

Гончаров В. В.,  
Филимоных Г. Б.

## 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СОКОВЫЖИМАЛКИ С ШАРОВЫМ АВТОБАЛАНСИРОМ

В системе автоматического проектирования SolidWorks создана 3D модель центробежной соковыжималки с цилиндрическим ситом и шаровым автобалансиrom для его уравнивания на ходу. С использованием модуля Cosmos Motion проведена обработка, наладка и тестирование модели для исследования динамики машины.

**Ключевые слова:** центробежная соковыжималка, динамика, компьютерное моделирование, автобалансиr, дисбаланс, вибрации, уравнивание.

### 1. Введение

В процессе работы электрических центробежных соковыжималок (соковыжималок) с цилиндрическим фильтром-ситом (ситом) [1, 2], выпускаемых в соответствии с ДСТУ 3141-95 (ГОСТ 18199-95) и рассчитанных на непрерывную переработку большого количества сырья, отжатая масса (мезга) неравномерно распределяется по ситам, вследствие чего возникает значительный дисбаланс и появляются вибрации корпуса соковыжималки. Последнее приводит к снижению производительности соковыжималки и износу ее деталей. Поэтому целесообразно уравнивать сито на ходу, в процессе эксплуатации.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для уравнивания на ходу быстровращающихся роторов нашли применение пассивные автобалансиры (автобалансиры) [3, 4]. Корректирующие грузы в таких устройствах (шары, ролики, маятники и т. п.) со временем сами приходят в то положение, в котором уравнивают ротор и далее вращаются с ним как одно целое, пока не начнет меняться дисбаланс или не появятся возмущения иного происхождения [3–6]. Конструктивно самыми простыми из них являются шаровые автобалансиры.

В работе [7] предложена модернизация широко класса соковыжималок с цилиндрическим ситом, средней – СВСП и повышенной – СВПП производительности, отечественного и зарубежного производства. Модернизация состоит в замене серийной платформы, на которой устанавливается сито, платформой, совмещенной с шаровым автобалансиrom.

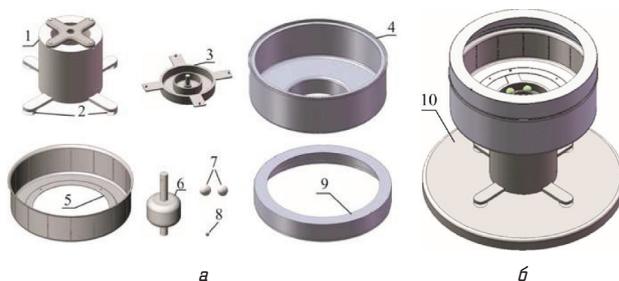
Создание натурального стенда соковыжималки с автобалансиrom и исследование на нем динамики машины (например, для нахождения оптимальных значений ее параметров) требует значительных временных и материальных затрат. Поэтому целесообразно провести исследование динамики соковыжималки с автобалансиrom 3D моделированием.

В данной работе для 3D моделирования используется система автоматического проектирования SolidWorks [8, 9] и ее модуль Cosmos Motion, реализующий метод конечных элементов для моделирования динамики меха-

нических систем. Для моделирования процесса автобалансировки используется методика, разработанная и реализованная в работе [10]. Она может рассматриваться как стандартная при решении подобных задач.

### 3. Создание 3D модели соковыжималки

**3.1. Создание 3D моделей деталей соковыжималки, объединение их в сборку.** 3D модель соковыжималки создается на примере машины отечественного производства СВПП-201. На рис. 1, а показаны созданные с помощью стандартных наборов инструментов Solid Works 3D модели основных деталей соковыжималки: корпус соковыжималки 1 на четырех опорах 2; корпус автобалансира 3; нижняя крышка 4; сито 5; ротор 6; шары автобалансира 7; шар, моделирующий дисбаланс, 8; верхняя крышка 9.



**Рис. 1.** Компьютерная 3D модель соковыжималки с автобалансиrom: а — 3D модели основных деталей соковыжималки и автобалансира; б — объединение деталей в сборку

При этом:

- высота корпуса 1, геометрические размеры опор 2, сита 5, ротора 6, нижней 4 и верхней 9 крышки совпадают с соответствующими размерами СВПП-201;
- плотность каждой из моделируемых деталей выбрана такой, что ее масса равна массе соответствующей детали оригинала;
- внешние размеры корпуса автобалансира 3 совпадают с размерами серийной платформы;
- радиус беговой дорожки шаров 7 в корпусе автобалансира 3 не меньше суммы диаметра вала и диаметра шара 7 и не больше диаметра сита 5;
- высота беговой дорожки шаров 7 не превышает расстояния между нижней гранью сита 5 и верхней гранью корпуса 1;

— диаметр шаров 7 не превышает высоты беговой дорожки.

Созданные детали собираются в сборку (рис. 1, б) с использованием инструментов сопряжения — «Совпадение», «Концентричность», «Расстояние», «Параллельность» для соответствующих окружностей, поверхностей, плоскостей, осей и точек. На столе 10 с помощью инструмента сопряжения «Совпадение», дважды примененном к окружностям, фиксируется начальное положение корпуса соковыжималки 1. В корпусе 1 соковыжималки с помощью инструмента сопряжения «Совпадение» (совпадение окружностей) фиксируется начальное положение ротора 6. С помощью инструмента сопряжения «Концентричность», дважды примененном для цилиндрических поверхностей, на корпусе соковыжималки 1 закреплена нижняя крышка 4 и на вал ротора 6 насажен корпус автобалансира 3. На корпус автобалансира 3 с помощью инструментов сопряжения «Концентричность» (для цилиндрических поверхностей) и «Совпадения» (для окружностей) закреплено сито 5. На внутренней боковой грани сита 5 с помощью инструмента сопряжения «Расстояние» (от точки до плоскости и от точки до оси) на определенном расстоянии от верхней кромки сита закреплен шар 8, моделирующий дисбаланс. В середину корпуса автобалансира 3 с помощью инструмента «Расстояние» (от точки до оси и от точки до плоскости) установлены шары автобалансира 7 таким образом, что они касаются боковой и верхней граней корпуса автобалансира 3. На нижней крышке 4 с помощью инструмента сопряжения «Совпадение» (для окружностей) и «Параллельность» (для цилиндрических поверхностей) закреплена верхняя крышка 9.

### 3.2. Обработка сборки модулем Cosmos Motion.

#### Наложение кинематических связей

**Неподвижные и подвижные детали.** Стол 10 принят как неподвижная деталь (Ground Part), корпус 1, ротор 6 и шары автобалансира 7 — подвижные (Moving Part).

**Фиксирование относительного положения деталей.** Нижнюю 4 и верхнюю 9 крышки жестко присоединяем (Attach To) к корпусу соковыжималки 1, а корпус автобалансира 3, сито 5 и дисбаланс 8 — к ротору 6.

Cosmos Motion автоматически интерпретирует связи между подвижными деталями и способ их относительного движения. Каждую связь необходимо или принять или установить другую.

**Движение ротора.** Оставляем связь типа петля (Revolute Joint) ротора 6 с корпусом 1, которая дает возможность свободно вращаться ротору вокруг его оси. Закон изменения угловой скорости вращения ротора моделируем трапецидальной функцией: на участке разбега (первые 2 с) скорость возрастает от 0 до крейсерской скорости 3000 об/мин; на участке крейсерского движения она постоянна; на участке выбега (последние 10 с) — убывает от 3000 об/мин до 0.

**Движение шаров.** Возможны различные подходы к моделированию движения шаров в корпусе автобалансира. Мы используем усовершенствованный подход работы [10], обеспечивающий высокую скорость расчетов и достаточно точное моделирование процесса автобалансировки. Оставляем связи, интерпретированные Cosmos Motion (расстояние от точки до оси и до плоскости), которые дают возможность двигаться шарам 7 внутри корпуса автобалансира 3 по беговой дорожке, касаясь ее боковой и верхней граней.

#### Добавление силовых взаимодействий между телами системы

**Моделирование опор.** Силовое воздействие каждой из четырех упруго-вязких опор 2 корпуса соковыжималки 1 моделируется с использованием инструмента «Втулка» («Bushing»). При этом предварительно удалены связи (совпадение окружностей) фиксирующие положение корпуса 1 относительно стола 10.

**Моделирование сил вязкого сопротивления, препятствующих относительному движению шаров.** Данные силы моделируются с помощью поступательных демпферов (Translational Damper) с линейными характеристиками, связывающих центры шаров с точками, неподвижными относительно корпуса автобалансира. Демпферы создаются инструментом «Демпфер» («Damper») модуля Cosmos Motion. При этом модуль суммарной силы, с которой демпферы действуют на шар, движущийся по беговой дорожке, должен быть инвариантным относительно его положения на дорожке.

Найдем силу, с которой действуют на шар  $n$  демпферов, если точки их крепления расположить вдоль траектории движения центра шара. Пусть радиус-вектор  $OC$ , задающий положение центра шара радиуса  $r$ , вращается вокруг точки  $O$  с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 2). При этом шар касается беговой дорожки по окружности радиуса  $R$ . Пусть центр шара соединен  $n$  одинаковыми поступательными демпферами (Translational Damper) с линейными характеристиками с расположенными на окружности радиуса  $R-r$  точками  $A_k, /k=1, n/$ . При этом  $A_i, A_j$  — соответственно одна из точек, расположенных левее и правее прямой  $CD$ . Коэффициент демпфирования демпферов равен  $b$ . Тогда проекция силы  $F$ , противодействующей относительному движению шара, на ось  $CX$  равна

$$F_x = \sum_{k=1}^n F_{xk} = -\sum_i F_i \cos(\alpha_i / 2) + \sum_j F_j \cos(\alpha_j / 2) = -\sum_{k=1}^n F_k |\cos(\alpha_k / 2)|,$$

где  $F_{xk}$  — проекция силы  $F_k$ , с которой  $k$ -й демпфер действует на шар, на ось  $CX$ ;  $F_k$  — модуль этой силы;  $\alpha_k = \angle A_k CX, /k=1, n/$  — угол, задающий положение точки  $A_k$  на траектории движения центра шара  $C$ .

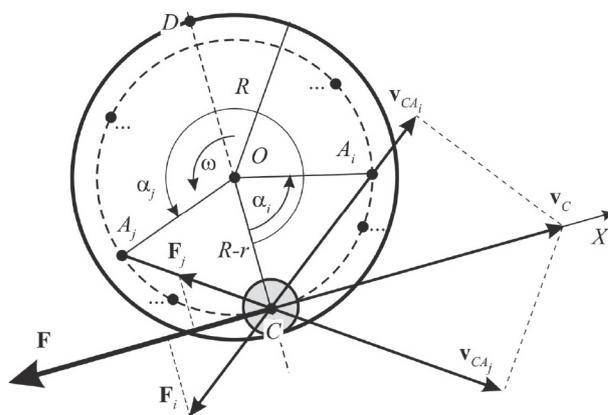


Рис. 2. Схема для нахождения результирующей силы, с которой демпферы действуют на шар

Модуль скорости движения центра шара относительно корпуса автобалансира равен  $v_C = \omega(R-r)$ . Модуль

скорости сжатия демпфера  $i$  или растяжения демпфера  $j$  равен  $v_{CA_k} = \omega(R-r)|\cos(\alpha_k/2)|$ ,  $/k=i, j/$ . Тогда  $F_k = b|v_{CA_k}| = b\omega(R-r)|\cos(\alpha_k/2)|$ ,  $/k=\overline{1, n}/$  и

$$F_x = -\sum_{k=1}^n b\omega(R-r)\cos^2(\alpha_k/2) = -1/2 \cdot b\omega(R-r) \left( n + \sum_{k=1}^n \cos \alpha_k \right). \quad (1)$$

При равномерном расположении точек крепления демпферов вдоль траектории движения центра шара имеем:

$$\alpha_k = \alpha_1 + 2\pi(k-1)/n, \quad /k=\overline{1, n}/, \\ \sum_{k=1}^n \cos \alpha_k = 0, \quad F = nb\omega(R-r)/2. \quad (2)$$

В последнем равенстве отсутствует угол  $\alpha_1$ , зависящий от текущего положения шара, и поэтому сила  $F$  не зависит от положения шара на беговой дорожке.

Таким образом, наиболее просто моделировать силу сопротивления  $F$  двумя демпферами, связывающими центр шара (точку  $C$ ) с двумя диаметрально противоположными точками на траектории движения точки  $C$ . При этом  $n=2$  и сила сопротивления принимает вид

$$F = b(R-r)\omega, \quad (3)$$

то есть коэффициент сил вязкого сопротивления относительно движению шаров (коэффициент вязкости) равен коэффициенту демпфирования инструмента «Демпфер» («Damper»). В дальнейшем будем использовать именно такое моделирование.

**Моделирование дисбаланса сита.** Дисбаланс сита смоделирован с помощью шара малого радиуса 8 (рис. 1, а), жестко закрепленного на боковой грани сита. При этом можно изменять как массу шара 8, так и его расстояние до верхней кромки сита.

#### 4. Выбор критериев качества работы автобалансира

Критериями качества работы автобалансира выданы:

- модуль остаточного виброускорения ( $m/c^2$ ) точки  $D$  на горизонтальной поверхности верхней крышки (рис. 1, б) в случае фиксированного дисбаланса;
- время ( $c$ ), в течение которого движение модели соковыжималки устанавливается — шары приходят в автобалансирующее положение и становятся неподвижными относительно сита;
- среднее интегральное (за время работы модели соковыжималки) модуль виброускорения ( $m/c^2$ ) точки  $D$  на горизонтальной поверхности верхней крышки в случае изменения дисбаланса в процессе работы модели соковыжималки.

Числовые значения критериев определяются: с графика модуля виброускорения; с графика угла между шарами в двухшаровом автобаланире; интегрированием по времени модуля виброускорения и т. д. Графики, табличные значения величин модуля виброускорения, углов между шарами и др. выдает Cosmos Motion при моделировании динамики соковыжималки.

## 5. Настройка и тестирование модели

### 5.1. Идентификация параметров модели и ее настройка.

Выбираем параметры инструмента «Втулка» («Bushing»):

- начальное напряжение опор (Force) вертикальное и оно уравнивает силу тяжести модели соковыжималки;
- силы упругого и вязкого сопротивления имеют поступательные свойства (Translational Properties) и изотропны (Isotropic);
- значение линейного коэффициента упругости (Stiffness) принято равным жесткости одной опоры натурной соковыжималки, найденной экспериментальным путем по «проседанию» корпуса от тестовой вертикальной нагрузки;
- значение коэффициента вязкости (Damping) такое, что при тестовом отклонении корпуса от положения равновесия его колебания затухают за минимальное время (находится методом последовательных проб).

Величину коэффициента вязкости (Damping) инструмента «Демпфер» («Damper») для шаров подбирается такой, что в вертикально расположенном корпусе автобалансира шар при тестовом отклонении от положения равновесия возвращается в него за минимальное время (находится методом последовательных проб).

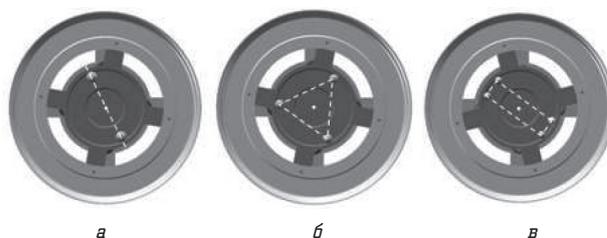
Выбираем параметры моделирования («Options»):

- в меню «World» устанавливаем направление действия силы тяжести (Direction) — параллельно оси вала ротора от ротора к столу;
- в меню «Simulation» задаем общее время процесса моделирования (Duration)  $T$  и количество кадров (шагов моделирования) (Number of Frames)  $K = T \cdot N$ , где  $N = 50$  — частота вращения ротора на крейсерской скорости (такое соотношение между количеством кадров и частотой вращения ротора моделирует стробоскопический эффект, используемый для изучения относительного движения шаров [10]).

**5.2. Тестирование модели.** Проверяем работоспособность модели соковыжималки на простых тестах, качественные результаты которых известны.

**Тест 1. При отсутствии дисбаланса.** В этом случае автобалансировка должна всегда наступать и шары в автобаланире должны расположиться таким образом, чтобы не создавать дисбаланс — два шара должны занять диаметрально противоположные положения, три — образовать правильный треугольник, а четыре — прямоугольник.

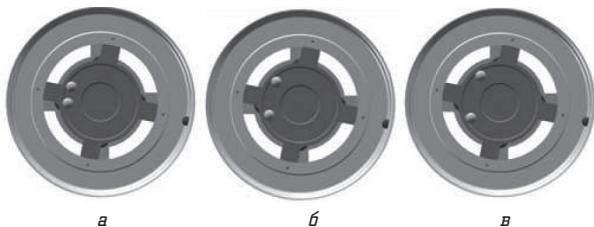
Результаты тестирования для разного количества шаров показаны на рис. 3.



**Рис. 3.** Автобалансирующие положения шаров при отсутствии дисбаланса и разном количестве шаров в автобаланире: а — два шара в автобаланире; б — три шара в автобаланире; в — четыре шара в автобаланире

**Тест 2. При наличии дисбаланса.** Тест проводится при двух шарах в автобаланси́ре. При увеличении массы дисбаланса должна увеличиваться баланси́ровочная емкость, используемая автобаланси́ром для его уравновешивания и поэтому шары в автобаланси́ре должны сближаться, выстраиваясь напротив дисбаланса.

На рис. 4 показаны положения двух шаров (4,2 гр) при насту́плении автобаланси́ровки в зависимости от массы  $m_s$  дисбаланса (темный шар) —  $m_s=2,5$  гр (рис. 4, а);  $m_s=3,0$  гр (рис. 4, б);  $m_s=3,5$  гр (рис. 4, в).



**Рис. 4.** Автобалансирующие положения шаров в двухшаровом автобаланси́ре в зависимости от массы  $m_s$  дисбаланса: а —  $m_s = 2,5$  гр; б —  $m_s = 3,0$  гр; в —  $m_s = 3,5$  гр

Следует отметить, что примененный подход к моделированию процесса автобаланси́ровки обеспечил большую скорость расчетов, позволяющую проводить за короткий промежуток времени большое число виртуальных экспериментов. При этом созданная модель достаточно точно моделирует процесс автобаланси́ровки — процессы разгона и выбега ротора и шаров, приход шаров в автобаланси́ровочное положение, реакцию шаров на дисбаланс и т. д.

## 6. Выводы

1. Использованная методика 3D моделирования динамики центробежной соковыжималки с автобаланси́ром обеспечивает высокую скорость расчетов и может рассматриваться как стандартная при моделировании процесса автобаланси́ровки в различных роторных системах.

2. Созданная 3D модель центробежной соковыжималки с автобаланси́ром работоспособна и ее основные параметры соответствуют модернизированной соковыжималке отечественного производства СВПП-201.

3. С помощью созданной 3D модели можно проводить полнофакторные и многофакторные эксперименты, в частности — 2-х и 3-х уровневые, для поиска оптимальных значений параметров 3D модели и модернизированной соковыжималки.

## Литература

1. Летаев, Д. А. Бытовые электроприборы для кухни [Текст] : справ. пособие / Д. А. Летаев. — Москва: Легпромбытиздат, 1992. — 96 с.
2. Партала, О. Н. Справочник по ремонту бытовых электроприборов [Текст] / О. Н. Партала. — СПб: Наука и техника, 2010. — 400 с.
3. Гусаров, А. А. Автобалансирующие устройства прямого действия [Текст] / А. А. Гусаров. — М.: Наука, 2002. — 119 с.
4. Філімоніхін, Г. Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобаланси́рами з твердими коригувальними вантажами [Текст] / Г. Б. Філімоніхін. — Кіровоград: КНТУ, 2004. — 352 с.
5. Нестеренко, В. П. Автоматическая баланси́ровка роторов приборов и машин со многими степенями свободы [Текст] / В. П. Нестеренко. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. — 84 с.

6. Rodrigues, D. J. Automatic two-plane balancing for rigid rotors [Text] / D. J. Rodrigues, A. R. Champneys, M. I. Friswell, R. E. Wilson // International Journal of Non-Linear Mechanics. — Vol. 43, Issue 6. — July, 2008. — P. 527–541.
7. Електрична центрифужна напівавтоматична соковыжималка [Текст] : Патент 77192 України, МПК G01M 1/32 / Філімоніхін Г. Б., Гончаров В. В.; власник патенту Кіровоградський нац. техн. університет. — № u201203340; заявл. 20.03.2012; опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3. — 4 с.
8. Алямовский, А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks [Текст] / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 784 с.
9. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with COSMOSMotion 2007 [Text] / Kuang-Hua Chang. — Publisher: Schroff Development Corporation, July 14, 2008. — Paperback, 142 p. — ISBN-10: 1585034827.
10. Коваленко, О. В. Числове моделювання процесу зрівноваження кульовими автобаланси́рами дисків ручних шліфувальних машин [Текст] / О. В. Коваленко, Г. Б. Філімоніхін // Вісник гірничого університету. — 2009. — № 10. — С. 72–77.

## 3D МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВІДЦЕНТРОВОЇ СОКОВИЖИМАЛКИ З КУЛЬОВИМ АВТОБАЛАНСИ́РОМ

У системі автоматичного проектування SolidWorks створено 3D модель відцентрової соковыжималки з циліндричним ситом і кульовим автобаланси́ром для його зрівноваження на ходу. З використанням модуля Cosmos Motion проведено обробку, налагодження і тестування моделі для дослідження динаміки машини.

**Ключові слова:** відцентрова соковыжималка, динаміка, комп'ютерне моделювання, автобаланси́р, дисбаланс, вібрації, зрівноваження.

*Гончаров Валерій Володимирович, кандидат фізико-математических наук, доцент, кафедра вищої математики, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: matkora@yandex.ru.*

*Філімоніхін Геннадій Борисович, доктор технічних наук, професор, кафедра деталей машин та прикладної механіки, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: filimonikhin@narod.ru, fgb@online.ua.*

*Гончаров Валерій Володимирович, кандидат фізико-математических наук, доцент, Кафедра вищої математики, Кіровоградський національний технічний університет, Україна.*

*Філімоніхін Геннадій Борисович, доктор технічних наук, професор, кафедра деталей машин та прикладної механіки, Кіровоградський національний технічний університет, Україна.*

*Goncharov Valery, Kirovograd National Technical University, Ukraine, e-mail: matkora@yandex.ru.*

*Filimonikhin Gennadiy, Kirovograd National Technical University, Ukraine, e-mail: filimonikhin@narod.ru, fgb@online.ua*