой головки корня;  
 $L$  - длина поводка щупа;  
 $x_m$  - скорость движения машины;  
 $t$  - время движения;  
 $r_k$  - радиус каточка (для ползкового щупа эта величина отсутствует).

При постоянных кинематических параметрах величина  $S_z$  - случайная функция времени, причем ускорение, с которым копирующий щуп перемещается по вертикали,

$$j_u = \frac{mg - F - N}{m}$$

где  $m$  - приведенная масса копирующего щупа;  
 $g$  - ускорение свободного падения;  
 $F$  - сила трения в шарнирах;  
 $N$  - сила сопротивления пружины (она необходима для уменьшения массы копирующего устройства и улучшения качества копирования).

Чувствительность копирующего устройства косвенно характеризуется минимальным расстоянием  $l_k$  между корнями свеклы с различно расположенными по высоте головками:

$$l_e = x_i \sqrt{\frac{2 \cdot (h_1 - h_2)}{j_u}} + \frac{d_1 + d_2}{2} + b_i$$

где  $h_1, h_2$  - расстояние от поверхности почвы до головок рядом стоящих корней свеклы (низко и более высоко расположенных);  
 $d_1, d_2$  - диаметры рядом стоящих корней;  
 $b_n$  - ширина ножа (при черенковом ноже).

Ползковый копирующий щуп чаще всего состоит из наклонной (под углом  $\beta$ ) передней части и горизонтального хвостовика. Длина хвостовика и угол наклона передней части должны быть достаточными, чтобы ползок начинал подниматься на более высокий корень не раньше, чем срежется предыдущая, более низко расположенная головка, т. е. чтобы

$$\frac{d_1 + d_2}{2} + b + c + (h_2 - \delta) \operatorname{ctg} \beta \leq l_e$$

где  $b$  - длина горизонтальной части ползка;  
 $c$  - расстояние между концом ползка и лезвием ножа;  
 $\delta$  - разница между уровнями основания ползка и лезвия ножа.

Отсюда

$$\operatorname{tg} \beta \leq (h_2 - \delta) \cdot \left[ l_e - b - c - \frac{d_1 + d_2}{2} \right]^{-1}$$

Процесс перехода с высоко расположенной головки корня на более низкую ускоряет пружина 3, необходимое усилие  $N$  которой определяют в зависимости от расстояния горизонтальной части щупа до оси корня и перемещения щупа по высоте, но поскольку эти величины в статистическом смысле случайны, то для более точного копирования нужна адаптивная система с переменными параметрами, а в дальнейшем и с переменной структурой.

При **уборке кукурузы** необходимо регулировать высоту среза комбайна с учетом рельефа поля, поскольку установка на низкий срез может привести к поломке рабочих органов, а высокий срез нежелателен из-за потерь зеленой массы. Использование комбайна ККХ-3 без автоматической системы копирования рельефа поля приводит к существенным потерям урожая, которые снижаются при помощи автоматической системы с пропорциональным регулированием. Особенно это заметно при использовании автоматической системы с дополнительным воздействием по производной от регулируемого параметра (при скорости 12,5 км/ч потери снижаются с 5 до 0,4 %).

**Во время уборки хлопка** с кустов хлопчатника (высота их достигает 800 - 1000 мм, нижние коробочки на кусте располагаются на расстоянии 30 - 50 мм от поверхности почвы) требуется, чтобы шпиндельные аппараты, перемещаясь в вертикальной плоскости, двигались на минимальном расстоянии от почвы, так как потери хлопка (оставлением на кустах или потерями на землю) из раскрывшихся коробочек (созревают сначала нижние коробочки) не допускаются.

Для копирования рельефа поля шпиндельные аппараты опираются на полозья. Чтобы последние не врезались в почву и на их движение не затрачивалось большое усилие, устанавливают компенсационные пружины, которые воспринимают до 95 % массы шпиндельных аппаратов. Работы по созданию систем автоматического копирования рельефа рядков хлопчатника продолжаются.

**При уборке льна-долгунца** (общая длина стебля 400 - 1600 мм, техническая длина 350 - 1250 мм, длина, на которую нужно вытянуть стебель из земли, 20 - 60 мм) высота  $z_T(x)$  тербления должна быть стабилизирована, так как с ее изменением растянутость вытеребливаемых стеблей увеличивается:

$$\lambda_e(\delta) = l_e(\delta) - z_\delta(\delta)$$

где  $\lambda_e(x)$  – теоретическая растянутость стеблей в тербельном ручье;

$l_k(x)$  – расстояние нижней точки начала тербельного ручья от основания крайнего стебля (точнее от нижнего семядольного бугорка), попадающего в данный ручей;

$z_T(x)$  – высота расположения нижней точки начала тербельного ручья от поверхности поля (высота тербления);

$x$  – путь движения льнотеребилки или льнокомбайна.

Первоначальную высоту  $z_T(0)$  тербления устанавливает машинист-оператор по указанию агронома. В процессе тербления высота  $z_T(x)$  изменяется из-за неровностей  $z_n(x)$  поверхности поля, а также колебаний комбайна в продольно-вертикальной  $\beta_k(x)$  и поперечно-вертикальной  $\gamma_k(x)$  плоскостях. Поскольку  $z_T(x) = f[z_n(x), \beta_k(x), \gamma_k(x)]$ , то  $\lambda_e(x)$  оказывается функцией этих переменных, что отражается на качестве работы комбайна. При неровностях поверхности поля, характеризуемых  $\sigma_{zn} = 1,3 - 2,4$  см, и неавтоматизированном комбайне математическое ожидание растянутости ленты льносоломы  $m_\lambda = 1,2 - 1,5$  (относительная величина) при среднем квадратическом отклонении  $\sigma_\lambda = 0,3 - 0,6$ . Нормированные корреляционные функции процессов изменения высоты семядольных бугорков и растянутости вытеребливаемых стеблей на неровном

поле показывают, что корреляционная связь процесса изменения высоты семядольных бугорков крайних для данного ручья стеблей более чем в 2 раза превышает (по пути агрегата) таковую для центральных стеблей. Существенная неравномерность наблюдается в расположении верхушечной (7,1 - 12,0 см) и корневой (5,4 - 8,3 см) частей ленты, что снижает чистоту очеса до 88 - 95 %. Таким образом, чтобы показатели работы льнокомбайна соответствовали агротехническим требованиям, его необходимо автоматизировать и, в частности, автоматизировать регулирование высоты тербления. Предпосылки для конструкторских работ в этом: направлении созданы ЛСХИ.

## 1.8 Лекция № 8 (2 часа).

**Тема:** «Системы регулирования загрузки рабочих органов и двигателей»

### 1.8.1 Вопросы лекции:

1. САР загрузки тракторных агрегатов.
2. САР загрузки комбайнов

### 1.8.2 Краткое содержание вопросов:

- 1 САР загрузки тракторных агрегатов.

При вспашке под технологической загрузкой рабочих органов понимают степень  $\epsilon_n$  использования ширины захвата и глубины обработки плуга относительно номинальных, расчетных значений:

$$\epsilon_i = \frac{y_{\phi.i}(\delta) \cdot z_{\phi.i}(\delta)}{y_{i.i} \cdot z_{i.i}}$$

где  $y_{ф.п.}(x)$ ,  $y_{н.п.}$  - фактическая и номинальная ширина захвата плуга;

$z_{ф.п.}(x)$ ,  $z_{н.п.}$  - фактическая и номинальная глубина обработки почвы плугом.

Применительно к одному корпусу

$$\epsilon_k = \frac{y_{ф.к}(x) z_{ф.к}(x)}{y_{н.к} z_{н.к}},$$

где  $y_k$ ,  $z_k$  - ширина захвата и глубина обработки одним корпусом.

С учетом числа  $n_k$  корпусов

$$\epsilon_i = \frac{y_{\phi.i}(\delta) \cdot z_{\phi.i}(\delta) n_e}{y_{i.e} \cdot z_{i.e}} \approx \frac{y_{\phi.i}(\delta) \cdot z_{\phi.i}(\delta)}{y_{i.i} \cdot z_{i.i}}$$

Знак « $\approx$ » указывает на то, что из-за перекосов плуга в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях, а также нестыковки смежных проходов полного равенства практически быть не может. Под силовой (в отличие от технологической) загрузкой рабочих органов следует понимать степень использования тягового усилия  $P_T$  или (по В.П. Горячкину) КПД плуга:

$$\eta_i = \frac{(\hat{E}_{i\div} \epsilon_{\delta}^2) \cdot y_{\phi.i}(\delta) \cdot z_{\phi.i}(\delta)}{fG + (\hat{E}_{i\div} + \epsilon_{\delta}^2) \cdot y_{\phi.i}(\delta) \cdot z_{\phi.i}(\delta)}$$

где  $K_{пч}$  - удельное сопротивление почвы (20 - 50 кПа);

$\epsilon_x$  - коэффициент, учитывающий скорость пласта почвы

$$(1,5 \dots 2,0 \frac{с^2}{m^4});$$

$f$  - коэффициент трения опор плуга о почву (0,5 - 0,9);

G - вес плуга.

По М. В. Сабликову

$$\eta_{\text{п}} = 1 - \frac{fG}{P_{\text{Tx}}},$$

где  $P_{\text{Tx}}$  - горизонтальная составляющая силы  $P_{\text{T}}$ , движущей плуг.

По Г. Н. Синеокову

$$\eta_{\text{п}} = \frac{R_x}{P_{\text{Tx}}},$$

где  $R_x$  - горизонтальная составляющая равнодействующей сил сопротивлений.

У прицепных пятикорпусных плугов  $\eta_{\text{п}} = 0,55 - 0,75$ , у навесных в зависимости от свойств почвы, состояния и остроты лезвия лемеха -  $0,6 - 0,8$  ( по М. В. Сабликову), на легких почвах  $\eta_{\text{п}} = 0,77$ , на средних -  $0,78$  при острых лезвиях лемехов (по Г. Н. Синеокову). Затупление лемехов снижает КПД плуга на  $20 - 25 \%$ .

Задача автоматического регулирования технологической загрузки - оптимизировать ширину  $y_{\text{ф.п}}(x) \rightarrow y_{\text{ф.п}}(x)_{\text{опт}}$  захвата плуга и глубину  $z_{\text{ф.п}}(x) \rightarrow z_{\text{ф.п}}(x)_{\text{опт}}$  обработки почвы при выдерживании прямолинейности движения.

Удельное сопротивление плуга (по М. В. Сабликову) определяется из рациональной формулы В. П. Горячкина:

$$K_{\text{г.е}} = \frac{\hat{E}_{\text{г.е}} + fG}{(y_{\delta, \text{г.е}}(\delta) \cdot z_{\delta, \text{г.е}}(\delta)) + \varepsilon_{\delta} \delta^2}$$

Значение  $K_{\text{пл}}$  больше, чем  $K_{\text{пч}}$  на  $0,1 - 0,5$  кПа. При оптимизации глубины обработки и ширины захвата тяговое сопротивление плуга значительно изменяется, что сказывается на нагрузке трактора и загрузке двигателя, на которую в малом диапазоне реагирует всережимный регулятор двигателя, а в большом - САР [А.с. 812209 (СССР)], позволяющая повысить

производительность  $Q_{\text{а}}$  агрегата, уменьшить расход топлива  $G_{\text{T}}$  при соблюдении агротехнических требований к глубине  $z_{\text{ф.п}}$  обработки почвы, т.е.

$$Q_{\text{а}} \rightarrow \max; Q_{\text{T}} \rightarrow \min; z_{\text{ф.п}} \rightarrow \text{const}.$$

Такая цель достигается тем, что САР снабжена датчиком загрузки двигателя и УПУ, связанным с входом исполнительного механизма высотной САР плуга и пружиной клапана-дросселя.

САР глубины обработки почвы и загрузки двигателя (рис. 1) работает так. Когда глубина обработки соответствует заданной и двигатель 8 загружен оптимально, клапан-дроссель 5 и УПУ 10 находятся в нейтральном положении. При увеличении (уменьшении) глубины обработки датчик 4 подает сигнал, который воздействует на пружину клапана-дросселя 5, в результате чего его проходное сечение уменьшается или увеличивается, усилие гидроцилиндра 2 пропорционально изменяется и плуг 3 возвращается в заданное положение. Нагрузка на плуг в момент заглубления повышает нагрузку на двигатель 8 трактора 7. Датчик 9 фиксирует увеличение нагрузки и подает сигнал на УПУ 10, питаемое гидронасосом 1 и воздействующее на исполнительный механизм 6 (коробку передач), в результате чего загрузка двигателя становится оптимальной. Одновременно УПУ посылает сигнал на клапан-дроссель 5, в результате чего система возвращается в первоначальное положение.

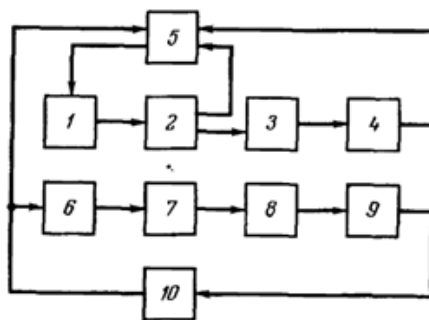
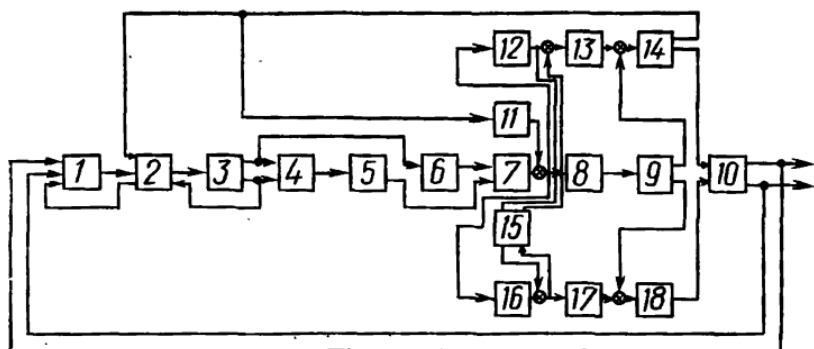


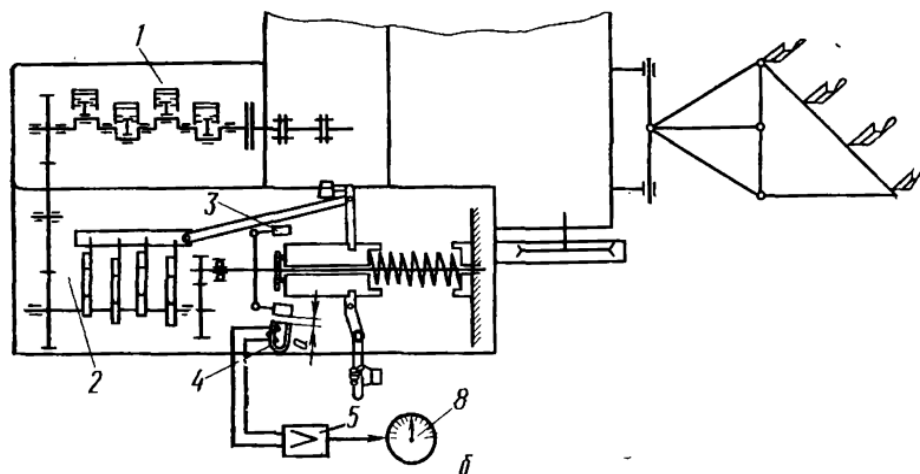
Рисунок 1. Функциональная схема САУ глубины обработки почвы и загрузки двигателя

В рассматриваемой системе датчиком глубины хода плуга может служить дискретный ПП с пружинными щупами, а датчиком и всей подсистемой загрузки двигателя - описанное ниже устройство (рис. 2, а, б).

При нормальной (оптимальной) нагрузке дизеля 1 топливный насос 2 обеспечивает соответствующую подачу топлива благодаря тому, что грузы 3 центробежного регулятора под действием центробежных сил, связанных с угловой скоростью коленчатого вала, расходятся на определенную величину. Заданная угловая скорость грузов и соответствующий этой скорости зазор «а» между грузами и магнитоиндукционным датчиком 4 наводят в обмотке этого датчика определенную ЭДС. После некоторого усиления в приборе 5 сигнал подается на указательный прибор 8, шкала которого проградуирована в процентах относительной загрузки. Такая схема обеспечивает контроль относительной загрузки двигателя по внешней скоростной характеристике при полной подаче топлива. Ее можно использовать на этапе внедрения предлагаемого устройства для контроля режима работы двигателя, когда загрузка близка к полной.



а





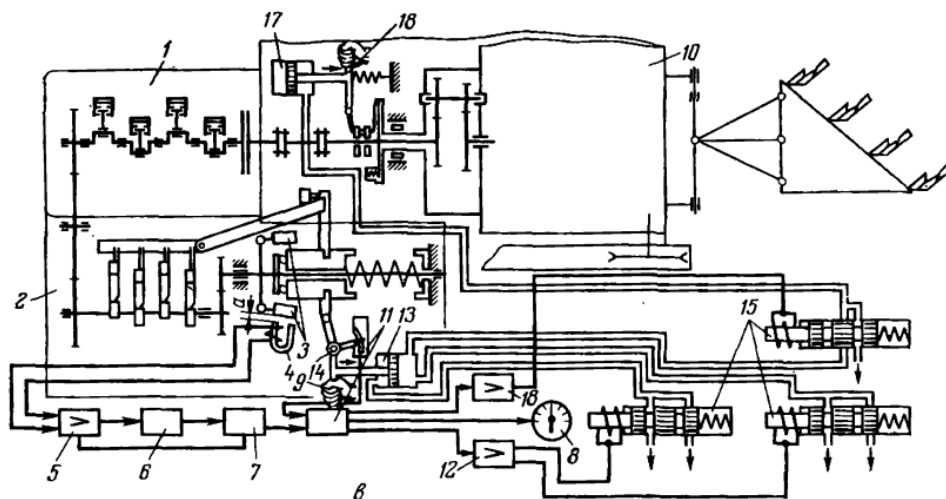


Рисунок 2. Схемы устройства автоматического контроля и регулирования загрузки двигателя: а – функциональная; б – принципиальная на внешней скоростной характеристике; в – то же на всех режимах.

Для контроля и автоматического регулирования работы агрегата на всех режимах (рис. 2, в) параллельно с получением усиленного сигнала датчика выделяют (с помощью частотомера 6) сигнал, пропорциональный угловой скорости. После этого сигналы перемножаются в блоке 7, которым может служить логометр, и подаются на указательный прибор 8. На вход прибора подается также сигнал корректирующего элемента, например потенциометра 9, управляемого в зависимости от положения рычага акселератора 10, на который может воздействовать тракторист 17, находящийся в тракторе 18. В результате таких мер на шкале указательного прибора регистрируется фактически развиваемая двигателем мощность (в процентах) как при работе на внешней, так и на частичных скоростных характеристиках.

Полученный после корректора сигнал направляется в УПУ 11 и 12, где при перегрузке возникает команда на срабатывание соответствующих электромагнитов золотниковых распределителей 13, управляющих гидроцилиндром 14 механизма подачи топлива (на увеличение подачи) и гидроцилиндром 15 включения механизма изменения передаточного числа трансмиссии. При этом масло от гидронасоса последовательно подается в штоковую полость гидроцилиндра 14 и только после достижения максимальной подачи топлива (в конце хода поршня) - к гидроцилиндру 15. При ликвидации перегрузки названные электромагниты обесточиваются. Золотники под влиянием пружин возвращаются в исходное положение, масло из цилиндра 15 под действием возвратной пружины рычага 16 вытекает на слив. Механизм увеличения передаточного числа выключается, штоковая полость гидроцилиндра соединяется со сливом, но поршень не изменяет положения, так как в механизме управления подачей топлива отсутствует возвратная пружина.

При недогрузке блок 12 обрабатывает команду на срабатывание электромагнита золотника. При этом масло подается в другую полость цилиндра 14 и подача топлива уменьшается.

Чтобы человек-оператор мог одновременно контролировать загрузку двигателя, порог и время срабатывания САР, указательный прибор (стрелочный индикатор) подключен к датчику загрузки посредством мостовой схемы и эмиттерного повторителя с элементом - определителем порогов срабатывания системы, например туннельным диодом. Чтобы повысить надежность в работе, точность регулирования и обеспечить малую инерционность, электронная логическая схема выполнена в виде транзисторно-трансформаторного усилителя с многоканальным разделителем входного сигнала для управления бесконтактными выходными элементами, например тиристорами, включающими исполнительные механизмы.

Устройство для контроля и автоматической оптимизации загрузки тракторных мобильных агрегатов (рис. 3, а, б) работает так. Момент  $M(t)$  сил сопротивления, поступающий на вход трансмиссии, проходит через звено 1 «трансмиссия» на вход двигателя 2. При этом в соответствии с его характеристикой энергетические показатели на выходе двигателя, частота вращения его, а следовательно, и вала топливного насоса 3 изменяются. На

корпусе центробежного регулятора 4 расположен индукционный ЧЭ 5, сигнал которого функционально связан с изменением положения  $h(t)$  рейки топливного насоса, а, значит, и подачи топлива  $g(t)$  и частотой вращения  $\omega_3(t)$  вала центробежного регулятора.

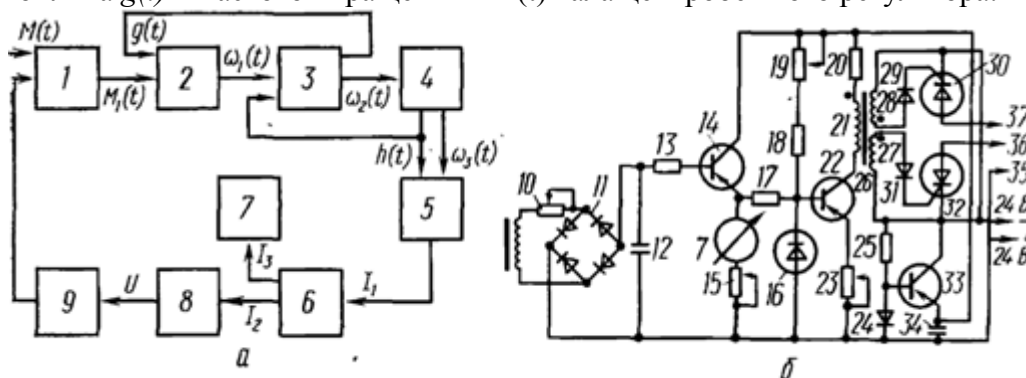


Рисунок 3. Схема устройства контроля и автоматической оптимизации загрузки мобильных агрегатов: а – функциональная; б – электрическая.

Сигнал  $I_1$  ЧЭ поступает на вход УПУ 6, с выхода которого снимается сигнал  $I_2$ , управляющий электрогидравлическим распределителем 8 для систем с гидравлическим устройством 9 или исполнительным устройством для систем с электрическим устройством, которые изменяют передаточное отношение трансмиссии.

Для визуального контроля за работой двигателя, а также функционированием САР нагрузки двигателя на приборном щитке в кабине установлен стрелочный индикатор 7 (сигнал к нему подается от УПУ), и оператор может оценивать возмущения, действующие на агрегат, и вмешиваться в процесс его управления.

В электрическую схему устройства (рис. 3, б) входит индукционный датчик 5, соединенный с диодным мостом 11 переменным сопротивлением 10. Мост 11, шунтируемый емкостью 12, связан с триодом 14 сопротивлением 13. В цепь эмиттера триода включены стрелочный индикатор 7 и добавочное сопротивление 15, шунтируемые туннельным диодом 16. Эмиттер триода сопротивлением 17 соединен с базой триода 22, в коллекторную цепь которого включены первичная обмотка 21 трансформатора 26 и сопротивление 20. Начало вторичной обмотки 28 трансформатора соединено с управляющим электродом тиристора 30 через диод 29, конец - с катодами тиристорov 30 и 32 концом вторичной обмотки 27, связанной диодом 31 с управляющим электродом тиристора 32, коллектором триода 33 и сопротивлением 25 (оно соединено через стабилитрон 24 и переменное сопротивление 23 с эмиттером триода 22). Эмиттер триода 33 емкостью 34 связан с общей точкой 35 соленоидов 37 и 36, которые соответственно соединены с анодами тиристорov 30 и 32. С коллектора триода 22 на его базу включена обратная связь через обмотку 21, сопротивление 20, переменное сопротивление 19 и сопротивление 18.

Электрическая схема работает так. При пересечении грузиками центробежного регулятора магнитных силовых линий индукционного ЧЭ в нем наводится переменная ЭДС, которая зависит от частоты вращения грузиков и расстояния их от ЧЭ. Наводимая ЭДС выпрямляется мостом 11, сглаживается емкостью 12 и открывает триод 14. Когда напряжение на его эмиттере достигает значения, равного минимальной нагрузке двигателя, диод 16 включается и триод 22 открывается.

Положительный импульс, возникающий на первичной обмотке 21 трансформатора 26 при открытии триода 22, наводит на вторичных обмотках 28 и 27, намотанных одна

навстречу другой, равнополярные импульсы. В данном случае положительный импульс с обмотки 28 поступает на управляющий электрод тиристора 30, открывает последний и на обмотке соленоида 37 управления гидросистемой возникает импульс управления. В свою очередь, соленоид воздействует на гидравлический исполнительный механизм (гидроцилиндр), изменяет передаточное отношение трансмиссии, изменяя тем самым момент сил сопротивления на входе двигателя.

По достижении грузиками центробежного регулятора скорости, соответствующей максимальной нагрузке двигателя, напряжение на ЧЭ снижается и диод 16 включается. Триод 22 закрывается, и на его коллекторе возникает отрицательный импульс. С обмотки 27 трансформатора 26 инвертированный импульс поступает на управляющий электрод тиристора 32, открывает его, и на обмотке соленоида управления 36 возникает импульс. Соленоид срабатывает, и гидросистема изменяет передаточное отношение трансмиссии и т. д.

Диод 16, включенный параллельно индикатору 7, позволяет резко изменять сопротивление цепи эмиттера триода 14 в период минимального значения сигнала; при этом указатель индикатора 7 совершает скачок, который оповещает оператора о срабатывании исполнительного устройства, воздействующего на механизм изменения передаточного отношения трансмиссии.

Сопротивление 10 служит для регулирования выходного сигнала, поступающего от ЧЭ на логическую схему. Сопротивления 18, 19, 23 регулируют интервал между максимальным и минимальным порогами срабатывания логической схемы.

Схема питается от аккумуляторных батарей (24 В), напряжение стабилизируется триодом 33, стабилитроном 24, сопротивлением 25 и емкостью 34.

Полевые испытания САР энергетической загрузки сельскохозяйственных агрегатов на вспашке, культивации и посеве показали, что она увеличивает производительность агрегатов на 7 - 11 % и снижает расход топлива на 5 - 8 %.

Оптимизировать энергетическую нагрузку тракторного пахотного агрегата можно не только воздействием на двигатель и трансмиссию трактора. Большие возможности имеются и в регулировании энергетической загрузки плуга, в частности автоматического регулирования угла наклона лемеха каждого корпуса плуга. Динамическая характеристика такого корпуса описывается передаточной функцией

$$W(s)_e = K_e \frac{\ddot{O}_2 s^2 + 2T_2 \xi_2 s + 1}{s(T_1^2 s^2 + 2T_1 \xi_1 s + 1)}$$

где  $K_k = 120$  Н/град;  $T_2 = 0,045$  с;  $\xi = 2,4$ ;  $T_1 = 0,017$  с;  $\xi_1 = 0,6$ .

Передаточная функция САР угла наклона лемеха к дну борозды

$$W(s)_n = K_n \frac{\ddot{O}_2 s^2 + 2T_2 \xi_2 s + 1}{s(T_1^3 s^3 + 3T_1^2 \xi_1 s^2 + 3\dot{O}_1 \xi_3 s + 1)}$$

где  $K_c = 0,2$ ;  $T_2 = 0,43$  с;  $\xi_2 = 1,0$ ;  $T_1 = 0,87$  с;  $\xi_1 = 0,8$ ;  $\xi_3 = 0,9$ .

С помощью оптимальной САР можно поддерживать минимальные тяговые сопротивления корпусов плуга, снижая их среднее значение на 36 - 39 % по сравнению со значениями, полученными при обычных лемешно-отвальных плугах, и уменьшая до 15 % степень неравномерности тягового сопротивления.

### 3.2 САР загрузки комбайнов.

**Для уборки сельскохозяйственных культур** стремятся создать оптимальные, в том числе адаптивные, автоматические системы загрузки уборочных машин. Рассмотрим унифицированную функциональную схему такой системы, в которую входят (рис. 4) комплект датчиков 1, 2,..., N, выдающих сигналы  $k_{s1}, k_{s2}, \dots, k_{sn}$  по числу контролируемых

рабочих органов, датчик 3 эффективной мощности двигателя, выдающий сигнал  $k_d$ , бортовой процессор 4 с анализатором сочетаний 5, блок адаптации 6 с анализатором соотношений 7, исполнительные устройства 8 и 9, изменяющие номиналы  $\pm H_i$ , настройки датчиков загрузки рабочих органов,  $\pm x$  режима работы или остановки агрегата.

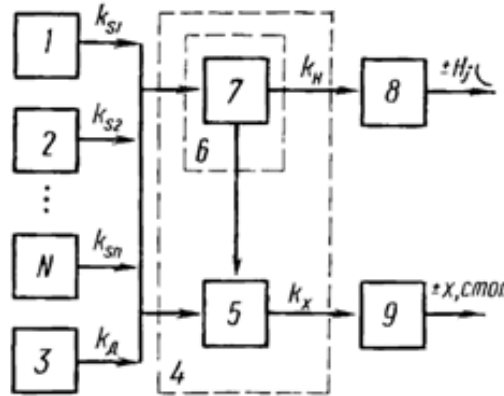


Рисунок 4. Функциональная схема адаптивной САР загрузки уборочных машин.

Анализатор 7 определяет градиент поиска оптимальной настройки по соотношению информативных сигналов  $k_{sj}$

$$k_i = \begin{cases} \frac{k_{si-m}}{k_{si}} = c \\ \frac{k_{si-m}}{k_{si}} \neq c \end{cases}$$

о загрузке рабочих органов, взаимодействующих с убираемым продуктом на различных стадиях его обработки, а анализатор 5 - сочетание сигналов о загрузке рабочих органов и двигателя:

$$k_x = \frac{k_s}{k_d}$$

Например, на самоходном картофелеуборочном комбайне информативный сигнал  $k_s$  и соответствующее управляющее воздействие  $x$ , обеспечивающее движение системы к оптимальной настройке и режиму работы, формируются по сигналам  $k_d$ ,  $k_{s1}$ ,  $k_{s2}$ , определяющим соответственно эффективную мощность двигателя, загрузку на входе и выходе сепаратора по алгоритму:

$$\left. \begin{aligned} k_{s1} = k_{s2} = k_d = +1 &\Rightarrow k_s = +x; k_{s1} = k_{s2} = k_d = -1 \Rightarrow k_s = -x; \\ k_d = -1 &\Rightarrow k_s = -x; (k_d = +1 \vee k_d = 0) \wedge k_{s1} = k_{s2} = 0 \Rightarrow k_s = x_0; \\ (k_{s1} = k_{s2} = +1 \vee k_{s1} = k_{s2} = 0) &\wedge k_d = 0 \Rightarrow k_s = x_0; \\ \left[ k_d = +1 (k_{s1} = 0 \vee k_{s1} = -1) \right] &\wedge k_{s2} = +1 \Rightarrow k_s = +H \\ \left[ k_{s1} = -1; (k_d = +1 \vee k_d = 0) \right] &\wedge (k_{s2} = 0 \vee k_{s2} = +1) \Rightarrow k_s = -H \\ (k_{s1} = 0 \vee k_{s1} = +1) \wedge k_{s2} = -1 &\Rightarrow k_s = -H; k_{s1} = +1 \wedge k_{s2} = 0 \Rightarrow k_s = -H \end{aligned} \right\}$$

где +1, 0, -1 – входные сигналы о возможности повысить, необходимости или снизить загрузку контролируемого рабочего органа;

$x_0$ , +Н, -Н – выходные сигналы на изменение или сохранение режима работы, на изменение номинала настройки.

При этом оптимальные настройки и режимы работы определяют путем минимизации целевой функции вида

$$C_t = \int_0^1 F \left[ P(\eta) \left[ \psi(\eta) \cdot \psi(\eta) \cdot \eta \left[ \sigma(U(S)) K_{\delta i}(S) \right] \right] \tilde{N}_1 \right] dS$$

где  $C_t$  – обобщенный критерий (приведенные затраты на уборку);

$P(\eta)$  – зависимость приведенных затрат на работу агрегата от коэффициента  $\eta$  использования по способности комбайна;

$\Psi(\eta)$  – зависимость потерь или затрат на дообработку урожая при доведении его до товарного вида от коэффициента  $\eta$ ;

$\Psi_{\delta}(\eta)$  – зависимость биологических потерь урожая от коэффициента  $\eta$  как фактора, оказывающего влияние на продолжительность уборки;

$\eta[\sigma(U(S)) K_{\phi m}(S)]$  – зависимость коэффициента  $\eta$  от среднего квадратического отклонения  $\sigma$  урожайности  $U$  и изменений физико-механических качеств  $K_{\phi m}$  убираемой культуры на участке поля площадью  $S$ ;

$C_1$  – стоимость единицы массы убираемой культуры или затраты на дообработку единицы массы собранного урожая.

Чтобы вычислить оптимальную загрузку  $q_i$  каждого контролируемого рабочего органа в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого продукта, получают систему уравнений, служащую для бортового процессора программой настройки первичных ИП.

Анализ технологических процессов показал, что при регулировании загрузки комбайна «Колос» автоматической системой с постоянными АУ, с фиксированными настроечными параметрами вероятность достижения показателей работы в интервале, определяемом агротехническими требованиями, составляет 0,71, при адаптивной системе - 0,89; в картофелеуборочном комбайне - соответственно 0,78 и 0,92, в кукурузоуборочном - 0,82 и 0,92.

Полевыми опытами с комбайном «Херсонец-7», оборудованным одномерной автоматической системой с фиксированной настройкой, установлено, что по сравнению с комбайном «Херсонец-200», имевшим многомерную адаптивную автоматическую систему поддержания оптимальной загрузки, производительность по чистому времени работы в зависимости от агротехнического фона убираемой культуры возрастает на 20 % в результате увеличения коэффициента использования пропускной способности до 0,95 его максимальной величины. Производительность комбайна КСК-4 при использовании адаптивной автоматической системы повышается по чистому времени работы на 14 %, причем показатели качества соответствуют требуемым. При этом расход топлива снижается на 4 %.

Впервые на целесообразность регулирования загрузки зерноуборочного комбайна путем управления режимами работы двигателя указал С. А. Иофинов. До этого автоматизация регулирования загрузки молотилки комбайна шла по пути контроля и регулирования силовых, кинематических или технологических параметров самой молотилки или наклонного транспортера. Применительно к тракторным (в частности, пахотным) агрегатам мы первыми указали на необходимость и возможность достижения максимальной производительности путем стабилизации технологической загрузки и оптимизации скоростных и загрузочных режимов двигателя. Это направление теперь реализуется. В частности, интересно устройство для автоматического управления режимами работы двигателей уборочных машин [(А. с. 869593 (СССР)], в котором использованы пневматические и пневмонные элементы. Так, в нем датчик загрузки двига-

теля соединен с пневмонным блоком сравнения, блок реверсирования снабжен пневмотумблером, пневмореле и пневмоэлементами И, взаимосвязанные управляющие камеры каждого из которых соединены с пневмотумблером, подключенным к пневмореле. Выходы пневмореле, в свою очередь, управляют двумя пневмоцилиндрами одностороннего действия со штоками, соединенными со штоками пневмоцилиндров двухстороннего действия, жестко связанными со штоками двух последующих пневмоцилиндров двухстороннего действия. Последние соединены с рычажным механизмом объемной гидропередачи, причем рабочие камеры пневмоцилиндров двухстороннего действия подключены к пневмореле двух блоков усиления, управляющие камеры которых связаны с выходами пневмоэлементов И.

Пример системы с широким использованием кинематических звеньев - САР скоростного режима двигателя зерноуборочного комбайна, инвариантная к нагрузке (рис. 5). Загрузочные режимы двигателя ( $M_D$ ) определяет измеритель 2 момента, вырабатывающий сигнал  $h$  на перемещение штока 1, а скоростные режимы  $\omega_D$  - центробежный маятник регулятора 3, вал которого вращается с угловой скоростью  $\omega_p$  и вырабатывает сигнал  $z$  на перемещение муфты регулятора. После того как сигналы  $h$  и  $z$  пройдут соответствующие кинематические звенья, они суммируются втулкой 5. Причем на ось 4 её действует преобразованный сигнал  $z$  измерителя 3 скорости, передаваемый далее на рейку 6 топливного насоса 7.

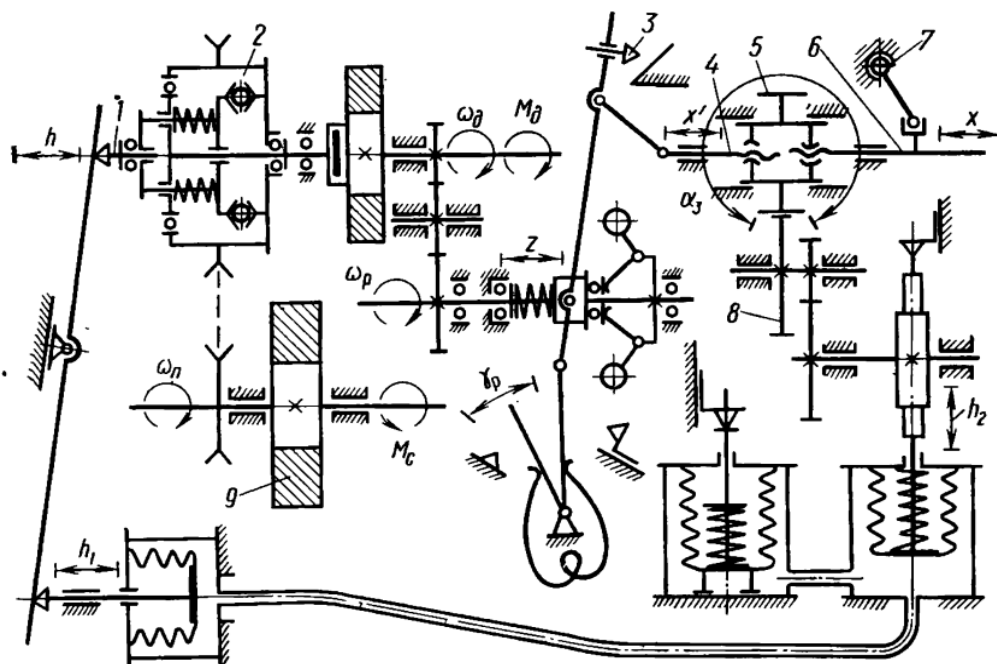


Рисунок 5. Принципиальная схема инвариантной САРС зерноуборочного комбайна.

Втулка 15 вращается вокруг своей оси под действием преобразованного сигнала  $h$  загрузки, воспринимаемого от колеса 8. При изменении момента сопротивления  $\Delta M_C$  на валу потребителя 9 (нагрузка двигателя) измеритель 2 фактической загрузки вырабатывает информационный сигнал  $\Delta n$ , пропорциональный  $\Delta M_D = f(\Delta M_C)$ , в результате чего втулка 5 поворачивается на угол  $\Delta \alpha_3$ . Втулка 5, завертываясь или отвертываясь на хвостовиках штока 4 и рейки 6, перемещает последние в осевом направлении. Шток 4 может оставаться и неподвижным (при  $\omega_p = \text{const}$ ); в этом случае рейка 6 перемещается на  $\Delta x = f(\Delta \alpha_3, \Delta h)$ .

Исследованиями комбайна СКПР-4А с двигателем СМД-15к, оборудованным инвариантным регулятором, на подборе валков озимых ржи и пшеницы (параметрами оптимизации служили суммарные потери зерна за молотилкой и ее пропускная спо-

способность, а фактором оптимизации - стабильность скоростного режима двигателя и рабочих органов) установлено, что при стабилизации кинематических режимов рабочих органов потери  $Q$  зерна за молотилкой в среднем снизились на 30 % для подач 3,2 - 4,8 кг/с. При неизменных же потерях (ограниченных допустимым уровнем 1,5 %) пропускная способность молотилки увеличилась на 10 – 11 %. Экономическая эффективность в результате сокращения потерь и сроков уборки может достигать 235 руб. за сезон на один комбайн. Отсутствие обратной связи в рассмотренной системе по подаче хлебной массы или потерям зерна снижает ее функциональные возможности. Это учтено в САР загрузки зерноуборочного комбайна (рис. 6), содержащей жатку 1, молотильный аппарат 2 и ходовую часть 3 комбайна как элементы ОР, датчики толщины слоя 4 и крутящего момента 5 на валу молотильного аппарата, два фильтра 6 и 7, сглаживающих сигналы датчиков, устройство 8, вычисляющее относительные потери  $Q$  зерна за молотилкой, элемент 9, сравнивающий потери  $Q$  с допустимыми  $Q_0$  и выдающий сигнал  $\Delta Q$  рассогласования, который поступает в УПУ 10 и гидроцилиндр 11, управляющий вариатором ходовой части комбайна.

Потери  $Q$ , учитываемые в системе регулирования, можно вычислить по уравнению регрессии:

$$Q = a + bh_c + cK$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты;

$$K_{i.\dot{a}} = \frac{\dot{I}_{\dot{a}} - \dot{I}_{\dot{\delta},\dot{\delta}}}{h_{\dot{n}}}$$

- крутящий момент на валу молотильного барабана, отнесённый к толщине слоя  $h_c$  в камере наклонного транспортёра;

$M_{\delta}$ ,  $M_{x.x}$  – крутящие моменты на валу барабана при загрузке его хлебной массой и на холостом ходу.

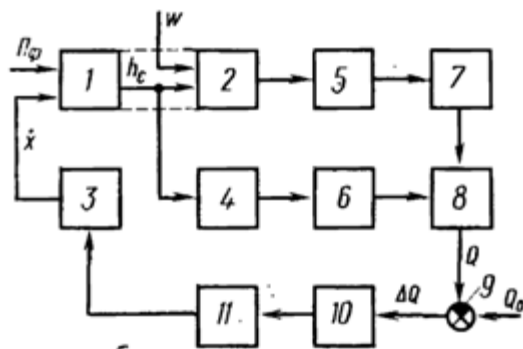


Рисунок 6. Функциональная схема САР загрузки зерноуборочного комбайна

Величина  $K_{m.\delta}$  характеризует энергоёмкость процесса обмолота и зависит от соломистости, влажности, засоренности убираемой культуры, т. е. от тех ее физико-механических свойств, с изменением которых потери зерна отклоняются от заданных при выбранной подаче  $P_{\phi}$  или толщине  $h_c$  слоя.

Коэффициент  $k_{\omega}$  линейной корреляции момента  $K_{m.\delta}$  с увеличением влажности возрастает до 0,814, остаточная дисперсия  $D_{\omega}$  относительно уравнения регрессии  $K_{m.\delta} = 2100 + 162\omega$  достигает  $520 \text{ (Н}\cdot\text{м)}^2/\text{м}^2$ .

Зависимость момента  $K_{m.\delta}$  от соломистости  $\delta$  описывается уравнением регрессии  $K_{m.\delta} = 1235 + 1370\delta$  с остаточной дисперсией  $D_{\delta} = 216 \text{ (Н}\cdot\text{м)}^2/\text{м}^2$  и при максимальном коэффициенте корреляции  $k_{\delta} = 0,928$ .

Промышленность выпускает электронные указатели потерь зерна с пьезоэлектрическими ПП, от которых можно получить сигнал обратной связи для коррекции САР скорости двигателя комбайна. Но потери с помощью указателя потерь

зерна определяются с относительно большим (для САР) транспортным запаздыванием ( $\tau \approx 8 - 10$  с), поэтому вызывает интерес способ отключения этого запаздывания путем экстраполяции процесса изменения потерь на время  $\tau_0$ . Передаточная функция такого экстраполятора (рис. 7, а, б)

$$W_y(s) = K \cdot (Ts + 1) \cdot (Ts + 1)^2$$

где  $T$  – постоянная времени, изменяющаяся в пределах 9 – 17 с при минимальной дисперсии ошибки прогнозирования.

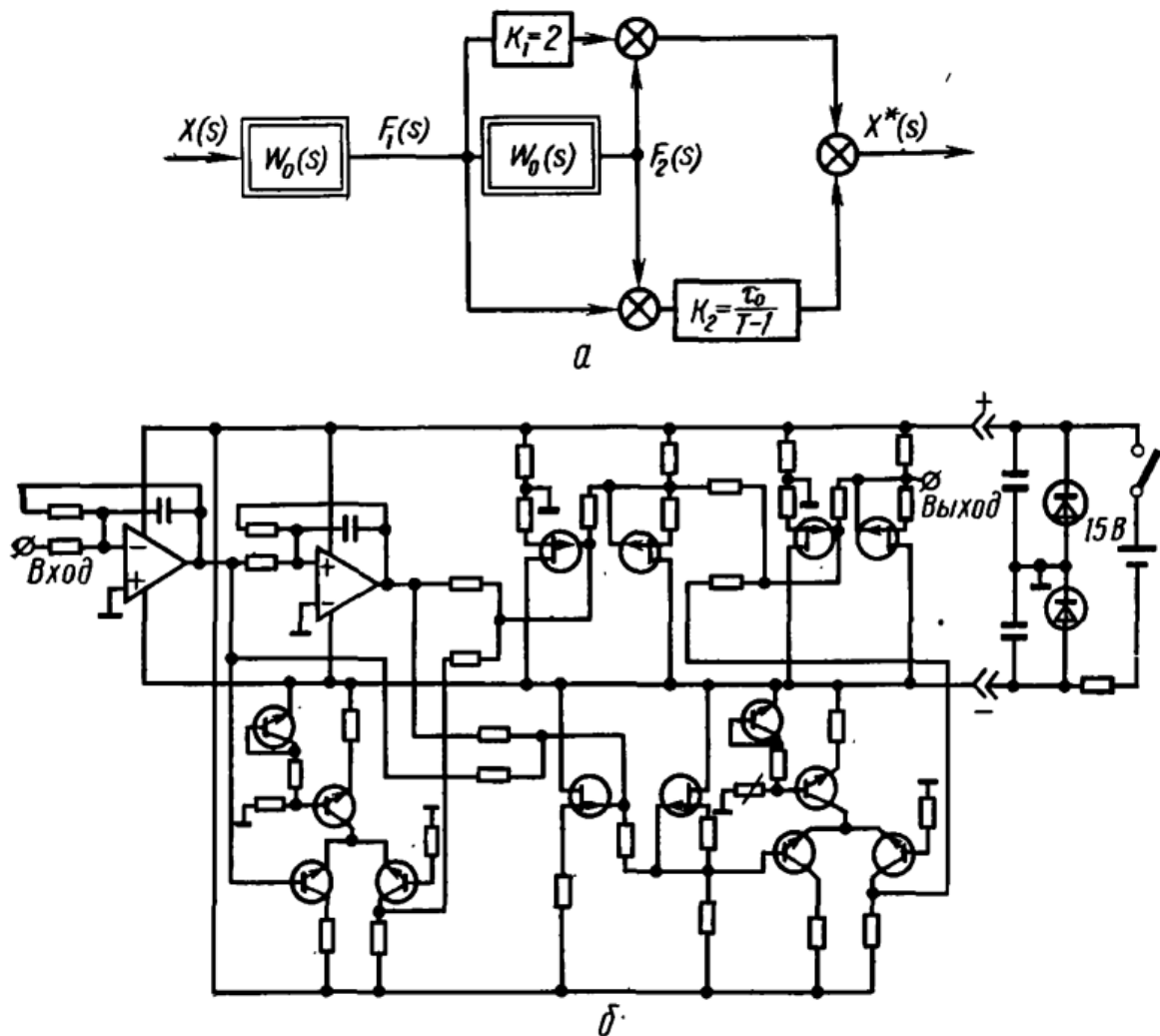


Рисунок 7. Схемы прогнозирующего экстраполятора потерь:  
а – структурная; б – электрическая

**Автоматизация регулирования загрузки картофелеуборочных комбайнов** позволяет значительно увеличить их энергетическую и технологическую эффективность. Оптимизация сложной динамической системы «хозяйство-поле-картотелеуборочный комбайн-транспортные средства-переборочный пункт» во многом зависит от регулирования режимов работы комбайна (скорости движения его основного элеватора и комбайна в целом), что видно из функции цели оптимизации:

$$\hat{O}_i = \hat{O}_0 + \dot{a}_1 b_1 \eta(H, S, W, h) + \dot{a}_2 b_2 \varepsilon(h) + \dot{a}_3 b_3 W_e$$

где  $\Phi_0$  – постоянная величина, определяющая начало отсчёта;

$a_1, a_2, a_3$  – постоянные коэффициенты значимости влияющих факторов для всего хозяйства;

$b_1, b_2, b_3$  – постоянные «весовые» коэффициенты для отдельных участков и полей;

$\eta$  – количество повреждённых клубней;



$H$  – степень повреждаемости клубней, определяемая биологическим сортом картофеля, его зрелостью, влажностью и температурой среды;  
 $S$  – степень сепарируемости почвы;  
 $h$  – толщина почвенной прослойки в конце элеватора;  
 $\varepsilon$  – количество почвенных примесей;  
 $W_k$  – производительность комбайна.

Анализ этой функции позволил сделать вывод о том, что для её оптимизации необходимо иметь управляющие системы двух типов: автоматизированные системы управления технологическими процессами АСУТП для оптимизации работы всех машин и людей, занятых уборкой и послеуборочной обработкой картофеля, и системы автоматического управления (регулирования) — САУ (САР) в пределах одного комбайна. Причем для информационно-управляющей связи между этими системами желательно применять в САР функциональные элементы электрической ветви ГСП.

САУ, отвечающая этим требованиям, разработана в МИИСПе (рис. 8). В ней электрические сигналы ИП имеют как аналоговую, так и частотноимпульсную форму (особенно удобна для дистанционной передачи). При работе картофелеуборочного комбайна сигналы ИП 1, 6 (загрузки двигателя и рабочих органов) и 7 определяют режим его движения (скорость). При перегрузке рабочих органов или двигателя комбайна в цепи электрического исполнительного механизма 2 по определенному алгоритму уменьшается сила тока, пока не установится оптимальная нагрузка рабочих органов или двигателя. В системе предусмотрены звуковая и световая сигнализации 4 перегрузок рабочих органов или двигателя и пороговое устройство 5 для полной остановки машины 3 при перегрузке, которая может вызвать поломку рабочих органов.

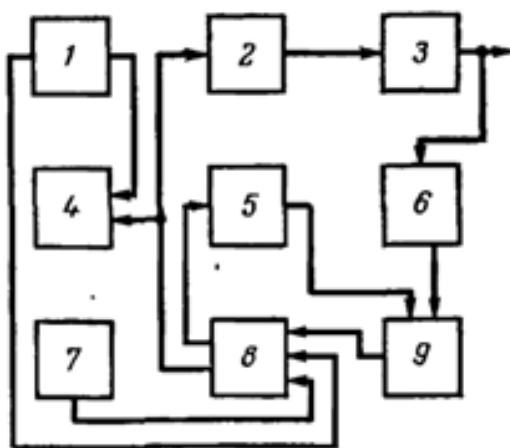


Рисунок 8. Функциональная схема САУ загрузки картофелеуборочных комбайнов

Система реализована на базе электрических бесконтактных модульных элементов серии «Логитка-1», что облегчает ее наладку, обслуживание и ремонт. Исполнительный механизм 2 (управляемый УПУ 8 по сигналам суммирующего устройства 9) имеет необходимое быстродействие, позволяющее оперативно вручную дублировать автоматическую систему, автоматически устанавливать нейтральное положение выходного вала. Все элементы отличаются высокой надежностью в требуемом диапазоне температур и вибраций; вероятность безотказной работы системы 0,88. Испытания САУ на комбайнах ККУ-2 и КСК-4 показали, что производительность их повышается на 9 – 15 %, качество рабочего процесса улучшается; при автоматическом управлении скоростью движения продольные колебания машины исключаются, что облегчает условия труда, сокращает простои машин из-за перегрузок, поломок и забиваний рабочих органов.

Экономическая эффективность от внедрения средств автоматизации на одном картофелеуборочном комбайне составляет 560 - 640 руб. в год при сроке окупаемости дополнительных капитальных вложений в течение двух сезонов уборки.

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **2.1 Лабораторная работа №1 (2 часа).**

**Тема:** «Включение переднего ведущего моста. Переключение передач. Автоматическое управление направлением движения трактора»

#### **2.1.1 Цель работы:**

1. Изучение поведения образца из малоуглеродистой стали в процессе растяжения до разрыва.
2. Получение диаграммы растяжения и определение основных механических характеристик материала.

#### **2.1.2 Задачи работы:**

1. Изучить принцип работы лабораторной установки УМ-5.
2. Выполнить испытание образца на растяжение.
3. Выполнить расчёт.

#### **2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Машина для испытания УМ-5.
2. Линейка.
3. Планиметр.
4. Образец из малоуглеродистой стали.

#### **2.1.4 Описание (ход) работы:**

##### **Включение переднего ведущего моста**

На большинстве тракторов дополнительный ведущий мост включается в зависимости от буксования колес основного ведущего моста с помощью муфты свободного хода или других аналогичных механизмов. Применение на тракторе измерителя действительной скорости в сочетании с бортовым компьютером позволяет расширить функциональные возможности дополнительного ведущего моста по сравнению с механическим способом его включения.

Передний ведущий мост включается бортовым компьютером с целью: повышения тягово-сцепных свойств трактора; снижения силы сопротивления качению на транспортных скоростях, повышения эффективности торможения.

Наиболее распространены тракторы классической схемы с передним отключаемым мостом. Включение переднего ведущего моста для повышения силы тяги на тракторе, оснащённом радарным датчиком скорости и микропроцессором, по принципу управления такое же как и при использовании муфтой свободного хода, т. е. мост включается при достижении некоторого заданного уровня буксования задних ведущих колес.

На транспортной скорости передний ведущий мост отключается бортовым компьютером с целью снижения сопротивления качению. Как правило, транспортные работы, начиная со скорости 15 - 20 км/ч, осуществляются по дорогам с высоким коэффициентом сцепления и низким коэффициентом сопротивления качению. По сравнению с тяговыми технологическими операциями на сельскохозяйственных фонах буксование движителей в этом случае невелико и не может компенсировать кинематическое несоответствие в приводе передних и задних ведущих колес. В таких условиях достаточно силы тяги, развиваемой только задним ведущим мостом. Для исключения возникновения паразитной мощности, снижения расхода топлива и изнашивания шин передний ведущий мост целесообразно отключить. Бортовой компьютер сравнивает действительную скорость с заданной в программе предельной скоростью. Когда скорость движения трактора превышает ее, система управления отключает передний ведущий мост.

Торможение при движении на высокой скорости более эффективно при

использовании полного веса энергетического средства в качестве сцепного. Известно, что максимальная сила торможения равна силе сцепления движителей с дорогой. Чем больше сила сцепления колес с дорогой, тем большая тормозная сила может быть реализована.

При наличии у энергетического средства центрального тормоза (как у трактора) эффективность торможения может быть повышена за счет блокировки переднего и заднего мостов. Тогда в торможении участвуют и передние, и задние колеса. При торможении на микропроцессор может подаваться линейное перемещение тормозной педали или другой параметр, характеризующий начало (окончание) торможения, по которому система управления включает (выключает) передний ведущий мост.

### Переключение передач

Автоматическое управление переключением передач осуществляется в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов работы двигателя. При этом должны выполняться следующие условия

- работа двигателя должна поддерживаться в режиме, близком к номинальному;
- должна быть включена передача с минимальным передаточным отношением, обеспечивающая указанный выше режим работы двигателя.

Эти условия могут быть выполнены при соответствующем выборе параметров и правильном совмещении регуляторной характеристики двигателя и лучевой диаграммы трансмиссии.

Из теории трактора известно правило разбивки передаточных чисел трансмиссии, основанное на законе геометрической прогрессии со знаменателем, равным отношению минимального момента двигателя к номинальному:  $q = M_{\min}/M_n$ . При ручном переключении передач тракторист субъективно оценивает режим работы двигателя и выполняет переключение при режимах, которые отличаются от заданных в точках  $M_{\min}$  и  $M_n$  на некоторую величину.

При автоматическом переключении необходимо, во-первых, уточнить диапазон работы двигателя между двумя переключениями передач, во-вторых, согласовать в соответствии с этим регуляторную характеристику и лучевую диаграмму трансмиссии. Согласование регуляторной характеристики двигателя и лучевой диаграммы трансмиссии приведено на рисунке 1.

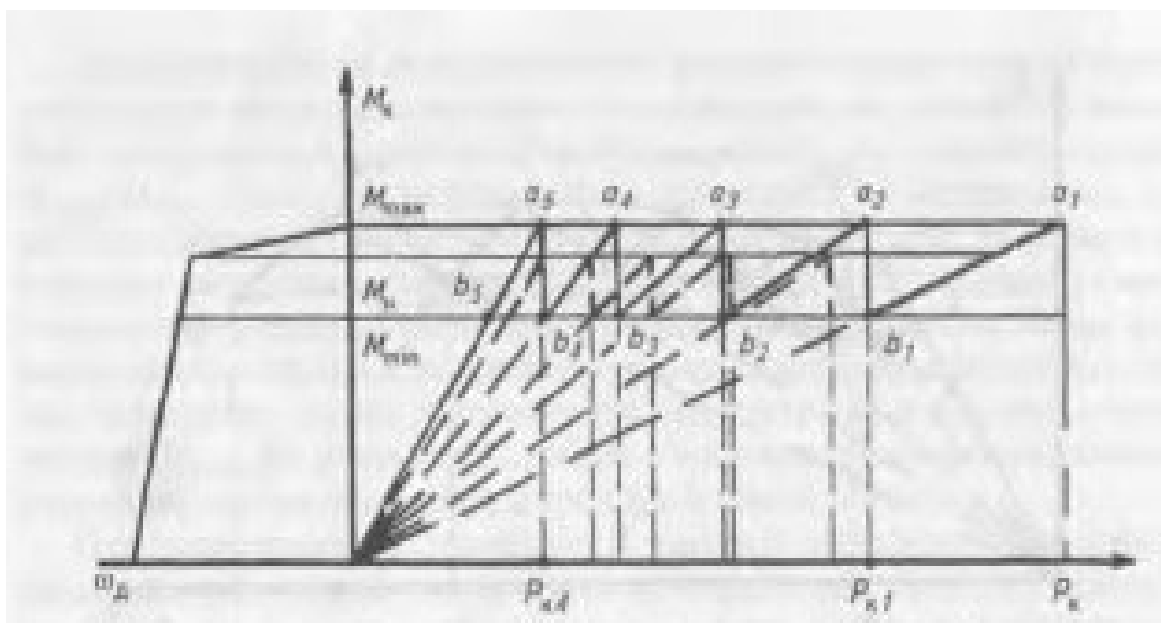


Рисунок 1. Совмещение лучевой диаграммы передаточных чисел трансмиссии и регуляторной характеристики дизеля при ручном ( $q_i = M_{\min}/M_n$ ) и автоматическом ( $q_i = M_{\min}/M_{\max}$ ) переключении передач.

Переключение в точке  $M_{\min}$  должно быть и при ручном, и при автоматическом переключении, хотя значение  $M_{\min}$  может быть разным в зависимости от способа переключения передач. При переходе с высшей на низшую тракторист осуществляет переключение, когда двигатель перешел корректорный участок и работает в режиме глубокой перегрузке. Степень перегрузки каждый тракторист определяет экспертно в зависимости от уровня квалификации, физического состояния и других факторов. Автомату необходимо задать точный режим переключения. Если в качестве такого режима задать номинальный, как при ручном переключении, то при повышении нагрузки автомат выполнит переключение на низшую передачу в точке  $M_n$  регуляторной характеристики, и корректорная ветвь регуляторной характеристики будет исключена из режима работы двигателя. Это недопустимо, потому что приведет к необоснованному частому автоматическому переключению передач. Чтобы диапазон работы двигателя между двумя переключениями передач охватывал и корректную ветвь регуляторной характеристики, необходимо его ограничить двумя точками:  $M_{\min}$  и  $M_{\max}$ .

Совмещение характеристик следует выбирать таким образом, чтобы переключение передач «вверх» и «вниз» осуществлялось для двух смежных передач при одном и том же значении  $P_{кр}$ . Тогда переключение передач при снижении нагрузки (на высшую передачу) должно происходить в точках  $b_1, b_2, b_3, b_4$ , а переключение с высшей на низшую — в точках  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  (см. рис. 1). На рисунке 1 нанесена также разбивка ряда передач, соответствующая ручному переключению. Из рисунка видно, что знаменатель геометрической прогрессии при автоматическом переключении передач  $q = M_{\min}/M_{\max}$  отличается от знаменателя геометрической прогрессии при ручном переключении  $q = M_{\min}/M_n$ . При наличии трансмиссии с автоматическим переключением передач работу трактора по передачам характеризует ломаная линия  $Ob_5a_5b_4a_4b_3a_3b_2a_2b_1a_1$ .

На рисунке 2 представлена теоретическая тяговая характеристика трактора с автоматическим переключением передач, построенная в соответствии с изложенным выше принципом разбивки передаточных чисел.

Жирной ломаной линией нанесена та часть зависимости  $N_{кр} = f(P_{кр})$ , в пределах которой работает трактор при автоматическом переключении передач. Переключение передач в соответствии с рисунком 1 осуществляется в точках пересечения графиков  $N_{кр} = f(P_{кр})$ , соответствующих регуляторному и корректорному участкам регуляторной характеристики дизеля.

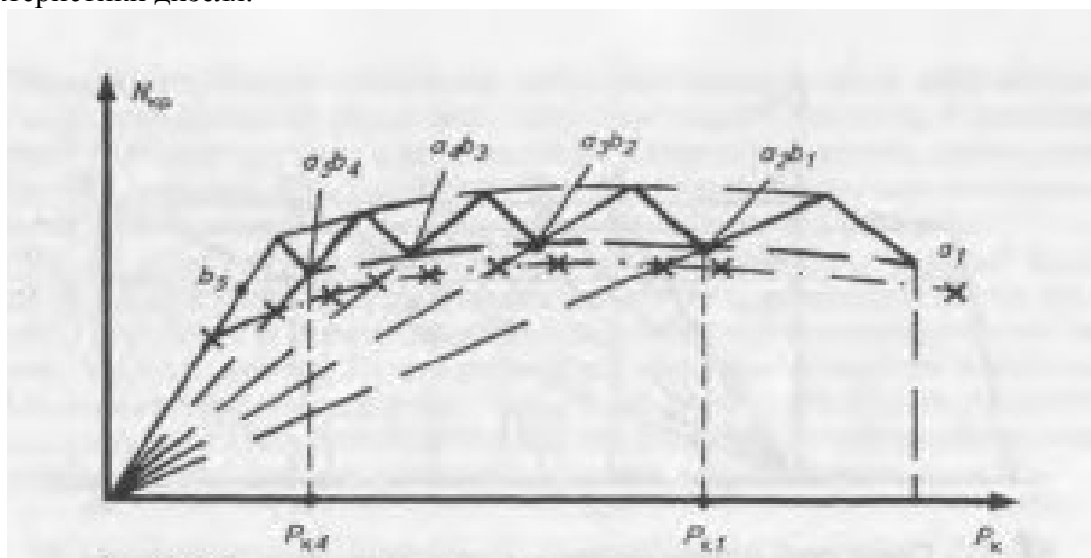


Рисунок 2. Теоретическая тяговая характеристика трактора с автоматическим переключением передач

Верхняя (потенциальная тяговая характеристика) и нижняя штриховые линии на рисунке 2 соединяют точки соответственно наибольших и наименьших значений тяговой

мощности, за пределами которых трактор с автоматическим переключением передач работать не может.

Точка пересечения  $N_{кр} = f(P_{кр})$  обладает следующими особенностями в качестве критерия для переключения передач.

Во-первых, автоматическое переключение всех передач с повышенной на пониженную, и наоборот, можно осуществлять, используя только один параметр  $M_k$ , характеризующий режим работы двигателя в двух точках регуляторной характеристики  $M_{min}$  и  $M_{max}$ , совмещенных на тяговой характеристике (рис. 2) в одну точку  $ab$ .

Во-вторых, при автоматическом переключении передач в этой точке формируется тяговая характеристика, максимально приближенная к потенциальной тяговой характеристике трактора. Чем меньше разность между  $M_{min}$  и  $M_{max}$  заложена в программу управления переключением передач, тем полнее используется мощность двигателя, потому что штриховая линия, соединяющая точки  $N_{кр\_min}$ , будет расположена выше, ближе к потенциальной тяговой характеристике. Однако при этом следует учитывать два обстоятельства: нельзя через мерно снижать запас крутящего момента двигателя, так как это приведет к ухудшению тягово-динамических свойств трактора; необходимо применить более плотный скоростной ряд и увеличить число передач в том же тяговом диапазоне, что вызовет более частое их переключение в процессе работы МТА.

Исправная работа автоматического управления гарантирует строгое соблюдение запрограммированного закона передач, каким бы узким ни был нагрузочный диапазон работы двигателя, характеризуемый  $M_{min}/M_{max}$ . При ручном управлении тракторист не всегда может правильно выбрать и своевременно переключить передачи, особенно при плотном скоростном ряде, вследствие свойственного человеку биологического барьера восприятия и переработки информации. Ввиду усталости, невнимательности, низкого уровня квалификации и других причин тракторист может допускать работу двигателя в режиме загрузки меньше  $M_{min}$ . На рисунке 1 работа с таким нагрузочным режимом на разных передачах обозначена штрихпунктирной линией.

При одинаковой потенциальной тяговой характеристике граница минимальной тяговой мощности ниже у трактора с ручным управлением. Следовательно, средняя эксплуатационная мощность у этого трактора будет меньше, чем у трактора с автоматическим переключением передач. Большое значение имеет то обстоятельство, что при ручном переключении передач работа трактора с загрузкой двигателя моментом сопротивления меньше  $M_{min}$  не регламентируется, в то время как у трактора с автоматическим переключением передач она просто невозможна.

Наряду с отмеченным и по тем же причинам возможна более длительная, чем при автоматическом переключении, работа трактора в режиме перегрузки, что также будет приводить к снижению средней мощности и производительности.

Эффективность автоматического переключения передач наиболее четко проявляется при работе МТА в условиях, когда необходимо частое переключение, поля с пересеченным рельефом, малого размера или сложной геометрии, неоднородные урожайность и масса убираемой культуры и т.д. В таблице 1 приведены сравнительные показатели - производительность и расход топлива опытного образца универсально-пропашного трактора Т-5 Липецкого тракторного завода, изготовленного в двух вариантах: с ручным и автоматическим переключением передач. Из таблицы видно, что эффективность автоматического переключения передач проявляется не на всех операциях одинаково, хотя в целом технологические преимущества автоматизированного трактора несомненны.

Таблица 1. Сравнительные показатели трактора Т-5 с коробкой передач, переключаемой вручную и автоматически.

Выполняемая работа	Агрегатируемая машина	Производительность W, га/ч, при переключении передач		Расход топлива G, кг/ч, при переключении передач	
		ручном	автоматическом	ручном	автоматическом
Пахота	ПНП-5-35	0,45	0,49	19,5	19,4
Культивация	КПН-4	2,48	2,91	3,34	3,27
Сев зерновых	СЗД-24	2,19	2,35	2,83	2,53
Междурядная обработка	КОН-2,8	1,46	1,56	2,84	2,58

По данным НАТИ, производительность трактора Т-150К повышается в результате оснащения его системой автоматического управления переключением передач и режимом работы двигателя 7,89 - 9,84 %, а погектарный расход топлива снижается на 4,31 - 5,53 %. Испытания трактора

Т-5 и Т-150К проводили разные организации и в разное время, в разных условиях, по разным методикам. Однако полученные результаты отражают одну и ту же тенденцию повышение технологических свойств трактора в результате применения системы автоматического переключения передач.

Помимо преимуществ по производительности и топливной экономичности, необходимо отметить существенное облегчение условий труда тракториста при автоматическом переключении передач.

Однако автоматическое переключение передач обладает и некоторыми недостатками. Усложнена конструкция коробки передач. Более полное использование энергии двигателя повышает статический уровень нагрузки двигателя, трансмиссии, ходовой системы, а более частое переключение передач повышает их динамическую нагруженность. Достаточно сложно установить датчик контроля нагрузки двигателя, фиксирующего точки переключения передач  $M_{min}$  и  $M_{max}$  на регуляторной характеристике.

#### **Автоматическое управление направлением движения трактора**

Исследованиями установлено, что при вспашке, культивации и посеве зерновых примерно 90 % информации, перерабатываемой трактористом, составляет информация о направлении движения МТА.

Из всего многообразия устройств для автоматического вождения трактора различного конструктивного исполнения и разного функционального назначения рассмотрим только системы автоматического направления движения (САНД), повышающие агротехнические свойства трактора при выполнении различных технологических операций: вспашки, посева, междурядной обработки, внесения удобрений, уборки урожая.

В качестве датчика направления движения служит щуп, который представляет собой рычаг на вертикальном шарнире, закрепленном на тракторе. На свободном ходе щуп имеет форму, которая позволяет ему перемещаться в борозде или по краю скошенной убираемой культуры в зависимости от назначения и выполняемой операции и отслеживать кривизну измеряемого параметра. В шарнир щупа встроен потенциометр или другой

электрический датчик, фиксирующий отклонение щупа при движении МТА. По сигналу датчика системой автоматического управления корректируется направление движения трактора и всего МТА.

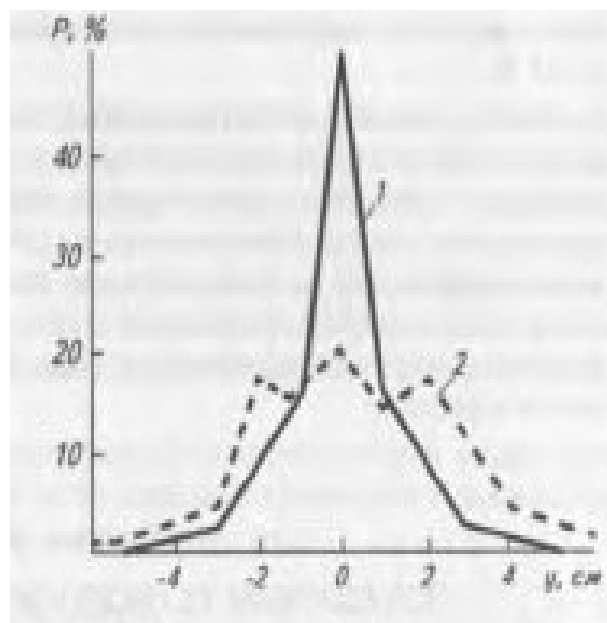


Рис. 3. Отклонение расположения корней сахарной свеклы от оси ряда при посеве: 1 - автоматическое управление; 2 - ручное управление

Испытания МТА с автоматическим вождением проводили на разных операциях и с САНД различной конструкции. Опыты на вспашке показали, что применение устройства автоматического вождения повышает прямолинейность борозд, стабильность ширины захвата и слитность пахоты. Так по данным Алтайской машиностроительной станции (МИС), среднее квадратическое отклонение координат борозд с автоматом, установленным на тракторе Т-4, составляет 6,3 - 8,2 см, а при ручном управлении 8,1 - 8,6 см. Высокие результаты по качеству вспашки достигнуты при автоматическом управлении направлением движения на тракторе К-701.

Опыты на посеве семян свеклы показали (рис. 3), что при автоматическом управлении посевным агрегатом примерно 50 % (величина Р) корней располагается по оси ряда, а 10,5 % - с отклонением до 2 см в ту или иную сторону. При посеве с ручным управлением трактора по оси ряда располагалось, только 19 % корней и с отклонением 2 см – 13 %.

В процессе испытаний отмечено более прямолинейное движение посевного аппарата при управлении в автоматическом режиме. Точность ориентации агрегата с применением САНД выше, чем при ручном управлении. САНД обеспечивает стабильность характеристик независимо от времени суток, освещенности, физического состояния тракториста. Сравнительные опыты на междурядной обработке показали, что защитная зона при автоматическом управлении может быть уменьшена, благодаря чему достигнуто сокращение сорняков на 12 % на 1 м<sup>2</sup>. Автоматическое управление позволило производить междурядную обработку на более высокой скорости и повысить за счёт этого производительность на 18 %.

Таблица 2. Повреждаемость культурных растений при междурядной обработке

Скорость движения м/с (км/ч)	Повреждаемость растений агрегатом	
	без САНД	с САНД
1,46 (5,26)	0,85	0,50
2,16 (7,78)	3,16	1,44
3,02 (10,9)	14,8	2,96

Чтобы оценить качество работы пропашного агрегата в процессе опытов определяли повреждаемость культурных растений (табл. 2). Из таблицы видно, что с



увеличением скорости движения повреждение культурных растений с САНД существенно ниже, чем агрегатом без САНД. Таким образом, применение автоматической системы вождения МТА позволяет значительно повысить агротехническое качество междурядной обработки при более высокой производительности агрегата.

#### **Автоматические системы вождения**

Групповое вождение сельскохозяйственных агрегатов - один из этапов комплексной автоматизации мобильных сельскохозяйственных агрегатов. При групповом вождении ведущий агрегат управляется трактористом — оператором, который с помощью системы теле контроля следит за технологическими, энергетическими и эксплуатационными процессами, связанными с функционированием группы ведомых агрегатов.

Принцип действия одной из систем группового вождения следующий. На ведущем тракторе, где находится водитель, установлен передатчик, излучающий электромагнитные волны высокой частоты. Передающая антенна смонтирована на поперечной штанге позади ведущего трактора. На ведомом тракторе установлено приемное устройство, антенна которого расположена на поперечной штанге в передней части трактора. Антенна состоит из двух колебательных контуров, намотанных на перпендикулярных друг к другу ферритовых стержнях. В одном из контуров формируется опорное напряжение, в другом — напряжение сигнала. Если ведомый трактор движется по заданному курсу, то напряжение сигнала равно нулю. При изменении положения ведомого трактора по отношению к ведущему в сигнальном контуре возбуждается переменное напряжение, амплитуда которого пропорциональна величине отклонения, а фаза характеризует его направление. Затем сигнальное напряжение взаимодействует с опорным в амплитудно-фазовом детекторе. Результат подается на исполнительный механизм, который поворачивает трактор, стремясь уменьшить рассогласование. Описанное устройство имеет чувствительный элемент радио лучевого типа. Ведомые агрегаты могут ориентироваться и с помощью копиров, и с помощью различных механических и гидравлических устройств, соединяющих их органы управления с органами управления ведущего агрегата. Устройство такой системы (рис. 11) включает в себя водило 16, установленное на ферме 9 спереди ведомого трактора, связанное одним концом с вертикальным валом И, имеющим планки 4 и 10, концы которых с помощью тяг 5 - 8 кинематически связаны с механизмом управления бортовыми фрикционными и тормозами ведомого трактора. Другой конец водила 16 свободно уложен на горизонтальный опорный ролик 15 с двумя боковыми ограничителями 12 и 17 на плуге ведущего агрегата. Это обеспечивает перемещение ведомого агрегата вдоль оси ведущего трактора со смещением его на ширину захвата. Для исключения наезда ведомого агрегата на ведущий трактор устройство имеет щиток 14, установленный на плуге ведущего агрегата, и рычаги 3 к 13 в виде клыков, смонтированные на ферме спереди ведомого трактора, кинематически связанные с механизмом отключения муфты сцепления ведомого трактора. Рычаги-клыки свободно качаются вокруг горизонтальной оси и при наезде ведомого трактора на щиток выключают муфту сцепления последнего. Для предотвращения возможного увеличения скорости ведущего агрегата устройство снабжено тросиком 1, 2, один конец которого закреплен на ведомом тракторе, другой — «а механизме включения муфты сцепления ведущего трактора с таким расчетом, что при увеличении скорости ведущего трактора тросик натягивается и его муфта сцепления выключается.

Существует еще несколько вариантов устройства для группового вождения тракторов. Два или три трактора, связанные единой гидравлической системой, располагаются в ряды и движутся параллельными курсами. Телескопическая штанга, вынесенная вперед, шарнирно связана со штоком гидроцилиндров, управляющих механизмами поворота тракторов. При отклонении от курса одного из агрегатов шток его гидроцилиндра перемещается, в гидросистеме происходит перераспределение давления, возвращающее отклонившийся трактор на исходный курс. Усилия на рычаги управления ведомых агрегатов передаются с ведущего трактора с помощью гидравлической и

механической связей. Контролирует работу агрегатов тракторист, находящийся на ведущем тракторе.

Казахским НИИМЭСХ разработано устройство для группового автоматического вождения тракторных агрегатов, которое может управлять движением тракторов как на рабочем гоне, так и на поворотной полосе. Причем при движении на поворотной полосе ведомые агрегаты перестраиваются таким образом, чтобы максимально уменьшить размеры поворотной полосы. При движении на рабочем гоне агрегаты управляются трактористом, находящимся на ведущем тракторе. Ведомые тракторы связаны с ним тросами, соединяющими датчики реостатного типа. Датчики выполнены в виде контактных коробов и воздействуют на органы управления. Ведомые тракторы управляются с помощью копирующих щупов с поворотными рамами. При подъеме или опускании сельскохозяйственной машины рама с помощью тросов передает сигналы на соответствующие исполнительные механизмы. Кроме того, на поворотных рамах установлены датчики смещения, которые управляют агрегатами на поворотной полосе. В нашей стране разработаны также системы группового вождения машинно-тракторных агрегатов с использованием квазистатического электромагнитного поля переменного тока, протекающего по ориентирующему токопроводу, укладываемому ведущим агрегатом. Ведомый машинно-тракторный агрегат оборудован индукционной САВ, которая осуществляет его ориентацию. Ориентирующий токопровод при укладке пропускается через обмотку трансформатора, в результате чего в нем возбуждается переменный ток. При проходе агрегата над поперечным проводом, обозначающим конец гона, приемник команды поворота выдает сигнал для поворота механизма укладки провода, который устанавливается в такое положение, что укладывает токонесущий провод на линию, совпадающую с осью симметрии агрегата. Таким образом, агрегаты на поворотной полосе расположены в один ряд. По окончании поворота по сигналу с того же приемника механизм укладки поворачивается в первоначальное положение и начинает укладывать провод на расстоянии, равном ширине захвата агрегата.

Разработана система группового вождения сельскохозяйственных тракторных агрегатов с использованием радиоволновых устройств для измерения расстояний и углов и для передачи сигналов дистанционного управления. Над кабиной ведущего трактора расположена горизонтальная рамочная антенна, несущая переменный ток звуковой частоты. На ведомом тракторе установлены три идентичные круговые рамочные антенны 1, 2, 3, расположенные треугольником в горизонтальной плоскости. Прямой угол находится у вершины 1, расстояния 1,2 и 1,3 равны. В антеннах возбуждается напряжение, обратно пропорциональное третьей степени расстояния от антенны ведущего трактора. Отношением напряжения, возбуждаемого в рамке 1 к напряжениям в рамках 2 и 3 определяют угол смещения.

Расстояние между тракторами определяют по амплитуде напряжения, наведенного в рамке 1. Этот сигнал используют для управления скоростью ведомого трактора. Несущая частота промодулирована по амплитуде сигналами дистанционного управления, муфтой сцепления, тормозами, пуском и остановкой двигателя, переключением передач, блокировкой дифференциала, технологическим процессом.

Для аварийной защиты системы предусмотрена триггерная ячейка, состояние которой определяется функционированием системы дистанционного управления: «О» — ДУ не работает; «1» — ДУ работает. Она обеспечивает невозможность самопроизвольного старта ведомого трактора.

Триггер устанавливается в положение «О» в следующих случаях; когда напряжение в рамке 1 соответствует расстоянию между агрегатами большему, чем максимально допустимое для обеспечения надежного рулевого управления; амплитуда хотя бы одного из сигналов дистанционного управления ниже допустимого уровня; одна из частот, соответствующих сигналам управления муфтой сцепления или тормозами, возникает на период более 1 с.

Выключение тормозов и включение муфты сцепления производится только при наличии двух соответствующих сигнальных частот ДУ, отсутствии сигнала  $D_y$  для остановки двигателя, нахождении триггерной ячейки в положении «1».

Регулятор подачи топлива и рычаг управления гидронавесной системой трактора приводятся в движение сервомоторами. Рулевое управление осуществляется гидромотором, поворачивающим с помощью редуктора рулевую колонку. Выключение муфты сцепления и включение тормозов осуществляется подачей напряжения «а нормально выключенный соленоидный клапан, который включает исполнительный механизм, воздействующий на муфту сцепления и тормоза. Применение системы группового вождения на пахоте значительно (на 80%) повышает производительность труда механизатора, хотя производительность агрегата в группе несколько снижается.

Индукционные САВ позволяют обеспечить вождение тракторных агрегатов практически при всех технологических операциях полеводства. Системы основаны на использовании в качестве направляющей траектории квазистатического магнитного поля переменного тока звуковой частоты, протекающего по проводам, уложенным в подпахотный слой почвы. Применение таких систем создает предпосылки для комплексной автоматизации сельскохозяйственных МТА.

В НАТИ, ОНИС НАТИ и других организациях разработано несколько вариантов индукционных систем автоматического вождения, использующих меньшее количество ориентирующих токопроводов. Ориентация этих систем относительно поверхностей с одинаковой напряженностью электромагнитного поля, условно названных эквидистантными линиями, или просто эквидистантами.

С помощью комбинации нескольких антенн был получен независимый от движения агрегата сигнал, позволяющий определить расположение осевой линии агрегата по отношению к направляющей линии. Сигнал использован при управлении поворотом.

Системы такого типа, однако, обеспечивают качественную работу агрегата только при расстоянии между проводами более 100 м из-за ограниченных возможностей измерительной системы.

НАТИ был разработан компенсационный способ ориентации по эквидистантным линиям, основанный на измерении текущего значения напряженности магнитного поля, сравнении его с эталонным значением и определении сигнала ошибки.

При движении самоходной машины по различным эквидистантам изменяются напряжения, наводимые в дополнительных магнитоприёмниках. Управляющее напряжение, представляющее разность этих напряжений, через усилитель с помощью управляемого делителя изменяет коэффициент передачи сигнального канала, стабилизируя крутизну статической характеристики чувствительного элемента.

В ВИМе в 1974—1978 гг. была разработана и изготовлена индукционная система автоматического вождения трактора ДТ-75К, обеспечивающая вождение МТА на сплошной, предпосевной обработке почвы и на посеве. Система построена по образцу «классической» индукционной САВ, то есть осуществляет вождение агрегата непосредственно над ориентирующим токопроводом.

Подземная сеть ориентирующих токопроводов состоит из продольных токопроводов, уложенных вдоль рабочего гона в подпахотный слой почвы на глубину 70 см на расстоянии 1,8 м друг от друга, и поперечных токопроводов, уложенных перпендикулярно продольным на границе поворотной полосы и в ее пределах. Продольные токопроводы питаются переменным током частотой 8 кГц, а поперечные - переменным током частотой 12 кГц.

Система имеет переменную структуру в виде двух контуров управления (рис. 12). Замкнутый контур 43i—УПУ1—ОУ управляет вождением МТА во время прохождения рабочего гона и во время выхода агрегата на последующий рабочий гон после выполнения операций, связанных с разворотом. Контур представляет собой широтноимпульсную систему автоматической ориентации. Управление вождением МТА на рабочем гоне осуществляется по двум параметрам (линейному и курсовому отклонению агрегата от

направляющей траектории), определяемым индукционным чувствительным элементом. Каналы управления системы состоят из соответствующего датчика, устройства формирования сигнала ошибки и устройства формирования управляющего воздействия, которое вырабатывается путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигнала ошибки.

Широтно-импульсная система позволяет получить наилучшее быстроедействие, помехоустойчивость при достаточно простой конструкции по сравнению с другими видами систем автоматического регулирования. Применение ШИМ дает возможность включать исполнительный механизм поворота трактора на полную мощность сразу после выхода объекта управления за пределы зоны нечувствительности.

Для повышения точности и помехоустойчивости индукционной системы ориентации применен сканирующий датчик, способный измерять как курсовое, так и линейное отклонение агрегата от направляющей траектории чисто фазовым методом. Датчик инвариантен к колебаниям амплитуды тока, влажности, неоднородности почвы и другим мешающим факторам.

Сканирующий индукционный датчик отклонения тракторного агрегата от направляющей траектории состоит из направляющего токопровода, горизонтально-направленной магнитной антенны, вращающейся вокруг вертикальной оси, укрепленной на валу электродвигателя, формирователя опорного напряжения, состоящего из двух контактов: положительного и отрицательного, симметричных относительно продольной оси агрегата и подвижной ламели, укрепленной на оси и вращающейся вместе с магнитной антенной детектора.

Принцип его действия заключается в следующем.

Магнитная антенна вместе с подвижной ламелью постоянно вращаются вокруг вертикальной оси с угловой частотой  $\omega$ . При этом на подвижной ламели образуется переменное напряжение прямоугольной формы  $V_{CDI}$ , используемое в качестве опорного. Поскольку вектор напряженности магнитного поля  $H_0$  провода с током всегда лежит в плоскости, перпендикулярной оси провода, а магнитная антенна обладает направленностью, то в данном случае она реагирует только на горизонтальную составляющую вектора  $H_0$ . Тогда амплитуда на выходе антенны будет зависеть от угла между  $H_0$  и плоскостью витка антенны.

$V \sim H \sin \alpha$ , т. е. окажется промодулированным по амплитуде с коэффициентом модуляции  $m = 1$ , частотой, равной угловой частоте вращения антенны  $\omega$ . Огибающая  $V_{ci}^2$  выделяется детектором и ограничивается усилителем-ограничителем. Если продольная ось агрегата параллельна ориентирующему токопроводу, т. е.  $\rho = 0$ , то напряжения  $V_{coi}$  и  $V_a > 2$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ .

Напряжение  $U_{coj}$ , снимаемое с подвижной ламели, и напряжение  $U_{102}$ , полученное в результате амплитудного детектирования сигнала с магнитной антенны, поступают соответственно на входы « $U_{оп}$ » и « $U_c$ » устройства формирования сигнала ошибки.

Принципиальная электрическая схема устройства формирования сигнала ошибки включает в себя формирователи опорного и сигнального напряжений, выполненные на интегральных микросхемах  $U1$  и  $U2$  типа  $K1UT181$ , фазовый детектор, выполненный на одной микросхеме  $U3$  типа  $K1UT181$  и двух логических схемах «И-НЕ»  $K1$  и  $K2$  микросхемы  $K1ЛБ333$ . При отклонении самоходной машины от курса, например влево, изменяется разность фаз между напряжениями  $V_{coi}$  и  $V_{coo}$  и на выходе системы «право» формируется напряжение сигнала ошибки, амплитуда которого пропорциональна величине курсового отклонения.

Для управления исполнительным механизмом необходимо преобразовать постоянное напряжение сигнала ошибки в широтно-модулированное управляющее воздействие, которое формируется в устройстве формирования управляющего воздействия (УФУВ) «право» широтно-импульсным модулятором. Исполнительный механизм в соответствии с величиной и знаком управляющего воздействия стремится

уменьшить величину курсового отклонения. При отклонении машины вправо включается УФУВ «лево».

Выходы устройства формирования управляющего воздействия нагружены на соленоиды электрогидравлического исполнительного механизма поворота.

Таким же образом действует канал линейного отклонения, состоящий из аналогичных звеньев.

Разомкнутый контур ЧЭг-УПУг-ОУ управляет агрегатом на поворотной полосе с момента поступления сигнала от окончания рабочего гона до момента начала функционирования первого контура.

Его структура зависит от вида разворота.

Наиболее простым является беспетлевой способ поворота, обеспечивающий минимальную ширину поворотной полосы. Он может быть использован при работе автоматизированных МТА с навесными машинами.

При работе агрегата с прицепными и полунавесными орудиями применяют петлевые повороты: грушевидные (открытой петлей) и восьмеркой (закрытой петлей). Все виды поворотов закрытой петлей характеризуются большими значениями времени поворота, длины поворота и ширины поворотной полосы. Поэтому при работе автоматизированного МТА на таких операциях, как посев, наиболее рациональны петлевые грушевидные повороты.

Поворот шеренгового агрегата на базе сцепки с самоустанавливающимися колесами и осуществляют комбинированным способом. При этом трактор совершает беспетлевой поворот на входе и петлевой на выходе из поворота. Большую часть пути при повороте агрегат движется на дуге окружности, центром которой является след крайнего рабочего органа. Такое движение агрегата на повороте позволяет значительно уменьшить ширину поворотной полосы и длину пути при повороте.

Автоматизированный МТА, оборудованный двумя челночными плугами, может двигаться челочно-реверсивным способом движения с игольчатыми разворотами на концах гона.

Схема обработки поворотных полос при работе агрегата соответствует схемам, рекомендованным правилами производства механизированных работ для агрегатов, работающих челночным способом. При четном количестве рабочих проходов после предпоследнего прохода автоматизированный агрегат обрабатывает одну поворотную полосу, затем совершает последний проход и обрабатывает вторую полосу. При нечетном количестве проходов агрегат переезжает на вторую поворотную полосу и обрабатывает полосу, оставшуюся после первого прохода агрегата по полю. Способ движения агрегата на поворотной полосе, как и на гоне - челочный.

Полевые испытания системы показали, что при вспашке на скорости 6 км/ч среднеквадратическое отклонение агрегата от направляющей траектории составляет 1,2 - 1,8 см, т. е. в 2,5 - 3 раза меньше, чем при ручном управлении. Вероятность пребывания агрегата в пределах агротехнического допуска равна 0,97.

#### СИСТЕМЫ АВТОВОЖДЕНИЯ НА ПОВОРОТНОЙ ПОЛОСЕ

Отсутствие направляющих траекторий осложняет автоматизацию вождения сельскохозяйственных агрегатов на поворотной полосе. Поэтому подавляющее большинство автоматов вождения на поворотной полосе представляет собой программные автоматические системы управления.

Две такие системы разработаны для слитной пахоты с копированием борозды предыдущего прохода. Поворот на конце гона в этих системах осуществляется при повернутых на 90° передних колесах. В одной из систем поворот осуществляется при полностью заторможенном одном заднем колесе, в другой — задние колеса вращаются в разные стороны. Передние колеса приводятся в движение гидромоторами. Сигнал на разворот трактор получает от троса, натянутого по краю поля на границе поворотной полосы.

В Грузинском сельскохозяйственном институте было создано устройство для автоматического вождения и точного поворота гусеничного трактора в междурядьях и загонках виноградников по шпалерной проволоке. Сигналы управления разворотом трактор получает от двух реперов, установленных на поверхности земли в конце гона. При выходе из междурядий щуп, установленный в передней части трактора, задевая за первый репер, воздействует на выключатель, что приводит к полному затормаживанию противоположной гусеницы. Поворот прекращается, когда в контакт с этим репером придет другой щуп, установленный в задней части трактора. Таким образом трактор совершает поворот на  $90^\circ$ , а затем продолжает поступательное движение до тех пор, пока передний щуп не коснется следующего репера. После этого трактор сделает второй поворот на  $90^\circ$  и выйдет на следующий гон. Автомат такого типа может применяться только при обработке садов и виноградников.

В ВИМе разработано несколько систем, использующих профилированные диски с записями программы разворота.

Различные модификации системы содержат механические и гидроскопические датчики курса.

Принцип действия такой системы заключается в следующем. Сигналом к началу разворота является подъем орудия в транспортное положение. При этом путеизмерительное колесо опускается на землю и его вращение передается профилированному диску с программой разворота, который через систему тяг и электрогидравлический исполнительный механизм управляет траекторией движения агрегата при петлевом или комбинированном развороте.

Более современны и надежны устройства логического типа, управляющие разворотом гусеничного трактора по заранее заданной программе, разработанные ВИМом. Сигналы управления бортовыми фрикционами, навесками, подачей топлива, коробкой перемены передач формируются в них электронным логическим блоком в соответствии с программой разворота. В процессе разворота измеряют пройденный путь (подсчетом количества оборотов полуоси) и курсовой угол (индукционным датчиком курса). Устройство может автоматически управлять беспетлевым или реверсивным разворотом мобильного сельскохозяйственного агрегата.

## **2.2 Лабораторная работа №2 (2 часа).**

**Тема: «Гусеничная машина как объект управления»**

**2.2.1 Цель работы:** Экспериментальное определение модуля нормальной упругости и проверка закона Гука при растяжении (сжатии).

**2.2.2 Задачи работы:**

1. Изучить тензометр Мартенса.
2. Изучить принцип работы лабораторной установки.
3. Выполнить эксперимент.
4. Произвести расчёты

**2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Металлический образец.

**2.2.4 Описание (ход) работы:**

### **Динамика поворота гусеничной машины**

Гусеничная машина представляет собой самоходную машину, в которой энергия, развиваемая двигателем, расходуется на преодоление внутренних и внешних сопротивлений при её движении.

Внутренние потери при движении машины зависят от качественных показателей двигателя, трансмиссии и ходовой части. Внешние сопротивления машины определяются главным образом качеством почвы, углом наклона плоскости движения и параметрами ходовой части.

В процессе управления гусеничной машиной приходится периодически изменять скорость и траекторию её движения. Последнее предъявляет особые требования к характеристикам двигателя, трансмиссии и ходовой части, которые должны обеспечить высокие динамические и тяговые качества. Высокую управляемость как при прямолинейном движении, так и при повороте можно обеспечить при установке на гусеничную машину автоматической прогрессивной коробки передач. Управление машиной при установке такой трансмиссии сводится к управлению подачей горючего в двигатель и к управлению механизмом поворота при помощи руля или рычага. Прогрессивная коробка передач должна автоматически устанавливать необходимое передаточное число в соответствии с величиной сопротивления движению. Создание такой идеальной трансмиссии представляет значительные технические трудности. В настоящее время применяются механизмы поворота дифференциального типа, которые сохраняют при повороте скорость центра тяжести машины постоянной и равной скорости прямолинейного движения до поворота. Применяются также механизмы поворота, у которых скорость забегающей гусеницы постоянна и равна скорости прямолинейного движения до поворота. Изменение прямолинейной скорости гусеничной машины производится

регулированием подачи топлива в двигатель, а также ступенчатым (а в перспективе и бесступенчатым) изменением передаточного числа коробки передач.

Таким образом, в процессе управления гусеничной машиной производится воздействие на подачу топлива в двигатель, изменение передаточного числа между двигателем и ходовой частью и воздействием на механизмы поворота той или иной конструкции.

В общем виде управления движения гусеничной машины являются нелинейными. При составлении дифференциальных уравнений необходимо проанализировать возможность их упрощения и линеаризации.

Рассмотрим методику составления дифференциальных уравнений объектов, допускающих линеаризацию. При этом сначала необходимо определить физический закон, описывающий процессы, происходящие в объекте. Затем следует определить функциональные зависимости, входящие в исходные уравнения. Последние могут быть аналитическими функциями или заданы графически. После подстановки найденных выражений в исходные уравнения обычно получается нелинейное уравнение.

В тех случаях, когда допустима линеаризация, исходное нелинейное уравнение заменяется линеаризованным.

Линеаризация производится в обычном порядке при помощи формулы Тейлора, которая позволяет разложить нелинейную функцию нескольких переменных по степеням малых приращений этих переменных, взятых в окрестности их значений, соответствующих установившемуся режиму.

Рассмотрим уравнения, описывающие динамику поворота гусеничной машины.

Изменение траектории движения гусеничной машины осуществляется при помощи механизмов поворота в результате изменения моментов на ведущих колёсах и скоростей движения, забегающей и отстающей гусениц.

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum F_{kx} \quad (1)$$

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = \sum F_{ky} \quad (2)$$

$$J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum m_z(F_k) \quad (3)$$

где М – масса тела;

$J_z$  – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр тяжести (точку С, рис. 1) и перпендикулярной плоскости;  
 $\varphi$  – угол поворота подвижных координат;  
 $F_{kx}$  – проекции силы на ось X;  
 $F_{ky}$  – проекции силы на ось Y;  
 $\sum m_z(F_k)$  – сумма моментов внешних сил, действующих на тело, относительно центра тяжести в плоскости XY.

Рассмотрим силы, действующие на гусеничную машину.

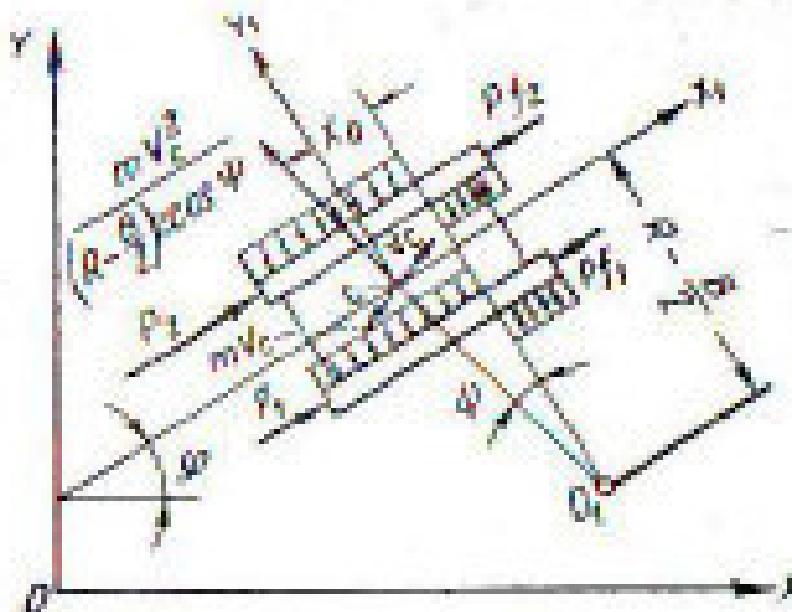


Рисунок 1. Схема сил, действующих на трактор

На рис. 1 показана гусеничная машина на повороте без нагрузки на крюке и нанесены силы, которые в данном случае на неё действуют.

Неподвижную плоскость примем за координатную плоскость XOY. Подвижные координаты расположим таким образом, чтобы ось  $X_1$  проходила по продольной оси симметрии машины, а начало координат С находилось в центре тяжести трактора.

Уравнения движения трактора в неподвижных координатах можно написать следующим образом (рис. 2):

$$\sum X = -m \frac{d^2 x}{dt^2} + (P_2 + P_1 - P_{f2} - P_{f1}) \cos \varphi + S_r \sin \varphi = 0 \quad (4)$$

$$\sum Y = -m \frac{d^2 y}{dt^2} + (P_2 + P_1 - P_{f2} - P_{f1}) \cdot \sin \varphi - S_r \cos \varphi = 0 \quad (5)$$

$$\sum M = -J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - M_c + (P_2 + P_1 - P_{f2} - P_{f1}) \cdot \frac{B}{2} = 0 \quad (6)$$

$P_1$  – сила тяги отстающей гусеницы;

$P_2$  – сила тяги забегающей гусеницы;

$P_{f1}$ ;  $P_{f2}$  – силы сопротивления поступательному движению;

$J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$  – момент касательных сил инерции трактора относительно оси, проходящей через центр тяжести;

$M_c$  – момент сопротивления повороту относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести, создаваемый поперечными касательными реакциями грунта на опорные поверхности гусениц;

$S_r$  – результирующая поперечная сила.



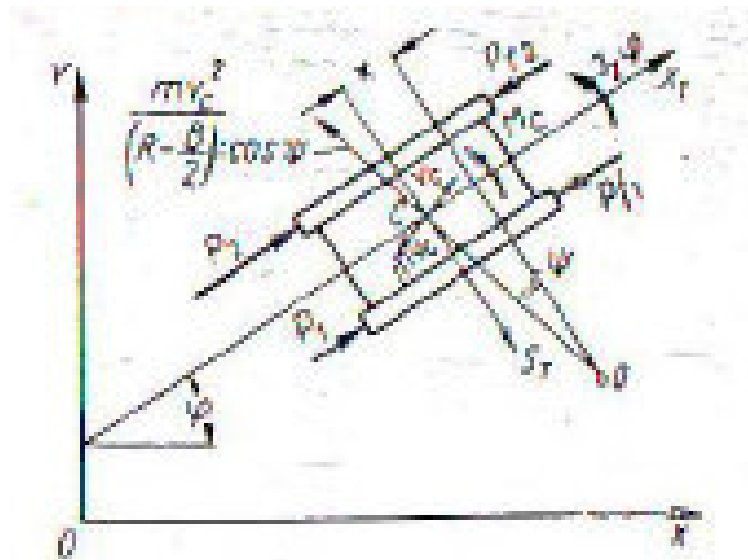


Рисунок 2. К определению уравнения движения трактора  
Кроме этого, необходимо учесть уравнение дифференциальных связей:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{B} \cdot r_{e.e} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \cdot r_{a.e} = V_{\dot{n}e} \quad (8)$$

где  $\omega_2$  – угловая скорость ведущего колеса забегающей гусеницы;

$\omega_1$  – угловая скорость ведущего колеса отстающей гусеницы;

$r_{в.к.}$  – радиус ведущего колеса;

$V_{ск}$  – составляющая скорости  $V_c$  по продольной оси трактора  $X_1$ .

Следует иметь в виду, что при автоматическом вождении отклонения от заданной траектории должны быть незначительными.

Для решения поставленной задачи составим уравнения движения трактора в подвижных координатах:

$$\sum X_1 = -m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + P_2 + P_1 - P_{f2} - P_{f1} = 0 \quad (9)$$

$$\sum Y_1 = -m \frac{d^2 y_1}{dt^2} - S_r = 0 \quad (10)$$

$$\sum M = -J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + (P_2 - P_1 - P_{f2} - P_{f1}) \cdot \frac{B}{2} = 0 \quad (11)$$

Определение траектории движения машины значительно затрудняется необходимостью учёта таких факторов, как изменение взаимодействия гусениц с почвой, их натяжения, буксования, уклонов (как поперечных, так и продольных).

Чтобы упростить решение задач, примем

$$P_{f2} = P_{f1} = f \frac{G}{2}$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению;

$$M_c = \frac{\mu GL}{4}$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления повороту;

$L$  – длина опорной поверхности гусениц;

Центробежной силой пренебрегаем.

Динамические качества машины при повороте, учитывая эти допущения, обычно незначительно отличаются от действительных.

В результате уравнения движения в подвижных координатах будут иметь вид

$$\sum X_1 = -m \frac{d^2 x}{dt^2} + P_2 + P_1 - fG = 0 \quad (12)$$

$$\sum M = -J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - M_c + (P_2 - P_1) \cdot \frac{B}{2} = 0 \quad (13)$$

Уравнение (13) можно записать в следующем виде:

$$J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_{\dot{A}} - \dot{I}_{\dot{N}} \quad (14)$$

где  $M_B = 0,5B \cdot (P_2 - P_1)$  – поворачивающий момент.

Дифференциальные уравнения движения трактора окончательно принимает вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = P_2 + P_1 - fG_1 \quad (15)$$

$$J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_{\dot{e}} - \dot{I}_{\dot{N}} \quad (16)$$

Как следует из этих уравнений, для осуществления поворота необходимо, чтобы  $M_B \geq M_C$ .

Так как в процессе работы можно управлять только силами  $P_2$  и  $P_1$ , целесообразно рассмотреть движение объекта под влиянием этих сил, т.е. считать входными величинами силы  $P_2$  и  $P_1$ , а выходными координаты трактора –  $x$  и  $\varphi$ .

Рассмотрим движение машины при условии, что скорость её в поступательном движении постоянна.

Если рассматривать переходный режим при небольших отклонениях, то момент сопротивления повороту можно записать в виде

$$M_C = A \frac{d\varphi}{dt} \quad (17)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности.

Формула (17) показывает, что момент на данном участке пути, при данной поступательной скорости, для исследуемого типа трактора связан линейной функцией со скоростью поворота.

Тогда дифференциальное уравнение трактора как объекта регулирования примет вид

$$J_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + A \frac{d\varphi}{dt} = \dot{I}_B \quad (18)$$

Разделив левую и правую части равенства на коэффициент  $A$ , получим

$$T \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K \dot{I}_B \quad (19)$$

где  $T = \frac{J_z}{A}$  с и  $K = \frac{1}{A} \frac{\partial \dot{a}}{\partial \dot{a} \cdot \dot{I} \cdot \dot{n}}$ .

Коэффициент  $K$ , называемый коэффициентом усиления гусеничной машины по управляющему воздействию, определяют скорость отклонения машины от заданной траектории в рад/с на единицу поворачивающего момента.

Величина  $T$ , называемая постоянной времени, имеет размерность времени и определяет инерционность данного звена, т.е. скорость установления выходной величины.

Если дифференциальное уравнение записать в операторной форме  $Tr^2\varphi + p\varphi = KM_B$ , где  $\delta = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования, то тогда передаточная функция трактора будет иметь вид

$$W(p) = \frac{K}{p(Tp + 1)} \quad (20)$$

Полученные уравнения позволяют сделать следующие выводы:

1. В уравнение движения трактора как объекта управления входит не угол  $\varphi$ , а только его производная.
2. Под влиянием управляющих воздействий гусеничная машина отклоняется от заданного направления без последующего самовыравнивания. Объект, описываемый таким уравнением называют нейтральным.
3. Постоянные  $T$  и  $K$  передаточной функции гусеничной машины зависят от конструктивных параметров машины, момента инерции, скорости движения, коэффициента сопротивления повороту и других величин.

При переезде гусеницей препятствия сопротивление её движению изменяется. В момент наезда на препятствие сила  $P_f$  увеличивается. При съезде с него – уменьшается. При движении опорных катков по препятствиям сила  $P_f$  также изменяется. Нарушение равенства  $P_{f1}$  и  $P_{f2}$  создаёт момент, вызывающий необходимость изменения сил  $P_1$  и  $P_2$ .

Трактор сохранит прямолинейное движение в том случае, если  $P_1 - P_{f1} = P_2 - P_{f2}$ . Тогда поворачивающий момент  $M_B = 0$ .

Если в качестве механизма, поворота применяется простой дифференциал (без учёта внутреннего трения в механизме), то  $P_2 = P_1$  и любое нарушение этого равенства вызовет отклонение трактора от прямолинейного движения. При использовании механизма поворота с бортовыми фрикционами или одноступенчатого планетарного механизма нарушение равенства  $P_{f2} = P_{f1}$  может быть компенсировано соответствующим изменением соотношения  $P_2$  и  $P_1$ , и машина будет сохранять прямолинейное движение (при отсутствии буксования гусеницы). При значительной разности между силами  $P_{f2}$  и  $P_{f1}$  и низком коэффициенте сцепления гусениц с почвой может создаваться такое положение, когда момент  $0,5(P_{f2} - P_{f1}) \cdot B$  и предельный по сцеплению с почвой поворачивающий момент  $M_B = 0,5(P_2 - P_1) \cdot B$  будут близкими, что вызовет различные буксования правой и левой гусениц. В этом случае машина изменит направление движения.

Учитывая, что при наличии сил  $P_1$  и  $P_2$  буксование практически происходит всегда, можно сделать вывод, что существенная разница между значениями  $P_{f2}$  и  $P_{f1}$  (при переезде препятствий одной гусеницей) вызывает отклонение трактора.

При  $P_{f1} \neq P_{f2}$  уравнение (16) принимает вид

$$J \frac{d^2 q}{dt^2} = (P_2 - P_1) \cdot \frac{B}{2} - (P_{f2} - P_{f1}) \cdot \frac{B}{2} - \dot{I}_N \quad (21)$$

## 2.3 Лабораторная работа №3 (2 часа).

**Тема:** «Колёсная машина как объект управления»

**2.3.1 Цель работы:** Сравнительное изучение свойств пластичных хрупких, однородных и неоднородных материалов и определение их механических характеристик при статическом сжатии.

**2.3.2 Задачи работы:**

1. Изучить принцип работы лабораторной установки ГМС-50.
2. Выполнить испытание различных материалов на сжатие.
3. Выполнить расчёты.

**2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Машина для испытания ГМС-50.
2. Линейки.
3. Образцы: сталь, бронза, древесина.

**2.3.4 Описание (ход) работы:**

### **Движение колёсной машины на повороте**

Для получения уравнения движения колесной машины как объекта управления рассмотрим схему движения колесной машины на повороте с учетом бокового увода ее колес (рис. 1). При повороте машины на ее колеса действуют боковые реакции. При этом колеса катятся под некоторым углом к своей плоскости вращения. Вследствие наличия

бокового увода передних колес машины  $\delta_1'$  и  $\delta_1''$  скорость  $V_B$  точки В (середина передней оси) направлена под некоторым углом  $\delta_1$  к средней плоскости вращения передних колес, повернутых на угол  $\varphi$ , по отношению к продольной оси машины АВ. Аналогично, скорость  $V_A$  точки А (середина задней оси) вследствие бокового увода задних колес  $\delta_2$  и  $\delta_2''$  будет направлена под некоторым углом  $\delta_2$  по отношению к продольной оси машины АВ. При отсутствии бокового увода каждое колесо катилось бы в плоскости своего вращения и мгновенный центр вращения всей машины располагался бы в некоторой точке  $O'$ . Однако из-за наличия бокового увода колес мгновенный центр вращения машины располагался в некоторой точке  $O$ , положение которой зависит от угла поворота управляемых колес  $\varphi$ , боковой эластичности передних и задних колес, скорости движения машины и радиуса ее поворота. Принимая отрезок  $OD$  равным радиусу поворота, согласно рис. 1, получим

$$\operatorname{tg} \delta_2' = \frac{AD}{R - \frac{B}{2}} \quad \operatorname{tg} \delta_2'' = \frac{AD}{R + \frac{B}{2}}$$

Учитывая, что  $R \gg B$ , окончательно получим

$$\operatorname{tg} \delta_2' \approx \operatorname{tg} \delta_2'' \approx \frac{AD}{R} = \operatorname{tg} \delta_2 \quad (1)$$

где  $B$  – расстояние между колёсами.

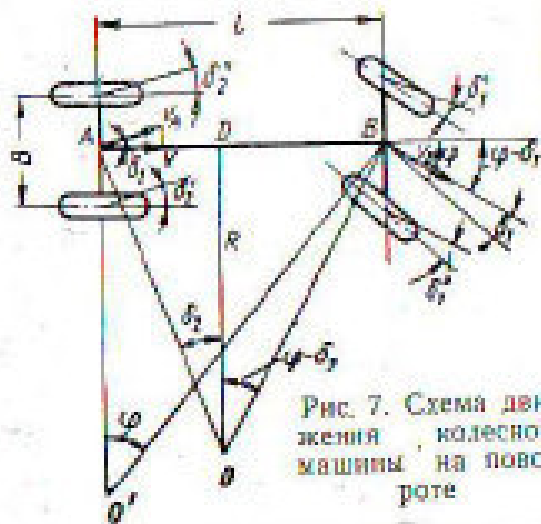


Рисунок 1. Схема движения колёсной машины на повороте

Аналогичные рассуждения справедливы и для углов бокового увода передних колес.

Для определения суммарных боковых реакций  $Y_1$  и  $Y_2$ , действующих на колеса передней и задней осей машины, рассмотрим схему сил, моментов и реакций, действующих в горизонтальной плоскости на машину при ее повороте, рис. 2. Предположим, что колесная машина находится в состоянии равновесия, тогда к ее центру тяжести приложены тангенциальная  $T$  и нормальная  $N$  силы и действует инерционный момент  $M_j$ .

Инерционный момент определяется выражением

$$\dot{I}_{\dot{n}} = J \frac{d\omega}{dt} = m \rho^2 \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

где  $m$  – масса машины;

$J$  – момент инерции машины относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести;

$\rho$  – радиус инерции массы машины относительно той же оси;

$\frac{d\omega}{dt}$  – угловое ускорение машины.

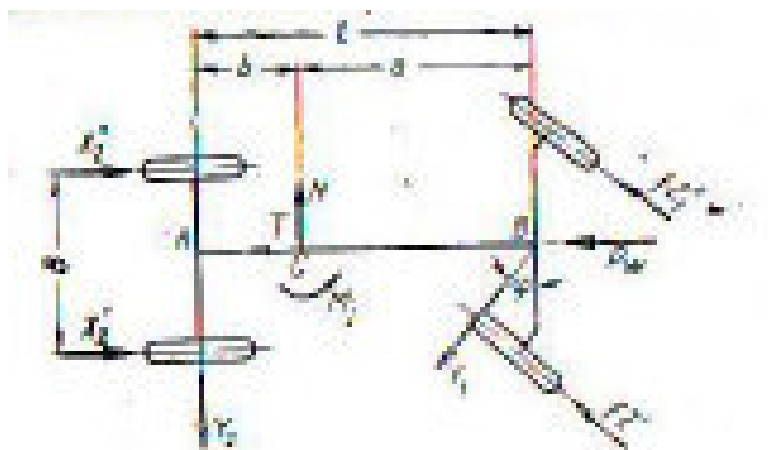


Рисунок 2. Схема сил и моментов, действующих на колёсную машину

Суммарные боковые реакции  $Y_1$  и  $Y_2$  действуют перпендикулярно плоскости вращения передних и задних колес.

Реакции  $X'_1$  и  $X''_1$ , действующие на передние колеса машины, определяются уравнениями

$$\begin{aligned} X'_1 &= fZ'_1 + J_{e1} \frac{1}{r_e^2} \cdot \frac{du}{dt} \\ X''_1 &= fZ''_1 + J_{e1} \frac{1}{r_e^2} \cdot \frac{du}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению;

$X'_1$  – радиальная реакция, действующая на внутреннее колесо передней оси;

$X''_1$  – радиальная реакция, действующая на внешнее колесо передней оси;

$r_k$  – радиус качения колеса;

$J_{k1}$  – момент инерции переднего колеса относительно его оси;

$J_{e1} \frac{1}{r_e^2} \cdot \frac{du}{dt}$  – сила, затрачиваемая на ускорение вращения переднего колеса.

Если принять скорость движения колёсной машины постоянной, можно записать

$$\begin{aligned} X'_1 &= fZ'_1 \\ X''_1 &= fZ''_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Реакции  $X'_2$  и  $X''_2$ , действующие на задние колеса, определяются уравнениями:

$$X''_2 = M_m \cdot \frac{k \cdot i_k \cdot i_A \cdot \eta_m}{r_k} - \frac{1}{r_k^2} \cdot (J_m \cdot i_0^2 \cdot i_k^2 \cdot k \cdot \eta_m + J_{k2}) \frac{du}{dt} - fZ'_2 \quad (5)$$

$$X'_2 = M_m \cdot \frac{(1-k) \cdot i_k \cdot i_A \cdot \eta_m}{r_k} - \frac{1}{r_k^2} \cdot (J_m \cdot i_0^2 \cdot i_k^2 \cdot k \cdot \eta_m + J_{k2}) \frac{du}{dt} - fZ'_2 \quad (6)$$

где  $M$  – вращающий момент двигателя;

$i_k$  – передаточное число коробки передач;

$k$  – коэффициент распределения полной суммарной окружной силы по колёсам задней ведущей оси машины;

$i_0$  – передаточное число главной передачи;

$\eta_m$  – механический к.п.д. силовой передачи или трансмиссии машины;

$r_k$  – радиус качения колеса;

$J_m$  – момент инерции вращающихся деталей двигателя и сцепления;

$Z'_2$  – радиальная реакция, действующая на внутреннее колесо задней оси;

$J_{k2}$  – момент инерции заднего колеса.

При постоянной скорости движения реакции  $X'_2$  и  $X''_2$  примут вид:

$$X_2'' = M_m \cdot \frac{k \cdot i_k \cdot i_A \cdot \eta_m}{r_k} - fZ_2' \quad (7)$$

$$X_2'' = M_m \cdot \frac{(1-k) \cdot i_k \cdot i_A \cdot \eta_m}{r_k} - fZ_2' \quad (8)$$

где  $Z_2''$  - радиальная реакция, действующая на внешнее колесо задней оси.

Сумма тангенциальных реакций  $X_2'$  и  $X_2''$  представляет собой свободную суммарную окружную силу  $P_a$  на задних ведущих колёсах машины.

Согласно уравнения (7) и (8) имеем

$$P_a = M_m \cdot \frac{i_k \cdot i_A \cdot \eta_m}{r_k} - f \cdot (Z_2' + Z_2'') \quad (9)$$

Полная суммарная окружная сила  $P_p$  равна сумме полных окружных сил  $P_p'$  и  $P_p''$  и превышает силу  $P_b$  на величину, затраченную на качение обоих колёс задней оси  $f \cdot (Z_2' + Z_2'')$ .

$$\text{Следовательно } P_p = P_a + f \cdot (Z_2' + Z_2'') = M_m \cdot \frac{i_k \cdot i_0 \cdot \eta_m}{r_k} \quad (10)$$

Действие тангенциальных реакций  $X_2'$  и  $X_2''$  можно заменить действием полной суммарной окружной силы, приложенной в направлении продольной оси машины АВ и момента  $M_y$ .

Кроме  $P_p$  и  $M_y$ , на колесную машину действуют силы сопротивления качению задних колёс  $f \cdot (Z_2' + Z_2'')$ , сила сопротивления воздуха  $P_u$  и тангенциальные реакции  $X_1'$  и  $X_1''$  действующие на передние колеса.

При малых значениях угла  $\varphi$  можно принять, что сила  $P_u$  и тангенциальные реакции  $X_1'$  и  $X_1''$  действуют в направлении продольной оси машины АВ.

Обозначая сумму указанных сил через  $P_b$ , получим

$$P_b = P_u + f \cdot (Z_1' + Z_1'' + Z_2' + Z_2'') + 2J_k \cdot \frac{1}{r_d} \frac{d\omega_k}{dt} = P_u + fG + 2J_k \cdot \frac{1}{r_d} \frac{d\omega_k}{dt} \quad (11)$$

где  $G$  – полный вес машины;

$r_d$  – динамический радиус колеса;

$\frac{d\omega_k}{dt}$  - угловое ускорение колеса.

Таким образом, схему сил и моментов, изображенную на рис. 2, можно заменить схемой, показанной на рис. 3.

Силы инерции:  $N$  – нормальная и  $T$  – тангенциальная равны произведениям массы колесной машины на ускорение центра тяжести  $j_{CR}$  - нормальное и  $j_{Ct}$  - тангенциальное соответственно.

Для определения этих ускорений рассматриваем движение машины (точнее, ее продольной оси АВ) относительно не подвижной системы координат  $X$  и  $Y$ , как показано на рис. 4.

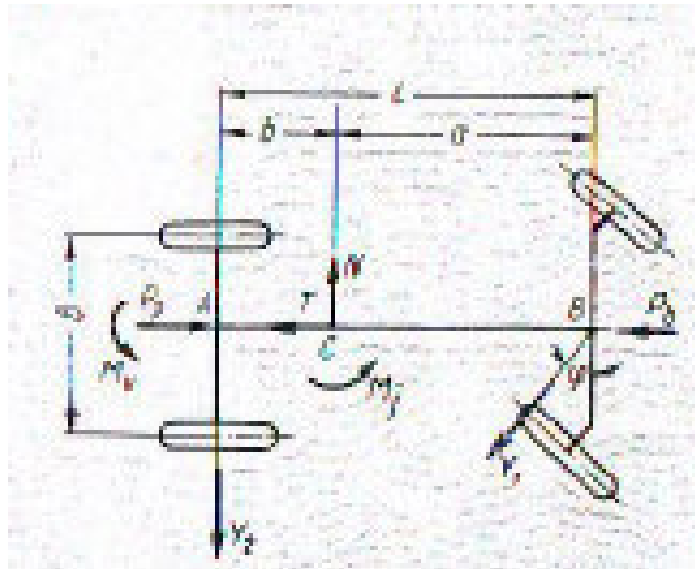


Рисунок 3. Упрощённая схема сил и моментов

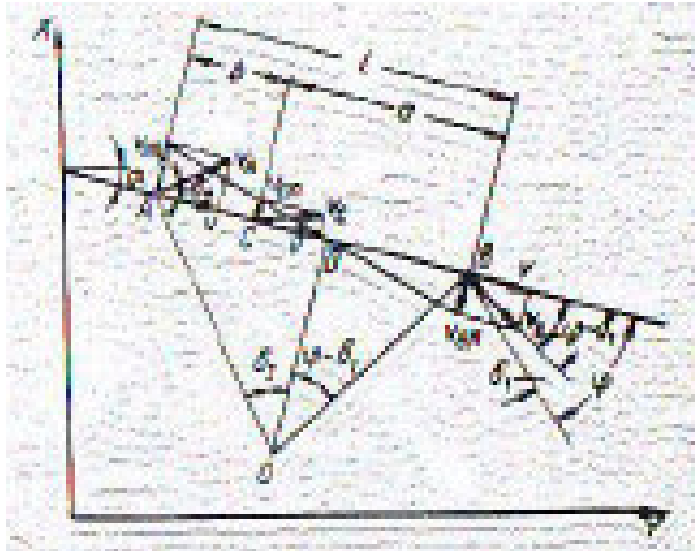


Рисунок 4. План скоростей колёсной машины

Из рис. 4 следует

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}; \quad j_{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

где  $j_{\omega}$  – угловое ускорение;

$\omega$  – угловая скорость вращения машины;

$\alpha$  – угол между осями АВ и Y.

Проекции полной скорости  $V_c$  центра тяжести машины С на оси X и Y определяются из рис. 4. Разложим скорость  $V_c$  на скорости  $V_c$  и  $V_{sk}$ . Принимая их направления от начала координат положительными, получим

$$V_x = V_{\bar{m}} \cos \alpha - V \sin \alpha \quad (12)$$

$$V_N = V \cos \alpha + V_{\bar{m}} \sin \alpha \quad (13)$$

Дифференцируя эти уравнения, получим выражения для проекций ускорения центра тяжести машины:

$$j_{cx} = \frac{dV_x}{dt} = \frac{dV_{\bar{m}}}{dt} \cos \alpha - V_{\bar{m}} \omega \sin \alpha - \frac{d\alpha}{dt} \sin \alpha - V \omega \cos \alpha$$

$$j_{cy} = \frac{dV_y}{dt} = \frac{dV}{dt} \cos \alpha - V \omega \sin \alpha - \frac{dV_{\bar{m}}}{dt} \sin \alpha + V_{\bar{m}} \omega \cos \alpha \quad (14)$$

Ускорения  $j_{cx}$  и  $j_{cy}$  центра тяжести колесной машины, направленные вдоль координатных осей  $X$ ,  $Y$ , могут быть определены непосредственно как проекции ускорений  $j_{c\bar{x}}$  и  $j_{c\bar{y}}$ .

Если скорость  $V_c$  уменьшается, то

$$j_{cx} = -j_{\bar{m}} \cos \alpha - j_{c\bar{x}} \sin \alpha \quad (15)$$

$$j_{cy} = j_{\bar{m}} \cos \alpha - j_{c\bar{y}} \sin \alpha \quad (16)$$

Решая совместно уравнения (15), (16) и (14), получим окончательные выражения для ускорений центра тяжести машины:

$$j_{c\bar{x}} = \omega V - \frac{dV_{\bar{m}}}{dt} \quad (17)$$

$$j_{c\bar{y}} = \frac{dV}{dt} + \omega V_{\bar{m}} \quad (18)$$

Зная  $j_{cx}$  и  $j_{cy}$ , можно определить силы инерции  $N$  и  $T$ , которые необходимо приложить к центру тяжести машины для того, чтобы рассматривать её как бы находящейся в равновесии:

$$N = m \cdot \left( \omega V - \frac{dV_{\bar{m}}}{dt} \right) \quad (19)$$

$$\dot{O} = m \cdot \left( \frac{dV}{dt} + \omega V_{\bar{m}} \right) \quad (20)$$

Пользуясь рис. 3, получим уравнение равновесия системы по отношению к вертикальной оси, проходящей через точку  $B$ .

$$Y_2 l = Na - M_j - M_y \quad (21)$$

Аналогичным образом, из условия равновесия системы по отношению к вертикальной оси, проходящей через точку  $A$ , получим

$$Y_1 l \cos \varphi = Nb + M_j + M_y \quad (22)$$

Из уравнений (21) и (22), а также (19) и (20) находятся выражения для суммарных боковых реакция  $Y_1$  и  $Y_2$  в самом общем случае движения машины:

$$Y_1 l \cos \varphi = m \cdot \frac{\left( \omega V - \frac{dV_{\bar{m}}}{dt} \right) \cdot b + \rho^2 \cdot \frac{d\omega}{dt}}{l} + \frac{M_y}{l} \quad (23)$$

$$Y_2 = m \cdot \frac{\left( \frac{dV_{\bar{m}}}{dt} + \omega V_{\bar{m}} \right) \cdot \dot{a} - \rho^2 \cdot \frac{d\omega}{dt}}{l} - \frac{M_y}{l} \quad (24)$$

Выражение  $\frac{dV_{\bar{m}}}{dt}$  может быть определено в зависимости от характера движения машины и боковой эластичности ее колес.

По результатам многочисленных экспериментов, углы бокового увода колес  $\delta_1$  и  $\delta_2$  можно принять пропорциональными действующим на эти колеса боковым реакциям. То же относится и к оси, если радиус поворота машины  $R$  достаточно велик и если ни одно из колес этой оси не получило бокового скольжения. В результате углы  $\delta_1$  и  $\delta_2$  бокового увода передней и задней оси машины могут быть выражены через суммарные боковые реакции  $Y_1$  и  $Y_2$ :

$$\begin{aligned} Y_1 &= K_{\delta_1} \cdot \delta_1 \\ Y_2 &= K_{\delta_2} \cdot \delta_2 \\ K_{\delta_1} &= \frac{1}{z_1} \\ K_{\delta_2} &= \frac{1}{z_2} \end{aligned} \quad (25)$$



где  $z_1, z_2$  – коэффициенты бокового увода передней и задней осей машины, численно равные углу бокового увода в рад, при действии на ось боковой реакции 1 кг.

Кроме этого, углы  $\delta_1$  и  $\delta_2$  могут быть определены при помощи схемы, изображённой на рис. 4.

Пользуясь этой схемой, получим

$$\frac{V_{A\dot{i}}}{V_A} = \frac{AD}{AO} \text{ и } \frac{V_{B\dot{i}}}{V_B} = \frac{BD}{BO}$$

или

$$V_{A\dot{i}} = \frac{V_A}{AO} AD = \omega AD = \omega b + \omega CD = \omega b + V_{\ddot{m}} \quad (26)$$

$$V_{B\dot{i}} = \frac{V_B}{BO} BD = \omega BD = \omega a - \omega CD = \omega a - V_{\ddot{m}} \quad (27)$$

Из этой же схемы

$$V_A = V \cdot \operatorname{tg} \delta_2, \quad V_B = V \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \delta)$$

поэтому можно записать.

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{\omega b + V_{\ddot{m}}}{V} \quad (28)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi - \delta) = \frac{\omega a + V_{\ddot{m}}}{V} \quad (29)$$

Углы бокового увода  $\delta_1$  и  $\delta_2$  передней и задней осей машины обычно невелики.

Если принять также небольшим и угол поворота управляемых колёс  $\varphi$ , то получим

$$\operatorname{tg} \delta_2 \approx \delta_2$$

$$\operatorname{tg}(\varphi - \delta_1) \approx \varphi - \delta_1$$

Тогда уравнения (28) и (29) примут вид

$$\delta_2 = \frac{V_{\ddot{m}} + \omega b}{V} \quad (30)$$

$$\delta_1 = \frac{V_{\ddot{m}} - \omega a + V \varphi}{V} \quad (31)$$

Учитывая уравнения (30), (31) и (25), можно записать

$$Y_1 = K_{\delta_1} \cdot \frac{V_{\ddot{m}} - \omega a + V \varphi}{V}$$

$$Y_2 = K_{\delta_2} \cdot \frac{V_{\ddot{m}} - \omega b}{V} \quad (32)$$

Одновременно с этим из условия равновесия системы (рис. 3) считаем, что  $\varphi$  достаточно мал, тогда  $\cos \varphi \approx 1$ .

$$Y_1 = Y_2 = m \cdot \left( \omega V - \frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} \right) \quad (33)$$

Решая совместно уравнения (32) и (33), получим

$$K_{\delta_2} \cdot \frac{V_{\ddot{m}} + \omega b}{V} + K_{\delta_1} \cdot \frac{V_{\ddot{m}} - \omega a + V \varphi}{V} = m \cdot \left( \omega V - \frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} \right) \quad (34)$$

После преобразований уравнение (34) приводится к виду

$$\frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} + \frac{K_{\delta_1} + K_{\delta_2}}{mV} \cdot V_{\ddot{m}} = V \omega + \frac{aK_{\delta_1} + bK_{\delta_2}}{mV} \cdot \omega - \frac{K_{\delta_2} \varphi}{m} \quad (35)$$

Пренебрегаем трением в дифференциале силовой передачи, уравнения (21) и (22) перепишем в виде

$$Y_2 l = Na - M_j \quad (36)$$

$$Y_1 l \cos \varphi = Nb + M_j \quad (37)$$

Умножим уравнение (36) на  $-b$ , а уравнение (37) на  $+a$  и сложим их, тогда

$$-b l Y_2 + a l Y_1 \cos \varphi - M_j b + M_j a$$

Далее, принимая  $\cos \varphi = 1$ , получим

$$a Y_1 + b Y_2 = M_j = J \frac{d\omega}{dt} \quad (38)$$

После подстановки в уравнение (38) значения  $Y_1$  и  $Y_2$  согласно формуле (32) получим

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{V} \cdot \omega = \frac{V_{\ddot{m}}}{V} \cdot (a K_{\delta 1} + b K_{\delta 2}) + a K_{\delta 1} \varphi \quad (39)$$

Следовательно, движение колёсной машины с учётом эластичности шин описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$V_x = V_{\ddot{m}} \cos \alpha - V \sin \alpha$$

$$V_B = V \cos \alpha + V_{\ddot{m}} \sin \alpha$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega$$

$$\frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} + \left( \frac{K_{\delta 1} + K_{\delta 2}}{mV} \right) \cdot V_{\ddot{m}} = V \cdot \omega + \left( \frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{mV} \right) \cdot \omega - \frac{K_{\delta 2} \varphi}{m}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + \left( -\frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{V} \right) \cdot \omega = \frac{V_{\ddot{m}}}{V} + (aK_{\delta 2} - bK_{\delta 1}) + aK_{\delta 2} \varphi$$

Вынеся в уравнении (35)  $\omega$  за скобки и разделив все члены уравнения (39) на  $J$ , получим

$$\frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} - \left( V + \frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{mV} \right) \cdot \omega + \frac{K_{\delta 1} - K_{\delta 2}}{mV} \cdot V_{\ddot{m}} + \frac{K_{\delta 1} \varphi}{m} = 0$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{a^2 K_{\delta 2} + b^2 K_{\delta 1}}{JV} \cdot \omega - \frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{JV} \cdot V_{\ddot{m}} - \frac{aK_{\delta 1} \varphi}{J} = 0$$

Введём следующие обозначения для постоянных коэффициентов:

$$\frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{JV} = A, \quad V + \frac{a^2 K_{\delta 1} - b^2 K_{\delta 2}}{mV} = C$$

$$\frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{JV} = B, \quad \frac{K_{\delta 1} + K_{\delta 2}}{mV} = D$$

$$\frac{aK_{\delta 1}}{J} = \mu, \quad \frac{K_{\delta 1}}{m} = n$$

После замены в этих уравнениях буквенных выражений на соответствующие коэффициенты получим

$$\frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} - C\omega + DV_{\ddot{m}} + n\varphi = 0 \quad (40)$$

$$\frac{d\omega}{dt} + A\omega - BV_{\ddot{m}} - \mu\varphi = 0 \quad (41)$$

Из уравнения (41) находим

$$V_{\ddot{m}} = \frac{1}{B} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{A}{B} \omega - \frac{\mu}{B} \varphi \quad (42)$$

Продифференцируем уравнение (41) по  $t$ :

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + A\frac{d\omega}{dt} - B\frac{dV_{\bar{n}}}{dt} - \mu\frac{d\varphi}{dt} = 0 \quad (43)$$

Подставляя в уравнение (43) значение  $\frac{dV_{\bar{n}}}{dt}$  из уравнения (40) и значение  $V_{\text{сп}}$  из уравнения (42), будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{d^2\omega}{dt^2} + A\frac{d\omega}{dt} - B \left[ C \cdot \omega - n \cdot \varphi - D \left( \frac{1}{B} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{A}{B} \omega - \frac{\mu}{B} \varphi \right) \right] - \mu \frac{d\varphi}{dt} - \frac{d^2\omega}{dt^2} + A\frac{d\omega}{dt} - \\ - BC\omega + Bn\varphi + D\frac{d\omega}{dt} + AD\omega - \mu D\varphi - \mu \frac{d\varphi}{dt} \end{aligned} \quad (44)$$

После группировки членов это уравнение запишем в виде

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + (A + D)\frac{d\omega}{dt} + (AD - BC) \cdot \omega = (\mu D - nB)\varphi + \mu \frac{d\varphi}{dt} \quad (45)$$

Таким образом, система двух уравнений (40) и (41) приведена к одному дифференциальному уравнению второго порядка. Так как

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad \frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{d^3\alpha}{dt^3} \quad (46)$$

то, введя обозначения:

$$A + B = b_1; \quad \mu D - nB = a_1; \quad AD - BC = b_2; \quad \mu = a_2 \quad (47)$$

запишем уравнение (44) в операторной форме

$$p^2 a + b_1 p^2 \alpha + b_2 p \alpha = a_1 \varphi + a_2 p \varphi \quad (48)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$

Отсюда

$$\alpha p \cdot (p^2 + b_1 p + b_2) \cdot \alpha = \varphi \cdot (a_2 p + a_1) \quad (49)$$

После этого находим передаточную функцию

$$W_n(p) = \frac{\alpha}{\varphi} = \frac{a_2 \cdot p + a_1}{p \cdot (p^2 + b_1 p + b_2)} = \frac{a_1 \left( \frac{a_2}{a_1} \cdot p + 1 \right)}{p b_2 \cdot \left( \frac{1}{b_2} \cdot p^2 + \frac{b_1}{b_2} \cdot p + 1 \right)} = \frac{K_\beta \cdot (T_3 p + 1)}{p \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1)} \quad (50)$$

где  $\frac{a_1}{b_2} = K_0$ ;  $\frac{a_2}{a_1} = T_3$ ;  $\frac{a_1}{b_2} = T_2^2$ ;  $\frac{b_1}{b_2} = T_1$

Возвращаясь к прежним обозначениям  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , а затем к  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $\mu$  и  $n$ , находим последовательно значение коэффициента усиления  $K$  и постоянных времени  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ .

Для  $T_3$  имеем

$$T_3 = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\mu}{\mu D - nB} \quad (51)$$

где

$$\begin{aligned} \mu D - nB &= \frac{a \cdot K_{\delta 1}}{J} \cdot \frac{K_{\delta 1} + K_{\delta 2}}{mV} - \frac{K_{\delta 2}}{m} \cdot \frac{a \cdot K_{\delta 1} - b \cdot K_{\delta 2}}{J \cdot V} = \\ &= \frac{a \cdot K_{\delta 1}^2 + a \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} - a \cdot K_{\delta 1}^2 + b \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}}{m \cdot V \cdot J} = \frac{K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot (a + b)}{m \cdot V \cdot J} \end{aligned}$$

Поэтому

$$T_3 = \frac{a_2 \cdot K_{\delta 1} \cdot m \cdot V \cdot J}{J \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot (a + b)} = \frac{a \cdot m \cdot V}{K_{\delta 2} \cdot (a + b)} \quad (52)$$

Аналогично

$$T_2^2 = \frac{1}{b_2} = \frac{1}{AD - BC};$$

$$AD - BC = \frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{JV} \cdot \frac{K_{\delta 1} + K_{\delta 2}}{mV} - \frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{JV} \cdot \frac{mV^2 + aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{mV} =$$

$$= \frac{K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} (a + b)^2 - mV^2 \cdot (aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2})}{JmV^2}$$

$$T_2^2 = \frac{JmV^2}{K_{\delta 1} K_{\delta 2} (a + b)^2 - mV(aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2})} \quad (53)$$

Наконец, определим  $T_1$

$$T_1 = \frac{b_1}{b_2} = \frac{A + D}{AD - BC};$$

$$A + D = \frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{JV} + \frac{K_{\delta 1} + K_{\delta 2}}{mV} = \frac{m(a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}) + J(K_{\delta 1} + K_{\delta 2})}{JmV}$$

$$T_1 = \frac{\left[ m(a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}) + J(K_{\delta 1} + K_{\delta 2}) \right] \cdot JmV^2}{JmV \left[ K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} (a + b)^2 - mV^2 (aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}) \right]} = \frac{\left[ m(a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}) + J(K_{\delta 1} + K_{\delta 2}) \right] \cdot V}{K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} (a + b)^2 - mV^2 (aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2})} \quad (54)$$

Определим  $K_0$

$$K_0 = \frac{a_1}{b_2} = \frac{\mu D - nB}{AD - BC}$$

поэтому

$$K_0 = \frac{K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot (a + b) \cdot JmV^2}{JmV \left[ K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} (a + b)^2 - mV^2 (aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}) \right]} = \frac{K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot (a + b) \cdot V}{K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} (a + b)^2 - mV^2 (aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2})} \quad (55)$$

Приведённые уравнения полностью определяют передаточную функцию  $W_\alpha(p)$ , позволяют найти зависимость коэффициента  $K_0$  и постоянных времени  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  от постоянных коэффициентов дифференциального уравнения движения автомобиля.

Для нахождения передаточной функции  $W_x(p) = \frac{x}{\varphi}$ , выражающей отношение

линейного отклонения объекта от заданной траектории к углу поворота  $\varphi$  передних колёс, удобно пользоваться рис. 5, откуда

$$C_2 O_1 = x_1 - x = \Delta x_1; \quad \Delta x_1 = O_1 O_1' \sin \alpha = V \cdot \Delta t \cdot \sin \alpha; \quad \frac{\Delta x}{\Delta t} = V \cdot \sin \alpha \quad (56)$$

Переходя к пределу, имеем

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = V \cdot \sin \alpha \quad (57)$$



$$W_x(p) = \frac{x}{\varphi} = \frac{V(a_2 p + a_1)}{p^2(p^2 + b_1 p + b_2)} = \frac{a_1 V \left( \frac{a_2}{a_1} p + 1 \right)}{p^2 b_2 \left( \frac{1}{b_2} p^2 + \frac{b_1}{b_2} p + 1 \right)} = \frac{K(T_3 p + 1)}{p^2(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (65)$$

где  $T_1, T_2, T_3$  – те же, что и в уравнении (50), а

$$K = \frac{a_1 V}{\delta_2} = K_0 V \quad (66)$$

Из уравнения (66) находится коэффициент  $K$ .

$$K = \left[ \frac{K_{\delta 2} K_{\delta 1} (a + b) \cdot V}{K_{\delta 1} K_{\delta 2} (a + b)^2 - m V^2 (a K_{\delta 1} - b K_{\delta 2})} \right] \cdot V \quad (67)$$

Таким образом, окончательно имеем

$$W_\alpha(p) = \frac{K_0(T_3 p + 1)}{p(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (68)$$

$$W_x(p) = \frac{K(T_3 p + 1)}{p^2(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (69)$$

## 2.4 Лабораторная работа №4 (2 часа).

**Тема:** «Исследование динамики колёсной машины и выбор оптимального закона управления на электронной модели»

**2.4.1 Цель работы:** Сравнение экспериментально полученного значения модуля сдвига с теоретическим и проверка закона Гука при кручении.

**2.4.2 Задачи работы:**

1. Изучить конструкцию лабораторной установки.
2. Разобраться с методикой определения угла закручивания.
3. Выполнить эксперимент.
4. Произвести расчёты

**2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Металлический образец.

**2.4.4 Описание (ход) работы:**

**Моделирование объекта управления – колёсной машины.**

При моделировании колесной машины воспользуемся передаточными функциями колесной машины с учетом эластичности шин. Эти передаточные функции имеют следующий вид:

$$W_\alpha(p) = \frac{\alpha}{\varphi} = \frac{K_0(T_3 p + 1)}{p(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (1)$$

по линейному отклонению колёсной машины  $x$  от траектории движения

$$W_x(p) = \frac{x}{\varphi} = \frac{K(T_3 p + 1)}{p^2(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (2)$$

где

$$T_1 = \frac{[m(a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}) + J(K_{\delta 1} + K_{\delta 2})] \cdot V}{K_{\delta 1} K_{\delta 2} (a + b)^2 - m V^2 (a K_{\delta 1} - b K_{\delta 2})} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{J m V^2}{K_{\delta 1} K_{\delta 2} (a + b)^2 - m V^2 (a K_{\delta 1} - b K_{\delta 2})} \quad (4)$$

$$T_3 = \frac{amV}{K_{\delta 2}(a+b)} \quad (5)$$

$$K_0 = \frac{K_{\delta 1}K_{\delta 2}(a+b)V}{K_{\delta 1}K_{\delta 2}(a+b)^2 - mV^2(aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2})} \quad (6)$$

$$K = K_0V \quad (7)$$

Математические модели колесной машины в соответствии с передаточными функциями [см. формулы (1) и (2)] представлены на рис. 1. Постоянные времени самоходной машины  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и коэффициенты усиления  $K_0$ ,  $K$  интегрирующих звеньев существенно зависят от скорости движения  $V$ . Коэффициент усиления зависит не только от скорости движения, но и от управляющего сигнала  $x_y$ , поскольку

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{V}{R} \approx \frac{V}{L \operatorname{ctg} \alpha_1} \approx \frac{V}{L \operatorname{ctg} K_{\beta} x_y} \quad (8)$$

где  $R$  – радиус кривизны траектории управляемого поворота;

$L$  – продольная база машины;

$\alpha$  – угол отклонения направляющих колёс от заданной траектории;

$K_{\beta}$  – коэффициент передачи рулевого механизма, не зависящий от условий движения самоходной машины;

$V$  – скорость движения.

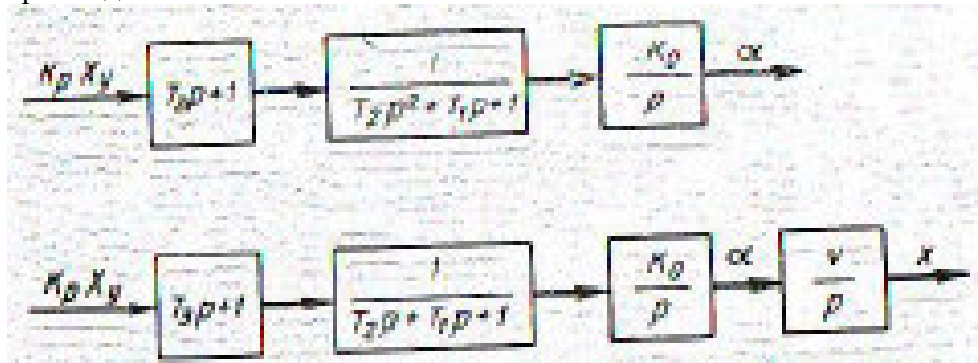


Рисунок 1. Математические модели колёсной машины

Таким образом, самоходная машина является нелинейным объектом управления, объектом управления с переменными параметрами. Нелинейности обуславливаются люфтом рулевой колонки, а также системой рычагов поворота передних колес. Учет в передаточной функции упругости шин, вызывающей боковой увод колес, приводит к сложной математической модели, но достаточно близкой к реальному объекту.

Для выбора рациональной системы автоматического вождения колёсной машины и исследования её на аналоговых моделирующих установках построим её модель, воспользовавшись полученными передаточными функциями. Как видно из выражений (1) и (2), колесная машина с учетом упругости шин описывается дробно – рациональными функциями, моделирование которых представляет значительные трудности. Применение дифференциаторов в схемах набора таких функций нецелесообразно из-за резкого усиления помех, присутствующих всегда в выходном сигнале решающего усилителя. Представление же правой части уравнения в виде заданной функции времени возможно в том случае, если заранее известны закон изменения входного сигнала.

Существует несколько способов воспроизведения таких передаточных функций на модели с применением только интегрирующих и суммирующих элементов. Эти способы сводятся к непосредственному интегрированию, разбиению передаточной функции на простейшие, разложению в систему уравнений первого порядка или комбинированию производных.

Воспользуемся методом комбинирования производных как наиболее простым с точки зрения подготовительной работы. Исходное уравнение для угла отклонения в операторной форме имеет вид

$$p^3\alpha + b_1p^2\alpha + b_2p\alpha = a_1\varphi + a_2p\varphi \quad (9)$$

где  $\frac{a_1}{b_2} - K_0$  - коэффициент усиления объекта;

$\frac{a_2}{a_1} - T_3$ ;  $\frac{1}{b_2} - T_2$ ;  $\frac{b_1}{b_2} - T_1$  - постоянные времени.

Запишем уравнение (9) в общем виде, добавив для удобства преобразований к правой части старшие производные:

$$p^3\alpha + A_2p^2\alpha + A_1p\alpha + A_0 = B_0\varphi + B_1p\varphi + B_2p^2\varphi + B_3p^3\varphi \quad (10)$$

где

$$A_2 = b_1; \quad B_0 = a_1$$

$$A_1 = b_2; \quad B_1 = a_2$$

$$B_2 = 0$$

$$A_0 = 0; \quad B_3 = 0$$

Уравнение (10) запишем в следующем виде:

$$\alpha = \frac{\varphi \cdot (B_0 + B_1p + B_2p^2 + B_3p^3)}{p^3 + A_2p^2 + A_1p + A_0} \quad (11)$$

Расчленим исходное уравнение (11) на два, вводя новую переменную:

$$\overset{\square}{\alpha} = \frac{\varphi}{p^3 + A_2p^2 + A_1p + A_0} \quad (12)$$

Тогда

$$\alpha = \overset{\square}{u}(B_0 + B_1p + B_2p^2 + B_3p^3) \quad (13)$$

или

$$\alpha = B_3p^3\overset{\square}{u} + B_2p^2\overset{\square}{u} + B_1p\overset{\square}{u} + B_0\overset{\square}{u} \quad (14)$$

Из выражения (12) имеем

$$p^3\overset{\square}{u} = \varphi - A_2p^2\overset{\square}{u} - A_1p\overset{\square}{u} - A_0\overset{\square}{u} \quad (15)$$

Подставим выражение (15) в уравнение (14)

$$\alpha = (-B_3A_2 + B_2)p^2\overset{\square}{u} + (-B_3A_1 + B_1)p\overset{\square}{u} + (-B_3A_0 + B_0)\overset{\square}{u} + B_3\varphi \quad (16)$$

или

$$\alpha = (-B_3A_2 + B_2)\frac{d^2\overset{\square}{\alpha}}{dt^2} + (-B_3A_1 + B_1)\frac{d\overset{\square}{\alpha}}{dt} + (-B_3A_0 + B_0)\overset{\square}{\alpha} + B_3\varphi \quad (17)$$

Для составления структурной схемы набора необходимо сначала набрать уравнение (15) методом понижения производной, а затем образовать искомую переменную в виде суммы производных от  $\overset{\square}{u}$  с соответствующими коэффициентами по уравнению (17). Значения производной  $\frac{d^2\overset{\square}{u}}{dt^2}$ ,  $\frac{d\overset{\square}{u}}{dt}$  получаются на выходах соответствующих интегралов при наборе уравнения (15). Схема набора приведена на рис. 2.



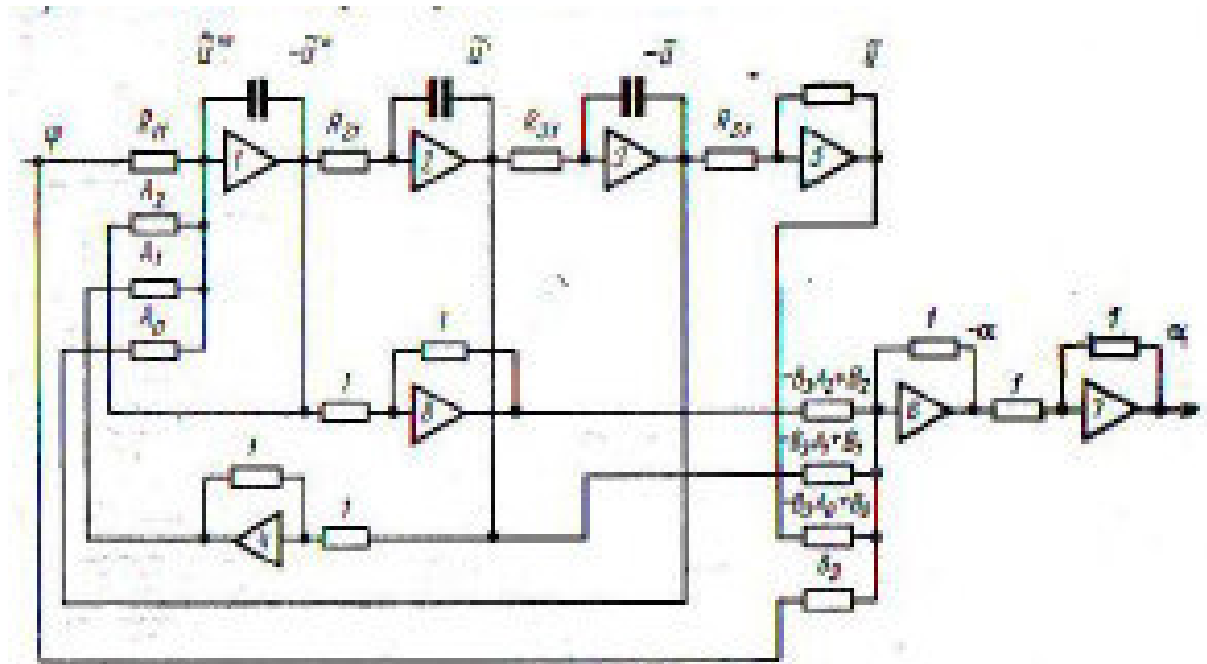


Рисунок 2. Схема набора уравнения (15) и (17) методом комбинирования производных

Для определения коэффициента передач отдельных решающих элементов составляем уравнения, связывающие входные и выходные величины каждого элемента, по структурной схеме набора модели (рис. 2) предварительно пронумеровав каждый элемент схемы:

$$U_1 = -\frac{1}{p}(k_{11}U_0 + k_{12}U_1 + k_{13}U_4 + k_{14}U_3)$$

$$U_2 = -\frac{1}{p}k_{21}U_1$$

$$U_3 = -\frac{1}{p}k_{31}U_2 \quad (18)$$

$$U_4 = -k_{41}U_2$$

$$U_5 = -k_{51}U_3$$

$$U_6 = -(k_{61}U_8 + k_{62}U_2 + k_{63}U_5 + k_{64}U_0)$$

$$U_7 = -k_{71}U_6$$

$$U_8 = -k_{81}U_1$$

где  $p = \frac{d}{dt_i}$

здесь  $t_m$  – независимая переменная аналоговой машины – время.

В полученной системе уравнений (18) напряжение  $U_7$  представляет искомую переменную, а напряжение  $U_5$  – промежуточную переменную. Решая эту систему относительно  $U_7$  и  $U_5$ , получим

$$p^3U_3 = k_{51}k_{31}k_{21}k_{11}U_0 - k_{12}p^2U_3 - k_{12}k_{21}pU_5 - k_{31}k_{21}k_{10}U_3 \quad (19)$$

$$U_7 = \frac{k_{81}k_{71}k_{61}}{k_{11}k_{31}k_{21}}p^2U_0 + \frac{k_{71}k_{02}}{k_{51}k_{31}}pU_0 + k_{71}k_{43}U_5 + k_{71}k_{64}U_0 \quad (20)$$

Все переменные реальной системы в модели представлены с помощью напряжений в различных точках схемы. Для того чтобы преобразовать реальные переменные в

машинные, необходимо ввести масштабы, исходя из того, что максимальная величина напряжений для ламповых АВМ не должны превышать 100 В:

$$u = M_{\alpha} U_5; \quad \alpha = M_{\alpha} U_7; \quad t = M_t t_i; \quad \varphi = M_{\varphi} U_0 \quad (21)$$

где  $M_{\alpha}$ ,  $M_{\alpha}$ ,  $M_t$ ,  $M_{\varphi}$  - масштабные коэффициенты соответствующих исходных переменных.

Подставляя соотношения (21) в уравнения (20) и (19), получим уравнения модели, записанные через коэффициенты передач, масштабные коэффициенты и исходные переменные:

$$p^3 u = k_{51} k_{31} k_{21} k_{11} \frac{M_{\alpha}}{M_{\varphi} M_t^3} \varphi - k_{12} \frac{1}{M_t} p^2 u - k_{13} k_{11} k_{21} \frac{1}{M_t^2} p u - k_{13} k_{21} k_{14} \frac{1}{M_t^3} u \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{k_{81} k_{71} k_{61}}{k_{51} k_{31} k_{21}} \cdot \frac{M_t^2 M_{\alpha}}{M_{\alpha}} p^2 u + \frac{k_{71} k_{41}}{k_{51} k_{31}} \cdot \frac{M_t M_{\alpha}}{M_{\alpha}} p u + k_{71} k_{61} \frac{M_{\alpha}}{M_{\alpha}} u + k_{71} k_{14} \frac{M_{\alpha}}{M_{\varphi}} \varphi \quad (23)$$

Так как уравнения (22) и (23) эквивалентны уравнениям (15) и (17), то коэффициенты при соответствующих переменных и их производных равны друг другу:

$$\left. \begin{aligned} k_{51} k_{31} k_{21} k_{11} \frac{M_{\alpha}}{M_{\varphi} M_t^3} &= 1 \\ k_{12} \frac{1}{M_t} - A_2 &= b_1 \\ k_{13} k_{41} k_{21} \frac{1}{M_t^2} &= A_1 - b_2 \\ k_{31} k_{21} k_{14} \frac{1}{M_t^3} &= A_0 = 0 \\ \frac{k_{81} k_{71} k_{61}}{k_{51} k_{31} k_{21}} \frac{M_t^2 M_{\alpha}}{M_{\alpha}} &= -B_3 A_2 + B_2 = 0 \\ \frac{k_{71} k_{62}}{k_{51} k_{31}} \frac{M_t M_{\alpha}}{M_{\alpha}} &= -B_3 A_1 + B_1 = a_2 \\ k_{71} k_{63} \frac{M_{\alpha}}{M_{\alpha}} &= -B_3 A_0 + B_0 = a_1 \\ k_{71} k_{44} \frac{M_{\alpha}}{M_{\varphi}} &= -B_3 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

В полученных соотношениях  $k_{14} = 0$ ,  $k_{61} = 0$ ,  $k_{31} = 0$ , поэтому в схеме набора модели (рис. 2) пропадает инвертор, первый и четвёртый входы сумматора 7 и четвёртый вход интегратора 1. Окончательная схема набора приведена на рис. 3, а. Оставшиеся коэффициенты передач образуют систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} k_{51}k_{31}k_{21}k_{11} \frac{M_u}{M_\phi M_t^3} &= 1 \\ k_{12} \frac{1}{M_t} &= b_1 \\ k_{13}k_{41}k_{21} \frac{1}{M_t^2} &= b_2 \\ \frac{k_{71}k_{62}}{k_{41}k_{31}} \frac{M_t M_\alpha}{M_u} &= a_2 \\ k_{71}k_{63} \frac{M_\alpha}{M_u} &= a_1 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

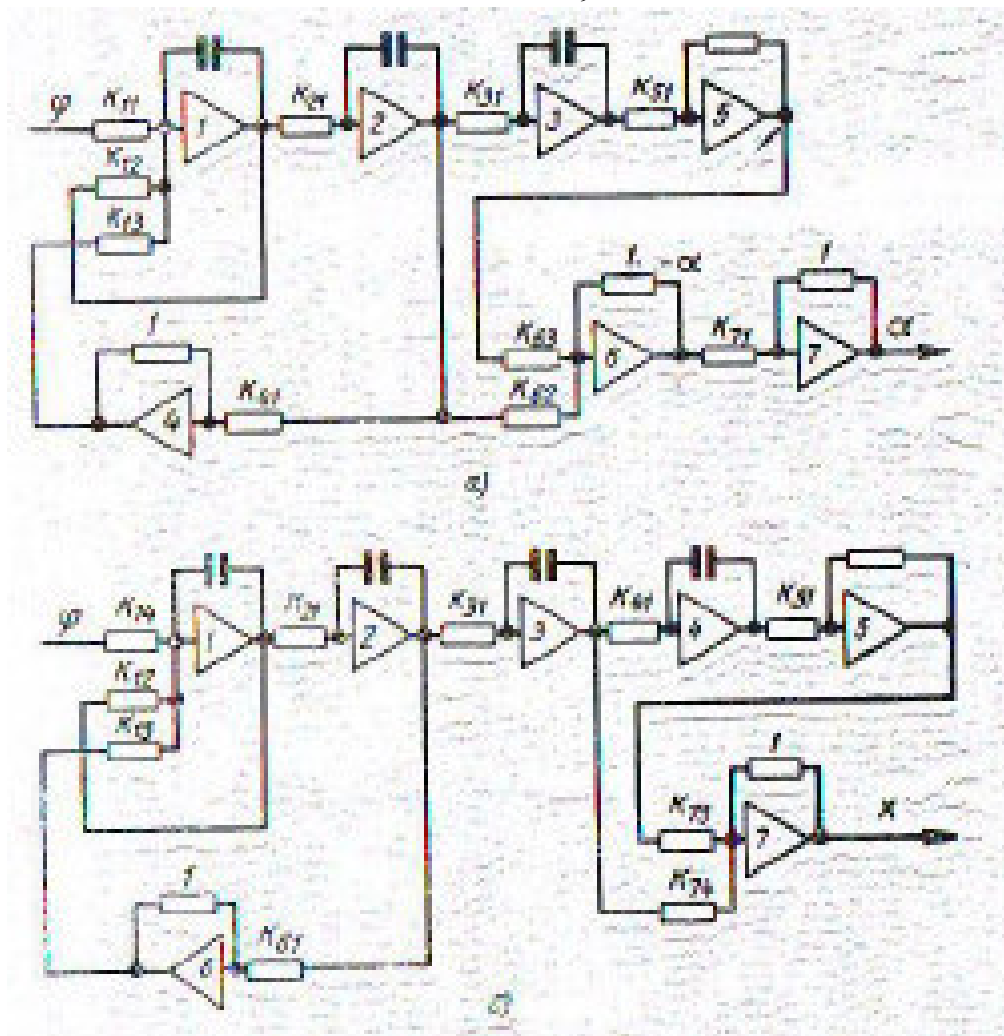


Рисунок 3. Схема набора на модели уравнений: а – (5,9); б – (5,35)

Аналогичная вспомогательная работа проделывается с уравнением для линейного отклонения колёсной машины от заданной траектории движения  $x$ :

$$p^4 x + b_1 p^3 x + b_2 p^2 x = a_1 V \phi + a_2 V p \phi \quad (26)$$

Этому уравнению соответствует структурная схема набора, приведённая на рис. 3, б. Коэффициенты передач вычисляются по выражениям, аналогичным уравнениям (25). В схеме (рис. 3, б)  $k_{51} = k_{61} = 1$ , а коэффициенты  $k_{11}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{31}$  и  $k_{41}$  приняты равными 0,1, тогда оставшиеся коэффициенты передач определяются из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} k_{74} &= 0,1 \frac{M_{\square}^u}{M_{\square} M_t} a_0 V \\ k_{75} &= \frac{M_{\square}^u}{M_x} a_1 V \\ k_{12} &= M_t b_1 \\ k_{13} &= 10 M_t^2 b_2 \\ M_u &= \frac{M_{\phi} M_t^4}{10^{-4}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Модель колёсной машины можно построить и по дифференциальным уравнениям, описывающим динамику объекта уравнения.

Исходные уравнения следующие:

$$\frac{dV_{\ddot{m}}}{dt} + \left( \frac{K_{\delta 1} + K_{\delta 2}}{mV} \right) V_{\ddot{m}} - V\omega + \frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{mV} \omega - \frac{K_{\delta 1}\varphi}{m} \quad (28)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{V} \omega = \frac{V_{\ddot{m}}}{V} (aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}) + aK_{\delta 1}\varphi \quad (29)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_x; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega; \quad \frac{V_{\ddot{m}}}{V} = \beta - \alpha \quad (30)$$

Машинные уравнения, составленные по выражениям (28) – (30), будут:

$$\frac{d\omega}{dt} = k_1(\beta - \alpha) - k_2\omega - k_3\varphi \quad (31)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = k_4\beta + k_5\alpha - k_6\omega - k_7\varphi \quad (32)$$

$$\frac{dx}{dt} = k_8\beta; \quad \frac{d\alpha}{dt} = k_2\omega \quad (33)$$

где

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{1}{J} (aK_{\delta 1} + bK_{\delta 2}) \\ k_2 &= \frac{a^2 K_{\delta 1} + b^2 K_{\delta 2}}{V} \\ k_2 &= aK_{\delta 1}, \quad k_4 = K_{\delta 1} + K_{\delta 2}, \quad k_4 = k_5 \\ k_0 &= \frac{1}{mV} \left( \frac{aK_{\delta 1} - bK_{\delta 2}}{V} \right) \\ k_7 &= K_{\delta 1}, \quad k_5 = \frac{1}{V}, \quad k_0 = 0,1 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Модель колёсной машины, составленная по уравнениям (31), (32), (33), показана на рис. 4.

### Система автоматического вождения колёсной машины

Определив в предыдущем разделе электронную модель колесной машины как объекта управления, составим модель системы автоматического вождения в целом.

При разработке систем автоматического управления автомобилями необходимо получить сигнал ошибки, который определяет положение самоходной машины относительно заданной траектории, осуществить синтез систем, которые обеспечили бы заданные качества управления.

Рассмотрим системы автоматического управления автомобилем типа А, В, С и Д (рис. 5, а, б, в, г).

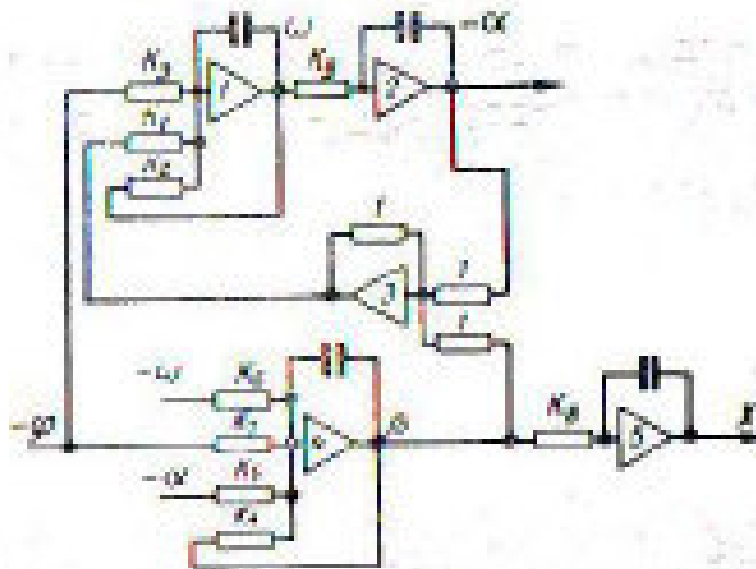


Рисунок 4. Модель колёсной машины, полученная по уравнениям (31), (32), (33)

Во всех этих системах сигнал на вход автоматического регулятора поступает при изменении величины отклонения транспортного средства от заданной траектории ( $x$ ), угла  $\alpha$  между продольной осью автомобиля и заданной траекторией, угла  $\varphi$  между передними колесами автомобиля и заданной траекторией и угла  $\gamma$  между продольной осью автомобиля и линией видимости к некоторой точке на дороге, расположенной на расстоянии  $l$  от автомобиля.

В системе А измеряется только сигнал  $x$ . В системе В, кроме сигнала  $x$ , измеряется сигнал  $\alpha$ . В системе С измеряют сигналы  $x$ ,  $\alpha$  и  $\varphi$ . В системе Д используются сигналы  $x$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$ .

Система Д более совершенна, так как она как бы определяет будущее положение объекта управления и по алгоритму своей работы напоминает управление автомобилем водителем. Идеальная система управления должна повторять действия водителя. Водитель не только устраняет ошибку отклонения автомобиля от заданной траектории, но также устраняет боковую составляющую ускорения, действующую на автомобиль, ориентируясь положением автомобиля относительно точки, расположенной на дороге от него на некотором расстоянии  $l$ .

Рассмотрим методы получения сигналов  $x$ ,  $\alpha$  и  $\varphi$  для перечисленных систем управления.

Если кабель проложен под поверхностью полигона и питается током низкой частоты, а две катушки, равноотстоящие от продольной оси автомобиля и соединенные встречно, расположены в плоскости, параллельной кабелю и центральной линии дороги, то разностное напряжение на выходе катушек  $\theta$  будет равно нулю в том случае, когда катушки находятся над центром линии кабеля, и будет увеличиваться при отклонении их от осевой линии кабеля.

Это разностное напряжение может быть использовано как сигнал ошибки для систем типа А, В, С.

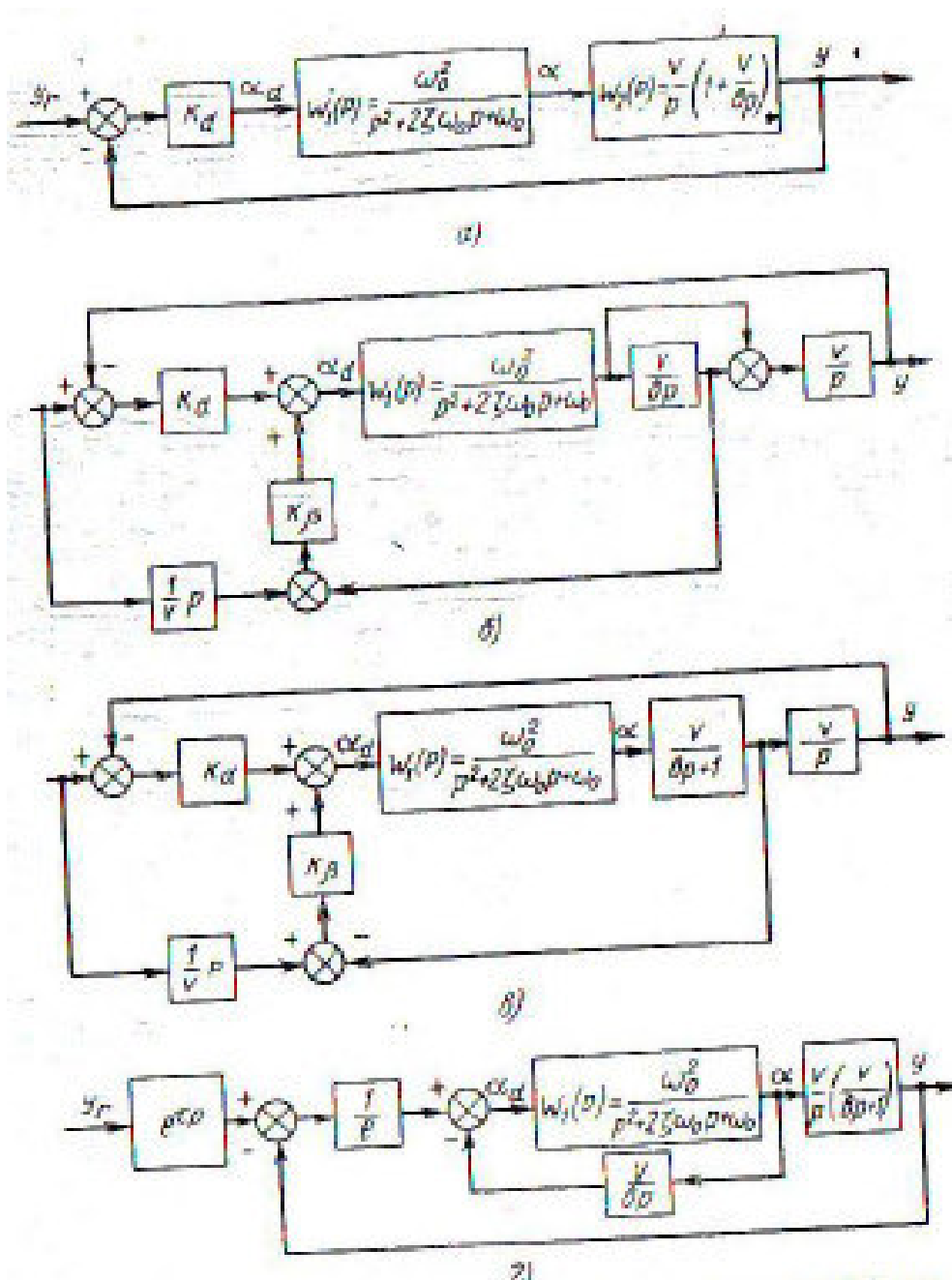


Рисунок 5. Системы автоматического управления автомобилем

Теперь если третью катушку расположить так, чтобы плоскость ее была перпендикулярна оси кабеля, то напряжение в этой катушке  $U_1 = 0$ . При отклонении катушки от перпендикулярного положения напряжение на её выходе будет изменяться линейно при малых углах отклонения. Таким образом, если эта катушка будет установлена на продольной осевой линии рамы автомобиля, то будет получен сигнал  $\alpha$ , предусмотренный для системы В. Если катушка будет вращаться синхронно с передними колесами

автомобиля, то мы получим сигнал  $\phi$ , предусмотренный для системы типа С.

Система типа Д не рассматривается в настоящей работе в виду её сложности. Однако эта система наиболее подобна управлению автомобилем водителем.

Передаточная функция сервомеханизма, управляющего положением передних колёс:

$$W_1(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\zeta\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (35)$$

где  $\omega_0$  – собственная частота сервомеханизма;

$\zeta$  – коэффициент демпфирования;

$p$  – оператор Лапласа.

Передаточная функция между поперечным отклонением и углом поворота управляемых колёс

$$W_2(p) = \frac{y}{\alpha} = \frac{V}{\rho} \left( 1 + \frac{V}{b\rho} \right) \quad (36)$$

где  $V$  – скорость движения;

$\alpha$  – боковая ошибка автомобиля по отношению к опорной траектории.

Исследование на устойчивость перечисленных систем показало, что из всех рассмотренных систем наиболее приемлемой для автоматического управления автомобилем является система типа С.

В качестве чувствительного элемента, определяющего положение колесной машины относительно заданной траектории, использовалось экспоненциальное измерительное устройство, в качестве исполнительного механизма электродвигатель постоянного тока с редуктором, обладающим меньшей инерционностью по сравнению с электрогидравлическим исполнительным механизмом и позволяющим осуществить привод на рулевое колесо машины.

Передаточная функция исполнительного механизма имеет вид:

$$W(p) = \frac{K}{p(Tp + 1)} \quad (37)$$

где  $K$  – коэффициент усиления исполнительного механизма ( $K = 19,3$ );

$T$  – постоянная времени ( $T = 0,12$  с).

Так как исполнительный механизм воздействует на рулевой механизм колесной машины через шестеренчатую передачу, то в системе автоматического вождения появляется нелинейность типа «люфт» (рис. 6).

Блок-схема САВ колесной машины изображена на рис. 7.

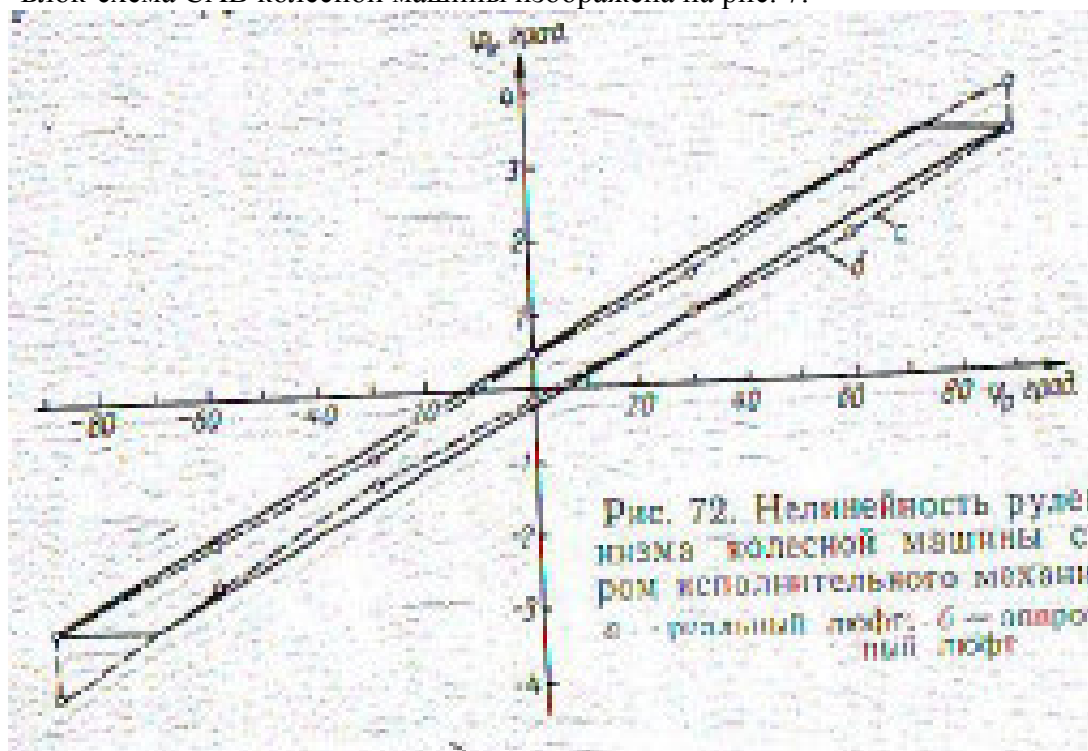


Рисунок 6. Нелинейность рулевого механизма колесной машины с редуктором исполнительного механизма САВ: а – реальный люфт; б – аппроксимированный люфт

Здесь с выхода объекта снимается сигнал  $x$  как расстояние между опорной точкой  $O_1$  и некоторой неподвижной осью отсчета  $y$ . Опорная траектория, параллельная оси отсчета, в общем случае отстоит от неё на расстоянии  $x_0$ . Разностный сигнал  $x_R = x_{\text{азм}}$ , т.е. управляющий сигнал, поступает на вход регулятора. Система работает так, чтобы управляющий сигнал, поступающий на вход объекта и вызывающий его поворот, был направлен на устранение  $x_0$ .

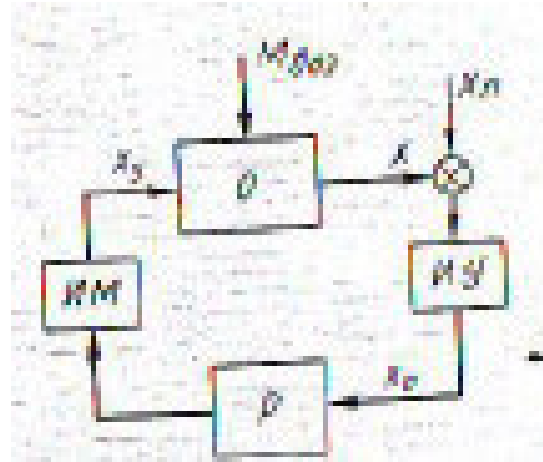


Рисунок 7. Блок-схема САВ колёсной машины: а – объект (колёсная машина); ИУ – измерительное устройство положений объекта относительно заданной траектории; ИМ – исполнительный механизм

Поскольку моделирование объекта подробно было рассмотрено выше, при исследовании модели САВ рассмотрим несколько подробнее другие элементы, входящие в САВ.

Измерительное устройство положения описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} U_1 &= k_2 x + k_2' \alpha \\ U_2 &= k_3 x + k_3' \alpha \\ \theta &= U_3 = U_1 - U_2 \end{aligned} \quad (38)$$

где  $k_2 = k_{\alpha i \dot{\alpha}}$ ,  $k_3 = k_{\alpha i \ddot{\alpha}}$

Инерционная корректирующая цепочка описывается передаточной функцией

$$W(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K'}{T_3' p + 1} \quad (39)$$

или в дифференциальной форме

$$\frac{dU_2}{dt} + \frac{1}{T^0} U_2 = K^* U_1 \quad (40)$$

где  $K^0$  и  $T^*$  – переменные параметры корректирующей цепочки, подбираемые в процессе исследования режимов САВ на модели.

После масштабирования уравнение (40) имеет вид

$$\frac{dU_{2i}}{dt_i} + \frac{M_i}{T^0} U_{2k} = \frac{K^* M_i M_{k1}}{M_{u2}} U_{1i} \quad (41)$$

В качестве регуляторов используются релейный и широтноимпульсный регулятор. Релейный элемент описывается уравнением вида

$$U_1 = F(U_3) = \frac{K_\beta}{2} [\text{sign}(U_3' - U_i) + \text{sign}(U_3' + U_i)] \quad (42)$$

где  $K_\beta$  – коэффициент усиления регулятора;

$U_m$  – зона нечувствительности релейного элемента,  $U_m = 5$  В.

Такая величина зоны нечувствительности соответствует отклонению  $\Delta x = 5$  см. Это отклонение создается вибрациями объекта, неровностями дороги и т.д. Для того чтобы



система не реагировала на все эти помехи, выбираем величину зоны нечувствительности, равную 5 В. Масштабные коэффициенты принимаем  $M_{a1} = 1$ ,  $M_{u3} = 0,01$ .

Широтно-импульсный регулятор описывается уравнением

$$U_2 = \begin{cases} k_4 \text{sign} U'_3(nT) & nT < t < nT + T\gamma[U'_3(nT)] \\ 0 & nT + T\gamma[U'_3(nT)] < t < (n+1)T \end{cases} \quad (43)$$

Зависимость  $\gamma$  от  $U_3(nT)$  в общем виде нелинейна. Аналитически эта зависимость может быть выражена следующим образом:

$$\gamma[U'_3(nT)] = \begin{cases} \hat{O}[U'_3(nT)] & \text{if } [U'_3(nT)] < x \\ 1 & \text{if } [U'_3(nT)] \geq x \end{cases} \quad (44)$$

где  $x$  - положительная величина;

$\Phi[U'_3(nT)]$  – некоторая в общем виде нелинейная функция  $U_3(nT)$ .

Рассмотрим частный случай этой зависимости

$$\gamma[U'_3(nT)] = \begin{cases} x[U'_3(nT)] & \text{if } [U'_3(nT)] < \frac{1}{x} \\ 1 & \text{if } [U'_3(nT)] \geq \frac{1}{x} \end{cases} \quad (45)$$

Таким образом, при  $U_3(nT) < 1/x$  длительность импульса пропорциональна входной величине, а при больших значениях  $U_3(nT)$  она постоянна и равна периоду повторения  $T$ .

Сигнал, поступающий на вход регулятора с выхода измерительного устройства, имеет величину, недостаточную для срабатывания регулятора (сигнал имеет величину порядка мВ). Поэтому применён дополнительный усилитель постоянного тока УПТ, усиливающий входной сигнал в 30 – 40 раз. Уравнение УПТ имеет вид

$$U_3 = k_1 U'_3 \quad (46)$$

или

$$U_{3i} = \frac{k_1 M V'_3}{M V_2} U'_{3i} \quad (47)$$

Регулятор воздействует на исполнительный механизм, который описывается передаточной функцией (см. формулу (37)), соответствующей дифференциальному уравнению:

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} + \frac{1}{0,12} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{19,3}{0,12} U_1 \quad (48)$$

где  $\Psi$  – угол поворота ИМ.

Вводя масштабные коэффициенты, получим

$$\frac{d^2 \psi_i}{dt_i^2} + \frac{M_t}{0,12} \cdot \frac{d\psi_i}{dt_i} = \frac{19,3}{0,12} \cdot \frac{M_t^2 M_{u1}}{M_\psi} U_{1i}$$

Реальная система всегда не линейна из-за наличия люфта. Графическое изображение нелинейной характеристики типа «люфт» определено экспериментально, приведено на рис. 6.

Схема набора на машине характеристики типа «люфт» приведена на рис. 8. Она построена по принципу следящей системы. Здесь входная величина  $e_{вх}$  сравнивается с выходной на первом решающем усилителе. В канал усиления включен последовательно диодный ограничитель, пропускающий сигнал в том случае, когда входная величина превышает выходную на величину  $\pm e$ . На интегрирующем усилителе 3 с большим коэффициентом усиления сохраняется выходное напряжение  $e_{вых}$  при размыкании цепи диодным ограничителем. Крутизна характеристики типа «люфт» устанавливается входными сопротивлениями  $R_{11}$   $R_{12}$  по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_{12}}{R_{11}} \quad (49)$$

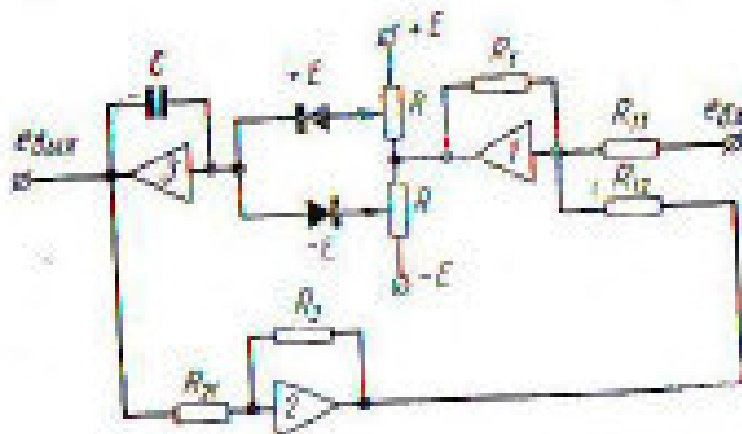


Рисунок 8. Схема набора на модели характеристики типа люфт

Эта характеристика по отрезкам с учетом масштабных коэффициентов набиралась на модели. В этом случае уравнение люфта в общем виде

$$\varphi = F(\psi) \quad (50)$$

$$\varphi_i = \frac{M_\psi}{M_\phi} F(\psi_i)$$

Таким образом, выше были приведены все исходные уравнения, необходимые для исследования системы автоматического управления.

## 2.5 Лабораторная работа №5 (2 часа).

Тема: «САК почвообрабатывающих машин»

**2.5.1 Цель работы:** Экспериментальная проверка величины прогибов и углов поворота в балке на двух опорах, определенных теоретическим подсчетом.

**2.5.2 Задачи работы:**

1. Изчитать принцип экспериментального определения прогибов в балке.
2. Выполнить эксперимент.
3. Выполнить расчёты.

**2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Набор грузов.
2. Индикатор часового типа.

**2.5.4 Описание (ход) работы:**

### Автоматический контроль при вспашке

Интенсивно ведутся разработки систем активного (в процессе выполнения технологических операций), в том числе автоматического, контроля с выходом на человека-оператора. Одна из таких систем – сигнализатор нарушения глубины вспашки СЗГ-1.

Контроль равномерности глубины обработки почвы и, как следствие, оптимизация в определенном смысле этого параметра приводят к улучшению качества обработки почвы, выравниванию поверхности поля и в итоге – к повышению урожайности. Между стабильностью глубины  $z$  обработки почвы и урожайностью существует зависимость. Вид этой зависимости разные исследователи определяют по-разному (рис. 1), но даже при

линейной аппроксимации средняя урожайность  $U_{cp}$  и потери урожая  $\Delta U_n$  связаны со средним квадратическим отклонением  $\sigma_z$  глубины:

$$U_{cp} = U_0 \cdot (1 - b_1 \sigma_z)$$

$$\Delta U_n = b_2 \sigma_z$$

где  $U_0$  - урожайность при оптимальной для данной культуры глубине вспашки;

$b_1, b_2$  - коэффициент влияния; численное значение этого влияния составляет 3,5 – 5 % потерь урожая на каждый 1 см  $\sigma_z$ .

Поскольку абсолютной компенсации колебаний глубины добиться нельзя, то считают, что САК глубины, например, вспашки может повысить урожайность до 2 %.

Эксплуатационно пригодных измерительных преобразователей (ИП) глубины хода рабочих органов плуга до последнего времени не было. НПО «Агроприбор» совместно с ВИМом, НАТИ и ВИСХОМом при разработке технических требований на САК и САР глубины хода рабочих органов пахотных агрегатов с тракторами тяговых классов 1,4; 2; 3; 4; 5; 6; 8 уделили внимание системе контроля глубины с человеком-оператором в качестве контролера и в качестве регулирующего элемента системы. В такой системе (рис. 2) ИП имеет элемент ЗЭ, позволяющий устанавливать заданную глубину  $z_{эд}$  контроля и регулирования плуга. Сравнивая её с фактической глубиной вспашки  $z_{вых}$ , ИП перерабатывает рассогласование  $\Delta z$  в электрический сигнал по закону:

$$K_{\dot{E}T}(\dot{A}) = \frac{4\dot{A}}{\pi A} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{\dot{A}}\right)^2}$$

где  $K_{ин}(A)$  – передаточная функция (или комплексный коэффициент усиления, или амплитуда характеристика) гармонически линеаризованного нелинейного ИП типа реле с зоной нечувствительности;

$A$  - максимальная амплитуда входного сигнала ИП;

$B$  - амплитуда сигнала на выходе ИП;

$\Delta$  - половина зоны нечувствительности ИП.

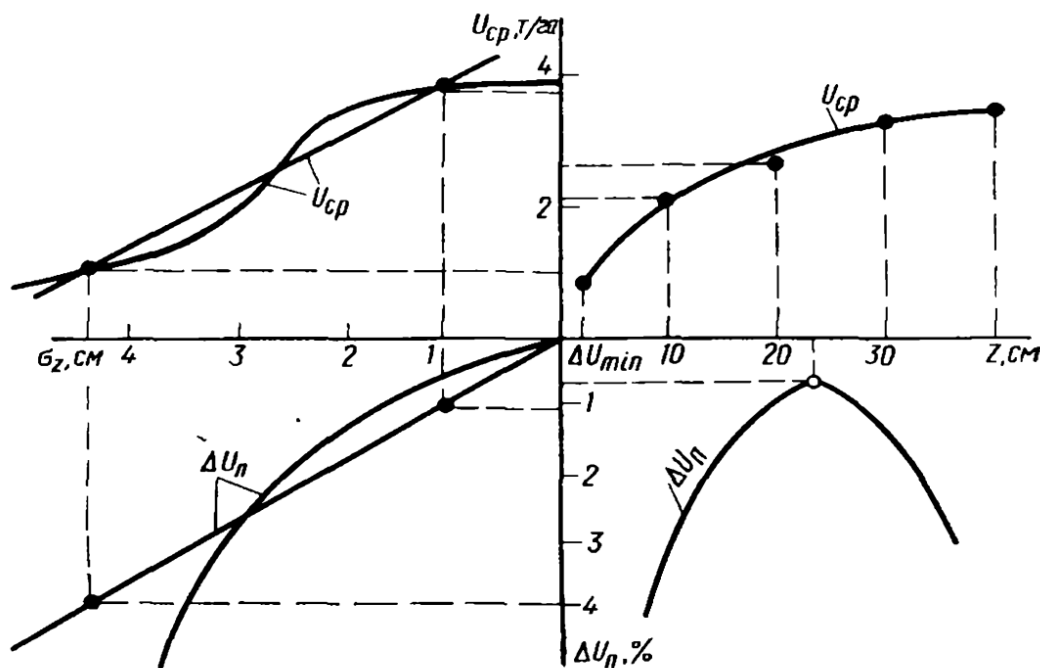


Рисунок 1. Зависимость средней урожайности  $U_{cp}$ , потерь урожая  $\Delta U_n$  от глубины  $z$  обработки почвы и отклонения  $Qz$ .

Блок сигнализации состоит из двух основных звеньев:

УПУ с передаточной функцией

$$W_{oi o}(s) = K_i W_o(s)$$

где  $s$  - оператор преобразования Лапласа;

$K_1$  - коэффициент усиления УПУ;

$W_\Phi$  - передаточная функция RC-фильтра.

и  $C$  с передаточной функцией

$$K_c(A_1) = \frac{4B_1}{\pi A_1}$$

где  $K_c(A_1)$  - передаточная функция сигнализатора с характеристикой типа идеального реле;

$B_1$  - значение сигнала на выходе реле;

$A_1$  - максимальная амплитуда входного сигнала.

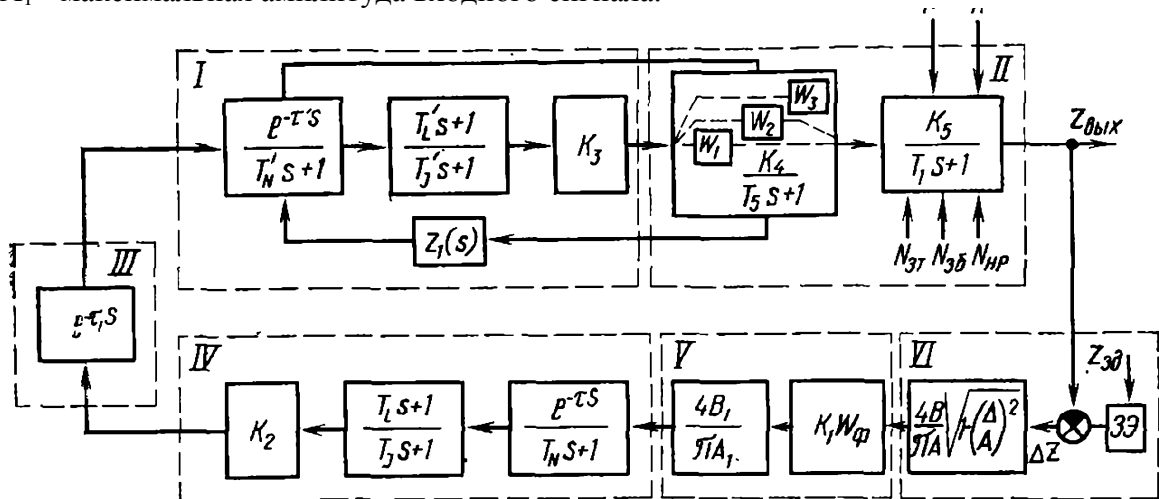


Рисунок 2. Структурная схема системы «тракторист-устройство контроля глубины - агрегат»: I – тракторист – оператор; II - объект регулирования – плуг; III - трактор; IV - тракторист - оператор - контролер; V - блок сигнализации; VI - ПП.

Тракторист – оператор – контролер в линейном приближении описывается тремя передаточными функциями:

восприятия информации

$$W_A(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_N s + 1}$$

где  $\tau$  - время чистого запаздывания (приблизительно 0,15 с);

$T_N$  – постоянная времени, зависящая от вида входной величины (0,01 - 1,0 с).

переработки информации

$$W_I(s) = \frac{\dot{O}_L s + 1}{T_J s + 1}$$

где  $T_L$  – постоянная времени упреждения (0 - 5,0 с);

$T_J$  – постоянная времени инерции (0,1 - 0,5 с).

исполнения принятого решения

$$W_E(s) = \hat{E}_2$$

где  $K_2$  - коэффициент усиления.

Трактор в цепи регулирования можно представить звеном запаздывания:

$$W_{об}(s) = e^{-\tau_1 s}$$

где  $\tau_1$  – время на остановку трактора для регулирования плуга.

Тракторист – оператор – регулятор характеризуется тем же комплексом передаточных функций, что и контролер, однако значения постоянных времени и коэффициента усиления могут быть другими, отражающими приспособляемость человека к виду деятельности:

$$W_{\dot{\alpha}_D}(s) = \dot{a}^{-\tau s} \cdot \frac{\dot{O}_L s + 1}{(T_N' s + 1) \cdot (T_J' s + 1)}$$

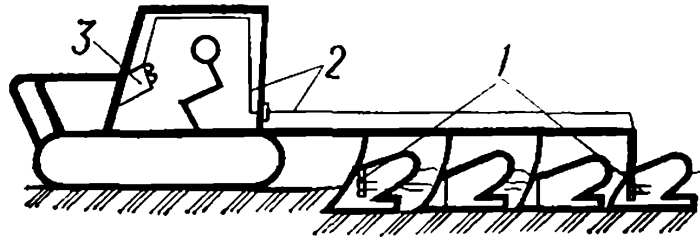


Рисунок 3. Сигнализатор нарушения заданной глубины вспашки.

ОР - плуг, на который действуют возмущения, требующие остановки и регулирования (силы, возникающие в результате затупления лемехов –  $N_{3T}$ , забивания и залипания рабочих органов –  $N_{36}$ , нарушения регулировок плуга или навески трактора –  $N_{нр}$ , а также высота неровностей  $H$  рельефа поля, удельное сопротивление  $K$  почвы и другие параметры), описывается двумя передаточными функциями:

исполнительного механизма

$$W_{\dot{E}I}(s) = \frac{\hat{E}_4}{T_4 s + 1}$$

самого плуга

$$W_{IE}(s) = \frac{\hat{E}_5}{T_1 s + 1}$$

где  $K_4$  и  $T_4$  – коэффициент усиления и постоянная времени того исполнительного механизма, на который вынужден воздействовать тракторист;

$K_5$  и  $T_1$  – коэффициент усиления и постоянная времени плуга.

Как видно из схемы (см. рис. 2), основные новые элементы в СЗГ-1 – ПП1 (рис. 3), линия связи 2 и блок сигнализации (БС) 3.

ПП представляет собой (рис. 4) два пружинных щупа 2, укрепленных на кронштейнах 1 с платами 4 и установленных на панели 5. В каждую плату вмонтированы постоянный магнит и магнитоуправляемый геркон КЭМ-2А. На каждом щупе закреплена шторка 6, перемещающаяся в пазу платы между герконом КЭМ-2А и магнит. Для контроля глубины хода рабочих органов плуга ПП установлены на переднем и заднем корпусах плуга в соответствии с заданной глубиной вспашки и пределами ее контроля.

При нормальной глубине обработки верхние щупы ПП находятся над поверхностью поля в свободном состоянии (герконы разомкнуты), а нижние щупы отклонены из-за воздействия на них стенки борозды (герконы также разомкнуты). Расстояние между верхним и нижним щупами, характеризующее зону нечувствительности ПП, определяется допустимыми текущими отклонениями глубины вспашки. Середина расстояния между щупами характеризуется математическое ожидание глубины вспашки, устанавливаемой по шкале 3.

При отклонении текущего значения глубины вспашки за допустимые пределы нормальное положение щупов нарушается. С увеличением глубины вспашки верхние щупы (переднего и заднего корпусов) в результате взаимодействия со стенкой борозды отклоняются (так как они опускаются ниже поверхности поля), из-за чего их герконы замыкаются. С уменьшением глубины вспашки нижние щупы освобождаются от воздействия стенки борозды (они поднимаются выше поверхности поля) своими шторками замыкают герконы.

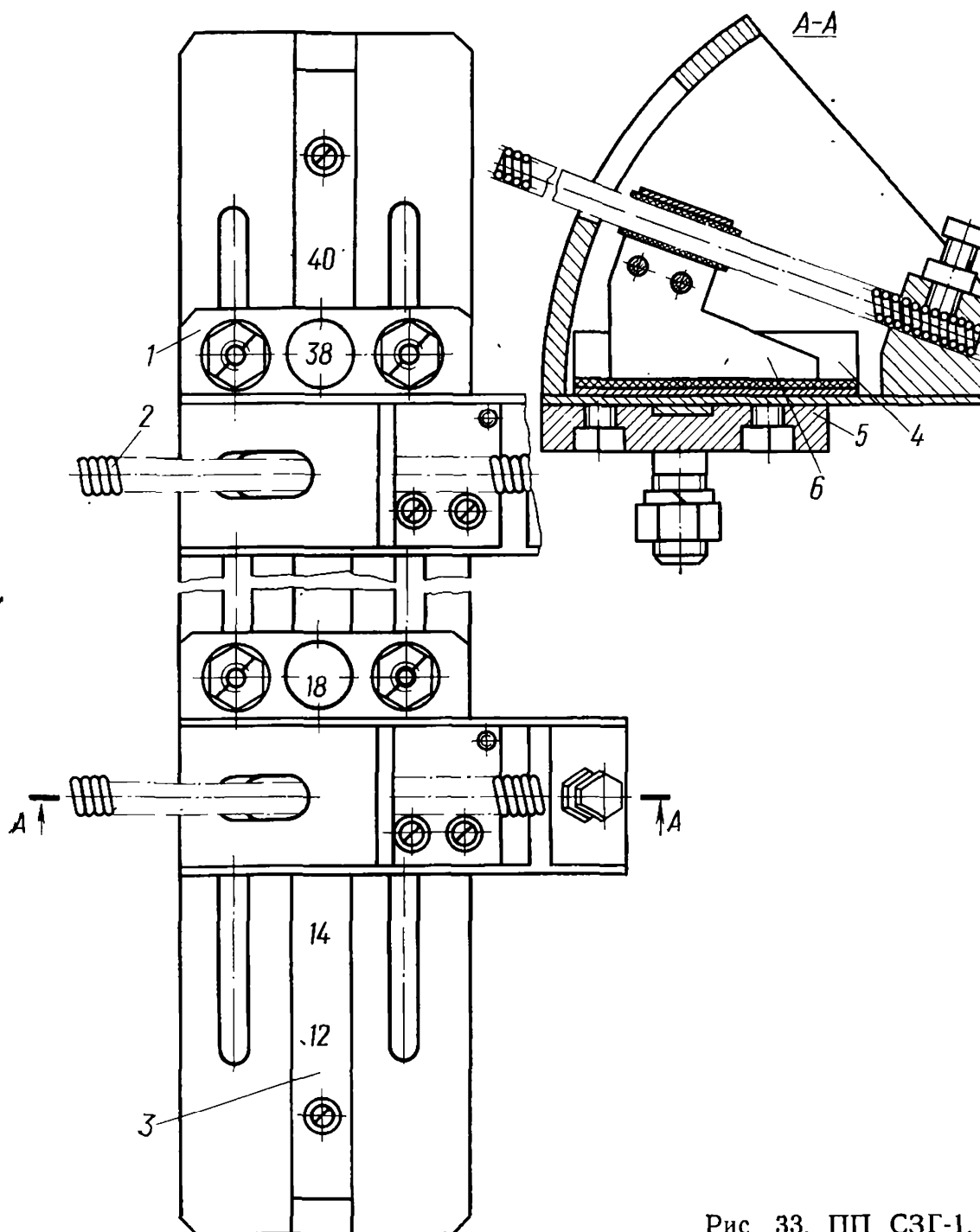


Рис. 33. ПП СЗГ-1.

Рисунок 4. ПП СЗГ-1

При перекосе плуга, неодинаковой установке корпусов по глубине возможно неидентичное и даже противоположное поведение ПП переднего и заднего корпусов, что позволяет ускорить припашку плуга и регулирование навесной системы трактора.

Сигналы от ПП по линии связи поступают в БС, представляющий собой пылезащитный корпус, в котором расположены резисторы R1, ..., R22, конденсаторы C1, ..., C4, полупроводниковые элементы VD1, ..., VD4, VD17, VD18, VT5, ..., VT16 электрической схемы (рис. 5). На лицевой панели блока сигнализации расположены две пары сигнальных ламп HL1, ..., HL4, тумблер включения S3 и два переключателя SA1, SA2 установки времени задержки. На левой стенке расположены разъемы X1, X2 для подсоединения жгута и кабеля питания от аккумуляторной батареи. БС устанавливают в кабине трактора. Поступившие в БС электрические импульсы от ПП подаются на две пары сигнальных ламп «переднего» и «заднего» (надписи на лицевой панели) корпусов

плуга. Первая пара ламп с обозначениями «мелко» и «глубоко» несет информацию трактористу - оператору о работе переднего корпуса, вторая – о положении заднего корпуса плуга.

Кратковременные (1,5 - 3 с по времени или 2 - 5 м по пути) отклонения от заданной глубины вспашки не вызывают световой сигнализации благодаря зоне нечувствительности датчика и электрическому фильтру УПУ, которые не пропускают информацию о таких выбросах, обеспечивая медленное нарастание силы тока сигнальных ламп.

Учитывая упомянутую зависимость урожайности от изменений глубины вспашки, параметры зоны нечувствительности и фильтра выбирали из условия

$$\sigma_{\text{зв}} = f(\Delta z_0, \tau_{\text{пор}}) \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{зв}} -$  среднее квадратическое отклонение глубины вспашки на выход системы «человек-оператор-агрегат-устройство контроля»;

$\Delta z_0$  – зона нечувствительности датчика по глубине;

$\tau_{\text{пор}}$  – минимальная (пороговая) длительность выброса контролируемого параметра, на которую должен реагировать оператор.

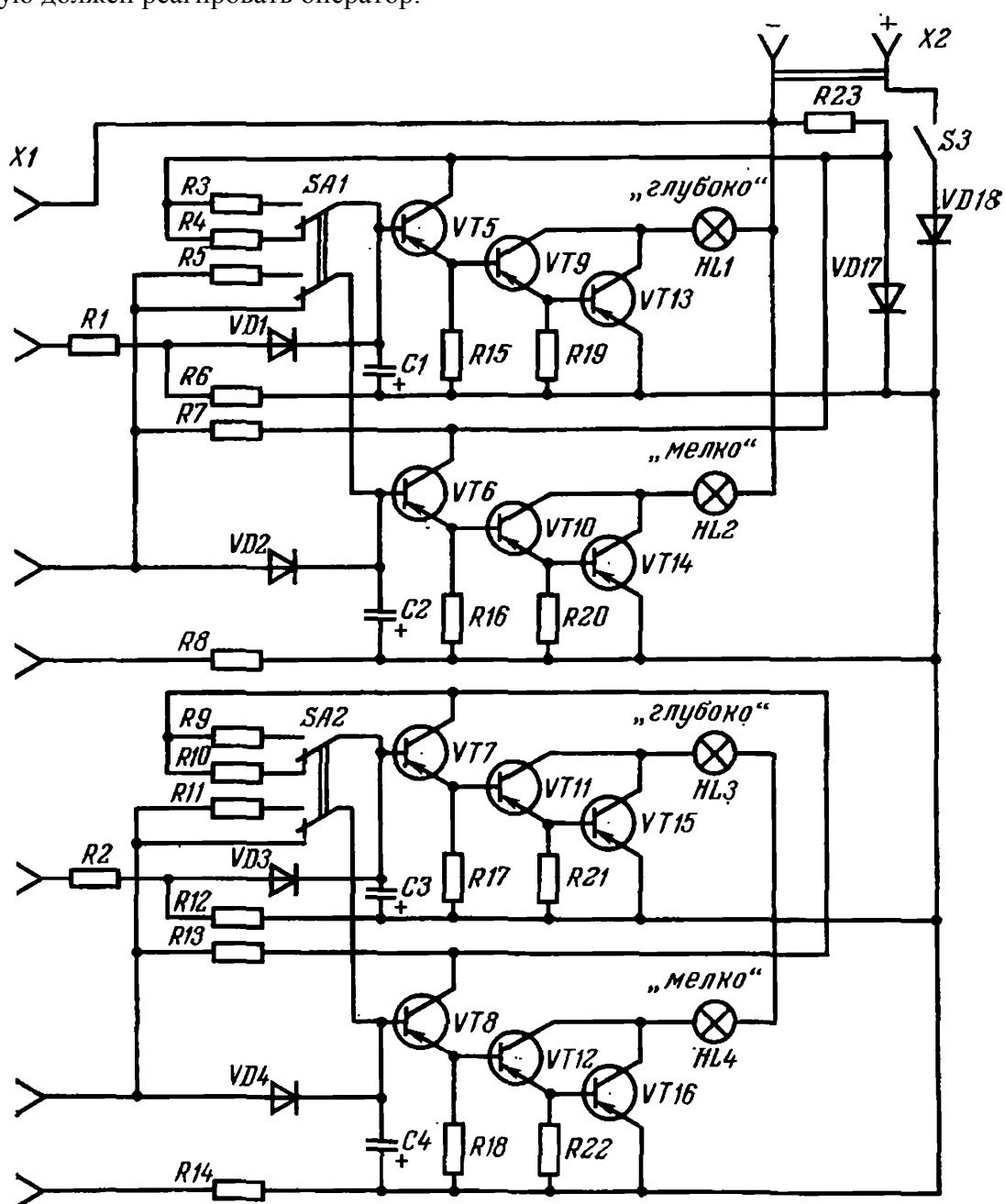


Рисунок 5. Электрическая схема БС

Анализ статических оценок процессов на входе системы контроля и её выходе [вероятность  $P$  пребывания процесса вне интервала  $\Delta z_0$ , т.е.  $P(\Delta z_0)$ ; среднее время  $T$  пребывания процесса вне этого интервала за контролируемый период работы агрегата, т.е.  $T(\Delta z_0)$ ; плотность  $n$  выбросов (выходов за интервал), т.е.  $n(\Delta z_0)$ , и средняя продолжительность одного выброса] позволяет представить формулу (1) в виде

$$\sigma_{z\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}} = \frac{2\hat{O}\Delta z_0}{n_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}}\tau_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}} - 1}$$

где  $\Phi$  – интеграл вероятностей;

$n_{\text{вых}} = n_{\text{вх}} \cdot (1 - P(\tau_{\text{пор}}))$ , или при пуассоновском распределении выбросов  $n_{\text{вых}} = n_{\text{вх}} \cdot (1 - e^{-\beta \tau_{\text{пор}}})$  – плотность выбросов на выходе системы;

$\beta$  – параметр эмпирической кривой плотности распределения выбросов ( $\beta = 0,7$ ).

$$\tau_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}} = \int_0^{\tau_{i\ddot{o}}} \tau \left( f(\tau) + \frac{1}{\tau_{i\ddot{o}}} \int_{\tau_{i\ddot{o}}}^{\infty} f(\tau) d\tau \right) d\tau$$

$f(\tau)$  – плотность распределения вероятности выбросов по длительности.

Среднее время, на которое снижается длительность выбросов системой контроля с участием человека-оператора,

$$\Delta \bar{\tau} = \bar{\tau}_{\ddot{a}\ddot{o}} - \bar{\tau}_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}} = k \cdot \left( \frac{\tau_{i\ddot{o}}}{2} + \frac{1}{\beta} \right) \cdot \bar{a}^{-\beta \tau_{i\ddot{o}}}$$

где  $k$  – параметр эмпирической кривой плотности распределения выбросов по длительности ( $k = 0,5$ ).

В результате расчетов при  $\tau_{\text{пор}} = 1 - 5$  с и  $\Delta z_0 = 1 - 6$  см получены зависимости  $\Delta \tau$  и  $n_{\text{вых}}/n_{\text{вх}}$  от  $\tau_{\text{пор}}$  и  $\sigma_{z \text{ вых}}/\sigma_{z \text{ вх}}$  от  $\Delta z_0$  (рис. 6, а, б, в). Как видно из рисунка, относительная плотность выбросов  $n_{\text{вых}}/n_{\text{вх}}$  на выходе и входе системы (рис. 6, а) возрастает с увеличением  $\tau_{\text{пор}}$ , т.е. чем больше минимальная длительность выброса, на которую реагирует человек-оператор, тем меньше выбросов фильтрует система. При этом время

$\Delta \bar{\tau}$  уменьшается с увеличением  $\tau_{\text{пор}}$ , что говорит о желательности сокращения величины  $\tau_{\text{пор}}$ .

Относительное среднее квадратичное отклонение колебаний глубины обработки почвы  $\sigma_{z \text{ вых}}/\sigma_{z \text{ вх}}$  возрастает с увеличением  $\Delta z_0$  (рис. 6, б) и повышением  $\tau_{\text{пор}}$  (рис. 6, в). Необходимость снижения  $\sigma_{z \text{ вых}}$  указывает на целесообразность выбора значений  $\Delta z_0$  и  $\tau_{\text{пор}}$  при создании и регулировании устройств контроля глубины вспашки. Однако тут имеется определенное

ограничение, связанное с участием в работе системы человека – оператора. Действительно, при выборе малых значений  $\Delta z_0$  (меньше 2 см) к человека-оператору будут поступать сигналы о колебаниях глубины в течение значительного времени (до 72 % общего времени работы агрегата) с частотой  $n(\Delta z_0) > 0,4$  Гц, превышающей возможности восприятия и обработки их оператором. Таким образом, поступление высококачественных выбросов на индикаторы будет отвлекать оператора от выполнения других функций, а сами сигналы им не будут использоваться. Эти выбросы следует, очевидно, оставить для компенсации САР.



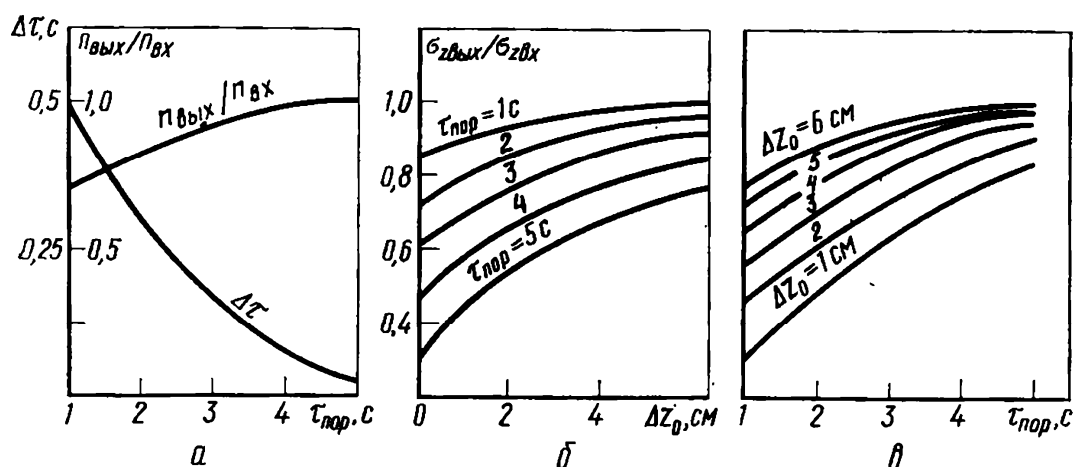


Рисунок 6. Связь между статическими характеристиками вспашки и параметрами устройства автоматического контроля

При  $\Delta z_0 > 5$  см информационная нагрузка на оператора уменьшается, но при этом из-за увеличения  $\sigma_{z \text{ вых}}$  значительно снижается эффективность системы контроля, поэтому оптимальные значения  $\Delta z_0$  для системы контроля лежат в пределах 2,5 - 5 см.

При  $\tau_{\text{пор}} < 1$  с наблюдаются нежелательно копирование микронеровностей поля и увеличение информационной нагрузки на оператора. С другой стороны, при  $\tau_{\text{пор}} > 4$  с существенно уменьшается информация о процессе и возрастает  $\sigma_{z \text{ вых}}$ . Так, при  $\tau_{\text{пор}} = 1$  (рис. 6, б, в) значение  $\sigma_{z \text{ вых}}$  изменится от  $0,37 \sigma_{z \text{ вх}}$  (при  $\Delta z_0 = 1$  см) до  $0,75 \sigma_{z \text{ вх}}$  (при  $\Delta z_0 = 6$  см). При  $\tau_{\text{пор}} = 5$  с  $\sigma_{z \text{ вых}}$  изменяется от  $0,82 \sigma_{z \text{ вх}}$  до  $0,97 \sigma_{z \text{ вх}}$  при  $\Delta z_0$ , соответственно равных 1 - 6 см. Отсюда следует, что оптимальное значение  $\tau_{\text{пор}}$  должно находиться в пределах  $1 \text{ с} < \tau_{\text{пор}} < 4 \text{ с}$ .

Прибор с такими параметрами позволит механизатору оперативно производить припашку плуга, контролировать существенные отклонения глубины обработки и быстро устранять причины, вызывающие их. Компенсацию колебаний глубины обработки почвы при  $\Delta z_0 < 2,5$  см целесообразно возложить на САР. Причем ПП устройства СЗГ-1 может использоваться (с более жесткими регулировками) в качестве ЧЭ такой САР.

Производственные испытания сигнализатора СЗГ-1 на пахотных агрегатах с трактором К-700 и плугом ПН-8-35, а также К-801 и ПТК-9-35 подтвердили правильность выбора параметров ИП и фильтра: качество вспашки повысилось ( $\sigma_{z \text{ вых}}$  снизилось в 0,72 - 0,82 раза), условия для работы человека-оператора стали оптимальными.

#### Технические данные СЗГ-1

Задаваемый предел глубины обработки, z, мм .....	120 - 400
Минимальная зона нечувствительности, $\Delta z_0$ , мм .....	25
Постоянная времени запаздывания фильтра, $\tau_{\text{пор}}$ (две установки в зависимости от рельефа поля и типа агрегата), с .....	1,5 и 3
Габаритные размеры, мм: блока сигнализации .....	220 × 110 × 60
ИП .....	370 × 280 × 90
Масса, кг: блока сигнализации .....	1,5
ИП .....	2,0
Интервал рабочих температур, °C .....	5 - 55
Напряжение питания, В .....	12±2

Глубину обработки почвы необходимо контролировать не только при вспашке, но и при поверхностной сплошной, в том числе плоскорезной, и междурядной обработке почвы культиваторами-растениепитателями, пропашными фрезерными культиваторами, при движении сошников сеялок. Для контроля работы фрезерного культиватора

разработана САК (рис. 7), в качестве ПП в которой использован контактный копирующий щуп-полз 2. Поводок щупа установлен соосно с ведомым валом центральной секции 1 фрезы и снабжен ламельным преобразователем 3, подающим сигналы по линии связи 4 через интеграторы 5, 6 и 9, а также сумматор и дифференциальный усилитель 8 в схему пульта измерения и индикации. Длительность сигналов пропорциональна времени сохранения глубины рыхления в поле допуска  $\pm 2$  см. Соответствующий выбор схемы и параметров пульта позволяет фиксировать текущую вероятность  $P_{z \text{ доп}}$  сохранения допуска и расстройку  $\Delta P_z$ , характеризующую знак и отклонение центра распределения колебаний от установочной глубины  $Z_{\text{эд}}$  рыхления. Пульт измерения и индикации выполнения на транзисторах и размещается в кабине трактора.

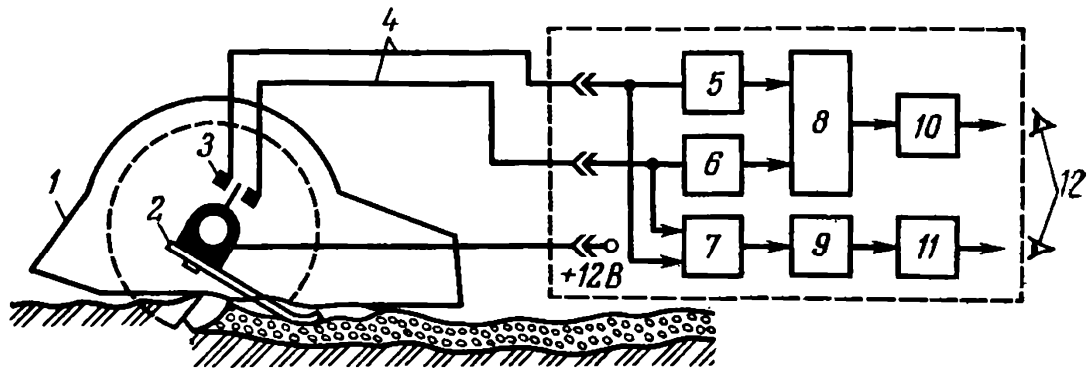


Рисунок 7. Схема САК фрезерного культиватора

В процессе работы тракторист-оператор 12 контролирует качество выполнения технологического процесса по индикатору  $P_z$  11, определяя характер регулировки рабочих органов по индикатору  $\Delta P_z$  10. Зоны низкого качества работы ( $P_z < 70\%$  и  $\Delta P_z > 20\%$ ) на шкалах индикаторов отмечены красным сектором.

Рассмотренной разработке в ЛСХИ предшествовали тщательные экспериментально-теоретические исследования. В частности, была создана динамическая модель пропашного фрезерного агрегата, причем связь между статистическими оценками колебаний входных  $x_i(t)$  и выходных  $u_i(t)$  процессов устанавливалась с помощью АЧХ:

$$S_y(\omega) = \sum_{i=1}^n A_{ij}^2(\omega) S_x(\omega)$$

где  $n$  - число входных возмущений.

Для определения степени идентичности динамических характеристик фрезы использовали аппарат когерентного анализа. При этом дисперсионный критерий степени

идентичности модели реальному объекту  $\bar{\xi} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2}$ , определяющий отношение дисперсии

прогноза выходного показателя  $y(t)$  к его фактической дисперсии, имел вид

$$\bar{\xi} = \int_0^\infty K_y(\omega) \sigma_y(\omega) d\omega$$

где  $K_y(\omega)$  – функция множественной когерентности между выходным процессом  $y(t)$  и совокупностью входных возмущений  $x_i(t)$ .

Для двумерных моделей пропашной фрезы

$$\hat{E}_y(\omega) = \frac{K_{\frac{y}{x_1}}(\omega) + K_{\frac{y}{x_2}}(\omega) - 2 \sqrt{K_{\frac{y}{x_1}}(\omega) \cdot K_{\frac{y}{x_2}}(\omega) \cdot K_{x_1 x_2}(\omega)}}{1 - K_{x_1 x_2}(\omega)}$$

Учитывая погрешность методов сбора и обработки первичной информации и другие допущения, принята область значений критерия идентичности  $0,7 \leq \bar{\xi} \leq 0,9$ , которая позволяет представить сложный динамический агрегат в виде достаточно простой модели, выделив наиболее существенные факторы, определяющие характер его функционирования.

Целесообразность контроля глубины хода дисковых сошников была обоснована на примере сеялки СЗ-3,6. Для установления вероятностной связи между глубиной хода сошника  $Z_{сш}$  и глубиной заделки семян зерна  $Z_{см}$  (обычно  $Z_{см} < Z_{сш}$ ) проведен регрессионный анализ данных, соответствующих различной настройке сеялки, по соотношениям:

$$M_{\tilde{N}\tilde{O}} - \tilde{I}_{\tilde{N}\tilde{O}} = S_{\tilde{N}\tilde{O} \cdot \tilde{N}\tilde{I}} \sigma_{\tilde{N}\tilde{O}} \cdot \frac{\dot{I}_{\tilde{N}\tilde{I}} - \tilde{I}_{\tilde{N}\tilde{I}}}{\sigma_{\tilde{N}\tilde{I}}}$$

$$M_{\tilde{N}\tilde{I}} - \tilde{I}_{\tilde{N}\tilde{I}} = S_{\tilde{N}\tilde{I} \cdot \tilde{N}\tilde{O}} \sigma_{\tilde{N}\tilde{I}} \cdot \frac{\dot{I}_{\tilde{N}\tilde{O}} - \tilde{I}_{\tilde{N}\tilde{O}}}{\sigma_{\tilde{N}\tilde{O}}}$$

где  $M_{сш}$ ,  $M_{см}$  – среднее значение в реализациях для десятого сошника;

$\tilde{I}_{\tilde{N}\tilde{O}}$ ,  $\tilde{I}_{\tilde{N}\tilde{I}}$  – средние значения по ансамблю реализации;

$\sigma_{см}$ ,  $\sigma_{сш}$  – разброс средних в реализациях;

$S_{сш, см}$  – коэффициент взаимной корреляции средних значений.

С учетом высокого значения  $S_{сш, см}$ , который оказался разным 0,8, сделан вывод о целесообразности контроля и регулирования глубины заделки семян по средней глубине хода дисковых сошников. Система с таким параметром контроля и регулирования разработана ЛСХИ. В нее входят (рис. 8) копирующий каток с поводком 1, укрепленным позади дискового сошника 2, на котором размещен также электрический преобразователь глубины сошника в сигнал  $U(t)$ . Блок 3 контроля и управления (БКУ), который снабжен тремя счетчиками, регистрирующими площади, засеянные с нормальной глубиной заделки семян ( $P_z$ ), с превышением заданной глубины ( $P+$ ) и мельче требуемой глубины ( $P-$ ). В этот же блок подается информация с путевого отметчика (ПО) 4 о скорости агрегата. В БКУ сигнал  $U(t)$  электрического преобразователя сравнивается с базовым напряжением  $U_0$ , соответствующим заданной глубине хода сошника. Рассогласование в виде напряжения  $\Delta U(t)$  сглаживается внутри БКУ фильтром высоких частот. Сглаженный сигнал  $U^*(t)$  поступает в этот же БКУ на трехуровневый дискриминатор, выделяющий сигналы заданного допуска ( $O$ ), выше допуска ( $U+$ ) и ниже допуска ( $U-$ ). Эти сигналы с одной стороны поступают на счетчики ( $P_z$ ,  $P+$ ,  $P-$ ) и на сигнальную лампу  $H$ , куда они пропускаются через соответствующие схемы совпадения, а с другой – сформированный сигнал  $\Delta U$  подается на релейный усилитель 5, который током  $I(t)$  источника 6 постоянного напряжения коммутирует обмотку двигателя 8, установленного на кронштейне 7. Двигатель воздействует на винт 9 и элементы 10, 11 регулятора заглубления сошника 2.

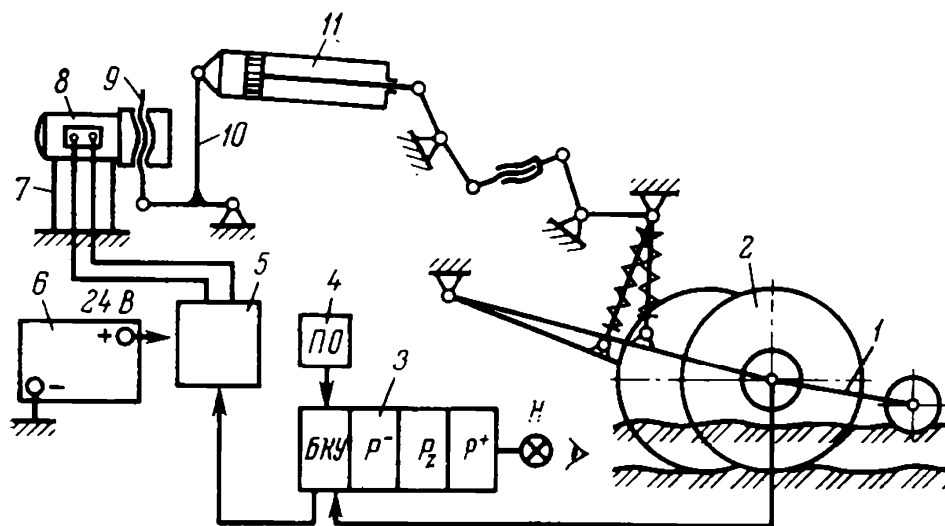


Рисунок 8. САК и регулирования глубины хода сошников

Работоспособность САК глубины заделки семян проверяли на сеялке СЗ-3,6 при посеве ржи (почва средний суглинок, влажность 20 – 22 %) на скоростях 1,87; 2,38; 3,38 м/с при настройке глубины  $Z_{сш}$ , равную 35 и 50 см, т.е. САК значительно улучшила укладку семян на заданную глубину.

## 2.6 Лабораторная работа №6 (2 часа).

Тема: «САК посевных машин»

**2.6.1 Цель работы:** Проверка правильности теоретического определения величины и направления прогиба балки при косом изгибе.

**2.6.2 Задачи работы:**

1. Ознакомиться с порядком проведения эксперимента.
2. Выполнить эксперимент.
3. Выполнить расчёты.
4. Сравнить результаты теоретических и практических расчётов.

**2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Груза.
2. Индикаторы часового типа.
3. Линейка.
4. Транспортёр.

**2.6.4 Описание (ход) работы:**

### Автоматический контроль при посеве

Одна из причин необходимости автоматического контроля сеялок — их большое и всевозрастающее число однотипных элементов. Даже в сеялках для пунктирного высева число таких элементов (рядность) 8, ..., 16, а в некоторых, например в сеялках фирмы Noudet Gougis (Франция), — 24. Еще более высок этот показатель при использовании сеялок в сцепке. При числе сошников в каждой сеялке 24, ..., 27 число однотипных элементов в агрегате может достигать 100 и более. Возрастает и степень комплексности сеялок. Появляются агрегаты, выполняющие одновременно две, три и более операций.

Обеспечить надежную работу сеялки конструктивным путем или с помощью мер, предпринимаемых в процессе эксплуатации, сложно и экономически невыгодно. Велико число факторов, влияющих на работу сеялки: производственные дефекты, нарушение правил ремонта и эксплуатации, неправильные регулировка и режим работы, низкое

качество посевного материала, удобрений, гербицидов, попадание в бункер посторонних предметов, физико-механическое состояние почвы и т. д.

Еще недавно технологический процесс сеяльщик контролировал визуально. Такой метод небезопасен и малоэффективен. При большой скорости движения и запыленности невозможно определить момент нарушения технологического процесса.

Автоматический контроль обеспечивает полную, объективную и своевременную информацию о нарушении производственного процесса, в результате чего количество незасеянных площадей сводится к минимуму. При использовании САК на сеялках типов SPC, СЗ-3,6, СЗС-2,1 количество пропусков сокращается соответственно в среднем на 4 - 5 и на 10 - 12 %. Разработка САК и внедрение их связано с решением нескольких проблем. Одна из них — что контролировать?

Чтобы получить информацию о работе сеялки, нужно знать: как распределяются семена по оси рядка (при посеве пропашных культур отклонение  $\Delta a$  расстояния  $a$  между семенами, т. е. шаг, составляет для 80 % семян  $\Delta a \leq 0,2a$ , а для 20 % —  $\Delta a \leq 0,4a$ ); при этом количество семян, приходящееся на единицу площади, не должно превышать рекомендуемого более чем на 3 % при высеве 40 - 70 тыс. семян на 1 га и не более чем на 5 % при высеве свыше 70 тыс. семян на 1 га; норму высева; глубину заделки семян в борозду (она зависит от вида культур: например, при высеве кукурузы допускается отклонение  $\pm 20$  %); дозу и равномерность внесения в почву удобрений, гербицидов и т. п.; уровень семян, удобрений, гербицидов в бункерах сеялки.

Прямой контроль большинства перечисленных параметров невозможен. САК не в состоянии, например, контролировать расстояние между семенами (или его отклонение) в процессе высева, поэтому приходится контроль одного параметра (в данном случае расстояния) заменить контролем другого, тесно коррелированного с первым (например, фиксировать период прохождения семян через высевающий аппарат или сошник). Контроль одного технологического процесса может быть заменен контролем другого. Так, в сеялках типа ССТ, в которых получить информацию о высеваемых семенах невозможно, вместо контроля высева используют косвенный метод — контролируют вращение высевающего диска и т. п.

Прежде чем разрабатывать системы контроля за работой сеялок, необходимо собрать статистический материал об отказах сеялок тех типов, в которых предусматривается ее применение. Материал нужно собирать в реальных условиях, а не в экспериментальных. Для этого должна быть разработана методика и соответствующая аппаратура, решено, по каким параметрам контролировать работу сеялки.

#### Вероятность возникновения неисправностей в зерновых сеялках

Сошник .....	0,602
Семяпровод .....	0,224
Маркер .....	0,062
Прицепное устройство .....	0,031
Механизм привода .....	0,024
Рама .....	0,022
Высевающий аппарат .....	0,014
Подкатывающееся колесо .....	0,008
Механизм поднятия сошника .....	0,007
Бункер .....	0,005
Опорное приводное колесо .....	0,001

Статистическая информация, полученная по сеялкам конкретных типов, может быть в определенной степени отнесена к сеялкам и других типов, имеющим подобную конструкцию.

Если при анализе неисправностей, например, сеялки SPC-6 обнаруживается, что ни одна из них не может служить основанием для прекращения высева, то контроль за

отдельными параметрами (например, вращением высевашего диска) не имеет смысла, так как не дает полного представления о процессе посева. В этом случае прямой контроль, несмотря на техническую сложность и высокую стоимость его, более выгоден, чем косвенный по нескольким параметрам. В сеялках для зерновых культур доминирующая неисправность — засорение сошника, поэтому косвенный контроль неоправдан и первичная информация должна получаться с участков технологического процесса, наиболее близких к поверхности почвы.

Как определяют глубину заделки семян? Для этого применяют прямой выборочный визуальный контроль. Так как проводить его непрерывно в процессе посева невозможно, то используют методы, основанные на контроле параметров, с помощью которых можно косвенно определить глубину заделки семян. Один из таких параметров — заглубление сошника в почву.

Технологический процесс следует контролировать не только по основным, но и по вспомогательным параметрам, таким как уровень зерна, удобрений или других материалов в бункере сеялки.

В зерновых сеялках уровень материала в бункере должен занимать не менее 10 % его объема. Преждевременное заполнение бункера ведет к снижению производительности. С введением автоматического контроля уровня на сеялке СЗ-3,6 и снижении числа заправок на 10 % производительность её возрастает примерно на 3 % при ручном и на 0,5 % при автоматическом заполнении.

Аналоговый контроль уровня сложен и экономически не оправдан. В связи с этим применяют дискретный двоичный контроль: «уровень выше» и «уровень ниже» допустимого. В сеялках, оборудованных общим бункером, используют один датчик уровня. Если каждый высеваший аппарат имеет бункер, то датчики устанавливают обычно в двух из них. Описанный способ контроля имеет существенный недостаток при использовании его для универсальных сеялок. Поскольку норма посева различных культур неодинакова, различен и минимально допустимый уровень семян в бункерах. Этот недостаток можно устранить регулированием положения датчика в бункере в соответствии с посевашей культурой, что, однако, трудно выполнить в процессе эксплуатации.

#### СИСТЕМА «КЕДР»

Такую систему устанавливают на сеялках типа СУПН-8 для контроля продольного распределения зерна в рядах. При этом контролируют период  $T_c$  следования семян в посеваших секциях. Условие нормального посева —  $T_c \leq T_{гр}$ , где  $T_{гр}$  - граничное значение. Кроме того, система контролирует уровень материала в двух бункерах сеялки. Первичная информация об уровне зерна передается датчиком, активная зона которого расположена на минимально допустимом уровне. Датчик выдает первичную двоичную информацию: «допустимый уровень», «недопустимый уровень».

**Датчики посева** имеют ПП фотоэлектрического типа. Излучателем служит лампа  $EL$  ( $BA9S$ ) с нитью накаливания, а фотоприемником — генераторный элемент типа КФСГ. При вращении посевашего диска семена, удерживаемые на нём под действием вакуума, проходят через активную зону датчика, изменяют интенсивность светового потока, попадающего на фотопреобразователь  $BL$ , который (рис. 1) генерирует электрические импульсы (один импульс - одно семя), подаваемые затем на двухкаскадный усилитель. Первый каскад выполнен по схеме с общим эмиттером, обеспечивающей температурную стабилизацию посредством параллельной отрицательной обратной связи (резистор  $R2$  соединен с транзистором  $VTI$ ).

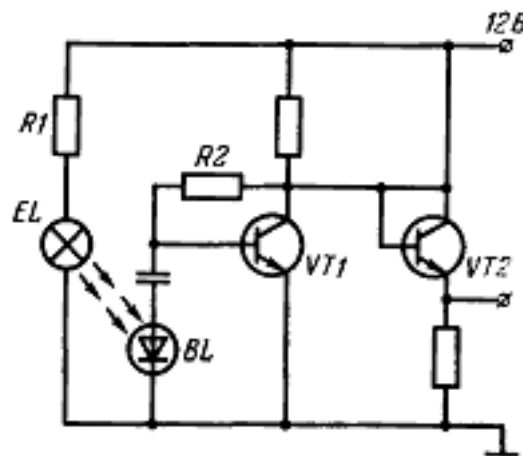


Рисунок 1. Электрическая схема датчика высева САК типа «Кедр»

Резистор  $R1$  уменьшает силу тока, проходящего через лампу  $EL$ . Транзистор  $VT2$  работает в каскаде как эмиттерный повторитель. Он снижает выходное сопротивление датчика, необходимое для работы контрольного устройства.

**Датчик уровня** имеет ПП фотоэлектрического типа. Излучателем служит лампа ВА9S, фотоприемником — фоторезистор СФ-3. Датчик расположен в нижней части бункера сеялки.

**Контрольный блок** выполнен по схеме параллельного контроля, в которой полученная от каждого датчика информация обрабатывается в отдельных контрольных устройствах. Действие контрольного устройства рассмотрим на примере принципиальной схемы (рис. 2, а) и временных диаграмм (рис. 3, а, б, в).

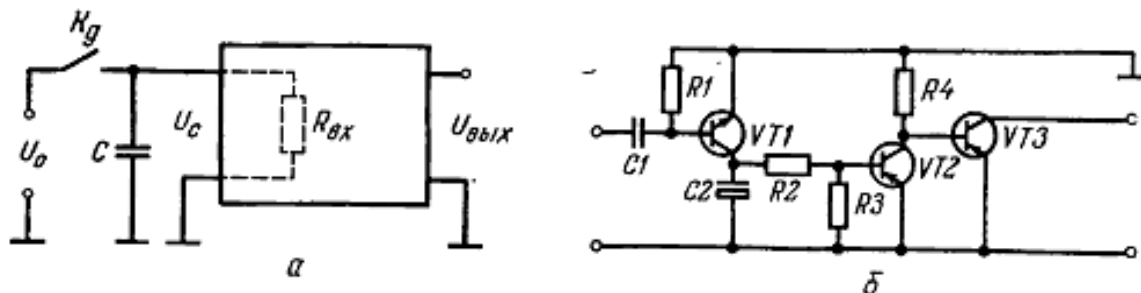


Рисунок 2. Схема контрольного устройства высева семян САК типа «Кедр»: а – принципиальная; б – электрическая

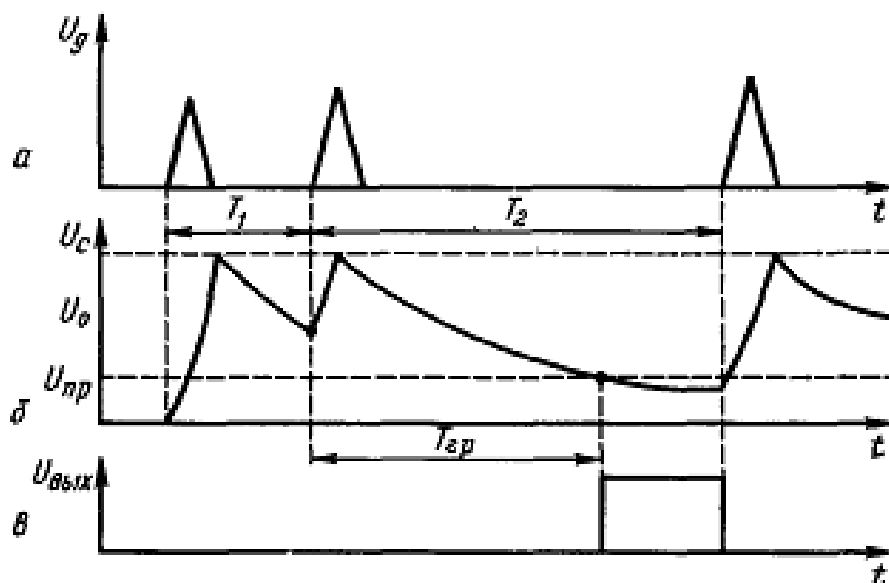


Рисунок 3. Временная диаграмма работы контрольного устройства САК типа «Кедр»

Период  $T$  поступления треугольных импульсов от датчика высева контролируется по отношению к эталонному граничному значению  $T_{гр}$ . Если  $T_1 < T_{гр}$  - процесс идёт нормально, если  $T_2 > T_{гр}$  нарушен. Ключ  $K_d$  срабатывает в такт с поступлением от датчика импульсов  $U_d$ . В связи с малой постоянной времени заряда (из-за низкого выходного сопротивления датчика) напряжение  $U_c$  на конденсаторе  $C$  почти мгновенно достигает значения  $U_0$ . После срабатывания ключа  $K_d$  напряжение

$$U_c = U_0 e^{-\frac{t}{R_{вх}C}}$$

где  $R_{вх}$  - входное сопротивление порогового устройства.

Если  $T_1 < T_{гр}$ , (рис. 3, а, б) то напряжение  $U_c$  не падает ниже  $U_{пр}$  и пороговое устройство не срабатывает. При  $T_2 > T_{гр}$  оно срабатывает, в результате чего на выходе его формируется сигнал о нарушении процесса высева.

Ключ  $K_d$  (рис. 2, б) выполнен в виде эмиттерного повторителя на транзисторе  $VT1$ , режим работы и температурную стабилизацию которого обеспечивает резистор  $R1$ . С помощью ключа  $K_d$  заряжается конденсатор  $C2$ . Входное сопротивление  $R_{вх}$  (см. рис. 2, а) образуют резисторы  $R2$  и  $R3$  (рис. 2, б) и сопротивление  $R4$  базы эмиттера транзистора  $VT2$ , служащего пороговым элементом.

Значение  $T_{гр}$  зависит от нескольких факторов, определяющие из которых — емкость конденсатора  $C2$ , а также параметры рабочего режима транзистора  $VT2$ . Поскольку они имеют большие допуски, значителен допуск и у  $T_{гр}$ . По техническим условиям системы «Кедр»  $T_{гр} = 1,2$  с допуском (+ 0,8 - -0,5) с. При  $T > T_{гр}$  транзистор закрыт, так же как и  $VT2$ , из-за их гальванической связи. Ключевой транзистор  $VT3$  открыт, что соответствует выходному сигналу «процесс высева нарушен».

Устройство контроля уровня представляет собой усилитель постоянного тока с ключом (рис. 4). При незасвеченном фоторезисторе транзистор  $VT1$  открыт, тогда как переключающий транзистор  $VT2$  закрыт.

При освещении фоторезистора сопротивление его резко уменьшается, и с него на базу  $VT1$  подается положительное напряжение, транзистор  $VT1$  закрывается, а открытый транзистор  $VT2$  подает на индикатор постоянное напряжение.

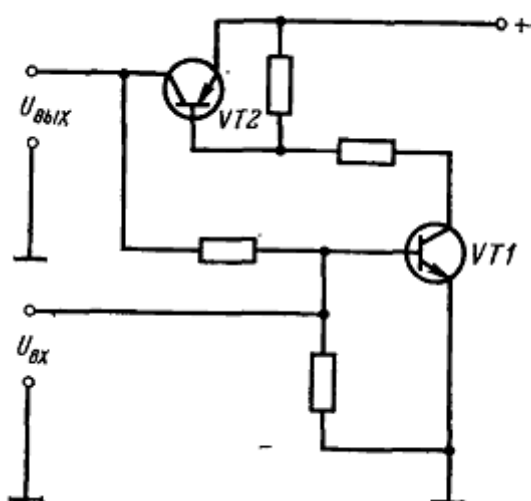


Рисунок 4. Электрическая схема устройства контроля уровня САК типа «Кедр»

**Индикаторный блок.** Нарушения рабочего процесса индицируются по параметрам «наличие высева» и «уровень» различными способами. Номер объекта (высевающий аппа-



рат), в котором возникло нарушение, индицируется с помощью цифровой лампы. Коллекторы ключевых транзисторов *VT3* (рис. 2, б) соединены через диодную дешифраторную матрицу с цифровой лампой типа ИВ-9 с сегментами накаливания, интенсивность которых достаточна для работы в условиях кабины МСХМ.

При уменьшении уровня материала в двух бункерах сеялки включается соответствующая лампа. Световая индикация по двум параметрам дублируется звуковым сигналом, подаваемым двухкаскадным RC-генератором с частотой 1 кГц. Генератор срабатывает от диодной схемы ИЛИ через выходы контрольных каналов системы. Звуковой и световой сигналы при этом подаются непрерывно. Звуковой сигнал об уменьшении уровня материала кратковременный (0,5 - 5 с), что осуществляется путем дифференцирования сигнала RC-схемой с выхода контрольных устройств на генератор.

**Блок самоконтроля** имеет мультивибратор, работающий на частоте около 2,5 Гц. При его включении (в режиме «самоконтроль») на излучатели датчиков высева подается напряжение указанной частоты. Пульсирующее освещение фотоприемника с периодом, меньшим максимально допустимого, имитирует процесс высева. Все элементы системы, кроме двух датчиков уровня и их контрольных и индикаторных устройств, проверяют в рабочем режиме.

Система «Кедр» имеет восемь датчиков высева с размещенными в них ПП и усилителями и два датчика уровня. Кабели датчиков заканчиваются разъемами, которыми они соединяются с кабелями, расположенными на правой и левой сторонах сеялки. Последние соединены разъемами с электронным блоком. Он смонтирован в средней части сеялки и включает в себя все контрольные устройства, дешифраторную матрицу и диодную схему ИЛИ (для включения генератора звука). Кабель с разъемом связывает электронный блок с пультом, размещенным в кабине трактора. На пульте расположены световые индикаторы, генератор звука, усилитель и устройство самоконтроля.

Особенности системы такие: отключение датчиков высева при их повреждении, стабилизированное напряжение питания контрольных устройств, применение параметрического стабилизатора (ток питания небольшой), при режиме «самоконтроль» включается специальный переключатель, что вызывает мигание лампы, предусмотренной между ключевым транзистором и отрицательным полюсом питания. Элементы схемы от напряжения с обратным знаком защищают два диода, включенные в цепь питания.

### САКС

Система автоматического контроля сева (САКС) предназначена для пневматических сеялок типа SPC-6 и SPC-8. Так как в бункерах этих сеялок размещен датчик уровня поплавкового типа, то уровень материала в бункере система не контролирует.

По принципу действия, схеме и конструкции САКС почти идентична системе «Кедр». Существенно отличаются только датчики. В САКС в качестве светового излучателя использован инфракрасный светодиод типа ЗЕ 1001. Оригинальна конструкция датчика, информирующего о прохождении семян после их освобождения из высевающего диска (рабочая зона датчика значительно расширена).

## 2.7 Лабораторная работа №7 (2 часа).

**Тема:** «Системы автоматического прореживания и обработки растений»

**2.7.1 Цель работы:** Экспериментальная проверка расчетных формул сопротивления материалов для случая внецентренного растяжения образца.

### 2.7.2 Задачи работы:

1. Изучить методику проведения эксперимента.
2. Изучить датчик.
3. Выполнить эксперимент.
4. Произвести расчёты.

### 2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Пластина стальная.
2. Машина ГМС-50.
3. Индикатор цифрового типа.

### 2.7.4 Описание (ход) работы:

Прореживание всходов - одна из трудоемких операций в полеводстве. В прореживании нуждаются всходы сахарной свеклы, турнепса, брюквы, моркови.

В нашей стране первые промышленные автоматические (селективные) прореживатели появились благодаря работам ВИМа, УНИИМЭСХа, ЛСХИ, Башкирского СХИ и особенно УкрНИИСХОМа.

К лучшим зарубежным образцам относятся прореживатели «Aversman», «John Deere» (США), ST-2000 (Франция) и «Monomat-S» (ФРГ).

При вдольрядном «слепом» прореживании формируются гнезда (или букеты) длиной  $\tau_b$  (рис. 1) с вырезами длиной  $t_b$  независимо от расположения растений. При Пуассоновском законе распределения растений в исходном (до прореживания) рядке вероятность того, что гнездо окажется пустым,

$$P_0 = \int_0^{\tau_b} \lambda e^{-\lambda x} dx = e^{-\lambda \tau_b}$$

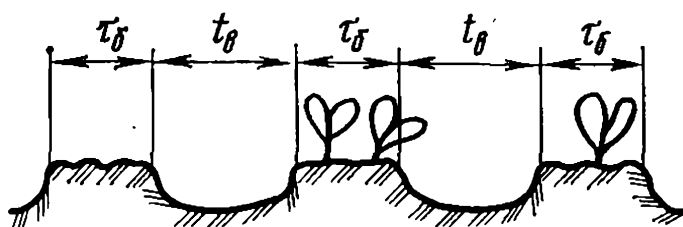


Рис.1. Расположение растений при «слепом» прореживании.

где  $\lambda$  - средняя плотность расположения растений на 1 м длины;

$x$  — расстояние между растениями, расположенными в одном гнезде.

Вероятность того, что гнездо не окажется пустым,

$$P = 1 - P_0 = 1 - e^{-\lambda \tau_b}$$

Число гнезд на 1 га

$$N_{\text{гн}} = \frac{L}{\tau_b + t_b}$$

где  $L$  — протяженность всех рядков на 1 га.

Число оставшихся растений

$$N_p = \frac{L \lambda \tau_b}{\tau_b + t_b}$$

Число полных гнезд

$$N_{\bar{A}i \cdot \delta} = N_{\bar{A}i} D = \frac{L \cdot (1 - e^{-\lambda \tau_{\sigma}})}{\tau_{\sigma} + t_{\bar{A}}}$$

Среднее число лишних растений

$$\bar{n} = \frac{N_P}{N_{\bar{A}i}} - 1 = \frac{\lambda \tau_{\sigma}}{1 - e^{-\lambda \tau_{\sigma}}}$$

Вероятность оставления в гнезде «двойников»

$$P_{\bar{A}\bar{A}} = \frac{1 - e^{-\lambda \tau_{\sigma}} - \lambda \tau_{\sigma} e^{-\lambda \tau_{\sigma}}}{1 - e^{-\lambda \tau_{\sigma}}}$$

При допустимом значении  $P_{\text{дв}} = 25\%$ ,  $t_b = 0,1$  и условии, что полная длина гнезда не может быть меньше  $0,04$  м (чтобы не повредить корни), из анализа предыдущих формул следует, что ни при какой исходной плотности  $\lambda$  «слепое» прореживание не может сохранить требуемое число  $N_P$  растений и полностью исключить ручной труд.

Возможны три вида программ автоматического селективного прореживания, при котором определяются координаты растений в рядке.

Программа I (рис. 2) предусматривает удаление после оставленного первого растения всех остальных, находящихся на заданном расстоянии  $L_3$ ; следующим оставляется первое обнаруженное растение за пределами интервала  $L_3$ . Так делается вырез длиной  $t_b$  и формируется букет длиной  $\tau_{\sigma}$ . Интервал между серединами букетов

$$L_{0i} = L_3 + \Delta L_{\bar{E}j}$$

где  $\Delta L_{\text{и}j}$  - часть исходного интервала между всходами (случайная величина).

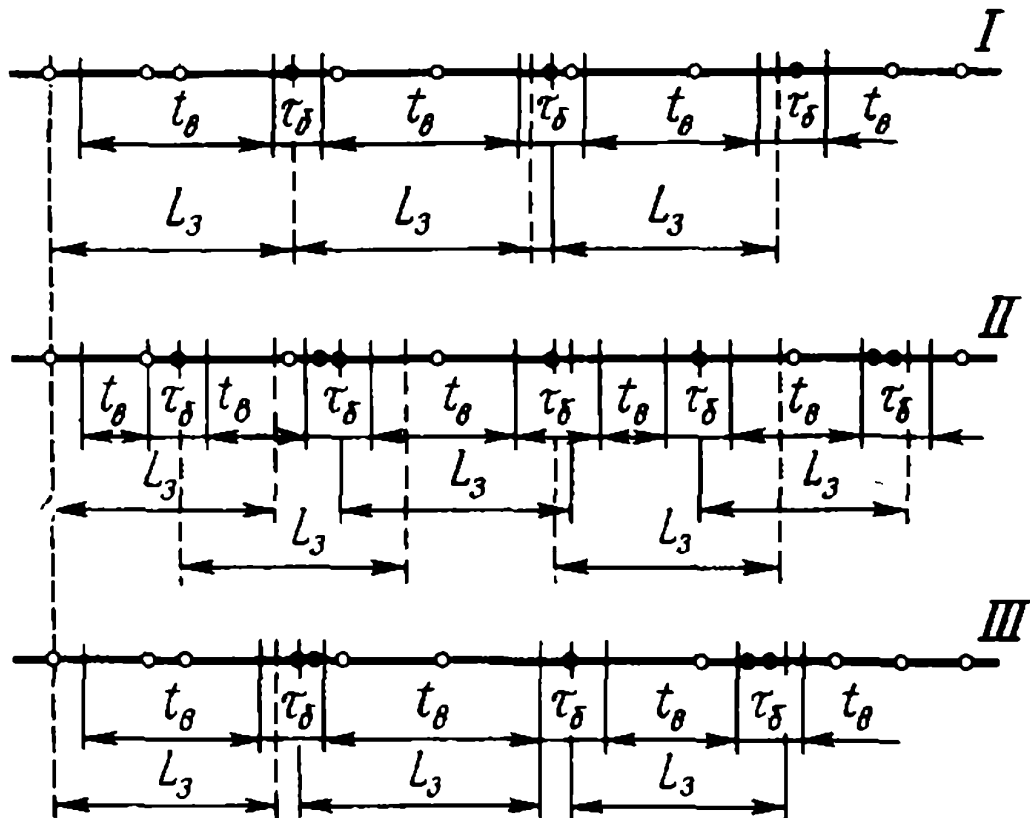


Рисунок 2. Диаграммы селективного прореживания.

По программе II (рис. 2) после первого оставленного растения удаляют все остальные в интервале  $L_3$ , кроме последнего, с которого начинается новый отсчет. Интервал между серединами букетов в этом случае

$$L_{0i} = L_3 - \Delta L_{\bar{E}j}$$

По программе III (рис. 2) после первого оставленного растения удаляют все остальные в интервале  $L_3$ , кроме последнего в этом интервале либо первого за его пределами. Отклонение координат оставленного растения от конца заданного интервала должно быть минимальным. Интервал

$$L_{0i} = L_3 \pm \min L_{\hat{E}j}$$

Из сравнения программ между собой и с методом «слепого» прореживания по экономическому критерию, учитывающему степень уменьшения затрат ручного труда, стоимость и сложность приборов для выполнения программы и стоимость расходуемых семян, видны преимущества селективного прореживания перед «слепым», а также преимущества программ II и III перед I (большая степень  $\Delta$  уменьшения затрат ручного труда и меньшее среднее квадратическое отклонение  $\sigma(L_0)$  длины букета). Однако результаты сравнения функциональных схем (рис. 3, а, б), реализующих эти программы, показывают следующее.

При работе по программе I (рис. 3, а) датчик 1 растений определяет координаты оставляемого растения на почве. В блоке 2 заложена информация о длине выреза и букета, в соответствии с которой формируются сигналы на включение и выключение с помощью ИУ 3 рабочего органа 4 прореживателя. Реализация функциональной схемы программы I не встречает принципиальных технических трудностей; она сравнительно проста и надежна.

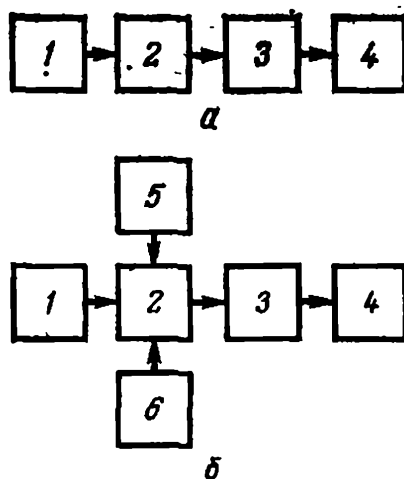


Рисунок 3. Функциональные схемы селективного прореживателя.

При работе прореживателя по программам II и III (рис. 3, б), кроме информации об оставляемых растениях, необходимы координаты растений в заданном интервале выреза, поэтому функциональная схема дополнена датчиком 5 пути и блоком 6 памяти. Сигналы от датчиков 1 и 5 дают возможность определить координаты растений по длине рядка. Эта информация поступает в блок 6 и сохраняется до момента прохождения датчиком конца интервала, заданного для программы II. По программе III информация поступает из блока 6 в блок 2 после фиксации датчиком растения, первого за заданным интервалом. После этого формируется сигнал на включение рабочего органа.

Трудности реализации программ II и III обусловлены низким качеством работы датчиков пути и высокой степенью сложности блока памяти, особенно для программы III, поэтому, несмотря на несколько лучшие показатели  $\sigma(L_0)$  и  $\Delta$  для программ II и III, в качестве схемы для автоматического прореживателя рекомендуется функциональная схема программы I.

Заметим, что всходы распределяются весьма неравномерно и закономерности этого распределения описываются достаточно приближенно, в связи с чем возможности выбора или расчета рациональных схем и программ прореживания всходов ограничены. С этой точки зрения вызывают интерес методы статистических испытаний с применением ЭВМ,

в частности аналоговых вычислительных машин (АВМ), при учете динамики рабочих органов, существенно влияющей на работу прореживателей.

Для воспроизведения и последующего преобразования в АВМ ЭМУ-10 случайной дискретной последовательности используют в качестве сигналов-носителей информации последовательности прямоугольных импульсов со случайной длительностью или амплитудой, площади которых - интервалы между всходами.

Схемы, построенные на штатных блоках АВМ, позволяют моделировать любые случайные последовательности, заданные в натуральном виде или статистическими характеристиками в форме теоретических или эмпирических законов распределения вероятностей с известными корреляционными зависимостями.

При формировании сигналов, соответствующих исходной последовательности всходов, используют схему непрерывного квантования случайного шума и последующего нелинейного преобразования полученных импульсов. Процесс прореживания реализован схемой поочередного интегрирования импульсов в течение заданных интервалов времени, соответствующих вырезам и букетам, длину которых с учетом колебаний рабочих органов задают по алгоритмам, отражающим способ прореживания.

Среди критериев оптимизации схем прореживания наиболее информативны длина  $\tau_0$  букета (ее выбирают из условия обеспечения максимальной вероятности появления букетов с заданным числом растений, что определяет минимальные затраты на последующую прорывку вручную) и длина  $t_b$  выреза (выбирают из условия обеспечения заданной густоты растений на единицу площади после разборки букетов вручную).

Для широкого спектра распределения всходов, характеризующихся их числом на 1 м длины, средним интервалом и дисперсией, определены рациональные схемы «слепого» и автоматического прореживания.

Установлены зависимости рациональных схем прореживания от средних исходных интервалов между всходами ( $M_x$ ) и их дисперсии ( $\sigma_x$ ), позволяющие аналитически выбирать размеры букета и выреза:

для букетировки

$$\tau_{i\dot{\delta}} = \dot{I}_{\delta} \text{ и } t_{i\dot{\delta}} = \frac{1000}{N_{\dot{\delta}}} - \tau_{i\dot{\delta}} - 1,25\sigma_{\dot{\delta}}$$

где  $N_3$  — заданное число растений на 1 м длины ряда;

для автоматического интервально-выборочного прореживания, когда каждый букет содержит хотя бы одно растение,

$$t_{i\dot{\delta}} = \frac{1000}{N_{\dot{\delta}}} - c - \sigma_{\dot{\delta}}$$

где  $c$  - длина защитной зоны.

Колебания рабочих органов существенно влияют на результаты прореживания. Они снижают равномерность распределения растений вследствие их подрезания, засыпания почвой и скалывания ее. При малых значениях  $M_x$  и  $\sigma_x$  скорость движения машин должна быть ограничена, а рабочие органы установлены с большей точностью. Полевые эксперименты показали, что при реализации рациональных схем прореживания необходимо увеличивать расчетную длину букета, а для этого вводить защитную зону  $\Delta t = 2 - 3$  см и уменьшать на столько же длину вырезов.

Исследованиями Полтавского СХИ установлено, что для автоматизации прореживания наиболее эффективны фотоэлектрические датчики, так как они способны обнаруживать растения даже в ранней фазе развития («вилочки»), когда рядки всходов практически свободны от сорняков.

Самая оптимальная программа прореживания - с коррекцией. Она уменьшает коэффициент вариации числа оставленных растений и интервал между ними. На базе фотоэлектрического датчика разработана САУ, использующая механические рабочие органы с гидроприводом.

Исследования отражательных свойств и цветовых характеристик растений и почв позволили установить, что наиболее информативны две области волн отраженной лучистой энергии: близкие к 680 и превышающие 800 нм; поэтому в основу алгоритма распознавания положен бихроматический принцип.

Алгоритм составлен в виде неравенств приращений реакции фотоприемника на распознаваемый объект в наиболее информативных областях описания:

$$V = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta W_I = 680 = W_I = 800 \\ 0 & \text{if } \Delta W_E = 680 > \Delta W_E = 800 \\ 1 & \text{if } \Delta W_D = 680 < \Delta W_D = 800 \\ 1 & \text{if } \Delta W_{D,E} = 680 < \Delta W_{D,E} = 800 \end{cases}$$

где  $W$  - реакция фотоприемника на поверхность почвы (индекс п), комок (к), растение (р), а также на растение и комок одновременно (р.к).

Контрастность фотоэлектрического датчика (рис. 4), работающего на основе такого алгоритма, достаточна, чтобы обнаружить растение с площадью листьев  $1,5 \text{ см}^2$ . Поперечный размер поля зрения датчика задается равным средней амплитуде отклонения прореживающей секции от оси рядка, а продольный - средней длине горизонтальной проекции растений.

Вероятность обнаружения растений на почве уменьшается с увеличением отклонения датчика от оси рядка. При отклонениях  $\pm 6 \text{ см}$  вероятность распознавания снижается до 0,9. Зависимость напряжения на фотоприемнике от такого же отклонения - резко убывающая функция (этим можно объяснить снижение вероятности распознавания).

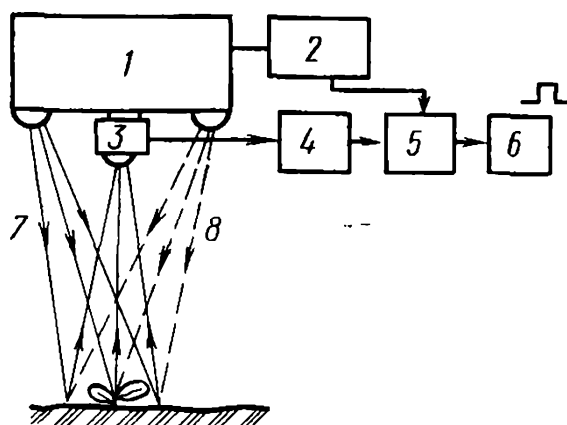


Рисунок 4. Блок – схема фотоэлектрического датчика растений:

- 1 – источник модулированных лучей; 2 – задатчик напряжения опорной фазы; 3 – фотоприёмник;
- 4, 6 – усилители напряжения; 5 – индикатор фазы;
- 7, 8 – разнеспектральные лучи.

Установлено, что запыленность воздушной среды  $65 \text{ г/м}^3$ , вызванная работой прореживателя, существенно не влияет на надежность распознавания растений и снижается, если запыленность превышает  $150 \text{ г/м}^3$ .

При отклонении оставляемых растений от заданного интервала (17 см) больше чем на 5 см всходы получаются изреженными. Чтобы сохранить рассеивание числа прореженных растений в заданных пределах, нужна автоматическая коррекция размера этого интервала. С этой целью разработана программа, предусматривающая рабочий  $t_{в1}$  вырез и аварийный  $t_{в2}$ .

Программа реализована на специальном электронном автомате; ось зрения исполнительных органов (два ножа, датчик растений) направлена между ножами (рис. 5). Ножи жестко посажены на вал реверсивного гидроусилителя, причем длина переднего ножа (по ходу агрегата) равна вырезу  $t_{в2}$ , длина заднего — вырезу  $t_{в1}$ . Датчик растений

синхронизирует начало рабочего цикла с координатами местоположения в рядке оставляемых растений.

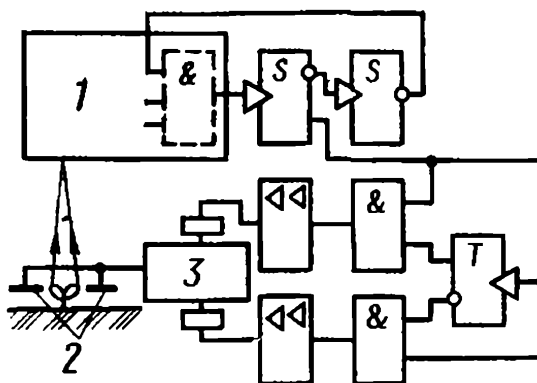


Рисунок 5. Функциональная схема программного автомата:  
1 – датчик; 2 – ножи; 3 – гидропривод.

Продолжительность рабочего цикла  $t_{ц}$  состоит из времени  $t_y$  усиления и формирования сигнала, времени  $t_3$  срабатывания электромагнита, времени  $t_{вх}$  входа ножа в почву, времени  $t_в$  выреза, времени  $t_{вых}$  выхода ножа из почвы, времени  $t_{отп}$  отпускания электромагнита и времени  $t_3$  запрета изменения состояния системы. Экспериментально и расчетом временных параметров рабочего цикла по методике, учитывающей качество посева, поступательную скорость и статическую ошибку вождения агрегата, а также угловую скорость рабочего органа, установлено, что скорость гидромеханического прореживателя составляет 0,41 - 0,87 м/с. Рабочую скорость можно повысить до 2,5 м/с, если применить малоинерционные рабочие органы — искровые и высоконапорные водяные.

Рассмотренная САУ представляет собой разомкнутую шестиканальную импульсную систему, предназначенную для выполнения корректируемой программы формирования густоты всходов сахарной свеклы. Каждый канал системы - передаточная цепь, получающая сигнал от фотоэлектрического датчика. В канале системы сигнал преобразуется по заданной программе и передается ОУ (исполнительному механизму рабочего органа) для выполнения рабочего цикла. Методика расчета временных характеристик рабочего цикла скорректированной программы прореживания позволяет определить быстродействие элементов САУ, необходимое для получения заданной рабочей скорости агрегата; по быстродействию выбранных элементов САУ можно найти предельную скорость.

Наработка шестиканальной автоматической системы на один отказ составляет 830 ч, вероятность безотказной работы системы в течение сезона - 0,81, ориентировочный экономический эффект от внедрения шестирядного фотогидравлического прореживателя - 8 руб. на 1 га.

Как было отмечено, лучшая схема прореживания та, при которой после заданного выреза остается первое растение. При разработке системы управления рабочими органами автоматического прореживателя конструкции УНИИМЭСХа такая схема была положена в основу, а режим работы прореживателя по этой схеме обусловил конструктивное оформление САУ (рис. 6). Действует она так. Управляющий сигнал (в виде слабого электрического импульса) от растения, обнаруженного ИП 2, поступает на вход УПУ 3, затем на УЭ 4, представляющий собой электрогидравлический клапан. Клапан открывает поступление масла к приводному гидромотору 5, на валу которого закреплены ножи 1 и магниты 6. Последние воздействуют в нужные моменты на магнитоуправляемые контакты прерывателя 7, предназначенного для остановки вала гидромотора и возвращения электрической схемы в исходное состояние после отработки системой управляющего сигнала.

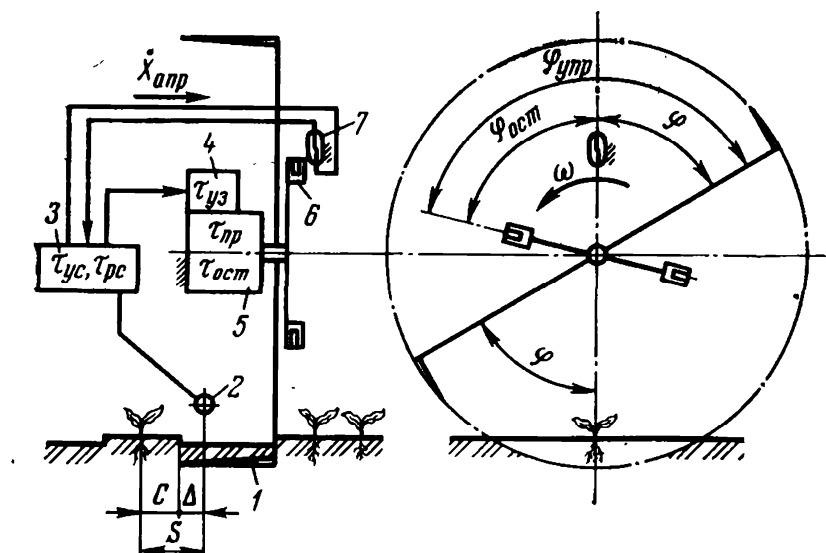


Рисунок 6. Функциональная схема САУ рабочими органами прореживателя.

В связи с импульсным режимом работы всех звеньев САУ при оценке ее качества ограничимся основными показателями динамической точности, в частности определением предельной частоты системы по отработке управляющих сигналов от растений, обуславливающей ее быстродействие и соответственно рабочую скорость прореживающего агрегата.

Анализ временных параметров управления рабочими органами автоматического прореживателя показал, что верхний предел его рабочей скорости

$$\chi_{a.i\delta} \leq k \cdot \frac{\tau_p + 30(\varphi + \varphi_{i\tilde{n}\delta})}{\pi n} \quad (1)$$

где  $k$  - заданное число оставляемых растений или букетов на 1 м длины ряда;

$\tau_p = \tau_{yc} + \tau_{p.c} + \tau_{y\tilde{z}}$  - время передачи сигнала релейным УЭ;

$\tau_{yc}$  - время прохождения сигнала через усилитель (им можно пренебречь);

$\tau_{p.c}$  - время срабатывания реле;

$\tau_{y\tilde{z}}$  - время срабатывания УЭ системы (электрогидравлического клапана);

$\varphi$  - угол поворота ножа от исходного положения до нижней точки его траектории (за время  $\tau_{пр}$  отработки команды на привод ножей, т. е. за время выреза);

$\varphi_{ост}$  - угол остановки ножа (за время  $\tau_{ост}$  - поворота ножей до полного перекрытия потока рабочей жидкости);

$n$  - частота вращения вала привода рабочих органов.

Из уравнения (1) следует, что рабочую скорость прореживателя можно увеличить, если уменьшить время на передачу управляющего сигнала релейным звеном САУ или повысить частоту вращения вала привода рабочих органов, однако поскольку в обоих случаях имеются ограничения, то параметры прореживателя необходимо оптимизировать. САУ автоматического прореживателя конструкции УНИИМЭСХа устойчиво работает при частоте до  $15 \text{ с}^{-1}$ , позволяя прореживать всходы сахарной свеклы с оставлением 5 - 6 растений на 1 м длины ряда во всем диапазоне допустимых агротехническими требованиями скоростей агрегата без снижения качества технологической операции.



## 2.8 Лабораторная работа №8 (2 часа).

Тема: «САР загрузки льноуборочных и других машин»

**2.8.1 Цель работы:** Проверка опытным путем с помощью электротензометров величины и направления главных напряжений в поверхностном слое тонкостенной трубы при ее одновременном изгибе и кручении и ознакомление с методом определения напряжений электрическим способом с помощью проволочных датчиков при плоском напряженном состоянии.

### 2.8.2 Задачи работы:

1. Изучить схему нагружения при совместном действии изгиба и кручения.
2. Выполнить эксперимент.
3. Выполнить расчёты.

### 2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Набор грузов.
2. Индикатор часового типа.

### 2.8.4 Описание (ход) работы:

При уборке льна загрузку рабочих органов комбайна без САР определяют толщина  $L_{\text{л}}$  ленты льна в теребивных ручьях и скорость  $x$  движения машины. Чем больше  $L_{\text{л.факт}}$  отличается от  $L_{\text{л.треб}}$ , тем вероятнее снижение качества очеса и забивание рабочих органов. Потери времени, связанные с забиванием последних, достигают 30 - 40 % и вместе с техническими неисправностями приводят к тому, что чистое время работы комбайна составляет 50 ... 60 % времени смены.

В ЛСХИ для определения параметров систем автоматизации контроля и управления режимами работы льноуборочных машин выбраны длительность  $\tau(\text{с})$  выброса и длительность  $\theta(\text{с})$  интервала паузы между двумя соседними выбросами случайного процесса изменения толщины ленты  $L_{\text{л}}(t)$  в зависимости от величины  $c$ :

$$c = m_L + \Delta L_{\varepsilon}$$

где  $m_L$  - среднее значение толщины ленты;

$\Delta L_{\text{л}}$  - односторонний допуск на колебание толщины ленты  $L_{\text{л}}(t)$ .

С увеличением скорости движения возрастают значения  $m_L$ , и  $\Delta L_{\text{л}}$ : например, при  $x = 1,55 \text{ м/с}$   $m_L = 1,85 \text{ мм}$ ,  $\Delta L_{\text{л}} = 0,58 \text{ мм}$ ; при  $x = 3,25 \text{ м/с}$   $m_L = 3,45 \text{ мм}$ ,  $\Delta L_{\text{л}} = 0,88 \text{ мм}$ , возрастает частота забиваний рабочих органов растительной массой. При  $\tau(\text{с}) \geq 0,25$  с и  $\theta(\text{с}) \leq 1,67$  с повышается возможность нарушения технологического процесса. Возникновение такой ситуации автоматическая система (рис. 1) не только фиксирует, но и с участием человека-оператора или автоматического управляющего устройства, изменяющих скорость движения агрегата, предупреждает ее.

Схема работает так. Сигналы от датчиков  $B_1, \dots, B_4$  толщины ленты льна, установленные в теребивных секциях, поступают на входы транзисторных усилителей  $A_1, \dots, A_4$  с входным VT1 и выходным VT2

транзисторами и схемой совпадения VD1, VD2. С коллектора транзистора VT2 усилителя A1 сигнал поступает на первый вход схемы совпадения VD1, VD2, второй вход которой соединен с выходом дешифратора U опросного устройства. Управляет дешифратором электронный кольцевой счетчик, собранный на триггерах SA1 и SA2, на вход которого поступают сигналы с путевого отметчика (он установлен на ходовом колесе комбайна). С помощью их через дешифратор последовательно опрашивается каждый датчик толщины ленты. Результат опроса поступает параллельно на пороговые усилители AK1 и AK2. Выход AK2 соединен с сумматором W, настроенным на такую толщину, при которой одновременно во всех секциях

рабочие органы льнокомбайна забиваются. При этом в сумматоре W формируется сигнал, поступающий на триггер SA3, HA и индикаторную лампу HL. Усилитель AK1 настроен на превышение заданной толщины ленты в одной теребивной секции. Выход AK1 соединен

с исполнительными элементами и может, как и выход АК2, иметь связь с САУ скоростными и нагрузочными режимами трактора, агрегатируемого с льнокомбайном, допуская оптимальную нагрузку двигателя при отсутствии сигнала перегрузки тербильных секций и снижая скорость движения при появлении его.

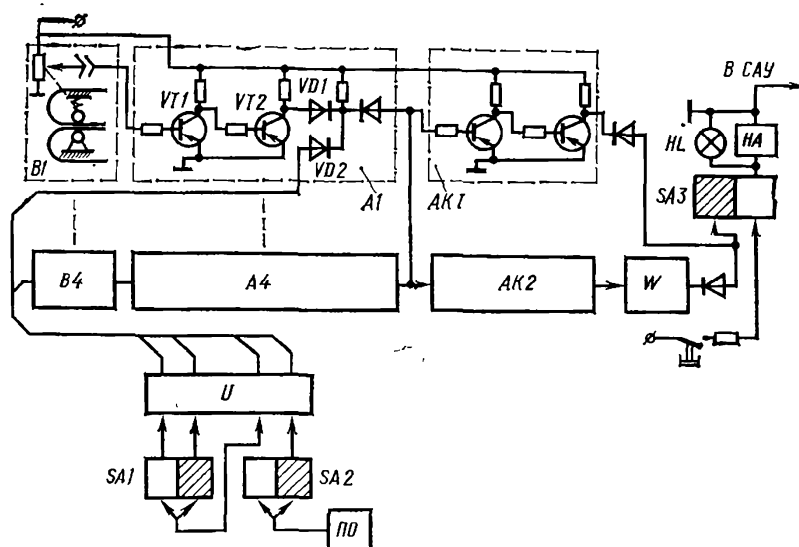


Рисунок 1. Схема системы контроля и сигнализации режимов работы льнокомбайна.

Такие САУ применительно к тракторам тягового класса 1,4 разработаны в УНИИМЭСХе и ЦНИИМЭСХе. В частности, система конструкции ЦНИИМЭСХа (рис. 2) работает так. При движении МТА 3 с заданной скоростью и оптимальной нагрузке двигателя

$$\Delta \varphi_{\dot{A}} = \varphi_{\dot{A}}(E) - \varphi(t) > 0 \quad (1)$$

$$\Delta \varphi_i = \varphi(t) - \varphi_i(E) > 0 \quad (2)$$

$$0,96 \varphi_3 < \tilde{\delta}_\delta < 1,04 \tilde{\delta}_3 \quad (3)$$

где  $E$  - угол, характеризующий положение рычага управления всережимным центробежным регулятором;

$\varphi_{\dot{A}}(\dot{A})$ ,  $\varphi_i(\dot{A})$  - высшие низшие частоты вращения вала двигателя;

$\varphi(t)$  - частота вращения вала двигателя;

$\tilde{\delta}_3$ ,  $\tilde{\delta}_\delta$  - заданная и фактическая скорости движения МТА.

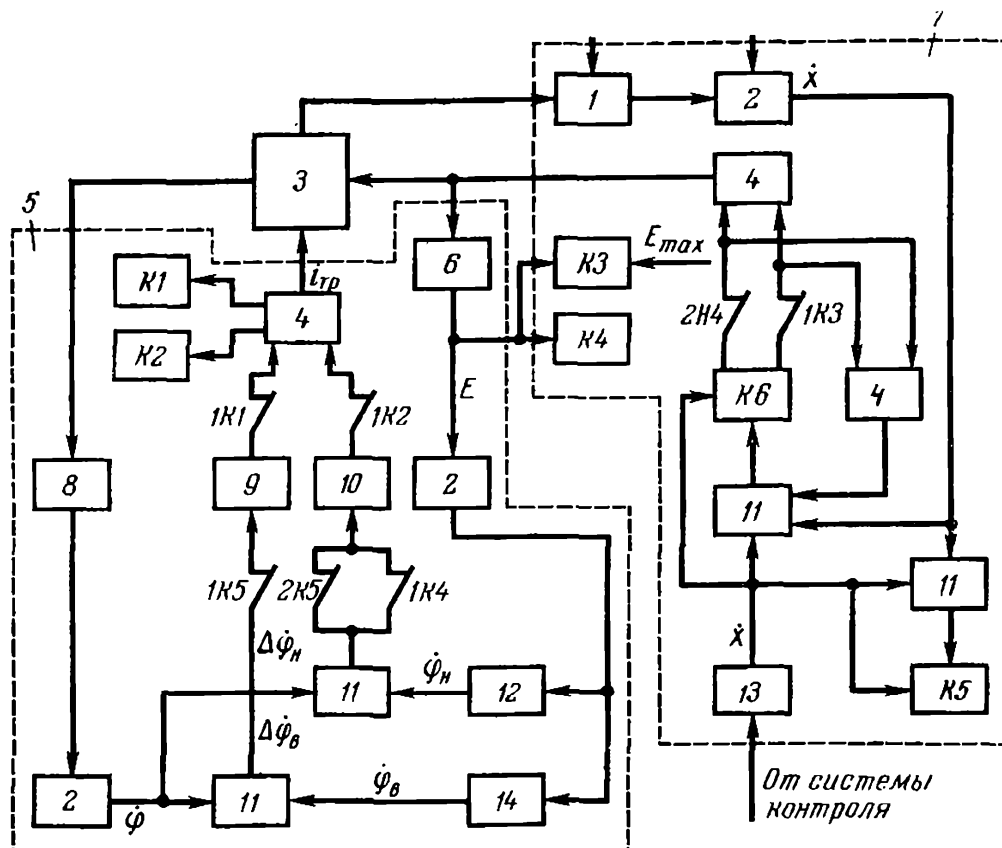


Рисунок 2. Схема САУ СЗР МТА.

Процесс включения  $i + 1$  (повышенной) передачи в контуре 5 управления передаточным числом трансмиссии происходит при  $\Delta\phi_b$ . Когда нагрузка на двигатель уменьшается, датчики 1, 6 и 8 скорости МТА, положения рычага центробежного регулятора и частоты вращения вала двигателя информируют об этом через фильтры 2 нижних частот всю систему и, чтобы поддержать загрузку двигателя в оптимальных пределах при  $\Delta\phi_b \leq 0$ , вход логического устройства 10 отключается, а на выходе логического устройства 9 через суммирующий блок 11 и блок нелинейности 14 независимо от входного сигнала генерируется команда длительностью  $t_k$  исполнительному механизму 4 контура 5 управления передаточным числом трансмиссии на включение смежной  $i + 1$  передачи. После некоторой паузы  $t_n$  по истечении времени  $t_c = t_k + t_n$  вход устройства 10 подключается к блоку 11 через блок нелинейности 12.

Процесс включения низшей  $i - 1$  передачи с возрастанием нагрузки протекает, как следует из выражений (1) и (2), аналогично, причем реле K1 и K2 служат для отключения входов исполнительного механизма 4 от устройства 9 или 10 при включении самой высокой или самой низкой передачи (тем самым предотвращаются холостые срабатывания механизма 4).

При улучшении условий движения, переходе на высшую передачу или задании через блок 13 более низкой скорости  $x_3 \downarrow$  (например, по сигналу от льнокомбайна), когда  $x_6 > 1,04 x_3$ , срабатывают реле K5 и K6; последнее подает команду механизму 4 контура 7 управления скоростным режимом двигателя на уменьшение подачи топлива, K5 размыкает контакт 1K5, блокируя включение высших передач. Как только начнет выполняться условие (3), реле K5 и K6 возвратятся в исходное положение.

Если же станет выполняться условие  $x_6 < 0,96 x_3$ , то реле K5 разомкнет контакт 2K5, блокируя включение низших передач, а реле K6 подаст команду механизму 4 контура 7 на увеличение подачи топлива. И вновь при выполнении условия (3) реле K5 и K6 возвратятся в исходное положение. В результате такого регулирования предотвращается

забивание рабочих органов, повышаются качество работы и производительность агрегата, снижается расход топлива.

Годовая экономическая эффективность системы определяется повышением производительности на 1 - 13 % и снижением расхода топлива на 1 - 12 % в зависимости от вида работ.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

#### **3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).**

**Тема:** «Комплексная автоматизация МТА»

##### **3.1.1 Задание для работы:**

1. Изучить методику построение тракторов-роботов.

##### **3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Ознакомиться с принципом работы автоматической системы управления тракторами.

##### **3.1.3 Результаты и выводы:**

1. Ознакомились со способами решения проблем автоматического управления тракторами.
2. Ознакомились с принципом работы контроллера.

#### **3.2 Практическое занятие №2 (2 часа).**

**Тема:** «Системы дистанционного управления»

##### **3.2.1 Задание для работы:**

1. Изучить способ радиоуправления.

##### **3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Ознакомились с различными способами дистанционного управления.

##### **3.2.3 Результаты и выводы:**

1. Изучили принцип распространения сигнала.
2. Изучили принцип работы каналов передачи командной информации.

#### **3.3 Практическое занятие №3 (2 часа).**

**Тема:** «Аппаратура для автоматического вождения гусеничных и колёсных машин»

##### **3.3.1 Задание для работы:**

1. Рассмотрение принципа действия и устройства автоматического вождения (САВГ ИДТИ), разработанное на ОМИС НАТИ.

##### **3.3.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Ознакомиться с блок схемой системы автоматического вождения гусеничного трактора.

##### **3.3.3 Результаты и выводы:**

1. Изучили систему автоматического управления гидросистемой гусеничного трактора.

#### **3.4 Практическое занятие №4 (2 часа).**

**Тема:** «Аппаратура для автоматического вождения гусеничных и колёсных машин»

##### **3.4.1 Задание для работы:**

1. Рассмотреть работу системы автоматического вождения колесных машин применительно к вождению автомашины ЗИЛ-130.

##### **3.4.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Ознакомиться с блок схемой системы автоматического вождения автомобиля.

##### **3.4.3 Результаты и выводы:**

1. Изучили систему автоматического управления гидросистемой гусеничного трактора.

#### **3.5 Практическое занятие №5 (2 часа).**

**Тема:** «Следящие устройства в приводах»

##### **3.5.1 Задание для работы:**

1. Изучить принцип привода тормозной системы автомобиля.

##### **3.5.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Ознакомиться со схемой работы следящих устройств тормозной системы автомобиля.

### **3.5.3 Результаты и выводы:**

1. Разобрались с принципом работы тормозной системы автомобиля.

## **3.6 Практическое занятие №6 (2 часа).**

**Тема:** «Классификация систем автоматического вождения»

### **3.6.1 Задание для работы:**

1. Изучить классификацию автоматического вождения самоходных машин.

### **3.6.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Изучить принцип работы системы автоматического вождения.

### **3.6.3 Результаты и выводы:**

1. Студент изучил программу работы системы автоматического вождения.

## **3.7 Практическое занятие №7 (2 часа).**

**Тема:** «Контроль и аварийная защита. Некоторые специфические задачи управления тракторами»

### **3.7.1 Задание для работы:**

1. Изучить систему контроля и аварийной защиты.
2. Изучить систему управления тракторов.

### **3.7.2 Краткое описание проводимого занятия:**

1. Ознакомиться с системой контроля и аварийной защиты.
2. Ознакомиться с системой управления тракторов.

### **3.7.3 Результаты и выводы:**

1. Изучили принцип работы системы контроля и аварийной защиты.
2. Изучили принцип работы системы управления тракторами.