

Б.С. ВОРОНЦОВ, к.т.н., доцент каф. ТМ ВНУ им. В. Даля, г. Луганск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО СИНТЕЗА ПЕРЕДАЧ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Розроблено математичне забезпечення інтерактивного синтезу передач зацепленням. Новий підхід до управління параметрами дозволяє підвищити ефективність процесу синтезу за рахунок максимального використання можливостей сучасних комп'ютерних технологій.

Mathematical provision of interactive gear engagement synthesis has been developed. New approach to parameter control allows for synthesis process effectiveness increase due to maximum use of modern computer technologies possibilities.

Постановка проблемы. Важнейшей предпосылкой автоматизации процесса проектирования является возможность нахождения оптимального варианта технического решения. Оптимизация, как выбор наилучшего варианта среди некоторого множества, подразумевает наличие правила предпочтения одного варианта другому, которое называется критерием оптимальности. В основе построения правила предпочтения лежит целевая функция, количественно выражающая качество объекта и потому называемая также функцией качества.

Для параметрической оптимизации постановка задачи выглядит следующим образом:

Имеется вектор $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ независимых внутренних параметров, значения которых однозначно определяют все характеристики изделия, в том числе целевую функцию и функциональные ограничения. Таким образом, целевая функция и функции ограничений зависят от внутренних параметров.

В процессе оптимизации часть независимых внутренних параметров подвергается изменениям в определенных пределах. Такие параметры называются управляемыми, а пределы их изменения – параметрическими ограничениями.

В задачах синтеза передач зацеплением выбор оптимального решения сводится к выбору наилучшей геометрии рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес. При этом кроме рабочих поверхностей зубьев используются и другие поверхности такие, как производящие, поверхности зацепления. Между этими поверхностями существуют различные связи (огибания, функциональные, скрытые), которые определяют зависимость одних поверхностей от других.

Поэтому в качестве управляемых параметров можно выбрать те параметры, которые управляют формой одной из взаимозависимых поверхностей. В качестве таких поверхностей могут служить как вышеперечисленные поверхности, так и различные вспомогательные поверхности, функционально связанные с синтезируемым объектом.

Анализ литературы. Разработке теории синтеза передач зацеплением посвящены работы отечественных и зарубежных ученых [1-4]. Применение

компьютерных технологий значительно повышает эффективность создания новых видов передач. Это подтверждают работы [5, 6]. В работе [7] приведен анализ математического обеспечения, которое широко используется при создании современных компьютерных систем поверхностного и твердотельного моделирования. Однако до настоящего времени недостаточно разработано математическое и методическое обеспечение систем интерактивного компьютерного синтеза передач зацеплением.

Целью данной работы является разработка математического обеспечения интерактивного компьютерного синтеза передач зацеплением.

Основная часть. Форму любой поверхности определяют параметрические кривые. Так в теории зубчатых зацеплений широко используются линии, описывающие исходный контур производящей поверхности.

Для того чтобы выбрать управляемые параметры задачи оптимизации зубчатых зацеплений, необходимо проанализировать математическое описание существующих линий и поверхностей и выбрать такие, которые бы имели ряд следующих преимуществ:

- позволяли максимально использовать современные достижения компьютерных технологий в плане управления процессом синтеза и визуализации результатов анализа;
- управляемые параметры можно было бы привести к единому виду, то есть унифицировать задачу синтеза и анализа передач зацеплением;
- процесс передачи информации из среды синтеза в среду твердотельного и поверхностного компьютерного моделирования не вызывал бы никаких затруднений, что позволяло бы создавать программные приложения для существующих CAD-систем.

Любую кривую, представленную как аналитически, так и таблично можно аппроксимировать с достаточной степенью точности различного вида сплайнами. В качестве универсального описания предлагаются кривые и поверхности Безье, которые широко используются в системах автоматизированного проектирования и обладают целым рядом свойств, удобных для построения математических моделей управляемого синтеза и оптимизации передач зацеплением.

Уравнение кривой в параметрическом виде:

$$\begin{aligned} x_k &= f_1(\lambda, P_x) = (1-\lambda)^3 x_0 + 3(1-\lambda)^2 \lambda x_1 + 3(1-\lambda) \lambda^2 x_2 + \lambda^3 x_3; \\ y_k &= f_2(\lambda, P_y) = (1-\lambda)^3 y_0 + 3(1-\lambda)^2 \lambda y_1 + 3(1-\lambda) \lambda^2 y_2 + \lambda^3 y_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_x=(x_0, x_1, x_2, x_3)$, $P_y=(y_0, y_1, y_2, y_3)$ – векторы координат опорных и управляющих точек P_0, P_1, P_2, P_3 , λ – переменная величина $0 \leq \lambda \leq 1$.

Этой кривой можно управлять с помощью курсора на экране компьютера, изменяя положение опорных точек P_0, P_3 и управляющих точек P_1, P_2 . Это позволяет визуализировать процесс синтеза, проводить всесторонний дина-

мический анализ как геометрии синтезированных передач, параметров зацепления, так и функций качества задач синтеза и оптимизации. Положением управляющих точек можно также управлять с помощью диалоговых панелей, пошагово изменяя значение координат точек или задавая конкретные их значения. Поэтому в качестве управляемых параметров задач синтеза и оптимизации предлагается использовать координаты точек управляющих объектов.

Профильный угол исходного контура определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{f_1'(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)},$$

где $f_1'(\lambda, P_x) = 3(-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)\lambda^2 + 6(x_0 - 2x_1 + x_2)\lambda + 3(x_1 - x_0);$
 $f_2'(\lambda, P_y) = 3(-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)\lambda^2 + 6(y_0 - 2y_1 + y_2)\lambda + 3(y_1 - y_0),$

- производные функций $f_1(\lambda, P_x)$ и $f_2(\lambda, P_y)$ по λ .

При анализе геометрии и выводе формул для определения функций качества необходимо знать вторые производные, которые имеют вид:

$$f_1''(\lambda, P_x) = 6(-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)\lambda + 6(x_0 - 2x_1 + x_2);$$

$$f_2''(\lambda, P_y) = 6(-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)\lambda + 6(y_0 - 2y_1 + y_2).$$

Уравнение станочного зацепления:

$$F_i = [\pm y_n(\mu, N) \pm \Omega_2 \cos \beta \mp R_i \varphi_i] \cdot \sin \alpha = 0, \quad (2)$$

где $\Omega_2 = \Omega_1 + f_2(\lambda, P_y); \Omega_1 = \frac{f_1(\lambda, P_x) \cdot f_1'(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)}.$

Уравнение поверхности станочного зацепления в параметрическом виде:

$$x = f_1(\lambda, P_x); \quad y = -\Omega_1 \cos \beta;$$

$$z = z_n(\mu, N) - f_2(\lambda, P_y) \sin \beta. \quad (3)$$

Для определения уравнений поверхностей зубьев нарезаемых колес необходимо представить уравнения поверхности станочного зацепления в системах координат S_1 или S_2 . Уравнения поверхностей контактирующих зубьев в системе координат S_i имеют вид:

$$x_i = [f_1(\lambda, P_x) \pm R_i] \cos \varphi_i \pm \Omega_1 \cos \beta \sin \varphi_i;$$

$$y_i = [R_i \pm f_1(\lambda, P_x)] \sin \varphi_i - \Omega_1 \cos \beta \cos \varphi_i;$$

$$z = z_n(\mu, N) - f_2(\lambda, P_y) \sin \beta. \quad (4)$$

Для определения функций качества многокритериального интерактивного синтеза и оптимизации передач зацеплением можно использовать следующие геометро-кинематические показатели:

- относительная скорость скольжения рабочих поверхностей;
- суммарная скорость перемещения точек контакта в направлении, перпендикулярном линии мгновенного контакта;
- коэффициент удельных скольжений;
- угол между относительной скоростью и направлением линии контакта;
- приведенная кривизна поверхностей зубьев в направлении, перпендикулярном линии контакта и др.

В качестве функциональных ограничений можно использовать:

- коэффициент перекрытия;
- условия подрезания зубьев;
- условия заострения зубьев и др.

Относительная скорость скольжения рабочих поверхностей зубьев:

$$V^{(12)} = (\omega_1 + \omega_2) f_1(\lambda, P_x) \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \alpha \cos^2 \beta + 1}. \quad (5)$$

Суммарная скорость перемещения точек контакта в направлении, перпендикулярном линии контакта при $\omega_1 = 1 \text{ рад/с}$:

$$u_i = u_{\tau 1} + u_{\tau 2} = \frac{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}{\sqrt{(\Omega_2')^2 \cos^2 \beta + [(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2] \cdot \sin^2 \beta}} \times$$

$$\times \left[2R_1 + \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2(\lambda, P_y)} (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta) \cdot \left(1 - \frac{1}{u} \right) \right]. \quad (6)$$

Здесь $u = \omega_1 / \omega_2$ – передаточное число зубчатой пары.

Коэффициенты удельных скольжений:

$$\eta_i = \frac{\pm \frac{u + 1}{u}}{\left(\frac{R_i f_2'(\lambda, P_y)}{f_1(\lambda, P_x) \cdot (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta)} \pm 1 \right)}. \quad (7)$$

Тангенс угла между относительной скоростью и направлением линии контакта имеет вид:

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}{\sin \beta \cdot \cos \beta} \times \frac{\Omega_2' \cdot \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta}{f_2'(\lambda, P_y) \cdot \Omega_2' - ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)}. \quad (8)$$

Приведенная нормальная кривизна контактирующих поверхностей зубьев в направлении, перпендикулярном линии контакта:

$$\chi_{пр} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot f_2'(\lambda, P_y)}{\left[(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{\left[R_1 + \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} (\Omega_2' \cdot \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta) \right]} \times \frac{\left[(\Omega_2')^2 \cos^2 \beta + (f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 \right] \cdot \sin^2 \beta}{\left[R_2 - \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta) \right]}. \quad (9)$$

Как видно из приведенных формул, описание рабочих поверхностей зубьев и все приведенные геометро-кинематические показатели зависят от координат управляющих точек.

На основании предложенной теории и полученного математического обеспечения была разработана компьютерная программа, позволяющая осуществлять многокритериальный интерактивный синтез передач зацеплением. Интерфейс программы приведен на рисунке.

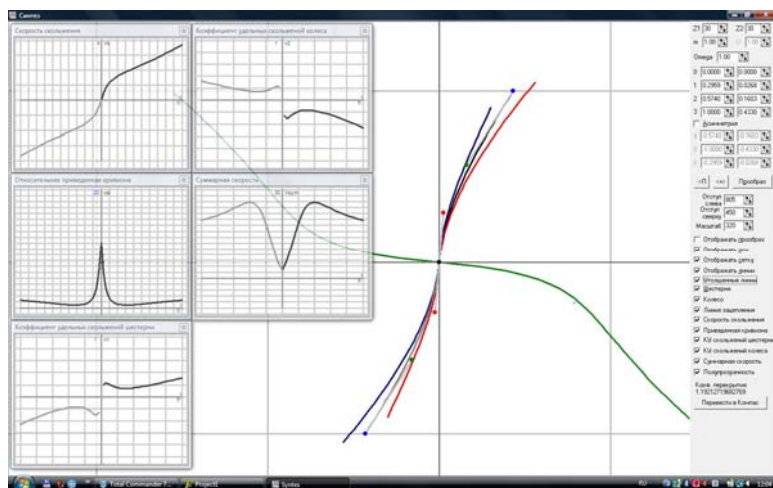


Рисунок – Интерфейс программы многокритериального интерактивного синтеза передач зацеплением

Выводы. Разработано математическое обеспечение многокритериального интерактивного синтеза передач зацеплением. Новый подход к управлению параметрами позволяет повысить эффективность процесса синтеза, унифицировать описание геометрии производящей поверхности, визуализировать дина-

мически изменяемые значения критериев синтеза, создавать компьютерные модули современных систем поверхностного и твердотельного моделирования.

Список литературы: 1. Litvin, F.L. Gear Geometry and Applied Theory. Prentice hall, Englewood Cliffs. – NJ, 1994. – 724с. 2. Шишов В.П. Високонвантажени циліндричні передачі з двоопукло-ввігнутими зубцями. Монографія / В.П. Шишов, П.Л. Носко и др. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Далі, 2005. – 216с. 3. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с. 4. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. Монография. – М.: Изд-во "Станкин", 1999. – 494с. 5. Бабичев Д.Т. Развитие теории зацеплений и формообразования поверхностей на основе новых геометро-кинематических представлений: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.18. – Тюмень, 2005. – 421с. 6. 3-D моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием / Грабченко А.И., Кондусова Е.Б., Кривошея А.В., Равская Н.С., Родин П.Р. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – 304с. 7. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. – М.: Изд-во физ. мат. лит., 2002. – 472с.

Поступила в редколлегию 17.05.10

УДК 621.833

В.Л. ДОРОФЕЕВ, д.т.н., проф., ФГУП "ММП "Салют", г. Москва, Россия
Д.В. ДОРОФЕЕВ, инженер ФГУП "ММП "Салют"
А.Б. ЕДИНОВИЧ, нач. бригады ГП "Ивченко-Прогресс", г. Запорожье
А.В. КОРНЕЙЧУК, ведущий конструктор ГП "Ивченко-Прогресс"

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕДУКТОРОВ ДЛЯ САМЫХ МОЩНЫХ В МИРЕ УКРАИНСКО-РОССИЙСКИХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Розглянуто питання підвищення якості проектування редукторів авіаційних двигунів за рахунок оптимальної модифікації профілю зубів евольвентного зацеплення, розрахованого за допомогою програми ASGears. Представлені теоретичні основи рішення зворотної задачі теорії зацеплення, реалізовані в програмі ASGears.

There is discussed question of increasing quality of gearbox design by means of optimum tooth profile modification of involute mesh calculated with ASGears program. There are presented theoretical principles of the inverse problem solution of mesh theory realized in ASGears program.

Выкат первого военно-транспортного самолета НАТО A400M состоялся 26 июня 2008 г. более чем на полгода позже запланированного срока. Основной причиной задержки стали проблемы в разработке нового двигателя TP400-D6 компанией EuroProp International. Этот двигатель является самым мощным турбовинтовым авиационным двигателем, когда-либо созданным странами Запада – его мощность составляет 11 тысяч лошадиных сил.

Однако самым мощным турбовинтовым авиационным двигателем в мире является советский двигатель НК-12МП, который устанавливался на самолеты