

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА

Предложена методика компьютерного моделирования динамики наземных транспортных средств. Методика основана на математическом описании геометрических свойств земной поверхности, геометрических свойств наружных поверхностей транспортного средства, силового взаимодействия между элементами этих поверхностей, а также динамической модели транспортного средства. Данный подход обеспечивает универсальность алгоритма компьютерных вычислений в ходе моделирования движения по поверхностям с разными геометрическими характеристиками локального рельефа местности.

Запропоновано методику комп'ютерного моделювання динаміки наземних транспортних засобів. Методика базується на математичному описі геометричних властивостей земної поверхні, геометричних властивостей зовнішніх поверхонь транспортного засобу, силової взаємодії між елементами цих поверхонь, а також динамічної моделі транспортного засобу. Даний підхід забезпечує універсальність алгоритму комп'ютерних обчислень у перебігу моделювання руху по поверхнях із різними геометричними характеристиками локального рельєфу місцевості.

The technique of ground transportation facilities dynamic computer simulation is proposed. The technique is based on mathematical description of geometrical properties of an earth surface, geometrical properties of vehicle external surfaces, the force interaction between these surface elements, and also a dynamic model of the vehicle. This approach ensures universality of a computer evaluation algorithm at simulation of motion on surfaces with various geometrical characteristics of a local relief of the terrain.

Введение. Перемещение транспортных средств (ТС) в условиях сложного рельефа, например в зонах разрушений и аварий, сопровождается многочисленными, заранее не прогнозируемыми контактами ТС с выступами опорной поверхности и хаотично расположенными на ней предметами. В процессе движения могут происходить скольжение по поверхности грунта, скачкообразная смена точек контакта с опорной поверхностью, падения в ямы и т.п.

Для моделирования динамики ТС высокой проходимости в таких условиях предлагается применить методику, обеспечивающую универсальность алгоритма компьютерных вычислений в процессе движения по неровным поверхностям с различными геометрическими характеристиками. Данный подход был использован при исследовании движения шагающего транспортного устройства [1] по поверхности со сложным рельефом, а также при моделировании преодоления препятствий, размеры которых сопоставимы с габаритами ТС.

В соответствии с предлагаемой методикой силовое взаимодействие между элементами ТС и грунтом рассматривается как следствие двух факторов – упругих деформаций, сопровождающихся диссипацией энергии, а также скольжения по поверхности, порождающего сухое трение. Силы и моменты, возникающие при контакте элементов ТС с грунтом, определяются по кинематическим параметрам движения аппарата на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений.

Для построения математической модели необходимо описать:

- геометрические характеристики рельефа местности;
- геометрические характеристики наружных поверхностей ТС, которые в процессе движения могут вступать в силовой контакт с элементами окружающей среды;
- силовое взаимодействие конструктивных элементов ТС с элементами окружающей среды;

© С.В. Григорьев, 2009

– динамику ТС как механической системы, состоящей из совокупности твердых тел.

Рассмотрим более подробно особенности данного подхода.

Описание геометрических характеристик рельефа местности. Геометрические характеристики рельефа будем задавать на основе аппроксимации поверхности грунта совокупностью треугольных фрагментов плоскостей. Для этого на участке местности выделяется область в виде горизонтального прямоугольника, за пределы которого не планируется выход ТС в ходе моделирования движения. Вводится система координат $OXYZ$, начало которой расположено в одном из углов прямоугольника, оси OX и OY направлены по его сторонам, а ось OZ направлена вверх. Задаются шаг сетки h_x по оси OX и шаг h_y по оси OY . Размер шага определяется размерами неровностей грунта и должен обеспечивать достаточно точную аппроксимацию рельефа. Длины сторон прямоугольника должны делиться нацело соответственно на h_x и h_y . Число узловых точек по оси OX обозначим n_x , а по оси OY – n_y . В пределах области построения сетки аналитически или в виде таблицы задается высота моделируемой поверхности: каждой узловой точке сетки ставится в соответствие координата $z_{i,j}$ ($i = \overline{1, n_x}, j = \overline{1, n_y}$), равная высоте поверхности в точке её пересечения с перпендикуляром к плоскости OXY . В точках аппроксимируемой поверхности с координатами $x_i, y_j, z_{i,j}$ ($i = \overline{1, n_x - 1}, j = \overline{1, n_y - 1}$) вводятся системы координат $(OXYZ)_{i,j}$, оси которых параллельны осям системы $OXYZ$.

Возьмем около узла сетки с координатами $x_i, y_j, 0$ конфигурацию узлов, показанную на рис. 1.

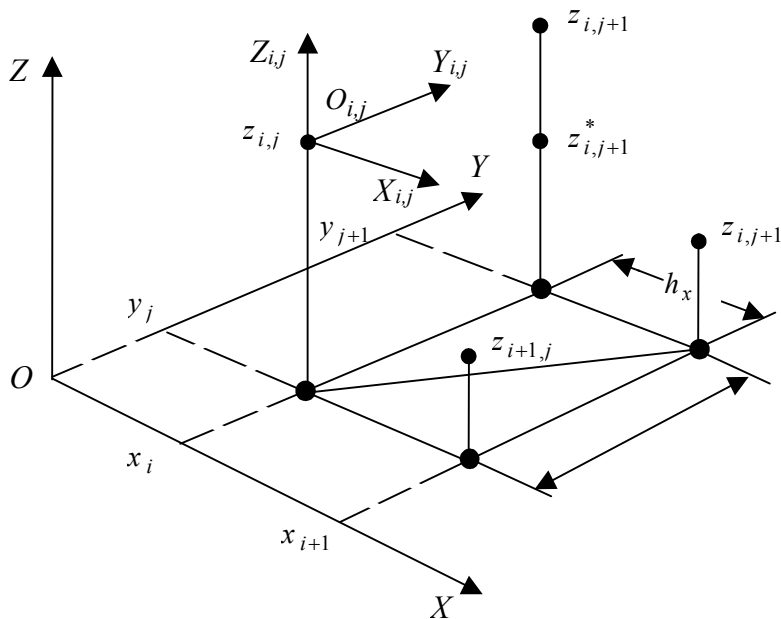


Рис. 1

Эта группа из четырех узлов образует две треугольные ячейки и является минимальным по размеру однотипным фрагментом сетки, на котором задаются параметры моделируемой поверхности. Каждой такой группе узлов соответствуют два треугольных фрагмента плоскостей, аппроксимирующих рельеф грунта. Будем называть их соответственно треугольниками $A_{i,j}$ и $B_{i,j}$. Координаты вершин треугольника $A_{i,j}$ – $x_i, y_j, z_{i,j}$; $x_i, y_{j+1}, z_{i,j+1}$ и $x_{i+1}, y_{j+1}, z_{i+1,j+1}$, а треугольника $B_{i,j}$ – $x_i, y_j, z_{i,j}$; $x_{i+1}, y_j, z_{i+1,j}$ и $x_{i+1}, y_{j+1}, z_{i+1,j+1}$. Введем системы координат $(OXYZ)_{i,j}^A$ и $(OXYZ)_{i,j}^B$, начала которых совпадают и располагаются в точке с координатами $x_i, y_j, z_{i,j}$. Переход от системы $(OXYZ)_{i,j}$ к $(OXYZ)_{i,j}^A$ задается двумя последовательными поворотами. Первый поворот осуществляется вокруг оси $(OX)_{i,j}$ на угол $\theta_{i,j}^A$ до попадания оси $(OY)_{i,j}$ в точку с координатами $x_i, y_j, z_{i,j+1}$. Второй поворот выполняется вокруг нового положения оси $(OY)_{i,j}$ на угол $\Psi_{i,j}^A$ до совмещения оси $(OZ)_{i,j}$ с нормалью к треугольнику $A_{i,j}$.

Переход от системы $(OXYZ)_{i,j}$ к $(OXYZ)_{i,j}^B$ осуществляется за счет первого поворота вокруг оси $(OX)_{i,j}$ на угол $\theta_{i,j}^B$ до попадания оси $(OY)_{i,j}$ в точку с координатами $x_i, y_j, z_{i,j+1}^*$. Координата $z_{i,j+1}^*$ вычисляется в соответствии с выражением

$$z_{i,j+1}^* = z_{i,j} + z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j}.$$

Значение $z_{i,j+1}^*$ равно длине отрезка перпендикуляра к плоскости OXY , восстановленного в точке с координатами $x_i, y_{j+1}, 0$, от нулевой отметки до точки пересечения с плоскостью, в которой расположен треугольник $B_{i,j}$.

Второй поворот выполняется вокруг нового положения оси $(OY)_{i,j}$ на угол $\Psi_{i,j}^B$ до совмещения оси $(OZ)_{i,j}$ с нормалью к треугольнику $B_{i,j}$.

Углы $\theta_{i,j}^A$ и $\Psi_{i,j}^A$ вычисляются по формулам

$$\theta_{i,j}^A = \text{Arctg} \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{h_y},$$

$$\Psi_{i,j}^A = \text{Arcsin} \frac{h_y (z_{i,j+1} - z_{i+1,j+1})}{\sqrt{h_y^2 (z_{i,j+1} - z_{i+1,j+1})^2 + h_x^2 (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2 + h_x^2 h_y^2}}.$$

Значения углов $\theta_{i,j}^B$ и $\Psi_{i,j}^B$ находятся аналогично. Отличие состоит лишь в замене координаты $z_{i,j+1}$ координатой $z_{i,j+1}^*$.

Положения начала систем координат $(OXYZ)_{i,j}$ в системе $OXYZ$ определяется векторами $R_{i,j}$ ($i = \overline{1, n_x - 1}, j = \overline{1, n_y - 1}$) с проекциями $(R_{i,j})_x = h_x(i-1)$, $(R_{i,j})_y = h_y(j-1)$ и $(R_{i,j})_z = z_{i,j}$ на оси OX , OY и OZ соответственно.

Векторы $R_{i,j}$ совместно с углами $\theta_{i,j}^A$, $\Psi_{i,j}^A$, $\theta_{i,j}^B$ и $\Psi_{i,j}^B$ ($i = \overline{1, n_x - 1}, j = \overline{1, n_y - 1}$) дают полный комплект параметров, характеризующих геометрию рельефа участка местности в области построения сетки.

Несмотря на то, что аппроксимация поверхности грунта осуществляется треугольными фрагментами плоскостей, при соответствующем выборе шага сетки данный подход обеспечивает достаточно точное описание рельефа с произвольными характеристиками. Данный вид аппроксимации дает возможность сравнительно просто отобразить как крупногабаритные препятствия на пути ТС в виде траншей, ступеней и т.п., так и мелкие неровности со случайным характером распределения по поверхности.

Описание геометрических характеристик наружных поверхностей ТС. На наружных поверхностях конструктивных элементов ТС строятся сетки с целью учета всех возможных вариантов контакта с жесткими элементами окружающей среды. Количество и вид сеток выбираются в зависимости от формы конкретного элемента. Каждой узловой точке сетки ставится в соответствие элементарная площадка поверхности с определенной площадью. Суммарная площадь элементарных площадок равна площади поверхности, на которой построена сетка. Пересечение узловыми точками плоскостей, аппроксимирующих рельеф местности, рассматривается как силовой контакт элементарной площадки с грунтом. В этом случае по координатам и скоростям узловых точек производится вычисление сил реакции элементов окружающей среды для всех контактирующих элементарных площадок. Суммирование сил реакции, приложенных к элементарным площадкам, и их вращательных моментов дает главный вектор силы реакции и главный момент силы реакции, приложенные к конкретному элементу ТС. Математическое описание геометрических поверхностей ТС сводится к вычислению координат векторов, проведенных из центров масс конструктивных элементов в узловые точки сеток, и координат этих точек в системе $OXYZ$. Дополнительно выполняется определение векторов абсолютных скоростей контактирующих узловых точек сеток. Вычисления проводятся на основе кинематических соотношений.

Описание силового взаимодействия конструктивных элементов ТС с элементами окружающей среды. При изучении вопросов проходимости транспортных средств, применяются полуэмпирические характеристики процесса напряжение – деформация, служащие для определения показателей взаимодействия движителя машины с грунтом [2]. Эти характеристики строятся на основе статических измерений, которые выполняются специальными приборами (беваметрами), и не содержат показателей рассеивания энергии в ходе деформации. Применение зависимостей напряжение – деформация в задаче моделирования динамики ТС требует учета диссипации энергии. Предлагаемый вариант математических соотношений позволяет учесть ос-

новные свойства реального контакта в динамике процесса в случае незначительных остаточных деформаций грунта. Математическое описание силового взаимодействия построено на основе допущения, что конструктивные элементы ТС являются абсолютно жесткими, а элементы окружающей среды деформируемы по нормали к аппроксимирующей их поверхности, обладают упругостью и диссипацией энергии гистерезисного типа:

$$F_z = \begin{cases} -c S [1 - \gamma \operatorname{sign}(v_z)] z & \text{при } z < 0 \text{ и} \\ 0 & \text{при } z \geq 0. \end{cases}$$

Здесь F_z – проекция силы, приложенной к элементарной площадке ТС, на нормаль к аппроксимируемой поверхности грунта; c – жесткость участка грунта единичной площади; S – площадь элементарной площадки, которая соответствует точке сетки на поверхности конструктивного элемента ТС; γ – коэффициент, характеризующий диссипацию энергии (определяется экспериментально); v_z – проекция абсолютной скорости точки сетки поверхности ТС на нормаль к аппроксимируемой поверхности грунта; z – расстояние от точки сетки на поверхности ТС до аппроксимируемой поверхности грунта по нормали к ней.

Скольжение элементарной площадки конструктивного элемента ТС по аппроксимирующей плоскости сопровождается силой сухого трения, лежащей в этой плоскости и направленной в сторону, противоположную скольжению:

$$F_x = -k F_z \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}, \quad F_y = -k F_z \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}.$$

Здесь F_x , F_y – проекции силы трения на оси системы координат, связанной с аппроксимирующей плоскостью; k – коэффициент трения; v_x , v_y – проекции на аппроксимирующую плоскость абсолютной скорости точки сетки на поверхности конструктивного элемента ТС.

Описание динамики ТС как механической системы, состоящей из совокупности твердых тел. ТС, как правило, может быть представлено в виде группы твердых тел, связанных между собой шарнирами или иными конструктивными элементами, которые ограничивают их взаимные перемещения. Движение системы тел происходит под действием приводов, земного притяжения и реакции опорной поверхности. Распределенные реакции опорной поверхности рассматриваются как источник одного из видов внешних сил и моментов внешних сил, направление действия и значение которых определяется кинематическими характеристиками конструктивных элементов ТС. В некоторых случаях могут учитываться и другие внешние силы. Методы составления уравнений динамики таких механических систем хорошо известны. Для построения математической модели шагающего транспортного устройства [1] применялся подход, основанный на принципе Д'Аламбера [3]. При этом дифференциальные уравнения динамики системы твердых тел были дополнены соотношениями, которые определяют моментные характери-

стики электроприводов, упругость и потери энергии в редукторах, а также в управляемой муфте.

Выводы. Предложенная методика позволяет провести моделирование движения ТС по местности как со случайным, так и регулярным (например, в виде ступеней лестницы) характером поверхности грунта. Переход от одного варианта моделирования к другому требует только ввода в компьютерную программу новой версии геометрических характеристик рельефа.

1. Пат. на винахід 72178, МПК В62D57/02. Крокуючий транспортний пристрій / Григор'єв С. В. ; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – 99010302 ; заявл. 20.01.1999 ; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. – 6 с.
2. Беккер М. Г. Введение в теорию систем местность-машина / М. Г. Беккер. – М. : Машиностроение, 1973. – 520 с.
3. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел / Й. Виттенбург. – М. : Мир, 1980. – 292 с.

Институт технической механики НАНУ и НКАУ,
Днепропетровск

Получено 30.06.08,
в окончательном варианте 06.02.09