

УДК 629.33

## Разработка закона управления индивидуальным приводом двигателей многоосной колесной машины

**Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко**

*Представлены адаптивный закон управления электромеханической трансмиссией колесной машины с индивидуальным приводом двигателей и результаты имитационного математического моделирования движения в различных условиях, доказывающие эффективность закона.*

**Ключевые слова:** индивидуальный привод колес, мощность, двигатель, крутящий момент, математическая модель, имитационное моделирование, колесная машина.

*A detailed description of the adaptive control of the wheeled vehicle electromechanical transmission with an individual drive and results of mathematical simulation of motion under different conditions, demonstrating the control efficiency are given.*

**Keywords:** wheels individual drive, power, prop, torque, mathematical model, simulation modeling, wheeled vehicle.

В различных условиях и режимах движения (разгон-торможение, криволинейное движение или преодоление подъема, движение по твердой или деформируемой опорной поверхности и т. д.) перераспределение мощности источника энергии, подводимой к колесам разных бортов и осей, должно быть различным.

Трансмиссия в целях улучшения показателей важнейших эксплуатационных свойств автомобиля (безопасности и подвижности) должна обеспечивать непрерывное регулирование мощности, подводимой к колесному двигателю, в зависимости от условий его качения, т. е. должно осуществляться приспособление машины, в частности полноприводного многоосного автомобиля, к случайно изменяющимся условиям внешней среды. Трансмиссия должна реализовать быструю и точную реакцию автомобиля на изменение силовых и кинематических параметров движения [1].

На кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан алгоритм распределения моментов по колесам пропорционально относительной нормальной нагрузке, приходящейся на каждый из двигателей. Эффективность предложенных теоретических положений была подтверждена результатами имитационного математического моделирования. При этом управление тяговыми электродвигателями было организовано по угловой скорости, т. е. при сравнении расчетных (теоретических) угловых скоростей всех колес с фактическими угловыми скоростями определяются необходимые моменты, подводимые к каждому колесу.



**КОТИЕВ**

**Георгий Олегович**  
доктор технических наук,  
профессор  
зав. кафедрой «Колесные  
машины»



**ГОРЕЛОВ**

**Василий Александрович**  
кандидат технических  
наук, доцент  
кафедры «Колесные  
машины»

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



**МИРОШНИЧЕНКО**

**Анатолий Васильевич**  
кандидат технических  
наук,  
главный конструктор  
(ОКБ «Техника»)

При разработке систем управления электродвигателями возможна реализация различных подходов, как по угловой скорости так и по моменту. В данной работе решается задача управления электромеханической трансмиссией колесной машины при организации управления тяговыми электродвигателями по моменту и перераспределению моментов пропорционально относительным нормальным нагрузкам, приходящимся на каждое колесо.

Предположим, что имеется условная механическая трансмиссия с двигателем, для которого мощность определяется выражением

$$N_{\text{дв}} h = M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{дв}}$  — максимальная мощность двигателя;  $h$  — степень использования мощности двигателя (нажатие педали «газ» [0; 1]);  $M_{\text{дв}}$  — выходной момент двигателя;  $\omega_{\text{дв}}$  — угловая скорость вращения выходного вала двигателя.

Пусть выходной момент двигателя должен перераспределяться между всеми движителями пропорционально относительной нормальной нагрузке, приходящейся на каждый из них:

$$M_{ki} = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^n Q_j} M_{\text{дв}}, \quad (2)$$

Здесь  $M_{ki}$  — крутящий момент на  $i$ -м колесе;  $\frac{Q_i}{\sum_{j=1}^n Q_j}$  — отношение нормальной силы на  $i$ -м

колесе  $Q_i$  к суммарной силе (весу колесной машины) по всем  $n$  колесам.

Учитывая возможность перераспределения угловых скоростей вращения колес, как это реализуется в полностью дифференциальной трансмиссии, получаем:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{ki}}{n}, \quad (3)$$

где  $\omega_{ki}$  — угловая скорость  $i$ -го колеса.

Используя уравнения (1) — (3), находим

$$M_{ki} = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^n Q_j} \frac{N_{\text{дв}} h}{\sum_{i=1}^n \omega_{ki} / n}, \quad (4)$$

Распространим выражение (4) на электромеханическую трансмиссию с индивидуальным приводом колес, полагая что  $M_{di}$  — момент на электродвигателе  $i$ -го колеса:

$$M_{di} = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^n Q_j} \frac{N_{\text{дв max}} n h}{\sum_{i=1}^n \omega_{ki} / n}, \quad (5)$$

Здесь  $N_{\text{дв max}}$  — максимальная мощность электродвигателя каждого колеса.

При разработке закона управления трансмиссией с перераспределением моментов по колесам пропорционально относительной нормальной нагрузке был принят подход, исключаяющий описание внутренней динамики процессов, которые происходят в электромеханических устройствах.

Закон реализован в среде моделирования Simulink программного комплекса Matlab путем включения в общую модель динамики колесной машины (КМ) по твердой ровной опорной поверхности. С помощью имитационного математического моделирования движения в различных условиях была доказана эффективность предложенного закона распределения моментов по колесам и работоспособность системы управления тяговыми электродвигателями.

Схема замещения электромеханической трансмиссии (рис. 1) включает блок «Контроллер» (Controller), в котором определяются моменты для каждого тягового электродвигателя, блок «Динамика колеса» (Dinamica kolesa), в котором рассчитываются действительные значения угловых скоростей каждого движителя.

Входными величинами блока «Контроллер» являются (см. рис. 1):  $h$ ,  $\omega_{ki}$ ;  $Q_i / \sum_{j=1}^n Q_j$ .

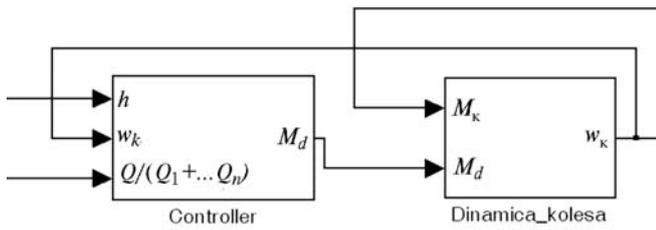


Рис. 1. Структурная схема модели электромеханической трансмиссии с системой управления электродвигателя по моменту

Динамика выходного вала электродвигателя, связанного непосредственно с движителем, представлена на рис. 2 и описывается уравнением

$$J_{ki} \dot{\omega}_{ki} = M_{di} - M_{ki}, \quad (6)$$

где  $J_{ki}$  — момент инерции  $i$ -го колеса (принимается равным для всех колес);  $\dot{\omega}_{ki}$  — угловое ускорение  $i$ -го колеса;  $M_{ki}$  — крутящий момент на  $i$ -м колесе, являющийся моментом сопротивления для выходного вала электродвигателя,

$$M_{ki} = R_{xi} r_d + M_{mi} + M_{fi}, \quad (7)$$

Здесь  $R_{xi}$  — продольная реакция  $i$ -го движителя с грунтом;  $r_d$  — расстояние от оси колеса до

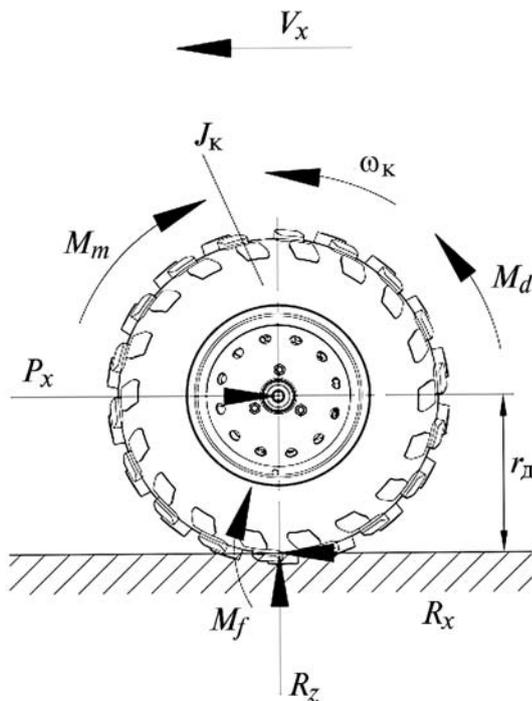


Рис. 2. Схема сил и моментов, действующих в плоскости колеса:

$P_{xi}$  — продольная сила, приложенная к оси  $i$ -го колеса

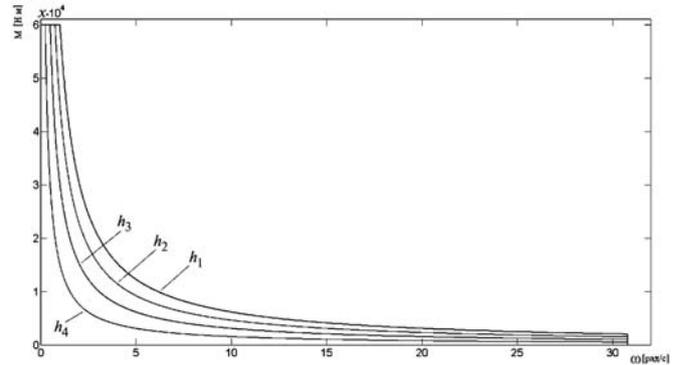


Рис. 3. Характеристики тягового электродвигателя, приведенные к скорости вращения движителя:  $h_1 = 1$ ;  $h_2 = 0,75h_1$ ;  $h_3 = 0,5h_1$ ;  $h_4 = 0,25h_1$

опорной поверхности;  $M_{mi}$  — момент на  $i$ -м колесе от действия тормозной системы автомобиля;  $M_{fi}$  — момент сопротивления качению  $i$ -го колеса.

Внешняя характеристика электродвигателя соответствует графику, представленному на рис. 3. Введены следующие ограничения:

- 1) выходной момент ограничен максимальным значением  $M_{max} = 60$  кН·м;
- 2) выходной момент ограничивается внешней характеристикой электродвигателя (ограничение по максимальной мощности)  $N_{max} = 60$  кВт;
- 3) угловая скорость вращения колеса ограничена (ограничение по максимально возможной скорости движения)  $\omega_{kmax} = 31$  рад/с.

При описании математической модели движения КМ 8×8 полной массой 60 т были приняты следующие допущения. Движение КМ как твердого тела рассматривается в горизонтальной плоскости на ровной, с учетом угла подъема в направлении движения, недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс (рис. 4). Система уравнений (8), описывающая такое движение, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующим на КМ [2, 3]. Для описания данного случая движения КМ введены следующие сис-

темы координат: неподвижная  $x'-y'$ ; подвижная  $x-y$ , связанная с корпусом КМ; система координат  $x''-y''$ , связанная с  $i$ -м колесом (рис. 4) [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_x &= \frac{d\mathbf{V}_x}{dt} - \omega_z \mathbf{V}_y = \frac{1}{m} \left( \mathbf{P}_{wx} + \sum_{i=1}^8 \mathbf{R}_{xi} - mg \sin(\alpha) \right); \\
 \mathbf{a}_y &= \frac{d\mathbf{V}_y}{dt} + \omega_z \mathbf{V}_x = \frac{1}{m} \left( \mathbf{P}_{wy} + \sum_{i=1}^8 \mathbf{R}_{yi} \right); \\
 J_z \frac{d\bar{\omega}_z}{dt} &= \sum_{i=1}^8 M_{mki} + \sum_{i=1}^8 M(\mathbf{R}_i); \\
 \mathbf{V}_{x'} &= \frac{dx'}{dt} = V_x \cos \theta - V_y \sin \theta; \\
 \mathbf{V}_{y'} &= \frac{dy'}{dt} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta; \\
 \bar{\omega}_z &= \frac{d\theta}{dt},
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

где  $m$  — масса КМ;  $J_z$  — момент инерции КМ относительно оси  $z$ ;  $\mathbf{V}$  — вектор скорости центра масс КМ;  $\mathbf{a}$  — вектор ускорения центра масс КМ (абсолютная производная от вектора скорости центра масс КМ);  $\frac{d\mathbf{V}}{dt}$  — относительная производная от вектора скорости центра масс КМ;  $\bar{\omega}$  — вектор угловой скорости поворота КМ;  $\theta$  — угол поворота КМ относительно оси  $x'$ ;  $x', y'$  — координаты центра масс КМ в неподвижной системе координат;  $\mathbf{R}_i$  — вектор силы взаимодействия с грунтом, действующей на  $i$ -е колесо;  $\mathbf{P}_w$  — вектор силы сопротивления воздуха;  $M_{mki}$  — момент сопротивления повороту  $i$ -го колеса;  $\alpha$  — угол преодолеваемого подъема (спуска) при прямолинейном движении.

Детально представленная математическая модель рассмотрена в работах [2, 3].

Для подтверждения эффективности закона распределения мощности по колесам пропорционально относительной нормальной нагрузке на каждом из них в широком диапазоне возможных условий движения колесной машины, а также для проверки возможности организации на практике разработанной системы управления тяговыми электродвигателями «по моменту», были проведены теоретические ис-

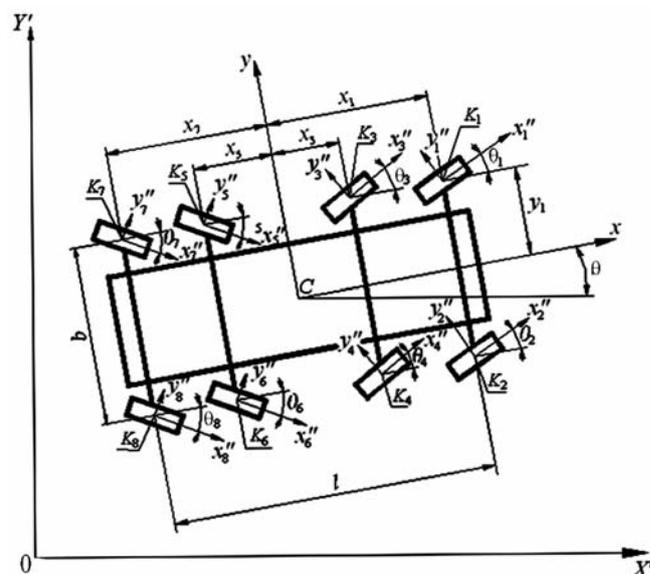


Рис. 4. Расчетная схема криволинейного движения КМ 8×8

следования с помощью имитационного математического моделирования.

Ниже представлены результаты численного моделирования движения КМ с подведением мощности к двигателям по предложенному закону и управлением тяговыми электродвигателями «по моменту». Моделировали четыре режима движения:

1) вход и движение в повороте с фиксированным радиусом ( $R_{расч} = 16$  м) с поддержанием постоянной скорости. КМ начинает двигаться со скоростью  $V = 30$  км/ч (8,33 м/с), которая поддерживается постоянной, на опорном основании «грунтовое основание» (с коэффициентом взаимодействия двигателя с опорным основанием при полном буксовании  $\mu_{smax} = 0,6$ ), все колеса автомобиля управляемые и полюс рулевого управления находится в центре базы. Время моделирования  $t = 20$  с;

2) прямолинейное движение на подъем с углом  $\alpha = 30^\circ$ . При этом КМ начинает двигаться со скоростью  $V = 30$  км/ч на опорном основании «грунтовое основание», угол поворота всех колес в процессе моделирования равен нулю, степень использования мощности двигателей  $h$  нарастает от 0 до 1 за 4 с. Время моделирования  $t = 10$  с;

3) прямолинейное движение автомобиля на ровном опорном основании с различным ко-

эффицентом сцепления под левым и правым бортом. При этом КМ начинает разгон с начальной скорости  $V = 1$  км/ч все колеса правого борта находятся на опорном основании «грунтовое основание», все колеса левого борта находятся на опорном основании с коэффициентом взаимодействия при полном буксовании  $\mu_{\text{max}} = 0,03$ , угол поворота всех колес в процессе моделирования равен нулю, степень использования мощности двигателей  $h$  нарастает от 0 до 1 за 4 с (аналогично п. 2). Время моделирования  $t = 5$  с;

4) прямолинейное движение автомобиля с условиями, описанными в п. 3, но с организацией аналога блокированной связи между колесами за счет индивидуального управления степенью использования мощности  $h$  каждого тягового электродвигателя.

**Режим движения № 1.** Закон управления поворотом колес ( $\theta_{ki}$ ) представлен на рис. 5.

При исследовании движения КМ в повороте были получены следующие результаты (траектория установившегося движения представлена на рис. 6). Линейная скорость автомобиля после коррекции со стороны системы поддержания постоянной скорости (см. рис. 11), о работе которой свидетельствует наличие переходных процессов практически на всех графиках, и наступления установившегося режима движения, составила 8,5 м/с. Угловые скорости колес перераспределились в соответствии

с траекториями их движения (рис. 7), а моменты к каждому колесу были подведены пропорционально соответствующей относительной нормальной силе на колесе (рис. 8 и рис. 10). График изменения отношения продольной реакции к нормальной силе на каждом колесе (рис. 9) доказывает, что сила тяги реализовалась также пропорционально нормальной силе, приходящейся на колесо, а ее удельное значение  $P_{xi} / Q_i$  на каждом движителе было одинаковым.

Таким образом, можно отметить, что при движении в повороте предложенный закон управления объединяет свойства блокированной и дифференциальной трансмиссии: угловые скорости колес соответствуют траекториям движения, но при этом на каждом колесе ре-

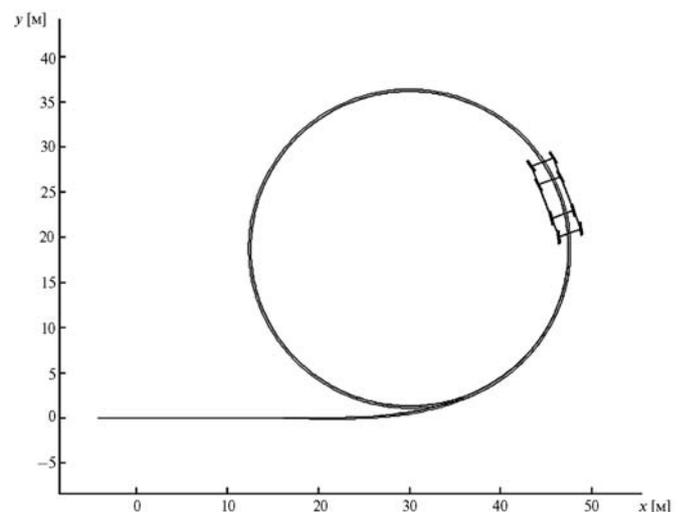


Рис. 6. Траектории движения КМ (режим движения № 1)

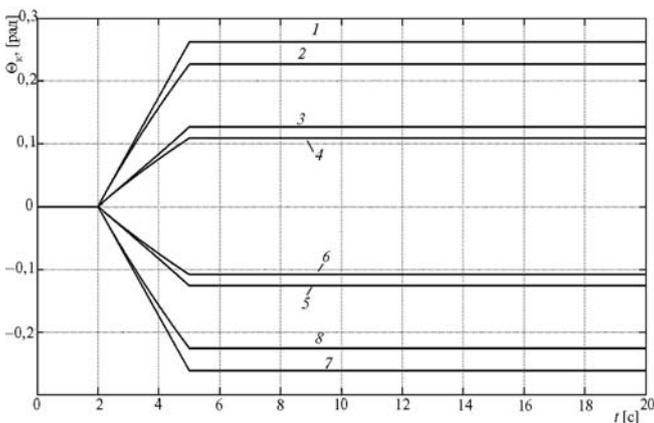


Рис. 5. Графическое отображение закона управления поворотом колес (режим движения № 1); цифрами обозначена принадлежность графика к соответствующему колесу (см. рис. 4)

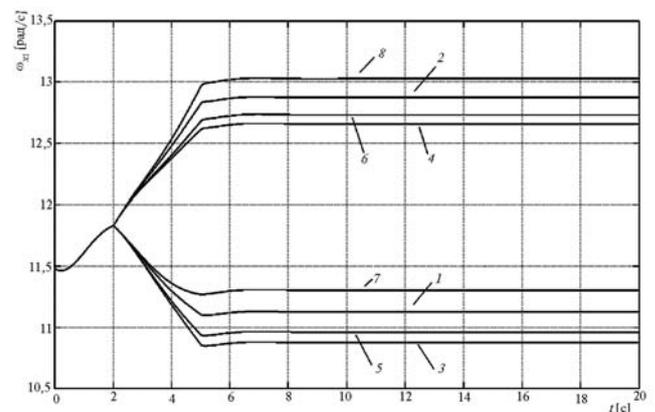


Рис. 7. Зависимость изменения угловых скоростей вращения колес от времени (режим движения № 1)

лизуется различный крутящий момент, пропорциональный относительной нормальной нагрузке.

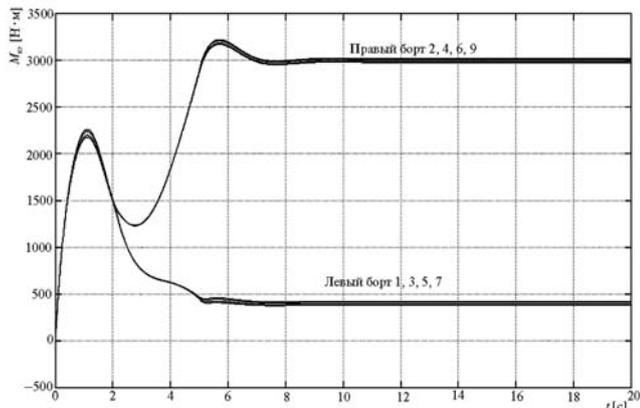


Рис. 8. Зависимость изменения крутящих моментов на колесах от времени (режим движения № 1)

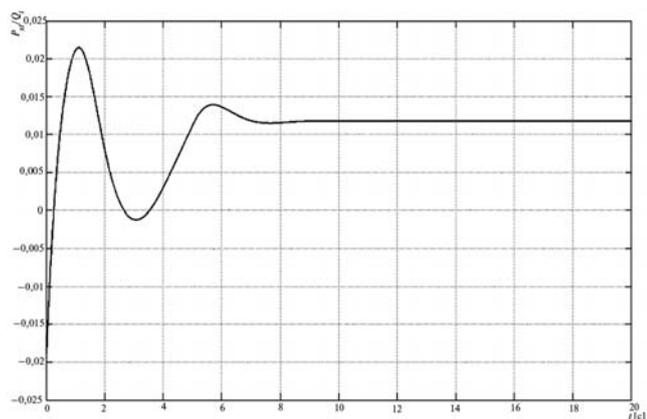


Рис. 9. Зависимость изменения отношения продольной силы к нормальной реакции на каждом колесе (режим движения № 1)

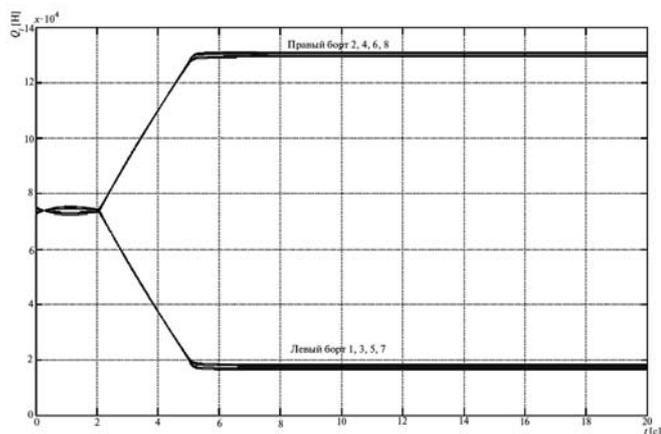


Рис. 10. Зависимость изменения нормальной реакции на каждом колесе (режим движения № 1)

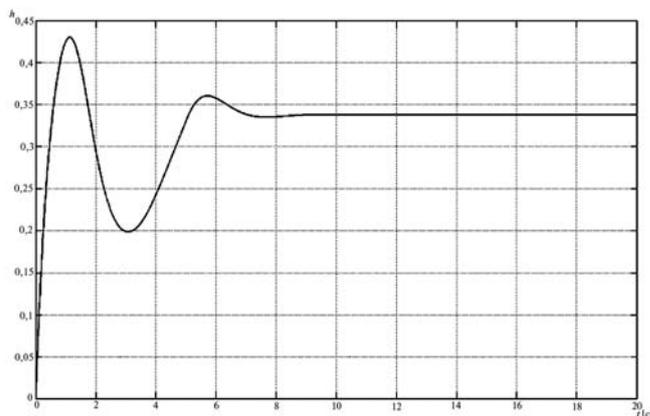


Рис. 11. Зависимость изменения степени использования мощности двигателя (режим движения № 1)

**Режим движения № 2.** Результаты моделирования представлены на рис. 12—18. КМ преодолевает предельный по тяговым возможностям подъем. Линейная скорость (см. рис. 12) достигает установившегося значения 1,1 м/с. Угловые скорости всех колес при этом были практически одинаковы (см. рис. 13), а крутящие моменты на каждом колесе разные и пропорциональные относительной нормальной нагрузке (см. рис. 14). Такие результаты характерны больше для заблокированной схемы, и, как известно, в трудных дорожных условиях заблокированный вариант является наиболее предпочтительным. Таким образом, предложенный закон «адаптировался» к условиям движения и обеспечил наилучший вариант распределения мощности. Анализ рис. 15 показывает, что удельная сила тяги для каждой оси была разной, объясняется это тем, что тяговые

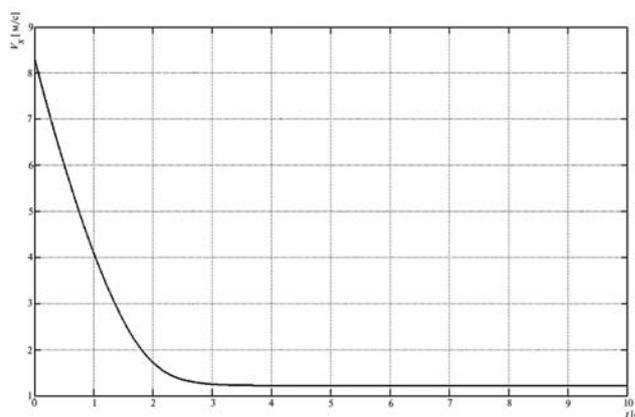


Рис. 12. Зависимость изменения линейной скорости автомобиля от времени (режим движения № 2)

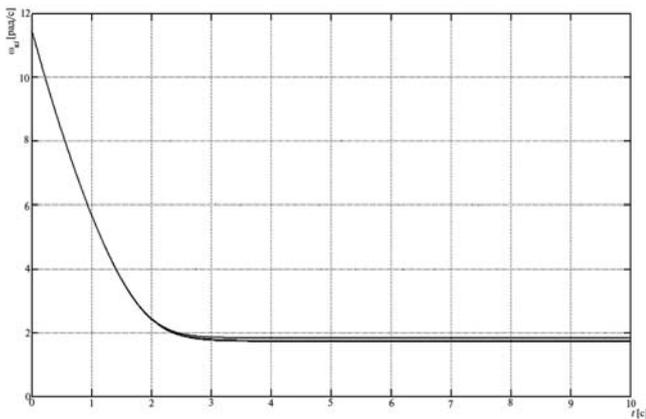


Рис. 13. Зависимость изменения угловых скоростей вращения колес от времени (режим движения № 2)

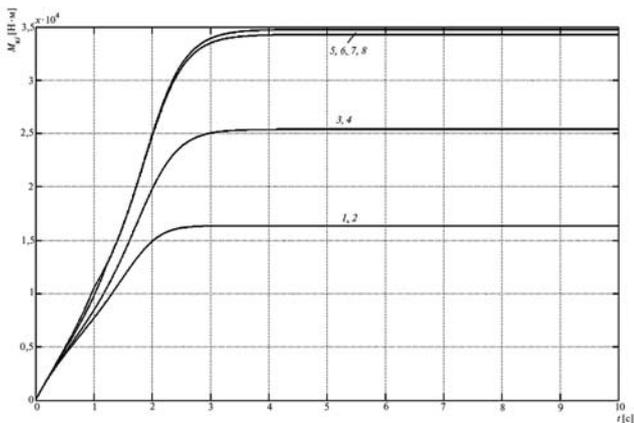


Рис. 14. Зависимость изменения крутящих моментов на колесах от времени (режим движения № 2)

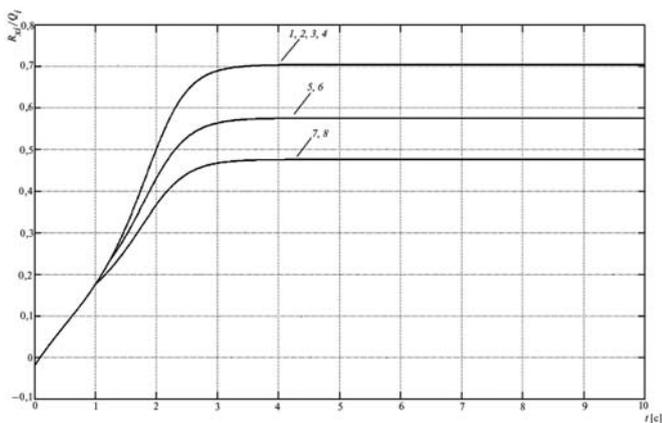


Рис. 15. Зависимость изменения отношения продольной силы к нормальной реакции на каждом колесе (режим движения № 2)

электродвигатели колес третьей и четвертой оси вышли на ограничение по максимальной мощности (см. рис. 17), и больший момент к колесам двух задних осей не может быть подведен. Поэтому удельная сила тяги на задних

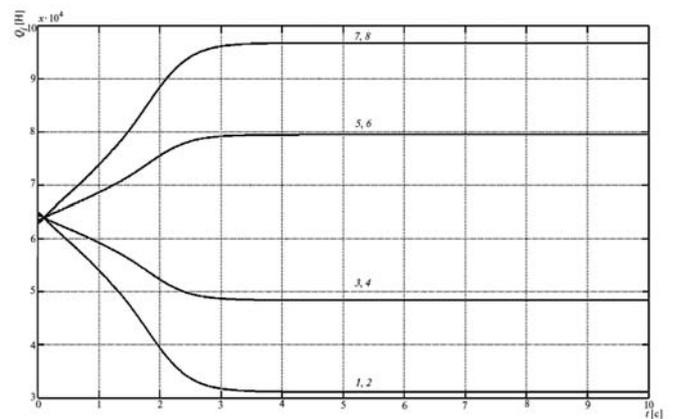


Рис. 16. Зависимость изменения нормальной реакции на каждом колесе (режим движения № 2)

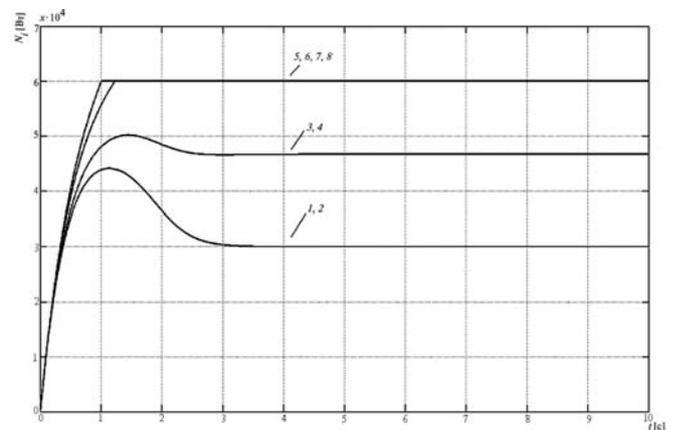


Рис. 17. Зависимость изменения затрат мощности тяговых электродвигателей колес (режим движения № 2)

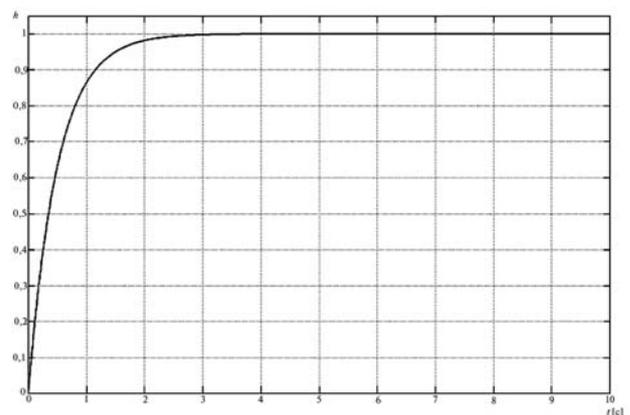


Рис. 18. Зависимость изменения степени использования мощности двигателя (режим движения № 2)

осей (колеса № 5, 6, 7, 8) меньше, чем на передних (колеса № 1, 2, 3, 4) (см. рис. 15). По перераспределению нормальных реакций по колесам (см. рис. 16) можно судить о правиль-

ной работе закона распределения мощности пропорционально приходящейся на колесо относительной нормальной нагрузке. Управляющие воздействия со стороны водителя в процессе моделирования приведены на рис. 18.

**Режим движения № 3.** При исследовании движения КМ с различными сцепными свойствами под разными бортами целенаправленно был задан очень низкий коэффициент взаимодействия движителя с грунтом под левым бортом. Анализируя полученные результаты моделирования (рис. 19–22), отметим, что за 5 с движения скорость КМ достигла значения немногим более  $V = 2,5$  м/с. При этом тяговые электродвигатели всех колес борта, находящегося в дорожных условиях с низким сцеплением, выходят на максимум по мощности (см. рис. 22), раскручивая при этом соответствующие движители (см. рис. 20). Момент на каждом колесе различный, но для всех колес левого борта он сразу достигает своего максимума и далее не изменяется (см. рис. 21). Моменты на колесах правого борта не позволяют полностью реализовать тяговые возможности, исходя из заданных сцепных свойств. Таким образом, динамические качества КМ резко снижаются, а энергетические затраты наоборот возрастают, вследствие чего можно сделать вывод о том, что в заданных условиях движения закон распределения моментов пропорционально нормальной нагрузке без коррекции не эффективен.

Очевидно, что применение дифференциальной связи между колесами в данных условиях

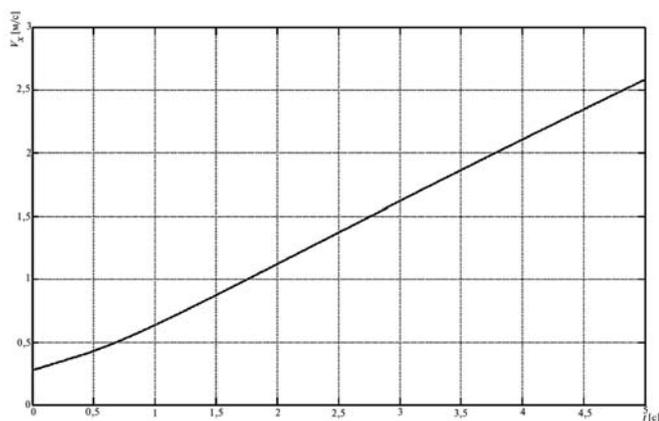


Рис. 19. Зависимость изменения линейной скорости автомобиля от времени (режим движения № 3)

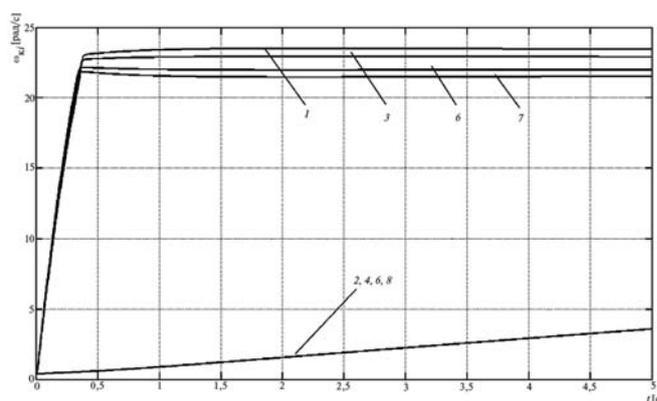


Рис. 20. Зависимость изменения угловых скоростей вращения колес от времени (режим движения № 3)

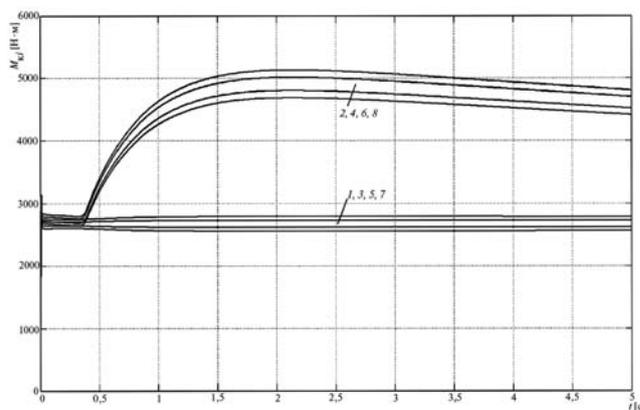


Рис. 21. Зависимость изменения крутящих моментов на колесах от времени (режим движения № 3)

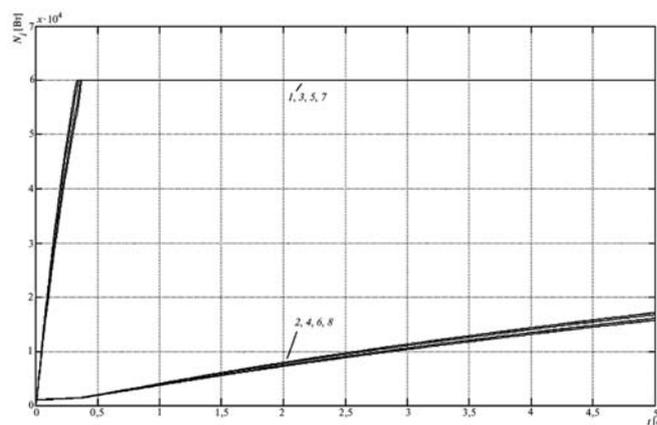


Рис. 22. Зависимость изменения затрат мощности тяговых электродвигателей колес (режим движения № 3)

движения никакого положительного результата не принесло бы, и водитель, попав в такую ситуацию, наоборот, постарается заблокировать дифференциалы. Таким образом, подтвердилась актуальность задачи организации аналога

блокированной связи между колесами для предложенного закона распределения мощности при управлении тяговыми электродвигателями для экстремальных случаев движения.

В случае поддержания одинаковой угловой скорости всех колес (что и реализуется при блокировке) в соответствии с формулой (5) на каждом колесе будет реализован одинаковый момент. Как известно, при блокировании трансмиссии при одинаковой скорости вращения колес может быть реализован разный момент на каждом колесе в зависимости от условий, в которых находится движитель.

При детальном анализе зависимости (5), по которой определяют моменты на выходных валах тяговых электродвигателей, очевидно, что организация аналога блокированной связи возможна только при индивидуальном управлении степенью использования мощности  $h_i$  каждого электродвигателя.

Предложенный алгоритм управления приводными двигателями реализуется с помощью «Fuzzy Logic» (нечеткой логики) [4].

В качестве входного сигнала фаззи-контроллера выбрана величина  $\Delta\omega$  — относительная разница между фактической угловой скоростью вращения  $i$ -го колеса  $\omega_{ki}$ , измеренной на колесах, и осредненным значением угловой скорости по всем колесам  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{ki}$ :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{ki} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{ki}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{ki}}. \quad (9)$$

Выходным параметром контроллера является  $h_i$  — уровень использования мощности привода двигателя каждого колеса, который может изменяться в пределах от 0 — педаль «газ» полностью закрыта, до 1.

Для входной величины были составлены функции принадлежности сигналов (рис. 23), описывающие следующие лингвистические значения [4]:

$\Delta\omega$  — отрицательное («-»), нулевое («0»), положительное («+»).

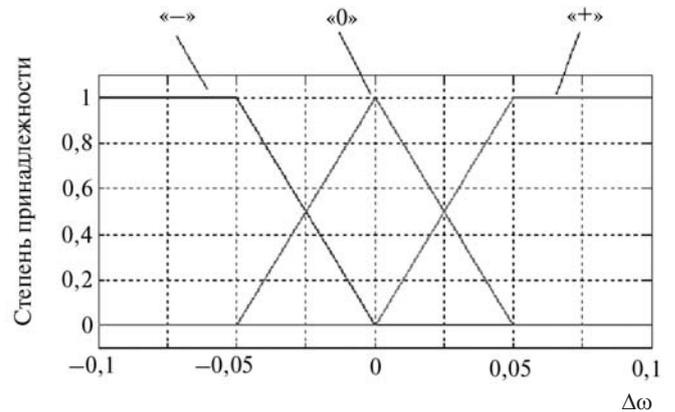


Рис. 23. Функции принадлежности входного сигнала

Лингвистические значения для выходной величины:

$h$  — уровень использования мощности нулевой («0»), уровень использования мощности частичный («+»), уровень использования мощности максимальный («++»).

На основании выбранных значений (термов) составлены три лингвистических правила, которые связывают входной параметр с выходной величиной, с описанием режима движения для каждого случая (таблица).

Таблица

№ п/п	$\Delta\omega$	$h$	Описание режима движения
1	-	++	Средняя скорость по всем колесам больше, чем текущая скорость на данном колесе. Полное нажатие на педаль «газ»
2	0	+	Текущая скорость на колесе равна средней по всем колесам. Частичное нажатие на педаль «газ»
3	+	0	Текущая скорость на колесе больше, чем средняя по всем колесам. Педаль «газ» должна быть полностью закрыта

В управлении предусмотрено ограничение: скорость при регулировании может быть увеличена, но не больше, чем задано водителем, т. е. в модели из двух значений (средней скорости вращения по всем колесам  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{ki}$  и желаемой скорости движения, задаваемой водителем) для сравнения с текущей скоростью выбирается то значение  $h_i$ , которое меньше. Система работает таким образом, что позволяет колесам раскручиваться, но не превышая среднего значения углового ускорения по всем

колесам. При этом, если колесо достигло той скорости, с которой водитель желает, чтобы осуществлялось движение КМ (пересчет от угловой скорости вращения колеса к поступательной скорости движения центра масс через свободный радиус колеса), далее раскручивание будет ограничено.

**Режим движения № 4.** Рассмотрим результаты моделирования движения КМ в условиях, соответствующих режиму № 3, но при организации блокированной связи между колесами по представленному выше алгоритму.

Скорость движения КМ за тот же период времени, что и в предыдущем режиме, достигала  $V = 5,2$  м/с (рис. 24). Сравнивая данный показатель с результатами предыдущего испытания ( $V = 2,5$  м/с), очевидно, что с точки зрения динамических качеств данный вариант управления тяговыми электродвигателями предпочтительней, чем без организации блокировки. Такой же вывод следует и при анализе рис. 25. Колеса левого борта, находящиеся в условиях низкого сцепления с опорной поверхностью, немного опережают по угловой скорости вращения колеса правого борта, однако это опережение невелико, а главное, что сразу система не раскручивает двигатели в условиях низкого сцепления, как это было в предыдущем случае. Таким образом исключаются лишние затраты энергии, что доказывает анализ рис. 25 и 26.

Крутящие моменты на колесах правого борта, находящегося на опорном основании с высокими сцепными характеристиками, реализуются бóльшие, чем на колесах левого, причем

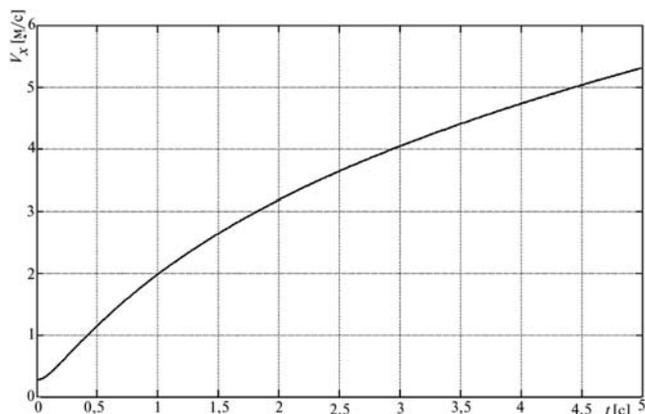


Рис. 24. Зависимость изменения линейной скорости автомобиля от времени (режим движения № 4)

учитывается также и перераспределение нормальной нагрузки, что подтверждается разными значениями крутящих моментов для каждого колеса соответствующего борта (см. рис. 26). Мощность, затрачиваемая при движении тяговыми электродвигателями правого борта, гораздо больше, чем левого (рис. 27). Таким образом, на колесах с лучшими сцепными свойствами реализуются максимальные тяговые усилия, а на колесах, находящихся в условиях низкого сцепления, минимизируются затраты энергии. Рисунок 28 иллюстрирует, как система осуществляла коррекцию  $h_i$  для каждого тягового электродвигателя. Очевидно, что управляющее воздействие  $h_i$  на тяговые электродвигатели, которые связаны с колесами, находящимися в условиях низкого сцепления, должно быть меньше и плавнее, чем на двигатели колес в условиях хорошего сцепления, что и подтверждается рис. 28.

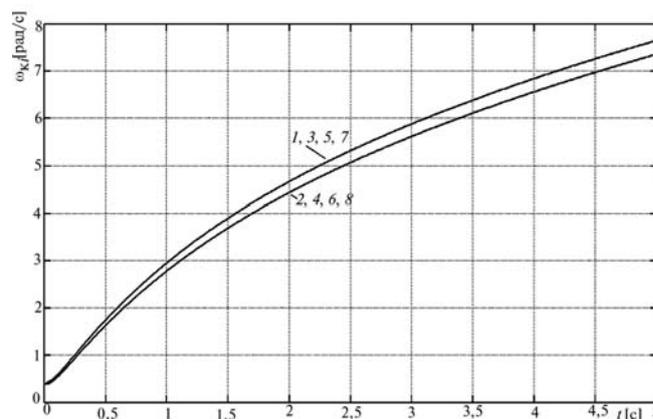


Рис. 25. Зависимость изменения угловых скоростей вращения колес от времени (режим движения № 4)

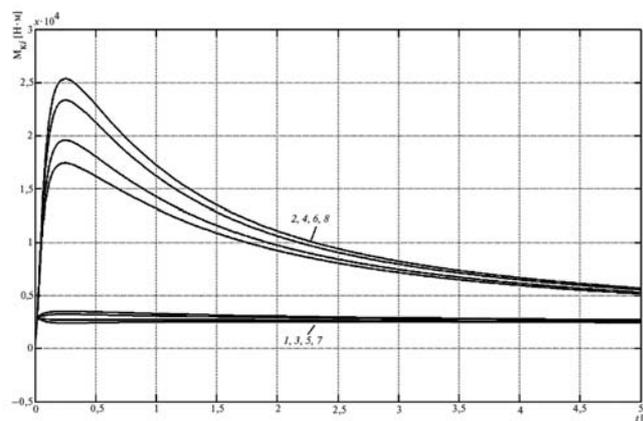


Рис. 26. Зависимость изменения крутящих моментов на колесах от времени (режим движения № 4)

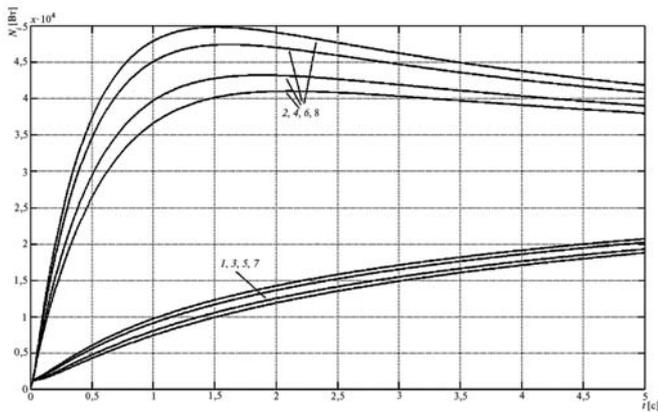


Рис. 27. Зависимость изменения затрат мощности тяговых электродвигателей колес (режим движения № 4)

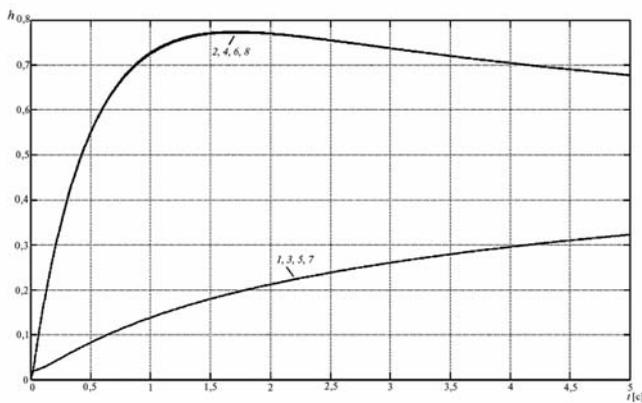


Рис. 28. Зависимость изменения степени использования мощности каждого тягового электродвигателя (режим движения № 4)

## Выводы

Проведенные с помощью имитационного математического моделирования теоретические исследования динамики КМ с индивидуальным приводом колес при различных внешних условиях движения позволили сделать следующий вывод: предложенный закон распределения мощности по колесам при управлении тяговыми двигателями «по моменту» работоспособен и эффективен во всех исследуемых случаях движения, кроме движения по дороге с различными сцепными свойствами под бортами (опорное основание «микст»). Организация аналога блокированной связи (которую на основании выполняемых функций также возможно

называть противобуксовочной системой) по предлагаемому алгоритму для этого случая движения позволяет избежать излишних энергетических затрат и существенно повысить тягово-динамические свойства КМ.

Для большинства случаев движения разработанный закон управления трансмиссией сочетает в себе преимущества дифференциальной и блокированной связи: обеспечивает разные угловые скорости вращения каждого колеса в соответствии с траекториями движения, реализуя при этом различные крутящие моменты на каждом движителе пропорционально относительной нормальной нагрузке. При попадании в экстремальные дорожные условия водитель может выбрать режим управления тяговыми электродвигателями, аналогичный блокированной связи, который позволяет предотвращать потерю подвижности при рациональных энергетических затратах.

Безусловно, многообразие дорожных условий не ограничивается теми, которые приняты для исследования в представленной работе, однако совокупность типовых случаев движения и возможных при этом внешних условий, определяющихся дорожной поверхностью, исследуемые испытания полностью охватывают. В этой связи можно отметить, что эффективность разработанного закона управления электромеханической трансмиссией с распределением моментов по движителям пропорционально относительной нормальной нагрузке и управлением тяговыми электродвигателями по моменту доказана.

## Литература

1. Теория силового привода колес автомобилей высокой проходимости / Под общ. ред. С.Б. Шухмана. М.: Агробизнесцентр, 2007. 336 с.
2. Горелов В.А., Котиев Г.О. Прогнозирование характеристик криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 6×6 при различных законах управления поворотом колес задней оси // Изв. вузов. Машиностроение. 2008. № 1. С. 44—55.
3. Котиев Г.О., Чернышев Н.В., Горелов В.А. Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8×8 при различных способах управления поворотом // Журнал ААИ. 2009. № 2. С. 34—40.
4. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide, Version 2. The MathWorks, Inc., 1999. 203 p.

Статья поступила в редакцию 30.11.2011