

распределения Пуассона генерируется K независимых реализаций полного числа событий N_k ($k = 1, \dots, K$).

2. *Биннирование данных.* Весь угловой диапазон детектора делится на n угловых интервалов, которые называются бинами. Для каждой реализации N_k события распределяются по бинам согласно мультиномиальному распределению с вероятностями $p_i = \sigma_i^{SM} / \sigma^{SM}$, где σ_i^{SM} – сечение в i -м бине. В результате формируется ансамбль из K гистограмм «псевдоэкспериментальных» чисел событий.

3. *Построение ковариационной матрицы.* По полученному ансамблю гистограмм вычисляется усредненная гистограмма и полная ковариационная матрица V размерности $n \times n$. Без учета систематики, она диагональна, однако моделирование позволяет включить в нее корреляции между бинами, возникающие из-за неопределенностей светимости, поляризации и эффективности детектирования конечных фермионов.

Данная схема позволяет избежать упрощений, характерных для асимптотических методов. Во-первых, она наглядно демонстрирует влияние статистических флуктуаций. Во-вторых, она позволяет корректно учитывать корреляции между угловыми бинами, что важно для реалистичной оценки чувствительности MuC.

Статистическое моделирование будущих данных на MuC необходимо для подготовки физической программы коллайдера и позволяет учесть корреляцию между угловыми бинами, обусловленную неопределенностями светимости, поляризации и эффективности детектирования конечных фермионов.

Литература

1. Review of particle physics [Particle Data Group Collaboration] / S. Navas [et al.] // Phys. Rev. D. – 2024. – Vol. 110, N 3. – 030001. – URL: <https://pdg.lbl.gov> (date of access: 20.03.2026).
2. The physics case of a 3 TeV muon collider stage / de Blas Jorge and others // FERMILAB-CONF-22-317-AD-ND-PPD-SCD-TD. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2203.07261> (date of access: 21.03.2026).
3. Accelerators for Electroweak Physics and Higgs Boson Studies / Faus-Golfe A. [et. al.] – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2209.05827> (date of access: 22.03.2026).
4. Sinegribov D. V., Andreev V. V., Serenkova I. A., Analysis of the indirect manifestation of extra Z' -boson at ILC and CLIC // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2025. – Vol. 22. – N 5. – P. 1111–1114.
5. Statistical Methods in Experimental Physics (2nd Edition) / W. Eadie, D. Drijard, F. James, M. Roos, B. Sadoulet // Journal of the American Statistical Association. – 2013. – P. 1–341. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/243672952> (date of access: 28.08.2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д. И. Зеленковский

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель О. А. Лапко

*Рассмотрено математическое моделирование операций механической обработки,
достоинства и недостатки, область применения.*

Ключевые слова: топография, обработанная поверхность, торцовое фрезерование, имитационный подход, моделирование резания.

Математические модели топографии обработанных поверхностей в первую очередь можно подразделить на статистические и динамические. Динамические модели учитывают изменение каких-либо своих параметров во времени, а статистические – не учитывают этого.

Если в модели не учитывается влияние случайных факторов, то такая модель является детерминированной. Если случайные факторы заменяются на их средние значения, такая модель называется моделью математического ожидания. В отличие от моделей математического ожидания, стохастические модели учитывают распределения случайных параметров и позволяют определять не только средние, но и колебания выходных параметров вплоть до получения их функции распределения.

Имитационные модели по структуре подобны исходной системе и должны быть ориентированы на проведение численных экспериментов. Имитационные модели часто являются динамическими и стохастическими и при правильном построении позволяют заменять экспериментальные исследования на численные эксперименты с моделью.

Модели «черного ящика» в некотором смысле противоположны имитационным. Они не предполагают вскрытия внутренней структуры системы, а только соответствуют ей по входам и выходам. Эти модели обычно проще имитационных, хотя могут допускать проведение численных экспериментов. Чаще всего модели «черного ящика» получают обработкой экспериментальных данных.

Так, С. Л. Леонов и В. Н. Некрасов используют метод математического моделирования. Математическую модель формирования топографии поверхности при торцевом фрезеровании они представляют в виде «черного ящика» (рис. 1) [1].

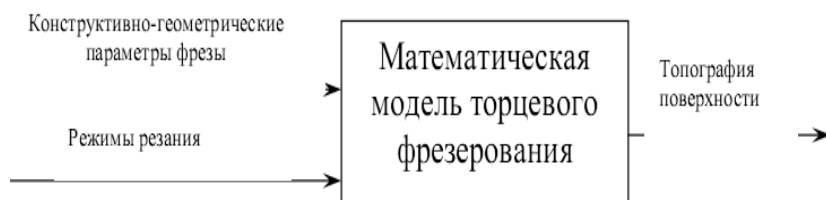


Рис. 1. Модель в виде черного ящика

Математическую модель торцевого фрезерования они разделяют на составные части: модель инструмента, модель обрабатываемой поверхности и модель процесса резания.

Предлагаемая математическая модель инструмента использует фрезу с равномерно распределенными по окружности зубьями с интервалом $(360/N)^\circ$. Фреза имеет следующие конструктивно-геометрические параметры: диаметр D , количество зубьев N , профиль зуба в осевой плоскости.

Предполагается, что все зубья фрезы имеют одинаковые геометрические параметры и соответственно одинаковые профили в осевых плоскостях.

В данной координатной плоскости задавался набор точек, описывающих профиль зуба. По набору точек строилась сплайн функция.

Обрабатываемую поверхность, а точнее рассчитываемый участок представляли в виде сетки.

Координаты узлов сетки постоянны, а координата Y вычислялась при расчете топографии. Сетка задавалась при помощи следующих параметров: координаты базового узла сетки; длина и ширина контролируемого участка; шаг сетки вдоль осей.

Топография обработанной поверхности получалась путем вырезания профиля зуба с учетом кинематики его движения, из исходного тела заготовки. При моделировании выполнялся последовательный расчет параллельных профилограмм, расположенных вдоль одной из осей L или C . Имея набор рассчитанных профилограмм, не составляет труда сформировать топографию обработанной поверхности.

В своей работе [2] В. А. Хоменко и С. Л. Леонов используют метод имитационного моделирования при проектировании торцовых фрез.

При проектировании торцовых фрез, наиболее важными параметрами являются конструктивно-геометрические, а именно диаметр фрезы, количество зубьев, геометрия зубьев инструмента и материал режущей части. Каждый из них, так или иначе, влияет на параметры качества обработанной поверхности, мощность резания, производительность.

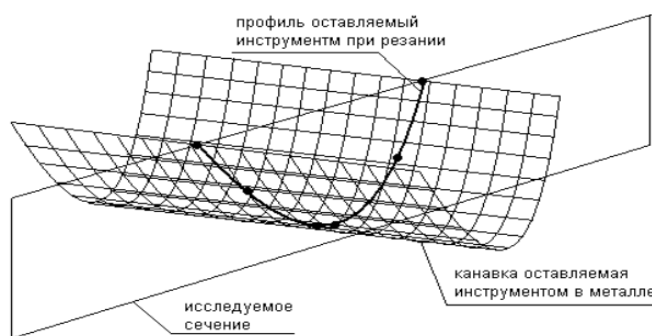


Рис. 2. Использование имитационного подхода при моделировании резания

Для быстрого и эффективного проектирования торцовых фрез предлагается использование разработанной модели, позволяющей оценить качество обработанной поверхности при различных параметрах инструмента и режима резания. Модель реализована в виде программы и обладает неограниченной свободой выбора параметров инструмента и режима резания. При моделировании процесса фрезерования использовался имитационный подход. Он позволяет при относительно простом математическом аппарате модели достаточно точно рассчитывать параметры качества обработанной поверхности. Имитационный подход заключается в следующем. Зуб режущего инструмента, при резании, внедряясь в металл, оставляет за собой прорезанную канавку, профиль сечения которой, проведенный перпендикулярно к направлению движения зуба в текущий момент времени, соответствует профилю зуба. Это означает, что при расчете профилограммы обработанной поверхности, необходимо в заданных местах, вырезать из исходного профиля заготовки профиль зуба с учетом его кинематики движения при резании. Кинематику движения зуба необходимо учитывать, так как при торцевом фрезеровании зуб совершает движение по сложной циклоидальной траектории. И при пересечении траектории зуба и исследуемой профилограммы, профиль канавки искажается. При моделировании, параллельные профилограммы рассчитывались с малым шагом друг от друга. Шаг один из задаваемых параметров моделирования. Затем из них формируется поверхность отражающая микротопографию обработанной поверхности (рис. 3), которая выводится на экран в графическом виде. По рассчитанной поверхности можно узнать параметр R_a в любом сечении, параллельном оси подачи заготовки. В силу особенностей процесса торцевого фрезерования, шероховатость на разных участках обработанной по-

верхности не одинакова, поэтому в качестве альтернативных параметров качества поверхности введены объемные: среднее квадратичное отклонение поверхности R'_a ; максимальное отклонение поверхности $R_{\max}$; относительная площадь поверхности на заданном уровне t_p .

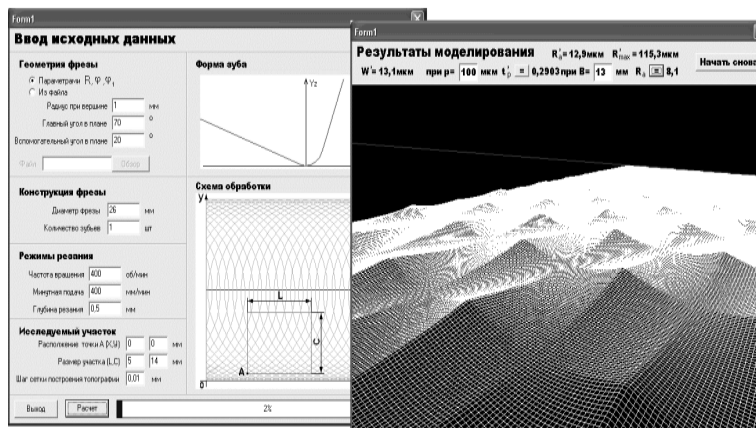


Рис. 3. Экранные формы ввода данных и вывода результата расчета

Достоинства предлагаемой модели:

- позволяет эффективно выбирать конструктивно-геометрические параметры путем подбора;
- может использоваться для проверки принятых проектных решений;
- дает возможность оценить шероховатость поверхности при заданных параметрах инструмента и режима резания.

В своей работе [2] Леонов С. Л. использует метод имитационного стохастического моделирования при проектировании торцовых фрез.

Исходными данными для моделирования являются геометрия инструмента и режим резания. Параметры режима резания задаются в блоке 1. Параметры геометрии инструмента полагаются случайными и задаются в блоке 2 законами их распределения. В соответствии с принципами стохастического моделирования расчеты производятся многократно, их количество N задается в блоке 1.

Математическое моделирование операций механической обработки по сравнению с экспериментальными исследованиями позволяет получать большее количество информации и сократить время на исследования. Эти преимущества приводят к широкому внедрению моделирования в технологические расчеты.

Литература

1. Леонов, С. Л. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования / С. Л. Леонов, А. Т. Некрасов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – 198 с.
2. Леонов, С. Л. Конструирование моделей для расчета шероховатости и топографии обработанных поверхностей / С. Л. Леонов, Е. Ю. Хоменко // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1–2. – С. 170–174.
3. Михайлов, М. И. К вопросу о методике моделирования кинематических поверхностей, сформированных режущим инструментом по различным схемам формообразования / М. И. Михайлов // Машиностроение : сб. науч. тр. – Минск, 2000. – Вып. 16. – С. 125–132.