

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ - СЛИВЕН

МАГ. ИНЖ. Михаил Светославов Милев

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ПТП ПРИ ЕКСПЕРТЕН ИНЖЕНЕРЕН АНАЛИЗ

АВТОРЕФЕРАТ

за получаване на образователна и научна степен „Доктор“

Научна специалност:

„Автоматизация на инженерния труд
и системи за автоматизирано проектиране“

Научни ръководители:

проф. д.т.н. Станимир Карапетков
доц. д.м.н. Петьо Келеведжиев

Рецензенти:

.....

.....

Сливен, 2021

Дисертационният труд е обсъден на заседание на катедрен съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ при Инженерно-педагогически факултет – Сливен на Технически университет – София, състояло се на 02.03.2021 г. от 10:00 часа и е насрочено за официална защита пред научно жури в състав: : проф. д-р инж. Любомир Ванков Димитров, проф. д-р инж. Пламен Петров Петров, Проф. д.н. Любка Атанасова Дуковска проф. д-р инж. Димитър Неделчев Карастоянов, проф. д-р инж. Владимир Василев Монов.

Резервни членове: проф. д-р Георги Пенчев Венков, доц. д-р инж. Тони Венциславов Бояджиев.

*Дата на защитата на дисертацията:
24.09.2021 г. (петък) от 14:00 часа.*

*Място на защита на дисертацията:
ТУ – София, ИПФ – Сливен, Зала 1207*

Данни за дисертационния труд: брой страници – 125, брой фигури – 74, брой таблици – 1, литературни източници – 68, публикации по темата на дисертационния труд – 3.

Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата съответства на тази в дисертацията.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Сградата на ИПФ, каб.1409.

Автор: маг. инж. Михаил Светославов Милев.

Тема: Визуализация на ПТП при експертен инженерен анализ

Тираж: 30 бр.

Проект, оформление и предпечатна подготовка: авторът.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Едни от най-разпространените ПТП са загуба на устойчивост на МПС, загуба на управление и удар между автомобили. Изследването на процесите при тези ПТП изисква строги механоматематични модели. Те представляват система от нелинейни обикновени диференциални уравнения. Интерес представлява онова нейно решение, което удовлетворява конкретни стойности в началото и/или в края на интервала, на случилото се и изследвано ПТП, т. е. механоматематичният модел е гранична задача за система от нелинейни обикновени диференциални уравнения.

Аналитичното решение на прецизно създаден механоматематичен модел би дало информация за различни характеристики на движенията на случилото се ПТП. При направеното литературно проучване се оказва че липсва обща теория, гарантираща разрешимостта на гранични задачи за нелинейни системи, а още по-малко обща теория, предлагаща аналитично решение на такъв тип задачи.

Изследването на разрешимостта на нелинейни гранични задачи за системи диференциални уравнения се свежда предимно до предлагане на достатъчни условия, гарантиращи абстрактно решение, без да се предлага негов аналитичен вид. Съществуват и методи за числено решаване на различни нелинейни гранични задачи. Недостатък на числените методи обаче е, че използват приближаваща функция, което води до натрупване на грешка.

Тъй като описва реално случило се ПТП, изследваната в дисертационния труд гранична задача има решение. Този предварително известен факт обезсмисля търсенето на теорема, потвърждаваща разрешимостта. От друга страна, видът на разглеждания модел не позволява да бъде решен аналитично. Накрая, резултатите от числените методи не предлагат ясна визуална представа, особено за неспециалист.

Всичко това насочва към заключението, че за целите на автотехническата експертиза би било удачно разработването на допълнителни средства, предлагащи визуализация, създадена въз основа на решението на изследвания тук механоматематичен модел. Отчитайки характера на разглежданите физични процеси, представянето им с анимиран триизмерен образ би осигурило предпоставки за непосредствено възприемане на събраната и възстановената от експертите на следствието информация за случило се ПТП.

НАУЧНА ОПРЕДЕЛЕНОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на изследването

Процесите на възникване и протичане на ПТП, представляващо загуба на устойчивост на автомобила.

Предмет на изследването

Изследван и визуализиран е механоматематичният модел на ПТП [8], разглеждащ движението на автомобил при загуба на устойчивост.

Цел на дисертацията

Целта на дисертационния труд е разработване на целево адаптирана среда за 3D анимация, описваща резултатите от механоматематичното моделиране на ПТП пред органи на следствието с неспециализирани в областта инженерни познания.

Задачи:

1. Да се анализира математическият апарат за описване на движенията при ПТП с цел систематизиране на получаваните от него данни.
2. Да се разработи адаптивен модел за 3D анимиране, представящ процесите на възникване и протичане ПТП, като следствие от паралелно събраната фактологична информация и информация получена в следствие на реализираните експертни дейности.
3. Да се предложат средства и начини за усвояване на следствените данни в контекста на създаваните модели за 3D анимация.
4. Да се създадат предпоставки за автоматизиране на процеса на усвояване на данните при 3D анимиране.

Методи на изследване

За решаване на поставените в дисертационната работа задачи се използват 3D моделиране, 3D анимиране, програмиране и компютърна симулация.

Апробация на изследването

За апробиране на изследването е използван софтуерен продукт за 3D анимиране *Autodesk Maya*.

Публикуване на резултатите от дисертационните изследвания

По дисертационния труд са направени общо три публикации, като две от тях са самостоятелни, а третата в съавторство с научните ръководители.

Структура на дисертацията

В структурно отношение дисертацията се състои от увод, пет глави, приноси на дисертационния труд, списък с направени публикации и литература.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ВТОРА ГЛАВА ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1.1. Механоматематичен модел на ПТП

В специализираната научна литература съществуват голям брой изследвания на ПТП, като с развитието на компютърната техника, особено значение придобиват трудове с механоматематично моделиране.

Едни от най-разпространените ПТП са загуба на устойчивост на МПС, загуба на управление и удар между автомобили. Изследването на процесите при тези ПТП изисква строги механоматематични модели.

Като правило, механоматематичният модел на дадено ПТП е система от нелинейни обикновени диференциални уравнения. Интерес представлява онова нейно решение, което удовлетворява конкретни стойности (определят се експертно) в началото и/или в края на интервала, в който се случва изследваното ПТП, т. е. механоматематичният модел е гранична задача за система от нелинейни обикновени диференциални уравнения.

В основата на настоящия дисертационен труд е моделът, получен в [8] и цитиран тук в Глава 2.

Аналитичното решение на прецизно създаден механоматематичен модел би дало информация за различни характеристики на движенията на случилото се ПТП. Оказва се обаче, че липсва обща теория, гарантираща разрешимостта на гранични задачи за нелинейни системи, а още по-малко обща теория, предлагаща аналитично решение на такъв тип задачи.

Аналитични решения са предложени в Fazhan Geng-Minggen Cui [39] и Raad N. Butris-Suham Kh. Shammo [51]. Граничната задача [39] е за система от втори ред с две неизвестни функции, като техните производни не участват в нелинейността. Граничната задача [51] е за система от диференциални уравнения от първи ред с три неизвестни, решени спрямо първите производни, в чиито нелинейности не участват самите производни. Въобще броят на граничните задачи за нелинейни системи, за които литературата разполага с подход за аналитично решаване, е твърде ограничен.

Изследването на разрешимостта на нелинейни гранични задачи за системи диференциални уравнения се свежда предимно до предлагане на достатъчни условия, гарантиращи абстрактно решение на разглежданата гранична задача, но без да предлагат аналитичен вид на решенията. Такива са например работите J.W. Bebernes-K. Schmitt [32], A. Granas-R.Guenter-J.Lee [40], I. T. Kiguradze [42],

Н.И. Василев-Ю.А. Клоков [4], Y.H. Lee-X. Xu [45], Н.В. Thompson-C. Tisdell [56] и N.A. Asif-R.A. Khan [30].

Предлагат се и методи за числено решаване на различни нелинейни гранични задачи. За резултати и литература могат да бъдат посочени P.P. See-Z.A.Majid-M. Suleiman [54], M.J. Rupa-M.S. Islam [53], T. A. Biala-S. N. Jator [33] и M. El-Gamel [37]. Числените методи дават приблизителните стойности на решението в поредица от точки (наречени възли). Недостатък на числените методи е, че не предлагат информация за поведението на решението извън възлите. Въз основа на стойностите на решението, получени с числен метод, често се построява функция, приближаваща самото решение. Този подход води до натрупване на допълнителна грешка.

Ясно е, че, тъй като описва реално случило се ПТП, изследваната в дисертационния труд гранична задача има решение. Този предварително известен факт обезсмисля търсенето на теорема, потвърждаваща разрешимостта. От друга страна, видът на разглеждания модел не позволява да бъде решен аналитично. Накрая, резултатите от числените методи не предлагат ясна визуална представа, особено за неспециалист.

Всичко това насочва към заключението, че за целите на автотехническата експертиза би било удачно разработването на допълнителни средства, предлагащи визуализация, създадена въз основа на решението на изследвания тук механоматематичен модел. Отчитайки характера на разглежданите физични процеси, представянето им с анимиран триизмерен образ би осигурило предпоставки за непосредствено възприемане на събраната и възстановената от експертите на следствието информация.

1.2. Обобщени информационни модели и видове ПТП

От съществено значение за експертното изследване е механизмът на възникване [1, 2, 3, 6, 7, 8, 21]. Чрез него се определят основните видове ПТП. Всеки вид ПТП може да бъде описан с информационен модел [23]. Информационните модели на ПТП представят съвкупността от непосредствено събраната информация и информацията, получена в следствие на извършения експертен инженерен анализ. Чрез тях се дефинират изчислително-аналитични процедури и научни методи за възстановяване на обстоятелствата, при което е възникнало дадено ПТП. Основни методи, прилагани при различните видове ПТП, са *Momentum 360*, *Теория на удара – Постановка на Нютон* и *Delta V*.

Доказването на хипотеза, възникнала в хода на разследването на ПТП, изисква прилагането на повече от един метод. Чрез всеки метод се търси

конкретно възможно решение, като се разчита на сравняване на получаваните числени резултати. Резултатите от различните методи за анализ по-често се извеждат във формализиран вид, като числови данни, и/или имат слабо илюстративна визуална интерпретация, най-вече под формата на 2D анимация или статична графика.

Всичко това затруднява еднозначното представяне на информацията пред органи на следствието с неспециализирани в областта инженерни познания и мотивира необходимостта от разработване на допълнителни средства, подобряващи графичното интерпретиране на резултатите.

1.3. 3D Анимация

Процесът 3D анимиране съдържа множество специфични дейности. В зависимост от изискванията за реалистичност и наличието на специални ефекти, броят на специфичните дейности може да варира. Проучените литературни източници [29, 31, 34, 38, 43, 52, 57, 58, 60] описват процеса по създаването на анимиран 3D проект, като съставен от 11 типични дейности.

Настоящият дял от литературното проучване разглежда основните дейности за създаване на 3D анимирани образи и ги отнася към проблематиката на дисертационния труд. Направеното проучване показва наличието на базови технически средства за изграждане на експериментален симулационен модел за визуализиране на ПТП чрез 3D анимиране. С ключова приложимост се явяват възможностите за:

- Моделиране и управление на несвободни механични системи;
- Параметризация;
- Програмиране на процедурни алгоритми;
- Трансфер на данни от външни софтуерни среди;
- Управление на виртуални ракурси при визуализация на 3D моделите.

От направеното проучване може да бъде обобщено следното: Съществува разнообразие от софтуерни платформи за цялостно реализиране или частично подпомагане на дейностите по създаването на 3D анимирана графика. [31, 34] диференцират тези софтуерни продукти на база комплексност на решаваните с тях задачи, степен на технологично развитие и маркетингова политика при разпространение на лицензните им пакети. По отношение на степен на технологично развитие, съществува известно хомогенизиране между водещите в областта софтуерни платформи. Резултатите от направеното проучване на източниците [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68] са систематизирани в табл. 1.1.

Табл.1.1. Софтуерни платформи за 3D анимация

Име	Поддръжка	Целево предназначение	Приблизителна цена
3DS Max	Windows	Animation, Modeling, Video Game Creation, Visual 3D Effects	Comercial: \$3500; Educational: Free
Houdini	Windows, Macintosh, Linux	Animation, Lighting, Modeling, Visual 3D Effects	Comercial: \$2000 - 7000; Educational: \$99
Cinema 4D	Windows, Macintosh, Linux	Modeling, Texturing, Animation	Comercial: \$1000 - 3500; Educational: \$200 - 500
Maya	Windows, Macintosh	Animation, Lighting, Modeling, Video Game Creation, Visual 3D Effects	Comercial: \$3500; Educational: Free
Lightwave	Windows, Macintosh	Modeling, Texturing, Animating	Comercial: \$1000; Educational: \$200
Blender	Windows, Linux, Macintosh, other	Animation, Lighting, Modeling, Video Game Creation, Visual 3D Effects	Free
Carrara	Windows, Macintosh	Animation, Modeling	Comercial: \$100 - 500; Educational: -

Autodesk Maya предлага комплексен набор от инструменти за реализиране етапите от процеса на 3D анимация и функционалности за моделиране на параметризирани сцени и обекти. Поддръжката на програмен език *MEL (Maya Embedded Language)* позволяват изграждане на процедурни алгоритми за усвояване и обработка на числови данни от външни софтуерни продукти. Това мотивира избора на *Autodesk Maya* като експериментална среда за дисертационната работа.

1.4. Изводи

1. Проучената математическа литература не предлага полезен за автотехническата експертиза подход за решаване на гранични задачи за нелинейни системи диференциални уравнения, какъвто е изследваният тук механоматематичен модел на ПТП.
2. Не са открити средства за визуализация на решенията на системата диференциални уравнения и онагледяване на ПТП, чрез 3D анимация.
3. Известните методи за анализ на ПТП обикновено предлагат слабо илюстративна интерпретация, най-вече под формата на 2D анимация или статична графика.
4. Систематизирането на процеса на 3D анимиране на реално възникнали събития съкращава времето за създаване на документален филмов разказ. Това от своя страна способства за бързо изясняване на възникнали по време на делото въпроси и съкращава сроковете на разследването на ПТП.

ВТОРА ГЛАВА

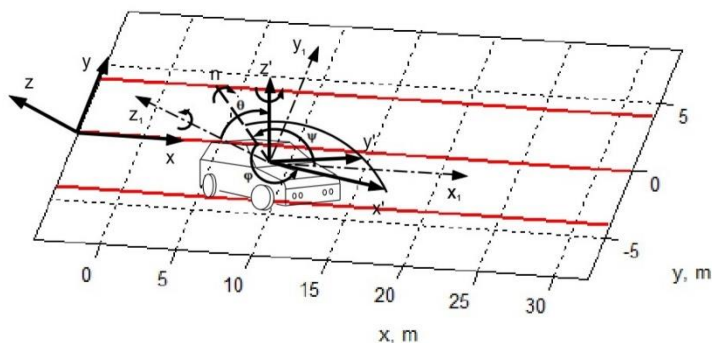
ДВИЖЕНИЕ НА АВТОМОБИЛ ПРИ ЗАГУБА НА УСТОЙЧИВОСТ – МЕХАНОМАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

За визуализиране движенията на автомобил при загуба на устойчивост е необходимо да се проследи и анализира механичната му система. Тя е сложна структура с множество степени на свобода. В зависимост от възприетия модел и нивото на абстракция, броят на степените на свобода може да варира. Моделите в [8], *квазиравнинен* и *пространствен*, предлагат и описват спецификите на процеса чрез механоматематично моделиране.

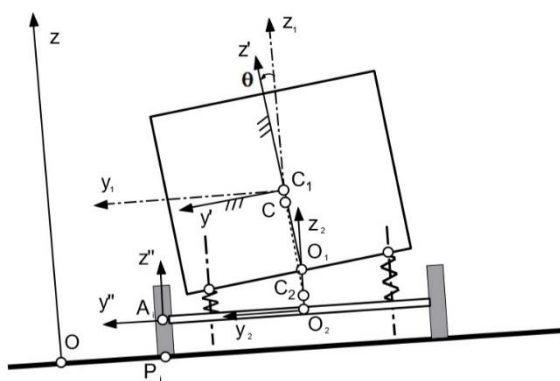
2.1. Движение на автомобил по равнина – пространствен модел

Тази част има изцяло реферативен характер и следва изложението на Глава 4, [8].

В [8] механичната система на автомобила се разглежда като система, съдържаща единадесет степени на свобода. За описанието им е въведена неподвижна координатна система „XYZ“, фиг. 2.1, с начало, лежащо на равнината на движение на автомобила. Равнината на двете ѝ оси (абсциса и ордината) съвпада с равнината на движение, като абсцисната ос е ориентирана успоредно на платното, а ординатната – перпендикулярна на нея.

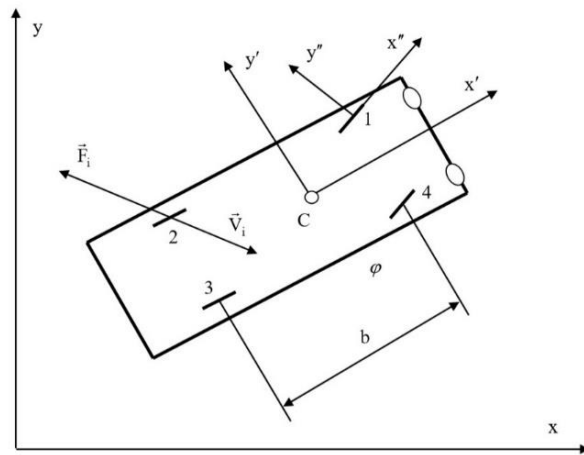


Фиг. 2.1. Схема на автомобил при движението му по равнина



Фиг. 2.2. Схема на движение на автомобил при изглед отзад

С „C“, фиг. 2.2, е означен масовият център на механичната система на автомобила, с „ C_1 “ – масовият център на подресорната маса, а с „ C_2 “ – на неподресорната. Координатната система $C_1x'y'z'$ е с начало масовия център на подресорната маса и е неизменно свързана с него. Оста x' е ориентирана успоредно на надлъжната ос на автомобила в посока напред, Ос y' е перпендикулярна на нея, а оста z' е ориентирана нагоре. Въведена е транслационно движеща се координатна система $C_1x_1y_1z_1$, чиито оси са успоредни на „XYZ“. В масовите центрове на всяко едно от колелата са въведени спомагателни координатни системи $C_ix''_iy''_iz''_i$, $i = \overline{1,4}$, фиг. 2.2 и фиг. 2.3. Осите x'' и y'' са успоредни на равнината на движение на автомобила, а осите x'' и z'' лежат в равнините на всяко от колелата. Координатната система $O_2x_2y_2z_2$, фиг. 2.2, е с начало, лежащо в равнината на собствените оси на въртене на колелата и е неизменно свързана с тях. Равнината $O_2x_2y_2$ е успоредна на равнината на движение на автомобила, а разположението на O_2 е определено, като проекция на масовия център C върху равнината $O_2x_2y_2$ в състояние на покой на автомобила. Ос x_2 е успоредна на надлъжната ос на автомобила, ос y_2 е успоредна на напречната, а ос z_2 е насочена нагоре. Междинните точки от собствените оси на въртене на колелата, дефинирани с A_i имат постоянни координати $x'_{2i}; y'_{2i}z'_{2i} = 0, i = \overline{1,4}$.



Фиг. 2.3. Схема на автомобил в проекция на равнината на движение

Приети са следните обобщени координати на механичната система на автомобила:

x_c, y_c, z_c – координати на масовия център на автомобила, спрямо неподвижната координатна система „XYZ“;

ψ, θ, φ – Ойлерови ъгли на подресорната маса;

$\gamma_i, i = \overline{1,4}$, – ъгли на завъртане на колелата около ротационните им оси;

θ_k – среден ъгъл на завъртане на управляемите колела около шенкелните оси.

2.2. Изследване на възможно решение на разглеждания модел

От предходната част на тази глава се знае, че движението на автомобил, загубил устойчивост, се описва от системата диференциални уравнения

$$(2.7) \quad m \cdot \ddot{x}_c = \sum_{i=1}^4 [F_{ix}] + m \cdot g \cdot \sin \alpha - w_x \cdot \sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2} \cdot \dot{x}_c,$$

$$(2.8) \quad m \cdot \ddot{y}_c = \sum_{i=1}^4 [F_{iy}] + m \cdot g \cdot \sin \beta - w_y \cdot \sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2} \cdot \dot{y}_c,$$

$$(2.9) \quad m \cdot \ddot{z}_c = \sum_{i=1}^4 N_i - \frac{m \cdot g}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + tg^2 \beta}},$$

$$(2.10) \quad [J_{c_1}] \cdot [\dot{\omega}] = [M_{c_\omega}] + [M_{c_{a1}}] + [M_{c_{a2}}] + [M_{c_\gamma}],$$

$$(2.11) \quad [I_\gamma] \cdot [\ddot{\gamma}] = [M_\gamma]; \quad M_{\gamma i} = F_{it} \cdot r_i + \sin(\dot{\gamma}_i) \cdot [M_{di} - f_i \cdot N_i - M_{si}],$$

$$(2.12) \quad I_\vartheta \cdot \ddot{\theta}_k = \sum_{j=1}^2 M_{kj};$$

Естеството на коефициентите и неизвестните в тези уравнения е описано в предходната част. Известно е, че всяка система от диференциални уравнения има безкрайно множество от решения. Решенията на системата (2.7) - (2.12) са векторни функции от вида

$$\mathbf{q}(t) = (x_c(t), y_c(t), z_c(t), \psi(t), \theta(t), \varphi(t), \gamma_1(t), \gamma_2(t), \gamma_3(t), \gamma_4(t)),$$

$q: [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^{10}$ чиито компоненти са дефинирани в интервала $[0, T]$, в който започва и приключва изследваното ПТП. Отделните решения се различават поне по една от функциите $x_c(t), y_c(t), z_c(t), \psi(t), \theta(t), \varphi(t)$ и $\gamma_i(t)$, $i = \overline{1, 4}$.

Важна характеристика на всяко ПТП са стойностите на компонентите в началния момент $t=0$ и/или в крайния момент $t=T$. Нека

$$(2.13) \quad q(0) = a,$$

$$(2.14) \quad q(T) = b,$$

където $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ са 10-мерни константни вектори, чиито компоненти са стойности на съответните неизвестни функции в $t = 0$ и $t = T$. Тъй като 0 и T са гранични

за интервала $[0, T]$, (2.13) и (2.14) се наричат гранични условия.

Компонентите на векторите a и b са различни за всяко отделно ПТП. Определят се въз основа на началните и крайните координати на автомобила или други обективни находки намерени при огледа на ПТП (следи от гуми, следи от течове, предмети и т.н.).

Системата (2.7)-(2.12) с добавените гранични условия (2.13) и (2.14) представлява гранична задача. Така дефинираната гранична задача е двуточкова, тъй като зададените стойности на неизвестните функции са в две точки – 0 и T .

Да се реши гранична задача, за система диференциални уравнения или за едно диференциално уравнение, означава от множеството решения да се отделят онези, които удовлетворяват граничните условия. Докато системата диференциални уравнения (без граничните условия) има безкрайно множество от решения, то гранична задача за същата система може да не е разрешима, да има единствено решение или повече решения.

Разглежданата тук задача (2.7)-(2.12), (2.13)-(2.14) има поне едно решение, тъй като описва вече случило се ПТП.

Многообразието на нелинейните гранични задачи е причина за липсата на обща теория за тяхното аналитично решаване. Всъщност значителната част от граничните задачи не могат да бъдат решени аналитично. Аналитични решения са предложени в Fazhan Geng-Minggen Cui [39] и Raad N. Butris-Suham Kh. Shammo [51]. Граничната задача, изследвана в [FG,MC], е от вида

$$\begin{aligned}x'' + a_1(t)x' + a_2(t)x + a_3(t)y'' + a_4(t)y' + a_5(t)y + N_1(x, y) &= f_1(t), \\x'' + b_1(t)x' + b_2(t)x + b_3(t)y'' + b_4(t)y' + b_5(t)y + N_2(x, y) &= f_2(t), t \in [0, 1],\end{aligned}\tag{2.16}$$

$$x(0) = x(1) = 0, y(0) = y(1) = 0,$$

където N_i и f_i , $i = \overline{1, 2}$, са нелинейни, а $a_i(t), b_i(t), i = \overline{1, 5}$, са непрекъснати функции. Решението е получено във вид на функционален ред при предположение, че е единствено. В [51] граничната задача е за системата

$$\begin{aligned}x' &= Ax + f(t, x, y, z), \\y' &= By + g(t, x, y, z), \\z' &= Cz + h(t, x, y, z)\end{aligned}$$

с интегрални гранични условия

$$\int_0^T x(t)dt = d_1, \int_0^T y(t)dt = d_2, \int_0^T z(t)dt = d_3,$$

където векторните функции $f(t, x, y, z)$, $g(t, x, y, z)$ и $h(t, x, y, z)$ са непрекъснати за $(t, x, y, z) \in \mathbb{R} \times D \times D_1 \times D_2$, $D \subset \mathbb{R}^n$, $D_1 \subset \mathbb{R}^m$, $D_2 \subset \mathbb{R}^k$, и периодични по t с период T , а A, B и C са неотрицателни квадратни матрици, а $d_1 \in D$, $d_2 \in D_1$ и $d_3 \in D_2$ са фиксирани вектори. Авторите предполагат, че съществуват константи $M_i, K_i, L_i, P_i, i = \overline{1,3}$, такива че за $t \in \mathbb{R}$, $x, x_1, x_2 \in D$, $y, y_1, y_2 \in D_1$ и $z, z_1, z_2 \in D_2$ са изпълнени условията за ограниченост

$$\|f(t, x, y, z)\| \leq M_1, \|g(t, x, y, z)\| \leq M_2 \text{ и } \|h(t, x, y, z)\| \leq M_3,$$

както и условията от вида

$$\|f(t, x_1, y_1, z_1) - f(t, x_2, y_2, z_2)\| \leq K_1\|x_1 - x_2\| + K_2\|y_1 - y_2\| + K_3\|z_1 - z_2\|,$$

$$\|g(t, x_1, y_1, z_1) - g(t, x_2, y_2, z_2)\| \leq L_1\|x_1 - x_2\| + L_2\|y_1 - y_2\| + L_3\|z_1 - z_2\|,$$

$$\|h(t, x_1, y_1, z_1) - h(t, x_2, y_2, z_2)\| \leq P_1\|x_1 - x_2\| + P_2\|y_1 - y_2\| + P_3\|z_1 - z_2\|;$$

за вектор $\vec{a}(a_1, \dots, a_l) \in \mathbb{R}^l$ нормата е $\|\vec{a}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^l a_i^2}$. За всяко произволно фиксирано (x_0, y_0, z_0) , принадлежащо на подходящо подмножество на $D \times D_1 \times D_2$, е предложено следното периодично решение с период T :

$$\begin{pmatrix} x(t, x_0, y_0, z_0) \\ y(t, x_0, y_0, z_0) \\ z(t, x_0, y_0, z_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 e^{At} + \int_0^t e^{A(t-s)} \left[f(t, x, y, z) - \frac{A}{e^{AT}-E} \int_0^T e^{A(T-s)} f(t, x, y, z) ds - \rho \right] ds \\ y_0 e^{Bt} + \int_0^t e^{B(t-s)} \left[g(t, x, y, z) - \frac{B}{e^{BT}-E} \int_0^T e^{B(T-s)} g(t, x, y, z) ds - \sigma \right] ds \\ z_0 e^{Ct} + \int_0^t e^{C(t-s)} \left[h(t, x, y, z) - \frac{C}{e^{CT}-E} \int_0^T e^{C(T-s)} h(t, x, y, z) ds - \varphi \right] ds \end{pmatrix},$$

$t \in [0, T]$, където

$$\rho = \frac{A^2}{e^{AT} - TAE - E} \left[\frac{x_0}{A} (e^{AT} - E) - d_1 + \int_0^T Lf(t, x, y, z) dt \right],$$

$\det A \neq 0, \det(e^{AT} - TAE - E) \neq 0$, за

$$Lf(t, x, y, z) = \int_0^T e^{A(t-s)} \left[f(s, x, y, z) - \frac{A}{e^{AT}-E} \int_0^T e^{A(T-s)} f(s, x, y, z) ds \right] ds;$$

σ и φ са подобни.

В значителна част от литературните източници, изследващи съществуването на решение на нелинейни гранични задачи за системи

диференциални уравнения, са предложени достатъчни условия, които гарантират разрешимост на разглежданата гранична задача без да предлагат аналитичен вид на решенията. Такива са например работите J.W. Bebernes-K. Schmitt [32], A. Granas-R.Guenter-J.Lee [40], I. T. Kiguradze [42], Н.И. Василев-Ю.А. Клоков [4], Y.H. Lee-X. Xu [45], Н.В. Thompson-C. Tisdell [56] и N.A. Asif-R.A. Khan [30].

В [32] е изследвана граничната задача

$$x'' = f(t, x, x'), t \in [0, 1],$$

$$x(0) = x(1), x'(0) = x'(1),$$

където $f: [0, 1] \times D \rightarrow \mathbb{R}^n, D \subset \mathbb{R}^{2n}$, е непрекъснатата. Тази задача се нарича периодична, защото зададените гранични условия гарантират периодичност на евентуалните решения; периодът е равен на дължината на интервала, в който се мени t , в случая той е 1. В една от доказаните теореми се предполага, че съществуват вектори $A, B, \varphi, \psi \in \mathbb{R}^n$ със свойствата $A < B$ и $\varphi < 0 < \psi$, такива че f е непрекъснатата в множеството $[0, 1] \times [A, B] \times [\varphi, \psi]$ и

$$f_i(t, x_1, \dots, x_{i-1}, A_i, x_{i+1}, \dots, x_n, x'_1, \dots, x'_{i-1}, 0, x'_{i+1}, \dots, x'_n) < 0 \\ < f_i(t, x_1, \dots, x_{i-1}, B_i, x_{i+1}, \dots, x_n, x'_1, \dots, x'_{i-1}, 0, x'_{i+1}, \dots, x'_n), i = \overline{1, n},$$

за всяко $A_j \leq x_j \leq B_j, j \neq i$, и всяко $x' \in \{y \in \mathbb{R}^n: y_i = 0, i = \overline{1, n}\}$,

$$f_i(t, x, x'_1, \dots, x'_{i-1}, \varphi_i, x'_{i+1}, \dots, x'_n) \text{ и } f_i(t, x, x'_1, \dots, x'_{i-1}, \psi_i, x'_{i+1}, \dots, x'_n)$$

не се анулират за всяко $(t, x, x'_j) \in [0, 1] \times [A, B] \times [\varphi_j, \psi_j], j \neq i, i = \overline{1, n}$. Теоремата гарантира поне едно периодично решение $x(t)$, такова че за $t \in [0, 1]$ е изпълнено $A \leq x(t) \leq B$ и $\varphi \leq x'(t) \leq \psi$.

Задачата на Дирихле

$$x'' = f(t, x, x'), t \in [0, 1],$$

$$x(0) = A, x(1) = B,$$

където функцията $f: [0, 1] \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ е непрекъснатата, е изследвана в [40]. Доказано е, че тя има поне едно решение, ако са изпълнени условията:

(I) Съществува константа $M \geq 0$, такава че

$$\langle x, f(t, x, p) \rangle \geq 0$$

за всяко $\|x\| > M$ и всички $x, p \in \mathbb{R}^n$, за които $\langle x, p \rangle = 0$; тук $\langle u, v \rangle = \sum_{k=1}^n u_k v_k$ е скаларното произведение на два вектора от $\mathbb{R}^n$.

(II) За всяко $i = \overline{1, n}$ съществуват функции $A_i(t, x, p_1, \dots, p_{i-1})$ и $B_i(t, x, p_1, \dots, p_{i-1})$, неотрицателни и ограничени за $(t, x, p_1, \dots, p_{i-1}) \in [0, 1] \times \{x \in \mathbb{R}^n: |x| \leq M\} \times \mathbb{R}^{i-1}$ и, такива че

$$|f_i(t, x, p)| \leq A_i(t, x, p_1, \dots, p_{i-1})p_{i-1}^2 + B_i(t, x, p_1, \dots, p_{i-1}).$$

Условията (I) и (II) обобщават условия, въведени от Бернщайн в началото на миналия век при изследване на разрешимостта на граничната задача на Дирихле за едно диференциално уравнение.

Сред задачите, изследвани в [42], е и многоточковата гранична задача

$$x'_i = f_i(t, x_1, \dots, x_n), t \in [a, b],$$

$$x_i(t_i) = \varphi_i(x_1, \dots, x_n), i = \overline{1, n},$$

където $-\infty < a < b < \infty$, $t_i \in [a, b]$, $\overline{1, n}$, функциите $f_i: [a, b] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $i = \overline{1, n}$, удовлетворяват условията на Каратеодори, а функционалите $\varphi_i: C([a, b], \mathbb{R}^n) \rightarrow \mathbb{R}$, $i = \overline{1, n}$, са непрекъснати. Доказано е, че тази гранична задача има решение, ако съществуват подходяща функция $q: [a, b] \rightarrow (0, \infty)$, матрична функция $\{p_{ik}(t)\}_{i,k=1}^n$, непрекъснат ненамаляващ оператор $(\varphi_{0i})_{i=1}^n: C([a, b], (0, \infty)^n) \rightarrow (0, \infty)^n$ и положително число γ , такива че

$$f_i(t, x_1, \dots, x_n) \text{sign}[(t - t_i)x_i] \leq \sum_{k=1}^n p_{ik}(t) |x_k(t)| + q(t), t \in [a, b], i = \overline{1, n},$$

и

$$|\varphi_i(x_1, \dots, x_n)| \leq \varphi_{0i}(|x_1|, \dots, |x_n|) + \gamma, i = \overline{1, n}.$$

В [4] е разгледана задачата

$$x'' = f(t, x, x'), t \in [a, b],$$

$$x(a) = Ax'(a) + C, x(b) = -Bx'(b) + D,$$

където $f: [a, b] \times \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ е непрекъснатата функция, A и B са положително определени $n \times n$ - матрици с реални коефициенти, а $C, D \in \mathbb{R}^n$. Едно от наложените условия върху f е: За произволна константа $M > 0$ съществуват число $p \geq 0$ и непрекъснатата положителна функция $\varphi(s)$, $s \in [0, \infty)$, такива че $\lim_{s \rightarrow \infty} \varphi(s) = 0$, $s^2 \varphi(s)$ е ненамаляваща функция и

$$|f(t, x, y)| \leq p(1 + |y|^2 \varphi(|y|)) \text{ за всяко } t \in [a, b], |x| \leq M \text{ и всяко } y \in \mathbb{R}^n.$$

Доказано е, че задачата има поне едно решение.

Граничната задача, изследвана в [45], е от вида

$$\begin{aligned} -\Phi(x')' &= \lambda h(t).f(x), t \in (0,1), \\ x(0) &= 0, x(1) = 0, \end{aligned}$$

където $\Phi(x') = (\varphi(x'_1), \dots, \varphi(x'_n))$, тук $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ е нечетен растящ хомеоморфизъм, $\lambda > 0$ е параметър, $h(t) = (h_1(t), \dots, h_n(t))$, тук функциите $h_i: (0,1) \rightarrow \mathbb{R}_+$, $\mathbb{R}_+ = [0, \infty)$, са непрекъснати и $h_i \neq 0, i = \overline{1, n}$, във всеки подинтервал на $(0,1)$, а $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$ е такава, че функциите $f_i: \mathbb{R}_+^n \rightarrow \mathbb{R}_+, i = \overline{1, n}$, са непрекъснати, $f_i(x) > 0, i = \overline{1, n}$, за всяко $x \in \mathbb{R}_+^n$, за което $\|x\| > 0$ и неравенството $f_i(x_1, \dots, x_n) \leq f_i(y_1, \dots, y_n)$ е изпълнено винаги, когато $x_i = y_i, x_i \leq y_i, i \neq j$. В зависимост от стойностите на параметъра λ , авторите предлагат допълнителни условия, при които тази задача има поне две положителни решения, има точно едно положително решение и няма такова.

Съществуване на решение на гранични задачи от вида

$$\begin{aligned} x'' &= f(t, x, x'), t \in [0,1], \\ G((x(0), x(1)), (x'(0), x'(1))) &= 0, \end{aligned}$$

гарантира резултат от [56]. Тук функцията $f: [0,1] \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, а $G(u, v)$ е такава, че функциите $u, v: \mathbb{R}^{2n} \times \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ са непрекъснати. Предположено е, че е изпълнено следното условие, вариант на класическото условие на Нагумо: Съществува положителна, ненамаляваща функция $\psi(s)$, такава че $\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s^2}{\psi(s)} = +\infty$ и

$$\|f(t, x, p)\| \leq \psi(\|p\|) \text{ за всяко } (t, x, p) \in [0,1] \times \bar{B}_R \times \mathbb{R}^n,$$

където $\bar{B}_R \subset \mathbb{R}^n$ е централно кълбо с радиус R .

Статията [30] разглежда четириточковата задача

$$\begin{aligned} -x'' &= f(t, x, y), \\ -y'' &= g(t, x, y), t \in (0,1), \\ x(0) &= 0, x(1) = \alpha y(\xi), \\ y(0) &= 0, y(1) = \beta x(\eta), \end{aligned}$$

където $f, g: (0,1) \times [0, \infty) \times [0, \infty) \rightarrow \times [0, \infty)$ са непрекъснати функции, сингулярни в $t=0$ и $t=1$, а параметрите α, β, ξ и η удовлетворяват условията $\xi, \eta \in (0,1)$ и $0 < \alpha\beta\xi\eta < 1$. Едно от условията, наложени от авторите, е:

$$\int_0^1 t(1-t) f(t, 1, 1) dt < +\infty \quad \text{и} \quad \int_0^1 t(1-t) f(t, 1, 1) dt < +\infty.$$

Полученият резултат подсигурява поне едно решение.

Известната литература предлага и числени методи за различни нелинейни гранични задачи. Ще посочим за резултати и литература P.P. See-Z.A.Majid-M. Suleiman [54], M.J. Rupa-M.S. Islam [53], T. A. Biala-S. N. Jator [33] и M. El-Gamel [37]. Граничните задачи в [54] са за системата

$$\begin{aligned} x'' &= f(t, x, x', y, y'), \\ y'' &= g(t, x, x', y, y'), t \in [a, b], \end{aligned}$$

с гранични условия на Дирихле

$$x(a) = A, y(a) = B, x(b) = C, y(b) = D$$

или на Нойман-Дирихле

$$x(a) = A, y(a) = B, x'(b) = C, y'(b) = D.$$

В [53] е предложено числено решение на задачи от вида

$$\begin{aligned} a_1(t)x'' + a_2(t)y'' + a_3(t)x' + a_4(t)y' + a_5(t)x + a_6(t)y + N_1(x, y) &= f_1(t), \\ b_1(t)x'' + b_2(t)y'' + b_3(t)x' + b_4(t)y' + b_5(t)x + b_6(t)y + N_2(x, y) &= f_2(t), \quad t \in [0, 1], \\ x(0) = x(1) = 0, y(0) = y(1) &= 0, \end{aligned}$$

където $N_i, i = \overline{1, 2}$, са нелинейни, а $a_i(t), b_i(t), i = \overline{1, 6}$, са непрекъснати функции. Числените методи, дадени в [37] и [33] третираят съответно задачи от вида (2.16) и

$$\begin{aligned} x'' &= f(t, x, x'), t \in [a, b], \\ x(a) &= A, x(b) = B, \end{aligned}$$

където функцията $f: [a, b] \times \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ е непрекъснатата.

Да се върнем на изследваната тук задача (2.7)-(2.12), (2.13)-(2.14) в опит да подберем подход за нейното решаване. Видът ѝ не позволява тя да бъде сведена до тип гранични задачи, за които разполагаме с теорема, гарантираща съществуване на решение. От друга страна търсенето на такава теорема не е съвсем смислено, тъй като тя би потвърдила разрешимостта на (2.7)-(2.12), (2.13)-(2.14) – факт, който, както отбелязахме вече, е известен предварително. Ясно е, че изследваната тук задача не позволява да бъде решена аналитично. Всъщност от изложеното по-горе става ясно, че броят на граничните задачи за

нелинейни системи, за които литературата разполага с подход за аналитично решаване, е твърде ограничен. Числените методи дават стойностите на решението в поредица от точки (наречени възли), принадлежащи на дефиниционния интервал на решението. Получените стойности не са съвсем точни, но обикновено са известни границите на натрупаната изчислителна грешка. Недостатък на числените методи е, че липсва информация за решението между възлите. Въвеждането на приближаваща функция, построена въз основа на получените стойности на решението, води до натрупване на грешката. Всичко това насочва към заключението, че за целите на автотехническата експертиза най-подходящ за решаването на граничната задача (2.7)-(2.12), (2.13)-(2.14) би бил софтуерен продукт визуализиращ нейното решение.

ТРЕТА ГЛАВА

ПОДХОД ЗА ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ПТП ЧРЕЗ 3D АНИМИРАНЕ

3.1. Предпоставки за визуализиране на процеса на възникване и протичане на ПТП чрез 3D анимация

Основна цел при идентификация на ПТП е възстановяването на фактологичната информация за процесите, протекли по време на инцидента. Основна задача от процеса на 3D анимиране на ПТП е графичното интерпретиране на паралелно събраната фактологична информация и информацията, получена в следствие на реализираните експертни дейности. От представените в литературния обзор информационни модели на ПТП са определени: пълният обем входни данни за идентифициране на ПТП и смисловото значение на получаваните резултати от изчислителни процедури.

При получаване на графична интерпретация в 3D среда, част от входните данни за решаване на задачите от механиката се използват съвместно с резултатите от решенията.

3.2. Типов параметричен сценарий за описание ПТП

Многообразието от видове ПТП бе разгледано в Глава 1. В дисертационния труд се предлага подход, отнасящ всеки вид ПТП към основна рамка, съдържаща взаимодействащите помежду си обекти. Възприема се тази рамка да се нарича *типов параметричен сценарий на ПТП*. Той определя съдържанието на модела за 3D визуализация и дефинира участващите в действието обекти. Всеки обект от модела за визуализация е представен в параметричен вид. Това позволява вариации на свойствата му и управление на извършваните от него движения.

Предвижда се вариациите в свойствата и характера на извършваните от обектите движения да се управляват чрез набори от предварително дефинирани входни параметри, кореспондиращи с част от данните от информационните модели на ПТП, [23].

При изграждане на конкретен типов сценарий на ПТП се допуска, че в него могат да участват произволен брой обекти, представени чрез техните 3D модели и съпътстващите ги набори от параметрични входове.

От гледна точка на функционалната си завършеност, предлаганият типов сценарий се разглежда като отворена система с набор от дефинирани параметрични входове и един изход, отразяващ крайния визуален резултат. Така, чрез краен набор от типови сценарии, е възможно представянето на неограничен брой вариации за възникване и протичане на ПТП.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ПАРАМЕТРИЧНО 3D МОДЕЛИРАНЕ НА МЕХАНИЧНАТА СИСТЕМА НА АВТОМОБИЛ С ЦЕЛ 3D АНИМИРАНЕ НА ДВИЖЕНИЯТА МУ

Съгласно приетите допускания от Глава 3 и анализа на механоматематичния модел в Глава 2, за визуализирането на движенията на механичната система е изграден симулационен параметричен 3D модел на автомобил. При изграждането му е използван модулен принцип и конструкцията е представена като съставна от два модула – *Автомобилно шаси* и *Каросерия*. Разделянето е направено на база целевото предназначение. Чрез модула *Автомобилно шаси* се управлява анимирането на микро и макро движенията на механичната система. Чрез модула *Каросерия* се придава визуален смисъл на формата.

Съгласно дефинициите за класовете 3D анимирани обекти [31, 50], модулет *Автомобилно шаси* е отнесен към класа на кинематичните системи с управляеми звена, стави и степени на свобода, а модулет *Каросерия* – към класа на подвижните деформируеми тела. От това произтичат и различията в подходите при моделирането им в средата на *Autodesk Maya*.

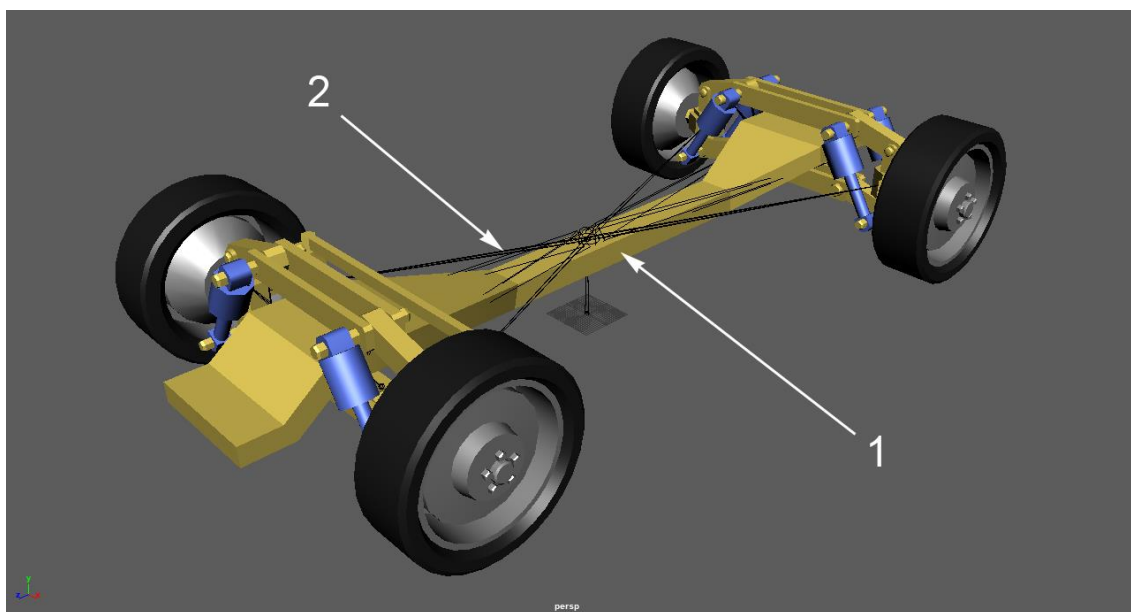
4.1. 3D моделиране и параметризация на модул *Автомобилно шаси*

3D моделът на модула *Автомобилно Шаси* е изграден на базата на окачване *Multi-Link*. Конструкцията е пресъздадена при въведено ниво на абстракция, като е спазен принципът на функциониране и кинематичните връзки между основните звена от механизма. Геометричните размери на звената са

параметризирани и са дефинирани размерните отношения между тях. Това прави 3D модела мащабируем при пресъздаване на двуосни МПС с различни габарити.

3D моделът на модула е представен като несвободна механична система, съставена от звена и стави. Тяхното положение в пространството е определено от наложени връзки и допуснати степени на свобода. Степените на свобода са представени чрез дефинираните в модела параметрични входове. Въз основа на дискретно подавани числови стойности към параметричните входове, моделът осигурява визуализация на дискретните положения на механичната система при нейното анимиране.

На фиг. 4.1 е представен общ изглед на изградения модул. Съгласно утвърдените подходи за 3D моделиране на обекти от този клас [31, 50], той е съставен от геометрични мрежи на телата, поз. 1, и контролируем скелет (*Rig*), поз. 2. Чрез контролируемия скелет са дефинирани звената и ставите на механичната му система и са определени връзките и степените на свобода при анимиране. За изграждане на *Rig* и функционалното му обвързване с телата от модела, са използвани информационни единици, подредени в йерархичен ред, следващ конкретиката на търсените механични взаимодействия.



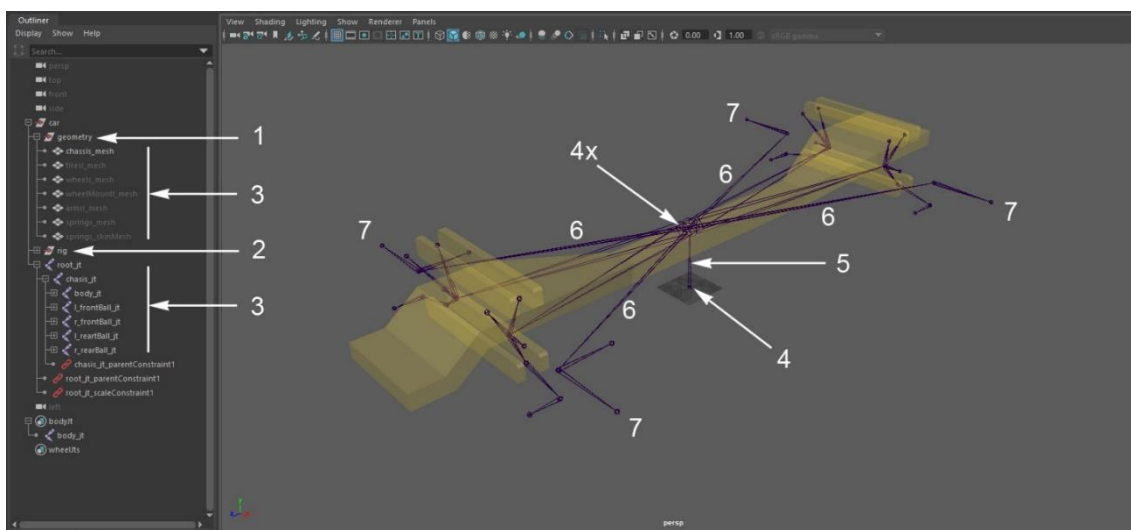
Фиг. 4.1. 3D модел на модул автомобилно шаси

За систематизиране на описанието на компонентите и механичните взаимодействия в структурата, модулът Автомобилно Шаси е разделен на подмодулите *Chassis*, *Wheels* и *Suspension*. Всеки подмодул реализира специфични функции в механичната система и взаимодейства с останалите. Процесът на моделиране на *Rig* условно е организиран в три етапа, дефиниращи размерни, логически и кинематични връзки в подмодулите и между тях. В

средата на *Autodesk Maya* структурата е организирана в директории. Те са подредени в йерархичен ред и съдържат диференцираните подмодули на модела.

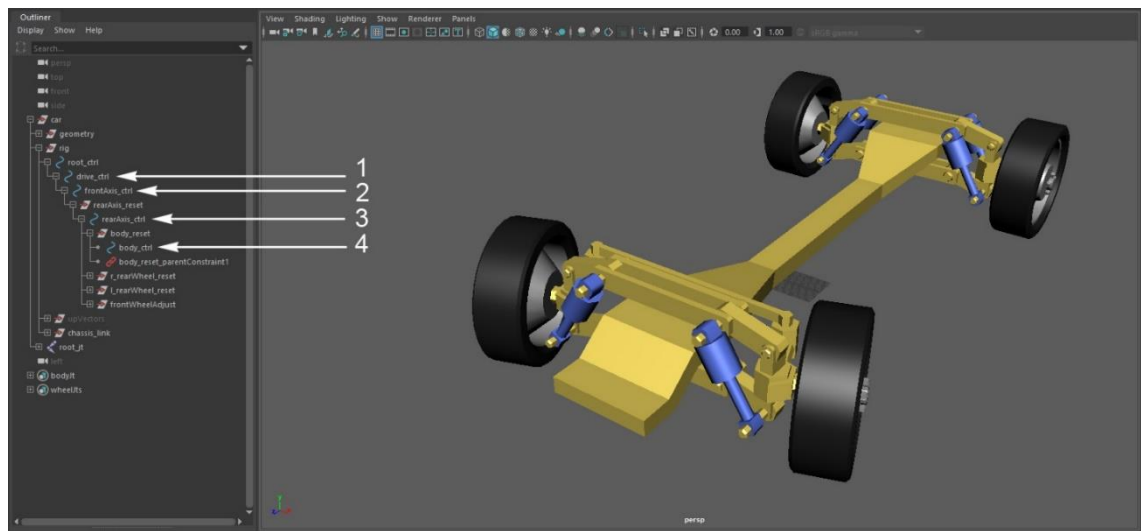
Най-високото йерархично ниво в структурата е пресъздадено от самия модел. Информационните единици на подмодулите са систематизирани в директории от следващо йерархично ниво. Всяка от тях съдържа поддиректории от по-ниско йерархично ниво, предназначени за Mesh- и Rig-обекти, фиг. 4.6, поз. 1 и поз. 2, в които е организирана конкретиката (тела, звена, стави и референтна геометрия) от информационното съдържание на всеки от подмодулите, поз. 3.

Фиг. 4.6 илюстрира етап от изграждането на *Rig* за подмодула *Chassis*, осигуряващ мащабиране на надлъжната база, напречната база и височината на окачването). Точката поз.4, от моделирания *Rig*, лежи в координатното начало на моделната област. Тя е еквивалентна на началото на неподвижната координатна система *OXYZ* от фиг. 2.1 и съдържа връзката *Root joint*.



Фиг. 4.6. Етап от изграждането на *Rig* за подмодула *Chassis*

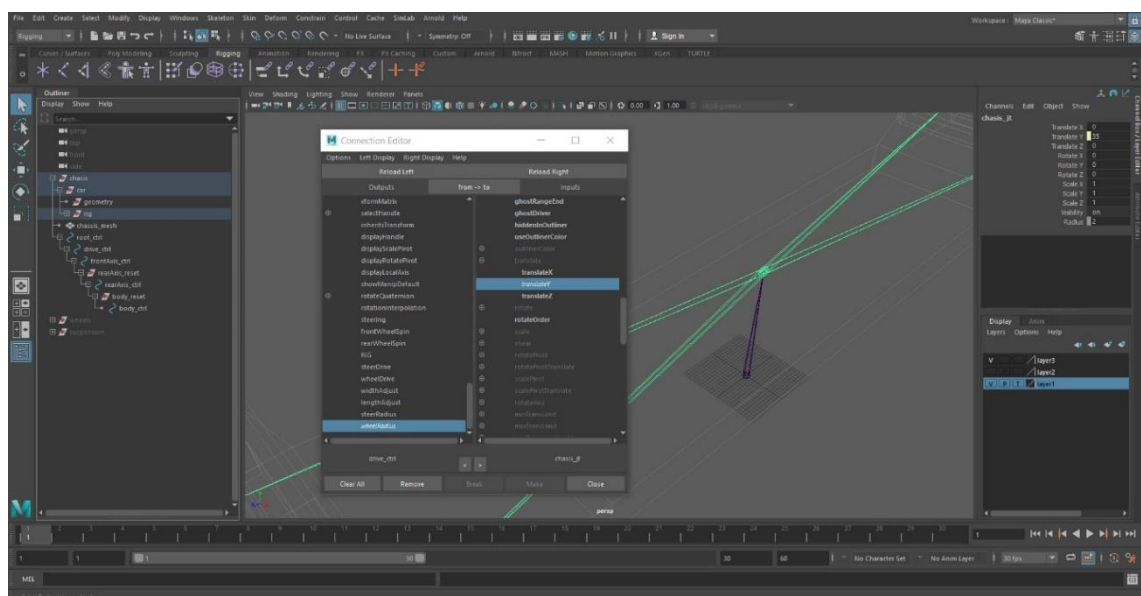
Точката от поз. 4x лежи в масовия център на подресорната маса, съдържа точката *Chassis Joint* и е еквивалентна на началото на координатната система $C_1x'y'z'$ от фиг. 2.1, фиг. 2.2 и фиг. 2.3. Звеното, определено от точките 4 и 4x, поз. 5, пресъздава височината на окачването. Размерът му е обвързан с параметъра *Radius* от подмодула *Wheels*, задаващ радиуса на колелата. Звената, поз. 6, са дефинирани чрез точката *Chassis Joint* и масовите центрове на колелата, поз. 7. Точките, поз. 7, са еквивалентни на C_i от описаните координатни системи $C_ix_i''y_i''z_i''$, $i = \overline{1,4}$, фиг. 2.2 и фиг.2.3. Чрез положението на точките 7 се дефинират параметрите *lengthAdjust* и *widthAdjust* (надлъжна и напречна база).



Фиг. 4.7. Йерархичен ред на референтните геометрични обекти

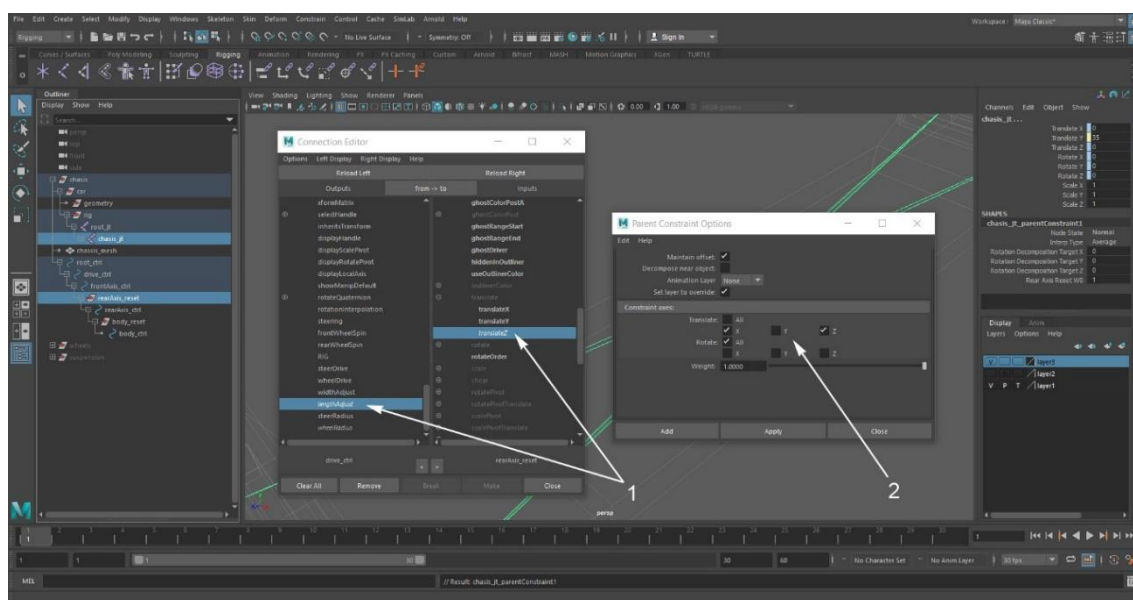
Фиг. 4.7 илюстрира йерархичния ред на компонентите от референтната геометрия, използвана за управление на движенията в модела. Най-високо ниво в него заема обектът *Drive Control*, поз. 1. Той е еквивалентен на ос x_2 от транслационно движеща се координатна система $O_2x_2y_2z_2$, фиг.2.2. Подчинен на *Drive Control* и следващ в йерархичния ред е обектът *frontAxis Control*, поз. 2. Той е еквивалентен на ос x_i'' от спомагателната координатна система $C_i x_i'' y_i'' z_i''$, $i = \overline{1,4}$, фиг. 2.2 и фиг. 2.3. Подчинени на *frontAxis Control* са *rearAxis Control*, поз. 3, и *body Control*, поз.4, като последният лежи в равнината $C_1 x' y'$ от координатната система $C_1 x' y' z'$, фиг. 2.1, фиг. 2.2 и фиг. 2.3.

Подреждането в йерархичен ред осигурява обща структурна обвързаност на обектите от референтната геометрия. При моделиране на описания до тук *Rigg*, е осигурено съответствие с дефинициите на механичната система в [8].



Фиг. 4.8. Параметризиране височината на окачването

Описание на геометричните и кинематичните връзки в модела е направено чрез съвместно използване на инструментите *Connection Editor*, *Node Editor* и *Expression Editor*. Фиг. 4.8 илюстрира обвързването на координата на точката *Chassis Joint* със стойността на параметъра *wheelRadius* в средата на *Connection Editor*. Съгласно дефиницията е зададено, моделът да интерпретира стойността на *wheelRadius* като *Y* координата на *Chassis Joint*. Това довежда до промяна във височината на общия *Rig* на подмодула *Chassis*, зависима от радиуса на колелата.

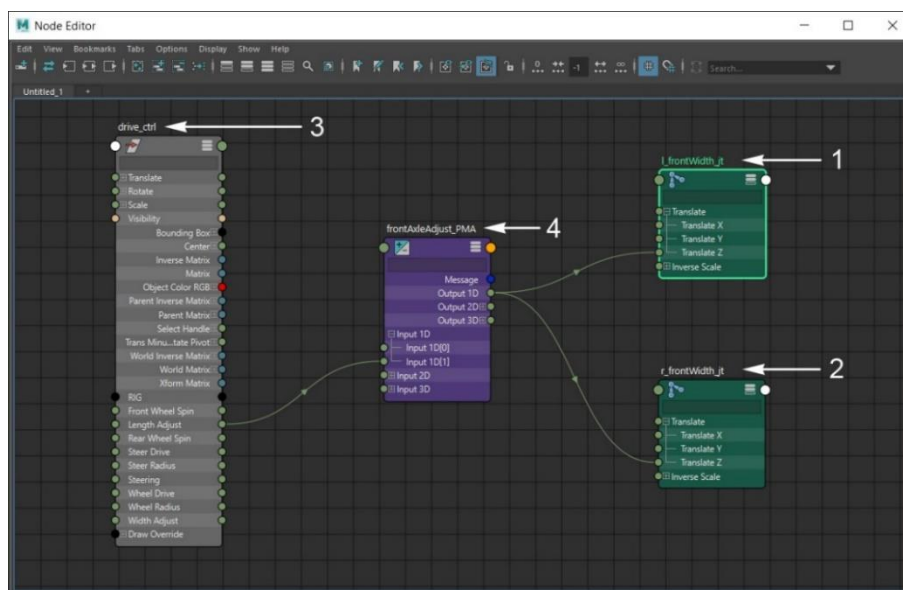


Фиг. 4.9. Параметризиране на обекти от надлъжната база и дефиниране на степените на свобода на задната ос

Фиг. 4.9 изобразява обвързването на параметъра *lengthAdjust*, определящ размера на надлъжната база и положението на геометричния обект *rearAxis_ctrl*, контролиращ задната ос на автомобилното шаси. Съгласно дефиницията, поз. 1, положението на *rearAxis_ctrl* е дефинирано по направление на ос *Z*, като зависимо от параметъра *lengthAdjust*. Чрез инструмента *Parent Constraint Options*, фиг. 4.9, поз. 2, са дефинирани възможните степени на свобода на геометричния обект *rearAxis_ctrl*, като са описани равнините на извършваните от него движения.

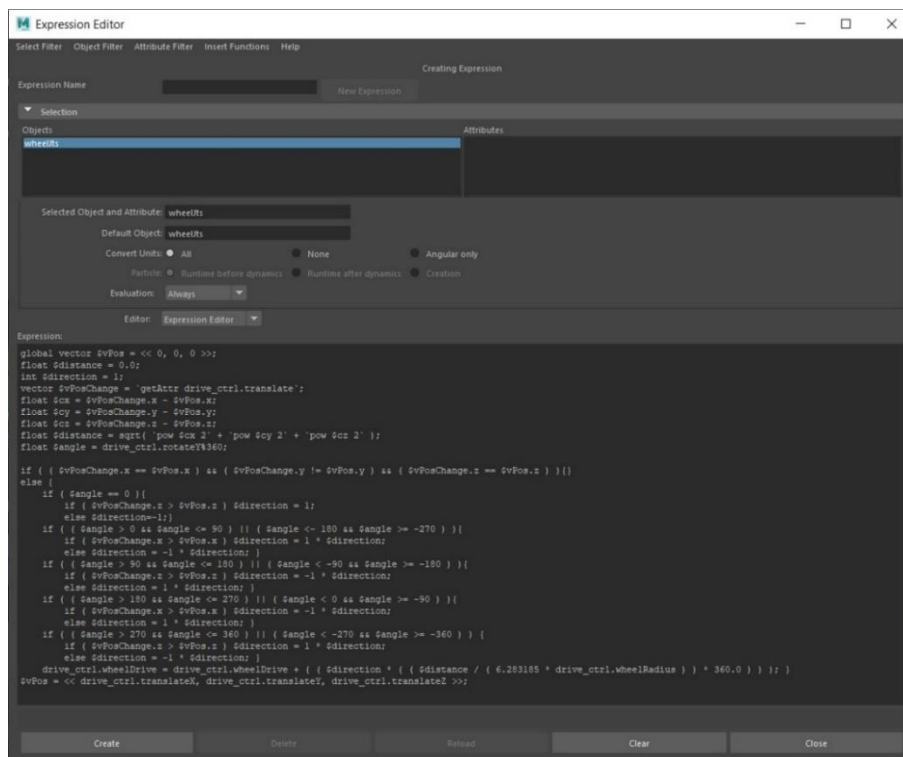
Обвързването на параметъра *lengthAdjust* с референтния елемент *frontAxis_ctrl*, е илюстрирано в графичната среда на инструмента *Node Editor*, фиг. 4.11. Елементът *frontAxis_ctrl* репрезентира предната управляема ос на автомобилното шаси чрез точките *l_frontWith_it* и *r_frontWith_it*, фиг. 4.11, поз. 1 и поз. 2. Съгласно логиката на взаимодействията в механичната система, положението на *frontAxis_ctrl* кореспондира с параметрите *lengthAdjust* и *drive_ctrl*. Чрез *drive_ctrl*, поз.3, се управлява посоката и направлението на движение на модула при анимиране. Според заложената йерархия, параметърът

lengthAdjust е дефиниран като подчинен на *drive_ctrl*. За обвързването на *frontAxis_ctrl* с *lengthAdjust* е използвана функцията, поз. 4, определяща координатите Z на точките *l_frontWith_it* и *r_frontWith_it* при мащабиране или движение на модела.



Фиг. 4.11. Свързване на параметъра *lengthAdjust* и референтния геометричен елемент *frontAxis_ctrl* в средата на Node Editor

На фиг. 4.12 е показан пример, дефиниращ пропорционална ротация на колелата при промяна на координатите на точка (масовия център на модула).



Фиг.4.12. Функционална логика в модела, касаеща ротацията на колелата

Използван е програмният език *MEL*, и инструментът *Expression Editor*.
Значението на записите от скрипта е както следва:

```
(4.1) global vector $vPos = << 0, 0, 0 >>,
(4.2) float $distance = 0.0,
(4.3) int $direction = 1,
(4.4) vector $vPosChange = `getattr drive_ctrl.translate`,
```

(4.1) определя началните условия на анимацията; (4.2) и (4.3) дефинират стойността и посоката на преместването на точка (масовия център) от модела; (4.4) дефинира положението на модела във всеки фрейм на анимацията. Текущите координати на точката се изчисляват чрез (4.5) – (4.9).

```
(4.5) float $cx = $vPosChange.x - $vPos.x;
(4.6) float $cy = $vPosChange.y - $vPos.y;
(4.7) float $cz = $vPosChange.z - $vPos.z;
(4.8) float $distance = sqrt(`pow $cx 2`+`pow $cy 2`+`pow $cz 2`);
(4.9) float $angle = drive_ctrl.rotateY%360;
```

(4.10) осигуряват посоката на ротация на колелата при различни равнинни движения на модела. Например, ако моделът извършва движение напред ($\$vPosChange.z > \$vPos.z$) и не завива ($\$angle == 0$), визуализираната ротация на колелата е обратна на часовниковата стрелка ($\$direction = 1$).

(4.10)

```
if ( ( $vPosChange.x == $vPos.x ) && ( $vPosChange.y != $vPos.y )
&& ( $vPosChange.z == $vPos.z ) ){
    else {
        if ( $angle == 0 ){
            if ( $vPosChange.z > $vPos.z ) $direction = 1;
            else $direction=-1;}
        if ( ( $angle > 0 && $angle <= 90 ) || ( $angle <- 180 &&
$angle >= -270 ) ){
            if ( $vPosChange.x > $vPos.x ) $direction = 1 * $direction;
            else $direction = -1 * $direction; }
        if ( ( $angle > 90 && $angle <= 180 ) || ( $angle < -90 &&
$angle >= -180 ) ){
            if ( $vPosChange.z > $vPos.z ) $direction = -1 *
$direction;
            else $direction = 1 * $direction; }
        if ( ( $angle > 180 && $angle <= 270 ) || ( $angle < 0 &&
$angle >= -90 ) ){
            if ( $vPosChange.x > $vPos.x ) $direction = -1 *
$direction;
```

```

        else $direction = 1 * $direction; }
    if ( ( $angle > 270 && $angle <= 360 ) || ( $angle < -270 &&
    $angle >= -360 ) ) {
        if ( $vPosChange.z > $vPos.z ) $direction = 1 * $direction;
        else $direction = -1 * $direction; }

```

(4.11) оразмерява пропорционалността на ротацията на колелата.

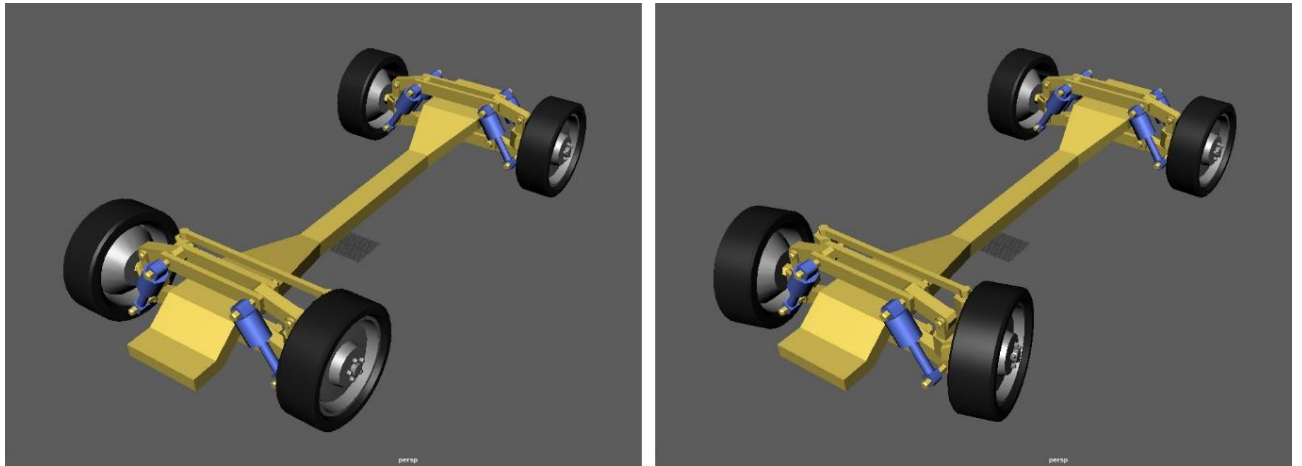
(4.11)

```

drive_ctrl.wheelDrive = drive_ctrl.wheelDrive + (($direction * ((
$distance / (6.283185 * drive_ctrl.wheelRadius)) * 360.0 ))); }

```

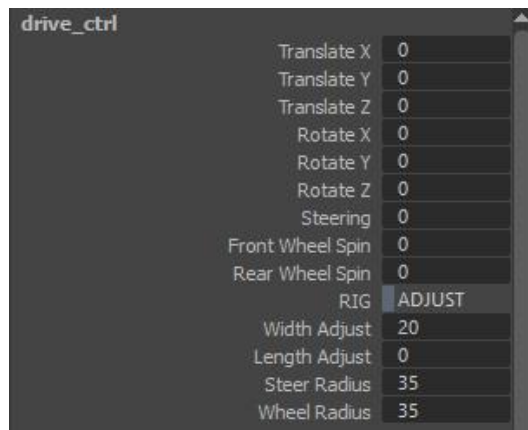
Описаните примери демонстрират част от функционалната логика, заложена в модела. Освен дадените в примерите кинематични структури, са моделирани и такива, които визуализират поведението на окачването и поведението на управляемите колела в състояние на завой. В резултат е получен 3D модел, чийто състояния са управляеми от набор входни параметри.



Фиг.4.13. Състояния на модела като следствие от входен параметър

Фиг. 4.13 илюстрира визуални състояния на модела в зависимост от вариация на входния параметър *Steering*, чийто смисъл кореспондира с θ_k от цитираните в Глава 2, дефиниции. Смисълът на останалите параметрични входове в модела, фиг. 4.14, е както следва:

- *Translate X, Translate Y, Translate Z* (x_c, y_c, z_c – координати на масовия център, спрямо неподвижната координатна система „XYZ“);
- *Rotate X, Rotate Y, Rotate Z* (ψ, θ, φ – Ойлерови ъгли на подресорната маса);
- *Steering* (θ_k – ъгъл на завъртане на управляемите колела около шенкелните оси);
- *Front Wheel Spin, Rear Wheel Spin* ($\gamma_i, i = \overline{1,4}$, – ъгли на завъртане на предните/задните колела около ротационните им оси).



Фиг. 4.14. Параметрични входове на модула *Автомобилно шаси*

Описаните до тук параметрични входове кореспондират напълно с цитираните в Глава 2, обобщени координати на механичната система на автомобил. По време на симулацията в средата на изградения 3D модел, те ще възприемат външни числови данни, подавани през дискретни времеви интервали. Така при дискретно променящи се стойности, 3D моделът ще реагира с поредица от дискретни, различаващи се помежду си образи, всеки от които изобразява единичен кадър от анимираната сцена.

Параметричните входове *Width Adjust*, *Length Adjust*, *Steer Radius* и *Wheel Radius* определят геометричните размери на 3D модела на *Автомобилното шаси*. Те използват еднократно задавани стойности в рамките на симулацията и кореспондират с част от входните данни в информационните модели на ПТП.

4.2. 3D Моделиране на модул *Каросерия*

Модулът *Каросерия* има за цел да придаде визуален смисъл на формата на автомобила. В описания тук пример, при изграждане на 3D модел на модула *Каросерия*, е използвана референтна форма на реален автомобил. Тя се характеризира като съставена от множество скулптурни повърхнини, свързани помежду си с ръбове, тангиращи закръгления и конструктивни делителни линии. От подходите, предлагани в [44], като най – ефективен се препоръчва 3D моделиране чрез *NURBS* и полигонален тип геометрия. Изграждането и трансформациите на геометрията в настоящия модел съдържат следните основни етапи:

- изграждане на контурен 3D модел, репрезентиращ граничните ръбове чрез сплайнова клетка от *NURBS* сплайни;
- моделиране на диференцирани *NURBS* повърхнини в затворените области на сплайновата клетка;

- трансформиране на *NURBS* повърхнините в полигонални;
- редактиране и обединение на диференцираната геометрия в режим на полигонална мрежа;
- повторна трансформация на модела в *NURBS* повърхнина.

Предложеното в дисертационния труд описание проследява характерните етапи от процеса на 3D моделиране. Маркирани са и някои типични проблеми, възникващи при този процес, и са предложени подходи за решаването им. За експериментите към дисертационния труд са изградени два варианта на този модул, базирани на реални модели превозни средства.

Изграждането на параметричен 3D модел на автомобил, участващ в симулационния модел на ПТП, използва структурно обединените модули *Автомобилно шаси* и *Каросерия*. Модулът *Каросерия* се използва като базов, а размерите на модула *Автомобилно шаси* се адаптират спрямо него преди сглобяването. По същество структурното обединение представлява процес на добавяне на геометрията от модула *Каросерия* към структурата на механичната система от модула *Автомобилно шаси*. Този процес задава неизменяеми връзки между телата на модула *Каросерия* и елемент от модула *Автомобилно шаси*, описан като *bodyControl*.

ПЕТА ГЛАВА

АНИМИРАНЕ ДВИЖЕНИЯТА НА АВТОМОБИЛ

В предходната глава бе създаден симулационен 3D модел на *Автомобилно шаси*. Моделът притежава параметрични входове, които управляват положенията на механичната му система. Цикличното подаване на данни към параметричните входове осигурява поредица от дискретни състояния на модела за получаване на анимиран образ.

При реализиране процеса на въвеждане на данни следва да бъдат решени следните задачи:

- да се определи логическия вид на данните, подавани към модела;
- да се разработи средство, осигуряващо алгоритъм за трансфер на данни към параметричните входове на модела;
- да се осигури синхронизация между времевите интервали на данните и анимирания образ.

В експерименталната работа тук, като източник на данни, е използван симулационен модел *Expertcar*, пакет *Avtom1-3D* (*Приложение 2*), [8]. Този

модел е разработен в средата на *Matlab Toolbox Simulink* и поддържа експорт на данни от симулацията във файлови формати *.txt, *.csv или *.xlsx. По същество тези данни съдържат числови стойности, отразяващи обобщените координати на механичната система на автомобил в дискретни времеви моменти.

Разработеният в средата на *Autodesk Maya* симулационен 3D модел, явяващ се приемник на данните, има специфична структура и специализирани параметрични входове. Инструментариумът на *Autodesk Maya* не предлага универсален алгоритъм за директно четене и трансфер на данните за този модел. Това налага разработване на средство, осигуряващо разпознаване, четене и трансфер по предназначение на информационните единици на данните от едната софтуерна среда към другата.

Известно е, че *Autodesk Maya* поддържа скриптове, написани на програмните езици *MEL* и *Python*, които позволяват управление на функциите от софтуерната ѝ среда [35, 36, 48, 55]. За определяне на диференцираните състояния на модела чрез данни от външен файл, разработеният скрипт трябва да осигури изпълнение на следния алгоритъм:

- отваряне и четене на файл, съдържащ данните;
- разграничаване на информационните единици във файла, ;
- буфериране;
- въвеждане на данните, по целево предназначение, в средата на симулационния 3D модел.

По-долу е разгледан принципът на работа и основните функции на скрипт, разработен чрез програмния език *Python* и осигуряващ описания алгоритъм. Скриптът осигурява разпознаване, четене и трансфер на данните, представени в *.csv файлов формат и разчита на конкретни синтактични особености на файла.

За конкретния csv файлов формат, вътрешното форматиране на данните използва първия ред от стрингове за етикиране на колоните. Всеки останал ред (под етикетите) съдържа стойности на обобщени координати на механичната система на автомобил. Тези стойности са валидни за момент от време, отразен в полетата от първата колона на файла. За нагледност, даденият тук пример илюстрира манипулирането на част от данните (*TranslateX*, *TranslateY*, *TranslateZ*).

Първата основна функция на скрипта

```
getCsvData ("Path/to/a/file.csv")
```

осигурява четене на данните от csv файл, дефиниран с конкретен път .

Файлът се чете ред по ред, като се използват разделителите (запетая), за да се диференцират полетата на отделните стойности. Тъй като първият ред съдържа заглавията на полетата, в речника на *Python* се създава обект, съдържащ всяко заглавие и списък за неговите стойности. Докато скриптът чете следващите редове, прочетените стойности се добавят към съответното заглавие в речника.

Функцията връща обект във формат

```
{'timestamp':[], ' TranslateX ':[], ' TranslateY ':[], ' TranslateZ '},
```

където 'timestamp' е времеви момент. Неговата стойност ще бъде използвана като ключ за достъп до стойностите на останалите данни в реда от списъка.

В csv файла стойностите на 'timestamp' са дефинирани в мерна единица време, а в средата на симулационния модел за 3D анимиране времето е изразено чрез кадровата честота на анимацията. Използвана е помощна функция, преобразуваща стойностите на 'timestamp' от мерна единица за време в съответстващ номер на фрейм, при конкретна кадровая честота.

След определяне на това съответствие, функцията осъществява достъп до данните на останалите полета от колоните „i“ и присвоява стойностите им към съответстващите заглавия.

```
def printCsvColumn(csvData, columnName)
    for i in range(len(csvData[columnName])):
        print csvData[columnName][i]
```

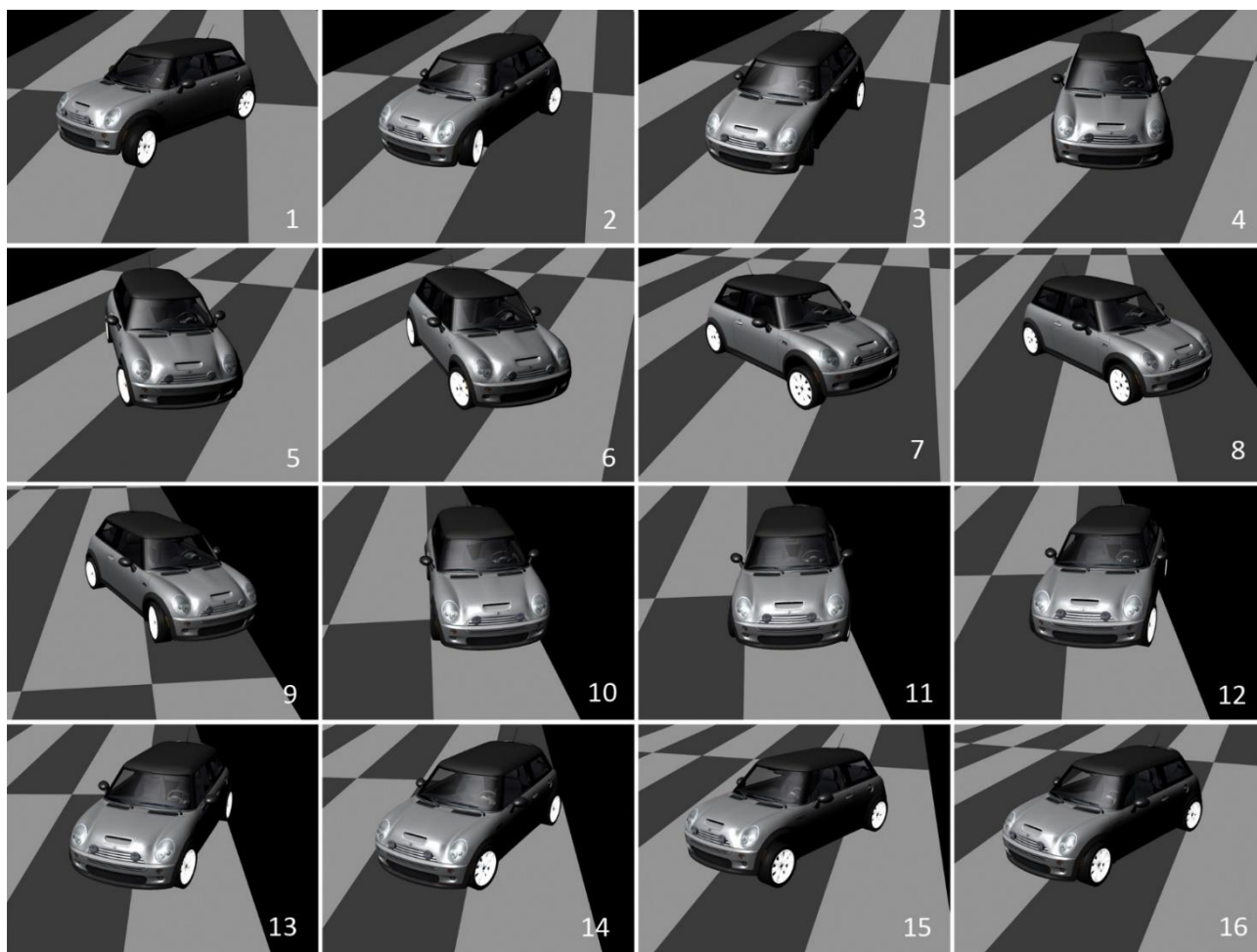
Всеки запис в речника представлява двойка ключ-стойност. 'timestamp' е ключът за достъп до ред от списъка със съдържание от стойности. Те касаят конкретен момент от време (конкретен кадър от анимацията).

Импортирането в средата на *Autodesk Maya* използва

```
import ecs_CsvToMaya as csv
csvData = csv.getCsvData("Path/to/the/File.csv")
csv.createCsvMotion(csvData).
```

Това създава локатори с атрибути за управление на цитираните в примера параметри ' TranslateX ', ' TranslateY ', ' TranslateZ ' за стойностите на обобщените координати на масовия център на автомобила.

На Фиг.5.5 са показани кадри от анимирането на ПТП, представляващо загуба на управление на автомобил. Разработеният симулационен 3D модел на автомобил може да се мултиплицира и да се визуализират по-сложни ПТП.



Фиг.5.5. Поре́дица дискретни кадри от ани́миране за́губа на управле́ние на автомоби́л

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Проучени са наши и чуждестранни литературни източници за наличие на подходящ математически апарат и е анализирана неговата приложимост за изследване на разрешимостта на механоматематичния модел [8], описващ ПТП за потребностите на автотехническата експертиза.
2. Разработен е подход за визуализиране на решенията на изследвания в дисертационния труд механоматематичен модел на движение на автомобил при загуба на устойчивост [8]. Въз основа на конкретни стойности на набор от параметри, разработеният подход предлага анимиране на ПТП.
3. Подходът е разработен като:
 - За автомобил, участващ в анимацията е създаден 3D модел, който позволява преоразмеряване на автомобила и управление на неговите движения.
 - Управлението на автомобила е постигнато като зависимо от данни, подаващи се на параметричните входове на 3D модела.
 - Параметричните входове са изградени съобразно обобщените координати на автомобила, получени от механоматематичния модел.
 - Предложено е средство за пренос на данни от решението на механоматематичния модел към параметричните входове на модела за 3D анимация.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Карапетков, Ст., П. Келеведжиев, М. Милев. Анимиране на пътнотранспортно произшествие чрез Autodesk Maya. XXVI I научно-техническа конференция с международно участие „Транспорт, екология – устойчиво развитие“, ТУ- Варна, 2021 (приета за печат).
2. Милев, М. 3D моделиране на механичната система на автомобил с Autodesk Maya. XXVI I научно-техническа конференция с международно участие „Транспорт, екология – устойчиво развитие“, ТУ- Варна, 2021 (приета за печат).
3. Милев, М. Визуализация на пътнотранспортно произшествие при експертен инженерен анализ. Известия на Съюза на учените – Сливен 2021, ISSN 1311 2864 (приета за печат).