

Разработка математической модели углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками.

04, апрель 2014

DOI: 10.7463/0414.0707227

Мальков О. В., Малькова Л. Д.

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

olma70@mail.ru

ldm@hotmail.ru

Введение

Большую часть теоретических и экспериментальных исследований проводят с целью определения функциональной или вероятностной связи между несколькими случайными величинами, а также определения вида зависимости искомой величины от изменяемых факторов эксперимента.

Получение зависимости исследуемой величины от факторов эксперимента может быть выполнено в двух направлениях: на основе классического однофакторного эксперимента и на основе методов многофакторного планирования экспериментов. Первый метод отличается простотой и возможностью наглядного оперативного представления степени влияния исследуемого фактора на искомую величину. Однако, при всей наглядности, метод требует постановки большого количества экспериментов, особенно при изучении многофакторной системы. А при разработке общей зависимости на основе частных могут возникать случаи, когда невозможно частные зависимости объединить в общую или погрешность общей зависимости является неудовлетворительной. Поэтому этот метод целесообразно применять при оценке влияния одного фактора.

Методы многофакторного эксперимента целесообразно использовать для получения математических зависимостей при одновременном действии нескольких факторов, описывающих так называемое факторное пространство [1]. Этот метод целесообразно применять при решении научных задач, связанных с оптимизацией. Однако, полученная математическая зависимость, как правило, является громоздкой и не отличается возмож-

ностью наглядного представления степени влияния исследуемого фактора на искомую величину.

В работах [2-10] было показано, что наличие угла наклона винтовых стружечных канавок, переднего и заднего углов зубьев требует корректирования резьбового профиля зубьев фрезы с целью получения обрабатываемой резьбы принятой степени точности. В работе [4] разработана геометрическая модель углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками, позволяющая получить результирующие значения углов профиля при варьировании геометрическими и конструктивными параметрами инструмента. Полученные значения углов профиля нуждаются в математической обработке для получения математической модели.

Целью работы является разработка математической модели углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками. Научной новизной и практической ценностью работы является разработанная математическая модель расчета углов профиля зубьев резьбовой фрезы с винтовыми стружечными канавками, позволяющая назначить геометрические параметры зуба, обеспечивающего изготовление резьбы принятой степени точности.

Разработка математической модели углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками

В работе [4] разработана геометрическая модель, позволяющая определить углы профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками, изготовленных из твердого сплава и быстрорежущей стали. В данной работе будем рассматривать углы профиля зубьев β_1 и β_2 (рисунок 1, б) резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками, изготовленных из твердого сплава, поскольку данные фрезы составляют подавляющее большинство резьбовых фрез применяемых в настоящее время на станках с ЧПУ.

На рисунке 1 представлен внешний вид геометрической модели определения углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – рабочая часть резцофрезы (цилиндр принятого диаметра), 2 – винтовая стружечная канавка, 3 – передняя поверхность, 4 – режущие кромки, 5 – задняя поверхность, 6 – вершина профиля зуба, 7 – поверхность резания, 8 – профиль получаемой резьбы. Основные положения и допущения предложенной модели представлены в [4]:

- профиль зуба принимается теоретически острым;

- передняя поверхность задается перемещением по винтовой линии прямой, проведенной из вершины зуба под углом в нормальной секущей плоскости к винтовой линии; угол γ , принимаемый далее при моделировании зависимостей углов профиля, контролировался в торцевом сечении;

- диаметр сердцевины принимался согласно рекомендации *Sandvik Coromant* для геометрии резбовых фрез *CoroMill Plura* и составляет $d_c=0,5 \cdot d$, где d – наружный диаметр фрезы;

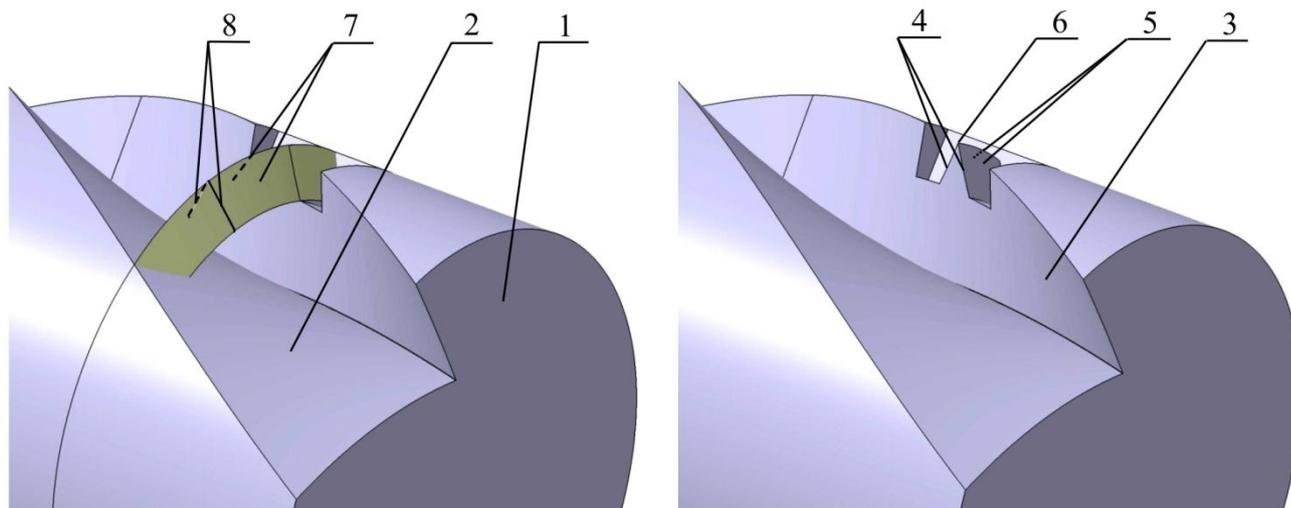
- параметр угла наклона винтовой стружечной канавки ω в модели устанавливался посредством задания шага H винтовой линии по формуле: $H = \pi d / \text{tg} \omega$;

- затылование проводилось по спирали с учетом падения затылка k , соответствующего принятому значению заднего угла α ;

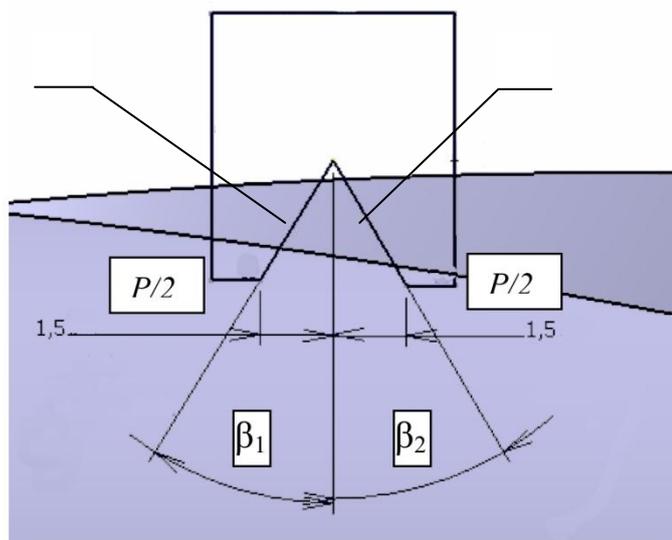
- параметры углов профиля зуба фрезы β_1 и β_2 пронумерованы слева направо (рисунок 1,б) при направлении взгляда со стороны передней поверхности зуба (поз. 3 рисунка 1,а);

- в модели имитировалось нарезание кольцевой резьбы без подачи на шаг. При принятых параметрах инструмента углы профиля зуба изменялись до тех пор, пока контрольные значения углов профиля формируемой резьбы не принимали значения $30,00^\circ$;

- значения углов профиля зубьев β_1 и β_2 фиксировались с точностью до 2-го знака после запятой в градусах, что соответствует значениям углов с точностью до $0,6'$. С учетом точности на угол профиля зуба инструмента, принятого в ГОСТ 1336-77 на практике достаточно получение угла в градусах с точностью до 1-го знака после запятой.



а



б

Рисунок 1. Внешний вид геометрической модели определения углов профиля зуба резбовой фрезы с винтовыми канавками: а - элементы модели; б - задаваемый профиль зуба.

В результате исследования полученной геометрической модели получены значения углов β_1 и β_2 , которые представлены в таблице 2 в соответствии с планом расчетного эксперимента в зависимости от варьирования следующих факторов: шага резьбы P , диаметра фрезы d , переднего угла γ , угла подъема винтовых стружечных канавок ω , заднего угла α (значения факторов представлены в таблице 1). Поскольку характер зависимости значений углов β_1 и β_2 от конструктивных и геометрических параметров резбовой фрезы не является линейным [4], то степень аппроксимирующего полинома должна быть не ниже второй. Как следствие, для оценки всех коэффициентов полинома второй степени необходимо варьирование факторов как минимум на трех уровнях.

Для реализации полного факторного плана для пяти факторов на трех уровнях без дублирования необходимо получить $3^5 = 243$ результата. С целью сокращения количества замеров принято решение использовать центральный композиционный план [1]. В связи с тем, что для ротатабельного планирования второго порядка большое значение имеет выбор числа опытов в центре плана, что невозможно осуществить получением результатов по твердотельной модели, в качестве критерия оптимальности принята ортогональность плана. Величина "звездного" плеча подобрана численным методом в пакете *Microsoft Excel*, ее значение для пяти факторов составило 1,596. Число опытов в центре плана принято равным 1. "Ядро" плана составляет схема полного факторного плана 2^5 (в таблицах 2, 3 и 4 строки с 1 по 32). Необходимые дополнительные расчетные значения включают в себя 10 "звездных" точек и одну точку в центре плана (в таблицах 2, 3 и 4 строки с 33 по 42 и

строка 43 соответственно). Таким образом, общее число замеров составляет $N = 2^5 + 2 \times 5 + 1 = 43$.

В таблице 1 представлены назначенные уровни варьирования пяти факторов, параметры кодирования и кодированные значения.

Таблица 1. Уровни варьирования, параметры кодирования и кодированные значения расчетного эксперимента.

Натуральные значения	Шаг P , мм	Диаметр d , мм	Передний угол γ , град	Угол подъема винтовой канавки ω , град	Задний угол α , град
Нижний уровень	1	12	0	0	8
Основной уровень	2	22	5	15	10
Верхний уровень	3	32	10	30	12
Параметры кодирования					
Интервал ϵ_i	1	10	5	15	2
Основной уровень \tilde{x}_i^0	2	22	5	15	10
Кодированные значения					
Нижний уровень	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Основной уровень	-1	-1	-1	-1	-1
Верхний уровень	0	0	0	0	0
Верхний уровень	1	1	1	1	1

Таблица 2. Центральный композиционный план для пяти факторов в натуральных значениях и значения углов профиля зуба, полученные по модели [4].

№	Шаг P , мм	Диаметр d , мм	Передний угол γ , град	Угол подъема винтовой канавки ω , град	Задний угол α , град	Угол профиля, град	
						β_1	β_2
1	1	12	0	0	8	30.01	30.01
2	1	12	0	0	12	30.01	30.01
3	1	12	0	30	8	31.21	28.88
4	1	12	0	30	12	31.86	28.34
5	1	12	10	0	8	30.74	30.74
6	1	12	10	0	12	31.14	31.14
7	1	12	10	30	8	31.97	29.55
8	1	12	10	30	12	33.07	29.31
9	1	32	0	0	8	30.01	30.01
10	1	32	0	0	12	30.01	30.01
11	1	32	0	30	8	31.21	28.88
12	1	32	0	30	12	31.86	28.34
13	1	32	10	0	8	30.67	30.67
14	1	32	10	0	12	31.02	31.02
15	1	32	10	30	8	31.91	29.49
16	1	32	10	30	12	32.98	29.24
17	3	12	0	0	8	30.01	30.01
18	3	12	0	0	12	30.01	30.01
19	3	12	0	30	8	31.21	28.88
20	3	12	0	30	12	31.87	28.34

21	3	12	10	0	8	31.15	31.15
22	3	12	10	0	12	31.76	31.76
23	3	12	10	30	8	32.29	29.82
24	3	12	10	30	12	33.59	29.73
25	3	32	0	0	8	30.01	30.01
26	3	32	0	0	12	30.01	30.01
27	3	32	0	30	8	31.21	28.88
28	3	32	0	30	12	31.86	28.34
29	3	32	10	0	8	30.76	30.76
30	3	32	10	0	12	31.16	31.16
31	3	32	10	30	8	31.98	29.55
32	3	32	10	30	12	33.09	29.33
33	3,596	22	5	15	10	31.25	29.86
34	0,404	22	5	15	10	31.11	29.73
35	2	37,96	5	15	10	31.14	29.75
36	2	6,04	5	15	10	31.67	30.21
37	2	22	12,98	15	10	31.98	30.53
38	2	22	-2,98	15	10	30.42	29.09
39	2	22	5	38,94	10	32.67	28.47
40	2	22	5	-8,94	10	30.06	30.88
41	2	22	5	15	13,192	31.57	29.71
42	2	22	5	15	6,808	30.79	29.85
43	2	22	5	15	10	31.17	29.78

Кодированное значение фактора x_i определено по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\varepsilon_i}, \quad (1)$$

где \tilde{x}_i - натуральное значение i -того фактора, \tilde{x}_i^0 - натуральное значение основного уровня i -того фактора, ε_i - интервал варьирования i -того фактора.

Значения факторов, устанавливаемые для расчетов в натуральном виде представлены в таблице 2. Полный центральный композиционный план в кодированном виде представлен в таблице 3.

Представленный в таблице 3 план не является ортогональным, т.к. не все суммы построчных произведений элементов двух столбцов равны нулю. В частности

$$\sum_{j=1}^N x_{oj} x_{ij}^2 \neq 0, \quad (2)$$

где j – номер строки, N – количество строк матрицы.

Для ортогональности соотношения (2) произведено преобразование столбцов матрицы путем замены переменной x_i^2 новой переменной x'_i :

$$x'_i = x_i^2 - \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}{N} = x_i^2 - \bar{x}_i^2. \quad (3)$$

В результате указанного преобразования получаем

$$\sum_{j=1}^N x_{oj}x'_{ij} = \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 - N \cdot \bar{x}_i^2 = 0, \quad (4)$$

что удовлетворяет условию ортогональности матрицы планирования.

Преобразованный центральный композиционный план в кодированном виде представлен в таблице 4.

На основании свойства ортогональности матрицы планирования коэффициенты регрессии b_i определены независимо друг от друга по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}. \quad (5)$$

Полученный в кодированном виде полином для β_1 имеет вид

$$y = 31,290 + 0,068x_1 - 0,081x_2 + 0,523x_3 + 0,778x_4 + 0,275x_5 - 0,046x_1x_2 + 0,071x_1x_3 - 0,007x_1x_4 + 0,016x_1x_5 - 0,067x_2x_3 + 0,007x_2x_4 - 0,015x_2x_5 + 0,008x_3x_4 + 0,117x_3x_5 + 0,170x_4x_5 - 0,045x_1x_2x_3 + 0,004x_1x_2x_4 - 0,010x_1x_2x_5 - 0,008x_1x_3x_4 + 0,015x_1x_3x_5 - 0,0003x_1x_4x_5 + 0,007x_2x_3x_4 - 0,015x_2x_3x_5 + 0,001x_2x_4x_5 + 0,007x_3x_4x_5 + 0,005x_1x_2x_3x_4 - 0,010x_1x_2x_3x_5 - 0,0003x_1x_2x_4x_5 - 0,001x_1x_3x_4x_5 + 0,002x_2x_3x_4x_5 + 0,0003x_1x_2x_3x_4x_5 - 0,004x'_1 + 0,021x'_2 - 0,002x'_3 + 0,017x'_4 - 0,004x'_5. \quad (6)$$

Полученный в кодированном виде полином для β_2 имеет вид

$$y = 29,796 + 0,062x_1 - 0,073x_2 + 0,479x_3 - 0,739x_4 - 0,038x_5 - 0,042x_1x_2 + 0,066x_1x_3 - 0,013x_1x_4 + 0,014x_1x_5 - 0,062x_2x_3 + 0,012x_2x_4 - 0,013x_2x_5 - 0,037x_3x_4 + 0,098x_3x_5 - 0,148x_4x_5 - 0,042x_1x_2x_3 + 0,008x_1x_2x_4 - 0,009x_1x_2x_5 - 0,013x_1x_3x_4 + 0,014x_1x_3x_5 - 0,003x_1x_4x_5 + 0,012x_2x_3x_4 - 0,013x_2x_3x_5 + 0,004x_2x_4x_5 - 0,013x_3x_4x_5 + 0,008x_1x_2x_3x_4 - 0,009x_1x_2x_3x_5 + 0,001x_1x_2x_4x_5 - 0,003x_1x_3x_4x_5 + 0,004x_2x_3x_4x_5 + 0,001x_1x_2x_3x_4x_5 - 0,002x'_1 + 0,019x'_2 - 0,0001x'_3 - 0,016x'_4 - 0,004x'_5. \quad (7)$$

Поскольку значения в каждой строке матрицы получены в результате расчетов по компьютерной модели, не может быть корректно проведена оценка статистической значимости коэффициентов полинома. Но, т.к. зависимости (6) и (7) предназначены для использования в системах автоматизированного проектирования, упрощать их нет необходимости.

После подстановок с использованием (1), получены полиномы для углов β_1 и β_2 с натуральными значениями факторов:

$$\beta_1 = 30,025 + 0,014P - 0,011d - 0,009\gamma - 0,005\omega + 0,020\alpha + 0 \cdot Pd - 0,001P\gamma - 0,001P\omega + 0 \cdot P\alpha + 0,0002d\gamma - 0 \cdot d\omega + 0 \cdot d\alpha - 0 \cdot \gamma\omega + 0,007\gamma\alpha + 0,005\omega\alpha - 0 \cdot Pd\gamma + 0 \cdot Pd\omega - 0 \cdot Pd\alpha - 0,0001P\gamma\omega + 0,004P\gamma\alpha + 0 \cdot P\omega\alpha - 0 \cdot d\gamma\omega + 0 \cdot d\gamma\alpha + 0 \cdot d\omega\alpha + 0 \cdot \gamma\omega\alpha + 0 \cdot Pd\gamma\omega - 0,0001Pd\gamma\alpha - 0 \cdot Pd\omega\alpha - 0 \cdot P\gamma\omega\alpha + 0 \cdot d\gamma\omega\alpha + 0 \cdot Pd\gamma\omega\alpha - 0,004P^2 + 0,0002d^2 - 0 \cdot \gamma^2 + 0 \cdot \omega^2 - 0,001\alpha^2; \quad (8)$$

$$\beta_2 = 30,021 + 0,006P - 0,009d - 0,009\gamma + 0,0003\omega + 0,020\alpha + 0 \cdot Pd - 0,001P\gamma - 0 \cdot P\omega + 0 \cdot P\alpha + 0,0002d\gamma + 0 \cdot d\omega + 0 \cdot d\alpha - 0,001\gamma\omega + 0,007\gamma\alpha - 0,005\omega\alpha - 0 \cdot Pd\gamma - 0 \cdot Pd\omega + 0 \cdot Pd\alpha - 0 \cdot P\gamma\omega + 0,004P\gamma\alpha - 0 \cdot P\omega\alpha - 0 \cdot d\gamma\omega + 0 \cdot d\gamma\alpha + 0 \cdot d\omega\alpha - 0 \cdot \gamma\omega\alpha + 0 \cdot Pd\gamma\omega - 0,0001Pd\gamma\alpha + 0 \cdot Pd\omega\alpha - 0 \cdot P\gamma\omega\alpha + 0 \cdot d\gamma\omega\alpha + 0 \cdot Pd\gamma\omega\alpha - 0,002P^2 + 0,0002d^2 - 0 \cdot \gamma^2 - 0 \cdot \omega^2 - 0,001\alpha^2. \quad (9)$$

Расчет углов β_1 и β_2 , произведенный согласно полиномам (8) и (9) для всех сочетаний факторов показал, что погрешность расчетных значений по сравнению со значениями, полученными по геометрической модели, не превышают 1,3 %, что составляет $0^\circ 24'$ и не превышает допуск на половину угла профиля зуба согласно ГОСТ 1336-77.

Заключение

На основе метода планирования экспериментов разработаны математические модели расчета углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками, позволяющие получать значения углов в зависимости от шага резьбы, диаметра фрезы, переднего угла, угла подъема винтовых стружечных канавок и заднего угла. Полученные полиномы являются громоздкими с точки зрения проведения ручных расчетов, однако при использовании модели в системах автоматизированного проектирования резьбовых фрез упрощать ее нет необходимости.

Расчет углов β_1 и β_2 , произведенный согласно полученным полиномиальным моделям для всех сочетаний факторов, показал, что погрешность расчетных значений по сравнению со значениями, полученными по геометрической модели, не превышают 1,3 %, что составляет $0^\circ 24'$ и не превышает допуск на половину угла профиля зуба согласно ГОСТ 1336-77.

Список литературы

1. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
2. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Общий случай профилирования зубьев резьбовой части сверлорезьбофрезы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1997. № 2. С. 77-84.

3. Мальков О.В. Профилирование зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 6. DOI: [10.7463/0613.0579350](https://doi.org/10.7463/0613.0579350)
4. Мальков О.В. Разработка и исследование модели расчета углов профиля зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 3. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/702743.html> (дата обращения 01.03.2014). DOI: [10.7463/0314.0702743](https://doi.org/10.7463/0314.0702743)
5. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машгиз, 1962. 952 с.
6. Карцев С.П. Инструмент для изготовления резьбы. М.: Машгиз, 1955. 252 с.
7. Левицкий М.Я. Резьбофрезерование. Киев: Машгиз. Украинское отд-ние, 1950. 192 с.
8. Левицкий М.Я. Основы резьбофрезерования. Киев: Машгиз. Украинское отд-ние, 1953. 156 с.
9. Титов А.И. Изготовление резьбовых фрез со спиральными канавками и передним углом $\gamma > 0$ // Холодная обработка металлов: сб. статей. М.: Оборонгиз, 1958. С. 13-17. (Сер. Передовой опыт производства / Науч.-исслед. ин-т технологии и организации производства авиац. пром-ти НИАТ; вып. 7).
10. Пикалов Б.И., Пашко Н.М., Жигалов В.И. Исследование зависимости параметров профиля резьбы в системе деталь - метчик // Исследования в области технологии образования наружных и внутренних резьб, резьбообразующих инструментов, станков и методов контроля резьб: сб. статей. Тула: Тульский политехнический институт, 1974. С. 134-141.

Developing a mathematical model of the tooth profile angles of thread milling cutter with helical flutes.

04, April 2014

DOI: 10.7463/0414.0707227

O.V. Malkov, L.D. Mal'kova

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

olma70@mail.ru

ldm@hotbox.ru

It is established that the lead and back angles of teeth, angle of helical flutes available require for correcting a thread profile of milling cutter teeth to machine a thread with an appropriate degree of accuracy.

Based on the previously developed geometrical model an experiment is conducted to calculate the values of tooth profile angles of thread milling cutters with helical flutes at variation of five factors in the established factorial space. When planning the experiment the full central composite draft has been elaborated in the coded form for five factors at three levels taking into account the orthogonality and the impossibility to conduct repeatedly experiments in the chosen points.

As the conducted researches have shown that a nature of dependence of the tooth profile angle values on design and geometrical parameters of thread milling cutter is nonlinear, the second degree of an approximating polynom is accepted. As a consequence, to assess all the coefficients of the polynom of the second degree the factors have been varied at three levels.

Based on the method of planning the mathematical models are developed to calculate the tooth profile angles of thread milling cutter with helical flutes allowing to obtain the values of angles depending on a pitch of thread, a cutter diameter, a rake angle, an angle of lead of helical flutes, and a back angle. In terms of making manual calculations the obtained polynoms are cumbersome, however when using the model in CAD systems of thread milling cutters there is no need to simplify it. The represented mathematical models can be chosen as starting ones at calculation of profile angles when designing the thread milling cutters with helical flutes.

Calculation of the profile angles of the thread milling cutter under study made according to polynoms obtained for all combinations of factors has shown that an error of calculated values in comparison with the values obtained using a geometrical model does not exceed 1.3% that makes $0^{\circ}24'$ and is no more than a tolerance for a half of tooth profile angle according to GOST 1336-77.

Publications with keywords: [mathematical model](#), [thread milling cutter](#), [profile angle](#)
Publications with words: [mathematical model](#), [thread milling cutter](#), [profile angle](#)

References

1. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Design of experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russian).
2. Mal'kov O.V., Litvinenko A.V. Obshchiy sluchay profilirovaniya zub'ev rez'bovoy chasti sverloz'bofrezy [General case of profiling teeth of threaded part of drill-thread mill]. *Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 1997, no. 2, pp. 77-84. (in Russian).
3. Mal'kov O.V. [Teeth profiling of thread milling cutters with helical flutes]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 6. DOI: 2013, no. 6. DOI: [10.7463/0613.0579350](https://doi.org/10.7463/0613.0579350) (in Russian).
4. Mal'kov O.V. [Design and research of calculation models of the tooth profile angles of thread milling cutter with helical flutes]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 3. DOI: [10.7463/0314.0702743](https://doi.org/10.7463/0314.0702743) (in Russian).
5. Semenchenko I.I., Matyushin V.M., Sakharov G.N. *Proektirovanie metallorazhushchikh instrumentov* [Design of metal-cutting tools]. Moscow, Mashgiz, 1962. 952 p. (in Russian).
6. Kartsev S.P. *Instrument dlya izgotovleniya rez'by* [Tool for manufacturing thread]. Moscow, Mashgiz, 1955. 252 p. (in Russian).
7. Levitskiy M.Ya. *Rez'bofrezerovanie* [Thread milling]. Kiev, Mashgiz: Ukrainian department, 1950. 192 p. (in Russian).
8. Levitskiy M.Ya. *Osnovy rez'bofrezerovaniya* [Basics of thread milling]. Kiev, Mashgiz: Ukrainian department, 1953. 156 p. (in Russian).
9. Titov A.I. [Manufacturing of thread milling cutters with spiral grooves and rake angle $\gamma > 0$]. *Kholodnaya obrabotka metallov: sb. statey* [Cold working of metals: collected papers]. Moscow, NIAT, Oborongiz Publ., 1958, pp. 13-17. (Ser. *Peredovoy opyt proizvodstva* [Advanced production experience]; iss. 7). (in Russian).
10. Pikalov B.I., Pashko N.M., Zhigalov V.I. [Study of the dependence of parameters of the thread profile in the system of detail - tap]. *Issledovaniya v oblasti tekhnologii obrazovaniya naruzhnykh i vnutrennikh rez'b, rez'boobrazuyushchikh instrumentov, stankov i metodov kontrolya rez'b: sb. statey* [Research in technology of formation of external and internal threads, tools for tapping, machine tools and methods of control of threads: collected papers]. Tula, TPI Publ., 1974, pp. 134-141. (in Russian).