

УДК 004.896

## ГЕНЕРАТОР X3D-МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.И. Телегин, Д.Н. Тимофеев*

Предложена методика табличного описания структурных, кинематических и геометрических параметров произвольных механических систем (МС), которая оптимально соответствует семантике X3D-разметки МС. Приведён и описан JS-код автоматического создания (генерации) X3D-модели МС. Рассмотрены примеры табличного описания и X3D-моделей манипуляторов.

Ключевые слова: механическая система, 3D-модель, X3D-код, таблица параметров.

Для создания новых и совершенствования существующих МС используются различные методы их моделирования, расчёта и конструирования. Под моделированием здесь понимается, во-первых, создание трёхмерной компьютерной 3D-модели МС и её анимации. Во-вторых, генерация (автоматическое выписывание) и использование в расчётах математической модели МС в виде уравнений механики (кинематики, статики и динамики).

Здесь рассматривается первый этап моделирования, т.е. создания 3D-модели МС на основе её табличного описания, которое является входной информацией первого этапа моделирования. Эта информация используется также для осуществления второго этапа, т.е. генерации математической модели МС. Генерация – это процесс автоматического выписывания уравнений кинематики, статики и динамики МС в желаемом виде, например, в аналитическом виде с явно выраженными геометрическими и инерционными параметрами, или в виде исполняемого программного кода для решения задач механики и управления.

Для построения 3D-модели МС необходимо описать структурные, кинематические и геометрические параметры этой МС, а также описать модели её тел. Рассмотрим подробнее процесс табличного описания МС и составления входной информации, на основе которой автоматически генерируются запускаемые X3D-коды 3D-модели МС [1].

В первую очередь необходимо определить типы кинематических пар (КП), которые используются в создаваемой 3D-модели МС. При описании КП используются следующие понятия: базовое тело КП, смежное тело КП, полюс КП, ось КП, базовая плоскость КП. Если коротко, то КП – это два тела, одно из которых называют базовым, а другое смежным. Смежное тело может двигаться относительно базового и наоборот. Полюс КП – точка, жёстко связанная с смежным телом. Ось КП – ось, вдоль которой поступательно перемещается или вокруг которой вращается смежное тело. Базовая плоскость КП – плоскость, жёстко связанная с базовым телом КП. Здесь

перечислим коды (цифровые обозначения) основных типов КП, через тире их названия (в скобках аббревиатуры) и через запятую опишем какие движения смежного тела относительно базового допускает эта КП. Различают следующие типы КП:

0 – поступательная КП (ПКП) или КП0, допускающая поступательное перемещение смежного тела вдоль оси КП.

1 – вращательная КП (ВКП) или КП1, допускающая вращение смежного тела вокруг оси КП.

2 – цилиндрическая КП (ЦКП) или КП2, допускающая поступательное перемещение смежного тела вдоль и вращение вокруг оси КП.

3 – шаровая КП (ШКП) или КП3, допускающая вращение смежного тела вокруг полюса КП.

4 – плоско-параллельная КП (ППКП) или КП4, допускающая поступательное перемещение полюса КП в базовой плоскости и вращение смежного тела вокруг оси перпендикулярной базовой плоскости и проходящей через полюс КП.

5 – поступательно-вращательная КП (ПВКП) или КП5, допускающая поступательное перемещение полюса КП в базовой плоскости и вращение смежного тела вокруг двух осей, где первая ось перпендикулярна базовой плоскости и проходит через полюс КП, а вторая ось жестко связана с смежным телом, перпендикулярна первой оси и проходит через полюс КП.

6 – свободная КП (СКП) или КП6, допускающая поступательное перемещение полюса КП и вращение смежного тела вокруг этого полюса.

В описании можно использовать две аббревиатуры КП. Во второй после букв КП указывается количество степеней свободы (за исключением КП0) смежного тела в движении относительно своего базового тела. Очевидно, что в КП0 смежное тело имеет одну (поступательную) степень свободы относительно своей базы.

КП4, КП5 и КП6, как правило, используют при моделировании КП, которую образует абсолютная система координат (АСК) и корпус транспортного средства. Тип этой КП, т.е. КП4, КП5 или КП6, зависит от опорной поверхности и вида транспортного средства. Для колёсного и гусеничного транспортного средства на плоской опорной поверхности (без кочек, подъёмов и спусков) достаточно связь корпуса с АСК моделировать через КП4, где вертикальная координата полюса КП (точка корпуса) постоянна, так как корпус может совершать только плоскопараллельное движение относительно АСК. Если опорная поверхность имеет наклонные (к горизонту) участки, т.е. подъёмы и спуски, то связь АСК с корпусом необходимо описывать через КП5. В общем случае для транспортных средств на произвольной опорной поверхности и для шагающих аппаратов АСК и корпус образуют СКП (КП6), в которой корпус относительно АСК имеет шесть степеней свободы. КП6 образует АСК и корпус летательного аппарата.

При заполнении таблицы параметров МС (ТПМС) необходимо представить МС в исходном (до начала движения тел) положении и считать, что с каждым телом жёстко связана система координат, оси которой ориентированы в пространстве, как и оси АСК, т.е. ось абсцисс направлена по горизонтали вправо, ось ординат – вертикально вверх, ось аппликат – перпендикулярна экрану монитора и направлена в сторону наблюдателя. Началом связанной системы координат  $i$ -го тела является полюс  $i$ -й КП. ТПМС имеет шесть столбцов. Номер КП определяется номером её смежного тела. Полюс  $i$ -й КП и полюс  $i$ -го тела (точка  $O_i$ ) совпадают.

Опишем заголовок ТПМС. В описании будем использовать следующие аббревиатуры: ССКБ( $i$ ) – связанная система координат базы  $i$ -го тела, ССК( $i$ ) – связанная система координат  $i$ -го тела с началом в точке  $O_i$ . Каждый столбец описывается в отдельном абзаце, где после номера столбца через тире приведено название столбца и после точки приведено описание назначения столбца.

1 – название тела. В первой строке ТПМС записывается имя тела отсчёта, например, аббревиатура АСК.

2 –  $i$ . Столбец номеров тел. Начинается с номера тела отсчёта (нулевого номера), очередная строка нумеруется очередным натуральным числом.

3 – базы. Столбец номеров базовых тел.

4 – КП. Код КП. Если  $i$ -е тело со своей базой образует КП $j$ , то записывается число  $j$ .

5 – перенос. Здесь заносятся координаты  $t_{xi}$ ,  $t_{yi}$ ,  $t_{zi}$  (в метрах) положения полюса  $i$ -го тела в ССКБ( $i$ ). Если в исходном относительном положении  $i$ -го тела начало ССК( $i$ ) совпадает с началом ССКБ( $i$ ), то заносим значения 0, 0, 0.

6 – поворот. Здесь заносятся числа  $p_{xi}$ ,  $p_{yi}$ ,  $p_{zi}$ ,  $q_i$ , где  $p_{xi}$ ,  $p_{yi}$ ,  $p_{zi}$  – направляющие косинусы в ССКБ( $i$ ) оси  $i$ -й КП,  $q_i$  – угол поворота ССК( $i$ ) вокруг оси КП (измеряется в градусах).

В пятом и шестом столбце ТПМС заносится несколько вещественных чисел. Для стабильной работы первой версии ПО эти числа должны быть отделены друг от друга запятой и одним пробелом.

При визуализации модели МС к её разметке подключаются  $N+1$  внешних  $x3d$ -файлов, которые имеют имена «тело\_0», «тело\_1», «тело\_2», ..., «тело\_ $N$ », где  $N$  – количество подвижных тел МС. Эти файлы содержат  $X3D$ -разметки моделей тел. В рассмотренных примерах на рисунках 3, 4 звенья манипуляторов изображаются в виде тонких стержней (боксов), направляющие ПКП в виде прямоугольных параллелепипедов, шарниры ВКП и ЦКП в виде цилиндров, шаровой шарнир в виде шара.

Для использования ПО необходимо открыть в любом текстовом редакторе html-файл «модельМС.html» и разметить ТПМС. В качестве примера в листинге 1 приведён код разметки МС, кинематическая схема которой изображена на рис. 1. В этом коде опущены первые два столбца, т.е. столбец имён и номеров тел. Он имеет типовую структуру. Поэтому процесс составления ТПМС является типовым. Мы рекомендуем при добавлении новых строк ТПМС копировать разметку предшествующей строки и изменять значения параметров на необходимые.

После редактирования файла «модельМС.html» его необходимо открыть в браузере (для визуализации 3D-модели необходим браузер Mozilla Firefox 35 и новее). На экране появится ТПМС и кнопка «Создать модель». По нажатию кнопки запускается JS-код генератора X3D-модели МС, который записан в файле «генерацияМС.js». JS-код формирования входных параметров JS-объекта «X3DмодельМС» приведён в листинге 2. Опишем его.

В первой строке кода объявляются три массива для хранения параметров МС. Во 2-й строке в переменную N записывается количество тел МС. Для этого применяется метод `getElementsByTagName()` объекта `document`. Он возвращает коллекцию тегов, размечающих строки таблицы. Свойство `length` содержит количество этих строк, из которого отнимается число 3, так как первые строки отведены для заголовков и параметров положения АСК. После полной загрузки страницы в браузере формируются массивы строковых значений, взятых из ТПМС. Для этого три раза вызывается функция «взять()», извлекающая из ячеек таблицы значения строкового типа и помещающая их в соответствующие массивы. При этом значения углов поворота в градусах переводятся в радианы. В конце код содержит регистрацию функции-слушателя события нажатия кнопки для запуска функции «создатьМодель()». Эта функция создаёт объект при помощи конструктора "X3DмодельМС", передавая ему пять сформированных ранее параметров. Затем применяется метод «получитьМодель()» созданного объекта, который возвращает сгенерированную X3D-разметку и помещает её в контейнер `<div>` на html-странице. Для визуализации 3D-модели на web-странице необходимо подключить JS-библиотеку `x3dom.js` (которую можно получить на сайте разработчиков <http://www.x3dom.org/>). Для этого при помощи метода `createElement()` создаётся тег `<script>`. В атрибут «src» записывается ссылка на внешний файл библиотеки, расположенный в папке «scripts». Метод `appendChild()` добавляет созданный тег в тело документа.

В листинге 3 представлен код конструктора «X3DмодельМС», который принимает четыре параметра. Эти параметры присваиваются одноимённым свойствам объекта. Функция «генераторМодели()» реализует метод «получитьМодель()». Опишем код этого метода. Функция «генераторМодели()» формирует массив номеров смежных тел на основе входного массива номеров базовых тел. X3D-код МС формируется в строковой пере-

менной «разметка». Этот код состоит из постоянной части, отвечающей за формирование преамбулы html-документа, корневого тега X3D-разметки и тегов, устанавливающих параметры сцены, такие как цвет фона и положение камеры. Здесь же формируется разметка внешнего трансформатора, который переносит АСК относительно центра сцены. Переменная «отступ» необходима для создания отступов при оформлении разметки. Для формирования части разметки, зависящей от входных параметров, вызывается рекурсивная функция «ветка()». После неё в переменную «разметка» добавляются закрывающие теги ранее открытых элементов.

Всё ПО состоит из запускаемого файла «модельМС.html» и папки «scripts», а также N+1 файлов с расширением .x3d, содержащих разметку тел МС. Файл «модельМС.html» содержит html-разметку страницы для работы с программой. Папка «scripts» содержит три файла. Первый из них «x3dom.js» – JavaScript-библиотека, необходимая для визуализации «3D-модели». Данный файл подключается к html-странице во время работы программы. Файл «стили.css» описывает стили элементов web-страницы, в частности стиль ТПМС. Код генератора 3D-модели находится в файле «генерацияМС.js».

На рисунках 1, 2 представлены кинематические схемы манипуляторов с четырьмя и шестью степенями свободы. Их ТПМС представлены в таблицах 1, 2. Соответствующие этим таблицам X3D-модели МС изображены на рисунках 3, 4.

**Листинг 1.** html-разметка ТПМС для манипулятора на рис. 1

```
<!DOCTYPE html><html><head><meta charset="UTF-8">
<script src="scripts/генерацияМС.js"></script>
<link rel="stylesheet" href="scripts/стили.css"></head><body>
<input type="button" id="создатьМодельМС" value="Создать модель">
<div id="ТПМС">
<table> <tr><td colspan="4">Таблица параметров МС на рис. 1</td></tr>
<tr><th>базы</th><th>КП</th><th>Перенос</th><th>Поворот</th> </tr>
<tr><td name="база">—</td> <td name="КП">6</td>
<td name="перенос">0.0, 1.2, 0.0</td>
<td name="поворот">0.0, 0.0, 0.0, 0.0</td> </tr>
<tr><td name="база">0</td> <td name="КП">1</td>
<td name="перенос">0.0, 0.0, 0.0</td>
<td name="поворот">0.0, 1.0, 0.0, -45.0</td> </tr>
<tr><td name="база">1</td> <td name="КП">0</td>
<td name="перенос">0.9, 0.0, 0.0</td>
<td name="поворот">1.0, 0.0, 0.0, 0.0</td> </tr>
<tr><td name="база">2</td> <td name="КП">2</td>
<td name="перенос">0.0, 0.5, 0.0</td>
<td name="поворот">0.0, -1.0, 0.0, 0.0</td> </tr>
</table></div><div id="модель"></div></body></html>
```

**Листинг 2.** Код формирования входных параметров объекта X3DмодельМС

```
onload = function(){ var базы=[], t=[], q=[],  
N = document.getElementsByTagName('tr').length-3;  
базы = взять('база'); t = взять('перенос'); q = взять('поворот');  
document.getElementById('создатьМодельМС').  
addEventListener('click', создатьМодель);  
function взять(параметр){ var массивЗначений=[], i=0, qq=[],  
массивПараметров = document.getElementsByName(параметр);  
for(i; i<N+1; i++) { if (параметр == "поворот") {  
qq = массивПараметров[i].innerHTML.split(/,\s*/); qq[3] *= Math.PI/180;  
массивЗначений.push(qq.join(", ")); } else {  
массивЗначений.push(массивПараметров[i].innerHTML); } }  
return массивЗначений; }  
function создатьМодель() { var модель = new X3DмодельМС(N,базы,t,q);  
document.getElementById('модель').innerHTML=модель.получитьМодель();  
var x3domm = document.createElement('script');  
x3domm.setAttribute('src',"scripts/x3dom.js");  
document.body.appendChild(x3domm); } }
```

**Листинг 3.** JS-объект генератора X3D-модели МС

```
function X3DмодельМС(N,базы,t,q){ this.N=N; this.базы=базы; this.t=t;  
this.q = q; this.получитьМодель = генераторМодели; }  
function генераторМодели(){ var N = this.N, базы = this.базы, t=this.t,  
q = this.q, отступ="\n ", смежные = [];  
// формирование массива номеров смежных тел  
for(var j=0; j < N+1; j++) { смежные.push([0]);  
for(var i=0; i<N; i++){ if(базы[i+1] == j) { смежные[j].push(i+1); } }  
смежные[j][0]=смежные[j].length-1; }  
// формирование начала разметки  
var разметка = '<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>\n  
<X3D version="3.2" height="570px" width="900px">\n <Scene>  
\n <Background skyColor="1 1 1"></Background>  
<Viewpoint position="0 0 8"></Viewpoint> \n <Transform id="тело_0"  
translation="'+t[0]+'>\n <Inline url="тело_0.x3d"></Inline>';  
// формирование разметки МС  
(function ветка(i) { for (var j=1; j<=смежные[i][0]; j++) {  
отступ=отступ.replace(' ', ' ');  
var k = смежные[i][j];  
разметка += отступ+'<Transform id="тело_'+k+'  
" translation="'+t[k]+'"+' rotation="'+ q[k] +'>';  
разметка += отступ+' <Inline url="тело_'+k+'.x3d"></Inline>';  
ветка(смежные[i][j]);  
разметка += отступ+' </Transform>'; отступ=отступ.replace(' ', '');  
} })(0);  
// формирование конца разметки  
разметка += '\n </Transform>\n </Scene>\n</X3D>';
```

```
return разметка;
}
```

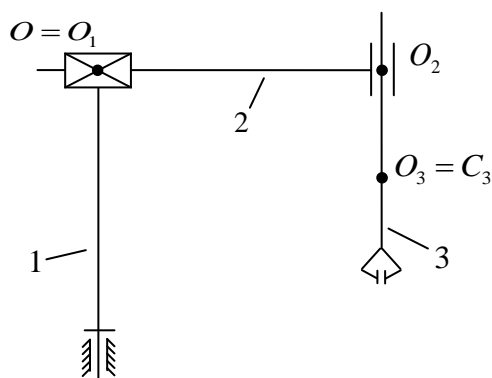


Рис. 1. Манипулятор

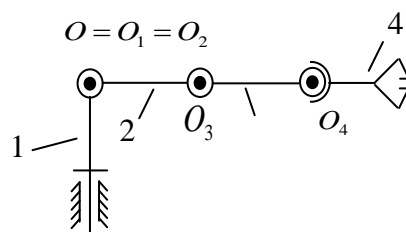


Рис. 2. Манипулятор

Таблица 1  
ТПМС манипулятора по рис. 1

Таблица параметров МС на рис. 1			
базы	КП	Перенос	Поворот
—	6	0.0, 1.2, 0.0	0.0, 0.0, 0.0, 0.0
0	1	0.0, 0.0, 0.0	0.0, 1.0, 0.0, -45.0
1	0	0.9, 0.0, 0.0	1.0, 0.0, 0.0, 0.0
2	2	0.0, 0.5, 0.0	0.0, -1.0, 0.0, 0.0

Таблица 2  
ТПМС манипулятора по рис. 2

Таблица параметров МС на рис. 2			
базы	КП	Перенос	Поворот
—	6	0.0, 1.0, 0.0	0.0, 0.0, 0.0, 0.0
0	1	0.0, 0.0, 0.0	0.0, 1.0, 0.0, 0.0
1	1	0.0, 0.0, 0.0	0.0, 0.0, 1.0, 0.0
2	1	1.5, 0.0, 0.0	0.0, 0.0, 1.0, 0.0
3	3	1.2, 0.0, 0.0	1.0, 0.0, 0.0, 0.0

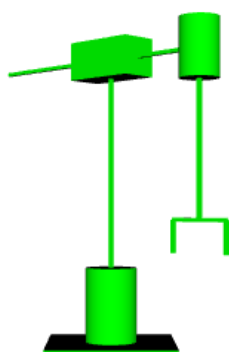


Рис. 3. X3D-модель по таблице 1

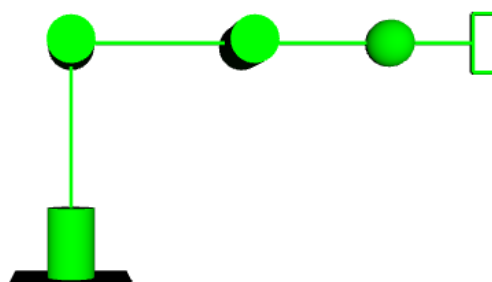


Рис. 4. X3D-модель по таблице 2

### Библиографический список

1. Телегин, А.И. x3d-моделирование механических систем: Опыт использования X3D в моделировании механических систем [Электронный ресурс]: монография / А.И. Телегин, Д.Н. Тимофеев, Д.И. Читалов; Юж.-Урал. гос. ун-т, ЭТФ. – Челябинск: ЭТФ, 2014. – 66 с. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?i=22585700>.

[К содержанию](#)