

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КЛЮЧЕЙ

Голубчик Т.В., Феофанова Л.С., Феофанов С.А., Лазарев Д.Б., Насибулов И.Р.

*ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,  
Москва, Россия (125319, Москва, Ленинградский проспект, 64) tvgolubchik@mail.ru*

В работе рассматриваются варианты реализации электрического дифференциала с микропроцессорным управлением, актуальные для электронакопительных транспортных средств с целью упразднения соответствующего механического узла и улучшения качества управления транспортным средством при различных внешних условиях. Целью работы являлось создание имитационной модели работы электрического дифференциала с микропроцессорным управлением и отладка их на испытательном стенде для последующей апробации на ходовом макете транспортного средства с электрической трансмиссией. Наиболее широко дифференциал применяется в конструкции привода автомобилей, где момент от выходного вала коробки передач поровну делится между полуосями правого и левого колеса. В полноприводных автомобильных транспортных средствах также может применяться для деления момента в заданном соотношении между ведущими осями, но следует отметить, что для решения этой технической задачи распространены конструкции и без дифференциала.

Ключевые слова: электромобиль, дифференциал, алгоритмы, модель, интеллектуальный ключ, фильтр Калмана

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR OPERATING THE ELECTRIC DIFFERENTIAL WITH MICROPROCESSOR CONTROL USING SMART SWITCHES

Golubchik T.V., Feofanova L.S., Feofanov S.A., Lazarev D.B., Nasibulov I.R.

*"Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI)", Moscow, Russia (Leningrad Prospect, Moscow, 64/125319,) tvgolubchik@mail.ru*

This paper describes embodiments of the electric differential with microprocessor control. This technical problem is important for electric and hybrid vehicles. The main goal is the abolition of the corresponding mechanical assembly through the use of electric powertrain control system with independent drive for each axle. This will improve the quality control of the vehicle and its safety in the long term under different external conditions. The most widely used in the construction of the differential drive cars where torque from the output shaft of the gearbox is equally divided between the left and right axle shafts wheel. In four-wheel drive automotive vehicles may also be used for dividing torque in a predetermined ratio between the major axes, but it is noted that solutions to this technical problem common design and not differential.

Keywords: electric vehicle, differential algorithms, model, smart switch, Kalman filter

### Введение

Целью работы являлось создание имитационной модели работы электрического дифференциала с микропроцессорным управлением и отладка их на испытательном стенде для последующей апробации на ходовом макете транспортного средства с электрической трансмиссией

Дифференциал — это механическое устройство, которое делит момент входного вала между выходными валами непосредственно связанные с ведущими колёсами. Необходимость применения дифференциала в конструкции автомобилей обусловлена следующим фактом - внешнее колесо при повороте проходит более длинное расстояние по дуге, чем внутреннее. То есть при вращении ведущих колёс с одинаковой скоростью поворот

возможен только с пробуксовкой, что негативно сказывается на управляемости и повышает износ шин.

Основное назначение дифференциала:

- позволяет ведущим колёсам вращаться с разными угловыми скоростями;
- неразрывно передаёт крутящий момент от двигателя на ведущие колёса;
- в сочетании с главной передачей служит дополнительной понижающей передачей.

Наиболее широко дифференциал применяется в конструкции привода автомобилей, где момент от выходного вала коробки передач (или карданного вала) поровну делится между полуосями правого и левого колеса. В полноприводных автомобильных транспортных средствах (АТС) также может применяться для деления момента в заданном соотношении между ведущими осями, но следует отметить, что для решения этой технической задачи распространены конструкции и без дифференциала (например, с вискомуфтой).

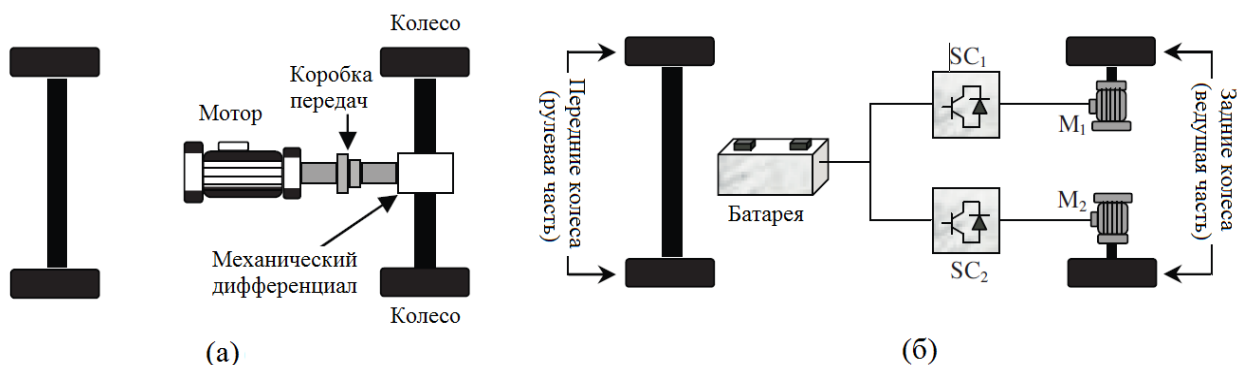
Усложнение экологической ситуации в крупных городах, ограниченность энергетических ресурсов стимулируют научно-технический прогресс в области энергоэффективного транспорта. В автомобильной промышленности активно развиваются следующие параллельные направления: электронакопительные транспортные средства (АТС с комбинированными (гибридными) энергетическими установками (КЭУ) и электромобили), рациональное использование электроэнергии для бортовых устройств за счет повышения энергоэффективности электроприводов<sup>1</sup> и внедрения интеллектуальных алгоритмов управления. Применение интеллектуальных MOSFET ключей в системах коммутации и защиты потребителей с диагностическими функциями, обладающие малыми динамическими потерями, позволяют реализовывать управление при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и реализовывать плавное регулирование нагрузкой потребителей в точном соответствии с требуемыми параметрами систем АТС.

В общем виде на электрическом транспортном средстве могут быть применены различные схемы использования электрической трансмиссии. С точки зрения применения дифференциала можно упростить до принципиальных схем приведенных ниже (рис.1.). На рис.1.а. показан вариант использования электрической трансмиссии с одним мощным электродвигателем. Современный энергоэффективный электропривод принципиально невозможен без микроконтроллерной системы управления с использованием силовой электроники применение которой позволяет гибко обеспечивать практически любые режимы его работы, необходимые для АТС. Применение независимых приводных электродвигателей на каждую ведущую полуось (реже колёса) позволяет решить задачу прохождения колёсами разных длин дуг при повороте при помощи системы управления и отказаться от

---

<sup>1</sup> при номинальном напряжении 12 В

механического дифференциала с фиксированными характеристиками. В такой конфигурации характеристики «электрического дифференциала» могут быть любыми, адаптироваться и изменять свои характеристики в зависимости от погодных условий, потребностей водителя или изменения дорожных условий. Реализация адаптивных алгоритмов работы с «электрическим дифференциалом» возможна по схеме показанной на рис.1,б. В случае применения независимых электродвигателей для всех колёс (полный привод), возможна реализация активных систем безопасности за счёт прямого моментного управления, что в конечном итоге позволит повысить безаварийность или снизить ущерб от ДТП, в том числе здоровью людей.



*Рис. 1. Схема автомобиля с одним центральным мотором и механическим дифференциалом (а), и двумя независимыми моторами (б).*

В случае реализации функции дифференциала система управления автомобилем должна формировать управляющие воздействия (тем самым изменяя скорость или момент на колёсах) опираясь на показания датчиков, которые однозначно определяют условия движения АТС.

При проведении исследований и расчётов была изучена и построена модель движения транспортного средства, на основании которой был создан алгоритм работы системы управления и проводилась проверка его работоспособности (рис.2).

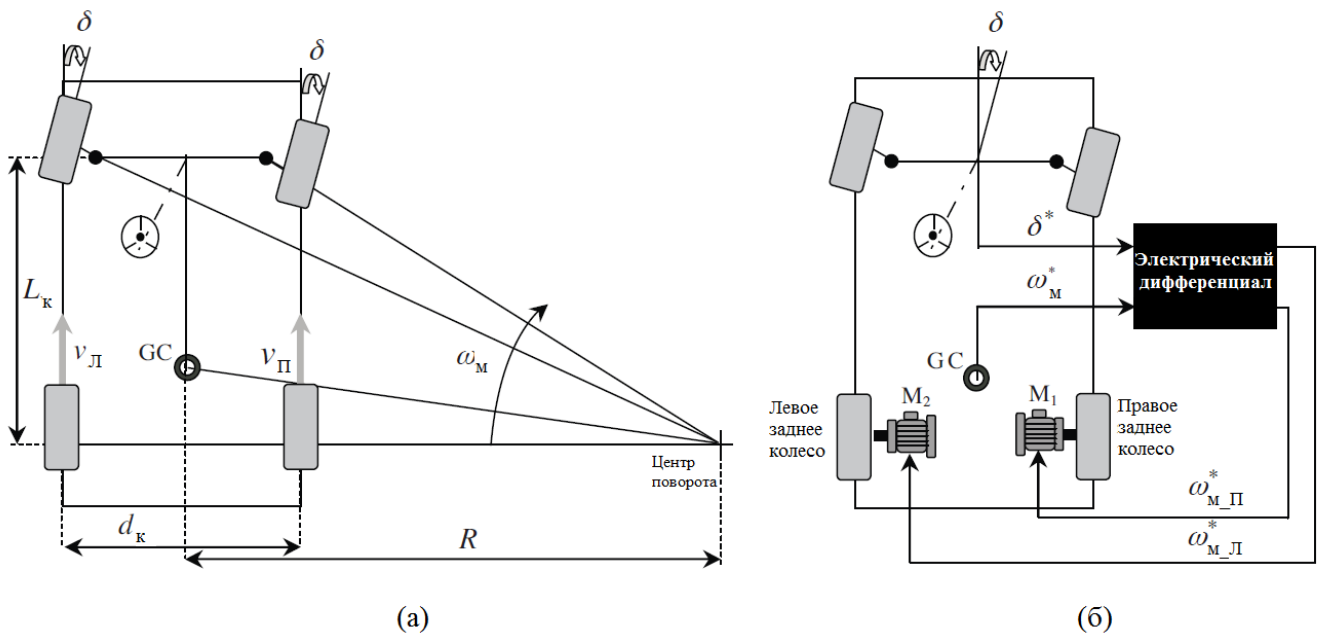


Рис.2. модель автомобиля, входящего в поворот (а), и модель электрического дифференциала (б)

Для расчета модели движения и корректировки модели в процессе испытаний применялись следующие формулы и зависимости [3]:

$v_l, v_n$  - скорость левого и правого колеса определяется по формулам (1) и (2):

$$v_l = \omega_m \left( R + \frac{d_k}{2} \right) \quad (1)$$

$$v_n = \omega_m \left( R - \frac{d_k}{2} \right) \quad (2)$$

где  $\omega_m$  - угловая скорость машины,  $d_k$  - ширина колеи,  $R$  – радиус поворота.

Радиус, по которому будет поворачивать АТС в зависимости от колёсной базы и угла поворота колёс, вычислялся по формуле (3):

$$R = \frac{L_k}{\text{tg}(\delta)} \quad (3)$$

где  $L_k$  - длина колесной базы АТС,  $\delta$  - угол поворота колёс.

Угловая скорость ведущих колёс с электрическим дифференциалом вычисляется по формулам (4) и (5), а разница между их числом оборотов в минуту соответственно по формуле (6):

$$\omega_{зл} = \frac{L_k + \frac{1}{2}d_k \text{tg}(\delta)}{L_k} \omega_m \quad (4)$$

$$\omega_{3л} = \frac{L_k - \frac{1}{2}d_k \operatorname{tg}(\delta)}{L_k} \omega_M \quad (5)$$

$$\Delta\omega = \omega_{3л} - \omega_{3п} = \frac{d_k \operatorname{tg}(\delta)}{L_k} \omega_M \quad (6)$$

где  $\omega_{3л}$ ,  $\omega_{3п}$  - угловая скорость ведущих заднего левого колеса и правого колес соответственно<sup>2</sup>,

При этом в разработанных алгоритмах управления было принято, что если  $\delta > 0 \Rightarrow$  АТС совершает поворот вправо,  $\delta = 0 \Rightarrow$  движется прямолинейно,  $\delta < 0 \Rightarrow$  поворачивает налево.

Динамика движения АТС рассчитывается исходя из сил, действующих на него в данный момент времени по формулам (8-11):

$$F_u = F_m + F_{cv} + F_n \quad (8)$$

$$F_m = \mu Mg \quad (9)$$

$$F_{cv} = \frac{1}{2} \rho C_x S v_h^2 \quad (10)$$

$$F_n = Mg \cdot \sin(\alpha) \quad (11)$$

где  $F_u$  - итоговая сила,  $F_m$  - сила трения,  $F_{cv}$  - сила сопротивления воздуха,  $F_n$  - сила тяжести действующая на АТС, находящемся на дороге с уклоном (препятствует или помогает движению в зависимости от направления уклона относительно движения- подъем или спуск),  $G$  - центр масс

Одной из задач являлось создание централизованной системы управления, которая смогла бы на основе данных о скорости, положении руля и педали газа логически управлять ведущими колесами, имитируя работу дифференциала и изменяя его настройки в зависимости от дорожных условий и погоды.

Для визуального представления работы, была составлена функциональная схема информационной вычислительной системы при помощи программы ERWIN Process Modeler. Данная программа строит модели систем по методологии IDEF0<sup>3</sup>, предназначенной для рассмотрения логических отношений между функциями, а не их временную последовательность. Разработанная функциональная схема представлена на Рис. 3.

<sup>2</sup>Прикладная задача была рассмотрена для заднеприводного автомобиля

<sup>3</sup> Позволяет отображать и анализировать модели деятельности широкого спектра сложных систем в различных разрезах. При этом ширина и глубина обследования процессов в системе определяется самим разработчиком, что позволяет не перегружать создаваемую модель излишними данными [1]

В трансмиссии автомобиля может быть использован любой тип электрического двигателя (ЭД) со специфичными техническими характеристиками, но алгоритм работы должен быть универсальным.

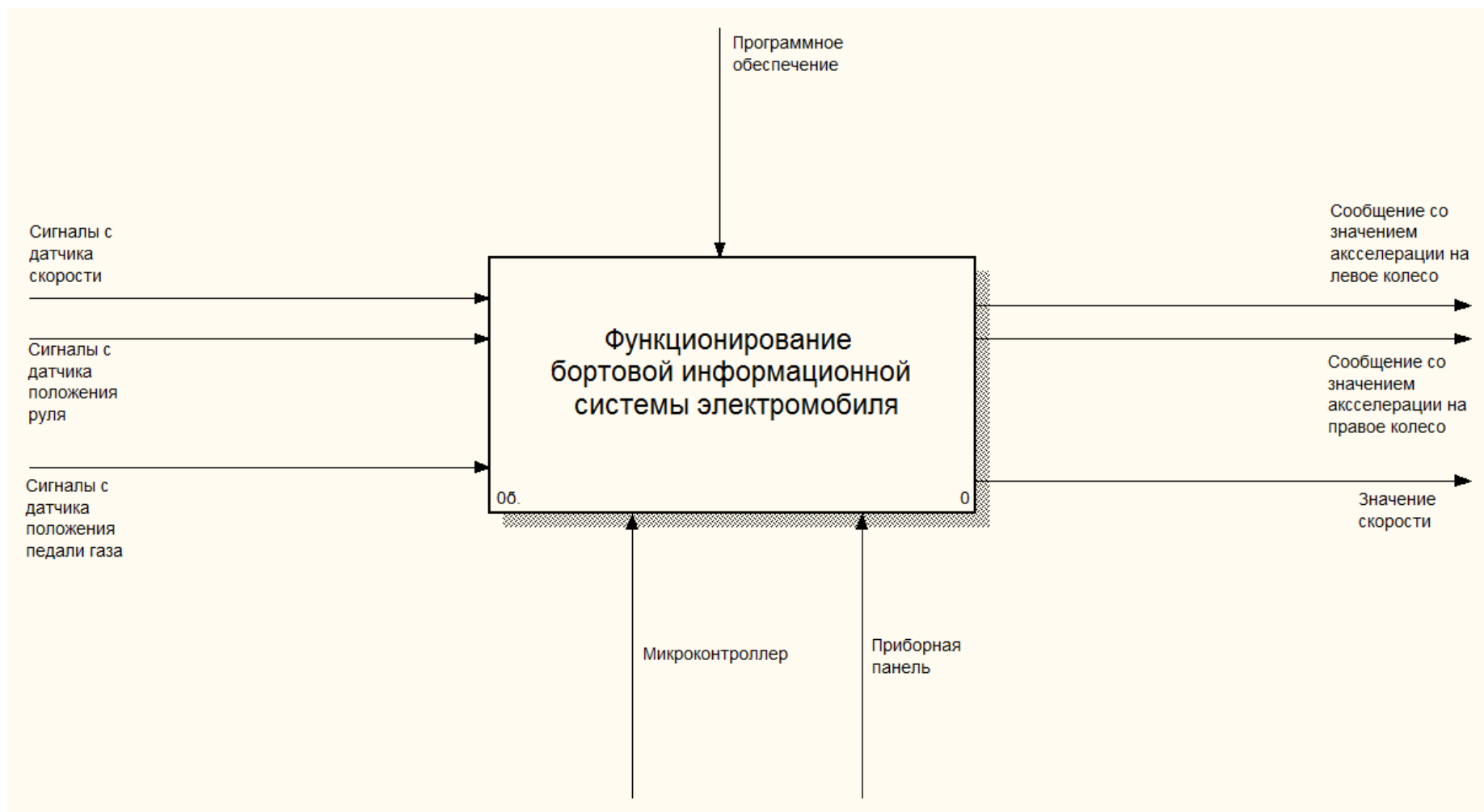


Рис. 3. Функция схема работы электрического дифференциала.

Влияние на работу электрического дифференциала оказывает:

- степень нажатия педали газа, степень нажатия которой изменяется в процентах от 0 до 100%;
- угол поворота руля (пересчитываемый на конечный угол поворота колёс)<sup>4</sup>;
- центробежная сила (боковое ускорение), которая появляется в результате входа автомобиля в поворот и вычисляется на основании данных от датчика ускорения.

В качестве выходных данных была принята частота вращения, измеряемая в процентах, подаваемая на каждое колесо. При реализации токового контура в силовых инверторах управления электродвигателями выходными данными также будут являться момент ЭД. Имитационная модель, встроенная в программное обеспечение обрабатывает данные и выводит значения для управления электрическим дифференциалом, при которых АТС плавно входит в поворот. В случае появления проскальзывания, излишнего бокового ускорения система пытается скорректировать движение для сохранения траектории в рамках своих возможностей.

После проведенных работ была составлена электрическая схема и была смоделирована работа отдельных узлов. После чего разработана уточненная функциональная схема работы электрического дифференциала с электронным управлением (рис.3).

Задачи по расчету показателей и обработке данных, формированию управляющих воздействий осуществляет микроконтроллер. Входными данными являются электрические сигналы, приходящие с датчиков, выходными – сообщения, посылаемые по CAN шине к силовым блокам управления электродвигателями с постоянными магнитами, и выводимое на приборную панель значение скорости. Соблюдение выполнения задач и функций реализовано за счет отлаженного и скорректированного программного обеспечения, записанного в память микроконтроллера.

Для отладки алгоритмов, поиска проблемных узлов, настройки и отладки совместной работы основных узлов электрического дифференциала с микропроцессорным управлением был разработан макетный стенд.

Основными компонентами стенда стали:

- 2 электродвигателя постоянного тока мощностью около 110 Вт, с установленными на вал зубчатыми колёсами с датчиком скорости АБС от автомобиля Lada Kalina;
- 2 импульсных регулятора входными токами и напряжениями ЭД на основе интеллектуальных ключей собранных по полумостовой схеме;
- встраиваемый модуль с микроконтроллером Texas Instruments TE-TMS320F28335;
- плата задатчиков и моделирования сигналов датчиков;

---

<sup>4</sup> для прикладной задачи поворот рулевого колеса в обе стороны был выбран угол равный 330°



- источники питания, жгуты и различные переходники.

На испытательном стенде были смоделированы основные алгоритмы работы и произведена корректировка программного обеспечения по результатам испытаний. В частности, в ходе испытаний, была выявлена проблема получения ложной информации с датчиков. С этой целью в программу был разработан и введен модуль фильтрации данных.

Значение напряжения, приходящих с аналоговых датчиков, может колебаться в больших пределах из-за электромагнитных наводок и погрешностей самих датчиков. Эти сигналы необходимо каким-либо образом выделить и защитить от помех. Кроме применения кабелей с двойным экраном был использован цифровой математический фильтр, который был реализован в виде программы для микроконтроллера.

Для решения задачи необходим фильтр, который учитывал бы все предыдущие погрешности и на их основе делал предсказание величины в следующий дискретный момент времени, поэтому был выбран фильтр Калмана [2].

Фильтр Калмана использует динамическую модель системы, известные управляющие воздействия и множество последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния. Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказание и корректировка. На первой фазе рассчитывается предсказание состояния в следующий момент времени. На втором этапе новая информация с датчика корректирует предсказанное значение. Оба этапа происходят с учетом неточности измерения.

В общем виде представление фильтра Калмана записывается следующей системой уравнений:

$$\hat{x}_k^- = F \cdot \hat{x}_{k-1} + B \cdot u_{k-1} \quad (12);$$

$$P_k^- = F \cdot P_k \cdot F^T + Q \quad (13),$$

где  $\hat{x}_k^-$  – предсказание состояния системы в текущий момент времени,  $F$  – матрица перехода между состояниями,  $\hat{x}_{k-1}$  – состояние системы в прошлый момент времени,  $B$  – матрица применения управляющего воздействия,  $u_{k-1}$  – управляющее воздействие в прошлый момент времени,  $P_k^-$  – предсказание ошибки,  $P_{k-1}$  – ошибка в прошлый момент времени,  $Q$  – ковариация шума процесса.

Формулы корректировки выглядят следующим образом:

$$K_k = P_k^- \cdot H^T \cdot (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)^{-1} \quad (14);$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \cdot \hat{x}_k^-) \quad (15);$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^- \quad (16),$$

где  $K_k$  – усиление Калмана,  $H$  – матрица измерений,  $R$  – ковариация шума измерения,  $z_k$  – измерение в текущий момент времени,  $\hat{x}_k$  – рассчитанное состояние системы в текущий момент времени,  $I$  – матрица идентичности.

Представленные большими буквами переменные представляют собой матрицы различной размерности, зависящей от количества входов и выходов фильтра.

Критичными для помех данными стали с потенциометрических датчиков положения руля и педали газа. Входные данные должны быть связаны между собой в одной системе и влиять друг на друга, в нашем же случае положение педали газа не зависит от положения руля, или зависит настолько незначительно, что им можно пренебречь. Поэтому было принято решение создать два отдельных экземпляра фильтра, которые будут по отдельности фильтровать каждый поток данных. Для данной задачи фильтры имеют всего один вход и один выход, а следовательно матрицы сводятся к обычным скалярным переменным, что упрощает расчёты. Для наглядности эти переменные записаны маленькими буквами (17-21).

$$\hat{x}_k^- = f \cdot \hat{x}_{k-1} + b \cdot u_{k-1} \quad (17)$$

$$p_k^- = f \cdot p_k \cdot f^T + q \quad (18)$$

$$k_k = p_k^- \cdot h \cdot (h \cdot p_k^- \cdot h + r)^{-1} \quad (19)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + k_k (z_k - h \cdot \hat{x}_k^-) \quad (20)$$

$$p_k = (i - k_k \cdot h) \cdot p_k^- \quad (21)$$

Для того, чтобы настроить фильтр, необходимо задать переменные  $f, b, r, q$  и  $h$ , которые задают динамику системы и измерений, а также определяют параметры сглаживания. Покажем настройку системы измерений на примере положения педали газа.

$f$  – переменная, описывает динамику системы. На динамику в нашем случае не оказывается влияния, так как педаль газа не изменяется со временем и может равновероятно оказываться в любом положении. Поэтому  $f = 1$ .

$b$  – переменная, определяющая применение управляющего воздействия. Было принято, что положение педали газа не зависит от положения руля. Поэтому внешними воздействиями можно пренебречь,  $b = 0$ .

$r$  – ошибка измерения. Может быть определена путем испытаний датчиков, после серии экспериментов и вычислений было эмпирически получено, что наилучший результат достигается при  $r = 100$ .

$q$  – шум процесса. При испытаниях на стенде было установлено, что наилучшие результаты получаются при  $q = 1$ .

$h$  – матрица наблюдаемости. В матричном представлении показывает соотношение между измерениями и действительным состоянием системы. Определитель матрицы должен быть равен единице, поэтому, в нашем случае с одной переменной,  $h$  должно принимать значение 1.

После произведенных изменений формулы принимают вид (22-26):

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1} \quad (22);$$

$$p_k^- = p_k + 1 \quad (23).$$

$$k_k = p_k^- \cdot (p_k^- + 100)^{-1} \quad (24);$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + k_k (z_k - \hat{x}_k^-) \quad (25);$$

$$p_k = (1 - k_k) \cdot p_k^- \quad (26).$$

На вход фильтра Калмана подается значение  $z_k$ , а на выход -  $\hat{x}_k$ .

Ниже приведен пример реализации фильтра Калмана в виде функции на языке C++:

```
float xkp=1.0, xkminus1=1.0, Kk=1.0, Pkminus1=1.0, Pk=1.0, Pkp=1.0, xk=1.0;
```

```
int F=1, H=1, R=100; float Q=1;
```

```
float kalman (float q)
```

```
{
```

```
    xkp=F*xkminus1;
```

```
    Pkp=F*Pkminus1*F+Q;
```

```
    Kk=(Pkp*H)/(H*Pkp*H+R);
```

```
    xk=xkp+Kk*(q-H*xkp);
```

```
    Pk=(1-Kk*H)*Pkp;
```

```
    xkminus1=xk;
```

```
    Pkminus1=Pk;
```

```
    return xk;
```

```
}
```

Функция принимает на вход значение  $q$ , являющимся измерением в данный момент.

После произведенных вычислений функция возвращает число  $xk$ , представляющим собой рассчитанное состояние системы в данный момент времени.

Введение данного модуля позволило решить проблему и обеспечить надёжную работу. Необходимо учитывать, что испытания проводились на лабораторном стенде и при переносе системы на ходовой макет транспортного средства с задним приводом алгоритмы и программное обеспечение, скорее всего, будут скорректированы. Также на первом этапе из алгоритмов была исключена информация о данных с датчика ускорения для упрощения

отладки и поиска неисправностей. Авторы, тем не менее, считаю, что он необходим и планируют исследовать работоспособность системы и с датчиком ускорения после всесторонних испытаний и отладки данного алгоритма на реальном объекте. На данный момент система электрического дифференциала с электронным управлением установлена на ходовом макете АТС с электрической трансмиссией Formula Electric, разработанный студентами МАДИ в рамках международной образовательной инженерной серии. На данном АТС планируется продолжить исследования.

### **Заключение**

Для осуществления инициализации периферийных устройств и формирование управляющих воздействий, был разработан алгоритм функционирования электрического дифференциала, создано программное обеспечение для микроконтроллера TMS320F28335, позволяющее производить сбор и обработку данных с датчиков скорости, положения руля и педали газа. Для проведения испытаний был разработан испытательный стенд с использованием блоков управления электродвигателями постоянного тока с интеллектуальными ключами на основе MOSFET транзисторов, управляемых посредством отправки сообщений по шине CAN от платы управления. На стенде были проведены испытания, установлено влияние помех на сигналы с датчиков, которые были решены при помощи реализации цифрового фильтра Калмана.

Были проведены испытания и произведена корректировка алгоритмов и программного обеспечения по результатам испытаний.

### **Список литературы**

1. Википедия [Электронный ресурс]: семейство стандартов IDEF. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/IDEF> (12.02.2014)
2. Википедия [электронный ресурс]: фильтр Калмана. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter) (12.02.2014)
3. Голубчик, Т.В. Повышение энергетической эффективности тягового электропривода транспортных средств с независимыми индивидуальными двигателями / Т.В.Голубчик, В.Е.Ютт, Нгуен К.Т., Лазарев Д.Б. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1.
4. Сидоров, К.М. Индивидуальный электропривод ведущих колес транспортного средства. Результаты разработки и стендовых испытаний / К.М.Сидоров, В.Е.Ютт, Т.В.Голубчик // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2013. № 1. С. 13а-20.

5. Сидоров, К.М. Результаты стендовых испытаний унифицированного электромеханического узла трансмиссии транспортного средства с индивидуальным приводом ведущих колес / К.М. Сидоров, В.Е. Ютт, Д.Б. Лазарев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1
6. СП 52.13330.2011 Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95, - М. : Минрегион РФ, 2011 : тираж 250 экз. : – 69с. : – 25с.
7. Сурин, Е.И. Энергетическая эффективность электромобилей и гибридных автомобилей / Е.И.Сурин, Т.В.Голубчик // Электроника и электрооборудование транспорта. 2006. № 6. С. 3-5.
8. Kada Hartani, Mohamed Bourahla, “Electronic Differential with Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion System// Turk J Elec Eng & Comp Sci. – 2009. –Vol 17, №1. – p.21-38.
9. K. Hartani, Y. Miloud, A. Miloudi., Electric Vehicle Stability with Rear Electronic Differential Traction// EFEEA’10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, Ghardaïa, Algeria, 2010, p. -5.
10. Zulkiflie Ibrahim, Nurazlin Mohd Yaakop, Marizan Sulaiman, Electric Differential With Svpwm Direct Torque Control Using Five-Leg Inverter For Electric Vehicles// Journal of Theoretical and Applied Information Technology. –2012, Vol.46, No.2, p.599-609.

**Рецензенты:**

Сидоров Б.Н., д.т.н. профессор, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование», ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г.Москва.

Марсов В.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВПО ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г.Москва.