

## РАЗРАБОТКА МЕХАТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИКЛАДНОГО ПАКЕТА CaMeL-View

В.И. Поддубный, А.С. Павлюк, М.Л. Поддубная

*Представлена идеология разработки мехатронных систем с использованием прикладного пакета CaMeL – View, приведены описание мехатронной модели стенда «рулевое управление – передняя подвеска автомобиля» и результаты математического моделирования управления поворотом рулевого колеса стенда.*

*Ключевые слова: система управления движением механической системой, мехатронная модель, прикладной программный пакет CaMeL-View, визуальное объектно-ориентированное программирование*

Одним из этапов создания системы управления является разработка ее математической модели и математическое описание с использованием теории автоматического управления. Для разработки управления в инженерной практике применяются пакеты расширения MATLAB (Simulink, Control System Toolbox, NSD Blockset) [1]. Их использование предполагает наличие математических моделей механических систем в матричном виде. Следует отметить, что возможно получение системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение механической системы традиционными методами с использованием уравнений Лагранжа 2 рода на основании расчетной схемы. Однако для случая системы с несколькими степенями свободы (например, рассмотрение движения шарнирно-сочлененной машины в пространстве) эта задача существенно усложняется и увеличивается вероятность ошибки в аналитических расчетах. Кроме всего прочего желательна проверка эффективности разработанного управления при моделировании рабочего движения механической системы. Математическая модель системы при этом должна быть адекватна – учитывать взаимодействие её отдельных составных частей друг с другом и с окружающей средой. При выполнении этих требований происходит появление дополнительных степеней свободы и усложнение модели. Развитие вычислительной техники и современного прикладного объектно-ориентированного программного обеспечения позволяет произвести разработку модели механической системы, как мехатронной, состоящей из отдельных частей, с возможностью программного управления её движением. Такие возможности предостав-

ляют специализированные пакеты Matlab-SimMechanik, CaMeL-View, Dymola и другие.

### **Моделирование механических систем в прикладном программном пакете CaMeL-View**

Прикладной пакет CaMeL-View, разработанный специалистами фирмы iXtronics GmbH (Падерборн, Германия), использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и предназначен для создания моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации [2]. Для составления моделей в пакете используются собственная библиотека объектов, позволяющая описывать отдельные тела системы, их механические связи между собой, производить математическое описание их взаимодействия. Моделируемая механическая система представляется как совокупность отдельных тел RigidBody, соединяемых при помощи сочленений Joint.

Для тела имеется возможность задавать его массово-геометрические характеристики (массу, тензор инерции). В качестве входа для тела могут быть применены силы и моменты, приложенные в центре масс тела или портах (точках тела). Положение портов задается переменными, описывающих их положение относительно центра масс тела и поворот координатной системы порта относительно системы отсчета, жестко связанной с центром масс тела. Выходами для тела являются его кинематические параметры – линейное ускорение в инерциальной системе отсчета, линейные и угловые скорости в различных системах отсчета, текущие координаты. Кинематические и силовые параметры могут быть определены в системах отсчета: инерциальной Ics, связанной с центром масс

Bcs и добавленной в произвольной точкой тела Acs.

Сочленение Joint определяет тип связи между телами. Его можно представить в общем случае, как пространственную пружину с задаваемыми жесткостью и демпфированием в направлениях осей X, Y, Z и угловыми жесткостью и демпфированием при угловых деформациях относительно осей. Сочленение может быть двух типов – кинематическое и динамическое. При соединении тел кинематическим Jointом есть возможность обеспечить свободное (линейное или угловое) перемещение тел в желаемых направлениях. Таким образом, можно описать любой тип связи между телами (сферический или цилиндрический шарниры в пространстве, на плоскости и т. д.). Силы взаимодействия в высвобождающемся направлении для кинематического Jointa описываются при помощи математического блока StateSpace. Обычно при описании сил применяются кинематические выходы тела и задаваемые параметры. Если применяется динамический Joint, то генерация сил упругого взаимодействия происходит автоматически с использованием задаваемых в блоке коэффициентов жесткости и демпфирования.

Механический блок ActuatorClass выполняет две функции – определяет относительные линейные и угловые перемещения и скорости двух тел, соединенных при помощи сочленений Joint, и позволяет вводить между ними силы и моменты внутреннего взаимодействия. Перемещения, скорости, силы и моменты определяются в системе координат порта актуатора J1. Кинематические параметры (перемещения, скорости) являются входами, а силовые (силы и моменты) – выходами этого блока. В отличие от блока описания твердого тела актуатор имеет только два порта J1 и J2 типа BodyAtpMbs, которые могут быть соединены с портами типа PairAtpMbs соединяемых тел.

Математический блок StateSpace позволяет производить математические вычисления, применять программирование с использованием объектного языка программирования Objective-DSS, основой которого является язык Smalltalk. При программировании и вычислениях используются задаваемые в блоке параметры и его входы. В качестве входов могут быть скалярные, векторные величины, матрицы. При составлении топологической схемы модели обычно выходы твердого тела соединяются с входами StateSpace, имеющими одинаковую размерность (становятся её

входами). Таким образом, кинематические параметры тела могут быть использованы при вычислениях в StateSpace. Выходами блока являются векторные, скалярные величины, матрицы. Довольно часто при разработке мехатронных моделей в качестве выходов StateSpace являются векторы сил и моментов взаимодействия тел системы, которые подаются на входы тел.

Вышеперечисленные блоки являются наиболее важными для составления моделей (не умаляя значимость остальных библиотечных модулей). В состав библиотеки объектов входят также блоки таблиц, источники сигналов различной формы, цифровые фильтры, блоки регуляторов, передаточных функций и т. д. Применение библиотеки объектов позволяет создавать модели механических систем различной сложности с использованием элементов управления и регулирования.

Встроенное в CAMeL символьное ядро позволяет по составленной из библиотечных модулей топологической схеме модели генерировать её математическую модель, представляющую собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка в форме Коши. Пакет включает в себя также элементы линейного анализа – определение собственных значений системной матрицы, получение фазовую и амплитудно-частотную характеристики системы, производить линеаризацию модели в заданной окрестности. Имеется возможность экспорта модели в MATLAB-Simulink в виде модельного файла для дальнейшего его использования при разработке системы управления и генерации си-кода для использования модели при лабораторных испытаниях в режиме реального времени.

#### **Мехатронная модель стенда «рулевое управление – передняя подвеска автомобиля»**

Топологическая схема представлена на рисунке 1. Модель включает в себя ряд функциональных частей. Часть «math» задает математический аппарат для расчета, а в части «mech» представлена конструкция стенда «рулевое управление – передняя подвеска автомобиля».

Блок Manewгу предназначен для генерации законов поворота рулевого колеса для обеспечения возможных маневров, совершаемых автомобилем.

Предварительно были проведены эксперименты по определению моментов инерции вала электроусилителя руля и

управляемого колеса легкового автомобиля и зависимость момента на валу электроусилителя от управляющего напряжения, подаваемого на плату усилителя.

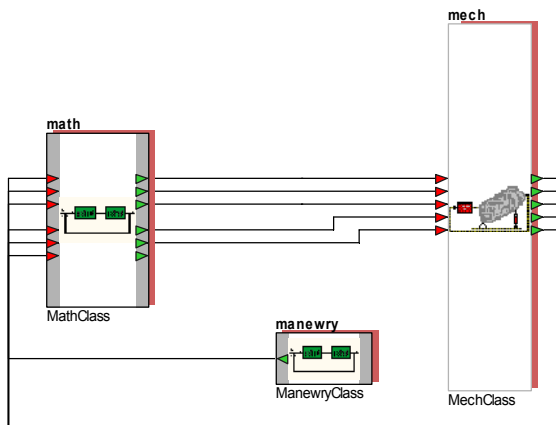


Рисунок 1 – Общая схема модели управления подвеской

На рисунке 2 изображено модельное представление механической части станда [3]. Рама станда моделируется блоком RigidBodyMbs rama, зафиксированной от перемещений сочленением podwes относительно земли, представленной блоком EnvironmentMbs zemlja.

С рамой станда при помощи сочленений rotZ соединены сошка sector\_soschka и вал электроусилителя руля, представленный блоком rul\_wal.

Сочленения обеспечивают одну степень свободы для сошки и вала электроусилителя – возможность поворота относительно их осей вращения. Входами для сошки и вала усилителя являются моменты сопротивления их повороту  $M_{sopr\_powor\_soschka}$ ,  $M_{sopr\_rul\_wala}$  и приводные моменты  $M_{drive\_soschka}$ ,  $M_{drive\_rul\_wal}$ .

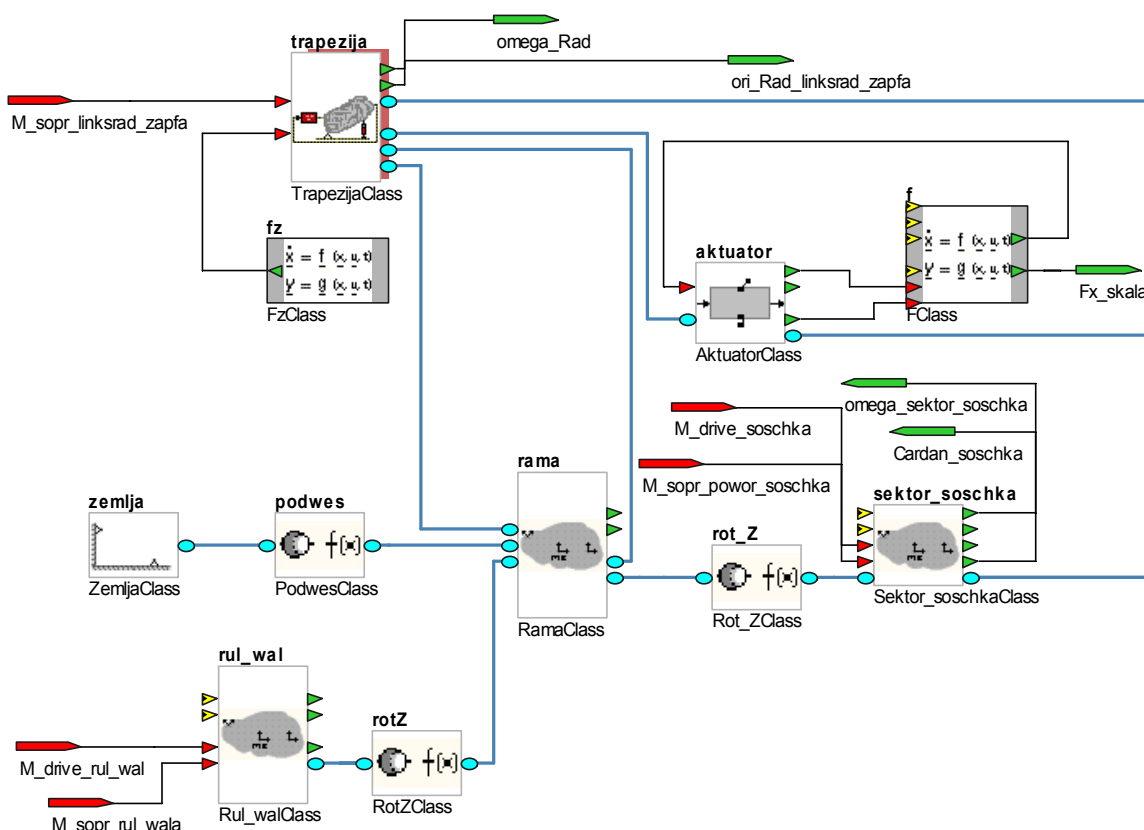


Рисунок 2 – Механическая часть модели

Значения моментов определяются в математической части модели. Угол поворота сошки Cardan\_soschka и ее угловая скорость  $\omega_{sektor\_soschka}$  являются выходами и используются для расчета параметров управления движением системы.

Aktuator определяет величину скорости и перемещения сошки относительно средней тяги рулевой трапеции. Их значения используются для определения силы взаимодействия между сошкой и тягой. Проекции силы на оси, связанные с портом сошки, определяют

ся в блоке F по следующим выражениям

$$F_x = c_x \cdot poz[1] + b_x \cdot vel[1];$$

$$F_y = c_y \cdot poz[2] + b_y \cdot vel[2],$$

где  $c_x, c_y$  – жёсткости сочленения между сошкой и тягой в продольном и поперечном направлениях;

$b_x, b_y$  – коэффициенты демпфирования в соответствующих направлениях;

$poz[1], poz[2]$  – относительные перемещения тел в продольном и поперечном направлениях;

$vel[1], vel[2]$  – относительные скорости.

Блок  $f_z$  генерирует вертикальную силу, компенсирующую вес колеса – моделируется

вертикальная реакция опорной поверхности для колеса.

Подсистема trapezija, изображенная на рисунке 3 представляет собой модель рулевой трапеции, соединенной с управляемым колесом. Маятниковый рычаг majatnik, средняя тяга srednjaja\_tjaga, левая тяга levaja\_tjaga, левое колесо подвески linksrad\_zapfa образует замкнутую на раму стенда кинематическую цепь. Соединение между ними обеспечивают сочленения Rot\_Z1Class, Rot\_Z2Class, Rot\_Z3Class, Rot\_Z4Class и Rot\_Z5Class, допускающие их взаимный поворот. Schkworen\_lew обеспечивает поворот управляемого колеса относительно шкворня по необходимому закону.

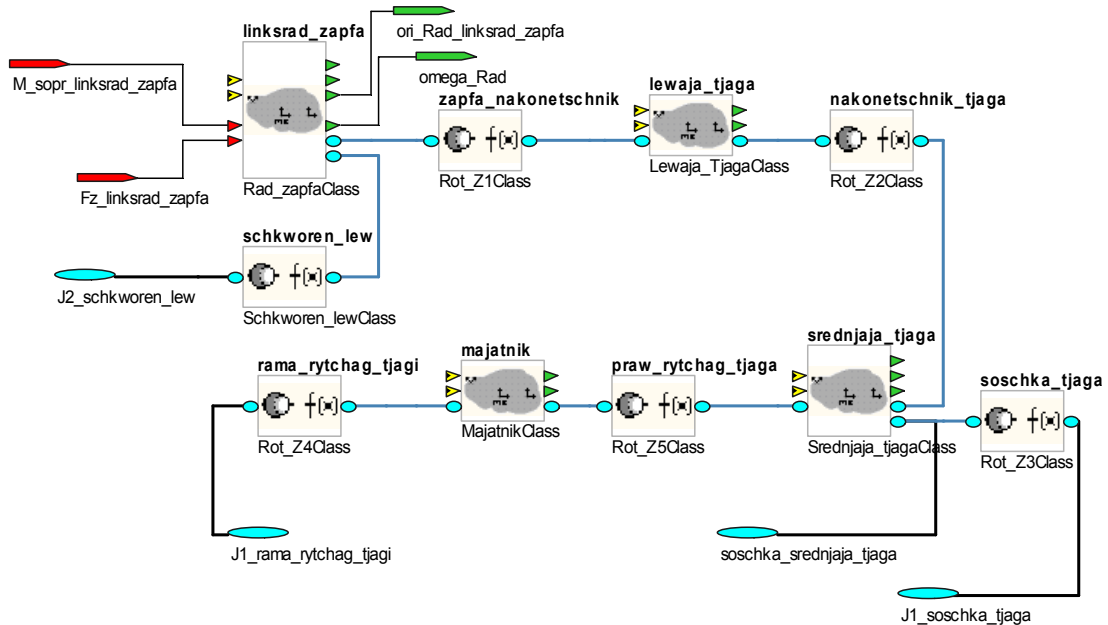


Рисунок 3 – Рулевая трапеция с управляемым колесом

Основное назначение подсистемы math, изображенной на рисунке 4, является генерация управляющего момента, приложенного к валу электроусилителя для обеспечения поворота управляемого колеса. Определяется управляющее напряжение, обеспечивающее необходимую силу тока и, соответственно, необходимый управляющий момент.

На вход математического блока  $f_i$ linksrad подается матрица направляющих косинусов Rad\_orientation подвижной системы отсчета, связанной с управляемым колесом. В блоке определяется текущее значение угла поворота колеса  $\varphi_i$  относительно оси шкворня и подается на вход  $m\_drive\_usilitelja$ .

$$\varphi_i = -\text{sign}(\text{Rad\_Orientation}[2;1]) \cdot \arccos(\text{Rad\_Orientation}[1;1])$$

где  $\text{Rad\_Orientation}[2; 1]$  - косинус угла, составляемого осью Y подвижной системы отсчета, связанной с ободом колеса с осью X инерциальной системы отсчета;  $\text{Rad\_Orientation}[1; 1]$  - косинус угла, составляемого осью X подвижной системы отсчета, связанной с ободом колеса с осью X инерциальной системы отсчета.

На вход  $m\_drive\_usilitelja$  подается также текущее значение задаваемого угла поворота  $f_i$ rad\_soll и угловой скорости колеса  $\omega_{ga\_rad}$ .

Регулируемой величиной в блоке  $m\_drive\_usilitelja$  является напряжение U, подаваемое на управляющую плату электроусилителя руля. Сила тока электродвигателя усилителя и управляющий момент пропорциональны величине U.

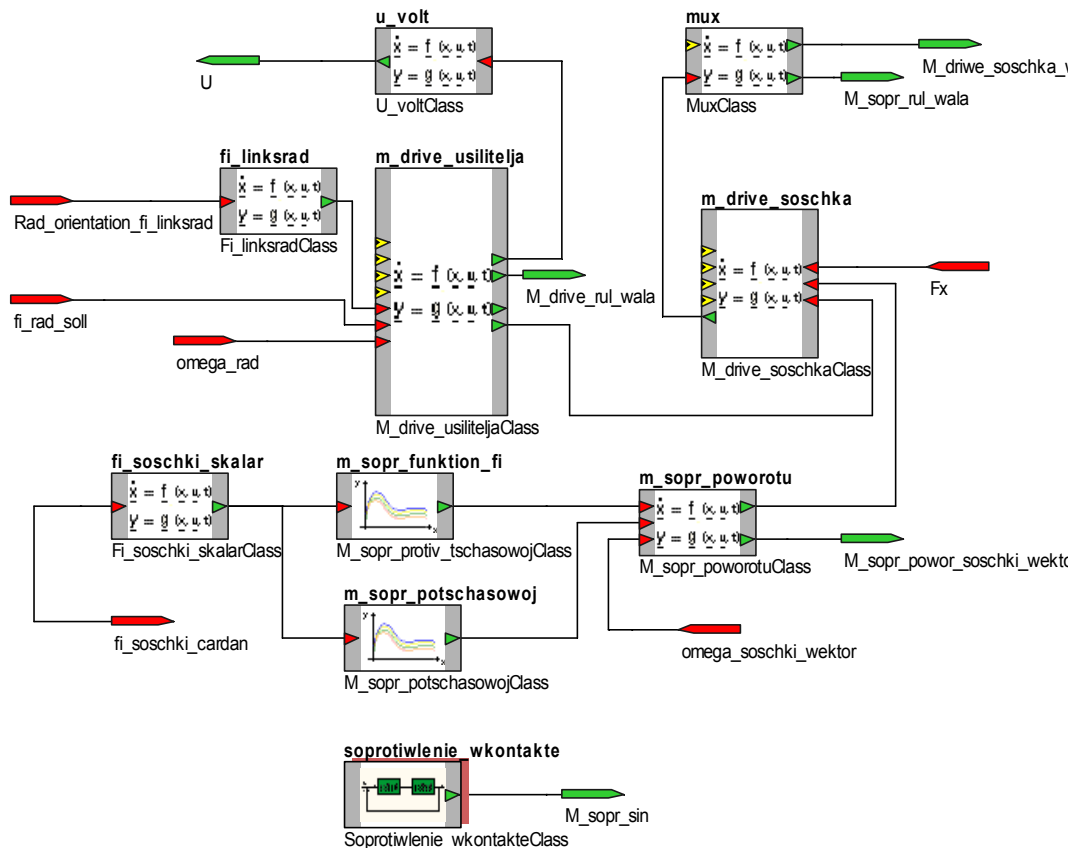


Рисунок 4 – Математическая часть модели

Величина управляемого напряжения определяется с использованием PID-регулятора

$$U = c \cdot \text{del\_fi} - \text{alfa} \cdot \text{omega\_rad}[3] + \text{beta} \cdot \text{summ\_del\_fi}$$

где  $c, \text{alfa}, \text{beta}$  – пропорциональный, дифференциальный и интегральный коэффициенты PID;  $\text{del\_fi}$  – рассогласование задаваемого и текущего углов поворота колеса относительно шкворня;  $\text{omega\_rad}[3]$  – угловая скорость поворота колеса относительно шкворня;  $\text{summ\_del\_fi}$  – интегральная сумма углового рассогласования  $\text{del\_fi}$ .

Управляющий момент на валу электроусилителя  $M_{dr\_scalar}$  определяется на основании результатов тарировки согласно следующим выражениям:

$$M_{dr\_scalar} = \frac{U}{0.0128} \quad \text{для } U > 0;$$

$$M_{dr\_scalar} = \frac{U}{0.0121} \quad \text{для } U < 0.$$

Момент, передаваемый от электроусилителя через рулевой механизм на сошку трапеции, определяется в  $m\_drive\_soschka$ .

Выражение момента получается из совместного решения дифференциальных уравнений вращательного движения вала электроусилителя и сошки

$$M_{drive\_soschki} = [M_{dr\_scalar} * J_{soschki} + (F_x * l_{soschki} - M_{sopr\_powor}) * J_{dwig} * \text{pered\_otnosch}] / (J_{soschki} + J_{dwig} * \text{pered\_otnosch}^2),$$

где  $M_{dr\_scalar}$  – момент на валу электроусилителя;  $J_{dwig}, J_{soschki}$  – осевые моменты инерции электродвигателя и сошки;  $M_{sopr\_powor}$  – момент сопротивления повороту рулевого колеса, приведенный к сошке;  $F_x$  – сила сопротивления повороту сошки со стороны рулевой трапеции;  $l_{soschki}$  – длина рычага сошки;  $\text{pered\_otnosch}$  – передаточное отношение рулевого механизма.

В блоке Mux формируется пространственный вектор момента  $M_{drive\_soschka\_vektor}$ , приложенного к сошке.

Значения момента сопротивления повороту за счет трения в элементах подвески были определены путем динамометрирования [4] и представлены в модели в табличных блоках  $M_{sopr\_po\_tschasowoj}$  (момент сопро-

тивления при вращении по часовой стрелке) и  $M_{sopr\_protiv\_tschasowj}$  (момент сопротивления при вращении против часовой стрелки).

В блоке  $fi\_soschki\_skalar$  значения карданного угла поворота сошки преобразуются в скалярные значения и подаются на входы табличных блоков моментов сопротивления. По знаку угловой скорости  $\omega_{soschki\_vektor}$  в  $m\_sopr\_poworotu$  определяется направление вращения и выбирается значение момента сопротивления, соответствующее направлению вращения.

Математическая подсистема  $soprotivlenie\_vkontakte$  предназначена для генерации момента сопротивления колесу в контакте с опорной поверхностью при действии вертикальной нагрузки.

Математическая подсистема  $mapewgu$ , включает в себя математические блоки, генерирующие законы поворота управляемого колеса для обеспечения маневров переставки, поворота автомобиля, движения по окружности. Для описания начальной и конечной четверти периода переставки закон изменения угла поворота описывается функцией вида

$$fi:=A*\delta^{**2}*(3-2*\delta)],$$

где  $A$  – амплитуда изменения угла поворота на интервале;

$\delta$  – отношение текущего значения времени на интервале, отсчитываемое условно от 0 к времени интервала;

$$\delta = (t - t_0)/(t_1 - t_0);$$

$t$  – текущее модельное время;

$t_0$  и  $t_1$  – начальное и конечное время интервала.

### Результаты моделирования управления поворотом рулевого колеса

Для уточнения параметров регулирования поворотом рулевого колеса и проверки адекватности модели стенда «рулевое управление- передняя подвеска автомобиля» реальному объекту было проведено моделирование управления поворотом рулевого колеса для обеспечения маневра автомобиля «переставка».

Закон изменения угла поворота рулевого колеса при переставке изображен на рисунке 5. Закон изменения управляющего момента на сошке для обеспечения переставки имеет негармонический вид и представлен на рисунке 6. Момент сопротивления повороту при переставке, приведенный к сошке расчетным путем, изображен на рисунке 7. При экспериментальном определении зависимости крутящего момента на валу электроусилителя

было установлено, что при изменении управляющего напряжения в интервале от 1,59 до 1,89 вольт момент равен нулю. Наличие такой мертвой зоны объясняет закон изменения управляющего напряжения, изображенный на рисунке 8.

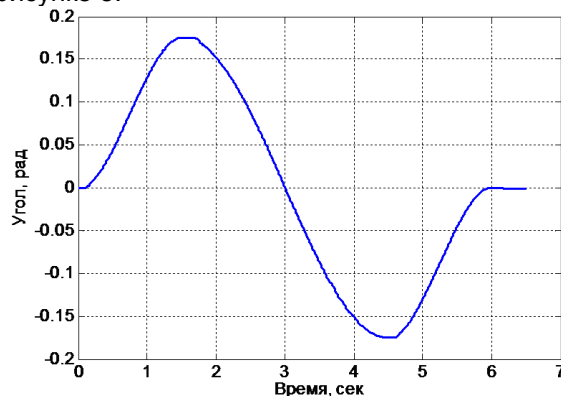


Рисунок 5 – Угол поворота колеса при «переставке»

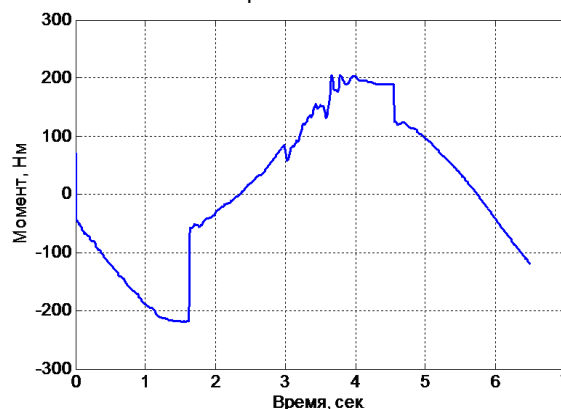


Рисунок 6 – Управляющий момент на сошке

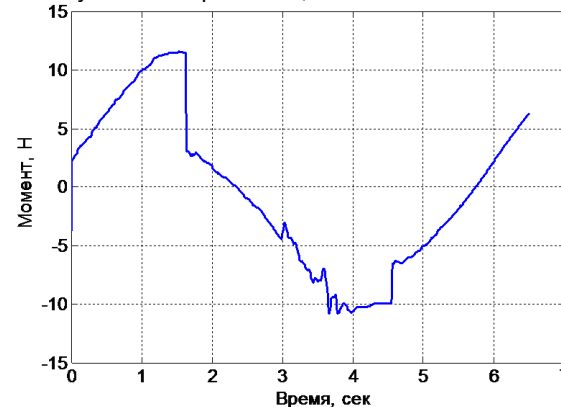


Рисунок 7 – Момент сопротивления повороту рулевого колеса

Следует отметить, что в начальный момент времени происходит резкое возрастание управляющего напряжения и момента на сошке, что можно объяснить необходимостью преодоления инертности масс всех движущихся элементов стенда.

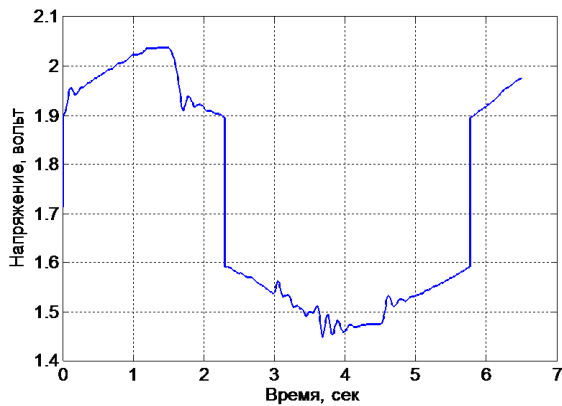


Рисунок 8 – Управляющее напряжение электроусилителя

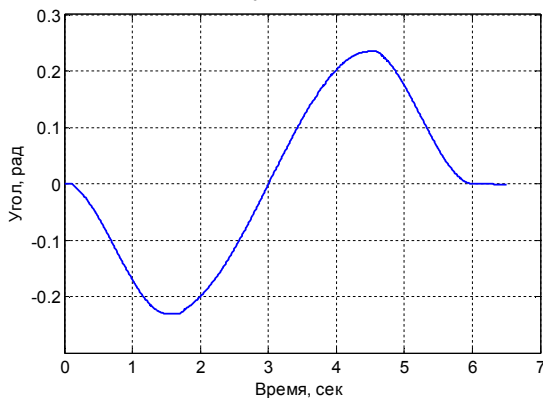


Рисунок 9 – Угол поворота сошки

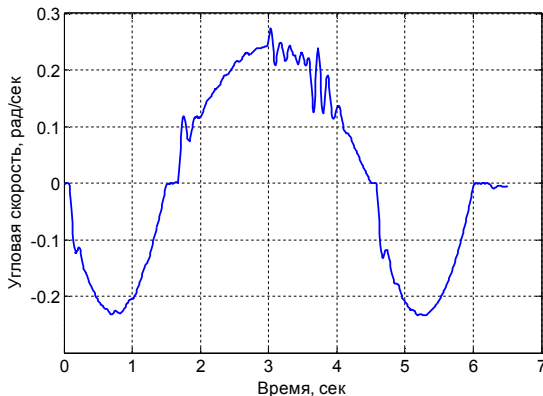


Рисунок 10 – Угловая скорость сошки

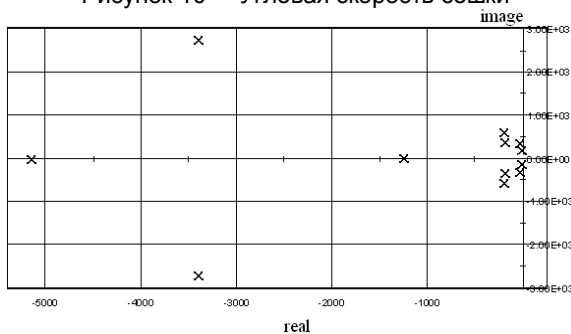


Рисунок 11 – Собственные значения системной матрицы

Угол поворота сошки рулевого механизма представлен на рисунке 9. Амплитуда угла поворота у сошки больше, чем у управляемого колеса. Движение происходит в противофазе. Сопоставление графиков зависимостей угла поворота сошки (рисунок 9) и ее угловой скорости (рисунок 10) от времени подтверждает наличие между ними дифференциальной зависимости.

Анализ собственных значений системной матрицы, графически представленных на рисунке 11, говорит об устойчивости данной системы (отсутствуют положительные значения реальной составляющей для всех собственных значений)[5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В.П. Матлаб 6.5+Simulink 4/5 [Текст] / В.П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс.-2002.-768 с.
2. Hahn, Martin. Ein Objektmodell fuer den Mechatronikentwurf. Anwendung in der objektorientierten Modellbildung mechatronischer Systeme unter Verwendung von Mehrkorpersystemformalismen [Text]: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) dem Fachbereich 10 Maschinentechnik der Universitat-Gesamthochschule Paderborn / Martin Hahn. – Paderborn , 1999.
3. Поддубный, В.И. Определение характеристик увода шин для исследования устойчивости движения автотранспортных средств [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк, А.В. Величко; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1987, 12 с. – Деп. в ЦНИИ-ТЭИавтопроме, № 1546-ап 87.
4. Поддубный В.И. Повышение эффективности использования колесных мобильных машин в АПК на основе улучшения их устойчивости и управляемости [Текст]: дис. ... доктора технических наук: 05.20.01 / В.И. Поддубный. – Барнаул, 2011.-419с.
5. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления [Текст]/ А.А. Первозванский. - М.: Наука, 1986.- 616с.

**Поддубный В.И.<sup>1</sup>**, д.т.н., доцент,  
тел. 29-08-56, e-mail: [poddubny@list.ru](mailto:poddubny@list.ru)  
**Павлюк А.С.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор,  
тел. 29-07-91, e-mail: [pavlukas@mail.ru](mailto:pavlukas@mail.ru)  
**Поддубная М.Л.<sup>2</sup>**, к.ф.-м.н., доцент, e-mail:  
[MLPoddubnaya@fa.ru](mailto:MLPoddubnaya@fa.ru)  
<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, каф. АиАХ  
<sup>2</sup> Финансовый университет при правительстве России Барнаулский филиал, 6556038 г. Барнаул, пр. Ленина 54, тел. 36-19-63