
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 65.012.1

DOI: 10.34641/TM.2025.271.1.004

Н. А. РАГРИН, д-р техн. наук

"Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина", г. Бишкек

А. А. АЙНАБЕКОВА, ст. преподаватель, Д. М. КУРГАНОВА, докторант, Д. К. ОРОЗАКУНОВ, магистрант

"Кыргызский ГТУ им. И. Раззакова", г. Бишкек

E-mail: n_ragrin@mail.ru

Обоснование методов снижения трудоемкости технических экспериментов

В работе проведен сравнительный анализ многофакторного и однофакторного планирования технических экспериментов с целью обоснования путей и методов снижения трудоемкости технических исследований. Обоснована возможность уменьшения трудоемкости экспериментов при применении плана однофакторных экспериментов.

The paper presents a comparative analysis of multifactorial and single-factorial planning of technical experiments in order to substantiate the ways and methods of reducing the labor intensity of technical research. The possibility of reducing the labor intensity of experiments when using a single-factorial experiment plan has been substantiated.

Ключевые слова: эксперимент, фактор, уровень, техническая проблема, случайное воздействие, функция отклика

Key words: experiment, factor, level, technical problem, random effect, response function

ВВЕДЕНИЕ

Результатом любого эксперимента является решение проблемы, научной или практической, окончательное эмпирическое решение которой всегда выражается эмпирической моделью определенного математического вида, отвечающей основному своему назначению: представлять характер влияния факторов на функцию поверхности отклика. Факторами принято называть независимые переменные, степень влияния которых на объект исследования выражается величиной коэф-

фициентов искомой функции поверхности отклика, эмпирической модели. Проблемы могут быть различные, связанные с народно-хозяйственными задачами, требующими решения. Эта работа посвящена обоснованию эмпирических методов решения технических проблем с целью снижения трудоемкости экспериментов.

Анализ проблемы

На рис. 1 представлена классификация технических проблем, определяющая показате-

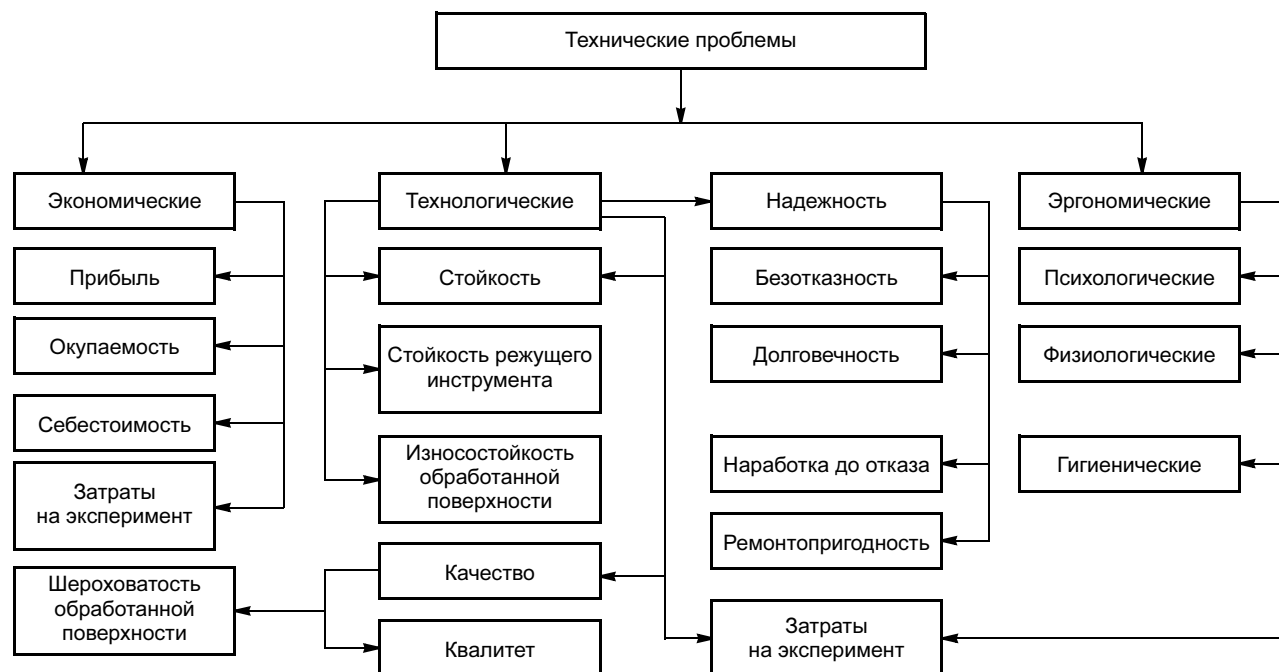


Рис. 1. Классификация технических проблем

ли технических проблем из которых основными являются экономические и технологические проблемы.

К показателям экономических проблем относятся: прибыль, окупаемость, себестоимость и затраты на эксперимент. Прибыль является основным экономическим показателем, т.к. от нее зависит эффективность любого производства. Окупаемость выделена отдельным показателем в связи с тем, что даже при значительной ожидаемой прибыли большой срок окупаемости затрат может свести ее на нет.

К показателям технологических проблем относятся: стойкость, качество, надежность и затраты на эксперимент. Стойкость в свою очередь подразделяется на стойкость режущего инструмента и износостойкость обработанной поверхности. Эти два показателя тесно связаны с качеством поверхности, квалитетом и шероховатостью. Надежность подразделяется на безотказность, долговечность, наработку до отказа и ремонтопригодность. Безотказность является основным показателем надежности, значимость которого переоценить

невозможно. Долговечность тесно связана с безотказностью, ремонтопригодностью и наработкой до отказа. Нарботка до отказа является основным критерием технологических проблем.

Чем больше средняя наработка до отказа и чем меньше дисперсия, тем выше качество изготовленных деталей. Это существенно влияет на эффективность производства, на его основной экономический показатель, прибыль. Ремонтопригодность относится только к проблемам ремонтируемых изделий. Если изделие не подлежит ремонту или его ремонт экономически нецелесообразен, то этот показатель надежности не рассматривается.

Все вышесказанное показывает наличие тесной связи между первыми двумя техническими проблемами и ставит на первое место среди них технологические проблемы.

Эргономические проблемы непосредственно связаны с людскими ресурсами, их психологическим взаимодействием, физиологическими потребностями и требованиями гигиены и в производственном процессе изделий при ре-

шении первых двух технических проблем имеют второстепенное значение.

Как видно на представленной классификации (рис. 1), затраты на эксперимент являются показателями всех представленных проблем. Они имеют немаловажное значение, потому что от них зависит трудоемкость решения этих проблем.

В связи с вышеизложенным, и в соответствии с целью исследований, необходимо решить следующие задачи исследований:

1. Разработать классификацию и провести анализ методов решения технических проблем;

2. Выполнить сравнительный анализ трудоемкости существующих методов планирования и постановки экспериментов;

3. Обосновать методы снижения трудоемкости технических экспериментов.

Результаты исследований

Классификация и анализ методов решения технических проблем

Классификация методов решения технических проблем представлена на рис. 2.

Эмпирическим методом решения проблемы является эксперимент. Известны два ме-

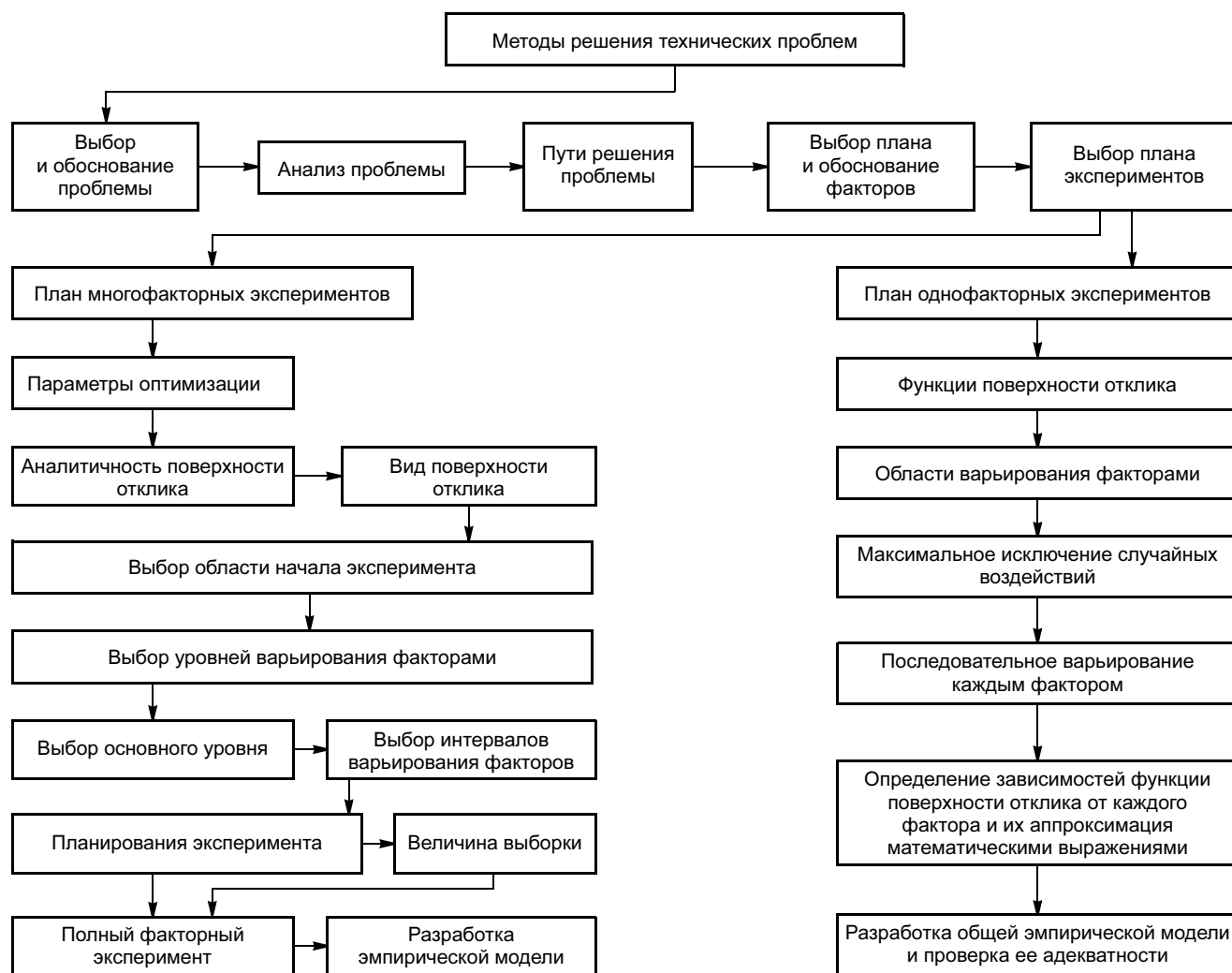


Рис. 2. Классификация методов решения технических проблем

тогда планирования и постановки экспериментов, многофакторный и однофакторный. Многофакторным планированием называют метод одновременного варьирования всеми факторами, однофакторным — метод последовательного варьирования каждым фактором при неизменных значениях остальных факторов. Независимо от метода планирования любой эксперимент начинается с выбора проблемы и обоснования ее значимости (актуальности) для той отрасли машиностроения, в которой она имеет место. Затем следует анализ проблемы, заключающийся в изучении информации содержащейся в опубликованных результатах исследований в близких к проблеме областях или методах решения аналогичных проблем. На этом этапе определяются пути решения проблемы задачи исследований, и факторы, наиболее существенно влияющие на решение поставленных задач. Завершением этих этапов исследований является выбор плана экспериментов, позволяющего с минимальной трудоемкостью построить эмпирическую модель функции отклика. В работе [1], на основании анализа большого количества источников по планированию экспериментов сделан вывод, что применение методов и приемов плана многофакторных экспериментов позволяет с наименьшими затратами решать многие, в том числе технические исследовательские задачи.

План многофакторных экспериментов

При выборе плана многофакторных экспериментов, прежде всего, необходимо иметь в виду, что для описания объекта исследования используется кибернетическая система называемая черным ящиком (рис. 3).

На входе черного ящика, слева, обозначенные X факторы, воздействующие на объект исследования. На выходе, справа, обозначенные Y численные характеристики задач исследований, параметры оптимизации. Стрелочками сверху, обозначенные W , случайные

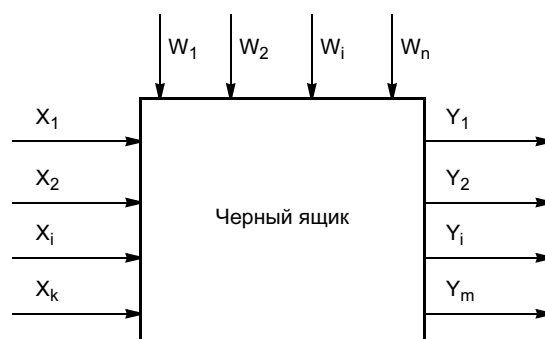


Рис. 3. Объект исследования

воздействия, от которых зависит величина выборки. На рис. 3 видно, что анализу результатов экспериментов может подлежать только степень влияния фактора на функцию отклика по величине коэффициента при конкретном факторе эмпирической модели. Название объекта исследования черным ящиком говорит о том, что в нем скрыт ответ на главный научный вопрос "почему фактор влияет именно таким образом на функцию отклика". Физическая сущность этой зависимости закрыта для исследования в черном ящике и научному анализу не подлежит. Это существенный недостаток плана многофакторных экспериментов.

Вторым существенным недостатком плана многофакторных экспериментов является обязательное условие, что параметр оптимизации уже подвергался исследованиям, информацию о которых можно получить. Такая информация, именуемая априорной, должна содержать представления о параметре оптимизации, характере и кривизне поверхности отклика, о факторах и условиях проведения процесса оптимизации. Отсутствие априорной информации ставит перед необходимостью проведения предварительных пилотных однофакторных экспериментов, что значительно повысит трудоемкость исследований, однако в ином случае при отсутствии априорной информации постановка плана многофакторных экспериментов практически не представляется возможной.

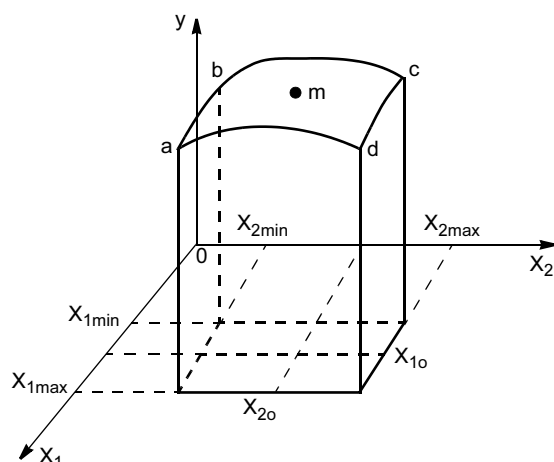


Рис. 4. Факторное пространство и поверхность отклика при двух факторах

Еще одно обязательное условие при планировании многофакторных экспериментов, это аналитическая функция отклика и наличие одного экстремума. Аналитической является функция, которую можно представить в виде степенного ряда в окрестности любой точки факторного пространства. Только при соблюдении этого условия, функцию отклика можно представить полиномом, а так как основная задача многофакторных экспериментов определить точку оптимума, точку максимума •m

поверхности отклика $abcd$ (рис. 4), или точку минимума при вогнутой поверхности отклика, используется полином первой степени. Полинома первой степени достаточно для определения направления градиента и использования шагового принципа движения по градиенту. В этом случае построение плана эксперимента сводится к выбору основных уровней факторов и интервалов варьирования (X_{10} , X_{20} и X_{1min} , X_{1max} , X_{2min} , X_{2max}) (рис. 4). Основным уровнем фактора является его численное значение X_0 (рис. 4). Точка начала эксперимента является многомерной точкой факторного пространства, состоящая из основных уровней факторов, значения которых можно получить только из априорной информации или при ее отсутствии из результатов предварительных однофакторных экспериментов.

Ранее было определено обязательное условие наличие априорной информации. В этом случае, исходя из ее значимости, мы можем располагать различными сведениями об условиях начала экспериментов, представленных на блок-схеме рис. 5.

Если априорная информация позволяет располагать только сведениями о координатах наилучшей точки, ее следует принять в качес-

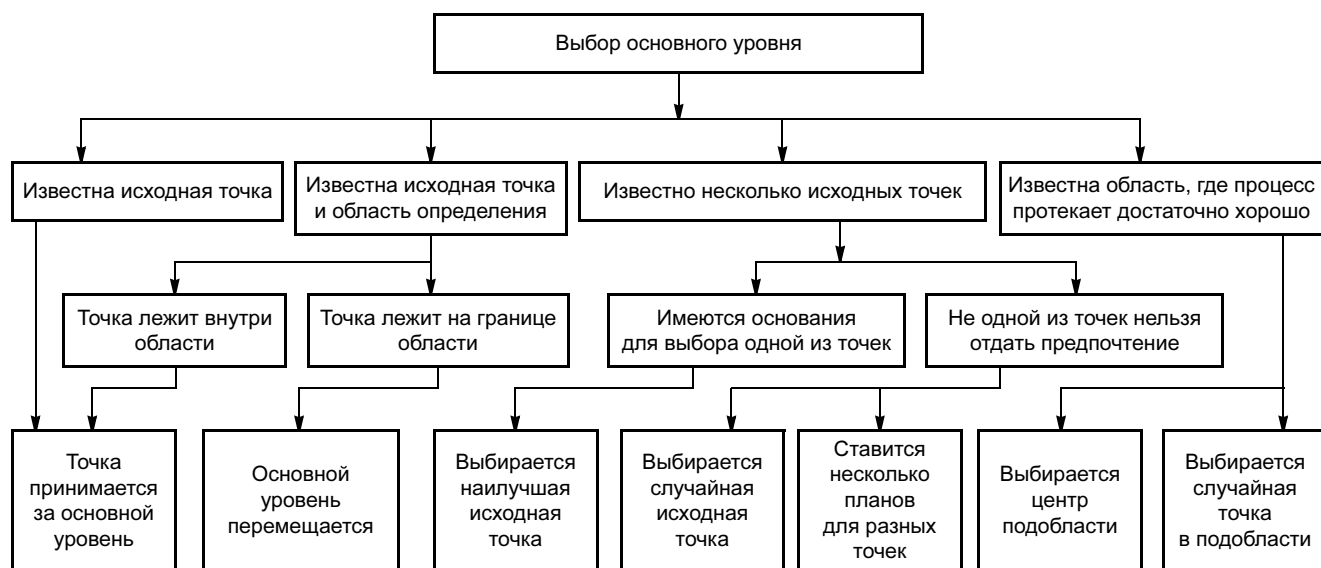


Рис. 5. Блок-схема принятия решения при выборе основного уровня

тве основного уровня. Такое же решение можно принять, если известна исходная точка и область определения фактора, при этом точка лежит внутри области. В случае, если точка лежит на границе области, основной уровень фактора следует переместить. Если известно несколько исходных точек с различными координатами и имеются основания для выбора одной из них, то выбирается лучшая исходная точка по решению экспериментатора. Если ни одной из точек нельзя отдать предпочтение, выбирается случайная исходная точка, либо ставится несколько планов для различных точек. Если координаты наилучшей точки не известны, но имеются сведения об области, где процесс протекает достаточно хорошо, и имеются сведения о ее подобласти, основной уровень выбирается либо в центре подобласти, либо, как случайная точка этой подобласти.

Выбор интервалов варьирования факторами является основной задачей плана многофакторных экспериментов. Узкий интервал варьирования может быть меньше погрешности определения фактора, слишком широкий — может превысить расстояние до точки максимума погрешности отклика (рис. 4). На рис. 6 представлена блок-схема принятия решения при выборе интервала варьирования факторами.

Синими линиями представлена схема выбора решений при низкой точности фиксирования факторов. В большинстве случаев выбирается широкий интервал варьирования. Узкий интервал варьирования не используется из-за низкой точности фиксирования факторов. Средний интервал варьирования выбирается только дважды при широком изменении параметра оптимизации и неизвестной кривизне поверхности отклика. Низкая точность фиксирования

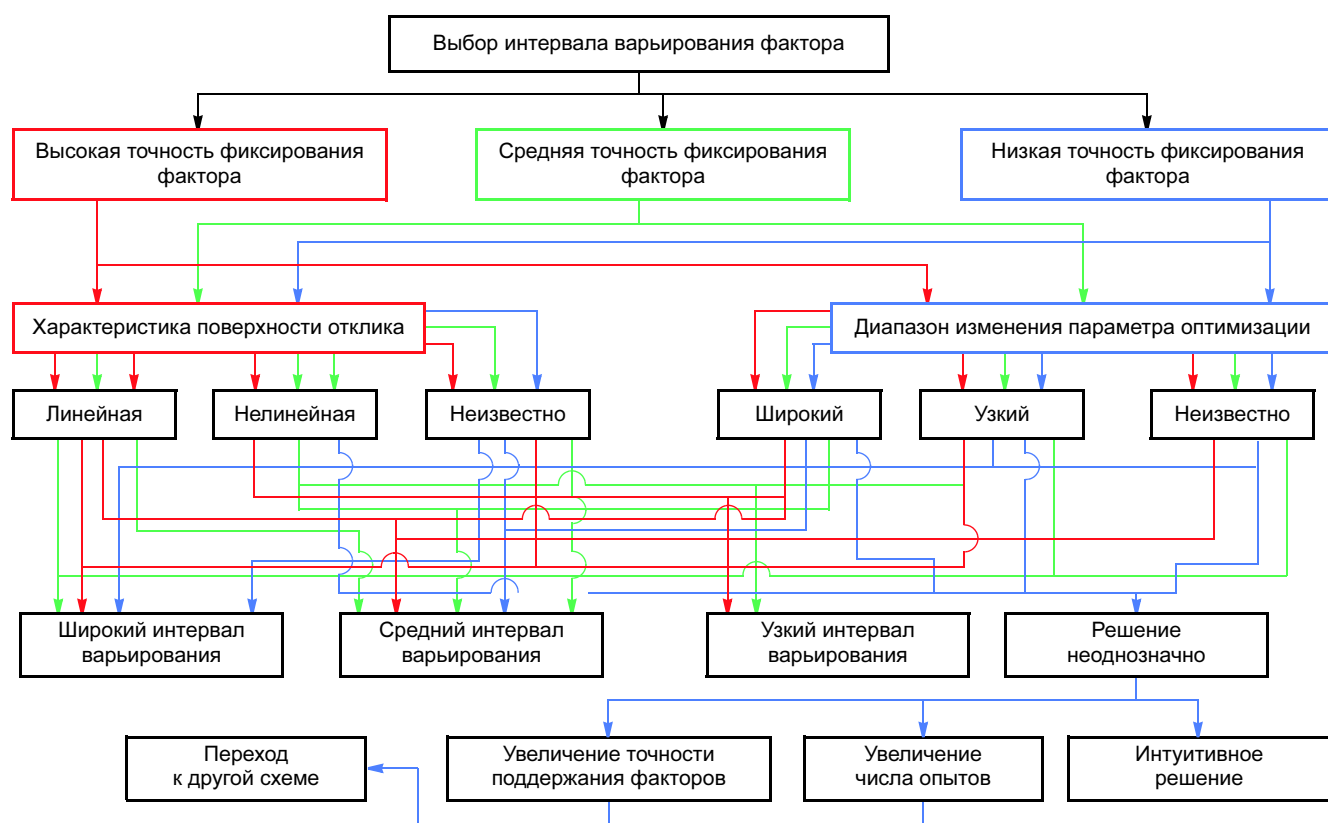


Рис. 6. Блок-схема принятия решения при выборе интервала варьирования фактора

сирования факторов не позволяет принять однозначное решение при нелинейной поверхности отклика. В этом случае необходимо либо увеличить точность эксперимента, либо увеличить число опытов, если это не связано с большой трудоемкостью, и перейти к схеме выбора решений при средней точности фиксирования факторов, в ином случае принимается интуитивное решение.

Зелеными линиями представлена схема выбора решений при средней точности фиксирования факторов. Превалирует выбор среднего интервала варьирования. Широкий интервал варьирования выбирается при линейной поверхности, узком диапазоне и при отсутствии информации о диапазоне изменения параметра оптимизации. Узкий интервал варьирования рекомендуется при нелинейной поверхности с широким диапазоном изменения параметра оптимизации.

Красными линиями представлена схема выбора решений при высокой точности фиксирования факторов. При высокой точности и нелинейной поверхности отклика при всех диапазонах параметра оптимизации выбирается узкий интервал варьирования. Довольно часто предпочтение отдается среднему интервалу и только в двух случаях широкому. В этих случаях на блок-схеме отсутствуют неоднозначные решения.

Величина выборки

От величины выборки в большой степени зависит трудоемкость экспериментов. Поэтому выборку желательно сделать минимальной, но достаточной для статистической проверки погрешности измерений — выбросов, критериями Граббса. Для использования критерия Граббса обязательным условием является нормальный закон распределения результатов экспериментов [2]. Стандарт [2] регламентирует возможность определения нормальности распределения при величине выборки $n > 15 \leq 50$ измерений. Однако, ми-

нимальная выборка из 15 измерений в соответствующее количество раз увеличивает трудоемкость экспериментов. Этот же стандарт допускает уменьшить количество измерений $n < 15$ без проверки принадлежности их к нормальному распределению настоящим стандартом, но только если заранее известно, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению. В этом случае минимальную выборку можно определить из приложения А [2]. Таблица приложения А позволяет определить величину критического значения для критерия Граббса для выборки равной трем измерениям, но при этом не должно быть выбросов, т.е. случайные воздействия должны быть устранены практически полностью.

Разработка эмпирической модели

Для получения линейной модели в виде полинома первой степени (1) достаточно

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1)$$

варьировать каждый фактор на двух уровнях, при этом, для построения матрицы планирования, значения уровней факторов кодируется. Верхний уровень значения фактора обозначается +1, нижний –1. Количество экспериментов одного этапа находится по формуле $N = 2^k$, где k число факторов. В табл. 1 приведены условия эксперимента при двух факторах на двух уровнях, где строки соответствуют числу опытов, а столбцы — значениям факторов в кодированном виде.

Таблица 1

№ опыта	X_1	X_2	Y
1	–1	–1	Y_1
2	+1	–1	Y_2
3	–1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4

Для построения эмпирической модели (1) необходимо определить коэффициенты b_0 , b_1 и b_2 . Коэффициенты b_1 и b_2 вычисляются по простым формулам

$$b_1 = \frac{(-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4}{4}, \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{(-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4}{4}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) вместо кодированных значений ставятся натуральные значения уровней факторов. Коэффициент $b_0 = \bar{Y}$.

Существенным недостатком плана многофакторных экспериментов является эмпирическая модель в виде полинома первой степени, который позволяет определить только точку экстремума функции отклика и не дает никакой информации о ее характере. Поэтому такую эмпирическую модель невозможно использовать при разработке режимов резания обработки конструкционных и других материалов на металлорежущих станках.

План однофакторных экспериментов

Функция поверхности отклика

Выше было отмечено, что полином первой степени невозможно использовать как эмпирическую модель при разработке режимов резания. Например, формулы для расчета допустимой скорости резания имеют степенной вид в которых трем факторам — стойкости, подаче и глубине резания задаются определенные значения в зависимости от вида обработки резанием, которые возводятся в определенные степени [3]. Известно, что степенные зависимости можно получить только при однофакторных экспериментах [4]. Поэтому результатом однофакторного эксперимента будет ряд степенных зависимостей, из которых строится эмпирическая модель (функция поверхности отклика).

Области варьирования факторами

В работе показано, что из технических проблем наиболее существенными являются технологические проблемы. Основными факторами, от которых зависит решение технологических проблем, представленных на рис. 1, являются параметры режима резания и прочность обрабатываемого материала. От этих факторов зависит стойкость режущего инструмента, качество обработанной поверхности и главный показатель надежности — наработка до отказа. Область варьирования факторами выбирается в зависимости от обрабатываемого и инструментального материалов и технической возможности экспериментального оборудования. При этом необходимо руководствоваться экономическими параметрами, такими, как производительность обработки и стойкость инструмента, например высокая стойкость инструмента при низкой производительности обработки, не связанная с параметрами качества обработанной поверхности нецелесообразна, как и наоборот. Поэтому экспериментатор выбирает разумные пределы области варьирования факторов, в рамках задач исследований, но с учетом достаточного количества экспериментальных точек для аппроксимации полученных зависимостей, желательно семь точек, интервал между которыми должен быть значительно выше погрешности их измерения.

Максимальное исключение случайных воздействий

Максимальное исключение случайных воздействий необходимо для максимального уменьшения величины выборки, которая зависит от случайных воздействий на измеряемую величину. На рис. 7 представлены основные методы, позволяющие исключить практически все случайные воздействия на результаты экспериментов при обработке резанием. Методы рассмотрены в рамках технологичес-

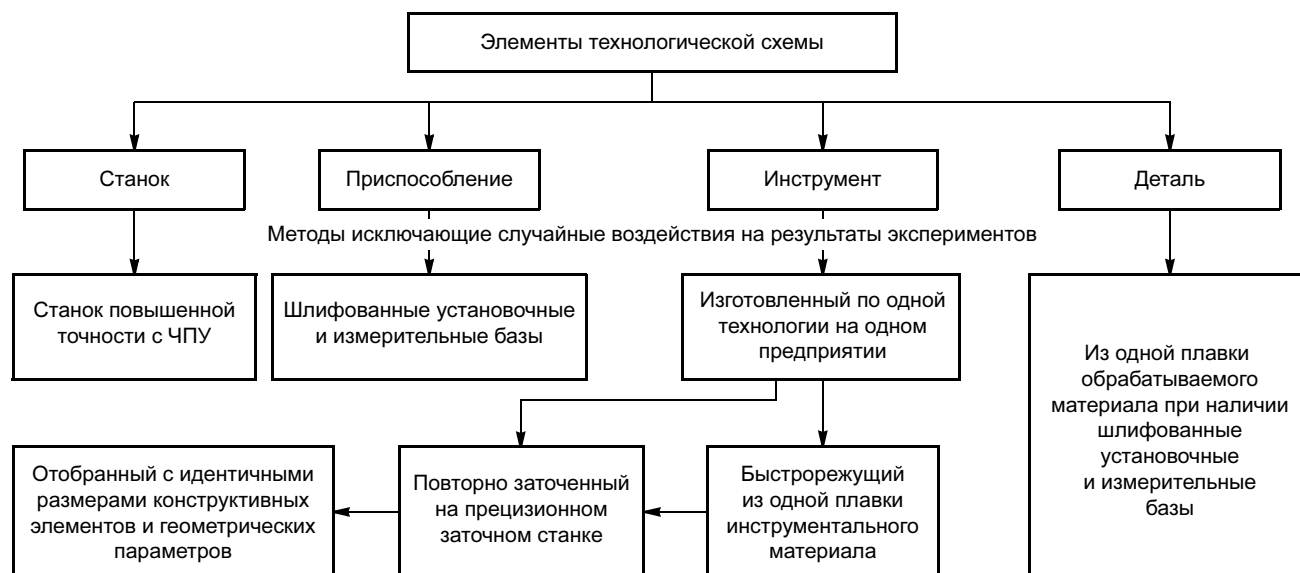


Рис. 7. Классификация методов исключения случайных воздействий на результаты технических экспериментов

кой системы: станок; приспособление; инструмент; деталь. На представленном рисунке видно, что наибольшее количество случайных воздействий возникает со стороны режущего инструмента, что связано с существенным влиянием физико-механических свойств материала режущей части инструмента, технологией его изготовления, допусками на размеры конструктивных элементов и геометрических параметров. После выполнения представленных на рис. 7 методов, величину выборки можно уменьшить до трех измерений, при условии нормальности их распределения. В работе [5] представлены положительные результаты проверки нормальности распределения технических измерений по методике стандарта [2]. Однако при этом результаты измерений первых нескольких экспериментальных точек необходимо проверить на наличие промахов по критерию Граббса [2].

Построение эмпирической модели функция поверхности отклика

Экспериментальные кривые, полученные в результатов экспериментов, аппроксимиру-

ются математическими зависимостями следующего вида: степенная $Y = aX^b$; показательная $Y = ab^X$; экспоненциальная $Y = ae^{bX}$; экстремальные $Y = aX^b e^{-CX}$ и $Y = a(X^b e^{-X^C})^n$. Затем, методом сравнения, оценивается наиболее адекватные из них. Методы аппроксимации экспериментальных кривых и сравнительного анализа адекватности полученных результатов представлены в работе [6]. Наиболее адекватные зависимости используются для построения эмпирической модели. Авторами работы [7] разработана методика, которую можно использовать для построения эмпирической модели.

ВЫВОДЫ

1. Разработана классификация методов решения технических проблем, позволившая определить основные пути их решения методами многофакторных и однофакторных экспериментов.

2. Сравнительный анализ существующих методов планирования и постановки экспериментов позволил определить, что при отсутствии априорной информации, постановка и

выполнение плана многофакторных экспериментов практически не представляется возможной, вместе с тем эмпирическую модель в виде полинома первой степени невозможно использовать при разработке режимов резания.

3. Разработаны и обоснованы методы снижения трудоемкости исследований посредством разработанной классификации исключения случайных воздействий на результаты технических экспериментов, позволяющей уменьшить величину выборки до трех измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шурин К. В., Волкова Е. К. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие для вузов / Санкт-Петербург: Лань, 2022. 336 с.
2. ГОСТ Р 8.736—2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений / М.: Стандартиформ, 2013. 19 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. 5-е изд. / М.: Машиностроение-1, 2003. 944 с. ил.
4. Методика экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки / М.: НИИМАШ, 1982. 15 с.
5. Рагрин Н. А., Курганова Д. М., Дыйканбаева У. М. Разработка методов статистического анализа эмпирических технических исследований // Технология машиностроения. 2023. № 9. С. 20—25.
6. Рагрин Н. А. Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. 2014. № 1. С. 49—54.
7. Рагрин Н. А. Методология построения моделей надежности инструментов для типа производства // Технология машиностроения. 2017. № 1. С. 50—56.

Реклама вашей продукции в нашем журнале — один из способов достижения вашего успеха!

Журнал "Технология машиностроения" предназначен для руководителей и специалистов предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в совместных исследованиях и внедрении разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и в странах дальнего и ближнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Наш журнал распространяется только по подписке — это надежная гарантия того, что ваше рекламное объявление будет прочитано именно специалистом или заинтересованным лицом, т. е. попадет точно в цель.

**Наш адрес: 127015, Москва, а/я 65,
тел.: (495) 640 7903**