

УДК 62-83

Е. А. Смотров, канд. техн. наук,
Д. В. Вершинин, В. В. Субботин

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА И КОМПЕНСАТОРА ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аннотация. Рассмотрены особенности работы электропривода многодвигательного электротранспортного средства, разработана его модель, учитывающая связь колес через дорожное полотно. Спроектирован регулятор, позволяющий минимизировать влияние изменения внешних параметров на движение транспортного средства и режимы работы электропривода. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: электротранспорт, электропривод, регулятор.

E. A. Smotrov, Ph. D.,
D. V. Vershinin, V. V. Subbotin

THE DESIGN OF THE MODEL OF MULTIMOTOR ELETRIC VEHICLE AND OF THE COMPENSATOR OF EXTERNAL DISTURBANCES

Abstract. In this article the peculiarities of operation of the electric drive of multimotor electric vehicle are being analysed and its' model that takes into consideration the connection between tires and road developed. The regulator allowing to minimize the influence of changes of the external parameters on the motion of the electric vehicle; results of simulation are shown.

Keywords: electric vehicle, electric drive, regulator.

Є. А. Смотров, канд. техн. наук,
Д. В. Вершинін, В. В. Суботін.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ БАГАТОДВИГУННОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА КОМПЕНСАТОРА ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

Анотація. Розглянуто особливості роботи електропривода багатодвигунного електротранспортного засобу, розроблено його модель, що враховує зв'язок коліс через дорожнє полотно. Спроектовано регулятор, який дає змогу мінімізувати вплив зміни зовнішніх параметрів на рух електротранспортного засобу та режими роботи електропривода. Наведено результати моделювання.

Ключові слова: електротранспорт, електропривод, регулятор.

Преимуществами многодвигательного электромобиля, кроме высокой (практически в разы) эффективности расходования энергии на движение и ряда конструктивных особенностей [2], являются следующие: задание и измерение развиваемого момента производится достаточно точно; скорость изменения вращающего момента составляет десятков миллисекунд, что на один–два порядка быстрее, чем у двигателя внутреннего сгорания или гидравлической тормозной системы [5].

Основная масса исследователей электротранспортных средств (ЭТС) оперирует контуром момента – аналогом двигателя внутреннего сгорания и моделью на базе одного колеса. В реальных системах предпочтительным является использование электропривода (ЭП) в контуре скорости, что позволяет реализовать более гибкие и комфортные

алгоритмы управления ЭТС. Для корректной и эффективной работы ЭП необходимо исключить проблемы, которые могут возникать из-за неточного задания, перераспределения нагрузки на ЭП или изменения параметров механической части.

Примером изменения параметров механической части может послужить изменение радиуса одного или нескольких колес, что может быть вызвано внешними возмущениями, например, изменением давления в шине. В случае одинаковых статических (конечная жесткость) механических характеристик частота вращения колеса с меньшим радиусом увеличивается, перемещаясь из рабочей точки вверх вдоль механической характеристики. От степени изменения радиуса зависит, к какой частоте вращения будет стремиться новая рабочая точка на механической характеристике, а от системы управления – в какой степени это отразится на энергетике ЭП.

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,
Субботин В.В., 2012

Перераспределение нагрузки на ЭП происходит прямо пропорционально жесткости. Чем выше жесткость механической характеристики, тем большую часть нагрузки берет на себя ЭП. При наличии погрешностей задания скорости и одинаковых характеристиках большую нагрузку берет на себя привод с большей величиной задания по скорости.

В ЭП с астатическими (абсолютно жесткими) характеристиками вследствие разброса в конце разгона наблюдается ситуация, когда один привод переходит во 2-ой квадрант электромеханической характеристики – режим торможения, так как задание или радиус шины, или давление в ней меньше. В разработанной структуре [2] с отдельным заданием величин двигательного и тормозного моментов, указанный привод переходит в режим свободного выбега и всю нагрузку в таком случае берет на себя другой привод.

В [6] предлагается система распределения нагрузки для 4-колесного транспортного средства с двумя независимыми приводами задних колес без учета режима проскальзывания. Предложенное решение обеспечивает синхронную частоту вращения ведущих колес при прямолинейном движении, что делает систему управления нечувствительной к изменению параметров системы и к внешним возмущениям (сопротивление дороги). Но такой подход оправдан при анализе двухколесного средства (типа электроскутера Segway x2), у которого изменение параметров системы и скорости колес может привести к изменению направления движения. В 4-колесном ЭТС, вследствие взаимосвязи колес через дорожное полотно, указанное применение может привести к другому распределению нагрузки на ведущих колесах, но не к изменению скорости колес (при отсутствии скольжения).

Вместе с тем связь колес через дорожное полотно накладывает определенную специфику на поведение ЭП (многодвигательного ЭТС). При отсутствии проскальзывания колеса связаны через линейную скорость, а координатой обратной связи по скорости в ЭП служит угловая частота вращения. Коэффициент связи между угловой частотой вращения и линейной скоростью – радиус колеса, который зависит от ряда различных

факторов: давления в шине, нормальной составляющей нагрузки на колесе, величины передаваемого крутящего момента и др.

Для проектирования регуляторов, компенсирующих разброс параметров и неравномерность задания, необходимо иметь модель, учитывающую особенность связи колес через дорожное полотно. Составим такую модель, а её работоспособность проверим на примере многодвигательного ЭТС (МЭТС) с двумя ведущими колесами и ЭП с астатическими характеристиками. Система регулирования ЭП описана в [4], останавливаться на ней подробно не будем.

Учет связи через дорожное полотно произведем путем сложения динамических сил, развиваемых ЭП. Под динамическими силами будем понимать разность полного момента МЭТС и момента сопротивления, обусловленного вращением колеса по опорной поверхности, приведенную к линейному движению. Сумма динамических сил всех ЭП затрачивается на приведение в движение транспортного средства и на преодоление силы аэродинамического сопротивления (рассматриваем частный случай: не учитываются сила и направление ветра). Скорость каждого из колес определяется на основании линейной скорости МЭТС, радиусов соответствующих колес и коэффициентов, учитывающих угол поворота МЭТС относительно условно положительной продольной оси.

Система уравнений, описывающая данное МЭТС,

$$\left\{ \begin{array}{l} M_i / R_i = F_i < F_{c\phi i} \\ F_i - F_{c\phi i} = F_{\phi i} \\ R_i = f(M_i, p_i, N_i \dots) \\ \sum_{i=1}^n F_{\phi i} - F_w = m_{TC} \frac{dv_{TC}}{dt}, \quad (1.1 \dots 1.6) \\ F_w = c_z \rho S v_{TC}^2 / 2 \\ \omega_i = v_{TC} K_{\phi i} / R_i \end{array} \right.$$

где M_i – электромагнитный момент, развиваемый на валу i -го колеса, Н·м; R_i – радиус i -го колеса, м; F_i – сила, соответствующая электромагнитному моменту i -го колеса, Н;

$F_{c_{ii}}$ – сила сцепления (предельная сила сцепления с дорогой i -го колеса), Н; $F_{c_{mi}}$ – сила сопротивления движению (трения качения), Н; $F_{о_{vi}}$ – движущая сила i -го колеса, Н; p_i – давление в шине i -го колеса, Па; N_i – нормальная составляющая реакции опоры i -го колеса, Н; n – число ведущих колес; m_{TC} – масса МЭТС, кг; v_{TC} – линейная скорость МЭТС, м/с; F_w – сила аэродинамического сопротивления при отсутствии ветра, Н; c_z – безразмерный аэродинамический коэффициент сопротивления; ρ – плотность воздуха, кг/м³; S – площадь лобовой поверхности транспортного средства, м²; K_{ϕ_i} – поправочный коэффициент, учитывающий изменение линейных скоростей колес по отношению к линейной скорости геометрического центра при повороте.

Поправочные коэффициенты каждого колеса характеризуются параметрами рулевой системы МЭТС. Для упрощения анализа на первом этапе предполагается, что поворот будет осуществляться при небольшом изменении углов поворота МЭТС (в диапазоне изменения угла соблюдается принцип Аккермана) [1].

Первые два выражения системы могут быть записаны также через параметры вращательного движения, а после переведены в параметры линейного движения. Условие сцепления колес с дорожным полотном отражено в выражении 1.1, а связь колес через

дорожное полотно выражена уравнениями 1.4 и 1.6. Структура такой модели приведена на рис. 1.

Построим регулятор, позволяющий устранить или минимизировать влияние упомянутых ранее возмущений.

Представим систему стабилизации загрузки по осям. Обеспечить равномерную загрузку приводов с астатическими характеристиками по моменту можно двумя способами:

- 1) увеличением задания на входе контура скорости для того колеса, которое находится в режиме выбега;
- 2) уменьшением задания на входе контура скорости для перегруженного колеса.

При прямолинейном движении оси колес движутся с линейной скоростью транспортного средства v_{TC} . Пусть радиус левого колеса меньше, чем правого колеса, тогда справедлива следующая система:

$$\begin{cases} \omega_{ЛК} = v_{TC} / R_{ЛК} > v_{TC} / R_{ПК} = \omega_{ПК} \\ \hat{\omega}_{ЛК} = \hat{\omega}_{ПК} = \omega_{ПК} < \omega_{ПК} \end{cases}, (2.1 \dots 2.2)$$

где ω_i – реальная частота вращения i -того колеса; $\hat{\omega}_i$ – задание на частоту вращения для i -го колеса.

В этом случае левое колесо переходит в режим свободного выбега, так как задание на ток торможения равно нулю. Разность токов приводов $\Delta I = I_{Прв} - I_{Лв}$ в этом случае больше нуля. Используем эту разность для увеличения задания недогруженному колесу

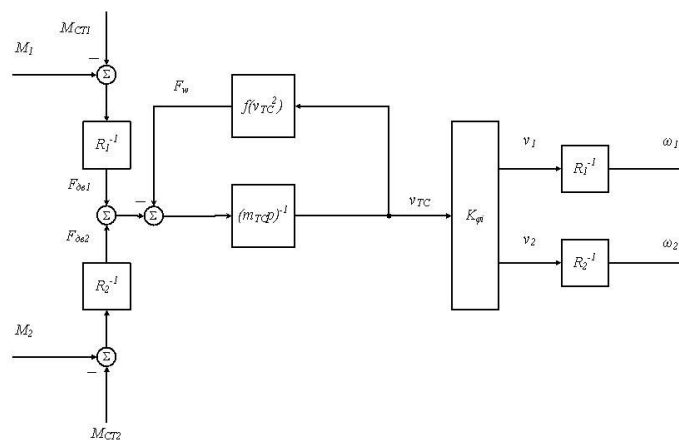


Рис. 1. Структура блока связи через дорожное полотно

или одновременного изменения задания частоты вращения обоих колес. Если строить систему с пропорциональным регулятором, в системе появится некая ошибка. Для полной компенсации необходимо использовать интегральный регулятор. Выходной сигнал регулятора может использоваться в качестве ОС как для всех ЭП (рис. 2), так и для одного (рис. 3).

На рис. 2 и 3 блоки и сигналы обозначены следующим образом: $РСi$ – регулятор скорости i -го привода; $КТi$ – контур тока i -го привода; $НЭ2, НЭ3$ – нелинейности, образующие схему выделения привода для уравнивающего сигнала; $M_{ТОРi}$, $M_{ТОРi}$ – задание i -му приводу на токоограничение при разгоне и при торможении соответственно; $\omega_{задi}$ – задание для регулятора скорости i -го

привода; ω_i – сигнал обратной связи по частоте вращения i -го колеса, $\omega_{донi}$ – корректирующий сигнал с выхода уравнивающего регулятора для i -го привода; I_i – ток i -го привода (в более общем случае, при отсутствии линейной связи между током и моментом, необходимо использовать величину момента на валу двигателя i -го привода).

Регуляторы тока настроены на модульный оптимум, регуляторы скорости на симметричный оптимум [3]

На рис. 4 приведен участок окончания разгона МЭТС с приспущенным колесом. Моменты M_i соответствуют движению МЭТС без компенсатора, а моменты M_i^* – движению МЭТС с компенсатором, структура которого приведена на рис. 2.

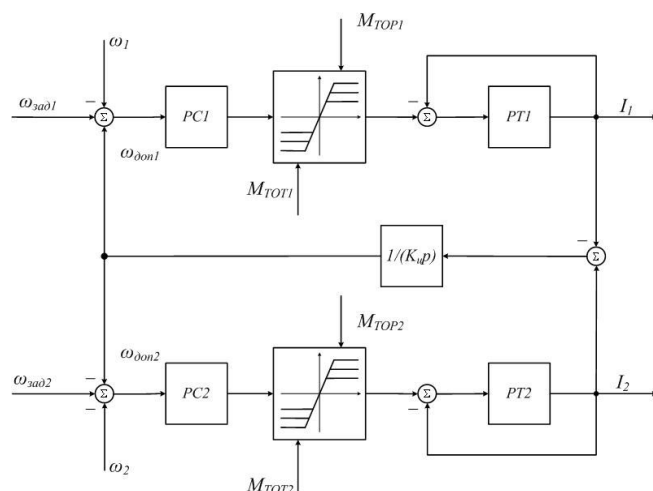


Рис. 2. Структура ЭП и компенсатора с одновременной компенсацией

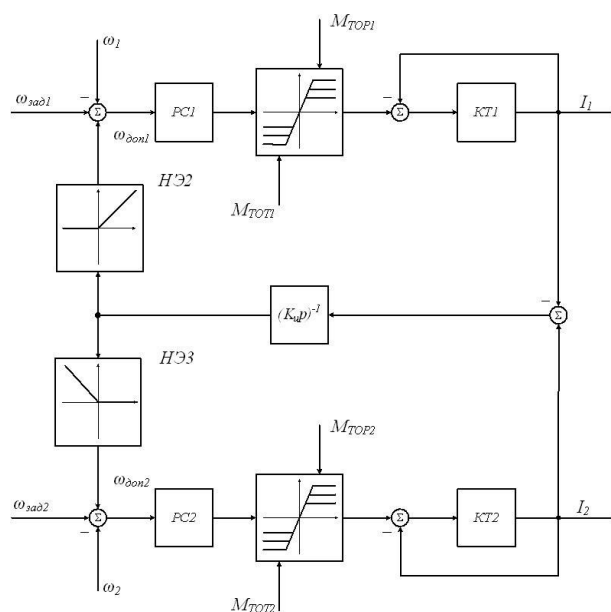


Рис. 3. Структура ЭП и компенсатора с поочередной компенсацией

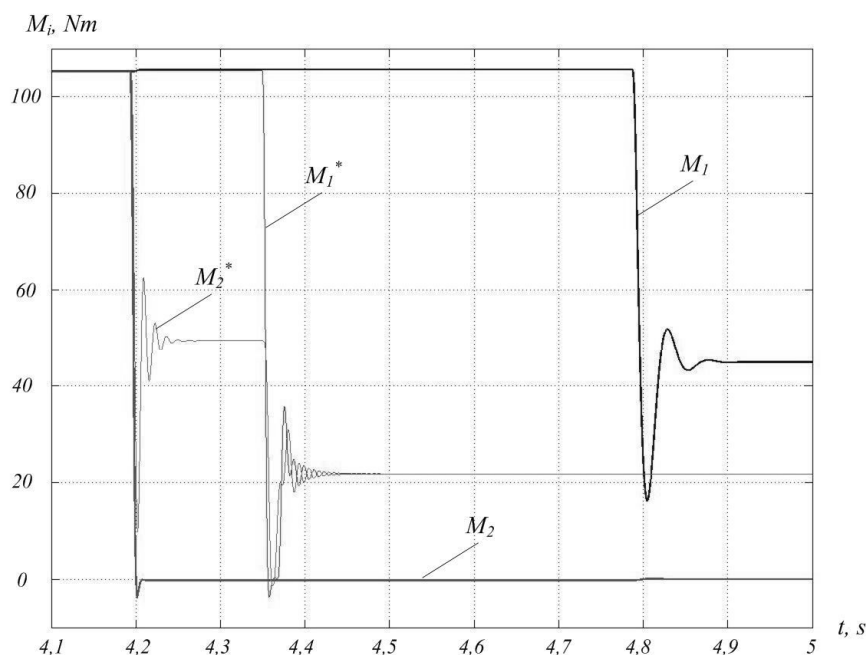


Рис. 4. График моментов при окончании процесса разгона МЭТС

Начало разгона на рисунке не показано, потому как до тех пор, пока контур скорости будет насыщен, ток (момент) будет поддерживаться на заданном уровне. Различие в радиусах приведет к тому, что угловая частота вращения колеса с меньшим радиусом будет нарастать быстрее. При достижении заданной частоты вращения момент, развиваемый этим колесом, уменьшится до определенной величины. Но так как процесс разгона не окончился (другой электропривод не вышел на заданную частоту вращения) то, вследствие особенностей структуры момент, развиваемый приспущенным колесом, упадет до нуля, увеличивая нагрузку на другой электропривод. На рис. 4 показано перераспределение моментов по окончании разгона транспортного средства.

Вследствие особенностей структуры регулятора (рис.2) линейная скорость МЭТС при наличии компенсатора меньше линейной скорости МЭТС при отсутствии компенсатора.

Выводы. Полученные результаты подтвердили правильность построения модели МЭТС с учетом связи колес через дорожное полотно. Однако она не учитывает силы, зависящие от пространственного положения МЭТС, нелинейные режимы движения (буксование, юз), что сужает область возможных

рассматриваемых режимов. Дальнейшими направлениями исследований станут доработка модели, проектирование уравнивающих регуляторов для МЭТС с большим числом ЭП и проверка полученных результатов на практике.

Список использованной литературы

1. Вершинин Д.В. Некоторые особенности построения системы управления многодвигательного электротранспортного средства / Д.В. Вершинин, В.А. Войтенко, Е.А.Смотров // *Электромашинобуд. та електрообладн.* – 2010. – Вип 75. – С. 12–21.
2. Выбор кинематической схемы электрического транспортного средства / Д.В.Вершинин, О.Г. Дашко, Ю.П. Кривошипский, Е.А. Смотров // *Приводная техника.* – 2009. – № 5(81). – С.32–36.
3. Герасимьяк Р.П. Повышение качества систем автоматического управления / Р.П. Герасимьяк. – К.: УМК ВО. – 1992. – С. 100
4. Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства / [Вершинин Д.В., Войтенко В.А., Смотров Е.А. и др.]. // *Электромашинобуд. та електрообладн.* – 2009. – Вип.74. – С. 25–30.
5. Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control on 4-wheel motored «UOT Electric March II»/ Hori Y. // *IEEE transactions on*

industrial electronics. – 2002. – № 5. –P. 954–962.

6. Yang Y-P, Lo C-P. Current distribution control of dual-direct driven wheel motors for EV. Proceedings of the 2006 American Control conference. – Minneapolis, Minnesota, USA, June 14–16, 2006. – P. 2469–2474.

Получено 09.02.2012

References

1. Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A. Several aspects of design of the control system of multimotor electric vehicle / Electrical machine-building and electrical equipment. – 2010. – Iss. 75. – P. 12–21 [in Russian].

2. Vershinin D.V., Dashko O.G., Krivospickij Y.P., Smotrov E.A. Choice of cinematic circuit of electric vehicle / Drive technique. – 2009. – № 5(81). – P.32–36 [in Russian].

3. Gerasimyak R.P. Improving the quality of control system. – Kiev: EMC HE. – 1992. – 100 p. [in Russian].

4. Electric drive of motor-wheel of electric vehicle / [Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A. and oth.] // Electrical machine-building and electrical equipment. – 2009. – Iss.74. – P. 25–30 [in Russian].

5. Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control on 4-wheel motored «UOT Electric March II» / Hori Y. // IEEE transactions on industrial electronics. – 2002. – № 5. – P. 954–962 [in English].

6. Yang Y-P, Lo C-P. Current distribution control of dual-direct driven wheel motors for EV. Proceedings of the 2006 American Control conference. – Minneapolis, Minnesota, USA, June 14–16, 2006. – P. 2469–2474 [in English].



Смотров
Евгений Александрович,
канд. техн. наук, вед.
инж. НТЦ «Станкосерт»,
тел. 048-728-85-05



Вершинин
Дмитрий Вениаминович,
инж.-исследователь
ОСКБ спец. станков,
тел. 048-728-85-05



Субботин
Виктор Владимирович,
студент Одесск. нац.
политехн. ун-та,
каф. ЭМС КУ