

## **Разработка структуры инструментальных средств анализа динамики механических систем класса зубчатых передач**

**П. В. Дяченко**

Задачи моделирования динамики зубчатых передач подробно рассматривались в работах [1-7]. Предлагаемые авторами соответствующие математические модели динамики кинематических пар в большинстве случаев представляют собой системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка относительно обобщенных координат. Такие модели учитывают, как правило, радиальные и продольно-поперечные колебания зубчатых колес с учетом влияния на них конструктивных, геометрических, инерционно-упругих, демпфирующих и динамических параметров реальной механической системы. Компьютерная реализация рассмотренных математических моделей в большинстве случаев сводится к применению известных численных методов решения систем дифференциальных уравнений [15], во временной либо частотной областях, без разработки и применения специализированных инструментальных средств.

В настоящей работе предлагается созданный автором программный комплекс *"DYNAMIKA"*, предназначенный для анализа динамических свойств исследуемой механической системы, на основе разработанного ранее комплекса математических моделей. Целью разработки комплекса является моделирование работы одноступенчатой эвольвентной косозубой зубчатой передачи в различных эксплуатационных режимах, в условиях изменения характеристик внутренней и внешней динамики. Программный комплекс *"DYNAMIKA"* рассчитан на работу в диалоговом режиме и ориентирован на проведение компьютерных экспериментов по реализации комплекса математических моделей динамики зубчатой передачи. В структуре программного комплекса предусмотрено выполнение трех основных функций – введение исходных данных, расчета и вывода результатов. Комплекс имеет модульную структуру, состоит из набора подпрограмм и требует от пользователя минимальных навыков программирования. Тем не менее,

пользователь должен четко представлять себе предметную область работы программного комплекса, и применяемые в нем методы моделирования. Реализация комплекса осуществляется средствами Borland Delphi на основе объектно-ориентированного языка Object Pascal. Некоторые отдельные задачи были разработаны в средах MathCad и Matlab [11-14].

Структурно, программный комплекс состоит из двух частей. Первая часть является управляющей, и содержит программные модули, выполняющие функции управления вычислительным процессом и возможностями тела программного комплекса. Вторая часть – предметная, и называется телом программного комплекса. Тело программного комплекса, в свою очередь разделено на три уровня. Верхний уровень содержит прикладные программы и открыт для пользователя. Это значит, что при необходимости можно наращивать количество прикладных программ без изменения структуры программного комплекса. Средний уровень содержит программные модули, реализующие созданные модели, с возможностью выбора любой из них. Нижний уровень содержит программные модули обрабатывающие информацию, и рассчитаны соответственно только на реализацию прикладных программ в представленном классе задач. Общая структура программного комплекса ”DYNAMIKA” показана на рис. 1.

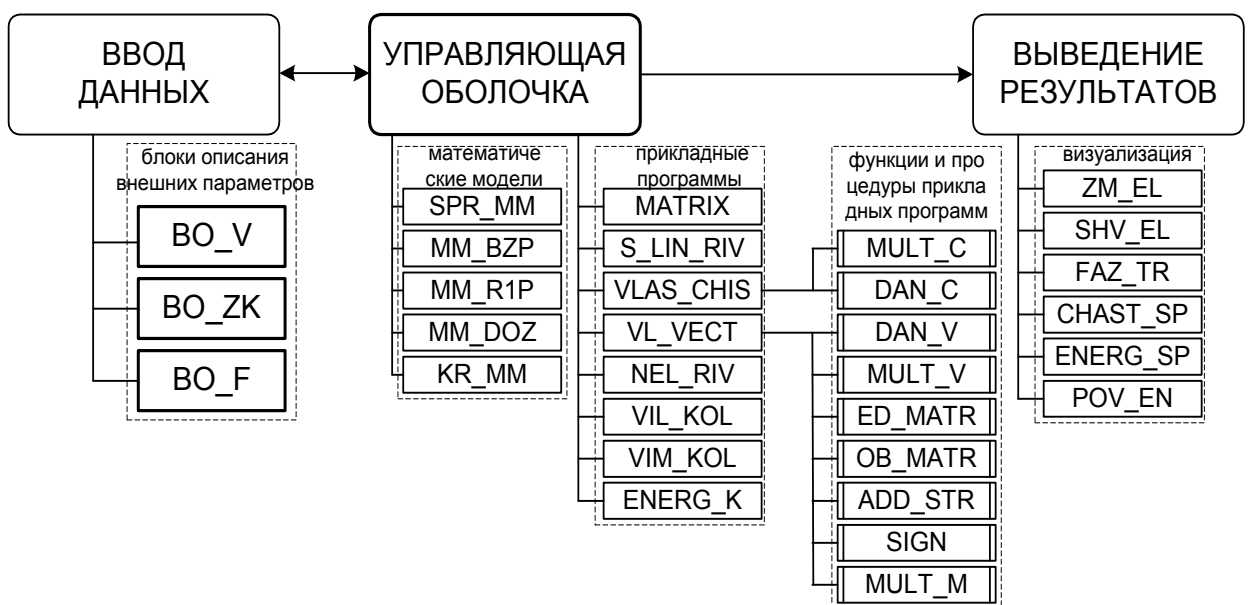


Рис. 1. Общая структура программного комплекса ”DYNAMIKA”

Управляющая часть программного комплекса состоит из управляющей оболочки, блоков ввода данных и вывода результатов. Блок ввода используется для работы с необходимым количеством данных, обеспечивает ввод числовых параметров модели и описание внешних функций воздействия. Управляющая часть обеспечивает доступ к необходимым процедурам и подпрограммам вычисления, а блок вывода результата обеспечивает возможность документирования результатов, полученных в результате компьютерного эксперимента, и их визуализации в виде графиков и диаграмм. Тело программной системы состоит из блоков описания внешних параметров, блока загружаемых моделей, блока вычислительных прикладных подпрограмм, и блока программных модулей графической визуализации полученных результатов.

Блок описания внешних параметров содержит:

- VO\_V – описание параметров валов зубчатой передачи;
- VO\_ZK – описание параметров зубчатых колес передачи
- VO\_F – описание функций типовых внешних нагружений на выходном валу зубчатой передачи. Подготовка и загрузка функций блока в программный комплекс осуществляется в системе MathCad, в виде файлов типа \*.mcd.

В состав блока математических моделей входят разработанные ранее модели, на основе которых осуществляется динамический анализ колебаний исследуемой механической системы:

- SPR\_MM – упрощенная математическая модель, на основе которой исследуется динамика одноступенчатой зубчатой передачи в частотной области, при условии одинаковых значений жесткостей опор валов;
- MM\_BZP – математическая модель, на основе которой осуществляется анализ динамики многоступенчатой зубчатой передачи в частотной области, при условии, когда значения жесткостей опор могут быть различными;
- MM\_DOZ – математическая модель, динамики одноступенчатой зубчатой передач, на основе которой исследуется динамика передачи с учетом демпфирования опор и зацепления;

- MM\_R1P – математическая модель, приведенная к системе дифференциальных уравнений 1-го порядка. Дает возможность осуществлять анализ динамики одноступенчатой зубчатой передачи во временной области, на основе методов численного решения;
- KR\_MM – конечно-разностная математическая модель одноступенчатой зубчатой передачи. Дает возможность анализа динамики одноступенчатой зубчатой передачи во временной области, на основе семейства методов конечных разностей.

Блок прикладных вычислительных подпрограмм содержит:

- SIS\_LIN\_R – подпрограмма решения системы линейных алгебраических уравнений методом Жордана-Гаусса. Используется на этапе формирования детерминанта матрицы системы;
- MATRIX – подпрограмма вычисления числовых значений элементов матрицы системы дифференциальных уравнений. Вычисления осуществляются на основе вида матрицы системы;
- VLAS\_CHISL – подпрограмма вычисления особых чисел матрицы системы;
- VLAS\_VEKT – подпрограмма вычисления особых векторов матрицы системы; В состав программного модуля входят такие процедуры и функции: MULT, DAN (процедура перемножения матриц), ED\_MATR – процедура вычисления единичной матрицы, OBR\_MATR – процедура вычисления обратной матрицы, ADD\_STR – процедура формирования строк результирующей матрицы, SIGN – процедура определения знаков промежуточной матрицы, MULT\_M – процедура вычисления произведения большеразмерных матриц высокого порядка;
- NEL\_RIV – подпрограмма решения нелинейного уравнения высокого порядка, соответствующего характеристическому полиному матрицы системы, и реализована на основе модифицированного метода Мюллера;
- VII\_KOL – подпрограмма решения системы дифференциальных уравнений во временной области. Модуль функционирует на основе использования обычного и модифицированного методов Рунге-Кутты 4-го порядка;

- VIM\_KOL – подпрограмма анализа колебаний элементов механической системы во временной области, при условии изменения внешнего момента нагрузки ( $M_3 \neq const$ ). Используются те же методы численного решения, что и в предыдущем случае. Структурно модуль объединен с математической моделью MM\_R1P, блоками визуализации и блоком внешних загружаемых функций, имитирующих закон нагружения зубчатой передачи;
- EN\_SIS – подпрограмма вычисления энергии каждого из тел колебательной системы в заданные моменты времени, и полной ее энергии. В состав подпрограммы входит процедура EN, вычисляющая энергии колебаний избранных тел механической системы [8-10]. Структурно подпрограмма связана с блоком описания внешних функций (BO\_F), и модулями визуализации решений (POV\_ENERG, EN\_SP).

Назначение блока визуализации решений – изображать в графическом виде соответствующие решения систем уравнений. Блок визуализации состоит из таких модулей:

- ZM\_EL – модуль графического изображения зависимости мгновенных значений смещений избранных тел колебания от времени;
- SHV\_EL – модуль графического изображения зависимости мгновенных значений скоростей движения избранных тел колебания от времени.
- FAZ\_TR – модуль визуализации фазовой траектории избранных тел;
- CHAST\_SP – модуль визуализации частотного спектра колебаний системы;
- EN\_SP – модуль визуализации мгновенных значений энергий тел колебательной системы;
- POV\_EN – модуль визуализации зависимости полной энергии колебательной системы от времени.

Таким образом, программный комплекс «*DYNAMIKA*» содержит в своем составе все необходимые модули, обеспечивающие эффективное решение задач исследования динамики колебательных процессов механических систем. класса зубчатых передач.

## Литература:

1. Петрусеви́ч А. Н. Динамические нагрузки на зубьях прямозубых колес. [Текст] / А.Н. Петрусеви́ч // В кн.: Расчет и конструирование деталей машин. ИМАШ АН СССР, 1942 г, с. 87.
2. Петрусеви́ч А. Н. Динамические нагрузки в зубчатых передачах с прямозубыми колесами. [Текст] / А. Н. Петрусеви́ч, М. Д. Генкин, В. К. Гринкеви́ч // М., Изд-во АН СССР, 1956. с. 134.
3. Доллежалъ В. А. Расчетная нагрузка зубчатых передач. [Текст] / В. А. Доллежалъ // М., Машгиз, 1957, с. 80.
4. Абрамов Б. М. Колебания прямозубых зубчатых колес. [Текст] / Б. М. Абрамов // Харьков, изд-во ХГУ, 1969. с. 175.
5. Ковалев Н. А. Колебания зубчатых передач с размыканием зубьев. [Текст] / Н. А. Ковалев // М. В кн. Теория передач в машинах. Изд-во Машиностроение, 1966. с. 248-251.
6. Бош М. Динамика цилиндрических зубчатых колес с учетом точности их изготовления. [Текст] / М. Бош // Часть 1. В кн. Экспресс-информация. Детали машин, №11, 1966, с.175.
7. Terauchi Yashio, Hidoka Teruaki, Nagashima Mitio. Eine Studie zur dynamischen Zusatzkraft gerad verzahnter Stienzäder (dez Einflubdes Einflanken Walzfeis ouf Zusatzkräft). Bull JSME, 1967, №42 1048-1056. (нем.) Экспресс-информация, Детали машин, №31, 1966.
8. Gear C.W., Numarical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations / C.W. Gear. - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. - N.J., 1972. – p. 52.
9. Ando A. Vibration analysis of submerged structure by finite element method // Japan Shipbuilding and Marine Engineering. - 1978. - V. 12. - No. 3. - P.5 - 10.
10. Майба, И.А., Глазунов, Д.В. Теоретическое обоснование механизма смешанной (полужидкостной) смазки в контакте «твердый оболочечный смазочный стержень-колесо-рельс» [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012 г., №1 – Режим доступа:

<http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/664> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

11. Дерлугян Ф.П., Щербаков И.Н. Обоснование процесса получения композиционных антифрикционных самосмазывающихся материалов с заданными техническими характеристиками методом химического наноконструирования. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010 г., №4 – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/287> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

12. Керман Митчелл К. Программирование и отладка в Delphi. [Текст] Учебный курс: пер. С англ./ Митчелл К. Керман. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 672 с.

13. В. П. Дьяконов. Справочник по MathCad PLUS 7.0 PRO. Универсальная система математических расчетов. [Текст] – Москва: 1998, 345 с.

14. Гультяев А. Имитационное моделирование в среде MATLAB-5.2. Практическое пособие. [Текст] – СПб: Корона принт. 1999, 288 с.

15. Программирование аналого-цифровых вычислительных систем: Справочник [Текст] / И. М. Витенберг, М. Г. Левин, И. Я. Шор; Под ред. И. М. Витенберга. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.: ил.

16. Воеводин В. В. Численные методы алгебры. Теория и алгоритмы. [Текст] / В. В. Воеводин // М.: Наука, 1966. 248 с.