

РАЗРАБОТКА НА СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА НАЗЕМНО ТРАНСПОРТНО СРЕДСТВО.

Никола Македонски
n.makedonski@tu-varna.bg

**Технически университет - Варна
Варна 9010, ул. "Студентска" № 1
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: моделиране, превозно средство, енергия, мощност.

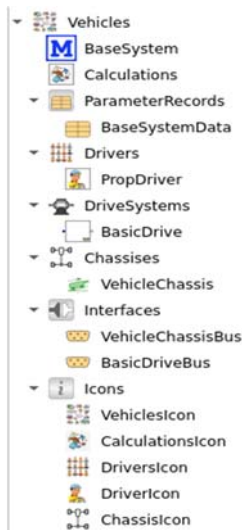
Резюме: Разработен е модел на наземно превозно средство, включващ масата, аеродинамичното съпротивление, съпротивлението при търкаляне и съпротивлението причинено от наклона на пътя. Възможно е свързването на няколко модела, по такъв начин, че да се симулира подвижен състав, съчленен автобус, съчленен тролейбус и др. Моделът включва и водач, чрез който се симулира цикъл на шофиране, включително стандартизирани такива, например стандартизиран цикъл за тестване на градски автобуси. Използвайки възможността за задаване на маршрута на превозното средство (наклон на различните участъци, разстояние), може да се определи профила на механичната мощност и съответно енергията, черпена, запасена и отдадена от превозното средство. Възможностите за усъвършенстване на модела са големи. Могат да се включват различни видове електродвижване, с различни типове електрически двигатели, различни видове управление на двигателите, скоростни кутии, батерии и др.

ВЪВЕДЕНИЕ

Превозно средство е машина, проектирана така, че да се самозадвижва и обикновено се използва за транспорт на хора, товари или и двете. Класификацията на превозните средства може да бъде направена по различни критерии като предназначение, вид на използваната енергия, вид на средата, в която се движи превозното средство и др. Например, според средата, различаваме наземен транспорт, воден, въздушен и космически транспорт. Моделирането на превозните средства е трудна задача, изискваща познания в много области или с други думи това е мултидисциплинарна задача. В зависимост от нивото на детайлизация, което трябва да се постигне, моделирането може да изисква познания по техническа механика, машинни механизми, двигатели с вътрешно горене, електрически машини, хидравлика и пневматика, силова и друга електроника и др. Като минимум, моделирането на електрическо превозно средство изисква симулиране в електрическата и механичната област, както и управлението. Симулации в смесени области е това, в което езикът Modelica и в частност средата OpenModelica [1], се отличава, поради присъщите му свойства за симулиране на смесени (от различни области на науката) системи.

ОПИСАНИЕ НА МОДЕЛА

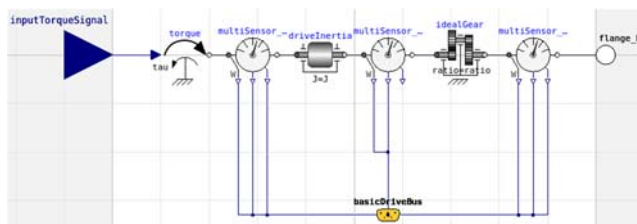
На фиг. 1 е показан разработеният пакет Превозни средства (Vehicles), съдържащ модели на компоненти, необходими за симулирането на превозни средства. Както е записано в [ръководството](#) на OpenModelica "Езикът Modelica насърчава подреденото повторно използване на модели на компоненти посредством пакети, които съдържат структурирани библиотеки от модели за многократна употреба." Основните пакети, съдържащи модели са Водачи (Drivers), Задвижващи системи (DriveSystems) и Шасита (Chassis). Спомагателни са пакетите Записи с параметри (ParameterRecords), Интерфейси (Interfaces) и Икони (Icons).



Фиг. 1. Модел на превозно средство, във вид на пакет, съдържащ модели за многократно

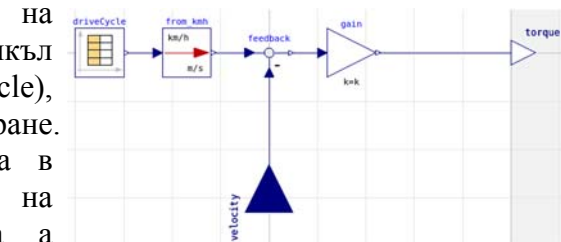
таблица, първата колона съдържа времена, а втората - скорост в съответното време. Файлът се прочита преди симулирането, като се прави подходяща обработка на данните така, че да има данни за всеки момент от симулацията. Изхода от този блок, който е желаната скорост в [км/ч], се подава на блок преобразуващ скоростта от [км/ч] в [м/с]. Следва блок за обратна връзка. В този блок, от желаната скорост се изважда действителната скорост на превозното средство. Тази разлика се подава на блока, реализиращ преобразуването на скорост във въртящ момент, според израз (1).

$$(1) M_{\text{желан}} [Nm] = k [Ns] (v_{\text{желана}} [m/s] - v_{\text{действителна}} [m/s])$$



Фиг. 3. Модел на базова задвижваща система.

Този въртящ момент, като сигнал е и изхода от блока на опростеният водач.

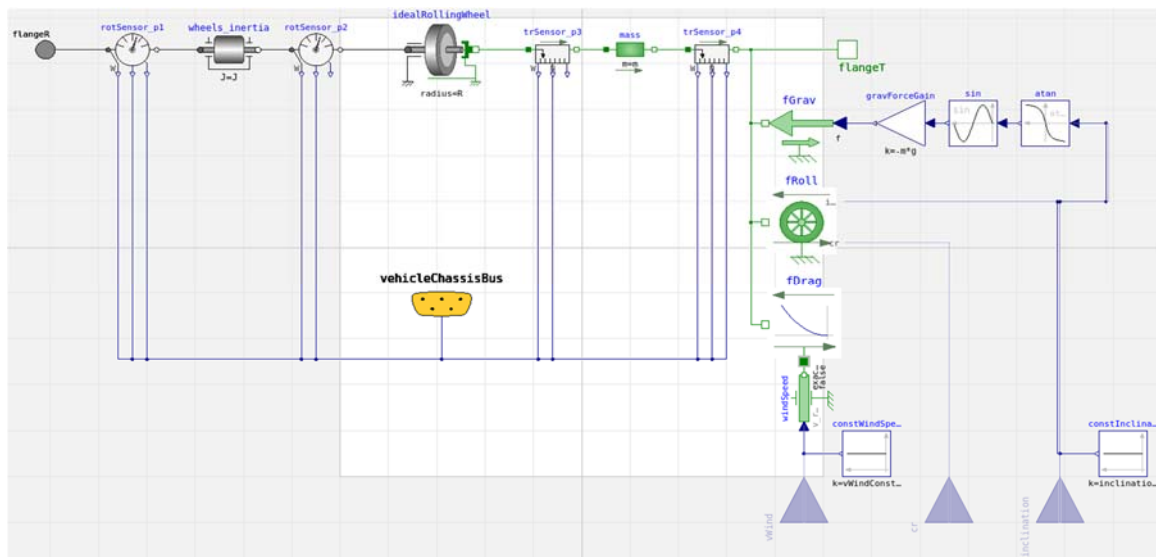


Фиг. 2. Модел на опростен водач, реализиращ пропорционално

Пакетът Задвижващи системи (DriveSystems) съдържа модели на задвижващи системи. На този етап, пакетът съдържа базова задвижваща система, показана на фиг. 3.

На входа на този модел, постъпва желаният въртящ момент, като сигнал от модела на опростеният водач. Този

сигнал е от типа Real, като чрез блока **torque** се преобразува в тип **въртящ момент [Nm]**. Трябва да се отбележи, че всички блокове след този се свързват, чрез съединителни елементи от типа **Flange** (малките кръгчета, запълнени в сиво и бяло). Езикът Modelica е строго типизиран език и трябва да се спазват типовете на променливите. Блоковете **multiSensor** измерват абсолютната ъглова скорост, въртящия момент и мощността между два съединителни елемента по идеален начин и предоставят резултатите съответно като изходни сигнали. Следващият блок **инерционен момент на задвижването (driveInertia)**, моделира инерционният момент на задвижващата система. Блокът **идеална скоростна кутия (idealGear)** моделира всеки тип скоростна кутия, която има един задвижващ вал и един задвижван вал. Предавката е идеална, т.е. няма инерция, еластичност, затихване или луфт.



Фиг. 4. Модел на шаси.

Пакетът **Шасита (Chassis)** съдържа модели на шасита. Този пакет, съдържа един модел, който може да се види на фиг. 4.

Това е модел на наземно превозно средство, включващ масата, аеродинамичното съпротивление, съпротивлението при търкаляне и съпротивлението причинено от наклона на пътя. За всички конкретни съпротивления значимите променливи могат да бъдат дадени чрез параметър или въведени чрез променлив във времето сигнал. Превозното средство може да се задвижва като му се подава механична мощност на въртеливото движение, например от електродвигател и скоростна кутия. Също така е възможно превозното средство да се използва като пасивно ремарке, ако не му се подава механична мощност на въртеливото движение. Както може да се види, моделът съдържа блок моделиращ инерционният момент на колелата и общата маса на превозното средство. Въртеливото движение се преобразува в линейно, чрез блока, моделиращ идеално търкалящо се колело. Движението на превозното средство се разглежда като постъпателно движение на центъра на масите на абсолютно твърдо тяло. Към този център на масите се подават като сили горепосочените съпротивления.

Аеродинамичното (въздушно) съпротивление се изчислява, чрез израза (2):

$$(2) F_{\text{въздух}}(t) = C_d A \frac{\rho (v_{\text{пс}}(t) - v_{\text{вятър}}(t))^2}{2}$$

където: $F_{\text{въздух}}(t)$ [N] - сила, дължаща се на аеродинамичното съпротивление;

C_d - коефициент на обтекаемост; A [m²] - площ на напречното сечение на превозното

средство; $\rho = 1,2 [kg/m^3]$ - плътност на въздуха; $v_{ПС}(t) [m/s]$ - скорост на превозното средство; $v_{в\ddot{y}т\ddot{y}р}(t) [m/s]$ - скорост на вятъра. Може да бъде със положителен или отрицателен знак, в зависимост от това дали съвпада с посоката на движение на превозното средство или не.

Силата, която се съпротивлява на движението на тялото, търкалящо се върху повърхност, се нарича съпротивление при търкаляне или триене при търкаляне. То се изчислява, чрез израза (3):

$$(3) F_{\text{търкаляне}} = C_r mg \cos(\alpha)$$

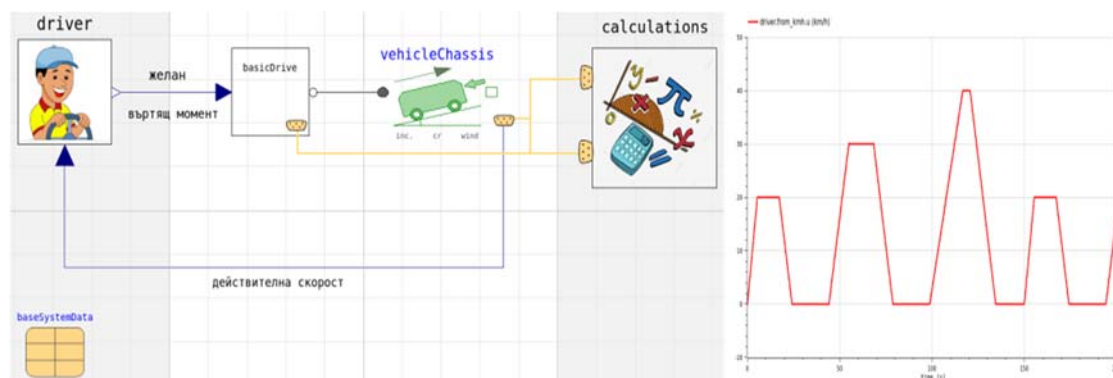
където: $F_{\text{търкаляне}} [N]$ - сила, дължаща се на съпротивлението при търкаляне; C_r - коефициент на триене при търкаляне. Този коефициент, при моделирането, е или константа или се подава към модела, като зависи от времето функция; $m [kg]$ - масата на тялото; $g = 9,80665 [m/s^2]$ - земно ускорение; α - ъгъл на наклона. Това е или постоянна величина или функция зависи от времето. Пътният наклон е равен на $\tan(\alpha)$. Това съответства на издигането на пътя на хоризонтално разстояние от 100 m, което обикновено се записва като процент. Например за път, който се издига с 10 m при хоризонтално разстояние от 100 m, наклонът е 10 % и следователно параметърът $\text{inclinationConstant} = 0,1$. Положителен наклон означава шофиране нагоре, отрицателен наклон означава шофиране надолу.

Съпротивителната сила на тежестта, се изчислява според израз (4):

$$(4) F_{\text{грав.}} = mg \sin(\alpha)$$

РАБОТА С МОДЕЛА

На фиг. 5 е представен симулационният модел на наземно транспортно средство, изграден, чрез гореописаните блокове и желаната скорост, задавана от водача.

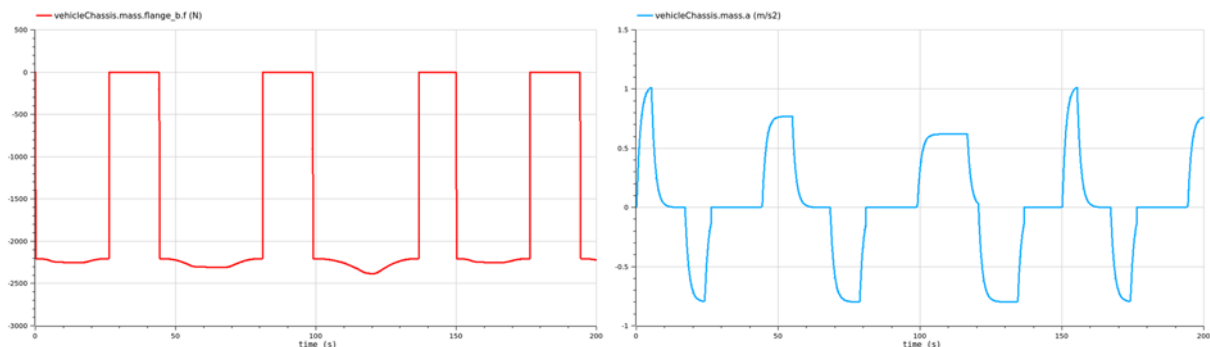


Фиг. 5. Симулационен модел на наземно транспортно средство (отляво). Профил на скоростта, според цикъла на шофиране SORT 1 (отдясно).

Както е известно [3], теоремата за изменението на кинетичната енергия гласи : "Производната по времето от кинетичната енергия на механична система е равна на сумата от мощностите на външните и вътрешните сили, действащи на системата."

$$(5) \frac{dE_k(t)}{dt} = P_{\text{външни}}(t) + P_{\text{вътрешни}}(t)$$

На фиг. 6 са показани съпротивителните сили действащи в масовия център на превозното средство и ускорението му.

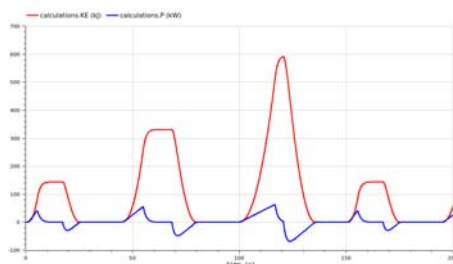


Фиг. 6. Съпротивителни сили (червена линия) и ускорение (синя линия).

В лявата графика, показваща съпротивителните сили се вижда, че преобладава частта от съпротивителната сила, която не зависи от скоростта. В този случай това е съпротивителната сила дължаща се на триенето при търкаляне и е около 2200 [N], докато частта, зависеща от скоростта, става все по-значима с увеличението на скоростта. В това има смисъл, тъй като обикновено в автомобилите въздушното съпротивление става преобладаваща, започвайки от скорости около 80 [км/ч] [2].

В блока **Изчисления** (Calculations) се извършва изчисляването на кинетичната енергия $E_k(t)$ и сумата от мощностите, действащи върху масовият център на превозното средство. Кинетичната енергия се изчислява според израза [3] (6):

$$(6) E_k(t) = \frac{mv^2(t)}{2}$$



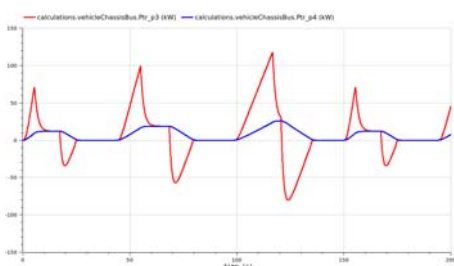
Фиг. 7: Кинетична енергия (червена линия) в [kJ] и мощност (синя линия) в [kW] на превозното

Когато скоростта е постоянна мощността $Ptr_{p3}(t)$ е равна на $Ptr_{p4}(t)$. По време на преходните процеси, ускоряване и забавяне, двете се различават и разликата е ускоряващият момент. Интегрирайки разликата между тези мощности или зоните между червената и синята крива се получава кинетичната енергия. Когато червената крива е над синята, се натрупва кинетична енергия в масата на превозното средство, а когато позицията е обърната, тази енергия се връща обратно и може да бъде преобразувана и повторно използвана.

Например, ако превозното средство е с електрическо задвижване, върнатата механична енергия може да се преобразува в електрическа, съхранена в батериите и след това отново използвана като механична енергия. Силовото предаване, показано на фиг. 3, е напълно обратимо и няма загуби, т.е. може да се приеме, че е идеално задвижване, тъй като освен че няма загуби, е в

Сумата от мощностите се изчислява като се диференцира израза (6). На фиг. 7 са показани кинетичната енергия и мощността.

На фиг. 8 е показана в червено мощността на линейно движение $Ptr_{p3}(t)$, която се подава на транспортното средство посредством колелата (виж фиг. 4), а със синьо е показана мощността в резултат от действието на силите на въздушно съпротивление, съпротивлението при търкаляне и силата на тежестта $Ptr_{p4}(t)$.



Фиг. 8. Мощност на линейното движение (червено) и сумарната мощност на съпротивителните сили (синьо), действащи върху превозното средство.

състояние напълно да възстанови спирачната енергия. Следователно в края на симулацията нетната енергия, доставена от задвижването, е площта под червената крива, която е равна на площта под синята (ако считаме за начална и крайна две точки, в които скоростта на превозното средство е нула, т.е. време = 0 и време = 180 s).

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] P. Fritzon *et al.*, “The OpenModelica Integrated Environment for Modeling, Simulation, and Model-Based Development,” *Modeling, identification and control*, vol. 41, no. 4, pp. 241–295, 2020, doi: [10.4173/mic.2020.4.1](https://doi.org/10.4173/mic.2020.4.1).
- [2] M. Ceraolo, “Simplified modelling of electric and hybrid vehicles.” Accessed: Apr. 13, 2024. [Online]. Available: <http://omwebbook.openmodelica.org/SMEHV>
- [3] Е. П. Черногоров, *Теоретическая механика. Динамика*. 2016, p. 170.

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF A GROUND VEHICLE

Nikola Makedonski
n.makedonski@tu-varna.bg

Technical University of Varna
Varna 9010, "Studentska" street No. 1
REPUBLIC OF BULGARIA

Key words: *modelling, vehicle, energy, power.*

Abstract: *A model of a ground vehicle was developed, including mass, aerodynamic drag, rolling resistance and road gradient resistance. It is possible to connect several models in such a way as to simulate rolling stock, articulated bus, articulated trolleybus, etc. The model also includes a driver through which a driving cycle is simulated, including standardized ones, for example a standardized urban bus test cycle. Using the possibility to set the route of the vehicle (inclination of the different sections, distance), the profile of the mechanical power and, accordingly, the energy drawn, stored and given by the vehicle can be determined. The possibilities for improving the model are great. Different types of electric propulsion can be included, with different types of electric motors, different types of motor management, gearboxes, batteries, etc.*