

На правах рукописи

УДК 629.33

Васильев Василий Владимирович

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ АГРЕГАТОМ
ТРАНСМИССИИ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ «ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ
ПЕРЕДАЧА – МУФТА СЦЕПЛЕНИЯ – ВАЛЬНАЯ КОРОБКА ПЕРЕДАЧ»**

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Котиев Георгий Олегович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные
оппоненты:

Тараторкин Игорь Александрович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, заведующий отделом механики
транспортных машин Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
«Институт машиноведения Уральского отделения
Российской академии наук»

Фисенко Игорь Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент, ведущий
эксперт Экспертного совета государственного
научного центра Российской Федерации
Федерального государственного унитарного
предприятия «Центральный научно-
исследовательский автомобильный и автомоторный
институт «НАМИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Защита состоится « » апреля 2018 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая
Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская
ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н.



Е.Б. Сарач

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение производительности колесных машин (КМ) обеспечивается во многом за счет автоматизации рабочих процессов. Это связано со стремлением снизить требования к квалификации водителя, повысить надежность, эффективность и безопасность транспортных средств. Это касается и автоматизации коробок передач (КП).

Наибольшее распространение на колесных машинах на сегодняшний день получили механические КП с ручным управлением (МКП, >90%), их автоматизированные исполнения (<5%) и планетарные гидромеханические передачи (ПГМП, <5%). Наряду с известными преимуществами ПГМП (переключения без разрыва потока мощности, малые осевые размеры и др.) их главными недостатками остаются высокая стоимость и сложность ремонта в сравнении с другими типами конструкций. Это обусловлено наличием нескольких планетарных механизмов и пакетов фрикционных дисков, высокотехнологичной электронно-гидравлической системы управления, требующей высокой точности изготовления и соответствующей степени фильтрации масла. Серийное изготовление ПГМП требует организации узкоспециализированного производства. Автоматические КП (АКП) других типов без гидропередачи – дешевле, но сложны с точки зрения автоматического управления. АКП с двухпоточным сцеплением – менее эффективны в переключениях, чем ПГМП, т.к. не обеспечивают безразрывность потока мощности при переключениях через одну ступень в сложных дорожных условиях.

Альтернативная к указанным вариантам конструкция – АКП по схеме ГСК (гидропередача – сцепление – вальная КП), может существенно снизить себестоимость и затраты на организацию производства новых АКП. Плюсы внедрения ГСК – в небольшом удорожании КМ, использовании положительных свойств гидропередачи (ГП), значительном снижении числа переключений, высокой степени унификации КП с ручным управлением и автоматических КП, использовании накопленного опыта производства серийных МКП. Недостатком, вызывающим сомнения при выборе между ПГМП и ГСК, является наличие разрыва потока мощности при переключениях у последней. Для выяснения эффективности использования ГСК необходимы сравнительные исследования, которые подразумевают наличие адаптивных к изменяющимся дорожным условиям законов управления переключениями передач. Под адаптивным законом управления понимается зависимость скорости машины, при которой нужно переключаться, от следующих параметров: положения педали акселератора и скорости ее перемещения, показаний датчиков состояния машины, истории предыдущих переключений и др.

Разработка адаптивных законов управления для гидромеханических трансмиссий с переключениями без разрыва и с разрывом потока мощности и последующее сравнение эффективности разных вариантов АКП представляется актуальной задачей.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является повышение эффективности КМ с АКП ГСК путем использования адаптивных законов управления переключениями передач и блокировки ГП, направленных на

снижение числа нерациональных переключений и блокировок ГП и на повышение средней скорости КМ.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен сравнительный анализ конструкций АКП;
2. Проведен обзор и анализ работ, посвященных разработке адаптивных законов управления АКП;
3. Разработаны математические модели КМ для двух вариантов АКП: ГСК и ПГМП;
4. Доказана адекватность указанных моделей путем сравнения результатов расчетных и экспериментальных исследований;
5. Разработана модель условий нагружения КМ, предназначенная для исследований и совершенствования законов управления;
6. Разработаны рекомендации для создания адаптивных алгоритмов управления АКП, основываясь на опубликованных по этой теме работах и на результатах теоретических исследований;
7. Синтезированы алгоритмы для математической модели КМ с ПГМП и с ГСК, дана оценка эффективности различных принципов адаптации законов управления АКП;
8. Проведено сравнение эффективности КМ с ПГМП и с ГСК посредством имитационного математического моделирования: выполнена оценка для различных условий движения и разной продолжительности разрыва потока мощности у ГСК.

Научная новизна работы заключается:

1. В разработке математических моделей движения КМ с ПГМП и с ГСК со связью внешних условий и режимов работы двигателя и АКП через действия «виртуального» водителя. Особенностью модели с ГСК является совокупный учет совместной работы всех компонентов: двигателя, ГП и муфты ее блокировки, сцепления, синхронизаторов КП, колесного движителя;
2. В разработке метода моделирования условий движения, позволяющем исследовать совершенство алгоритмов АКП и проводить их доводку. Метод заключается в формировании условий работы как сочетания прямых и тяговых ограничений скорости в виде периодических процессов с варьированием амплитуд, частот и разности фаз;
3. Разработаны новые принципы адаптации законов управления АКП, обеспечивающие снижение числа нерациональных переключений и блокировок ГП. Принципы основаны на учете текущего углового ускорения выходного вала КП, положения педали акселератора и скорости ее перемещения, а также длительности переключений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов подтверждена сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований динамики КМ и базируется на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования.

Практическая значимость работы. На основе полученных результатов был создан программный комплекс для ЭВМ, позволяющий исследовать работу

алгоритмов АКП в различных условиях для любых моделей КМ с механическими и гидромеханическими АКП. Разработанный комплекс программ и математическая модель могут быть использованы на стадии проектирования и доработки систем управления АКП колесных машин.

На защиту выносятся положения научной новизны, а также результаты и выводы по работе.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, в АО «БАЗ», в ОАО «МЗКТ», а также используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедрах колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана и транспортных и технологических машин Белорусско-Российского университета.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

1. На научно-технических семинарах кафедры колесных машин МГТУ им. Н. Э. Баумана. М., 2013-2017;

2. На научно-техническом семинаре кафедры «Тягачи и амфибийные машины» ГТУ МАДИ. М., 2016;

3. На конференции «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». Могилев (Республика Беларусь), 2015.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 научные статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, общим объемом 1,89 п.л.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы, приложения. Работа изложена на 135 листах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 8 таблиц. Список литературы содержит 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, заключающегося в разработке адаптивных законов управления автоматической КП ГСК. Приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ конструкций АКП, обзор и оценка существующих методов повышения адаптивности законов управления, рассмотрены математические модели движения КМ по тематике исследования трансмиссий.

Для сравнительного анализа 4-х различных конструкций АКП (ГСК, ПГМП, АМТ, КП с двухпоточным сцеплением) проанализированы особенности их работы на разных режимах: трогание с места, переключение передач, торможение и другие. Разрыв потока мощности у современных АМТ значительно меньше по времени, чем у МКП и преимущество КП с безразрывными переключениями над вальными КП не столь большое, как над КП с ручным управлением. О полной непригодности КП с разрывом потока мощности можно говорить лишь при выборе КП для КМ, предназначенных для

постоянной эксплуатации в условиях тяжелого бездорожья. Для многоцелевых КМ, лишь эпизодически попадающих в такие условия, нужно сопоставлять затраты на установку, ремонт и обслуживание ПГМП с повышением эксплуатационных показателей по сравнению с ручными КП, АМТ или ГСК. Среди исследований, посвященных ГСК, в отечественной науке можно отметить труды Л.А. Румянцева, А.Л. Карунина, А.Н. Нарбута, Р.Т. Халикова, А.А. Зырина, С.П. Контанистова, в зарубежной – исследования, проведенные фирмой Цанрадфабрик. В работах рассматривались конструкции только с ручным управлением. Обоснование применения ГСК – в небольшом удорожании КМ, значительном снижении числа переключений, использовании положительных свойств ГП, высокой степени унификации. Для полного следования данной идее система управления КП должна быть максимально дешевой, электропневматической, с относительно долгим процессом переключения. Это необходимо компенсировать адаптивностью алгоритма, снижающей число переключений. Также при относительно долгой смене ступени нельзя пренебрегать падением скорости при выборе точек переключения.

Вопросам управления АКП посвящены работы М.А. Айзермана, В.А. Петрова, Ю.И. Чередниченко, О.И. Гируцкого, Л.Г. Красневского, Б.И. Плужникова, В.П. Тарасика, М.В. Нагайцева, О.В. Пузановой, С.А. Рынкевича, В.Н. Басалаева, И.А. Фисенко, Д.Г. Поляк, труды научных школ МГТУ им. Баумана, МАДИ, НАМИ, МАМИ, НАТИ, ВНИИТРАНСМАШ, 21 НИИИ МО РФ, ВА БТВ, БНТУ (БПИ), БРУ, ОИМ НАН Беларуси и др.

Принципиально наиболее эффективным методом борьбы с нерациональными переключениями является использование топографических навигационных систем. Но это может быть реализовано далеко не на всех видах транспортных средств и не во всех условиях. Остается актуальной проблема адаптации законов управления АКП под переменные внешние условия движения при отсутствии информации о предстоящем участке маршрута.

Обобщая рассмотренные научные труды и патенты, можно отметить, что за исключением работ, где учитываются явления «мгновенно-резких» сбросов/нажатий педали акселератора, нигде не рассматривается вариант «динамики» изменения условий движения КМ: законы управления синтезируются с допущением, что условия постоянны, не учитывается ни характер изменения условий, ни степень интенсивности этих изменений. Недостаточно изучены вопросы выбора условия для совершения переключений с пропуском передач и влияния длительности разрыва потока мощности на выбор точек переключений.

По обзору патентов установлено, что, количество параметров, влияющих на законы управления, может достигать до нескольких десятков. Для адаптации законов управления под условия при натурно-экспериментальном подходе потребуется большой объем испытаний в различных условиях. Актуален вопрос, каким образом получать рациональные значения либо зависимости для быстрой адаптации параметров алгоритмов на начальных стадиях разработки.

На основе проведенного анализа работ была сформулирована цель и определены задачи исследования.

Во второй главе разработаны модели системы «машина – управление – внешняя среда» для исследований работы алгоритмов адаптивного управления АКП 2-х вариантов: ГСК и ПГМП. Особенностью является модель системы ДВС-АКП, учитывающая согласованную работу компонентов:

- дизельного двигателя с всережимным регулятором – с учетом влияния неуставившихся режимов;
- гидropередачи;
- фрикционных пар сцепления и многодисковых муфт;
- синхронизаторов (для ГСК).

Модели имеют переменную структуру дифференциальных уравнений, зависящую от состояния фрикционных элементов, что позволяет моделировать характерные режимы движения КМ с переключениями передач и управлением блокировкой ГП. Математические модели выполнены состоящими из набора моделей подсистем, которые выделены по принципу изолирования и независимости. Объединение подсистем производится с помощью расчетных схем, показанных на Рис. 1.

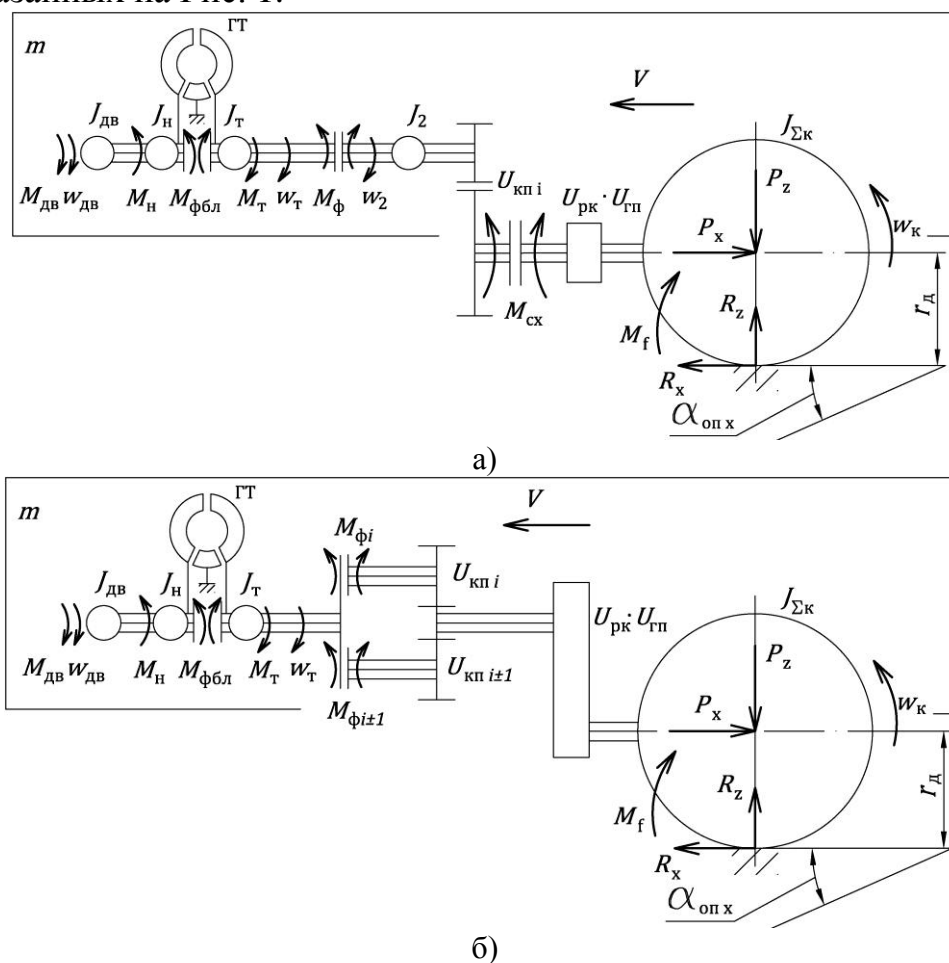


Рис. 1.

Расчетная схема КМ: а) с КП ГСК; б) с гидромеханической КП, обеспечивающей переключения без разрыва потока мощности

Функционирование электронного блока системы управления АКП смоделировано с использованием модуля StateFlow пакета MatLab, построенного по блочно-модульному принципу и обеспечивающему высокую наглядность работы алгоритмов и автоматическую генерацию их кодов согласно блок-схемам.

Для формирования модели виртуального водителя применен аппарат нечеткой логики, как наиболее подходящий для описания действий человека-оператора.

Уравнения, описывающие динамику КМ с ГСК на всех режимах движения, кроме синхронизации, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}(J_{\text{дв}} + J_{\text{н}}) \cdot \dot{w}_{\text{дв}} &= M_{\text{дв}} - M_{\text{н}} - M_{\text{фбл}}; \\ J_{\text{т}} \cdot \dot{w}_{\text{т}} &= M_{\text{т}} - M_{\text{ф}} + M_{\text{фбл}};\end{aligned}\quad (1)$$

$$(J_{\Sigma \text{тр, к}} + J_2 \cdot U_{\text{тр } i}^2 \cdot \eta_{\text{тр } i}) \cdot \dot{w}_{\text{к}} = M_{\text{ф}} \cdot U_{\text{тр } i} \cdot \eta_{\text{тр } i} - M_{\text{ф}} - R_{\text{х}} \cdot r_{\text{д}};\quad (2)$$

$$m \cdot \dot{v} = R_{\text{х}} - P_{\text{х}};$$

$$R_{\text{х}} = \mu \cdot R_{\text{з}};$$

$$\mu = \mu_{\text{max}} \cdot (1 - e^{-\frac{s}{s_0}}) \cdot (1 + e^{-\frac{s}{s_1}});$$

$$s = \frac{\omega_{\text{к}} \cdot r_{\text{к0}} - v}{\omega_{\text{к}} \cdot r_{\text{к0}}};$$

$$M_{\text{т}} = K(i_{\text{ГТ}}) \cdot M_{\text{н}};$$

$$M_{\text{н}} = \lambda(i_{\text{ГТ}}) \cdot \rho \cdot g \cdot D_{\text{а}}^5 \cdot w_{\text{дв}}^2;$$

$$i_{\text{ГТ}} = w_{\text{т}} / w_{\text{дв}},$$

где $J_{\text{дв}}$, $J_{\text{н}}$, $J_{\text{т}}$ – моменты инерции вращающихся и приведенных к ним частей двигателя, насосного и турбинного колеса соответственно, J_2 – момент инерции ведомой части сцепления и кинематически связанных с ней деталей КП; $J_{\Sigma \text{тр, к}}$ – суммарный момент инерции колёс и части трансмиссии после выходного вала КП; $M_{\text{дв}}$, $M_{\text{н}}$, $M_{\text{т}}$ – крутящие моменты двигателя, насосного колеса, турбинного колеса; $w_{\text{дв}}$, $w_{\text{т}}$, w_2 , $w_{\text{к}}$ – соответствующие индексам угловые скорости; $M_{\text{фбл}}$ – момент, передаваемый фрикционной муфтой блокировки ГТ; $M_{\text{ф}}$ – момент, передаваемый фрикционной муфтой КП; $M_{\text{ф}}$ – момент сопротивления качению колес; $U_{\text{тр } i}$, $\eta_{\text{тр } i}$ – передаточное отношение и КПД трансмиссии на i -й передаче в КП; m – масса КМ; v – скорость КМ; $R_{\text{х}}$ – продольная реакция в контакте колес с опорной поверхностью; $r_{\text{д}}$ – динамический радиус колеса; μ – коэффициент взаимодействия (сцепления) колеса с опорной поверхностью; $R_{\text{з}}$ – нормальная реакция опорного основания; s – коэффициент скольжения; s_0 , s_1 – константы, определяющие вид кривой $\mu(s)$; $r_{\text{к0}}$ – радиус чистого качения колеса; μ_{max} – коэффициент взаимодействия колеса с опорной поверхностью при $s \rightarrow \infty$; $P_{\text{х}}$ – сумма внешних сил сопротивления; K – коэффициент трансформации ГТ; $i_{\text{ГТ}}$ – передаточное отношение ГТ; λ – коэффициент момента насосного колеса.

На режиме синхронизации в КП уравнение (2) заменяется 2-мя следующими уравнениями:

$$J_2 \cdot \dot{w}_2 = -\frac{M_{cx}}{U_{кп\ i\pm1}} \cdot \text{sign}\left(\frac{w_2}{U_{кп\ i\pm1}} - \frac{w_k}{U_{гп} \cdot U_{рк}}\right);$$

$$J_{\Sigma\text{тр, к}} \cdot \dot{w}_k = M_{cx} \cdot U_{гп} \cdot U_{рк} \cdot \eta_{\text{тр}}^* \cdot \text{sign}\left(\frac{w_2}{U_{кп\ i\pm1}} - \frac{w_k}{U_{гп} \cdot U_{рк}}\right) - M_f - R_x \cdot r_d,$$

где M_{cx} – момент синхронизации; $U_{кп\ i\pm1}$ – передаточное отношение включаемой в КП передачи; $U_{гп}$, $U_{рк}$ – передаточные числа главной передачи и раздаточной коробки; $\eta_{\text{тр}}^*$ – КПД трансмиссии от синхронизатора до колес.

Для моделирования работы АКП с возможностью переключений без разрыва потока мощности (Рис. 1,б) необходимо заменить уравнения (1) и (2) на следующие:

$$J_T \cdot \dot{w}_T = M_T + M_{\text{фбл}} - M_{\text{фи}} - M_{\text{фи}\pm1};$$

$$J_{\Sigma\text{тр, к}} \cdot \dot{w}_k = M_{\text{фи}} \cdot U_{\text{три}} \cdot \eta_{\text{три}} + M_{\text{фи}\pm1} \cdot U_{\text{три}\pm1} \cdot \eta_{\text{три}\pm1} - M_f - R_x \cdot r_d,$$

где $M_{\text{фи}}$ и $M_{\text{фи}\pm1}$ – момент, передаваемый соответственно выключаемой и включаемой при переключении « $i \rightarrow i\pm1$ » фрикционной муфтой АКП; $U_{\text{три}\pm1}$, $\eta_{\text{три}\pm1}$ – передаточное число и КПД трансмиссии на включаемой передаче ($i\pm1$).

Проверка адекватности математической модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования и испытаний, проведенных на ОАО «МЗКТ» и подтвердила правомерность использования предложенной модели для теоретических исследований работы алгоритмов АКП.

В качестве объекта исследования была использована полноприводная КМ МЗКТ-600100 с двигателем ЯМЗ-7513.10 и ПГМП «МЗКТ-4361». На предварительном этапе исследований проведены тестовые заезды «разгон-выбег» с целью определения коэффициентов учета вращающихся масс и сопротивления качению.



Рис. 2.

КМ МЗКТ-600100 с испытательным оборудованием

Для получения записей процессов движения с цикличностью переключений выполнялись заезды с переменным нажатием педали. Чтобы обеспечить достаточно продолжительное движение с разблокированным ГТ, был выбран скоростной диапазон 2-й и 3-й передач.

При испытаниях регистрировались следующие параметры: частоты вращения колес ГТ и выходного вала КП, скорость шасси, сигналы на переключение передач и блокирование/разблокирование ГТ, давления в бустерах фрикционов АКП, крутящий момент на карданном валу, положение педали акселератора. Запись параметров осуществлялась через ноутбук, подключенный к CAN-шине системы управления АКП. Измерение крутящего момента проводилось через бесконтактный токосъемник, передающий сигнал от термопары на карданном валу к CAN-шине. Кривые изменения давлений на поршни фрикционов АКП при переключениях моделировались по записанным в ходе эксперимента показаниям датчиков давлений.

Рассчитанные и измеренные параметры сопоставляемых процессов – эксперимента и моделирования – имеют различия, не превышающие в экстремальных точках 12% (Рис. 3), что говорит о приемлемой точности математического моделирования. Т. к. имитационные модели ПГМП и ГСК разрабатывались по одной и той же методике при неизменном математическом инструментарии, можно утверждать, что с приемлемой точностью модель переключения передач с разрывом потока мощности в АКП ГСК также адекватна реальному объекту.

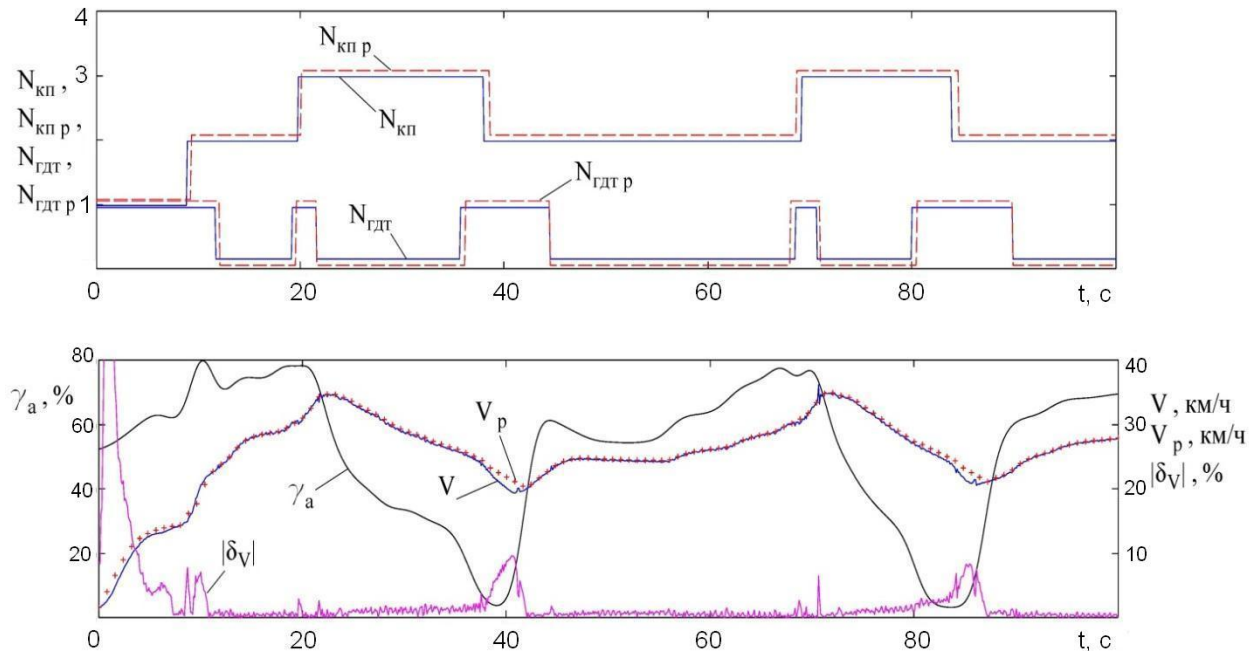


Рис. 3.

Результаты эксперимента и моделирования на ЭВМ:

N_{kp} , $N_{kp\ p}$ – номер передачи АКП, N_{gdt} , $N_{gdt\ p}$ – состояние фрикциона блокировки ГДТ, γ_a – положение педали акселератора, V , V_p – скорость КМ, $|\delta_V|$ – модуль относительной погрешности моделирования скорости. Индексом «р» обозначены графики, полученные моделированием.

В третьей главе проведены синтез и теоретические исследования работы алгоритма АКП ГСК. Проанализированы базовые законы управления и другие параметры алгоритма, их связь с внешними условиями и действиями водителя. В качестве объекта для теоретических исследований выбрана модель КМ, использованной в экспериментальной части работы.

Получение базовых законов переключений передач и блокировок/разблокировок ГТ осуществлено исходя из критерия максимальной средней скорости. Пример карт законов управления приведен на Рис. 4.

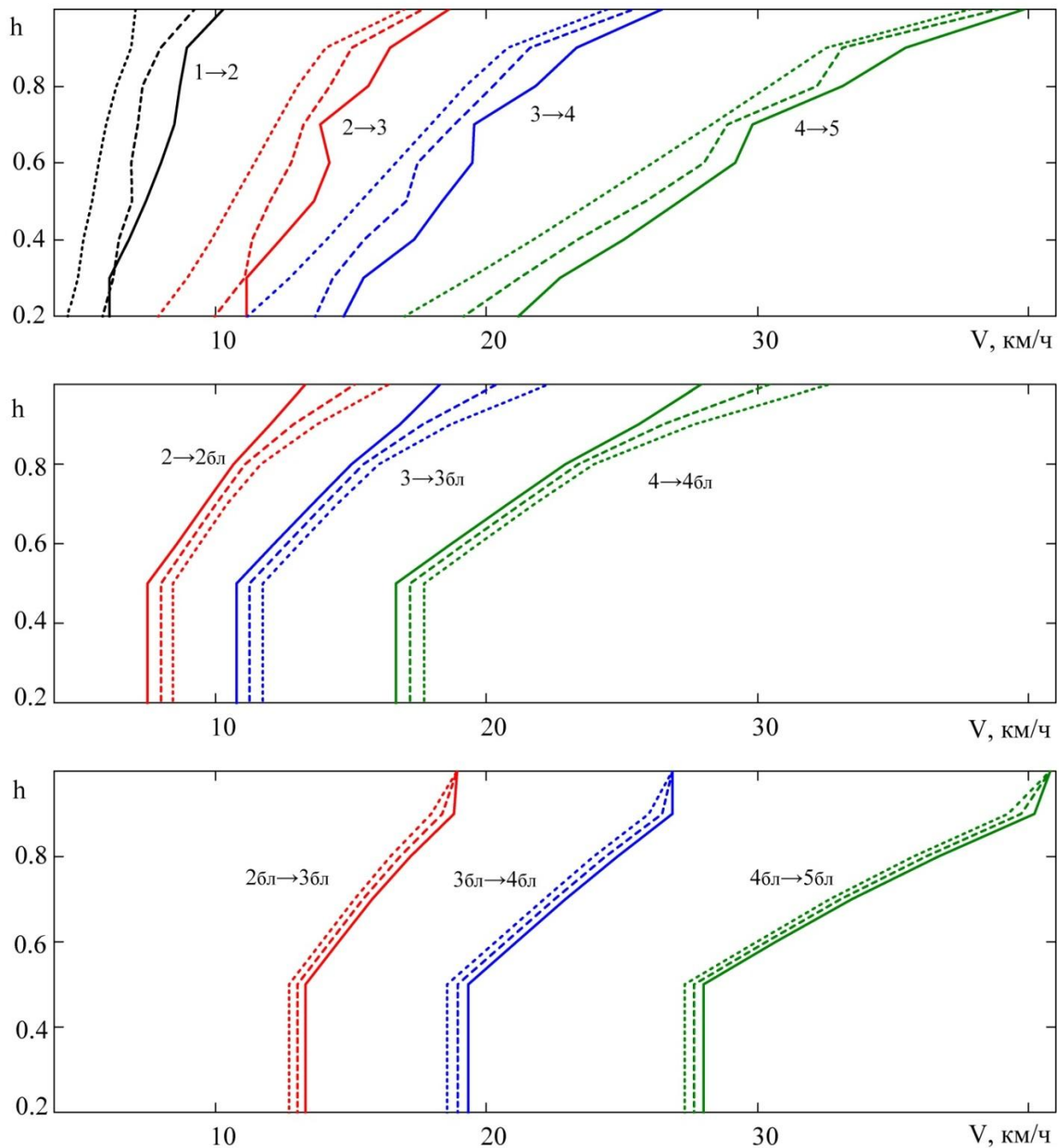


Рис. 4.

Карты законов управления АКП ГСК для различных значений сопротивления движению ψ : $\psi=0,1$, - - $\psi=0,2$, — $\psi=0,3$

По сопоставлению законов управления, рассчитанных для разных уровней сопротивления, видно, что наибольший разброс имеют законы для неблокированных передач, наименьший разброс – законы для блокированных передач. Причем, чем ниже номер передачи, тем больше относительное изменение закона в зависимости от сопротивления. Т.е. можно сделать вывод, что распознавание текущих условий движения важнее для более низких передач.

Сравнение законов, рассчитанных для повышенной и пониженной ступени в раздаточной коробке, показало, что при частом использовании пониженной передачи имеет смысл оснастить машину соответствующим датчиком. Поскольку если не учитывать состояние раздаточной коробки, то закон управления для первой передачи КП будет искажаться на +18% относительно рационального.

Представленных выше законов достаточно для управления только при квазистационарных режимах: разгон, торможение, движение с постоянной скоростью. Их объединяет то, что условия движения и положение педали акселератора (h) постоянны или изменяются достаточно медленно. На практике такие режимы движения составляют далеко не всю часть общего пробега КМ; реальные условия эксплуатации характеризуются резко переменным сопротивлением движению, различными ограничениями скорости. Это требует от водителя часто менять положение педали, что приводит к частым переключениям при алгоритме с фиксированными законами. Устранение нерациональных переключений является одной из главных задач при создании алгоритма работы АКП. Для достижения этого используется множество параметров и логических правил: гистерезис законов переключений, задержки на исполнение команд, зоны нечувствительности (по времени) для предотвращения ложных сигналов от колебательных процессов и случайных действий водителя, условия для переключений с пропуском передач, длительность запрета на управление после фиксации цикличности переключений, угол поворота рулевого колеса, при котором блокируется повышение ступени, условия для обоснованного повышения передачи и др.

Для комплексного исследования и настройки алгоритмов в целом, с учетом динамики процесса движения КМ и разнообразия условий, разработан метод моделирования условий движения с использованием периодических процессов. Метод заключается в формировании условий как сочетания прямых и тяговых ограничений скорости в виде периодических процессов с варьированием их амплитуд, частот и разности фаз. Графическая иллюстрация приведена на Рис. 5.

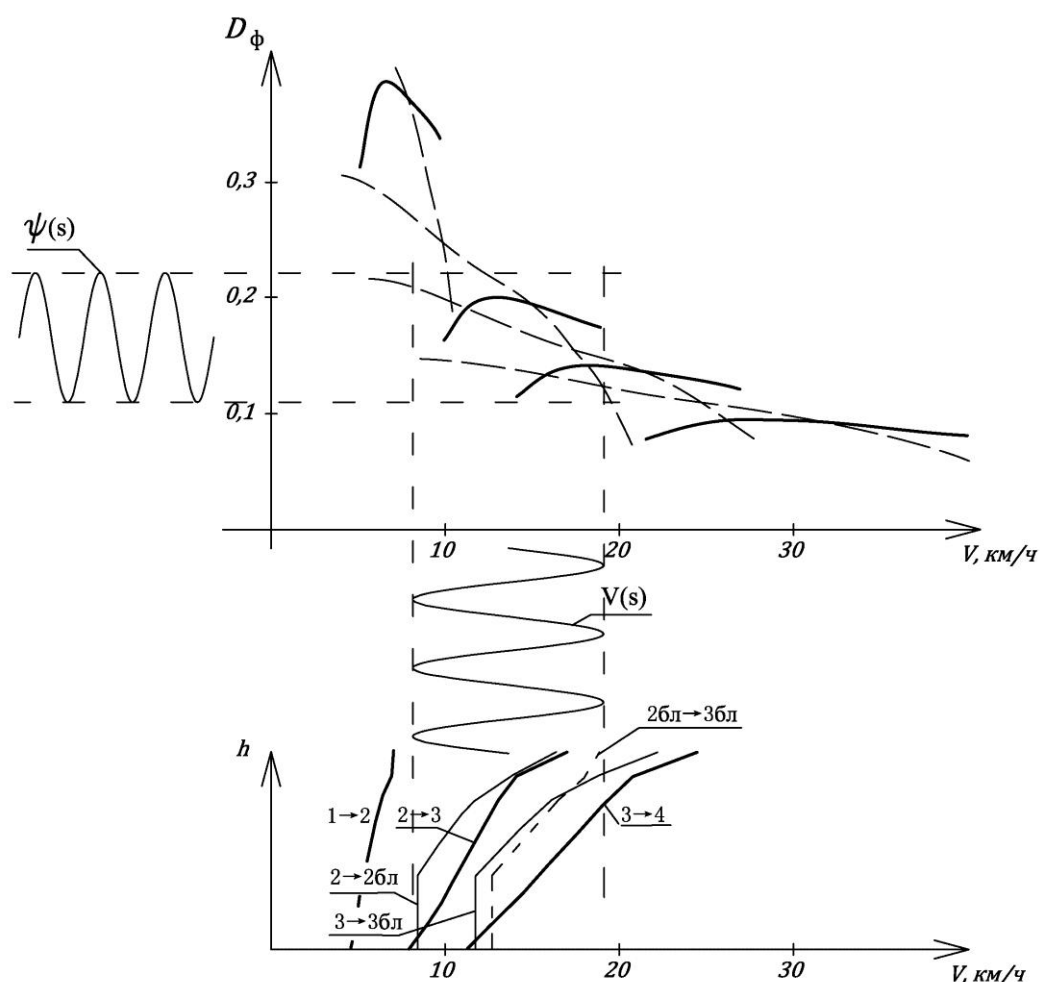


Рис. 5.

Иллюстрация метода моделирования условий движения КМ

Метод основан на том, чтобы поместить КМ в такие условия, которые с высокой вероятностью вызовут появление нерациональности и цикличности в действиях АКП. По тяговым ограничениям скорости это должно достигаться при колебании сопротивления движению в области, близкой к максимуму динамического фактора передачи, высшей для исследуемого закона переключений. По прямым ограничениям – в пределах границ законов управления по координате скорости. Максимальные и минимальные значения частот изменения сопротивления и желаемой скорости определяются из следующих соображений. Поскольку конечная цель – в устранении нерациональных переключений и цикличности, исключаются те частоты, ниже которых передачи будут меняться через длительные отрезки времени, которые дольше максимальных зон нечувствительности алгоритма, т.е. больше 5-6-ти секунд. Максимальные частоты подбираются исходя из 2-х условий, первое – то, что переключения не могут происходить чаще, чем через 1-2 секунды, второе – смена направления хода педали не должна происходить быстрее, чем появиться соответствующий отклик машины по скорости. Таким образом, проведя несколько пробных расчетов, можно определить диапазон частот для

колебаний сопротивления и желаемой скорости. Также, для большей реалистичности, метод можно дополнить постепенным затуханием/нарастанием периодических процессов и вариацией размахов через датчик случайных чисел. На Рис. 3 изображены колебания параметров условий в пределах 2-х передач. Но кроме этого, чтобы гарантированно обеспечить продолжительные участки с полным нажатием педали либо с нулевым нажатием и использованием тормозной системы, также добавлены варианты условий, в которых амплитуды охватывают разное число передач. Т.е., например, если сопротивление соответствует 2-й и 3-й передаче, а скорость в диапазоне от 2-й до 4-й, будут иметь место участки с максимальными нажатиями педали.

Предлагаемый метод моделирования внешних условий в отличие от статистических позволит за более короткое время получить набор сочетаний 2-х факторов для доработки правил алгоритма, а также исключить участки пути с длительным отсутствием переключений (не представляющие интереса). На текущие значения можно влиять через амплитуды, на производные – через частоту либо за счет сочетания амплитуд и частот. Таким образом, при подробном варьировании колебаний, можно проанализировать всевозможные дорожные ситуации, за исключением случаев с «мгновенно-резкими» управляющими действиями водителя.

Путем имитационного моделирования с применением данного метода было получено множество дорожных ситуаций, анализ которых позволил выработать недостающие алгоритмам блоки логических условий, повышающих их эффективность.

По методу с периодическими условиями также проведена оценка эффективности известных подходов к снижению числа нерациональных действий АКП. Установлено, что наиболее эффективным является метод расширения/сужения границ перекрытия передач на карте законов управления.

Усовершенствован метод исключения необоснованных переключений вверх, основанный на проверке достаточного запаса ускорения (Z_a), гарантирующего уверенное движение на высшей передаче. В исходной версии метода не оговорены случаи, когда величина ускорения близка к пороговому значению Z_a , т.е. при явно большей вероятности появления нерационального переключения. В методе также принимается, что текущее сопротивление движению известно, но на практике это редко реализуемо. Для повышения эффективности метода предлагается дополнительно ввести в алгоритм оценку координаты педали и значения ее производной:

при неполном нажатии педали вполне допустим нулевой или малый Z_a (переключение 3→4 на Рис. 6), т.к. после переключения при необходимости будет возможность его повысить разблокировкой ГТ (4(h=100%)). При полном же нажатии нельзя будет компенсировать малое ускорение (переключение 3→4 на Рис. 7). Если до переключения нажатие педали возрастало, что может быть признаком роста сопротивления, то параметр Z_a лучше повысить относительно уровня, выбранного для неподвижной педали.

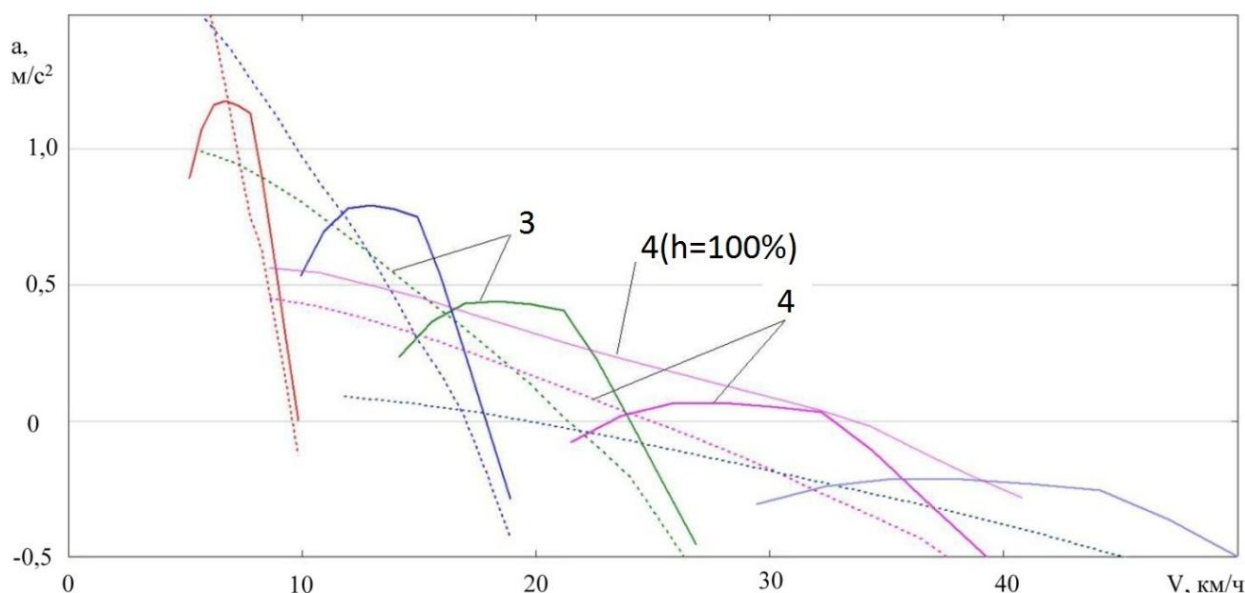


Рис. 6.

Ускорения КМ при неполном нажатии акселератора

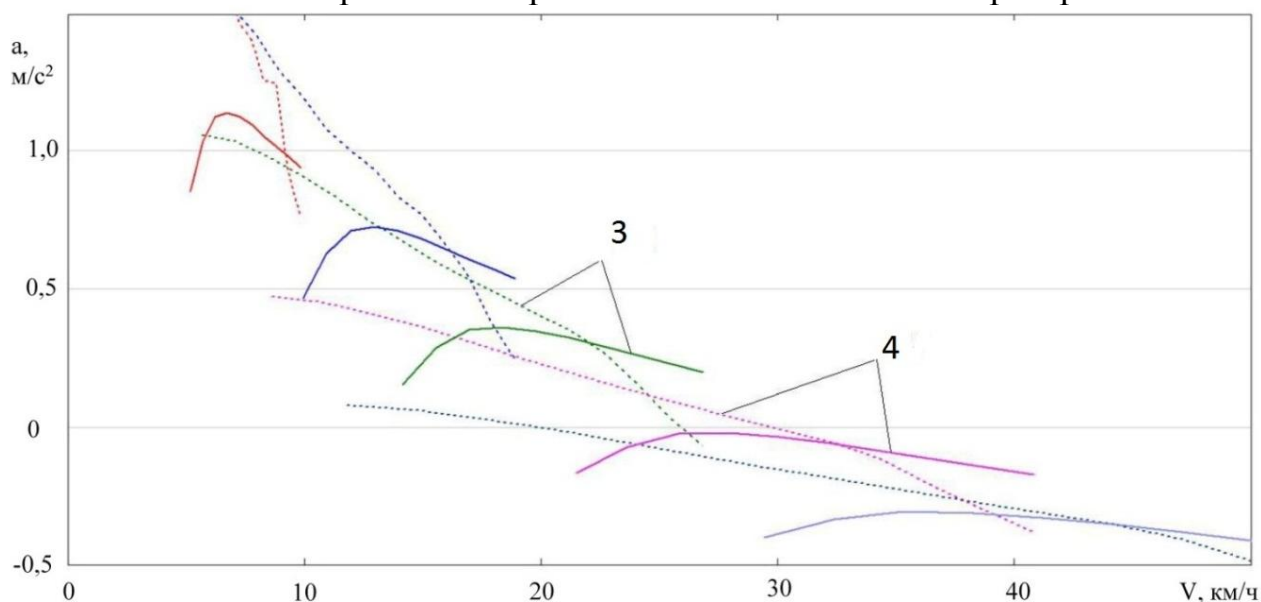


Рис. 7.

Ускорения КМ при полной подаче топлива

Учет в алгоритме потери скорости от разрыва потока мощности показан на Рис. 8. Последовательность процесса движения отмечена точками от 1 до 4. В т.1 происходит движение на 4-й передаче с малой подачей топлива. Выбранная карта законов управления обозначена пунктирными линиями. От роста сопротивления движению происходит снижение скорости до т.2 и педаль нажимается водителем до уровня, близкого к максимальному. Если при этом за время нечувствительности алгоритма ускорение останется отрицательным, то алгоритм примет новую карту законов, соответствующую большему сопротивлению. Линии законов переключений при этом сместятся в правую сторону. Далее алгоритм отнимет от текущей скорости величину падения

скорости при переключении ($\Delta V_{\text{пер}}$) и в соответствии с новым положением педали попадет в точку 4 на новой карте переключений (сплошные линии законов переключений). В итоге координаты педали и скорости будут соответствовать уже не соседней низшей передаче (3-й), а на 2 ступени ниже (2-й), и запустится переключение с пропуском 3-й ступени.

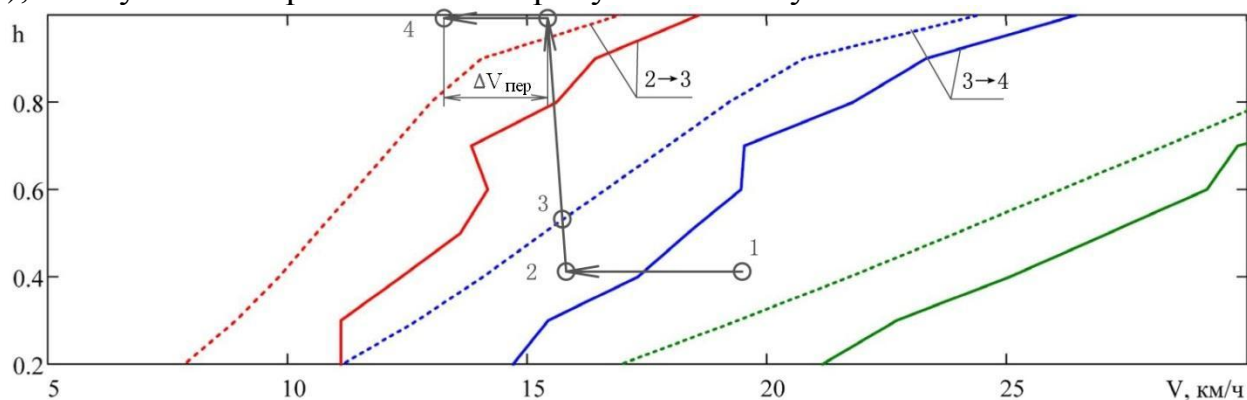


Рис. 8.

Пример учета алгоритмом продолжительности разрыва потока мощности при переключениях

В четвертой главе представлены результаты теоретических исследований динамики КМ с двумя вариантами АКП: ГСК и ПГМП. Объектом исследования выбрана полноприводная КМ «МЗКТ-600100» с двигателем ЯМЗ 7513.10 с всережимным регулятором и планетарной гидромеханической АКП МЗКТ-4361. Сравнение показателей эффективности КМ проведено на основе разработанного в 3-й главе метода моделирования внешних условий, но вместо периодических процессов были использованы реализации случайных с заданными характеристиками.

Для оценки эффективности транспортной работы КМ использованы три показателя: средняя скорость на маршруте, число переключений в АКП, степень соответствия скорости текущим условиям ($S_{\Delta V}$). Показатели топливной экономичности не рассматривались – разработать экономичную программу управления АКП было невозможно в связи с отсутствием данных по кривым расхода топлива для частичных скоростных характеристик двигателя и по влиянию на эти характеристики переходных режимов работы. Но даже при наличии этих данных, сравнение по экономическому критерию ПГМП и ГСК было бы достаточно условным, т.к. сами стоимости этих АКП и их эксплуатации значительно различаются в пользу схемы ГСК.

Диапазон моделируемых условий движения специально ограничен: варианты движения под уклон и с интенсивным буксованием колес не рассматриваются, т.к. для первого преимущество безрывного переключения у ПГМП проявляется в наименьшей степени, для второго – в наибольшей.

Для исследований выбраны 2 диапазона суммарного сопротивления движению: бездорожье и грунтовые дороги в удовлетворительном состоянии. Тяговые и прямые ограничения скорости моделировались в виде реализаций случайных процессов методом неканонических представлений.

Математическое ожидание и дисперсия ограничений скорости выбирались в соответствии с графиками на Рис. 5, так чтобы максимальный размах случайного процесса превышал диапазон по $\psi(s)$, спроецированный через D_ϕ на ось V .

Дополнительно к указанному разделению условий на бездорожье и грунтовые дороги в удовлетворительном состоянии, для обеих выполнена оценка при 2-х вариантах максимальной продолжительности переключения у ГСК: длительностью около 1-й и около 2-х секунд. В Таблице представлены соответствующие результаты моделирования движения КМ:

Результаты сравнения эффективности КМ с АКП ГСК и ПГМП

Условия движения	Показатель	Вариант АКП		Прирост (+) или снижение (-) показателя при переходе от ПГМП к ГСК, %
		ПГМП	ГСК	
Длительность переключения в ГСК ≈1 секунда				
Бездорожье	Средняя скорость, км/ч	10,80	10,47	-3,1
	Переключения, км ⁻¹	23,5	25,1	-2,6
	S _{ΔV} ,%	100	94	-6,0
Грунтовые дороги	Средняя скорость, км/ч	20,4	20,1	-1,5
	Переключения, км ⁻¹	6,27	6,27	≈0
	S _{ΔV} ,%	100	97	-3,0
Длительность переключения в ГСК ≈2 секунды				
Бездорожье	Средняя скорость, км/ч	10,80	9,70	-10,2
	Переключения, км ⁻¹	23,5	22,1	+6,0
	S _{ΔV} ,%	100	64	-36
Грунтовые дороги	Средняя скорость, км/ч	20,4	19,9	-2,5
	Переключения, км ⁻¹	6,27	6,27	≈0
	S _{ΔV} ,%	100	93	-7,0

Сравнение ГСК и ПГМП с одинаковыми ГТ и передаточными числами показало невысокое преимущество ПГМП по средней скорости: от 1,5 до 10,2 % в зависимости от условий движения и быстроты переключений в ГСК. В условиях бездорожья установлено преимущество ГСК по малому числу переключений, обусловленное: 1) пропуском законов на карте переключений за время падений скорости при разрывах потока мощности (переключения «через передачу»); 2) адаптацией гистерезиса законов управления за счет фиксации величины падения скорости при долгих (≈ 2 сек.) переключениях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Сравнительный анализ различных конструкций АКП показал, что ГСК является наиболее универсальным вариантом, выбор которого позволит:

сэкономить время на разработку законов управления АКП для режимов трогания, маневрирования, торможения двигателем; сохранить унификацию между ручными и автоматическими КП; обеспечить сохранение функциональности в случае отказа электроники; снизить число переключений за счет повышения приспособляемости АКП с гидропередачей к изменяющимся внешним условиям (по сравнению с механическими КП).

2. Разработаны математические модели КМ с ГСК и с ПГМП, особенностью которых является имитация совместной работы всех компонентов: двигателя, ГП с муфтой блокирования, сцепления или многодисковых муфт, синхронизаторов, колесного движителя. Результаты экспериментального исследования подтвердили корректность допущений, касающихся работы двигателя, возможности не учитывать упругодемпфирующие свойства трансмиссии и колес, схематизированной кинематической характеристики фрикционных муфт. Разница между расчетными результатами и экспериментальными измерениями не превысила 12% за исключением первых секунд начала движения машины. Моделирование процесса движения КМ с помощью разработанных моделей позволит проводить разработку алгоритмов АКП в части выборов моментов переключений и блокировок ГП, оценивать тягово-скоростные свойства КМ и совершенство алгоритма АКП, а также сравнить эффективность ГСК и ПГМП.

3. Рациональные (по критерию максимальной средней скорости) законы переключений существенно изменяются лишь при смене сопротивления из области низших передач в область высших передач КП.

4. При диапазоне сопротивления движению $0,1 \dots 0,3$ сложность (учет большого числа параметров) алгоритма переключения передач и управления блокировкой гидропередачи гораздо больше влияет на количество соответствующих действий АКП на единицу пути, нежели на среднюю скорость. Последняя в зависимости от алгоритма варьируется в пределах $\pm 4\%$ при относительно быстрых переключениях (до 1 секунды), $\pm 7\%$ при медленных переключениях (от 1,9 до 2,2 секунд).

5. Установлено, что при снижении массы КМ с полной (24 т) до снаряженной (14 т) в условиях бездорожья рационально повышение минимальных интервалов по времени между сигналами на управление АКП с 2 до 4 секунд.

6. Разработанные принципы адаптации законов управления, основанные на учете углового ускорения выходного вала АКП, положения педали акселератора и скорости ее перемещения, а также длительности переключений при моделировании дали сокращение числа нерациональных действий АКП на 8%.

7. Сравнение ГСК и ПГМП с одинаковыми ГТ и передаточными числами показало невысокое преимущество ПГМП по средней скорости: от 1,5 до 10,2 % в зависимости от условий движения и быстроты переключений в ГСК. Таким образом, с учетом статистических распределений пробегов колесных машин по передачам КП и в различных дорожных условиях, разрыв потока мощности при

переключениях незначительно влияет на быстроходность КМ. АКП ГСК целесообразно применять на колесных машинах за исключением тех, которые предназначены для постоянной эксплуатации в условиях тяжелого бездорожья.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Васильев В.В., Котиев Г.О., Горбатовский А.В. Анализ конструкций коробок передач колесных машин для эксплуатации в тяжелых условиях // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. Эл № ФС 77-48211. 2015. № 4. С. 29-40. (0,69 п.л./0,38 п.л.).
2. Теоретическое исследование буксования движителя в начале движения автомобиля, оснащенного различными трансмиссиями, на деформируемом грунте / В.В. Васильев [и др.]. Журнал Автомобильных Инженеров. 2016. №1 (96). С.5-7; №2. С.12-14. (0,7 п.л. / 0,36 п.л.).
3. Васильев В.В., Котиев Г.О., Горбатовский А.В. Оценка эффективности применения автоматической трансмиссии типа гидротрансформатор – сцепление – коробка передач // Тракторы и сельхозмашины. 2016. №2. С. 16-20. (0,56 п.л./0,27 п.л.).
4. Васильев В.В. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований алгоритмов управления автоматическими трансмиссиями колесных машин // Журнал Автомобильных Инженеров. 2017. №1 (102). С.18-24. (0,88 п.л.).