

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПЕРЕТАЧИВАНИИ

А.В. Мовсисян

Национальный политехнический университет Армении

Исследуются вопросы математического и компьютерного моделирования режущего инструмента при перетачивании. Разработана и реализована математическая модель с учетом критерия оптимизации для определения числа движений режущего инструмента, точности и качества обработанной поверхности. Проведено оптимизационное компьютерное моделирование для дисковых фасонных фрез, протяжек, червячных фрез, долбяков, фасонных резцов, сверл. Разработаны графические имитационные модели режущего инструмента для различных целей, начиная от получения рабочего чертежа режущего инструмента до анализа сложных трехмерных схем срезания припуска в процессе обработки и формообразования.

Ключевые слова: математическое моделирование, компьютерное моделирование, перетачивание режущего инструмента, критерий оптимизации.

Введение. Компьютерное и математическое моделирование режущего инструмента используется с различными целями, в зависимости от типа производства и технологического процесса [1]. Длительный опыт разработки и использования математического моделирования режущего инструмента в различных отраслях промышленности позволяет сделать некоторые выводы:

1. Способ реализации, т.е. выбор той или иной компьютерной системы, играет весьма большую практическую роль, но конечный результат, эффективность компьютерного моделирования и качество режущего инструмента зависят, в первую очередь, от математической модели режущего инструмента.

2. В математических моделях режущего инструмента, при всем их многообразии, целесообразно выделить две большие группы: оптимизационное и имитационное математическое моделирование [1, 2]. По этому же признаку можно выделить и два типа компьютерного моделирования режущего инструмента.

3. Оптимизационная математическая модель режущего инструмента может быть выражена в достаточно общем случае в виде целевой функции (1) и ограничений (2):

$$K = F(x_i) \rightarrow \min(\max), \quad (1)$$

$$f_j(x) = b_j, \quad 1 \leq i \leq n, \quad 1 \leq j \leq m, \quad (2)$$

где K – критерий оптимизации; F – функция (набор функций, уравнений, неравенств, таблиц), описывающая зависимость K от переменных x_i ; f_j – зависимости между переменными x_i или между x_i и постоянными b_j , причем переменные меняются произвольно (параметры) или в зависимости от других переменных; n и m – соответственно число переменных и ограничений.

Критерий K может быть экономическим (себестоимость обработки детали данным режущим инструментом, его стоимость и др.) или техническим (точность или производительность обработки режущего инструмента, стойкость, размеры, геометрия кромки и др.). Последний используется взамен или совместно с экономическим критерием по трем причинам: для расчета экономического критерия не имеется достаточной информации; достижение технического критерия обеспечивает очевидное экономическое преимущество; расчет экономического критерия для режущего инструмента невозможен без расчета технических характеристик режущего инструмента.

Метод исследования. В математическом и компьютерном моделировании режущего инструмента в качестве технического критерия использованы характеристики инструмента в целом (стойкость, габариты, точность, количество типоразмеров) или характеристики отдельных его элементов, например геометрических параметров [3].

Одной из важных для практики и наиболее сложной в математическом отношении задач является оптимизационное математическое моделирование, где в качестве критерия K служит число формообразующих движений режущего инструмента, а основными ограничениями или переменными являются возможные виды режущего инструмента, типы и кинематика используемых станков, точность и качество обработанной поверхности. Разработка и реализация такого математического моделирования практически означает выбор вида инструмента и кинематической схемы формообразования, что непосредственно влияет на технологический процесс, тип и стоимость станка и затраты на обработку.

К сложным задачам математического моделирования относится также и определение кинематических задних углов режущего инструмента, особенно для дисковой фрезы, обрабатывающей винтовые поверхности. Для решения этой задачи формируется математическое моделирование поверхности резания, которую описывает режущая кромка дисковой фрезы в сложном движении (два вращательных вокруг скрещивающихся осей фрезы и детали и одно поступательное вдоль оси детали).

Поверхность резания определяется как совокупность траекторий точек кромки в сложном движении дисковой фрезы относительно детали. Координаты точек траектории в системе координат, связанных с фрезой, находятся путем матричных преобразований. При угле поворота α кромки вокруг оси дисковой

фрезы, угле скрещивания ε осей дисковой фрезы и детали, расстоянии m между осями дисковой фрезы и детали с учетом того, что l , l_s и ν зависят от соотношения скоростей движений и размеров дисковой фрезы, имеем

$$\begin{aligned}
 M1 &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, & M2 &= \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
 M3 &= \begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, & M4 &= \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & -\sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m \\ \sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Искомые координаты точек траекторий находятся с помощью результирующей матрицы:

$$MR = \left(M4 \times \left(M3 \times \left(M2 \times \left(M1 \times \begin{pmatrix} 0 \\ Y_j \\ Z_{ij} \\ 1 \end{pmatrix} \right) \right) \right) \right). \tag{4}$$

Описанная таким образом поверхность резания рассматривается как задняя поверхность зубьев фрезы при нулевом кинематическом угле во всех точках кромки фрезы, т.е. такая поверхность является базовой, по сравнению с которой формируется тем или иным способом фактическая поверхность зубьев.

Для шлифования и перетачивания по задней поверхности винтовых зубьев цельных конических осевых инструментов, таких как фрезы, зенкеры, развертки, разработана компьютерная модель со следующими характеристиками: K – число формообразующих движений и установочных параметров [1]; x_i – величины установочных параметров: геометрия кромки режущего инструмента (передние и задние углы γ и α , угол наклона винтовых зубьев), ширина (толщина) спинки зубьев, ширина b цилиндрической ленточки зубьев, диаметр (для концевых фрез) и число зубьев, диапазон изменения переменных γ , α , b вдоль оси инструмента, форма и размеры шлифовального круга.

Ограничениями, которые выражаются уравнениями (2), служат: максимальные и минимальные значения передних ($\gamma_{\max}, \gamma_{\min}$) и задних ($\alpha_{\max}, \alpha_{\min}$) углов; минимальный угол заострения кромки $\beta_{1\min}$ [1]; допустимая погрешность f_{\max} отклонения образующей конуса от прямолинейности; максимально допустимая ширина ленточки b . Наименьшее достижимое в данном

компьютерном моделировании значение критерия равно $K=2$, что соответствует одному поступательному движению осевого инструмента относительно шлифовального круга и одному установочному параметру режущего инструмента на станке. Такая кинематическая схема реализуется на универсально-заточных станках, широко используемых в промышленности. Использование компьютерного моделирования показало, что с увеличением отношения большого и малого диаметров конусов до двух и более вероятность достичь значения $K=2$ уменьшается, т.е. осуществить шлифование по задней поверхности зубьев при изготовлении или перетачивании режущего инструмента, при удовлетворительном его качестве, становится невозможным. Если одно из ограничений (2) в математической модели не выдерживается, то приходится усложнять кинематику обработки, например, использовать шлифовально-заточный станок с числовым программным управлением (ЧПУ). В то же время использование математического и компьютерного моделирования обеспечивает максимально достижимое качество режущего инструмента при использовании простой кинематики недорогих станков.

Результаты исследования. Оптимизационное математическое и компьютерное моделирование проведено для дисковых фасонных фрез, протяжек, червячных фрез, долбляков, фасонных резцов, сверл. Для каждого вида режущего инструмента ввиду разнообразия их конструкций и назначения разработаны различные математические модели с различными критериями K .

Для дисковых фрез с затылованными зубьями разработана компьютерная модель, обеспечивающая минимизацию погрешностей при стачивании; для изготовления этих же фрез использовано математическое моделирование, позволяющее обеспечить максимальную ширину шлифованного зуба при его затыловании и наибольшее число перетачиваний зуба фрезы.

Для компьютерного моделирования протяжек, обрабатывающих внутренние поверхности, в том числе для комбинированных шлицевых протяжек, в качестве критерия K служит число протяжек в комплекте. При $K=1$ критерием оптимизации является длина одной протяжки. Переменными являются последовательность обработки отдельных участков заготовки (фасок, цилиндра, боковых поверхностей шлицев), схема срезания припуска, подъем на зуб, число зубьев в секциях, шаг и высота зубьев.

К ограничениям в компьютерном моделировании протяжки относятся: сила резания, допустимая станком и прочностью хвостовика и рабочей части протяжки; число одновременно работающих зубьев; максимальная длина одной протяжки с учетом технологических возможностей ее изготовления и эксплуатации (в том числе, шлифования зубьев, термообработки, нанесения покрытий, максимального хода протяжного станка); наибольшие и наименьшие

значения переменных. Число вариантов конструкций протяжек, допустимых ограничениями и мало отличающихся по длине, может оказаться достаточно большим. Поэтому в качестве дополнительных критериев при выборе окончательного варианта должны быть приняты расчетная сила резания, толщина вершины зуба, трудоемкость изготовления протяжки.

Описанная выше общая математическая модель протяжки достаточно сложна не столько из-за сложности математического аппарата (использована методика динамического программирования), сколько из-за весьма большого количества возможных вариантов конструктивных элементов. Поэтому целесообразно построение нескольких разных математических и компьютерных моделей протяжки, которые предназначены для разных схем срезания припуска и схем расположения зубьев на протяжке. Общая компьютерная модель может включать несколько самостоятельных отдельных компьютерных моделей.

Для червячных затылованных фрез, нарезающих эвольвентные цилиндрические колеса, разработаны различные математические и компьютерные модели с различными критериями K и ограничениями.

Для фрез стандартной конструкции K - количество перетачиваний фрезы, или ширина шлифованного участка зуба. Основными ограничениями являются минимальный диаметр круга, диапазон изменения установочных параметров круга на станке, минимально допустимый задний угол зубьев фрезы.

Для червячных фрез с протуберанцами, нарезающих пару зубчатых колес с последующим их шлифованием, $K \rightarrow \max$ - ширина выкружки, образуемой протуберанцем (выступом) зубьев червячной фрезы у ножки зуба колес. Если червячными фрезами нарезается несколько пар колес, в качестве критерия $K \rightarrow \min$ принято количество типоразмеров фрез, используемых для нарезания всего диапазона колес данного модуля и угла профиля, при тех же вышеперечисленных переменных и ограничениях. Поскольку число z зубьев колес, нарезаемых одной и той же фрезой, существенно влияет на размер выкружки, минимизировать количество типоразмеров фрез при большом диапазоне изменения z , например от 15 до 90, достаточно сложно. Поэтому, если это допустимо конструкцией нарезаемых колес, число переменных следует увеличить, добавив к ним коэффициент смещения исходного контура зубьев колес, высоту и толщину их зубьев.

Имитационная модель режущего инструмента описывает с помощью одной или многих функций F (неравенств, таблиц, символов) одну или множество W характеристик режущего инструмента (процесса его эксплуатации или изготовления) в зависимости от переменных x_i :

$$W = F(x_i), \quad (5)$$

где x_i могут меняться произвольно или же быть взаимосвязанными, что выражается равенствами (2), как и в случае оптимизационного компьютерного моделирования. Отличие от последнего в том, что здесь отсутствует алгоритм, приводящий тем или иным способом (например, с использованием метода динамического программирования) к получению экстремального значения какого-то одного или нескольких критериев (характеристик режущего инструмента). Делается это по двум принципиально разным причинам: это либо не требуется (имитационная модель первого типа), либо трудно достижимо (имитационная модель второго типа).

Для оценки характеристик режущего инструмента, полученных опытным путем, таких как точность (погрешность), стойкость и др., разработана компьютерная модель, которая обрабатывает опытные данные (x_i) и выдает набор W статистических характеристик режущего инструмента – дисперсию, коэффициент вариации, тип и квантили распределения, ошибку среднего значения при заданном уровне вероятности и ряд других. В данной компьютерной модели в терминах математической статистики описываются свойства режущего инструмента (имитационная модель первого типа).

Для формообразования дисковым инструментом (фрезой или шлифовальным кругом) сложных поверхностей, цилиндрических и конических винтовых с фасонным профилем разработана компьютерная модель обрабатываемых поверхностей в виде круговых проекций семейства линий L_k , которые описываются точками заданного профиля поверхности [4,5]. Каждая линия L_k описывается k -й точкой в относительном движении формообразования режущего инструмента и обрабатываемой детали. Если ко всем линиям L_k удастся провести огибающую семейства этих линий (что предусмотрено либо графическим, либо специально разработанным аналитическим способом), то получение поверхности заданного профиля дисковым режущим инструментом возможно. В противном случае – следует поменять установку режущего инструмента относительно детали, размеры режущего инструмента или кинематику (движения) формообразования. В большинстве случаев сложный фасонный профиль с резкими переходами, например профиль канавки спирального сверла с выступом-стружколомом, не удастся получить дисковым инструментом, даже при использовании различных установочных параметров; можно лишь добиться уменьшения отличий получаемой формы поверхности от заданной.

В данной компьютерной модели осуществляется имитация обрабатываемой поверхности и касания ее с поверхностью режущего инструмента, что позволяет в некоторой мере оптимизировать установку режущего инструмента и снизить погрешности формы детали (имитационная модель второго типа).

На рис. 1 приведена схема построения математической модели поверхности резания, которая рассматривается как совокупность координат точек, образующих траекторию движения режущей кромки $Pr(Pr', Pr'')$ фрезы при встречном фрезеровании. Исходными данными для определения траектории являются: координаты точек профиля Pr в системе xuz ; p - винтовой параметр, ε - угол скрещивания осей.

В приведенную на рис. 1 схему преобразования координат включены следующие движения: поворот профиля Pr на угол α вокруг оси Z , одновременное перемещение фрезы на расстояние $l_s = s_z z \alpha / 2\pi$ по оси Z (для встречного фрезерования) и согласованный поворот на угол $\nu = l_s / p$.

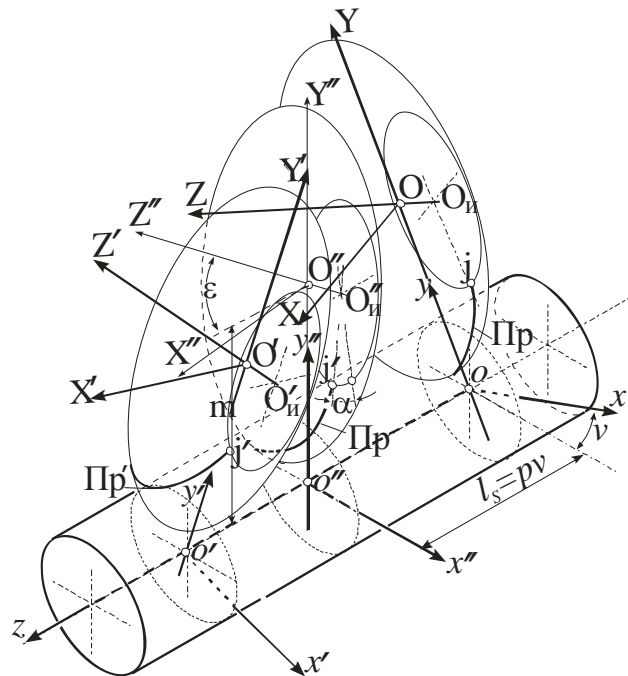


Рис. 1. Схема построения математической модели поверхности резания

Также разработаны графические имитационные модели режущего инструмента для различных целей - от получения рабочего чертежа режущего инструмента до анализа сложных трехмерных схем срезания припуска в процессе обработки и формообразования.

Схема на рис. 2 представляет собой результат компьютерного моделирования задней поверхности с заданными значениями кинематических задних углов.

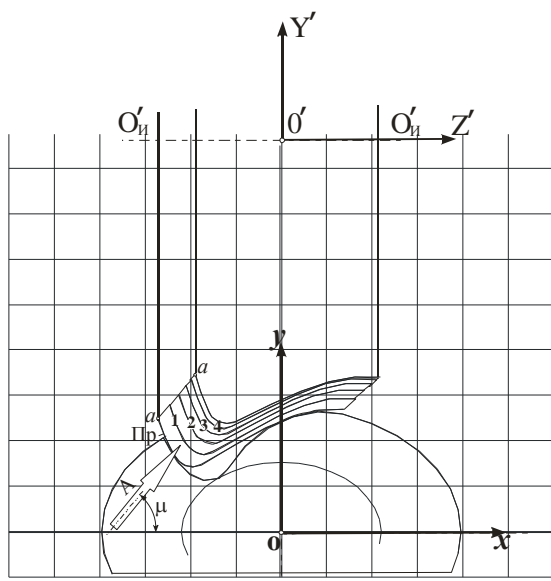


Рис. 2. Результат компьютерного моделирования задней поверхности дисковой фрезы на базе поверхности резания

Выводы. Преимуществом имитационных компьютерных моделей режущего инструмента, как аналитических, так и графических, является возможность использования без существенных затруднений весьма сложных уравнений и зависимостей. Все приведенные выше математические модели режущего инструмента реализованы в промышленности. Опыт их применения показал, что при разработке компьютерной модели режущего инструмента с разными целями, начиная от расчетов до оптимизации, выбор типа математического моделирования играет решающую роль, влияя на эффективность использования компьютерного моделирования.

Литература

1. Гречишников В.А., Колесов Н.В., Петухов Ю.Е. Математическое моделирование в инструментальном производстве: Уч. пособие. - М.: ИЦ МГТУ Станкин, 2003. – 117 с.
2. Труды III Международной конференции “Идентификация систем и задачи управления”, SISPRO 04. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. – 1156 с.
3. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и техническое обеспечение: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.

4. **Петухов Ю.Е., Мовсисян А.В.** Математическая модель задней поверхности затылованных фрез с передним углом // Сборник докладов X научно-методической конференции по математическому моделированию и информатике. – М.: МГТУ Станкин, 2007. – С. 136 – 139.
5. **Петухов Ю.Е., Мовсисян А.В.** Математическая модель дисковой фрезы // XX Международная научная конференция “Математические методы в технике и технологиях”. ММТТ-20: Сб. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2007. – Т. 4. – С. 76-77.

*Поступила в редакцию 07.05.2015.
Принята к опубликованию 26.05.2015.*

ԿՏՐՈՂ ԳՈՐԾԻՔԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ՎԵՐԱՍՐԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա.Վ. Մովսիսյան

Հետազոտվում են կտրող գործիքների մաթեմատիկական և համակարգչային մոդելավորման հարցերը վերասրման դեպքում: Մշակված և իրականացված է մաթեմատիկական մոդել, որում հաշվի են առնված լավարկման չափանիշը կտրող գործիքի շարժումների թվի որոշման համար, նրա ճշտությունը և մշակված մակերևույթի որակը: Մշակված և կիրառված է լավարկող համակարգչային մոդելավորում սկավառակային ձևավոր ֆրեզների, ձգիչների, որդնակային ֆրեզների, թործիչների, ձևավոր կտրիչների, գայլիկոնների համար: Մշակված է կտրող գործիքների գրաֆիկական իմիտացիոն մոդելների շարք տարբեր նպատակների համար՝ սկսած կտրող գործիքների աշխատանքային զծագրերի ստացումից մինչև մշակման և ձևագոյացման պրոցեսների ժամանակ թողվածքի կտրման բարդ եռաչափ սխեմաների վերլուծությունը:

Առանցքային բաներ. մաթեմատիկական մոդելավորում, համակարգչային մոդելավորում, կտրող գործիքի վերասրում, լավարկման չափանիշ:

MODELING THE CUTTING TOOL AT REGRINDING

A.V. Movsisyan

The problems of mathematical and computer modeling of the cutting tool at regrinding are investigated. A mathematical model taking into account the optimization criterion for determining the number of movements of the cutting tool, its accuracy and machined surface quality are developed and implemented. An optimization computer modeling for disk shaped cutters, broaches, hobs, cutters, shaped cutters, drills is developed and applied. A number of graphical simulation models of cutting tools for a variety of purposes - from the receipt of the working drawing of the cutting tool to the analysis of complex three-dimensional cutting allowance schemes in the processing and shaping are developed.

Keywords: mathematical modeling, computer simulation, regrinding the cutting tool, optimization criterion.