

УДК 621.9

Анализ применения дробных факторных планов в технологических исследованиях на примере механической обработки

Малькова Л. Д.^{1,*}

^{*}ludmma@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Современные исследователи широко применяют факторное планирование и, как следствие, полиномиальную модель изучаемого технологического процесса. Но ни математические, ни технико-технологические источники не дают рекомендаций по декодированию с учетом смешанных оценок в натуральные значения получаемой полиномиальной модели и не прогнозируют погрешность из-за сокращения числа опытов в два раза и более раз при планировании дробных реплик. Целью предлагаемой работы является экспериментально-расчетная оценка указанной погрешности при различных вариантах декодирования полиномиальной модели на примере формирования и реализации дробного факторного планирования $1/4$ -реплики при исследовании тангенциальной составляющей силы резания при наружном продольном точении.

Ключевые слова: дробный факторный эксперимент, сила резания, точение

Введение

Правильный выбор математической модели для описания того или иного технологического процесса является базовым условием адекватности модели и ее последующего корректного использования. Планирование эксперимента в технологических исследованиях будет рассмотрено на примере механической обработки. Основными особенностями этого технологического процесса являются большое количество параметров обработки, участвующих, взаимодействующих и влияющих на исследуемую характеристику, а также непостоянство указанных параметров в процессе исследования. Примерами могут служить изменяющийся износ режущего инструмента, переменная твердость обрабатываемого материала, изменяющийся из-за отжаты и вибраций припуск, усложненная стружколомами передняя поверхность режущей пластины и т.д. В совокупности это предопределило выбор многими исследователями мультипликативных моделей с большим количеством поправочных коэффициентов [1-5]. Недостатки такого подхода с примерами различных методов механической обработки рассмотрены в литературе [6,7], где показаны большие процентные расхождения расчетных результатов, выполненных по различным

источникам. Современные авторы, располагающие возросшими возможностями вычислительной техники, все более широко в исследованиях применяют факторное планирование и, как следствие, полиномиальную модель изучаемого технологического процесса [8-10]. Адекватность таких математических моделей и возможность анализа процесса механической обработки на их основе рассмотрена в работе [11]. В большинстве случаев исследователи используют полный факторный план эксперимента, иногда представляя результирующий полином только в кодированном виде.

Рассмотрим возможность формирования и реализации полного факторного плана исследования тангенциальной составляющей силы резания при точении. На основании обзора литературных источников [7] в качестве факторов, влияющих на тангенциальную составляющую силы резания при точении, приняты глубина резания t , подача S_0 , скорость резания v , твердость обрабатываемого материала HB, передний угол γ и величина износа по задней поверхности h_z . Число опытов N в полном факторном эксперименте определяется числом всех сочетаний уровней факторов, т.е. $N = mk$, где m – число уровней каждого фактора, k – число факторов. Таким образом, при $k = 6$ минимальное число опытов на двух уровнях планирования составляет 64. Поскольку математическая обработка результатов может осуществляться при равномерном дублировании опытов, при неравномерном дублировании и при отсутствии дублирования, но в управляемом эксперименте рекомендовано обеспечить равномерное дублирование [12], то при трехкратном повторении общее число замеров в эксперименте с двумя уровнями варьирования факторов составит 192. Очевидно, что обеспечить технологические мероприятия, позволяющие сохранить условия обработки близкими к постоянным в ходе эксперимента со 192 опытами невозможно. Для достоверности полученных результатов при исследованиях динамических характеристик при точении необходимо предельно сократить время непосредственного участия режущего лезвия в процессе обработки, чтобы величина износа, установленная в плане эксперимента, была близка к постоянной; вести обработку в области с минимальным отжати-ем заготовки, вызывающем вибрации и изменение глубины резания; проводить замеры составляющих силы резания на одном диаметре заготовки, чтобы сохранить идентичные условия в зоне резания, минимизировать влияние рассеивания некоторых параметров [13,14] и т.д. Перечисленные технологические требования определяют необходимость предельно возможного сокращения количества опытов и их продолжительности для определения составляющих силы резания. Такую возможность дает математический аппарат, реализующий дробный факторный план эксперимента. Но ни математические, ни технико-технологические источники не дают рекомендаций по декодированию с учетом смешанных оценок в натуральные значения получаемой полиномиальной модели и не прогнозируют погрешность из-за сокращения числа опытов в два раза при планировании $1/2$ -реплики и в четыре раза при планировании $1/4$ -реплики.

Целью предлагаемой работы является экспериментально-расчетная оценка указанной погрешности при различных вариантах декодирования полиномиальной модели на примере формирования и реализации дробного факторного планирования $1/4$ -реплики 2^{6-2}

при исследовании тангенциальной составляющей силы резания при наружном продольном точении.

1. Формирование дробного факторного плана эксперимента

Формирование дробного факторного плана $1/4$ -реплики 2^{6-2} основано на полном факторном плане с четырьмя факторами на двух уровнях с заменой произведения $x_1x_2x_3x_4$ новым фактором x_5 и произведения $x_2x_3x_4$ новым фактором x_6 .

Общий вид полинома для дробного факторного эксперимента $1/4$ -реплики 2^{6-2} :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 \quad (1)$$

Матрица плана эксперимента приведена в таблице 1. В связи с тем, что в дробных репликах часть взаимодействий заменена новыми факторами, найденные коэффициенты уравнения регрессии будут являться совместными оценками линейных эффектов и эффектов взаимодействия.

Таблица 1. Матрица планирования для дробного факторного эксперимента $1/4$ -реплики 2^{6-2}

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4 = x_6$	$x_2x_3x_4 = x_5$	y
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	y_8
9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_9
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	y_{10}
11	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	y_{11}
12	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	y_{12}
13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	y_{13}
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_{14}
15	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	y_{15}
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	y_{16}

Генерирующие соотношения дробной реплики:

$$x_1x_2x_3x_4 = x_5; x_2x_3x_4 = x_6; \quad (2)$$

из которых сформирован обобщающий определяющий контраст $1/4$ -реплики:

$$1 = x_1x_2x_3x_4x_5 = x_2x_3x_4x_6 = x_1x_5x_6 \quad (3)$$

Схему смешивания оценок находим последовательным умножением обобщающего определяющего контраста на x_1, x_2, x_3, x_4 и т.д.:

$x_1 = x_2x_3x_4x_5 = x_1x_2x_3x_4x_6 = x_5x_6;$	$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{2345} + \beta_{12346} + \beta_{56}$
$x_2 = x_1x_3x_4x_5 = x_3x_4x_6 = x_1x_2x_5x_6;$	$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{1345} + \beta_{346} + \beta_{1256}$
$x_3 = x_1x_2x_4x_5 = x_2x_4x_6 = x_1x_3x_5x_6;$	$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{1245} + \beta_{246} + \beta_{1356}$
$x_4 = x_1x_2x_3x_5 = x_2x_3x_6 = x_1x_4x_5x_6;$	$b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{1235} + \beta_{236} + \beta_{1456}$
$x_5 = x_1x_2x_3x_4 = x_2x_3x_4x_5x_6 = x_1x_6;$	$b_5 \rightarrow \beta_5 + \beta_{1234} + \beta_{23456} + \beta_{16}$
$x_6 = x_1x_2x_3x_4x_5x_6 = x_2x_3x_4 = x_1x_5;$	$b_6 \rightarrow \beta_6 + \beta_{123456} + \beta_{234} + \beta_{15}$
$x_1x_2 = x_3x_4x_5 = x_1x_3x_4x_6 = x_2x_5x_6;$	$b_{12} \rightarrow \beta_{12} + \beta_{345} + \beta_{1346} + \beta_{256}$
$x_1x_3 = x_2x_4x_5 = x_1x_2x_4x_6 = x_3x_5x_6;$	$b_{13} \rightarrow \beta_{13} + \beta_{245} + \beta_{1246} + \beta_{356}$
$x_1x_4 = x_2x_3x_5 = x_1x_2x_3x_6 = x_4x_5x_6;$	$b_{14} \rightarrow \beta_{14} + \beta_{235} + \beta_{1236} + \beta_{456}$
$x_2x_3 = x_1x_4x_5 = x_4x_6 = x_1x_2x_3x_5x_6;$	$b_{23} \rightarrow \beta_{23} + \beta_{145} + \beta_{46} + \beta_{12356}$
$x_2x_4 = x_1x_3x_5 = x_3x_6 = x_1x_2x_4x_5x_6;$	$b_{24} \rightarrow \beta_{24} + \beta_{135} + \beta_{36} + \beta_{12456}$
$x_3x_4 = x_1x_2x_5 = x_2x_6 = x_1x_3x_4x_5x_6;$	$b_{34} \rightarrow \beta_{34} + \beta_{125} + \beta_{26} + \beta_{13456}$
$x_1x_2x_3 = x_4x_5 = x_1x_4x_6 = x_2x_3x_5x_6;$	$b_{123} \rightarrow \beta_{123} + \beta_{45} + \beta_{146} + \beta_{2356}$
$x_1x_2x_4 = x_3x_5 = x_1x_2x_3x_6 = x_2x_4x_5x_6;$	$b_{124} \rightarrow \beta_{124} + \beta_{35} + \beta_{1236} + \beta_{2456}$
$x_1x_3x_4 = x_2x_5 = x_1x_2x_6 = x_3x_4x_5x_6;$	$b_{134} \rightarrow \beta_{134} + \beta_{25} + \beta_{126} + \beta_{3456}$

2. Проведение эксперимента и обработка результатов

Эксперименты проводились на динамометрической установке на базе токарно-винторезного станках модели 16К20 с использованием универсального динамометра УДМ 600, усилителя тензометрического восьмиканального 8АНЧ-21 и компьютера с платой АЦП модели LA70M4. Наружное продольное точение стали 45 осуществлялось резцами с напайными пластинами из твердого сплава Т15К6, задним углом $\alpha = 8^\circ$, главным углом в плане $\varphi = 45^\circ$, вспомогательным углом в плане $\varphi_1 = 45^\circ$. В эксперименте использовались четыре резца, попарно имеющие передние углы $\gamma = 0^\circ$ и 15° и величину износа по задней поверхности $h_3 = 0,16$ и $0,8$ мм. Значения уровней факторов определены на основании рекомендаций для полустойковой обработки [1-5] и приведены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные для шестифакторного эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний (–1)	верхний (+1)	основной	
S_o , мм/об	x_1	0,097	0,39	0,2435	0,1465
v , м/мин	x_2	50	155	102,5	52,5
t , мм	x_3	0,5	2	1,25	0,75
НВ	x_4	200	250	225	25
γ , град	x_5	0	15	7,5	7,5
h_3 , мм	x_6	0,16	0,8	0,48	0,32

Для каждого опыта, т.е. строки в плане эксперимента, определены среднее значение тангенциальной составляющей силы резания $P_{z \text{ сред}}$, дисперсия и среднее квадратическое отклонение. Все статистические расчеты выполнены по рекомендациям [12]. С помощью G -критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости принята гипотеза однородности дисперсий, на основании чего определены коэффициенты регрессии в уравнении (4).

$$y = 536,7 + 271,7 x_1 - 3,2 x_2 + 318,6 x_3 + 25,9 x_4 - 43,8 x_5 - 22,4 x_6 - 25,3 x_1 x_2 + 170,8 x_1 x_3 + 18,3 x_1 x_4 - 11,7 x_2 x_3 - 0,9 x_2 x_4 + 29,6 x_3 x_4 - 15,2 x_1 x_2 x_3 - 16,9 x_1 x_2 x_4 + 16,1 x_1 x_3 x_4 \quad (4)$$

По критерию Стьюдента при 5%-ном уровне значимости в уравнении выявлены незначимые коэффициенты b_2 и b_{24} . Проверка полинома по F -критерию Фишера показала его адекватность. Результаты дробного факторного эксперимента 2^{6-2} , значения тангенциальной составляющей силы резания, полученные по формуле (4), и относительная погрешность сведены в протокол, представленный в таблице 3.

Таблица 3. Протокол дробного факторного эксперимента 2^{6-2}

№	Подача на оборот S_0 , мм/об	Скорость резания v , м/мин	Глубина резания t , мм	Твердость HV	Передний угол γ , град	Величина износа по задней поверхности h_z , мм	Среднее значение тангенциальной составляющей силы резания $P_{z \text{ сред}}$, Н	Расчетное по (4) значение тангенциальной составляющей силы резания $P_{z \text{ сред}}$, Н	Относительная погрешность, %
01	0,39	155	2	250	15	0,8	1255	1252,24	0,19
02	0,097	155	2	250	0	0,8	503	500,87	0,46
03	0,39	50	2	250	0	0,16	1521	1523,00	0,15
04	0,097	50	2	250	15	0,16	364	366,82	0,64
05	0,39	155	0,5	250	0	0,16	371	368,54	0,63
06	0,097	155	0,5	250	15	0,16	131	128,56	1,78
07	0,39	50	0,5	250	15	0,8	264	266,67	0,88
08	0,097	50	0,5	250	0	0,8	91	93,74	2,55
09	0,39	155	2	200	0	0,16	1243	1238,83	0,33
10	0,097	155	2	200	15	0,16	386	382,03	1,05
11	0,39	50	2	200	15	0,8	1173	1176,86	0,34
12	0,097	50	2	200	0	0,8	397	401,23	1,02
13	0,39	155	0,5	200	15	0,8	277	272,72	1,46
14	0,097	155	0,5	200	0	0,8	153	149,40	2,63
15	0,39	50	0,5	200	0	0,16	364	368,13	1,11
16	0,097	50	0,5	200	15	0,16	93	96,77	4,36

3. Декодирование полинома в натуральные значения

Принимая во внимание, что все коэффициенты представляют собой смешанные оценки, и что совместное влияние большего количества факторов в общем случае менее значимо, чем совместное влияние меньшего количества факторов, рассмотрим некоторые различные варианты декодирования полученного полинома. Схема декодирования представлена в таблице 4. Для сравнительного анализа принято решение варьировать пятью сочетаниями факторов b_{23} , b_{34} , b_{123} , b_{124} и b_{134} , в смешанных оценках которых присутствуют близкие по значимости элементы (например, в смешанной оценке $b_{23} \rightarrow \beta_{23} + \beta_{145} + \beta_{46} + \beta_{12356}$ присутствуют два парных сочетания факторов β_{23} и β_{46}). Такой подход позволит качественно оценить влияние декодирования на результирующий полином на основании анализа 32 вариантов.

Таблица 4. Схема декодирования полученного полинома

№ коэффициента		1	2	3	4	5
Коэффициент		b_{23}	b_{34}	b_{123}	b_{124}	b_{134}
Вариант декодирования	1	$x_2 x_3$	$x_3 x_4$	$x_1 x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_4$	$x_1 x_3 x_4$
	2	$x_4 x_6$	$x_2 x_6$	$x_4 x_5$	$x_3 x_5$	$x_2 x_5$

Введя обозначение вариантов декодирования, где цифра 1 или 2 обозначает номер варианта декодирования каждого коэффициента, а позиция этой цифры - номер коэффициента, получаем коэффициенты 32 декодированных полиномов (табл. 5). Для пояснения чтения таблицы приведены примеры полиномов №1 с кодом 11111 и № 28 с кодом 22122:

$$P_z = 645,52 - 1600,90 \cdot S_0 - 4,45 \cdot v - 23,60 \cdot t - 2,57 \cdot \text{HB} + 19,81 \cdot S_0 \cdot v + 508,50 \cdot S_0 \cdot t + \\ + 6,72 \cdot S_0 \cdot \text{HB} + 0,34 \cdot v \cdot t + 0,02 \cdot v \cdot \text{HB} + 0,15 \cdot t \cdot \text{HB} - 2,63 \cdot S_0 \cdot v \cdot t - 0,09 \cdot S_0 \cdot v \cdot \text{HB} + \\ + 5,85 \cdot S_0 \cdot t \cdot \text{HB} - 70,11 \cdot h_3 - 5,84 \cdot \gamma; \quad (5)$$

$$P_z = 76,96 - 1214,19 \cdot S_0 - 1,15 \cdot v + 3,28 \cdot t + 0,52 \cdot \text{HB} + 1823,72 \cdot S_0 \cdot t + 5,01 \cdot S_0 \cdot \text{HB} + \\ + 0,64 \cdot v \cdot t - 1,47 \cdot \text{HB} \cdot h_3 + 1,76 \cdot v \cdot h_3 - 2,63 \cdot S_0 \cdot v \cdot t - 3,01 \cdot t \cdot \gamma + 0,04 \cdot v \cdot \gamma + 79,53 \cdot h_3 - 6,26 \cdot \gamma$$

Используя полученные 32 декодированных полиномиальных уравнения проведен расчет тангенциальной составляющей силы резания в экспериментальных точках (табл. 3). Установлено, что расчетные значения для каждой точки, полученные по всем 32 уравнениям, являются идентичными и соответствуют расчетным значениям по уравнению (4) в кодированном виде (табл. 3). Это позволяет сделать выводы о правильности проведения декодирования и о правомерности такого вариативного подхода.

Для качественной оценки полиномов проведено экспериментальное измерение составляющих силы резания в точках заданного факторного пространства, но не входящих в план. Условия экспериментов, результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений сведены в таблицу 6.

Таблица 5. Коэффициенты декодированных полиномов

№ варианта	Комбинация	Свободный член	S_0	v	t	НВ	$S_0 \cdot v$	$S_0 \cdot t$	$S_0 \cdot \text{НВ}$	$v \cdot t$	$\text{НВ} \cdot h_k$	$v \cdot \text{НВ}$	$t \cdot \text{НВ}$	$v \cdot h_k$	$S_0 \cdot v \cdot t$	$\text{НВ} \cdot \gamma$	$S_0 \cdot v \cdot \text{НВ}$	$t \cdot \gamma$	$S_0 \cdot t \cdot \text{НВ}$	$v \cdot \gamma$	h_k	γ
1	11111	645,52	-1600,90	-4,45	-23,60	-2,57	19,81	508,50	6,72	0,34		0,02	0,15		-2,63		-0,09		5,85		-70,11	-5,84
2	11112	1077,19	-3244,93	-4,76	-343,86	-4,35	19,81	1823,72	14,03	0,34		0,02	1,58		-2,63		-0,09			0,04	-70,11	-10,02
3	11121	122,82	429,83	0,37	-1,03	-0,38	0,00	508,50	-2,30	0,34			0,15		-2,63			-3,01	5,85		-70,11	-2,08
4	11122	554,49	-1214,19	0,07	-321,28	-2,16	0,00	1823,72	5,01	0,34			1,58		-2,63			-3,01		0,04	-70,11	-6,26
5	11211	427,02	-1264,07	-3,65	42,01	-1,97	16,52	239,03	6,72	-0,30		0,02	0,15			-0,08	-0,09		5,85		-70,11	12,36
6	11212	858,69	-2908,10	-3,96	-278,24	-3,75	16,52	1554,26	14,03	-0,30		0,02	1,58			-0,08	-0,09			0,04	-70,11	8,18
7	11221	-95,68	766,67	1,17	64,59	0,23	-3,29	239,03	-2,30	-0,30			0,15			-0,08		-3,01	5,85		-70,11	16,12
8	11222	335,99	-877,36	0,87	-255,67	-1,55	-3,29	1554,26	5,01	-0,30			1,58			-0,08		-3,01		0,04	-70,11	11,94
9	12111	288,29	-1600,90	-5,30	331,52	-0,60	19,81	508,50	6,72	0,34		0,02	-1,42	1,76	-2,63		-0,09		5,85		-250,67	-5,84
10	12112	719,96	-3244,93	-5,60	11,26	-2,38	19,81	1823,72	14,03	0,34		0,02		1,76	-2,63		-0,09			0,04	-250,67	-10,02
11	12121	-234,42	429,83	-0,47	354,09	1,60	0,00	508,50	-2,30	0,34			-1,42	1,76	-2,63			-3,01	5,85		-250,67	-2,08
12	12122	197,25	-1214,19	-0,78	33,84	-0,18	0,00	1823,72	5,01	0,34				1,76	-2,63			-3,01		0,04	-250,67	-6,26
13	12211	69,78	-1264,07	-4,50	397,13	0,01	16,52	239,03	6,72	-0,30		0,02	-1,42	1,76		-0,08	-0,09		5,85		-250,67	12,36
14	12212	501,45	-2908,10	-4,80	76,88	-1,77	16,52	1554,26	14,03	-0,30		0,02		1,76		-0,08	-0,09			0,04	-250,67	8,18
15	12221	-452,92	766,67	0,33	419,71	2,20	-3,29	239,03	-2,30	-0,30			-1,42	1,76		-0,08		-3,01	5,85		-250,67	16,12
16	12222	-21,25	-877,36	0,02	99,45	0,42	-3,29	1554,26	5,01	-0,30				1,76		-0,08		-3,01		0,04	-250,67	11,94
17	21111	525,23	-1600,90	-4,82	-54,16	-1,87	19,81	508,50	6,72	0,64	-1,47	0,02	0,15		-2,63		-0,09		5,85		260,08	-5,84
18	21112	956,90	-3244,93	-5,13	-374,42	-3,65	19,81	1823,72	14,03	0,64	-1,47	0,02	1,58		-2,63		-0,09			0,04	260,08	-10,02
19	21121	2,53	429,83	0,00	-31,59	0,33	0,00	508,50	-2,30	0,64	-1,47		0,15		-2,63			-3,01	5,85		260,08	-2,08
20	21122	434,20	-1214,19	-0,31	-351,85	-1,45	0,00	1823,72	5,01	0,64	-1,47		1,58		-2,63			-3,01		0,04	260,08	-6,26
21	21211	306,73	-1264,07	-4,02	11,45	-1,26	16,52	239,03	6,72		-1,47	0,02	0,15			-0,08	-0,09		5,85		260,08	12,36
22	21212	738,40	-2908,10	-4,33	-308,81	-3,04	16,52	1554,26	14,03		-1,47	0,02	1,58			-0,08	-0,09			0,04	260,08	8,18
23	21221	-215,97	766,67	0,80	34,03	0,93	-3,29	239,03	-2,30		-1,47		0,15			-0,08		-3,01	5,85		260,08	16,12
24	21222	215,69	-877,36	0,49	-286,23	-0,84	-3,29	1554,26	5,01		-1,47		1,58			-0,08		-3,01		0,04	260,08	11,94
25	22111	168,00	-1600,90	-5,67	300,96	0,10	19,81	508,50	6,72	0,64	-1,47	0,02	-1,42	1,76	-2,63		-0,09		5,85		79,53	-5,84
26	22112	599,67	-3244,93	-5,98	-19,30	-1,68	19,81	1823,72	14,03	0,64	-1,47	0,02		1,76	-2,63		-0,09			0,04	79,53	-10,02
27	22121	-354,71	429,83	-0,85	323,53	2,30	0,00	508,50	-2,30	0,64	-1,47		-1,42	1,76	-2,63			-3,01	5,85		79,53	-2,08
28	22122	76,96	-1214,19	-1,15	3,28	0,52	0,00	1823,72	5,01	0,64	-1,47			1,76	-2,63			-3,01		0,04	79,53	-6,26
29	22211	-50,51	-1264,07	-4,87	366,57	0,71	16,52	239,03	6,72		-1,47	0,02	-1,42	1,76		-0,08	-0,09		5,85		79,53	12,36
30	22212	381,16	-2908,10	-5,17	46,32	-1,07	16,52	1554,26	14,03		-1,47	0,02		1,76		-0,08	-0,09			0,04	79,53	8,18
31	22221	-573,21	766,67	-0,04	389,15	2,91	-3,29	239,03	-2,30		-1,47		-1,42	1,76		-0,08		-3,01	5,85		79,53	16,12
32	22222	-141,54	-877,36	-0,35	68,89	1,13	-3,29	1554,26	5,01		-1,47			1,76		-0,08		-3,01		0,04	79,53	11,94

Таблица 6. Результаты экспериментов в случайных точках описанного факторного пространства

№	S_0 , мм/об	v , м/мин	t , мм	НВ	γ , град	h_z , мм	P_z сред, Н
1	0,195	94	0,5	250	15	0,8	185
2	0,26	94	1	200	15	0,8	481

Результаты расчетных значений в указанных случайных точках представлены в таблице 7.

Анализ данных таблицы 7 показывает, что сокращение числа опытов на 75%, что соответствует $\frac{1}{4}$ -реплики полного факторного эксперимента, приводит к снижению точности полинома в неэкспериментальных точках факторного пространства. Установлено, что подобный вариативный подход к декодированию позволяет выявить приоритеты внутри смешанной оценки. В частности, во всех случаях расчета в смешанной оценке b_{134} сочетание $S_0 \cdot t \cdot \text{НВ}$ имеет преимущество перед сочетанием $v \cdot \gamma$, а в смешанной оценке b_{124} сочетание $t \cdot \gamma$ имеет преимущество перед сочетанием $S_0 \cdot v \cdot \text{НВ}$. В оставшихся восьми вариантах полинома с номерами №№ 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27 и 31 отклонение от экспериментальных значений колеблется в диапазоне от 16% до 45%, что указывает на необходимость дополнительного анализа полиномов, получаемых на основе дробного факторного эксперимента.

Таблица 7. Результаты расчета тангенциальной составляющей силы резания по полученным полиномам в случайных точках (табл. 6)

№ варианта полинома	Комбинация	Расчетное значение тангенциальной составляющей силы резания $P_{z \text{ расч. Н}}$		Отклонение расчетного значения от экспериментального, %	
		в первой случайной точке	во второй случайной точке	в первой случайной точке	во второй случайной точке
1	11111	110,60	370,32	40,3	23,0
2	11112	102,69	367,12	44,6	23,6
3	11121	128,44	376,27	30,7	21,7
4	11122	120,52	373,07	35,0	22,4
5	11211	94,62	385,58	48,9	19,8
6	11212	86,71	382,38	53,2	20,5
7	11221	112,46	391,53	39,3	18,6
8	11222	104,55	388,33	43,6	19,2
9	12111	135,40	355,67	26,9	26,0
10	12112	127,49	352,46	31,2	26,7
11	12121	153,24	361,62	17,3	24,8
12	12122	145,33	358,42	21,6	25,4
13	12211	119,43	370,92	35,6	22,8
14	12212	111,51	367,72	39,8	23,5
15	12221	137,26	376,87	25,9	21,6
16	12222	129,35	373,67	30,2	22,3
17	21111	100,76	382,69	45,6	20,4
18	21112	92,85	379,49	49,9	21,1
19	21121	118,60	388,65	36,0	19,2
20	21122	110,69	385,44	40,3	19,8
21	21211	84,78	397,95	54,2	17,2
22	21212	76,87	394,75	58,5	17,9
23	21221	102,62	403,90	44,6	16,0
24	21222	94,71	400,70	48,9	16,7
25	22111	125,56	368,04	32,2	23,4
26	22112	117,65	364,84	36,5	24,1
27	22121	143,40	373,99	22,6	22,2
28	22122	135,49	370,79	26,9	22,9
29	22211	109,59	383,30	40,9	20,3
30	22212	101,67	380,09	45,1	20,9
31	22221	127,42	389,25	31,2	19,0
32	22222	119,51	386,05	35,5	19,7

Выводы

1. Использование дробных факторных планов в технологических исследованиях может быть вызвано необходимостью сокращения количества опытов и их продолжительности.

сти для сохранения постоянства технологических параметров обработки и повышения достоверности полученных результатов.

2. Наличие смешанных оценок в результирующем полиномиальном уравнении в кодированном виде позволяет провести его декодирование с учетом вариативности сочетаний факторов.

3. Расчетные значения для каждой точки факторного эксперимента, полученные по всем декодированным уравнениям, являются идентичными и соответствуют расчетным значениям по уравнению в кодированном виде, что позволяет сделать выводы о правильности проведения декодирования и о правомерности такого вариативного подхода.

4. Сокращение числа опытов на 75%, что соответствует $1/4$ -реплики полного факторного эксперимента, приводит к снижению точности полинома в неэкспериментальных точках факторного пространства.

5. Вариативный подход к декодированию позволяет выявить приоритеты внутри смешанной оценки. В частности, во всех случаях рассмотренного экспериментально-расчетного исследования в смешанной оценке b_{134} сочетание $S_0 \cdot t \cdot \text{HB}$ имеет преимущество перед сочетанием $v \cdot \gamma$, а в смешанной оценке b_{124} сочетание $t \cdot \gamma$ имеет преимущество перед сочетанием $S_0 \cdot v \cdot \text{HB}$.

6. В рассмотренном экспериментально-расчетном исследовании отклонение значений, полученных по декодированным полиномам в неэкспериментальных точках факторного пространства, от экспериментальных значений колеблется в диапазоне от 16% до 45%, что указывает на необходимость дополнительного анализа полиномов, получаемых на основе дробного факторного эксперимента.

Список литературы

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985-1986. Т.2. 1985. 496 с.
2. Барановский Ю.В., Брахман Л.А., Гдалевич А.И. и др. Режимы резания металлов: Справочник; под ред. А.Д. Корчемкина. 4-е изд., перераб. и доп. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
3. Грановский Г.И., Грудов П.П., Кривоухов В.А. и др. Резание металлов; под ред. В.А. Кривоухова. М.: Машгиз, 1954. 472 с.
4. Локтев А.Д., Гущин И.Ф., Батуев В.А. и др. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: в 2 т. М.: Машиностроение, 1991. Т.1. 640 с.
5. Локтев А.Д., Гущин И.Ф., Балашов Б.Н. и др. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: в 2 т. / М.: Машиностроение, 1991. Т.2. 304 с.
6. Грановский Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. М.: Машиностроение, 1982. 112 с.

7. Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2007. № 8. С. 53-61.
8. Мальков О.В., Малькова Л.Д. Разработка математической модели углов профиля зубьев резбовых фрез с винтовыми стружечными канавками // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. DOI: [10.7463/0414.0707227](https://doi.org/10.7463/0414.0707227) (дата обращения 17.10.2016).
9. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С. Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. №2 (29). С. 44-49.
10. Злыгостев А.М., Бобошко А.И., Сариллов М.Ю. Исследование режимов электроимпульсной обработки стали Р9К5 методом планирования многофакторных экспериментов // Металлообработка. 2004. № 3(21). С.10-12.
11. Малькова Л.Д., Чихарева М.А. Исследование характеристик токарной обработки на основе получения и анализа многомерных полиномиальных зависимостей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2013. №8. DOI: [10.7463/0813.0589299](https://doi.org/10.7463/0813.0589299) (дата обращения 17.10.2016).
12. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
13. Малькова Л.Д. Влияние величины припуска поковок на энергоемкость механической обработки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 65-73. DOI: [10.7463/1015.0815492](https://doi.org/10.7463/1015.0815492) (дата обращения 17.10.2016).
14. Малькова Л.Д. Влияние рассеивания твердости поковок на энергоемкость механической обработки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 101-110. DOI: [10.7463/1115.0823350](https://doi.org/10.7463/1115.0823350) (дата обращения 17.10.2016).

Analyzing the Application of Fractional Factorial Plans in Technological Researches: the Case of Machining

L.D. Mal'kova^{1,*}

^{*}ludmma@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: fractional factorial experiment, cutting force, turning

The aim is to give an experimental and computational estimate of the error in various decoding options of a polynomial model, using as an example, formation and implementation of fractional factorial planning (FFP) of $1/4$ -replica 2^{6-2} when investigating a tangential component of the cutting force in outer longitudinal turning. To achieve this aim is formed a FFP of the experiment with previously identified six factors such as feed S_0 , cutting speed v , cutting depth t , workpiece material hardness HB, face angle γ , flank-wear rate h_3 , which affect the desired function. According to the plan, have been conducted experimental studies, and a polynomial model in coded form has been obtained. Mixed estimates enabled to identify 32 options of decoding models in naturalness and obtain appropriate polynomials. Analysis of 32 polynomials has shown that the calculated values for each point of the factorial experiment, obtained for all decoded equations are identical and correspond to the calculated values from the equation in encoded form. This allows us to draw conclusions that decoding is correct and such a variability approach is proper. The variability approach to decoding allows us to identify priorities within the mixed estimate. In particular, in all cases of the experimental and computational study under consideration, the $S_0 \cdot t \cdot HB$ combination has advantage over the $v \cdot \gamma$ combination while the $t \cdot \gamma$ combination takes precedence over the $S_0 \cdot v \cdot HB$ one. Reducing the number of experiments by 75%, which corresponds to $1/4$ -replica of full factorial experiment, reduces the accuracy of the polynomial in non-experimental points of the factor space. In particular, in the experimental and computational study under consideration, a deviation of values derived from the decoded polynomials in non-experimental points of the factor space from experimental values is in the range from 16% to 45%, thereby showing that there is a need to analyze further the polynomials based on the fractional factorial experiment.

References

1. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ia: v 2 t. [Manual of technologist-machine engineer: in 2 volumes]; under the editorship of A.G. Kosilova and R.K. Meshcheriakov.

- Mashinostroenie* = *Mechanical Engineering*, 4th revised and corrected edition. Moscow, 1985-1986. Vol. 2. 1985. P. 496.
2. Baranovskii Iu.V., Brakhman L.A., Gdalevich A.I. at al. Rezhimy rezaniia metallov: Spravochnik [Metal cutting modes: Manual]; under the editorship of A.D. Korchemkin. *NIITavtoprom Institute*. 4th revised and corrected edition. Moscow, 1995. P. 456.
 3. Granovskii G.I., Grudov P.P., Krivoukhov V.A. at al. Rezanie metallov [Metal cutting]; under the editorship of V.A. Krivoukhov. *Mashgiz*. Moscow, 1954. P. 472.
 4. Loktev A.D., Gushchin I.F., Batuev V.A. at al. Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniia: Spravochnik: v 2 t. [Engineering industry's standards of cutting modes: Manual: in 2 volumes]. *Mashinostroenie* = *Mechanical Engineering*. Moscow, 1991. Vol. 1. P. 640.
 5. Loktev A.D., Gushchin I.F., Balashov B.N. at al. Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniia: Spravochnik: v 2 t. [Engineering industry's standards of cutting modes: Manual: in 2 volumes]. *Mashinostroenie* = *Mechanical Engineering*. Moscow, 1991. Vol. 2. P. 304.
 6. Granovskii G.I. Obrabotka rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy rezaniia metallov. *Mashinostroenie* = *Mechanical Engineering*. Moscow, 1982. P. 112.
 7. Dreval' A.E., Mal'kova L.D. Sovmestnoe vliianie parametrov mekhanicheskoi obrabotki na velichinu sostavliaiushchikh sily rezaniia. *Izvestiya VUZov. Ser. Mashinostroenie* = *News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering Series*. 2007. No. 8. P. 53-61.
 8. Mal'kov O.V., Mal'kova L.D. Razrabotka matematicheskoi modeli uglov profil'nykh zub'ev rez'bovykh frez s vintovymi struzhechnymi kanavkami. *Nauka i obrazovanie* = *Science and education*. Scientific edition of Bauman MSTU "Science & Education". 2014. No. 4. DOI: [10.7463/0414.0707227](https://doi.org/10.7463/0414.0707227) accessed 17.10.2016.
 9. Dmitriev A.M., Korobova N.V., Tolmachev N.S. Eksperimental'naya proverka rezul'tatov komp'iuternogo modelirovaniia napriazhenii na elemente deformiruiushchego instrumenta. *Vestnik MGTU Stankin* [Herald of the MSTU "Stankin"]. 2014. No. 2 (29). P. 44-49.
 10. Zlygostev A.M., Boboshko A.I., Sarilov M.Iu. Issledovanie rezhimov elektroimpul'snoi obrabotki stali R9K5 metodom planirovaniia mnogofaktornykh eksperimentov. *Metalloobrabotka* = *Metalworking*. 2004. No. 3(21). P. 10-12.
 11. Mal'kova L.D., Chikhareva M.A. Issledovanie kharakteristik tokarnoi obrabotki na osnove polucheniia i analiza mnogomernykh polinomial'nykh zavisimostei. *Nauka i obrazovanie* = *Science and education*. Scientific edition of Bauman MSTU "Science & Education". 2013. No. 8. DOI: [10.7463/0813.0589299](https://doi.org/10.7463/0813.0589299) accessed 17.10.2016.
 12. Spiridonov A.A. Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov. *Mashinostroenie* = *Mechanical Engineering*. Moscow, 1981. P. 184.
 13. Mal'kova L.D. Vliianie velichiny pripuska pokovok na energoemkost' mekhanicheskoi obrabotki. *Nauka i obrazovanie* = *Science and education*. Scientific edition of Bauman

MSTU “Science & Education”. 2015. No. 10. P. 65-73. DOI: [10.7463/1015.0815492](https://doi.org/10.7463/1015.0815492) accessed 17.10.2016.

14. Mal'kova L.D. Vliianie rasseivaniia tverdsti pokovok na energoemkost' mekhanicheskoi obrabotki. *Nauka i obrazovanie = Science and education*. Scientific edition of Bauman MSTU “Science & Education”. 2015. No. 11. P. 101-110. DOI: [10.7463/1115.0823350](https://doi.org/10.7463/1115.0823350) accessed 17.10.2016.