

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Введение. Современный этап развития автомобилестроения направлен на разработку, модернизацию и улучшение конструкции транспортных средств на альтернативных видах топлива с целью минимизировать потребление нефти. В связи с этим развитие гибридных, электрических транспортных средств, а также развитие автомобилей на водородных элементах, солнечных батареях достигает все новых и новых высот. Положительное влияние таких транспортных средств на ресурсы, экологию нашей планеты уже неоднократно доказывалось. Развитие новых конструкций автомобилей требует теоретических и практических исследований их эксплуатационных свойств.

Анализ предыдущих исследований доказывает актуальность развития гибридных и электрических автомобилей. Вопросами изучения эксплуатационных свойств и технических параметров экологически чистого транспорта занимаются научные школы всего мира, не оставляют этот вопрос в стороне и автопроизводители. Можно выделить несколько основных направлений исследований: системы управления двигателем, топливная экономичность, режимы движения транспортного средства, системы безопасности [1, 2, 3]. Подавляющее большинство современных транспортных средств оборудуется системами рекуперации энергии, которые в процессе электродинамического торможения вырабатывают электрическую энергию и возвращают её в систему накопителей. В этом случае очевидна значительная связь между запасом хода транспортного средства, характеристиками системы электродинамического торможения и ездовым циклом, во время которого проводятся измерения потребления энергии транспортным средством. К сожалению, подавляющее большинство исследователей рассматривает вопросы движения гибридных и электрических транспортных средств без учёта работы системы рекуперации энергии, а количество рекуперированной энергии, в лучшем случае, учитывается как суммарный показатель.

Необходимо отметить, что в данный момент в Европе действует ряд стандартов, направленных на обеспечение безопасности транспортных средств на альтернативных видах топлива [4, 5, 6]. Но, как правило, указанные нормативные документы описывают общие методы испытаний по определению расхода электроэнергии и также не учитывают количество рекуперированной энергии.

Количество рекуперированной энергии как показатель играет важную роль в исследованиях свойств автомобилей, в вопросах ёмкости накопителей, а также алгоритма работы систем управления тяговыми двигателями и накопителями энергии.

Целью данной работы является создание математической модели движения транспортного средства, оборудованного электроприводом и системой рекуперации энергии.

С целью исследования движения автомобиля, оборудованного электрическим приводом и системой рекуперации энергии, целесообразно воспользоваться математическими моделями движения и электродинамического торможения автомобиля.

Процесс разгона и движения автомобиля с постоянной скоростью на электротяге целесообразно описать, используя уравнение силового баланса:

$$P_k = P_j + P_f + P_w \pm P_h, \quad (1)$$

где P_k – сила тяги на колесах, Н;

P_j – сила инерции, Н;

P_f – сила сопротивления качению, Н;

P_w – сила сопротивления воздуха, Н;

P_h – сила сопротивления подъёму, Н.

Для упрощения расчётов на данном этапе примем, что автомобиль движется на горизонтальном участке дороги и $P_h = 0$. Учитывая, что целью работы является создание математической модели движения автомобиля, предлагается привести силы, действующие на транспортное средство, к работам, которые будут выполнены в процессе разгона и движения с постоянной скоростью:

$$A_k = A_j + A_f + A_w, \quad (2)$$

где $A = P \cdot S$ – работа соответствующей силы, Дж;

S – пройденный путь, м.

Используя зависимости, известные с теории эксплуатационных свойств автомобиля [7], и интегрируя уравнение по времени, получим уравнение движения:

$$A_k = \int_{t_n}^{t_k} (F \cdot k \cdot v^3 + f \cdot G_a \cdot v + j \cdot m_a \cdot v) dt, \quad (3)$$

где t_n – начальное время, с;

t_k – конечное время, с;

F – лобовая площадь автомобиля, м²;

k – коэффициент лобового сопротивления автомобиля;

v – скорость автомобиля, м/с;

f – коэффициент сопротивления качению;

G_a – вес автомобиля, Н;

j – ускорение автомобиля, м/с²;

m_a – масса автомобиля, кг.

Математическую модель процесса электродинамического торможения автомобиля можно описать зависимостью [8]

$$A_t = \int_{t_n}^{t_k} \frac{1}{r_k \cdot \eta_{тр} \cdot \delta_{об}} \left(\frac{\eta_e \cdot r_k \cdot I_{ген}(V) \cdot R_e \cdot I_{ген}(I_{зб})}{V \cdot U_{мпе}} + k_w \cdot B \cdot H \cdot V^2 \cdot r_k \cdot \eta_{тр} + \psi \cdot G_a \cdot r_k \cdot \eta_{тр} \pm G_a \cdot \sin \alpha \right) V dt, \quad (4)$$

где U – напряжение тягового электродвигателя, В;

$U_{мпе}$ – передаточное число трансмиссии для электропривода;

r_k – радиус качения колеса, м;

n – обороты электродвигателя, мин⁻¹;

a, b, c – коэффициенты, которые определяют характеристики электродвигателя в режиме генератора;

$\eta_{тр}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии.

Ситовский Олег Филиппович, к.т.н., доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий Луцкого национального технического университета, e-mail: sitovsky@ukr.net

Дембицкий Валерий Николаевич, ассистент кафедры автомобилей и транспортных технологий Луцкого национального технического университета, e-mail: dvm2@meta.ua

Кашуба Андрей Николаевич, ассистент кафедры автомобилей и транспортных технологий Луцкого национального технического университета, e-mail: and-kashuba@yandex.ru

Украина, 43018, г. Луцк, Львовская, 75.

Таким образом, общая работа A_{Σ} , произведённая транспортным средством во время его движения, будет определена:

$$A_{\Sigma} = A_k - A_r \quad (5)$$

или

$$A_{\Sigma} = \int_{t_n}^{t_k} (F \cdot k \cdot V^2 + f \cdot G_a + j \cdot m_a) V \cdot dt - \int_{t_n}^{t_k} \frac{1}{r_k \cdot \eta_{TP} \cdot \delta_{об}} \left(\frac{\eta_e \cdot r_k \cdot I_{ген}(V) \cdot R_e \cdot I_{ген}(I_{зб})}{V \cdot u_{мре}} + K_w \cdot B \cdot H \cdot V^2 \cdot r_k \cdot \eta_{TP} + \psi \cdot G_a \cdot r_k \cdot \eta_{TP} \pm G_a \cdot \sin \alpha \right) V \cdot dt. \quad (6)$$

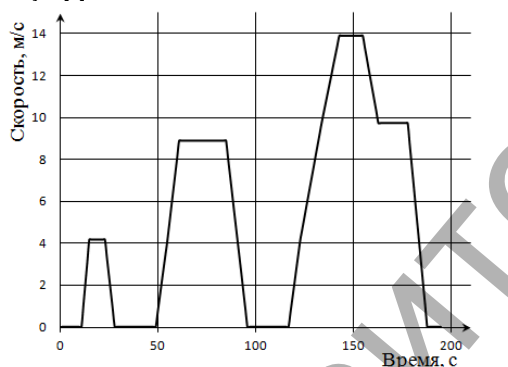
Уравнение (6) можно назвать уравнением энергетического баланса движения автомобиля.

Для решения поставленных задач математического моделирования движения транспортного средства, на данном этапе, целесообразно воспользоваться ездовым циклом, установленным [4, 5], поскольку он является стандартизированным и распространяется на гибридные и электрические транспортные средства.

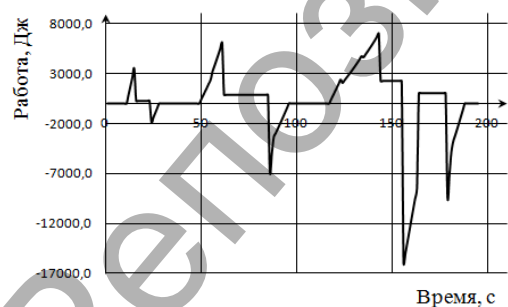
Анализ ездового цикла [4], показанного на рис. 1а, позволяет выбрать данные, которые в дальнейшем будут использованы для расчетов энергетических характеристик автомобилей.

В связи с тем, что использование систем рекуперации энергии наиболее эффективно в городском цикле, в данных исследованиях загородный цикл не рассматривается.

Используя уравнение (6), создан график энергетического баланса движения (рис. 1б) легкового автомобиля с электроприводом и системой рекуперации энергии по городскому ездовому циклу, описанному в [4].



а)



б)

а – режимы движения; б – энергетический баланс движения автомобиля в городском цикле

Рис. 1. Городской ездовой цикл. На графике отрицательные значения соответствуют рекуперации энергии, а положительные – затратам

График энергетического баланса движения автомобиля в городском цикле (рис. 1б) позволяет проводить анализ количества потреблённой и рекуперированной энергии с целью выбора оптимальных режимов движения с тем, чтобы минимизировать потребление топлива двигателем внутреннего сгорания, а также обеспечить максимальный запас хода на электротяге.

Кроме этого, проведена работа по определению суммарных затрат энергии на городском ездовом цикле при движении автомобиля на электрическом приводе. Результаты исследований приведены на рис. 2.

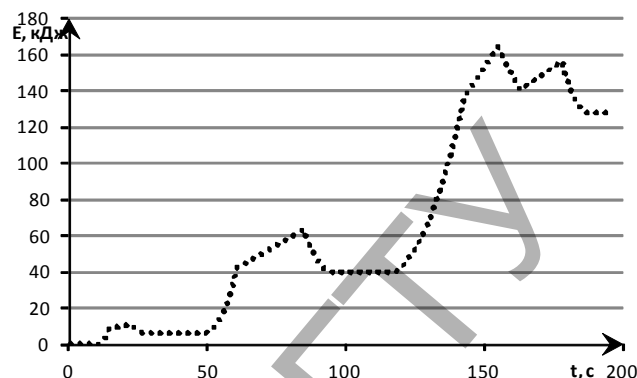


Рис. 2. Энергетические показатели гибридного автомобиля в городском ездовом цикле при применении рекуперативного торможения

Как показали исследования, применение рекуперативного торможения позволяет аккумулировать и использовать для дальнейшего движения до 30 % кинетической энергии, выделяемой при торможении.

Применение рекуперативного торможения должно осуществляться в совокупности с оптимизацией режимов движения, а также стиля вождения транспортного средства.

Заключение. Представленная математическая модель позволяет с помощью энергетических показателей описать движение автомобиля с учётом режимов разгона, выбега, движения с постоянной скоростью, электродинамического и механического торможения. Применение результатов проведенного исследования позволит производить моделирование и расчёты как на стадии проектирования, так и на разных этапах производства, различных показателей и характеристик автомобилей: тягово-скоростных свойств, ёмкости накопителей энергии, режимов движения гибридных транспортных средств, с тем чтобы добиться оптимальных показателей. Кроме этого, данная математическая модель может применяться в системах управления тяговым электроприводом с целью обеспечения наиболее продуктивных режимов его работы.

Дальнейшее развитие данных исследований должно быть направлено на совершенствование математической модели, проверку её адекватности, а также её адаптацию к различным дорожным условиям и определение оптимальных режимов работы двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей гибридных автомобилей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Muhammad, H. Rashid / Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design. Second edition/ Muhammad H. Rashid // University of West Florida, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2010. – 558 p.
2. Блохин, А.Н. Результаты исследования электромобиля на шасси "ГАЗель" / А.Н. Блохин, А.М. Грошев, Т.А. Козлова [и др.] // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана: Наука и образование. – 2012. – № 12. – С. 75–106.
3. Бажинов, О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков [та ін.] – Харків: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
4. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик: ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 ((EN 1986-1:1997, IDT) - [Введён в действие 01.03.2012]. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2011. – Часть 1. Электрооборудование – 30 с.
5. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 2. Гибридные транспортные средства ГОСТ Р ЕН 1986-2-2011 ((EN 1986-2:2001, IDT) – Введён в действие 01.03.2012. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2011. – 20 с.

6. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, приводимых в движение только двигателем внутреннего сгорания либо приводимых в движение при помощи гибридного электропривода, в отношении измерения объема выбросов двуоксида углерода и расхода топлива и/или измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге, а также транспортных средств категорий М1 и N1, приводимых в движение только при помощи электропривода, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге. – Введены в действие 29.04.2005. – Женева: Европейская Экономическая комиссия Организации Объединенных наций, 2005. – 128 с.
7. Основы теории автомобиля и трактора: учебное пособие для механических специальностей вузов / В.В. Иванов, В.А. Иларионов, М.М. Морин. — М.: Высшая школа, 1970. – 224 с.
8. Дембіцький, В.М. Математична модель процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу, обладнаного електроприводом / В.М. Дембіцький, О.П. Сітовський [та ін.] // Наукові нотатки. Вип. 45. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – С. 159–167.

Материал поступил в редакцию 22.09.15

SITOVSKYI O.F., DEMBITSKYJ V.N., KASHUBA A.N. Mathematical modeling of the vehicle with electric drive

This publication describes a mathematical model of the vehicle equipped with electric drive and energy recuperation system in the urban cycle. The article deals with urban driving cycle in the context of energy consumption.

УДК 521.763

Барсуков В.Г., Хвусевич В.М., Чикова Т.С., Барсуков В.В.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СТЕСНЕННОГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Введение. Индентирование является весьма распространенным методом исследования деформационных свойств материалов, реализуемым на широком спектре устройств [1, 2]. В литературе предложены варианты определения показателей ряда деформационно-прочностных характеристик материала (модуль упругости, твердость, предел текучести, коэффициенты в функциональной зависимости сопротивления деформации) путем обработки диаграмм вдавливания [2–6]. Поскольку в процессе внедрения индентора возникает сложное напряженно-деформированное состояние, то при математической обработке экспериментальных данных используют те или иные упрощения, например, допущение о постоянстве нормальных напряжений на поверхности контакта [7, 8] или средних деформаций в отпечатке [9]. В ряде работ использованы методы, основанные на численном интегрировании дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела [10–13]. В частности, в работе [13] выполнено конечно-элементное моделирование внедрения в упруго-пластический материал конического индентора с углом при вершине 140,6°, эквивалентного индентору Берковича. Установлено существование зоны затрудненной деформации вблизи вершины индентора, причем размеры области влияния (25–40 нм) сопоставимы с размером наноиндентора (радиус скругления 50–100 нм).

Вместе с тем, разработанные методы хорошо описывают начальную (упругую) или заключительную (пластическую) стадии процессов индентирования. Переходная стадия, соответствующая стесненному упруго-пластическому деформированию, изучена недостаточно [14, 15].

Краткий анализ методов индентирования. При статическом определении твердости в поверхность испытываемого материала с определенной силой вдавливаются индентор – тело, выполненное в виде шарика, алмазного конуса, пирамиды или иглы [16, 17]. В зависимости от способа измерения различают твердость по Бринеллю, Роквеллу, Мейеру, Мартелю, Кнупу, Шору, Виккерсу, Моосу и др.

Измерение твердости по Бринеллю основано на внедрении в плоскую поверхность испытываемого образца стального закаленного шарика определенного диаметра D (10; 5 или 2,5 мм) под постоянной нагрузкой P и измерении диаметра отпечатка d , остающегося после снятия нагрузки. Твердость, выраженную в кгс/мм², определяют по формуле

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Метод применяют для измерения твердости поверхности не более 450 HB [16]. При выборе шарика используют правило: диаметр отпечатка должен лежать в пределах 0,2...0,7 диаметра шарика.

Измерение твердости по Мейеру по схеме аналогично методу Бринелля. Вычисление НМ производится как отношение нагрузки к площади проекции отпечатка шарика на плоскость, перпендикулярную направлению действия нагрузки [17], т.е.

$$HM = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (2)$$

По размерам отпечатка, остающегося после снятия нагрузки, определяют твердость по Виккерсу и микротвердость. В качестве индентора (вдавливается наконечника) в этих методах используют четырехгранную пирамидку с углом при вершине 136° (2,38 рад). Твердость по Виккерсу HV определяется по формуле [17]

$$HV = 0,189P/d_o^2,$$

где P – нагрузка, Н; d_o – размер диагонали отпечатка, остающегося после снятия нагрузки, мм. Испытания проводят при нагрузках от 9,8 до 980 Н, в зависимости от толщины детали [16]. Метод Виккерса используется для определения твердости малотолщинных деталей и изделий с покрытиями.

Микротвердость по Кнупу определяют путем вдавливания алмазной пирамиды с углами между противоположными гранями 2,27 и 3,01 рад [17].

Для измерения твердости термо- и химико-термически обработанных сталей, твердых сплавов, керамики, покрытий, цветных металлов и сплавов широко используют метод Роквелла, согласно которому в твердое тело внедряют алмазный конус с углом при вершине 120° (для шкал А и С) или стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм (для шкалы В) [16]. Определение твердости по Шору основано на измерении глубины проникновения в материал усеченного конуса под действием пружины.

Применяются также методы определения твердости по отскоку легкого бойка, падающего с определенной высоты на испытуемую поверхность. В частности, по Мартелю шарик падает на гладкую

Барсуков Владимир Георгиевич, д.т.н., проректор Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Чикова Тамара Семеновна, д.ф.-м.наук, профессор кафедры технической механики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

Барсуков Виктор Владимирович, инженер Гродненского дома науки и техники.