

На правах рукописи  
УДК 629.113, 303.732

**Бузунов Николай Викторович**

МЕТОД РАЗРАБОТКИ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ  
НАГРУЖАТЕЛЕМ РУЛЕВОГО КОЛЕСА ПРИ  
ОТСУТСТВИИ «ЖЕСТКОЙ» СВЯЗИ В СИСТЕМЕ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Специальность  
05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

**Кушвид Рубен Петрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ООО «Наземные транспортные системы»,  
советник генерального директора

**Курмаев Ринат Ханяфиевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»,  
заведующий конструкторским отделом  
проектирования и макетирования  
комбинированных энергоустановок

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-  
дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)»**

Защита состоится « 22 » мая 2017 г. в 16-30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по указанному адресу.

Автореферат разослан «    »                      2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Сарач Е. Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Для длиннобазовых колесных машин с большим числом управляемых колес и значительным их удалением от рулевого колеса (РК) реализация рулевых систем при наличии механической связи рулевого и управляемых колес вызывает значительные технические трудности, несмотря на высокую степень надежности данного типа рулевого управления. Данный факт связан с большим числом рулевых тяг и шарниров, вследствие чего повышается масса элементов рулевого управления и снижается жесткость рулевого привода. Помимо этого, для рассматриваемого типа рулевого управления весьма серьезной конструкторской задачей является реализация законов управления поворотом колес с регулируемым смещением полюса рулевого управления.

Альтернативой данному типу рулевого управления может являться гидрообъемное рулевое управление (ГОРУ). В системах рулевого управления данного типа одним из основных элементов является насос-дозатор, представляющий собой обратимую гидравлическую машину. Данный узел, помимо обеспечения преобразования угла поворота рулевого колеса в соответствующий угол поворота управляемых колес и снижения усилий на рулевом колесе при выполнении маневра, позволяет формировать момент сопротивления на рулевом колесе ввиду своей обратимости.

ГОРУ представляет собой гидравлическую передачу высокого давления, что обуславливает повышенное внимание к надежности и безопасности ее эксплуатации. В этой связи ГОРУ не рекомендовано к применению на транспортных средствах, скорость движения которых выше 50 км/ч.

Представленные факты способствуют применению на колесных машинах автоматизированных рулевых систем при отсутствии кинематической «жесткой» связи рулевого колеса (задатчика управляющего воздействия) и управляемых колес. Поворот управляемых колес в данном случае может осуществляться как с использованием электрического привода, так и с использованием гидрообъемной передачи, выработка управляющих воздействий для которых выполняется автоматизированной системой управления в соответствии с законом криволинейного движения. Особенностью данных рулевых систем является необходимость применения дополнительных компонентов с целью создания на рулевом колесе реактивного момента сопротивления повороту для обеспечения информативности рулевого управления и реализации так называемого чувства дороги. Непосредственно формирование момента сопротивления осуществляется при помощи электромашины, монтируемой на конце рулевого вала. Управление электронагружателем выполняется при помощи электронного блока на основе микропроцессорной системы.

Для подобных вспомогательных систем характерна следующая особенность: выполнение отладочных мероприятий управляющей программы, проверка правильности функционирования аппаратной части, а также

отработка и корректировка базовых законов управления (в данном случае – закона формирования момента сопротивления) могут быть произведены в полном объеме только непосредственно на объекте. Ввиду специфики выполняемых разрабатываемой системой управления функций и невозможности осуществления представленных выше доводочных мероприятий в отсутствии объекта возникают значительные временные потери, связанные с ожиданием изготовления опытного образца объекта колесной техники. Данный факт приводит к увеличению времени выполнения ОКР в целом.

Рулевые системы транспортного средства оказывают непосредственное влияние на безопасность эксплуатации колесной машины. Соответственно, данное свойство в значительной степени определяется правильностью функционирования используемых в рулевых системах электронных модулей. Описанные выше «простои» при разработке автоматизированных систем рулевого управления уменьшают общее время отладки наиболее важных электронных компонентов, а выполнение экстремальных маневров на высоких скоростях движения в ходе проведения заводских или предварительных испытаний при недостаточно отработанной системе управления повышает риск травмирования водителя-испытателя и (или) повреждения опытного образца объекта.

**Цель работы:** повышение безопасности криволинейного движения на этапах разработки и эксплуатации многоосного колесного шасси (МКШ), оснащенного электронагружателем рулевого колеса с цифровой системой управления, при отсутствии «жесткой» (механической) связи рулевого и управляемых колес.

Достижение поставленной цели осуществляется путем использования при составлении технических требований и на этапе разработки системы управления электронагружателем рулевого колеса (СУ ЭНРК) метода разработки законов управления нагружателем рулевого колеса, в основе которого лежит применение имитационных математических моделей «реального времени» динамики МКШ (ИММРВ МКШ).

В работе решены следующие **основные задачи:**

- создание и подтверждение адекватности метода разработки законов управления электронагружателем рулевого колеса системы рулевого управления МКШ;
- разработка и верификация имитационной математической модели динамики криволинейного движения МКШ, функционирующей в режиме «реального времени»;
- реализация взаимодействия системы управления электронагружателем рулевого колеса с верифицированной имитационной математической моделью криволинейного движения МКШ «реального времени»;
- определение параметров закона формирования реактивного момента на рулевом колесе, реализованного в настоящее время в опытном образце

бортовой информационно-управляющей системы объекта МКШ специального назначения.

### **Методы исследований**

Исследование производилось с использованием комплекса программных средств, созданного при выполнении данной работы, который включает в своем составе:

- имитационную модель динамики криволинейного движения МКШ, функционирующую в режиме «реального времени»;
- программные средства визуализации для отображения текущего положения на плоскости виртуального шасси и параметров движения в режиме «реального времени».

Экспериментальные исследования осуществлялись в составе объекта специальной колесной техники. Данные мероприятия были направлены на оценку взаимодействия системы управления электронагружателем рулевого колеса с верифицированной моделью «реального времени» и последующее подтверждение адекватности имитационной модели «реального времени» динамики МКШ.

### **Научная новизна заключается:**

- в создании метода разработки законов управления электронагружателем рулевого колеса, отличающегося применением имитационной математической модели «реального времени» динамики криволинейного движения МКШ для отработки программной и аппаратной частей системы управления электронагружателем рулевого колеса на ранних этапах выполнения ОКР в отсутствии опытного образца объекта;

- в разработке и реализации имитационной математической модели динамики криволинейного движения МКШ, отличающейся:

- 1) возможностью моделирования физических явлений в режиме «реального времени» с точностью, достаточной для решения задач исследования;
- 2) возможностью организации взаимодействия с цифровой системой управления электронагружателем рулевого колеса, реализованной на аппаратном уровне;

- в результатах определения параметров базового закона управления электронагружателем рулевого колеса из состава системы рулевого управления МКШ с колесной формулой 8х8 с использованием разработанной модели «реального времени» динамики МКШ.

**Достоверность** научных результатов: в ходе верификации модели «реального времени» динамики МКШ установлено, что средние и максимальные значения относительных погрешностей параметров модели «реального времени» при сравнении с параметрами «эталонной» модели не превысили заданных критериев адекватности в 2% и 5% соответственно.

**Практическая ценность работы** заключается в разработке комплекса программных средств:

- реализованная на языке программирования высокого уровня (C++) имитационная математическая модель «реального времени» динамики МКШ;
- реализованный на языке программирования высокого уровня (C#) интерфейс графической визуализации для отображения положения и параметров движения модели колесной машины при выполнении виртуальных маневров.

### **Реализация результатов работы**

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также применяются при выполнении НИР и ОКР НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «КАМАЗ».

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на 75-ой всероссийской научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ в 2017 г. (г. Москва);
- на научных семинарах кафедры СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации:** по материалам диссертации опубликованы три научные работы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом 2,11 п. л.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 186 листе машинописного текста, содержит 88 рисунков, 14 таблиц. Библиография работы содержит 152 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, заключающаяся в совершенствовании методов разработки электронных бортовых систем, входящих в состав автоматизированного рулевого управления колесной машины (система управления электронагружателем рулевого колеса), а также базовых законов и алгоритмов функционирования, лежащих в основе работы указанных систем, что позволяет повысить безопасность движения и управления объектом колесной техники. Помимо этого, сформулирована цель исследования, приведено краткое содержание выполненного исследования, представлены основные положения, которые выносятся на защиту.

В **первой главе** представлен анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных моделированию (как в режиме «непрерывного», так и в режиме «реального времени») в процессе исследования и разработки объектов колесной техники, а также вопросам проектирования и использования автоматизированных систем рулевого управления в отсутствии «жесткой» (механической) связи рулевого и управляемых колес. Помимо этого, в данной главе представлена классификация рулевых систем, применяемых в настоящее

время в составе объектов колесной техники, и отмечены преимущества автоматизированных рулевых систем по сравнению с системами других типов.

Особенно выделены работы отечественных и зарубежных исследователей Бахмутова С.В., Ведерникова А.А., Воробьева Н.П., Гладова Г.И., Горелова В.А., Дульцева В.С., Жилейкина М.М., Литвинова А.С., Михайлова В.В., Мурог И.А., Полунгяна А.А., Петренко А.М., Рязанцева В.И., Смирнова Г.А., Трача С.И., Кушвида Р.П., Mogi K., Sugai T., Suzuki N., Mostefai L., Geng C., Parsania P., Saradava K., Wang C., Zhou D., Limroth J., Shimizu N., а также труды научных школ Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана (МГТУ им. Н.Э.Баумана), Московского политехнического университета (МАМИ), Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института (НАМИ), НИИЦ Автомобильной техники 3 ЦНИИ МО РФ.

В итоги главы были вынесены основные задачи диссертации, решению которых посвящены остальные главы.

Во **второй главе** представлено описание имитационной модели криволинейного движения МКШ, которая легла в основу модели «реального времени», а также дано решение задач, применительно к движению колесных машин, с которыми сталкиваются разработчики моделей «реального времени».

Рассматриваемый метод проектирования системы управления электронагружателем рулевого колеса предполагает использование на ранних этапах разработки имитационной математической модели «реального времени», описывающей динамику криволинейного движения колесной машины. В ходе исследования в качестве базовой («эталонной») динамической модели применялась имитационная модель криволинейного движения колесного шасси, разработанная в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре колесных машин.

В рассматриваемой модели динамики движение колесной машины как твердого тела рассматривается в горизонтальной плоскости на ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс (Рис. 1).

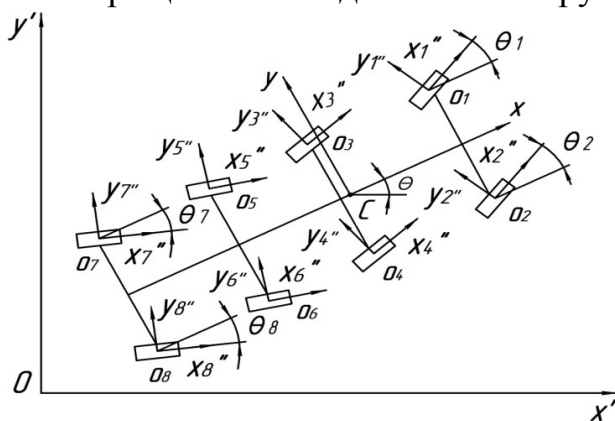


Рис. 1. Системы координат, использующиеся при моделировании криволинейного движения МКШ с колесной формулой 8x8

На Рис. 1 используются следующие условные обозначения:

$x' - O - y'$  – неподвижная система координат (НСК) ;

$x - C - y$  – подвижная система координат (ПСК), связанная с центром масс объекта;

$x_i'' - O_i - y_i''$  – подвижная система координат, связанная с осью вращения  $i$ -ого колеса;

$\Theta$  – курсовой угол модели колесной машины;

$\theta_i$  – угол поворота  $i$ -ого колеса.

Параметры виртуального шасси представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры виртуального шасси

| Наименование параметра                                                   | Значение |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| Масса, кг:                                                               | 29600    |
| Длина, м:                                                                | 6,15     |
| Колея, м:                                                                | 2,6      |
| Высота центра масс, м:                                                   | 1,38     |
| Статический радиус колеса, м:                                            | 0,725    |
| Момент инерции МКШ вокруг вертикальной оси, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ | 110105   |
| Максимальная мощность электродвигателей мотор-колес, Вт                  | 60000    |

Система уравнений (1), описывающая данное движение, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующим на колесную машину со стороны опорной поверхности и окружающей среды:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x = \frac{dV_x}{dt} - \omega_z \cdot V_y = \frac{1}{m} \cdot \left( P_{wx} + \sum_{i=1}^8 R_{xi} \right) \\ a_y = \frac{dV_y}{dt} + \omega_z \cdot V_x = \frac{1}{m} \cdot \left( P_{wy} + \sum_{i=1}^8 R_{yi} \right) \\ J_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^8 M_{mki} + \sum_{i=1}^8 M(\vec{R}_i) \\ V_{x'} = \frac{dx'}{dt} = V_x \cdot \cos \theta - V_y \cdot \sin \theta \\ V_{y'} = \frac{dy'}{dt} = V_x \cdot \sin \theta + V_y \cdot \cos \theta \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $m$  - масса автомобиля;  $J_z$  - момент инерции колесной машины относительно оси  $z$  (центра масс);  $\vec{V}$  - вектор скорости центра масс колесной машины;  $\vec{a}$  -

вектор ускорения центра масс колесной машины (абсолютная производная от вектора скорости центра масс автомобиля);  $\frac{d\vec{V}}{dt}$  - относительная производная от вектора скорости центра масс колесной машины;  $\omega_z$  - угловая скорость поворота колесной машины вокруг центра масс;  $\theta$  - угол поворота колесной машины относительно оси  $x'$ ;  $\vec{R}_i$  - вектор силы взаимодействия с опорным основанием, действующей на  $i$ -ое колесо;  $\vec{P}_w$  - вектор силы сопротивления воздуха;  $M_{nki}$  - момент сопротивления повороту  $i$ -го колеса.

Расчетная схема, применяемая для определения сил и скоростей отдельного колеса объекта (как по модулю, так и по направлению), представлена на Рис. 2.

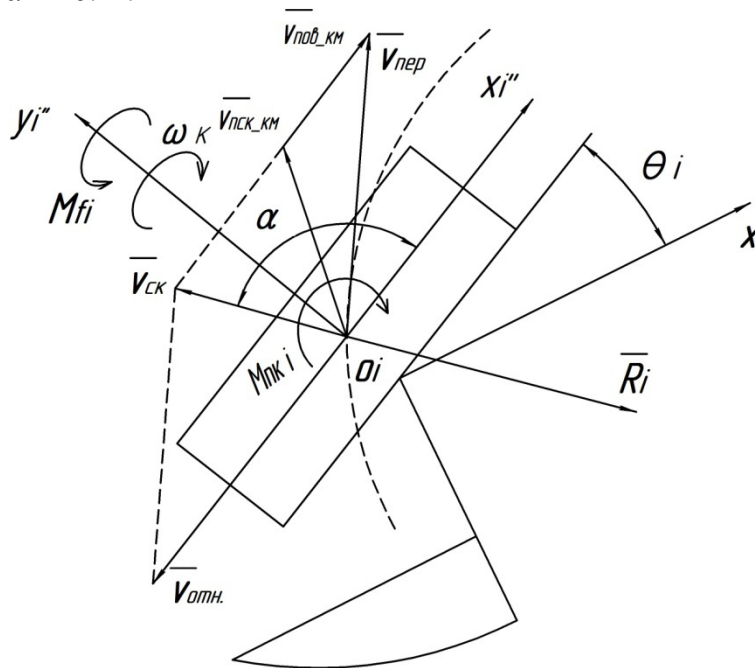


Рис. 2. Расчетная схема колеса

На Рис. 2 представлены следующие условные обозначения:

$\vec{V}_{ск}$  – вектор скорости скольжения точки контакта колеса относительно опорной поверхности;

$\vec{V}_{отн.}$  – вектор относительной скорости колеса в пятне контакта;

$\vec{V}_{пер}$  – вектор переносной скорости центра вращения колеса  $O_i$  (вектор скорости точки ПСК  $x - C - y$ , с которой в настоящий момент связан центр  $O_i$  ПСК  $x_i'' - O_i - y_i''$ , относительно НСК  $x' - O - y'$ );

$\vec{V}_{пск\_км}$  – вектор линейной скорости поступательного движения центра масс колесной машины в НСК  $x' - O - y'$ ;

$\vec{V}_{пов\_км}$  – вектор линейной скорости вращательного движения центра  $i$ -ого колеса вокруг центра масс колесной машины;

$\alpha$  – угол поворота вектора скорости скольжения колеса относительно оси  $x_i''$  системы  $x_i'' - O_i - y_i''$ ;

$\omega_k$  – угловая скорость вращения  $i$ -ого колеса;

$\vec{R}_i$  – сила взаимодействия с опорной поверхностью  $i$ -ого колеса;

$\theta_i$  – угол поворота  $i$ -ого колеса;

$M_{fi}$  – момент сопротивления качению  $i$ -ого колеса;

$M_{nki}$  – момент сопротивления повороту  $i$ -ого колеса.

На МКШ, рассматриваемом в ходе настоящего исследования, применяется схема трансмиссии с индивидуальным электроприводом каждого колеса. Дифференциальное уравнение динамики вращения каждого колеса при данной схеме раздачи мощности представляется в следующем виде:

$$J_K \cdot \dot{\omega}_K = M_D - M_C, \quad (2)$$

где  $J_K$  – момент инерции колеса;  $\dot{\omega}_K$  – угловое ускорение вращения колеса;  $\omega_K$  – угловая скорость вращения колеса;  $M_D$  – крутящий момент приводного электродвигателя;  $M_C$  – момент сопротивления, приведенный к валу тягового электродвигателя.

Схема трансмиссии при индивидуальном приводе представлена на Рис. 3.

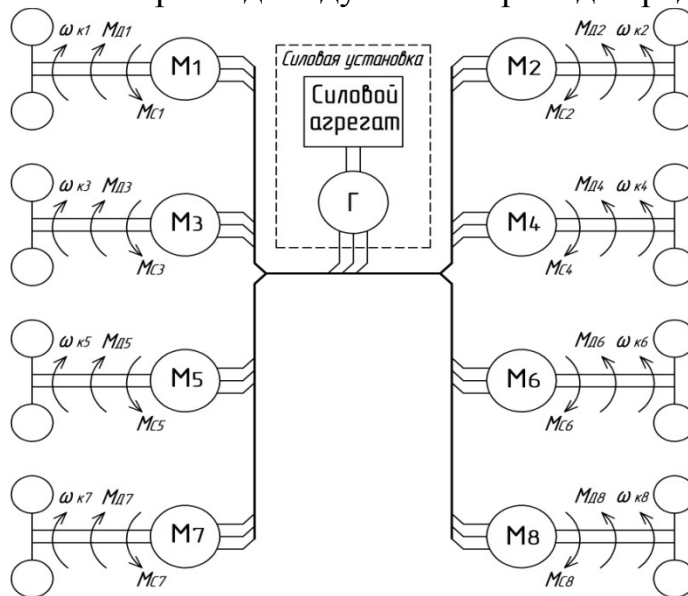


Рис. 3. Схема трансмиссии при индивидуальном электроприводе колес:

$\omega_{k1} \dots \omega_{k8}$  – угловые скорости вращения колес;

$M_{Д1} \dots M_{Д8}$  – крутящие моменты приводных электродвигателей;

$M_{С1} \dots M_{С8}$  – моменты сопротивления, приведенные к валам приводных электродвигателей;

$M_1 \dots M_8$  – приводные электродвигатели;

Г – генераторная установка

Реализация системы дифференциальных уравнений (1) осуществляется при помощи неявного метода численного интегрирования систем дифференциальных уравнений с применением производных высших порядков.

Верификация имитационной математической модели «реального времени» осуществлялась путем сравнения динамических параметров движения виртуальной колесной машины (координаты, скорость и ускорение центра масс, курсовой угол, угловые скорость и ускорение поворота вокруг центра масс) с аналогичными параметрами «эталонной» модели в различных условиях движения при выполнении следующих видов маневров:

- прямолинейное движение с ускорением и замедлением;
- движение при «ступенчатом» воздействии на рулевое колесо – реакция на «рывок» руля;
- движение при синусоидальном воздействии на рулевое колесо.

По результатам верификации установлено, что средние и максимальные значения относительных погрешностей при сравнении соответствующих параметров «эталонной» модели и модели «реального времени» не превышают заданных критериев адекватности в 2% и 5% соответственно. Таким образом, подтверждена адекватность автономной работы имитационной математической модели «реального времени» динамики криволинейного движения МКШ при точности имитационного моделирования  $\varepsilon = 0,003$  в относительном выражении и минимальном шаге реализации 0,0035 с.

В **третьей главе** отражена организация взаимодействия ИММРВ МКШ с опытным образцом системы управления электронагружателем рулевого колеса из состава объекта МКШ специального назначения, а также представлена верификация ИММРВ МКШ при совместной работе с действующей системой управления.

Обмен данными СУ ЭНРК с бортовой информационно-управляющей системой (БИУС) объекта осуществляется по цифровому CAN-интерфейсу при штатной скорости обмена 250 кбит/с в соответствии с протоколом информационно-логического взаимодействия (далее - Протокол ИЛВ), основанного на стандарте SAE J1939. Выходными параметрами для СУ ЭНРК являются текущий угол поворота рулевого колеса, а также величина реактивного момента, развиваемого электронагружателем на рулевом колесе; в качестве входного параметра выступает требуемый момент сопротивления на рулевом колесе, величина которого вычисляется БИУС объекта в соответствии с представленным ниже выражением:

$$M_c = K \cdot \left( -k_1 \cdot \alpha - k_2 \cdot \dot{\alpha} - k_3 \cdot \left( \alpha - \frac{\theta_1}{i_{pn}} \right) - k_4 \cdot \left( \dot{\alpha} - \frac{\dot{\theta}_1}{i_{pn}} \right) \right), \quad (3)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления на рулевом колесе, Н·м;  $\alpha$  – замеренное значение угла поворота рулевого колеса, рад;  $\dot{\alpha}$  – первая производная по времени угла поворота рулевого колеса, рад/с;  $\theta_1$  – замеренное значение угла поворота переднего левого колеса шасси, рад;  $\dot{\theta}_1$  – первая производная по

времени угла поворота переднего левого колеса шасси, рад/с;  $i_{pn} = \frac{\theta_{треб}}{\alpha}$  –

передаточное отношение рулевого привода;  $\theta_{треб}$  – требуемое значение угла поворота переднего левого колеса, рад;  $K, k_1 \dots k_4$  – коэффициенты усиления,  $k_1 = 3$  Н·м/рад,  $k_2 = 1$  Н·м/с<sup>-1</sup>,  $k_3 = 0.2$  Н·м/рад,  $k_4 = 1$  Н·м/с<sup>-1</sup>,  $K = 3$ .

ИММРВ МКШ выступает в качестве имитатора БИУС объекта, вследствие чего предварительно в ИММРВ МКШ был реализован соответствующий Протокол ИЛВ для обеспечения возможности работы с СУ ЭНРК по

цифровому каналу связи в составе объекта. Вычисление требуемого реактивного момента в ИММРВ МКШ осуществляется специальным программным модулем в соответствии с выражением (3) на основе данных о текущем угле поворота рулевого колеса (поступают от СУ ЭНРК), скорости поворота рулевого колеса (вычисляется ИММРВ МКШ) и рассогласовании углов поворота рулевого и управляемых колес (вычисляется ИММРВ МКШ).

На Рис. 4 представлено изображение рабочего места при проведении исследования модели «реального времени» МКШ в составе объекта.



Рис. 4. Рабочее место исследования ИММРВ МКШ в составе объекта:

- 1 - персональный компьютер, на котором осуществляется функционирование модели «реального времени» и отображение МКШ через интерфейс визуализации;
- 2 - датчик положения педалей акселератора и тормоза;
- 3 - рулевое колесо (штурвал) из состава объекта;
- 4 - электронагрузчик рулевого колеса;
- 5 - датчик углового положения рулевого колеса;
- 6 - USB-to-CAN преобразователь IXXAT

Исследование совместной работы ИММРВ МКШ с СУ ЭНРК осуществлялось при выполнении типовых виртуальных маневров «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м» и «Поворот  $R_{\Pi} = 35$  м» по ГОСТ 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний». В качестве примера на Рис. 5 представлена экранная форма интерфейса визуализации при выполнении типового маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м», а Рис. 6 отображает соответствующее изменение момента сопротивления на рулевом колесе при выполнении данного маневра.

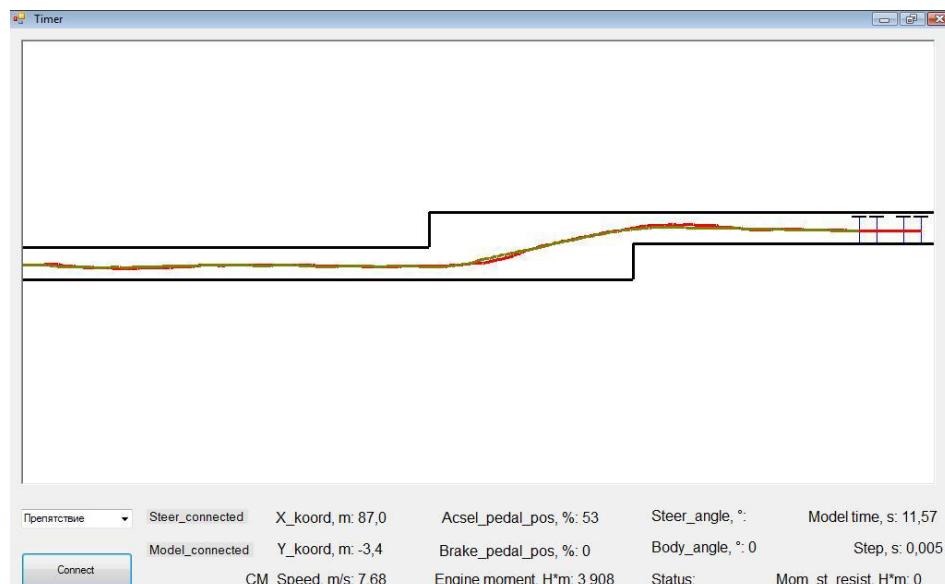


Рис. 5. Экранная форма интерфейса визуализации по результатам виртуального заезда с выполнением маневра типа «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м» с моментом сопротивления на рулевом колесе

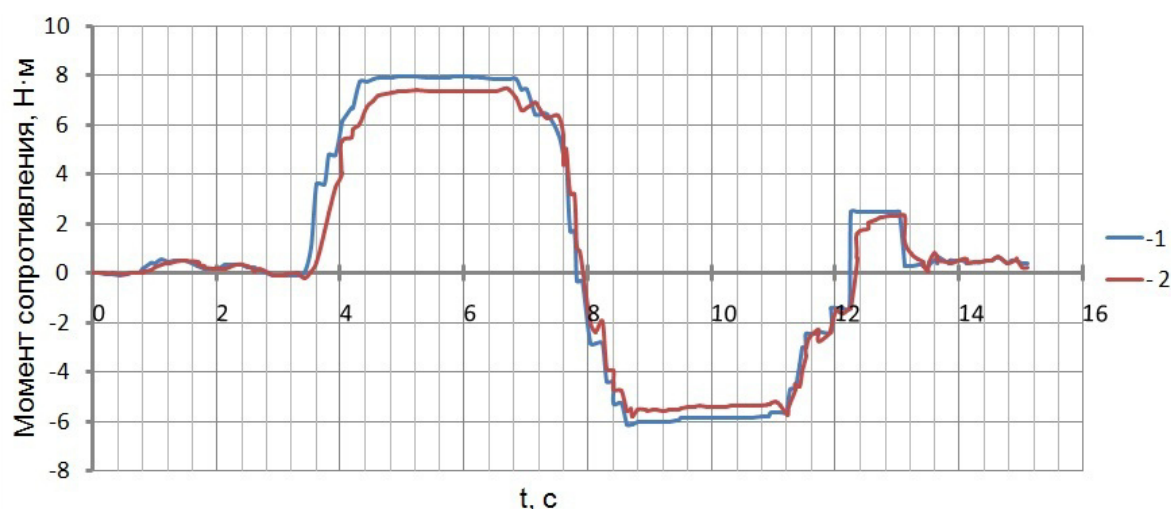


Рис. 6. Моменты сопротивления на рулевом колесе при выполнении типового маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м» на скорости 25 км/ч:  
1 - требуемый момент сопротивления на РК, рассчитанный ИММРВ МКШ;  
2 - текущий момент сопротивления на РК по данным от СУ ЭНРК

Верификация работы ИММРВ МКШ во взаимодействии с физической системой управления осуществляется по аналогии с верификацией автономной работы ИММРВ МКШ с той разницей, что в качестве критериев адекватности в данном случае выступают значения средней и максимальной относительной погрешности в 3% и 10% соответственно. По результатам данного вида работы были сделаны следующие выводы:

- подтверждена возможность и адекватность работы ИММРВ МКШ при взаимодействии с внешней физической системой управления при выбранных параметрах моделирования;

- подтверждена корректность работы бортовой системы управления с ИММРВ МКШ.

В **четвертой главе** представлено подробное описание метода разработки системы управления электронагружателем рулевого колеса.

Рассматриваемый метод разработки позволяет в значительной степени разрешить трудности, с которыми сталкиваются разработчики систем управления на ранних этапах проектирования. Основные этапы настоящего метода разработки отражены на Рис. 7.

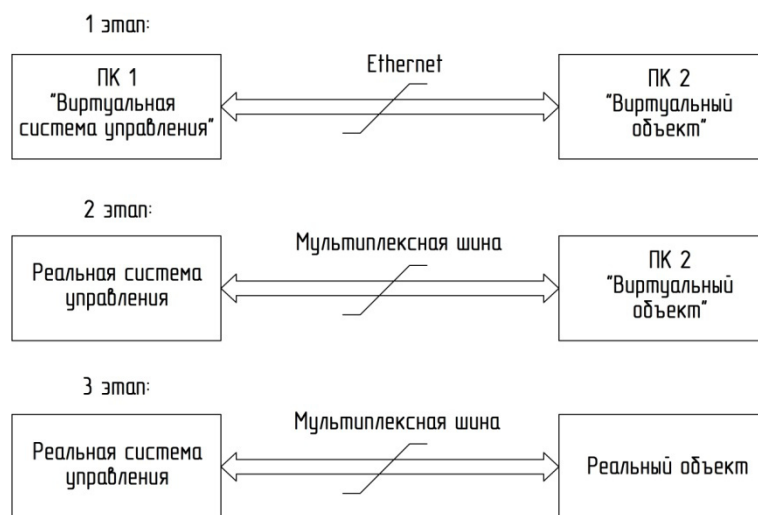


Рис. 7. Последовательность перехода от ИММРВ СУ ЭНРК и виртуального объекта колесной техники к опытным образцам СУ ЭНРК и объекта колесной техники

В данном случае применяются следующие обозначения:

«ПК» – персональный компьютер;

«Виртуальная систем управления» – имитационная математическая модель «реального времени» разрабатываемой СУ ЭНРК;

«Виртуальный объект» – имитационная математическая модель «реального времени» разрабатываемого объекта колесной техники;

«Реальная система управления» – опытный образец СУ ЭНРК;

«Реальный объект» – опытный образец объекта колесной техники.

Первый этап метода разработки, т. е. работа по схеме «Виртуальная система управления – Виртуальный объект», позволяет более детально и в большем объеме прорабатывать требования и допустимые диапазоны изменения параметров при составлении технического задания (ТЗ) на СУ ЭНРК, а также осуществлять синтез и отработку базовых законов управления СУ ЭНРК.

Второй этап метода разработки предполагает реализацию взаимодействия опытного образца проектируемой системы управления с верифицированной имитационной моделью «реального времени». Одной из основных задач текущего этапа метода разработки является подтверждение соответствия динамических характеристик бортовой системы управления заданным со

стороны ТЗ требованиям, которые непосредственно вытекают из технических требований на разрабатываемый объект.

Третий этап метода разработки предусматривает функционирование разрабатываемой СУ в составе объекта колесной техники с выполнением требуемых задач управления и контроля. Целью третьего этапа метода разработки является подтверждение соответствия текущих характеристик объекта заданным тактико-техническим требованиям.

В пятой главе в качестве примера возможностей метода разработки показано определение параметров закона формирования момента сопротивления на РК, представленного выражением (3), с применением ИММРВ МКШ. В ходе данного исследования из указанного закона исключены составляющие, содержащие скорости поворота рулевого и управляемых колес.

По результатам проведения автором многочисленных виртуальных заездов с выполнением типовых маневров при исследовании взаимодействия СУ ЭНРК с ИММРВ МКШ получены временные зависимости действующего момента сопротивления на РК. На Рис. 8. и 9 представлены зависимости момента сопротивления при выполнении маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м» для различных значений коэффициента усиления при составляющей скорости поворота РК в выражении (3).

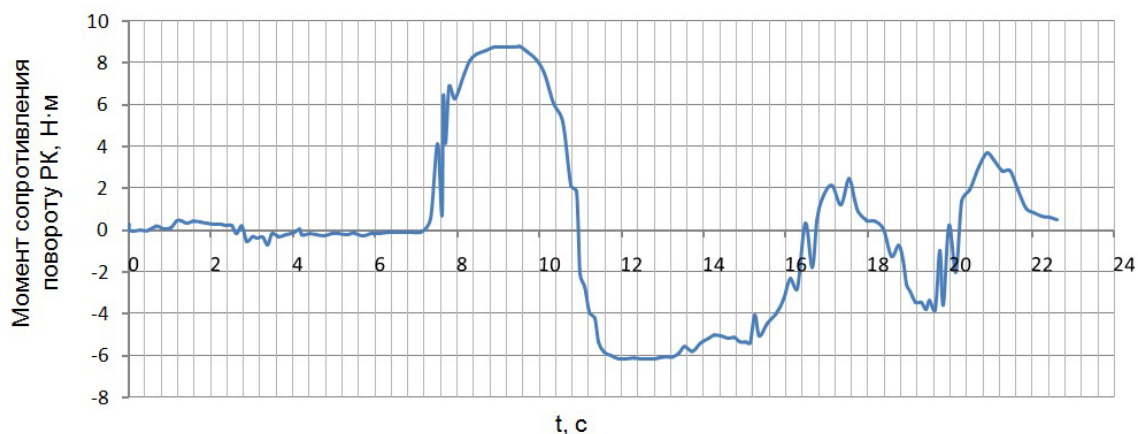


Рис. 8. Временная зависимость момента сопротивления на РК при выполнении маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м»,  $K_{d\theta/dt} = 1$  Н·м/с<sup>-1</sup>

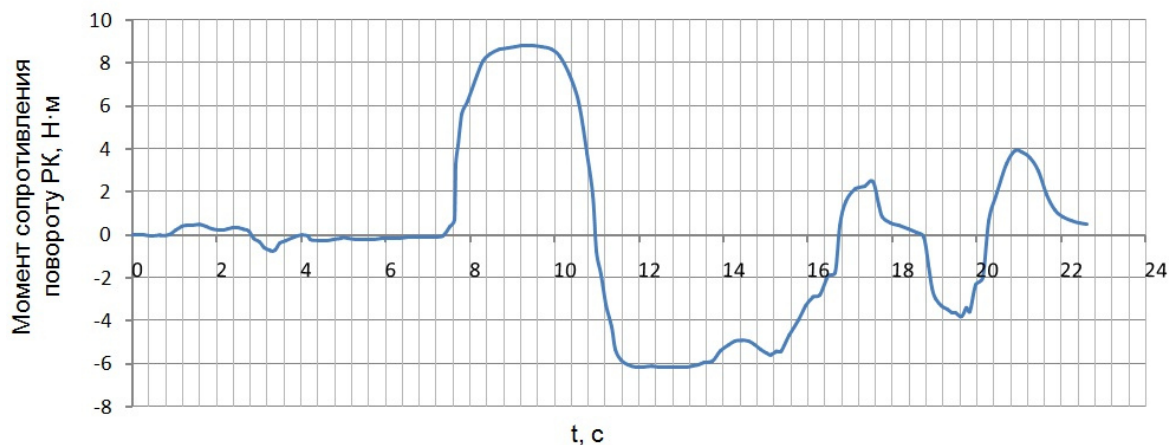


Рис. 9. Временная зависимость момента сопротивления на РК при выполнении маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м»,  $K_{d\theta/dt} = 0,1$  Н·м/с<sup>-1</sup>

По результатам анализа зависимости на Рис. 8 установлено, что интенсивные повороты РК сопровождаются характерными «импульсами» момента на РК значительной амплитуды. Со стороны водителя данные кратковременные увеличения момента сопротивления на РК будут восприниматься как удары, не связанные с взаимодействием поворотных колес с опорной поверхностью. Указанные явления будут негативным образом сказываться на удобстве управления транспортным средством и создавать у водителя ложное «чувство дороги». Помимо указанного эффекта формирования «импульсов» реактивного момента будет осуществляться с некоторым запаздыванием, связанным со временем реакции системы управления на изменение входного воздействия и временем отработки электронагрузателем задающей команды. Таким образом, высока вероятность ситуации, что водитель будет воспринимать удары на рулевом колесе уже после его поворота, и в случае неготовности к подобному явлению может быть осуществлен самопроизвольный поворот РК.

Представленные зависимости показывают, что снижение реактивных «ударов» со стороны РК удастся достичь только при значительном уменьшении коэффициента при составляющей скорости РК в выражении момента сопротивления на РК (Рис. 9). Следующие виртуальные заезды показали, что полное исключение скорости РК из расчета реактивного момента на РК не приводит к существенным изменениям в нагружении РК и не повлияет на информативность рулевого управления. Аналогичная картина характерна для составляющей рассогласования угловых скоростей поворотного и рулевого колес. Таким образом, коэффициенты в выражении (3) принимают следующие значения:  $k_1 = 10$  Нм/рад,  $k_2 = 0$ ,  $k_3 = 9$  Нм/рад,  $k_4 = 0$ ,  $K = 1$ .

Представленный подход к синтезу закона формирования момента сопротивления на рулевом колесе свидетельствует о возможности реализации на основе имитационной математической модели «реального времени» динамики криволинейного движения МКШ программно-аппаратного комплекса – стенда для проведения виртуальных заездов с выполнением типовых маневров в соответствии с ГОСТ 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания». Данный стендовый комплекс позволит осуществлять сбор статистических данных при выполнении группой водителей-испытателей серии виртуальных заездов при различных параметрах МКШ, различных законах управления поворотом колес («веерный», РСП УС, РСП У и т. д.), различных свойствах опорной поверхности. Обработка полученных результатов позволяет определять оптимальные значения искомых параметров в законе формирования реактивного момента на рулевом колесе с использованием экспертных оценок.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Создан и верифицирован метод разработки законов управления электронагружателем рулевого колеса из состава системы рулевого управления МКШ, включающий три этапа при проектировании цифровой системы управления:

- работа по схеме «Виртуальная система управления - Виртуальный объект»;

- работа по схеме «Реальная система управления - Виртуальный объект»;

- работа по схеме «Реальная система управления - Реальный объект».

Указанный инструмент проектирования обеспечивает широкие возможности, направленные на повышение качества функционирования и сокращения сроков разработки цифровой системы управления:

- формирование технических требований на вновь создаваемую или модернизируемую систему управления;

- отработка базовых законов управления, лежащих в основе функционирования бортовой системы управления;

- отладка программной и аппаратной частей образца системы управления в отсутствии опытного образца объекта.

2. Создана имитационная математическая модель «реального времени» динамики криволинейного движения МКШ с колесной формулой 8x8 и всеколесным рулевым управлением (ИММРВ МКШ), реализация которой осуществляется на языке программирования высокого уровня C++.

3. Произведена верификация и подтверждена адекватность автономной работы ИММРВ МКШ при точности реализации  $\varepsilon = 0,003$  в относительном выражении и минимальном шаге численного решения, равным 0,0035 с; определена область адекватной работы ИММРВ МКШ:

- диапазон скоростей движения виртуального объекта МКШ с колесной формулой 8x8: 10 – 110 км/ч;

- диапазон значений максимального коэффициента взаимодействия колес с опорной поверхностью: 0,2 – 0,8;

- допустимые режимы криволинейного движения виртуального объекта: до потери устойчивости по опрокидыванию (при значении коэффициента взаимодействия колес с опорной поверхностью 0,8) и по заносу (при значении коэффициента взаимодействия колес с опорной поверхностью 0,2).

Установлено, что средние и максимальные значения относительных погрешностей при сравнении соответствующих параметров «эталонной» модели и модели «реального времени» не превышают заданных критериев адекватности в 2% и 5% соответственно.

4. Выполнена верификация и подтверждена адекватность работы ИММРВ МКШ при взаимодействии с опытным образцом СУ ЭНРК в составе объекта МКШ. Область адекватной работы модели в данном режиме функционирования соответствует области адекватной автономной работы ИММРВ МКШ. Средние и максимальные значения относительных

погрешностей параметров моделирования в режиме «реального времени» при совместной работе с системой управления электронагружателем рулевого колеса не превышают 3% и 10% соответственно.

5. В качестве примера практической реализации метода разработки произведено определение параметров базового закона формирования момента сопротивления на рулевом колесе, представленного выражением (3): коэффициенты при скорости поворота рулевого колеса  $k_2$  и разности скоростей поворота рулевого и управляемого колес  $k_4$  приняты равными нулю, коэффициент при угле поворота рулевого колеса  $k_1$  равен 10 Н·м/рад, коэффициент при разности углов поворота рулевого и управляемого колес  $k_3$  равен 9 Н·м/рад, общий коэффициент усиления  $K$  равен 1. При выбранных значениях параметров закона управления нагружателем рулевого колеса обеспечивается снижение физических нагрузок на водителя, так как момент сопротивления на рулевом колесе в ходе выполнения виртуальных заездов не превышает 25 Н·м.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Бузунов Н.В., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Совершенствование методов разработки бортовых информационно-управляющих систем колесных и гусеничных машин // Журнал Автомобильных Инженеров. 2015. № 4(93). С. 11-15. (0,62 п.л./ 0,4 п.л.).

2. Бузунов Н.В. Исследование модели «реального времени» плоского криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 6х6 // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2016. № 3(29). С. 2-8. (0,56 п.л.).

3. Бузунов Н.В., Котиев Г.О., Падалкин Б.В. Особенности реализации «обратной связи» для различных систем рулевого управления колесных машин // Труды МАМИ. 2016. № 3(266). С. 35-44. (0,93 п.л./0,47 п.л.).