

Д.В. Антуфьев, Ю.Б. Житков  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, antufev.d@compmechlab.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ

### Аннотация

Прогнозирование износа является важной задачей в машиностроении. Российское программное обеспечение для моделирования динамики твердых тел, такое как Универсальный механизм, включает контактные модели взаимодействия тел, однако не имеет модели для учета их износа. Целью работы является разработка способа расширения функциональности российского программного комплекса Универсальный механизм для моделирования износа. В работе использовались классическая модель сухого трения и модель износа Арчарда. Разработана библиотека в программном комплексе SimInTech, которая включает математическое описание контактного взаимодействия твердых тел с накоплением износа, которая может быть использована в программном комплексе Универсальный механизм.

*Ключевые слова:* износ, контактное взаимодействие, Универсальный механизм, SimInTech.

### Введение

Универсальный механизм (далее по тексту УМ) – программный комплекс для моделирования твердотельной динамики механических систем. Среди инструментария УМ присутствует специализированный модуль для решения задач износа железнодорожных колес, который невозможно применить для изучения износа других элементов конструкций.

Так как при разработке цифровых моделей, входящих в состав цифровых двойников, часто возникает необходимость учета износа различных деталей механизмов, то появляется потребность в разработке соответствующих моделей.

Целью работы является разработка компьютерной модели износа в месте контакта твердых тел с применением российского программного обеспечения Универсальный механизм и SimInTech.

Современные подходы к задаче расчета износа используют модель фундамента Винклера [1...3]. Также подобная задача рассматривается в работах [4...7]. В различных моделях износа широко используется метод конечных элементов [8, 9].

### Методы и материалы

Разработка модели контактного взаимодействия и износа происходила в SimInTech, после чего разработанную 1D-модель преобразовывали в динамическую библиотеку формата \*.dll, которая уже использовалась для решения задачи износа в программном комплексе Универсальный механизм.

Контактное взаимодействие двух тел описывалось с помощью математической модели, которая аналогична модели «точки-плоскость» [10, 11],

реализованной в Универсальном механизме. Это позволило провести верификацию разработанной модели, а также открыло возможность совместно применять штатные модели с внедряемыми.

Износ описывался с помощью модели Арчарда [12, 13]. Модель реализована таким образом, что изменение геометрии тела из-за износа происходит на каждом шаге интегрирования.

Общая расчетная схема контактной задачи двух тел с износом представлена на рисунке 1. В изнашиваемом теле рассматривается точка  $A$  контактирующей поверхности. Контактная поверхность второго тела представлена плоскостью с нормалью  $\mathbf{n}$ . В точке  $A$  рассчитываются нормальная сила, имеющая зависимость от глубины и скорости проникновения, и сила трения, имеющая зависимость от нормальной силы и скорости перемещения. Принято, что износ происходит по нормали плоскости контакта, скорость Штрибека [14] равна нулю, смазка поверхности и вязкое трение при скольжении не учитываются.

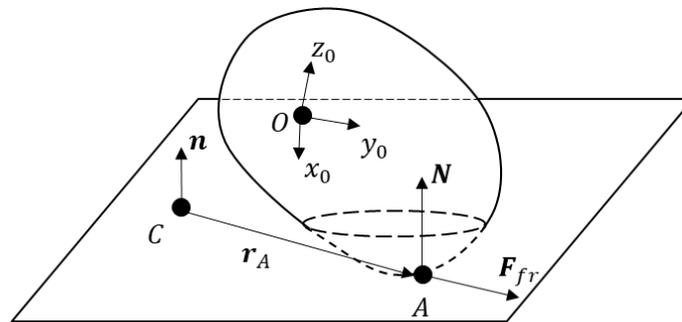


Рисунок 1 – Общая расчетная схема контактной задачи двух тел с износом

Место контакта представлялось в виде упруго-вязкого элемента, нормальная сила определялась по формуле:

$$N = \begin{cases} -(c(\Delta + w) + d\dot{\Delta})\mathbf{n}, & \text{если } \Delta + w < 0 \\ 0, & \text{если } \Delta + w \geq 0 \text{ или } -(c(\Delta + w) + d\dot{\Delta}) < 0' \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta = \mathbf{r}_A \cdot \mathbf{n}$  – проникновение точки первого тела во второе тело, м;

$c$  – коэффициент жесткости контакта, Н/м;

$d$  – коэффициент диссипации контакта, (Н·с)/м;

$w$  – величина износа в точке  $B$  по нормали к плоскости контакта, м.

Сила трения имеет два режима: режим сцепления и режим скольжения [15]. Сила трения в режиме скольжения рассчитывается по формуле (2).

Сила трения в режиме сцепления определялась по формуле:

$$\mathbf{F}_{fr} = \mathbf{F}_{сц0} - c(\mathbf{r}_{сц} - \mathbf{r}_{сц0}) - d\mathbf{v}_{ск}. \quad (2)$$

Сила трения в режиме скольжения определялась по формуле:

$$\mathbf{F}_{fr} = f|N| \frac{\mathbf{v}_{ск}}{|\mathbf{v}_{ск}|}, \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения;

$N$  – нормальная сила контакта, Н;

$\mathbf{v}_{ск}$  – скорость скольжения – проекция вектора скорости точки  $A$  относительно  $C$  на плоскость контакта, м/с.

Режим сцепления включается на шаге интегрирования, при котором скалярное произведение скорости скольжения на данном шаге интегрирования на скорость скольжения на прошлом шаге интегрирования  $\mathbf{v}_{ск}^{(k)} \cdot \mathbf{v}_{ск}^{(k-1)}$  отрицательно.

Режим скольжения включается, когда выполняется условие:

$$|F_{fr}| > f_0 |N|. \quad (4)$$

где  $f_0$  – коэффициент трения покоя.

Износ определялся с помощью модели Арчарда:

$$w(t) = k A_{fr}(t) = k \int_0^t v_{ск} \cdot F_{fr} dt, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент износа,  $\frac{м}{Дж}$ ;

$A_{fr}$  – суммарная работа сил трения, Дж.

Пример имплементации моделей контактного взаимодействия и износа в программном комплексе SimInTech изображен на рисунке 2.

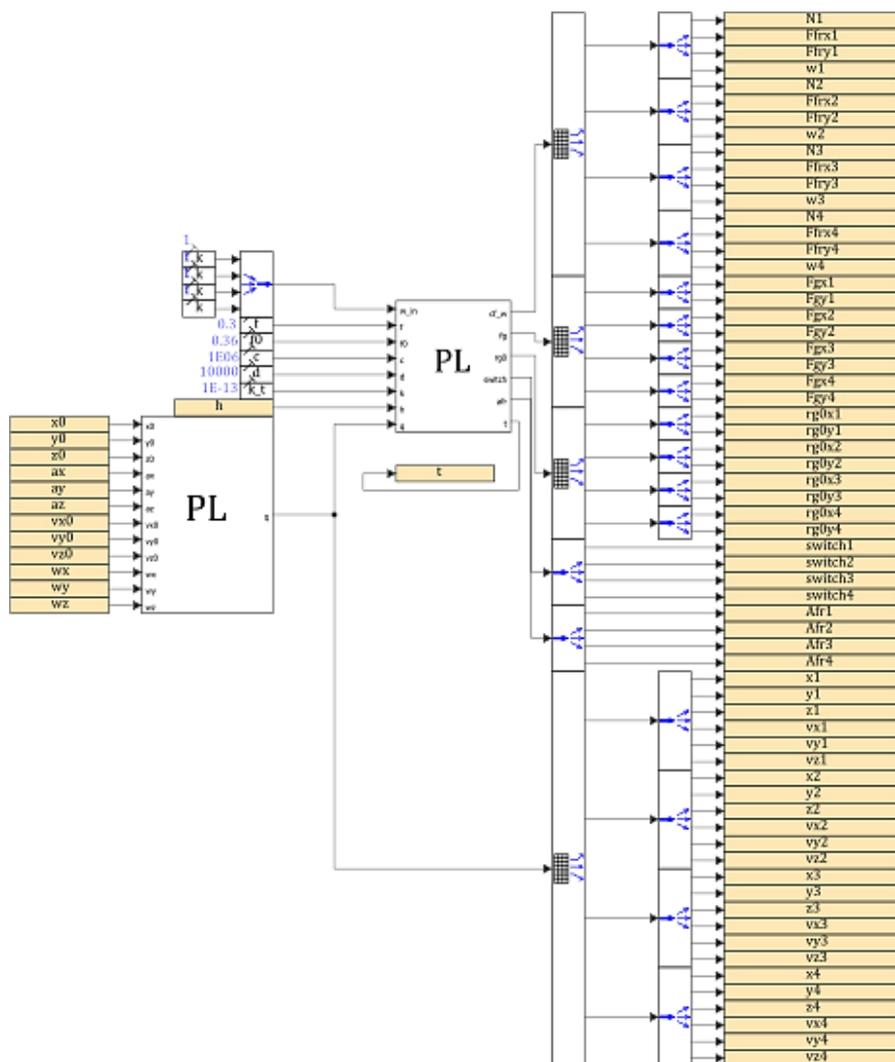


Рисунок 2 – Пример имплементации моделей контактного взаимодействия и износа в программном комплексе SimInTech

Разработанная схема преобразовывалась в динамическую библиотеку формата \*.dll и использовалась в модели динамики, разработанной в программном комплексе Универсальный механизм.

### Результаты и обсуждение

Разработанная модель контактных сил была верифицирована методом сравнения со штатными моделями контакта программного комплекса Универсальный механизм.

Для этого проведены виртуальные эксперименты:

- произвольное движение тела - бросание кубика;
- возвратно-поступательное движение тела.

Целью экспериментов было определение эквивалентности работы моделей. В каждом эксперименте происходило вычисление, запись и сравнение нормальных сил и сил трения.

Результаты верификации показали полное соответствие моделей контактных сил. В дальнейшем планируется проведение верификации модели износа методом сравнения со специализированными программными комплексами, а также совершенствование разработанной модели.

### **Заключение**

Представленная в данной работе модель износа может быть использована для моделирования контактного взаимодействия твердых тел в программном комплексе Универсальных механизмов. Модель является заделом для совершенствования инструментария, предназначенного для прогнозирования износа контактирующих тел в задачах динамики.

### **Благодарности**

Выполненная работа является заделом для подготовки мультидисциплинарных компьютерных моделей на цифровой платформе по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Научного центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение № 075-15-2022-311 от 20.04.2022).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Dillard, D. A. A review of Winkler's foundation and its profound influence on adhesion and soft matter applications / D. A. Dillard, B. Mukherjee, P. Karnal, R. C. Batra, J. Frechette // *Soft Matter*. - 2018. - V. 14. - № 19. - P. 3669-3683.
2. Pödra, P. Wear simulation with the Winkler surface model / P. Pödra, S. Andersson // *Wear*. - 1997. - V. 207. - № 1-2. - P. 79-85.
3. Garcin, S. Fretting Wear Modeling of 3D and 2D Hertzian Contacts with a Third-Body Layer Using a Winkler Elastic Foundation Model. / S. Garcin, S. Baydoun, P. Arnaud, and S. Fouvry // *Tribology International* - 2022. - V. 170.
4. Gallego, L. Multiscale computation of fretting wear at the blade/disk interface / L. Gallego, B. Fulleringer, S. Deyber, D. Nélias // *Tribology International*. - 2010. - V. 43. - № 4. - P. 708-718.
5. Gallego L. Comprehensive Method to Predict Wear and to Define the Optimum Geometry of Fretting Surfaces / L. Gallego, D. Nélias, C. A. Jacq // *Journal of Tribology*. - 2006. - V. 128. - № 3. - P. 476-485.
6. Kong Y. A computationally efficient method for the prediction of fretting wear in practical engineering applications / Y. Kong, C. J. Bennett, C. J. Hyde // *Tribology International*. - 2022. - V. 165.
7. Choi, K.Y. Modeling of Fretting Wear Based on Solution of Wear Contact Problem. / K.Y. Choi, S. S. Kim, I. A. Soldatenkov // *Tribology Letters* - 2010. - V. 37. - P. 69-74.
8. Garcin S. A FEM fretting map modeling: effect of surface wear on crack nucleation / S. Garcin, S. Fouvry, S. Heredia // *Wear* - 2015. - V. 330-331 - P. 145-159.
9. Arnaud P. A dynamical FEA fretting wear modeling taking into account the evolution of debris layer / P. Arnaud, S. Fouvry // *Wear*. - 2018 - V. 412-413 - P. 92-108.
10. Kraus P.R. Modeling of frictional contacts for dynamic simulation / P.R. Kraus, A.

Fredriksson, V.S. Kumar // Proc. of IROS 1997 Workshop on Dynamic Simulation: Methods and Applications - 1997.

11. Johnson, K. L. Contact Mechanics. / Cambridge University Press - 1985. - 452 p.

12. Archard, J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces // Journal of Applied Physics - 1953. – V. 24. - P. 981-988.

13. Archard, J. F., Hirst, W. P. The wear of metals under unlubricated conditions // Proceedings of the Royal Society of London - 1956 - V. 236 - № 1206 - P. 397-410.

14. Stribeck, R. Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager // Zeitschrift Des Vereines Deutcher Ingenieure, - 1902 - 86 p.

15. Bo, L. C. The friction-speed relation and its influence on the critical velocity of the stick–slip motion. / L. C. Bo, D. Pavelescu // Wear - 1982. - V. 82. - № 3. - P. 277–289.

D.V. Antufev<sup>1</sup>, Yu.B. Zhitkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, antufev.d@compmechlab.ru

## MODELLING RIGID BODY WEAR IN UNIVERSAL MECHANISM SOFTWARE COMPLEX

### Abstract

Wear forecasting is an important task in mechanical engineering. Russian software for modeling multibody dynamics, such as a Universal Mechanism, includes contact models of the interaction of bodies, but does not have a model for computing their wear. The aim of this work is to develop a way to expand the functionality of Russian software complex Universal mechanism for wear modeling. The classical dry friction model and the Archard wear model were used in the work. A library has been developed in the SimInTech software package, which includes a mathematical description of the contact interaction of solids with wear accumulation, which can be used in the Universal Mechanism software package.

*Keywords:* wear, contact interaction, Universal mechanism, SimInTech.

УДК 62-235

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-259

Д.Е. Ишимов<sup>1</sup>, Н.Н. Демидов<sup>1</sup>, Ли Сяньшунь<sup>3</sup>, Е.Б. Седакова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, daniil\_ishimov@mail.ru

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСМИССИИ С ИЗМЕНЯЕМЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ЧИСЛОМ В СОВРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ

### Аннотация

В работе рассмотрены основные схемы трансмиссий современных электромобилей, применяемые крупными автоконцернами. При серийном производстве электромобилей возникает необходимость увеличения эффективности всего транспортного средства в целом. В результате проделанной работы,