

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОДУКЦИИ И
ТЕХНОЛОГИИ**

Методические указания по выполнению дополнительного раздела выпускных
квалификационных работ магистров
ФКТИ, ФРТ, ФЭЛ, ФЭА, ФИБС

Санкт-Петербург,
2025

В пособии содержится информация о материалах, которые могут быть включены в дополнительный раздел выпускной квалификационной работы студентов СПбГЭТУ «ЛЭТИ», обучающихся по основным образовательным программам магистратуры ФКТИ, ФРТ, ФЭЛ, ФЭА, ФИБС.

Методические рекомендации пособия также содержат информацию об актуальности управления качеством на этапе проектирования, обширную информацию о теоретическом аспекте робастного параметрического проектирования и пошаговую процедуру выполнения раздела с примерами выполненных этапов этой процедуры.

Оглавление

Введение	4
1 МЕТОД РОБАСТНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (РПП) В КОНТЕКСТЕ ЭВОЛЮЦИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ. ПРИМЕРЫ УСПЕШНОГО ПРИМЕНЕНИЯ.	5
2. ВВЕДЕНИЕ В УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. 8	8
2.1 РОБАСТНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ОБЗОР	8
2.2 СТАНДАРТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.	11
3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАЗДЕЛА ВКР «УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОДУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ».	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Термины, определения и обозначения в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16336	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Набор стандартных определений робастного параметрического проектирования, принятых Центром обеспечения качества фирмы AT&T Bell Laboratories	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Ортогональные планы Тагучи. Примеры.	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Применение робастного проектирования параметров в различных областях (динамические и статические характеристики). ГОСТ Р ИСО 16336	33
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Определение оценки робастности через отношение SN, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16336	37
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Процедура проведения эксперимента при параметрическом проектировании, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16336.	46
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 Параметрическое планирование экспериментов для системы охлаждения лампы.	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 Пример «Проектирование схемы температурного контроллера»	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 Пример «Снижение процента брака при производстве поликремниевых пластин. в программе STATISTICA	70
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	81

Введение

В пособии содержится информация о материалах, которые могут быть включены в дополнительный раздел выпускной квалификационной работы студентов СПбГЭТУ «ЛЭТИ», обучающихся по основным образовательным программам магистратуры ФКТИ, ФРТ, ФЭЛ, ФЭА, ФИБС. Методические рекомендации пособия также содержат: информацию об актуальности управления качеством на этапе проектирования; обширную информацию о теоретическом аспекте робастного параметрического проектирования (РПП); пошаговую процедуру выполнения дополнительного раздела с примерами выполненных этапов этой процедуры.

Цель данных методических указаний:

- помочь подготовить дополнительный раздел в составе ВКР;
- выработать умение и навыки разработки планов робастного параметрического эксперимента, применительно к основному предмету выпускной квалификационной работы студента.

Таким образом, основная разработка ВКР студента (техническая система, подсистема или её компоненты), если она выполнялась в организации, может получить дальнейшее развитие и продолжение в виде реальных экспериментов организации по планам, разработанным в рамках дополнительного раздела ВКР. И, как показано в первом разделе пособия, организация может получить реальный экономический эффект от применения РПП. Формат раздела «Управление качеством при проектировании продукции» — свободный, так как содержательный диапазон основных разделов ВКР выпускника может быть очень широкий.

В первом разделе пособия подробно освещена актуальность темы дополнительного раздела ВКР, показана эволюция методов управления качеством: от инспекционного контроля на выходе технологических операций и/или процессов, до управления качеством на этапе проектирования и продукции и технологий. Приведены примеры успешного применения метода РПП отечественными и зарубежными компаниям, в частности, в электронной и автомобильной отраслях. Также, показана актуальность метода робастного проектирования в условиях Индустрии 4.0. В частности, совместное применения метода РПП, цифровых двойников и автоматизированных систем управления процессами приводит к повышению скорости реагирования на изменения технологического процесса и улучшению робастности продукции.

Во втором разделе пособия приводится вводная теоретическая информация об управлении качеством на этапе проектирования.

В третьем разделе пособия приведена подробная процедура выполнения дополнительного раздела ВКР, которая содержит подробные указания на заполняемые формы планов робастного планирования эксперимента при параметрическом проектировании объекта, разработанного в рамках основного раздела ВКР.

Пособие содержит приложения, в которых представлена следующая информация:

- термины, определения и обозначения, применяемые в данной области;
- примеры ортогональных планов эксперимента Тагути;
- выборочные разделы стандарта ГОСТ Р ИСО 16336-2020
- многочисленные примеры применения РПП

1 МЕТОД РОБАСТНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (РПП) В КОНТЕКСТЕ ЭВОЛЮЦИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ. ПРИМЕРЫ УСПЕШНОГО ПРИМЕНЕНИЯ.

Сегодня в международных и отечественных стандартах определение термина качество в широком понимании, по-прежнему остается архаичным – соответствие требованиям¹. Архаичность этого понимания тянется с того периода, когда инспекционный контроль соответствия требованиям допускам был единственным способом обеспечения качества, другими словами, качество изделия или его компонентов контролировалось, главным образом, после их изготовления. Со временем, в ходе индустриальной революции, с ростом объема производства, а главное, сложности продукции, тотальный инспекционный контроль стал непреодолимым экономическим препятствием, что стимулировало необходимость развивать механизм управления качеством. На рис.1 представлена эволюция концепции управления качеством на этапах жизненного цикла технических систем, подсистем и их компонентов.

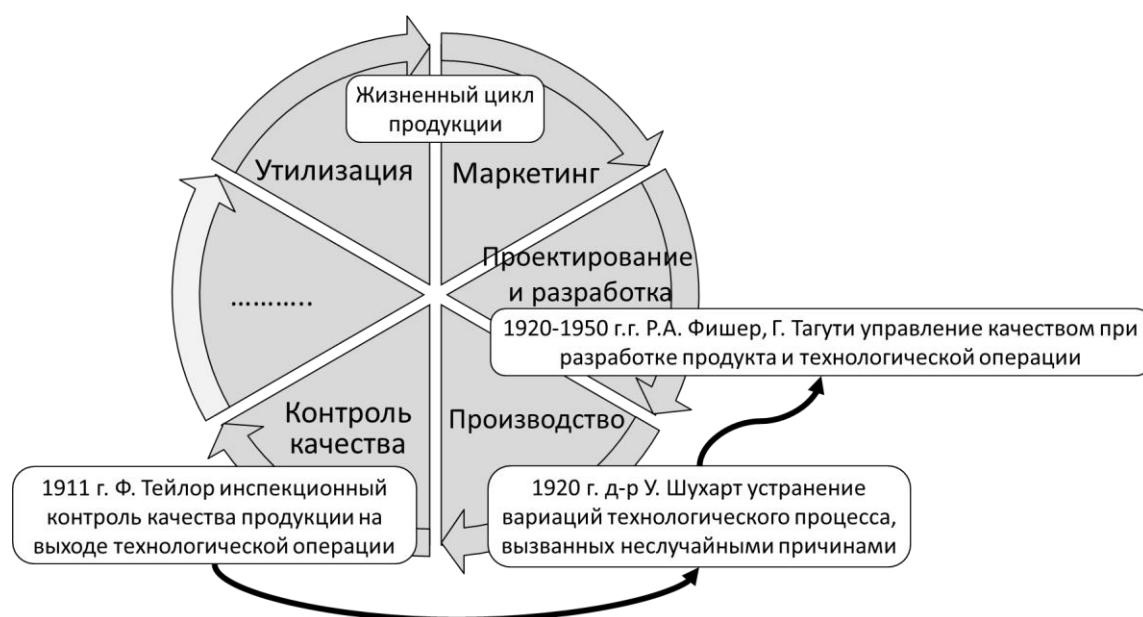


Рис. 1. Эволюция концепции управления качеством на этапах жизненного цикла технических систем, подсистем и их компонентов.

В 20-х гг. прошлого столетия д-р У. Шухарт показал, что функцию управления качеством продукции можно встроить в технологический процесс для предотвращения несоответствий продукции на его выходе. Это стало экономически более выгодной альтернативой приемочному инспекционному контролю, при котором средства и ресурсы на выпуск дефектной продукции были уже затрачены. Шухарт применил статистический подход к менеджменту качества, разработав первую карту регулирования и продемонстрировал, что устранение вариаций процесса, вызванных случайными причинами ведет к требуемому качеству конечного продукта только путем регулирования параметров процесса. Для изучения таких причин вариации следует выявить ее источник, для чего необходимо изучать эффекты от различных управляемых факторов, которые в то время исследовались путем их изменения во времени. Эта практика привела к фундаментальному прорыву, совершенному в 1920 г., когда английский специалист по статистике сэр Р.А. Фишер предложил при планировании эксперимента изменять все факторы (входные переменные) одновременно, чтобы можно было наблюдать

¹ 3.6.2 **качество** (quality): Степень соответствия совокупности присущих характеристик (3.10.1) объекта (3.6.1) требованиям (3.6.4). ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь

соответствующие изменения на выходе, т. е. факторы отклика [1]. При этом предполагается, что все входные переменные взаимодействуют друг с другом. Таким образом, в эксперименте исследуются все возможные единовременные взаимодействия между входными переменными. Полученные данные затем анализируются для принятия обоснованных и адекватных решений. Метод также называется полным факторным экспериментом и включает проведение различных тестов. С целью уменьшения объема работ стал использоваться дробный факторный эксперимент, при котором реализуется только отобранная часть комбинаций условий, необходимых для проведения полного факторного эксперимента, однако экономия (два–четыре фактора) получалась несущественной.

С изобретением в Англии в 1940 г. ортогональной матрицы, с помощью которой проверялась минимальная совокупность всех возможных комбинаций, объем вычислений значительно уменьшился [1].

Наконец в 50-х гг. Г. Тагути успешно применил план эксперимента, предложенный сэром Фишером, и ортогональные матрицы для эффективной разработки продукта, объединив преимущества обоих методов. Кроме того, он высказал идею учитывать в ходе эксперимента влияние факторов шума на продукцию или процесс, тем самым достигая их робастности [1]. Таким образом, современная концепция управления качеством, перестала быть такой же понятной для широкой общественности, как инспекционный контроль.

Пример одного из первых успешных применений РПП в Японии, опубликованный в книге «Передовые достижения в промышленности», издательства Diamond Sha, иллюстрирует, что параметрическое проектирование, согласно Леон [2, с. 85-86] — экономически эффективный метод улучшения производственных процессов.

Технологи японской компания Ina Tile, производителя керамической плитки, уже в 1953 г. знали, что дороже управлять причинами нежелательной вариации, чем сделать процесс нечувствительным к этим причинам. Также, технологам компании было известно, что неравномерное распределение температуры в печи обжига вызывает вариацию размера керамических плиток. Поскольку неравномерное распределение температуры было основной причиной вариации, управление качеством в ходе процесса привел бы к увеличению затрат на изготовление плитки. Технологи решили уменьшить вариацию размеров плитки без увеличения затрат. Вместо управления вариацией температуры в объеме печи они попытались найти такую рецептуру плитки, которая уменьшила бы влияние неравномерности распределения температуры, вызывающей разброс размеров плитки. С помощью планирования экспериментов был найден экономически выгодный метод уменьшения разброса размера плиток. Было обнаружено, что увеличение содержания извести в плитке от 1 до 5% уменьшает вариацию ее размера в 10 раз. Это открытие было качественным скачком в производстве керамических плиток.

Метод робастного параметрического проектирования, путем уменьшения вариации с помощью снижения чувствительности инженерной разработки к его источникам оказался эффективнее управления самими источниками нежелательной вариации характеристик продукции с точки зрения экономического аспекта.

Робастное проектирование на фирме AT&T Bell Laboratories впервые было реализовано в 1980 г. Этот пример применения РПП замечателен тем, что несмотря на то, что некоторые составляющие концепции РПП применялись и ранее, именно в этом случае был применён практически современный подход к «управлению качеством на стадии проектирования» [2, с.54-59].

Производство интегральных схем - сложный и длительный процесс. Впервые на фирме AT&T метод робастного проектирования был применен для решения задачи уменьшения разброса размеров «контактных окон» - отверстий диаметром около 3,5 мкм, которые вытравливались в оксидных слоях толщиной примерно 2 мкм. В то время микропроцессорный кристалл WE 32100 фирмы AT&T, содержал на площади приблизительно 2,25 см² около 250 тыс. таких окон [2, с.54-59].

Было исследовано только 18 комбинаций девяти управляемых параметров процесса из возможных 6000 комбинаций, чтобы определить оптимальные уровни значений этих девяти управляемых параметров. Впоследствии найденные уровни были использованы в производстве микропроцессора WE 32100, микрокомпьютера WE 4000 и некоторых других ИС, разрабатывавшихся в то время [2, с.54-59].

Следующим важным приложением робастного проектирования стало создание производственного процесса для кристалла памяти фирмы AT&T. Разработка этих ИС памяти выполнялась последовательно: после проектирования кристалла проектировался производственный процесс. Мегабитный кристалл памяти с самого начала создавался в то время с учетом требований рынка. Разработка производственного процесса велась параллельно разработке кристалла, поэтому завод был готов начать выпуск ИС сразу же по завершении разработки. Подобно тому как концепция робастного проектирования сегодня представляет собой качественный скачок по сравнению с предыдущими методами обеспечения качества, требования к современным инженерам-технологам существенно выросли по сравнению с прежними требованиями [2, с.54-59].

Десять лет назад, в 70-х годах прошлого столетия, ширина линий на фотошаблонах для больших интегральных схем (БИС) была столь большой, что для травления пластин можно было использовать жидкостные растворы. Однако жидкостное травление действует как по вертикали, так и по горизонтали (изотропное травление), поэтому оно дает некоторое подтравливание схемных рисунков, если не производить корректировку размеров на фото шаблоне. Сегодня линии на фотошаблонах настолько узки, что подгонка их размеров не позволяет полностью скомпенсировать подтравливание. Поэтому в новых производственных процессах (речь идет о 80-х годах) использовалось сухое травление в атмосфере плазмы [2, с.54-59].

Некоторые основные этапы производства СБИС включают множество стадий, имеющих множество параметров с несколькими уровнями варьирования.

Травление силицида тантала - один из основных этапов, причем считается наиболее важным. Оборудование для травления, которое на тот момент использовалось в составе производственной линии, давало только 2/3 пригодной продукции из-за неоднородности процесса травления.

Для решения проблемы, вызванной этой ситуацией, были предложены три пути: 1) заменить оборудование на другое с другими возможностями, 2) добавить оборудование с такими же возможностями, 3) использовать усовершенствованный или новый химический процесс обработки [2, с.54-59].

В то время для исследования всех параметров с помощью существовавших обычных традиционных методов анализа потребовалось бы недопустимо много экспериментов. Однако при робастном проектировании были использованы матричные ортогональные планы экспериментов, что позволило получить однородное травление за весьма малое время (20 суток). Модифицированный процесс был внедрен на существующем оборудовании, что увеличило производительность на 50% [2, с.54-59].

Робастное проектирование сохранило предприятию 1,2 млн. долл., которые ушли бы на замену оборудования и на переделку полов в цехе. К тому же оно позволило оптимизировать процесс травления силицида тантала. Другие успешные применения программ робастного проектирования на фирме AT&T включают уменьшение времени реакции операционной системы UNIX[™] в три раза, увеличение срока службы режущего инструмента в четыре раза, 65%-ное уменьшение числа визуальных дефектов при травлении: алюминия на кристаллах ИС и несколько применений в системах автоматизированного проектирования [2, с.59].

Пример применения РПП в 2005 году в российской практике автомобильной промышленности о том, как руководство ОАО «АВТОВАЗ» приняло решение обучить методам робастного проектирования группу проектировщиков новых автомобилей ВАЗ [3]. Модульная программа обучения сотрудников НТИЦ ВАЗа объемом 120 ч содержала

элементы статистических методов, структурирования функции качества, планирования эксперимента и робастного проектирования. По результатам обучения выполнялась выпускная работа, предполагающая применение полученных знаний к проектированию узлов автомобиля. Впоследствии на ВАЗе были созданы творческие группы применения полученных знаний в области РПП, так как в тот период, в условиях вступления РФ в ВТО внутренний рынок был наполнен импортными автомобилями высокого качества по цене, соизмеримой с вазовскими [3].

Последние публикации показывают, что, не смотря на почтенный возраст планирования эксперимента и его развития в формате РПП и сегодня существуют исследования использования подхода методов Тагути в условиях Индустрии 4.0 [4]. В данной работе показано, что интеграция методов Тагути с Индустрией 4.0 означает глубокий прогресс в производстве и управлении качеством. Индустрия 4.0 с ее передовыми цифровыми технологиями, такими как Интернет вещей (IoT), анализ больших данных, искусственный интеллект (ИИ) и киберфизические системы, создает среду, которая значительно усиливает метод Тагути. Эта интеграция способствует более динамичному подходу к оптимизации процессов, используя данные в реальном времени и сложный анализ для достижения высокого качества, и эффективности. Сбор данных в реальном времени и расширенная аналитика позволяют адекватно применять метод Тагути, повышая скорость реагирования на изменения процесса и улучшая робастность продукции. Цифровые двойники и автоматизированные системы управления процессами дополнительно поддерживают робастную конструкцию, позволяя проводить её виртуальное тестирование и коррекцию [4].

В работе [5] приводится обзор и анализ обширных источников об универсальности и возможности применения метода в широком спектре научных направлений и отраслей. Метод Тагути остаётся ценным и широко применимым инструментом для оптимизации экспериментов и выявления влияющих факторов в различных дисциплинах.

2. ВВЕДЕНИЕ В УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

2.1 РОБАСТНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ОБЗОР

Методы оптимизации проектирования и процесса производства были развиты в 1950- 60-х годах Тагути и Ву [2, с. 113-114] в связи со стремлением производить высококачественные изделия в экономических условиях, сложившихся в Японии в тот период ². Сейчас созданные Тагути и Ву методы оптимизации используются как стандартные для достижения высокой эффективности проектирования и производства изделия [2, с. 113-114].

Тагути исходил из предположения, что качество изделия следует выражать количественно с помощью общих потерь, наносимых обществу с момента поступления изделия потребителю [2, с. 114]. В данной методологии потери от изделия рассматриваются только с точки зрения его функциональных отклонений, вызванных определенной группой факторов, именуемых здесь шумами или факторами (параметрами) помех [2, с. 114-115]:

1. Внешние. Это различные типы факторов помех, внешних относительно изделия, такие, как условия нагрузки, температура, влажность, пыль, напряжение питания, вибрации, вызванные работающим рядом механизмом, и ошибки человека при эксплуатации изделия.

2. Несовершенства производства. Сюда включается изменчивость выходных характеристик для различных единиц изделия. Такая изменчивость неизбежна входе производственного процесса. Пример несовершенства производства - отклонение

² после Второй мировой войны эти условия характеризовались в Японии низким качеством сырья, плохим производственным оборудованием и недостатком хорошо подготовленных инженеров.

сопротивления резистора от номинального значения 100 кОм, которое в каком-то экземпляре изделия может принять значение 101 кОм.

3. Деградация. В начале эксплуатации все выходные характеристики изделия могут совпадать с заданными значениями, но год от года значения отдельных характеристик могут изменяться, что приводит к деградации свойств.

Существующий в то время традиционный подход к уменьшению изменчивости функциональных характеристик изделия заключался в ограничении факторов помех или в их полном устранении. Например, уменьшение диапазона температур эксплуатации, обеспечение более узких диапазонов допусков или снижение дрейфа параметров [2, с. 115].

Идея же Тагути состоит в выборе таких значений параметров проектирования, чтобы минимизировать чувствительность функции изделия ко всем факторам помех. Как показала дальнейшая практика, этот путь оказался с экономической точки зрения, менее дорогим. Этот же подход при проектировании технологического процесса позволил уменьшить его изменчивость, вызванную несовершенствами производства и влияющую на характеристики изделия. По мнению Тагути [2, с. 115] главная ответственность за качество изделия лежит на разработчике изделия, а не на организаторах производства, что и подтвердила дальнейшая практика передовых компаний.

Методология робастного³ параметрического проектирования (РПП), разработанного Гэнити Тагути выделяет три основных этапа в проектировании изделия или процесса производства: 1) системное проектирование; 2) параметрическое проектирование, или оптимальное проектирование; 3) проектирование допусков. Системное проектирование состоит в создании работоспособной принципиальной схемы или схемы производственного процесса. Роль параметрического, или оптимального, проектирования состоит в определении уровней управляемых факторов, которые минимизируют чувствительность ко всем факторам помех. На этом этапе допуски полагаются столь широкими, что производственные затраты оказываются малыми. Если параметрическое проектирование не обеспечивает достаточно низкую функциональную изменчивость изделия, то при проектировании допусков ряд допусков выборочно уменьшают, основываясь на их вкладе в затраты [2, с. 116].

На рис. 2.1 представлена блок-схема РПП изделия, которая может быть использована и для технологической операции производственного процесса и даже для непроизводственного процесса или коммерческой системы [2, с. 116-117].

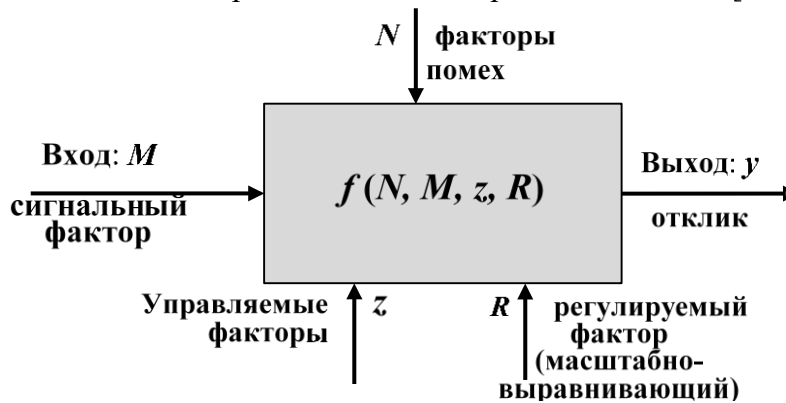


Рис. 2.1. Блок-схема робастного параметрического проектирования объекта,

На блок-схеме отклик обозначен как y . Факторы, которые влияют на отклик, могут быть разбиты на четыре следующих категории [2, с. 117-118]:

1. *Сигнальные факторы (M).* Это такие факторы, которые устанавливаются пользователем или оператором для того, чтобы достичь заданного значения выходной

³ англ. robustness, от robust — «крепкий», «сильный», «твёрдый», «устойчивый»

характеристики y или выразить желаемый выход. Например, угол поворота руля, задаваемый водителем, является сигнальным фактором для механизма управления автомобилем. Установка рычага управления скоростью на вентиляторе и значения 0 и 1, передаваемые в системах связи, - также примеры сигнальных факторов. Сигнальные факторы отбираются разработчиком на основе инженерных знаний. Иногда используются в комбинации несколько сигнальных факторов; например, один из них может быть использован для грубой настройки, а другой - для тонкой настройки.

2. *Управляемые факторы (z)*. Это набор параметров изделия, за чьи значения ответствен разработчик. Каждый из управляемых факторов может принимать несколько значений, которые называют уровнями. Цель процесса проектирования – определить наилучшие уровни этих факторов. Для определения наилучших уровней можно использовать разные критерии; например, можно максимизировать стабильность и робастность проектирования при поддержании минимальных затрат. Робастность - это нечувствительность к факторам помех.
3. *Масштабно-выравнивающие факторы (R)*. Это специальные виды управляемых факторов, которые можно регулировать для достижения желаемого функционального соотношения между сигнальным фактором и откликом y , например, передаточное число в механизме управления автомобилем можно отрегулировать на стадии проектирования изделия для того, чтобы достичь желаемой чувствительности радиуса поворота к изменению угла поворота руля, задаваемого водителем. Пороговое напряжение в цифровой связи можно отрегулировать для того, чтобы изменить относительные ошибки при передаче нуля и единицы.
4. *Факторы помех (N)*. Это неуправляемые факторы. Они влияют на отклик y , и их уровни изменяются для разных единиц изделия (элемента системы), условий окружающей среды и моментов времени. В некоторых случаях могут быть известны или определены только статистические характеристики факторов помех, но не их действительные значения. Выше упоминались типичные группы факторов помех: *внешние, несовершенство производства, деградация*.

В работе [2, с. 118-119] показан подход Тагути к максимизации прогнозируемой части и минимизации непрогнозируемой части с помощью подходящего выбора уровней z и R .

Пусть зависимость отклика y от сигнальных, управляемых, масштабнo-выравнивающих и связанных с помехами факторов имеет вид

$$y = f(N, M; z, R) \quad (1)$$

Функция f состоит из двух частей: 1) $g(M; z, R)$ - прогнозируемое и желаемое функциональное соотношение между y и M ; 2) $e(N, M; z, R)$ - непрогнозируемая и нежелательная часть. Тогда

$$y = g(M; z, R) + e(N, M; z, R) \quad (2)$$

Если требуется линейное соотношение между y и M , g должно быть линейной функцией от M . Все нелинейные члены будут включены в e . Влияние всех факторов помех также выражается функцией e .

Цель проектирования - максимизация прогнозируемой части и минимизация непрогнозируемой части с помощью подходящего выбора уровней z и R . В качестве комбинированной меры степени предсказуемости используется отношение дисперсий⁴ функций g и e : степень предсказуемости = V_g/V_e .

⁴ Под дисперсиями V_g и V_e подразумеваются среднеквадратичные отклонения для $g(M; z, R)$ и $e(x, M; z, R)$ соответственно.

Следует отметить [2, с. 119], что степень предсказуемости не зависит от масштаба. По аналогии с теорией связи в качестве меры минимизации непрогнозируемой части (степени предсказуемости) Тагути предложил взять $10 \log$ и называть эту величину отношением сигнал/шум (S/N). Это отношение является функцией z и R :

$$\eta'(z, R) = 10 \log (V_g(z, R)/V_e(z, R)) \quad (3)$$

Как указывалось, выше, R - специальный управляемый фактор, который используется с целью достижения желаемого функционального соотношения для любого заданного значения и рациональной разработки изделия, с тем чтобы максимизировать степень предсказуемости. Часто можно определить влияние R на η' без выполнения реальных экспериментов для различных значений R . В любом случае сначала пытаются оценивать $\eta(z)$, причем $\eta(z) = \max \eta'(z, R)$. затем оптимальное проектирование выполняется в области значения z .

Следует отметить, что из-за наличия масштабного фактора максимизация $\eta(z)$ приводит к минимизации V_e . Если принять квадратичную функцию потерь, минимизация V_e приведет к минимизации потерь потребителя из-за функциональной изменчивости [2, с. 119].

2.2 СТАНДАРТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

2.2.1 Введение в стандартизацию РПП

В 2021 году введен отечественный стандарт по управлению качеством на этапе проектирования, идентичный международному стандарту⁵ - ГОСТ Р ИСО 16336–2020 Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD) [6]. Появление стандартов, как правило, говорит о зафиксированной и апробированной хорошей международной и/или отечественных практике.

Во вводном разделе стандарта этого [6, с. 7-13] изложен основной подход РПП, как эффективного метода анализа технических идей и решений. В приложениях № 5 и №6 к данному методическому указанию, приведена информация о 5-м [6, с. 13-22] и 6-м [6, с. 22-32] разделах стандарта, излагающих более подробное и конкретное описание этапов оценивания робастности и планирования экспериментов при параметрическом проектировании.

Робастное параметрическое проектирование позволяет получить рациональную и эффективную оценку технических средств в процессе проектирования на основе критерия повышения робастности⁶. Различают следующие две процедуры робастного параметрического проектирования [2, с. 7]:

- а) процедура точного и простого оценивания робастности;
- б) процедура оценивания эффективности нескольких технических средств.

Также, в данном разделе стандарта [6, с. 7-13] изложен подход к достижению цели параметрического проектирования, а более подробное и конкретное описание этапов оценивания робастности и планирования экспериментов при параметрическом проектировании приведено в разделах 5 и 6 стандарта (ПРИЛОЖЕНИЯ 5, 6)

2.2.2 Оценка робастности системы [6, с. 7-8]

Как можно точно оценить робастность системы с помощью отношения SN?

⁵ ISO 16336:2014 "Applications of statistical and related methods to new technology and product development process - Robust parameter design (RPD)", IDT

⁶ англ. robustness, от robust — «крепкий», «сильный», «твёрдый», «устойчивый»

Робастность системы связана с многочисленными условиями ее эксплуатации, поэтому робастность невозможно оценить простым измерением. С целью выявления скрытых факторов при оценивании робастности можно использовать следующие подходы:

а) использование идеальной функции системы. Идеальная функция - целевая функция системы. При оценивании робастности реальную функцию системы важно измерить и сравнить с идеальной функцией данной системы. Для идеальной функции характерно отсутствие дефектов, отказов и проблем с качеством;

б) использование факторов шума. Реальная система при эксплуатации функционирует в различных условиях относительно шума. В план следует включить эксперименты с факторами шума на различных уровнях, а реальную функцию системы следует измерять и оценивать в условиях заданных, заранее установленных уровней шума. Оценивание робастности сильно зависит от выбора факторов шума и их уровней. Поэтому очень важно применять эффективные стратегии управления шумом.

Функция системы - это работа, направленная на полное достижение ее цели. Например, функция электрической лампочки - преобразование электрической энергии в энергию светового излучения, а функция ветряной турбины - преобразование энергии ветра в механическую энергию вращения, требуемую для работы водяного насоса. Такая функция обычно выражается в форме математической зависимости между энергией на входе и на выходе. Эту математическую зависимость можно описать разными способами. При описании преобразования энергии в реальных физических системах используют пропорциональную зависимость с нулевой точкой. Подробности рассмотрены в разделе 5.

Характеристики входа и выхода - это фиксированные величины, полученные на основании идеальной функции системы. Характеристики входа называются сигналами в зависимости вход-выход; при регулируемых изменениях на входе возникают изменения на выходе как в условиях реальной эксплуатации, так и в эксперименте при параметрическом проектировании. Сигнал ассоциируется с энергией или информацией, требуемой для реализации функции системы. Фактор сигнала создает условия для управления пользователем выходом системы за счет изменения входного сигнала. В эксперименте для динамических характеристик системы фактор сигнала может быть отнесен к трем или более уровням шума, так что можно оценить линейность реальной зависимости вход-выход. Для статической характеристики отсутствует фактор сигнала, поскольку у нее есть только один целевой выход. Выходная характеристика называется выходным откликом, или просто откликом.

Важная задача - выбор соответствующего метода измерения отклика. Например, в некоторых зависящих от времени явлениях возникает трудность в обнаружении отклика. В таких случаях должны быть разработаны новые методы измерений. Отклик связан с функциональным назначением системы. Для осветительной системы, например, отклик - это значение освещенности, а для водяного насоса - количество воды.

Воздействие шума приводит к отклонению реальной функции системы от ее идеальной функции. Примерами служат воздействия факторов окружающей среды в реальных условиях эксплуатации, таких как температура и влажность, фактическое напряжение питания, электрические помехи, частота включения и нагрузка. Они называются внешними шумами. С другой стороны, есть еще источники шумов, которые называются внутренними, такие как старение и износ. Например, продолжительность времени работы и/или простоя после включения, износ частей системы после длительной работы и производственная вариабельность системы и/или ее частей. Воздействие факторов шума приводит к ухудшению функциональных характеристик системы в сравнении с проектными значениями. Поскольку назначение исследования робастности заключается в количественной оценке таких ухудшений, то при оценке робастности важно определить вариацию функции системы в различных условиях относительно шума. Вот причина, по которой показатели шума должны быть введены в качестве факторов шума в план эксперимента при параметрическом проектировании. Выделяют три категории факторов

шума: а) окружающая среда, б) старение и изменения с течением времени, в) производственные вариации. С целью разработки эффективной стратегии управления воздействиями шума надо исследовать различные типы шума в реальной эксплуатации под воздействием условий окружающей среды.

На рисунке 2.2 показана схема оценивания робастности на основании информации об уровнях фактора шума. В результате эксперимента получают ряд откликов реальной системы от Y_1 до Y_n под воздействием фактора шума на уровнях от N_1 до N_n , а отношение SN (η), характеризующее робастность, вычисляют на основании данных от Y_1 до Y_n . Формулы для вычисления отношения SN приведены в ГОСТ Р ИСО 16336 [раздел 5, с.13-22] (ПРИЛОЖЕНИЕ 5). В случае сравнения нескольких систем надо исследовать воздействия однородных факторов шума на одинаковых уровнях.

В случае включения нескольких факторов шума в план эксперимента при параметрическом проектировании можно использовать ортогональную конфигурацию для определения уровней шума.

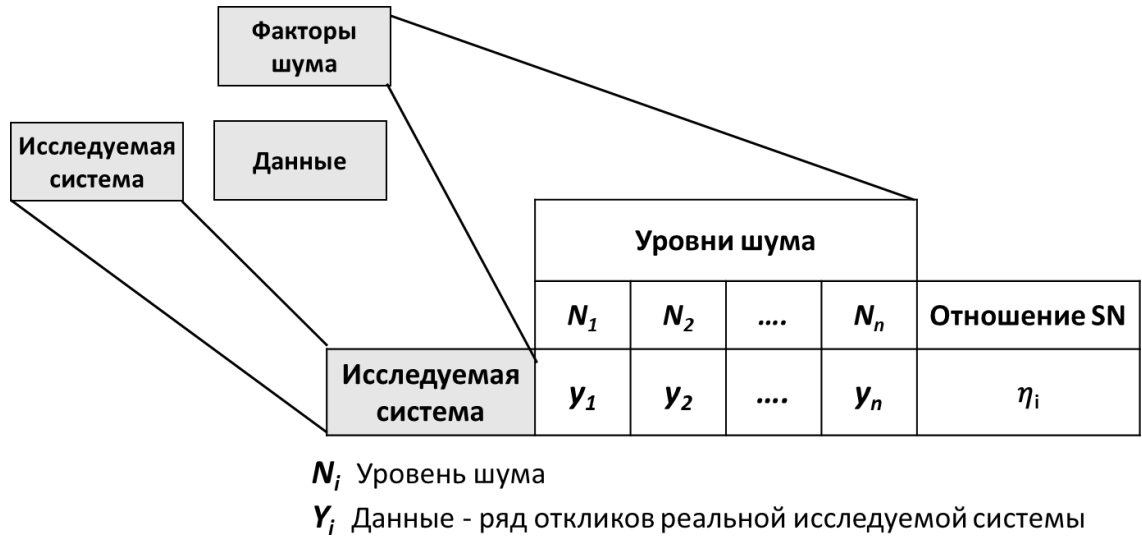


Рис. 2.2 - Оценивание робастности на основании информации об уровнях фактора шума

На рис. 2.3 уровни шума от N_1 до N_n были определены путем комбинации уровней факторов шума, таких как А, В, С, приведенных в ортогональной таблице (ПРИЛОЖЕНИЕ 3). Для определения уровней шума можно использовать и неортогональные планы экспериментов.

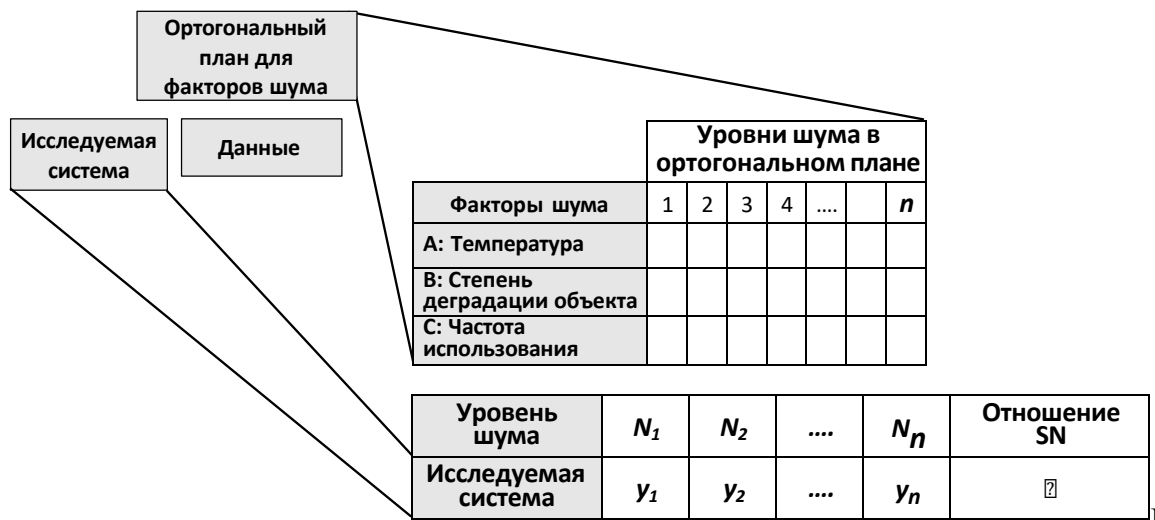


Рис.

2.3 - Оценивание робастности на основании информации об уровнях факторов шума, включенных в ортогональный план

2.2.3 Оценки робастности через отношение SN [6, с. 9]

В робастном параметрическом проектировании определение идеальной функции и разработка стратегии управления шумом служат ключевыми вопросами при оценивании робастности. Поэтому важными задачами являются измерение, оценка вариабельности и эффективности реальной функции системы. Потребность в осуществлении этой процедуры обусловлена тем, что она затрагивает все технические аспекты функционирования системы, направленные на предотвращение технических проблем. Результаты оценки представляют в форме отношения SN и чувствительности.

Отношение SN позволяет точно оценить робастность для различных проектов. Для сравнения используют относительные оценки отношений, так как на их абсолютные значения влияют наборы уровней факторов шума. Следовательно, при проведении бенчмаркинга предпочтительнее использовать оценки робастности проектов.

Особенность данного подхода заключается в том, что нужна только информация для оценки отношений SN: функция системы и уровни факторов шума. Подробная техническая информация об исследуемой системе не требуется. Отношения SN можно вычислять одним и тем же способом до тех пор, пока у системы сохраняется прежняя функция, то есть отношение вход-выход, даже если изменяется ее техническая реализация. Поскольку отношение SN позволяет точно охарактеризовать робастность системы, можно оценивать и сравнивать робастность систем, в которых реализованы разные проектные решения.

Аналогичным способом, через отношение SN, сравнивают системы, в которых реализуются разные технологии или проектные решения. Такие системы, как стандартные, так и вновь разрабатываемые, как свои собственные, так и системы конкурентов, можно оценивать и сравнивать аналогичным способом, с помощью отношения SN, если у них та же самая функция. В этом заключается идея проведения бенчмаркинга различных проектов на основании оценок робастности с помощью отношения SN.

2.2.4 Эффективный метод анализа технических идей - параметрическое проектирование [6, с. 9-10]

Основные технологии и механизмы их реализации надо выбирать в форме проектного решения до начала проектирования системы производства продукции. Если нужен бенчмаркинг различных проектных решений системы, можно использовать подход к определению оценки робастности, введенный в предыдущем подразделе.

Следующий этап после выбора наилучшего проектного решения - это детализация проекта посредством выбора значений параметров разрабатываемого проекта системы. На этом этапе детализации проекта разработчики могут оптимизировать систему за счет выбора оптимальных номинальных значений параметров таким образом, чтобы функция разрабатываемой системы получилась наиболее робастной и эффективной. Реализуемый при этом метод оптимизации проекта системы называется параметрическим проектированием, поскольку оптимизация проекта достигается за счет приведения его параметров к оптимальным номинальным значениям.

Рассмотрим, какие типы состояний важны. Когда система находится в оптимальном состоянии, она достигает самых лучших результатов во всех нормальных условиях эксплуатации. Более конкретно, производственная система может стабильно осуществлять целевую функцию на протяжении всего периода эксплуатации, даже если, например, она функционирует в широких диапазонах температуры и влажности, в разных областях и условиях окружающей среды. Оптимальные параметры проекта выбирают путем комбинации значений параметров, которые максимизируют робастность готовой продукции. Поскольку оптимизация параметров проекта приводит к оптимальной максимизации робастности, то есть минимизации вариабельности и максимизации эффективности, то суждение о состоянии системы формируют на основании характеристик робастности: отношения SN и чувствительности.

Оптимизация проекта системы на основании оценки робастности через отношение SN служит критерием оптимизации при параметрическом проектировании. Теоретически

оценки робастности должны быть получены для всех возможных проектов в факторном пространстве, но на практике это невыполнимо ввиду того, что это потребует большого количества экспериментов для рассмотрения всех возможных комбинаций параметров проекта.

Как более практичный метод, применимый на стадиях разработки и проектирования, рекомендуется проведение эксперимента в соответствии с ортогональным планом, который позволяет оценить многие параметры проекта при ограниченном числе опытов. Такой план рекомендуется не только потому, что он позволяет сократить число опытов по сравнению с полным факторным экспериментом с тем же числом управляемых факторов, но еще и потому, что в нем можно разместить максимальное число управляемых факторов при том же числе опытов. Для подтверждения достоверности результатов эксперимента следует провести проверочный опыт для контроля воспроизводимости. В разделе 6 [6, с. 32-40] (ПРИЛОЖЕНИЕ 7) приведен конкретный метод проведения проверочного эксперимента с целью контроля воспроизводимости.

Процедура параметрического проектирования включает следующие этапы:

- этап 1** - определение идеальной функции системы;
- этап 2** - выбор фактора сигнала и его диапазона;
- этап 3** - выбор метода измерений отклика на выходе;
- этап 4** - разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней;
- этап 5** - выбор управляемых факторов и их уровней из параметров проекта;
- этап 6** - распределение экспериментальных факторов между внутренней и внешней таблицами;
- этап 7** - проведение эксперимента и сбор данных;
- этап 8** - вычисление отношения SN и чувствительности S;
- этап 9** - построение диаграмм эффектов факторов для отношения SN и чувствительности;
- этап 10** - выбор оптимальных условий;
- этап 11** - оценка повышения робастности по приросту;
- этап 12** - проведение проверочного эксперимента, контроль прироста и показателя "воспроизводимость".

2.2.5 Двухэтапная оптимизация (стратегия параметрического проектирования) [6, с. 10-12]

На рис. 2.4 представлен план экспериментов при параметрическом проектировании в соответствии с изложенной выше процедурой. План экспериментов на этом рисунке включает две ортогональные таблицы; одна ортогональная таблица - для управляемых факторов, то есть для параметров проекта (внутренняя таблица), а другая ортогональная таблица - для факторов шума (внешняя таблица). Такая конфигурация называется планом прямого произведения. Число экспериментальных данных соответствует произведению числа строк (опытов), установленных ранее в этих двух ортогональных планах. Например, в случае, когда комбинируются внутренний план L_{18} и внешний план L_{12} , (ПРИЛОЖЕНИЕ 3) в которых число строк равно $m=18$ и $n=12$ соответственно, общее число строк составляет $18 \times 12 = 216$. Для примера, приведенного на рис. 2.4 внутренний план L_9 и внешний план L_4 в которых число строк равно $m=9$ и $n=4$ соответственно, общее число строк составляет $9 \times 4 = 36$.

В некоторых случаях для факторов шума и сигнала вместо ортогональной таблицы можно использовать полный факторный план. При физических опытах рекомендуется объединять множество факторов шума в один комбинированный фактор шума. Однако для внутренних планов всегда рекомендуется использовать ортогональные таблицы, поскольку в один такой план можно включить множество параметров проекта.

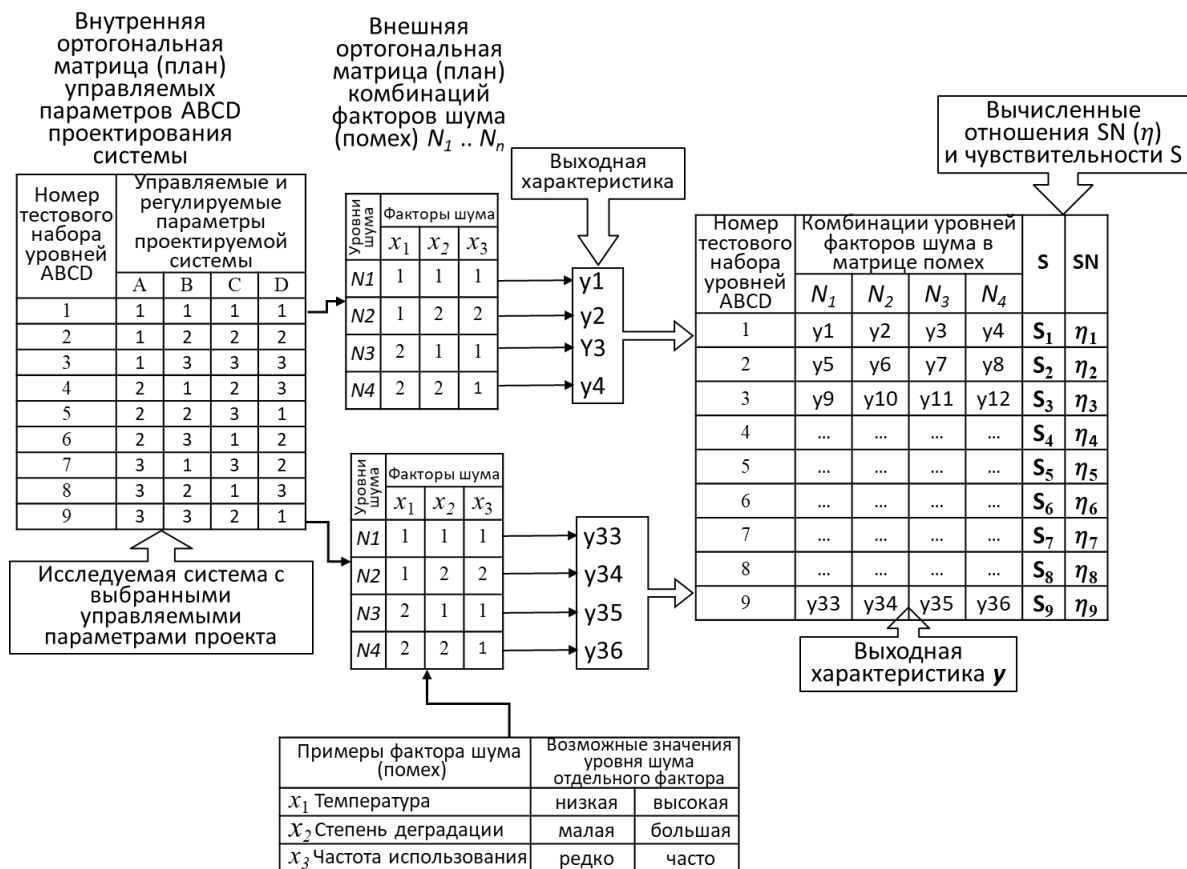


Рис. 2.4 - План прямого произведения для параметрического проектирования

Экспериментальные данные, полученные для каждой комбинации уровней управляемых факторов, содержат множество данных для соответствующего числа факторов шума. Для того чтобы найти оптимальные значения параметров проекта по характеристикам робастности, чувствительность (среднее значение в случае "номинал - наилучший отклик") и отношение SN должны быть рассчитаны для каждой строки внутреннего плана, то есть комбинации значений параметров проекта. В таком случае можно вычислить эффекты управляемых факторов по чувствительности, по отношению SN и представить их на диаграмме эффектов факторов, как показано на рисунках 2.5 и 2.6. Конкретные формулы для вычислений описаны в разделе 6 (ПРИЛОЖЕНИЕ 6 данного методического пособия). Оптимальные значения параметров проекта выбирают из диаграмм, построенных для чувствительности и отношения SN. Чувствительность характеризует среднее значение набора данных (в случае статических характеристик), а отношение SN - робастность.

Диаграмма эффектов факторов показывает, как влияет на функцию системы каждый параметр проекта, включенный в эксперимент. Если некоторый фактор имеет большой градиент, то он имеет большое влияние на функцию системы (говорят, что у него "большой эффект"). Различают два типа диаграмм эффектов факторов, характеризующих степень влияния отдельных факторов на отношение SN и чувствительность. Важная особенность двухэтапного плана - ориентация на отношение SN, а не на чувствительность. На первом этапе выбирают оптимальные уровни управляемых факторов, при которых обеспечивается максимальное отношение SN на соответствующей диаграмме эффектов факторов (см. рисунок 4), а затем, на втором этапе, как правило, корректируют среднее значение или угловой коэффициент прямой, то есть чувствительность с целью достижения целевого значения для одного параметра проекта (см. рисунок 2.6). Для такой корректировки на диаграммах эффектов факторов желательно выбирать один фактор с максимальной чувствительностью и минимальным отношением SN. Первый этап

заключается в оптимизации проекта по робастности на основании отношения SN, а второй этап - в корректировке значения параметра с использованием чувствительности.

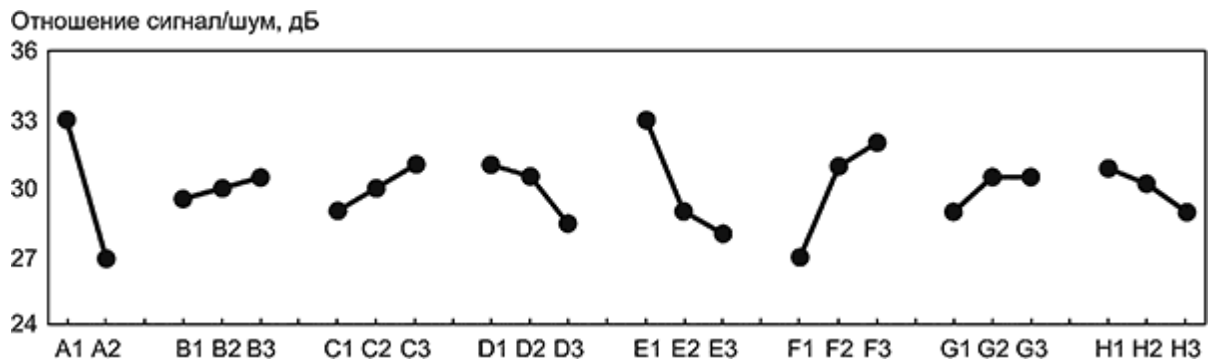


Рисунок 2.5 - Диаграмма эффектов факторов для отношения SN (робастность) [6, с. 12]

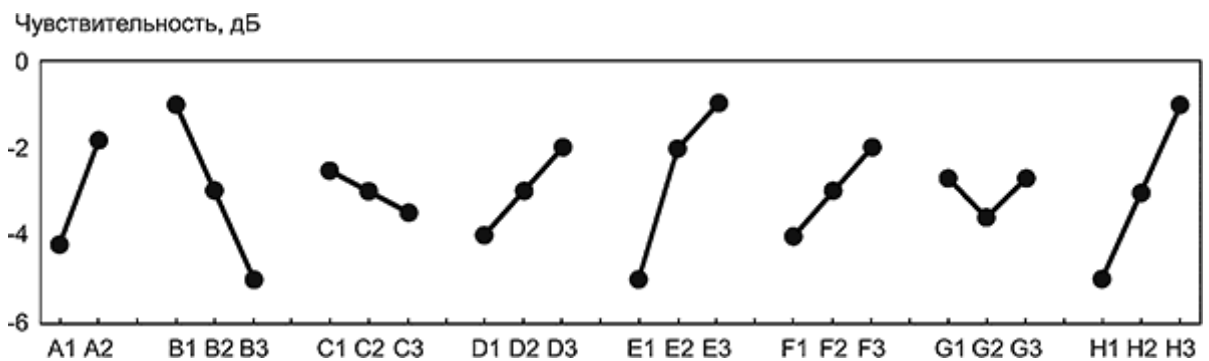


Рис. 2.6 - Диаграмма эффектов факторов для чувствительности (среднее значение или углового коэффициента прямой) [6, с. 12]

Данная двухэтапная процедура обеспечивает реализацию концепции проектирования на основе робастности. По этой причине параметрическое проектирование для достижения робастности известно под названием двухэтапной оптимизации.

В чем заключается важность двухэтапной оптимизации? Что труднее: оптимизировать робастность на основании отношения SN или корректировать значение параметра с использованием чувствительности?

Последовательность этапов оптимизации важна для эффективного проектирования робастных систем. Рассмотрим в качестве примера запись звука на диктофон. Если аудиоданные записываются с высоким фоновым шумом, то корректировка громкости не обеспечит удобства прослушивания записи при ее воспроизведении. Для распознавания информации при наличии шумовых помех должны быть использованы такие подходы, как шумоподавление для гашения шумовых эффектов, или микрофон, который менее чувствителен к фоновому шуму. Увеличение отношения SN требует использования современных методов и контрмер при записи. С другой стороны, если средний уровень записи слишком низок, то это можно легко улучшить, подстраивая громкость при прослушивании. Управление средним значением воспроизводимого звука с помощью регулятора громкости позволяет добиться улучшения таким относительно простым методом. Коррекцию значения величины можно осуществлять с использованием чувствительности.

Другой пример - это функция визуального образа как на фото-, так и на видеоизображениях. Средний уровень тона можно легко скорректировать, но часто изображение, полученное в темноте, подвержено воздействию факторов шума и обладает низким качеством. Также имеются ограничения в возможностях улучшения качества изображения в результате его обработки. Достаточно легко скорректировать значение, поскольку для этого надо изменить значение одного параметра. Также легко

скорректировать и средний уровень энергии. Но, с другой стороны, возникают сложности с повышением робастности. Для этого желательно иметь как можно больше управляемых факторов. Следовательно, установление оптимальных уровней для параметров проекта на основании максимизации отношения SN - приоритетное направление при проектировании системы. На данном подходе основана двухэтапная оптимизация, при которой приоритетной характеристикой оптимизации робастности служит отношение SN.

2.2.6 Определение оптимального проекта [6, с. 13]

Если при параметрическом проектировании на основании диаграмм эффектов факторов установлено, какие параметры проекта влияют на отношение SN, а какие на чувствительность, то можно выбрать множество оптимальных значений параметров проекта на основе робастности. Затем выбирают окончательный оптимальный проект в соответствии с другими ограничениями, такими как затраты и условия поставки.

Так как при выборе окончательного оптимального проекта системы важно учитывать многие ограничения, то лучше выбирать такой экспериментальный план, в котором факторы охватывают широкий диапазон в факторном пространстве. Возможна такая ситуация, при которой оптимальные значения окажутся далеко за областью, заданной в эксперименте, поэтому рекомендуется выбирать уровни управляемых факторов таким образом, чтобы они охватывали как можно более широкий диапазон.

В параметрическом проектировании оптимизация робастности достигается через максимизацию отношения SN. Это отношение служит количественной характеристикой потерь качества пользователя из-за дефектов, отказов и проблем с качеством, обусловленных низкой робастностью. Потери качества пользователя включают в себя потери из-за невыполнения функций, дефектов, затрат на дополнительное обслуживание и т.д.

В соответствии с функцией потерь качества по Тагути отношение SN можно преобразовать в потери качества пользователя, выраженные в денежных единицах. Общие потери качества для общества, связанные с данной продукцией, можно вывести из потерь качества для пользователя, добавляя другие затраты, такие как затраты на разработку продукции, затраты на материалы, затраты на производство, стоимость поставки, текущие эксплуатационные расходы, расходы на утилизацию и т.д. Общие потери для общества должны служить мерой качества данной продукции. На стадии проектирования продукции разработчик должен рассматривать потери для общества с точки зрения технологии. На этом этапе разработчику трудно предсказать общие потери для общества, но, по крайней мере, он должен оценивать и оптимизировать проект с точки зрения робастности. Робастное параметрическое проектирование фокусируется на потерях качества для пользователя с точки зрения инженерных решений на основе робастности, то есть вариабельности функции изделия.

3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАЗДЕЛА ВКР «УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОДУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ»

На рис. 3.1 представлена процедура количественной оценки робастности [6, с. 22-32], а также результаты, достигаемые на этапах. На схеме темным цветом выделены этапы, которые могут войти в дополнительный раздел ВКР (с 1-го по 6-ой этапы).

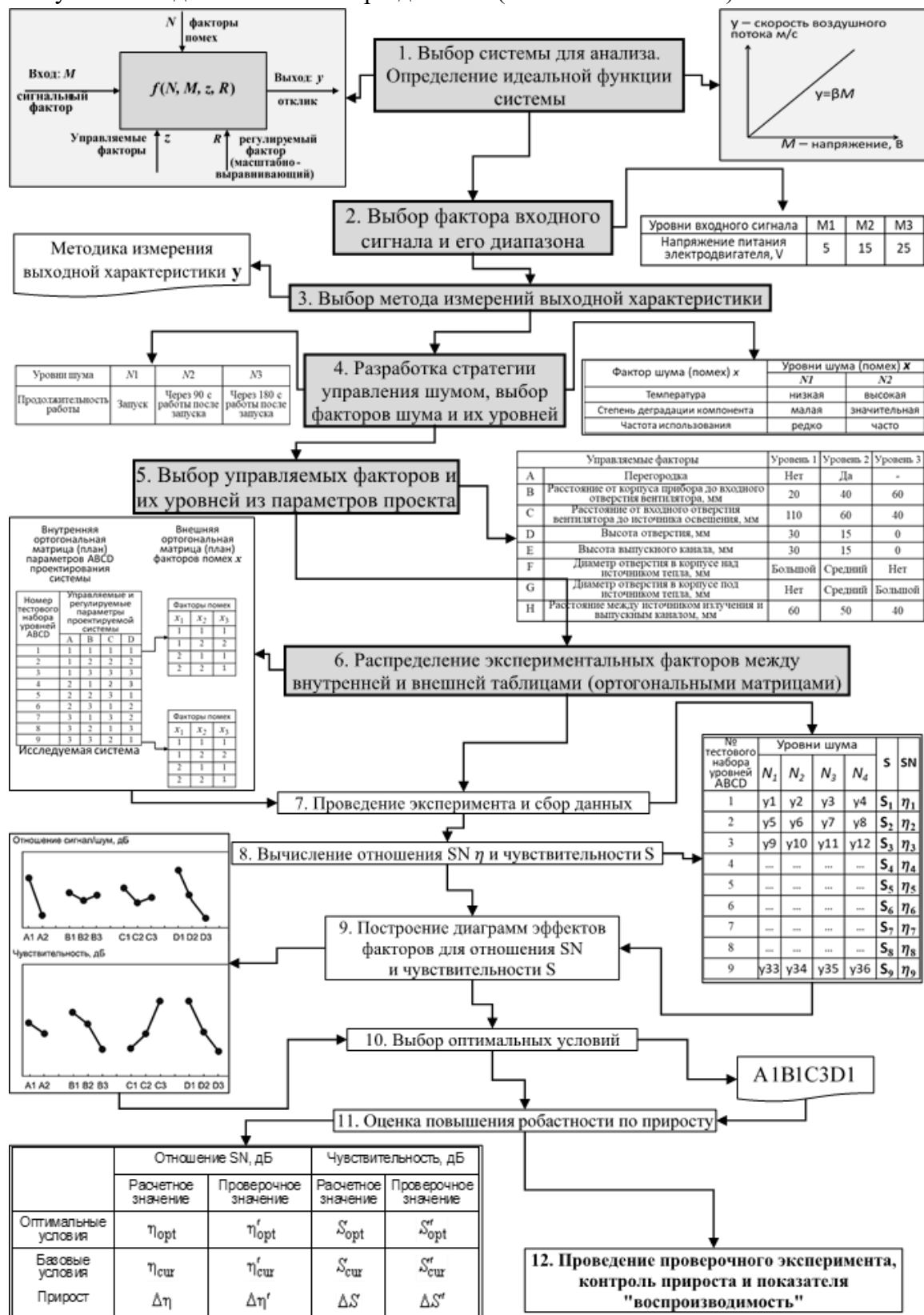


Рис. 3.1 Процедура РПП

В комментариях к каждому этапу, входящему в ВКР есть дополнительное пояснение для динамической системы при параметрическом проектировании в случае пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой. Соответствующий пример рассмотрен в [6, с. 32-40] (ПРИЛОЖЕНИЕ 7). С целью исследования области параметров проекта рекомендуется использовать ортогональный план для внутренней таблицы, поскольку именно такой план позволяет оценить комбинации многих параметров проекта одновременно. Число исследуемых параметров проекта в данном случае гораздо больше, чем в других экспериментальных планах при том же числе опытов. Это означает, что возможностей для повышения робастности при выборе оптимальных уровней параметров проекта становится гораздо больше.

Этап 1. Выбор системы для анализа. Определение идеальной функции системы.

Предполагается, что в качестве объекта для анализа будет выбрана техническая система, подсистема или её компонента, которые использовались, как основная тема ВКР.

В соответствии с терминологическим разделом, функция - это действия, которые выполняет система для достижения своей цели [6, с.3]. Любая функция имеет входной сигнал, обеспечивающий реализацию намерения оператора в динамическом режиме. Отклик системы варьируется за счет изменения входного сигнала до тех пор, пока не будет достигнуто целевое значение отклика. Функцию выражают математической зависимостью между входными сигналами и откликами. Определение идеальной функции, то есть планируемой зависимости между входными сигналами и откликами, основано на целевой функции системы. Идеальная функция характеризует ожидаемые действия системы.

В случае статической (нединамической) характеристики определяют идеальный выход, целевое значение выхода системы [6, с. 14].

Описать идеальную функцию могут помочь следующие вопросы [6, с. 22-23]:

- Какова предполагаемая функция системы?
- Как система формирует предполагаемый отклик?
- Какова физическая модель системы?
- Какую энергию преобразует система в случае рассмотрения аппаратных средств системы?
- Как преобразуется информация в случае рассмотрения программного обеспечения или систем обслуживания?
- Что представляет собой входной сигнал, который изменяет отклик?
- Что представляет собой отклик, формируемый системой?
- Какова идеальная зависимость между сигналом и откликом?
- Каким выражением можно описать существующую функциональную зависимость?

Если отклик должен быть нулем при нулевом сигнале (вход равен нулю, значит и выход равен нулю), а вход и выход должны быть пропорциональны, тогда функцию можно описать пропорциональной зависимостью с нулевой точкой. Пропорциональная зависимость между величинами справедлива во многих физических системах, следовательно, использование пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой физически обосновано. Использование линейных зависимостей обеспечивает простоту восприятия и управления системами. Такие характеристики, выражаемые зависимостями вход-выход, также называют динамическими характеристиками.

Различают три основных типа зависимостей для динамических идеальных функций [6, с. 14-18]: пропорциональные с нулевой точкой, пропорциональные с опорной точкой и линейные зависимости. В некоторых случаях зависимость между входом и выходом можно выразить простым линейным выражением после определенных преобразований.

В качестве пример реализации Этапа 1 [6, с. 32-33] рассматривается система охлаждения которая должна поддерживать требуемую температуру вблизи источника освещения за счет работы вентилятора, приводимого в движение электродвигателем и обеспечивающего отток нагретого лампой воздуха. Функцию такой системы охлаждения

можно сформулировать так [6, с. 32]: "Создание оттока теплого воздуха за счет вращения вентилятора с электродвигателем". Идеальную функцию описывают следующим образом [6, с. 32]: "Вход - это электрическая энергия, которая характеризуется напряжением питания электродвигателя вентилятора. Выход - скорость потока воздуха, создаваемого для удаления нагретого воздуха". Идеальную функцию можно записать в виде

$$y = \beta M$$

где M - входной сигнал: "напряжение питания";

y - отклик: "скорость воздушного потока".

На рис. 3.2 показана идеальная функция системы охлаждения. При увеличении напряжения питания электродвигателя пропорционально увеличивается скорость потока воздуха. Любой вид утечки воздуха, завихрения или турбулентность являются причинами отклонения от идеальной функции в реальных условиях и снижения эффективности преобразования энергии.



Рис. 3.2 - Идеальная функция системы охлаждения

Этап 2. Выбор фактора сигнала и его диапазона

В случае динамической характеристики сигнал - это активный или пассивный вход системы, изменяющий отклик системы в соответствии с установленными требованиями. Те характеристики в эксперименте, которые управляют входным сигналом, надо принять в качестве фактора сигнала. Фактор сигнала - это такая входная переменная, которую экспериментально задает оператор с целью получения отклика системы. Диапазон изменений фактора сигнала должен охватывать весь диапазон, соответствующий эксплуатации [6, с. 14].

Иногда пользователь воздействует на вход косвенно, например, с помощью ножной педали, ручную или посредством рычага. Уровни фактора сигнала должны охватывать весь диапазон условий эксплуатации. В случае активных динамических характеристик диапазон откликов наиболее значим, поскольку требования к выходу устанавливает пользователь. Поэтому проверяют, охватывают ли условия эксплуатации диапазон отклика, формируемый за счет изменения сигнала. В случае пассивных динамических характеристик, таких как температура термометра, фактический диапазон сигнала должен охватывать уровни фактора сигнала в эксперименте. Общий диапазон сигнала стоит выбирать более широким, поскольку результаты эксперимента могут быть применены в отношении различных ситуаций. Фактор сигнала должен иметь три или более уровня, поскольку нелинейность и искажения более высоких порядков могут быть оценены как эффекты шума. Если уровни сигнала находятся на равных расстояниях один от другого, то вычисления декомпозиции суммы квадратов упрощаются [6, с. 23].

Примеры реализации Этапа 2 [6, с. 33]
Таблица 1 - Фактор сигнала и его уровни

Уровни	M1	M2	M3
Напряжение питания электродвигателя, V	5	15	25

Этап 3. Выбор метода измерений выходной характеристики [6, с. 14, 23]

Выходную характеристику также называют откликом. В случае динамической функции выход - это величина, которую пользователь ожидает получить. При измерении отклика, который зависит от времени, могут возникнуть некоторые трудности. В некоторых случаях подходящий метод может отсутствовать. В таких случаях должен быть разработан соответствующий метод измерения. В целом, в промышленности выполняют измерения нединамических откликов в целях валидации. Разработка эффективных и результативных измерительных систем, предназначенных для количественной оценки откликов идеальных функций, - важное направление.

В примере реализации Этапа 3 [6, с. 33], откликом является скорость воздушного потока, то есть скорость движения воздуха, которая измеряется с использованием анемометра.

Этап 4. Разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней

Условия, которые вызывают отклонения идеальной функции в реальных условиях на этапе эксплуатации, называют условиями шума или условиями ошибки [6, с. 15]. В эксперименте по определению оценки отношения SN важно воссоздавать условия шума с использованием факторов шума. Факторы шума - это переменные, которые вызывают изменения отклика в реальных условиях эксплуатации. Поэтому при определении оценки робастности рекомендуется рассмотреть все возможные источники возникновения шума и определить рациональные и эффективные стратегии управления шумом. Факторы шума обусловлены условиями использования, процессами старения/износа и производственной вариацией. При параметрическом проектировании рекомендуется рассматривать как можно большее число видов факторов. Кроме того, уровни факторов шума надо располагать в широком диапазоне, охватывающем реальные условия эксплуатации. С целью увеличения срока службы системы можно рассматривать факторы шума, обусловленные износом при длительном периоде эксплуатации [6, с. 15].

Иногда одного или двух факторов шума может быть достаточно, чтобы сравнить робастность системы во всем пространстве факторов шума. Если желательно иметь много факторов шума и их легко варьировать, то можно расположить их в ортогональной таблице [6, с. 24].

Факторы шума в основном подразделяются на два вида: внутренний шум и внешний шум. Внутренний шум возникает по причине отклонения параметров системы от проектных значений, например, деградации в результате старения, неточности характеристик деталей, вариабельности процессов производства и сборки. Внешний шум поступает извне, например, воздействие факторов внешней среды в процессе эксплуатации, таких как температура, влажность, вибрация и т.д [6, с. 24].

Когда в план эксперимента включают много факторов шума, увеличивается область применения результатов эксперимента, но, с другой стороны, сильно возрастает число опытов. Следовательно, если для каждого фактора шума приблизительно известно направление градиента, то можно использовать метод смешивания. Смешанный фактор шума имеет два крайних уровня: на одном отклик имеет тенденцию снижаться, а на втором - повышаться. Тогда робастность можно оценить только на двух уровнях шума, обеспечивая предельную эффективность эксперимента. Чем меньше эффект смешанного

фактора шума, тем система более робастна. [6, с. 24].

Примеры реализации Этапа 4 [6, с. 33].

Таблица 2 - Фактор шума и его уровни [6, с. 33]

Уровни шума	N1	N2
Препятствие	Нет	Есть

Таблица 3 - Фактор шума для двигателя постоянного тока [6, с. 49]

Уровни шума	N1	N2	N3
Продолжительность работы	Запуск	Через 90 с работы после запуска	Через 180 с работы после запуска

Таблица 4 - Факторы шума и их уровни для температурного контроллера [2, с. 129]

Обозначение	Фактор	Допуск, % номинального значения	Уровень, % номинального значения		
			1	2	3
A	R_p , кОм	5	-2,04	0	2,04
B	$\alpha = R_2/R_1$	5	-2,04	0	2,04
C	$\lambda = R_4/R_1$	5	-2,04	0	2,04
D	E_o	5	-2,04	0	2,04
F	E_z	5	-2,04	0	2,04

Этап 5. Выбор управляемых факторов и их уровней для параметров проекта

Параметры проекта, используемые в эксперименте, выбирают в качестве управляемых факторов [6, с. 24]. Рекомендуется использовать три уровня, один из которых - базовый уровень. На заключительном этапе оптимизации надо выбрать и проверить оптимальные уровни управляемых факторов. Устанавливать диапазон параметров проекта рекомендуется исходя из того, насколько требуется исследовать пространство факторов. Обычно диапазон должен быть выбран настолько широкий, насколько это возможно. Иногда оптимальные значения параметров проекта обнаруживаются в непредвиденном диапазоне [6, с. 24].

Управляемые факторы могут быть непрерывными переменными, такими как длина или масса, а могут быть дискретными атрибутами, такими как тип или форма материала, зависящими от природы параметров проекта.

Прежде всего, управляемые факторы надо выбрать таким образом, чтобы можно было их варьировать независимо. Во-вторых, определять управляемые факторы рекомендуется таким образом, чтобы их эффекты тоже были независимыми. В некоторых случаях, когда управляемые факторы взаимодействуют, можно применять метод, который называют "скользящим уровнем", или переопределить управляемые факторы таким образом, чтобы их эффекты стали более независимыми [6, с. 24].

Например, когда объем, удельный вес и массу кубической детали выбирают в качестве управляемых факторов в одном эксперименте, они оказываются коррелированными и зависимыми переменными. Два из них можно выбрать в качестве управляемых факторов. Вместо выбора времени и температуры в качестве управляемых факторов, можно переопределить их как тепловую энергию и время или просто назвать их временем и термодинамической характеристикой [6, с. 24].

В таблице 5 приведен примеры реализации Этапа 5 [6, с. 34]

Таблица 5 - Управляемые факторы и их уровни

Управляемые факторы		Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
A	Перегородка	Нет	Да	-
B	Расстояние от корпуса прибора до входного отверстия вентилятора, мм	20	40	60
C	Расстояние от входного отверстия вентилятора до источника освещения, мм	110	60	40
D	Высота отверстия, мм	30	15	0
E	Высота выпускного канала, мм	30	15	0
F	Диаметр отверстия в корпусе над источником тепла, мм	Большой	Средний	Нет
G	Диаметр отверстия в корпусе под источником тепла, мм	Нет	Средний	Большой
H	Расстояние между источником излучения и выпускным каналом, мм	60	50	40

Этап 6 Распределение экспериментальных факторов между внутренней и внешней таблицами

Распределяют управляемые факторы во внутренней таблице, а факторы шума, выбранные на этапе 4, и фактор сигнала, выбранный на этапе 2, - во внешней таблице. Внутренняя таблица должна быть ортогональной матрицей, такой как матрица L_{18} (ПРИЛОЖЕНИЕ 2), а внешняя таблица может быть каким-нибудь факторным планом. В имитационных экспериментах внешний план тоже может быть ортогональной матрицей, поскольку в таком случае параллельные опыты во внешней таблице проводить гораздо проще [6, с. 24].

Ортогональный план L_{18} имеет восемь столбцов. Один двухуровневый управляемый фактор A и семь трехуровневых факторов (B-H) могут размещаться в столбцах этого ортогонального плана, как показано в таблице 6. Управляемый фактор A надо разместить в первом столбце. Строки представляют собой номера опытов. Числа в каждой ячейке - это уровни соответствующих факторов. Опыт номер 1 должен быть проведен при следующей комбинации уровней факторов: A1B1C1D1E1F1G1H1. А условия проведения опыта в строке 2 сформированы на основании комбинации уровней факторов: A1B1C2D2E2F2G2H2 [6, с. 24].

В таблице 6 приведен пример реализации Этапа 6 для системы охлаждения лампы [6, с. 34]

Таблица 6 - Управляемые факторы во внутренней таблице

Номер п/п	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Нет	20	110	30	30	Большой	Нет	60
2	Нет	20	60	15	15	Средний	Средний	50
3	Нет	20	40	0	0	Нет	Большой	40
4	Нет	40	110	30	15	Средний	Большой	40
5	Нет	40	60	15	0	Нет	Нет	60
6	Нет	40	40	0	30	Большой	Средний	50
7	Нет	60	110	15	30	Нет	Средний	40
8	Нет	60	60	0	15	Большой	Большой	60
9	Нет	60	40	30	0	Средний	Нет	50
10	Да	20	110	0	0	Средний	Средний	60
11	Да	20	60	30	30	Нет	Большой	50

12	Да	20	40	15	15	Большой	Нет	40
13	Да	40	110	15	0	Большой	Большой	50
14	Да	40	60	0	30	Средний	Нет	40
15	Да	40	40	30	15	Нет	Средний	60
16	Да	60	110	0	15	Нет	Нет	50
17	Да	60	60	30	0	Большой	Средний	40
18	Да	60	40	15	30	Средний	Большой	60

На этом этапе планирование робастного параметрического эксперимента завершается и эти результаты приводятся в дополнительном разделе ВКР.

В приложении 7 содержится полная информация о примере для системы охлаждения лампы с расчетами и выводами [6, с. 32-40]

Далее приводится краткое описание этапов, которые не входят в состав дополнительного раздела ВКР.

Этап 7. Проведение эксперимента и сбор данных

На данном этапе считается известным план экспериментов по оцениванию робастности через отношение SN. В плане показано, какие комбинации уровней факторов сигнала и шума будут реализованы в эксперименте. Обычно выбирают двухуровневый полный факторный план для факторов сигнала и шума. Другими словами, измерения выходного отклика выполняют при различных комбинациях уровней сигнала и шума. Далее проводят эксперимент и собирают данные в таблице результатов экспериментов. На ее основании можно вычислить отношения SN для динамических характеристик. В случае статических (нединамических) характеристик фактор сигнала отсутствует, поэтому эксперимент проводят в условиях шума. План экспериментов по оцениванию робастности соответствует внешней таблице плана прямого произведения для робастного параметрического проектирования [6, с. 15, 25].

В таблице 7 приведен пример реализации Этапа 6 для системы охлаждения лампы [6, с. 35]

Таблица 7 – результаты измерений скорости воздушного потока во всех опытах внутренней таблицы.

Номер п/п	M_1		M_2		M_3	
	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2
1	0,12	0,09	0,31	0,26	0,44	0,41
2	0,18	0,15	0,28	0,23	0,44	0,32
..						
...						
17	0,27	0,23	0,83	0,72	1,30	1,08
18	0,28	0,19	0,76	0,57	1,06	0,71

Этап 8. Вычисление отношения SN η и чувствительности S

Отношение SN и чувствительность вычисляют на основании данных, полученных на этапе 5. Формулы для расчетов приведены в [6, с. 13-32]. Эти формулы основаны на форме идеальной функции системы, определенной на этапе 1. Отношение SN характеризует вариации функции, обусловленные условиями шума. Отношение SN - это характеристика робастности системы, а чувствительность S - показатель, характеризующий значение изменения отклика, вызванное единичным изменением входной [6, с. 4]

Подробно с содержанием и методикой дальнейших расчетов этапов 8, 9, 10, 11 и 12 можно познакомиться в 5 и 6 разделах ГОСТ Р ИСО 16336 [6, с. 13-32], а также в приложениях данного пособия №№ 5 и 6.

3 Термины, определения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте [ГОСТ Р ИСО 16336-2020] применены термины по ИСО 3534-1 и ИСО 3534-3, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 функция (function): Действия, которые выполняет система для достижения своей цели.

Примечание - Функция может быть представлена в форме математической зависимости входов и выходов.

3.1.2 робастность (robustness): Степень малости вариабельности функции системы при варьировании факторов шума.

Примечание - Эффективность работы системы может быть оценена с помощью робастности. Отношение SN является количественной мерой робастности.

3.1.3 отношение сигнал/шум, отношение SN (signal-to-noise ratio, SN ratio): Отношение полезных эффектов к эффектам вредных факторов в вариациях отклика.

Примечание 1 - Отношение SN обычно выражается в децибелах (дБ). Это обозначение обычно используют вместо dB при измерении робастности.

Примечание 2 - Антилогарифм отношения SN - действительное число, которое обратно мере вариации, такой как дисперсия или коэффициент вариации, и обратно пропорционально денежным потерям.

Примечание 3 - Перемены в отклике, обусловленные существенными переменами значения входного сигнала, - это полезный эффект. В случае, когда идеальная функция проходит через нулевую точку, угол наклона прямой, проходящей через ноль, служит характеристикой полезного эффекта.

Примечание 4 - Перемены в отклике, обусловленные факторами шума, - это вредный эффект. Примеры - эффекты факторов шума и отклонения от идеальной функции.

Примечание 5 - Отношение SN должно содержать вариабельность факторов шума и отклонения от идеальной функции в нормальных условиях эксплуатации.

3.1.4 чувствительность (sensitivity): Значение изменения отклика, вызванное единичным изменением входной величины.

Примечание 1 - Чувствительность обычно выражают в децибелах (дБ).

Примечание 2 - При исследовании динамических характеристик чувствительность оценивают по значению линейного коэффициента, определяемого при изменении входного сигнала, β^2 , где β - константа пропорциональности.

Примечание 3 - Для отклика вида "номинал - лучше всего" чувствительность показывает значение m^2 , где m - среднее арифметическое откликов.

3.1.5 шум (noise): Фактор, который нарушает функцию системы.

Примечание 1 - Любой фактор в условиях эксплуатации - это сигнал либо шум.

Примечание 2 - Шум подразделяют на внутренний шум и внешний шум. Их иногда называют шумом изготовления и шумом использования соответственно. Изменения внутреннего состояния системы или ее части во времени, такие как ухудшение работы, старение, износ и производственные вариации, - это примеры внутреннего шума. Условия эксплуатации и окружающая среда продукции - примеры внешнего шума.

3.1.6 сигнал (signal): Входной фактор (входная переменная) системы, который пользователь намеренно изменяет для получения ожидаемого отклика в отношении вход-выход.

Примечание 1 - Для условий пользователя все факторы - это либо сигнал, либо шум.

Примечание 2 - Выделяют два вида сигналов: активные и пассивные. Активные сигналы пользователь изменяет, чтобы достичь желаемого отклика, например, изменяет

поворот руля, чтобы изменить направление движения автомобиля. Пассивный сигнал используется для информирования пользователя о значении входной величины при наблюдаемом отклике, например, температура в тепловых измерениях. В обоих случаях выход изменяется при варьировании сигнала, но при активном сигнале пользователь может получить желаемое значение отклика, а при пассивном сигнале - только узнать его значение.

3.1.7 динамические характеристики (dynamic characteristics): Отклик, который имеет множество идеальных целевых значений, зависящих от значений некоторого сигнала.

Примечание - Отношение между динамическими характеристиками и сигналом можно представить в виде функциональной зависимости между входом и выходом. Во многих случаях выход функции системы - это динамическая характеристика.

3.1.8 статические характеристики, нединамические характеристики (static characteristics, nondynamic characteristics): Отклик, имеющий фиксированное значение.

Примечание - Статические характеристики можно разделить на три группы в зависимости от целевого значения; различают характеристики трех видов: "номинал - лучше всего", "чем меньше, тем лучше" и "чем больше, тем лучше", где целевое значение представляет собой конечное число, ноль и бесконечность соответственно.

3.1.9 внутренняя таблица (план) (inner array): План эксперимента, параметры которого рассматривают как управляемые факторы или как факторы-индикаторы.

Примечание 1 - Каждую комбинацию уровней факторов (опыт) оценивают на робастность с помощью отношения SN и чувствительности.

Примечание 2 - Для внутренней таблицы рекомендуются ортогональные планы, поскольку многие параметры плана в одной серии экспериментов можно рассматривать как управляемые факторы.

Примечание 3 - Факторы, включенные в эксперимент, следует различать по их роли в параметрическом планировании и в соответствии с этим размещать отдельно во внутренней или внешней таблицах. Управляемые факторы и факторы-индикаторы следует размещать во внутренней таблице.

3.1.10 внешняя таблица (план) (outer array): План эксперимента, в котором факторами служат условия эксплуатации, рассматриваемые как факторы шума или факторы сигнала при определении оценок отношения SN и чувствительности.

Примечание 1 - Любые факторы в условиях эксплуатации представляют собой либо сигнал, либо шум.

Примечание 2 - Факторы, включенные в эксперимент, следует различать по их роли в параметрическом планировании и в соответствии с этим размещать отдельно во внутренней или внешней таблицах. Факторы шума и факторы сигнала следует размещать во внешней таблице.

3.2 Обозначения

f - число степеней свободы;

k - число уровней фактора сигнала;

L - линейная форма;

L_i - линейная форма для уровня i ;

M - фактор сигнала/входной сигнал;

M_i - i -й уровень сигнала;

M_i - значение i -го уровня сигнала;

N - фактор шума;

n - число уровней фактора шума;

N_i - i -й уровень фактора шума;
 P_0 - стандартизованная ошибка;
 r - сумма квадратов уровней входного сигнала/эффективный делитель;
 S - чувствительность;
 S_T - общая сумма квадратов;
 S_m - сумма квадратов, обусловленная средним значением;
 S_β - сумма квадратов, обусловленная угловым коэффициентом прямой β ;
 $s_{n\beta}$ - сумма квадратов, обусловленная дисперсией угла наклона прямой β уровней шума;
 S_e - сумма квадратов, обусловленная ошибкой;
 S_{opt} - расчетное значение чувствительности для оптимальных условий;
 S_{base} - расчетное значение чувствительности для базовых условий;
 S_{cur} - расчетное значение чувствительности для текущих условий;
 V_e - дисперсия, обусловленная ошибкой/дисперсия ошибки;
 V_N - дисперсия, обусловленная объединенной ошибкой/дисперсия, обусловленная ошибкой и шумом;
 $\mathcal{Y}$ - отклик (выходная переменная);
 β - коэффициент чувствительности/угловой коэффициент прямой;
 ΔS - прирост чувствительности;
 $\Delta \eta$ - прирост отношения SN;
 η - отношение SN;
 η_{opt} - расчетное значение отношения SN для оптимальных условий;
 η_{base} - расчетное значение отношения SN для исходных условий;
 η_{cur} - расчетное значение отношения SN для текущих условий;
 P_0 - стандартизованное отношение вклада.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Набор стандартных определений робастного параметрического проектирования, принятых Центром обеспечения качества фирмы AT&T Bell Laboratories [2, с. 25-28]

Настоящий словарь содержит набор стандартных определений, принятых Центром обеспечения качества фирмы AT&T Bell Laboratories. Вклад в подготовку этого материала внесли многие сотрудники фирмы AT&T Bell Laboratories.

Определения

Регулируемый параметр. Управляемый параметр, который можно использовать для точной настройки выходных характеристик после того, как выбраны значения нерегулируемых управляемых параметров, минимизирующий выходную меру независимо от регулировки.

Управляемая матрица. Матрица, строки которой определяют значения управляемых параметров в эксперименте. Тагути называет ее «внутренней матрицей».

Управляемый параметр. Переменная, номинальное значение которой может задаваться проектировщиками или инженерами-технологами

Функциональная характеристика. Основная характеристика изделия, относящаяся к его функциональным возможностям.

Параметр, регулирующий среднее значение. Регулируемый параметр, который управляет средним значением соответствующей функциональной характеристики.

Помеха (в параметрическом проектировании). Разбросы, которые вызывают флуктуации выходных характеристик изделия при фиксированных номинальных значениях управляемых параметров. Это, например, деградация изделия, дефекты сырьевых материалов и изменения условий производства или условий эксплуатации изделия потребителем.

Матрица помех. Матрица, строки которой определяют значения факторов помех в эксперименте. Тагути называет ее «внешней матрицей».

Параметр помехи. Источник помехи, который можно систематически варьировать при параметрическом планировании эксперимента.

Метод контроля качества на стадии проектирования (off-line). Метод, который используется при проектировании изделия или производственного процесса для того, чтобы гарантировать или улучшить качество изделия.

Метод контроля качества в процессе производства (on-line). Метод, используемый при производстве изделия, чтобы улучшить и стабилизировать его качество.

Ортогональная матрица. Числовая матрица, столбцы которой попарно ортогональны. Это означает, что в каждой паре столбцов все упорядоченные пары чисел встречаются одинаковое число раз.

Выходные потери. Потери, вызванные отклонением функциональной характеристики от ее заданного значения.

Выходная мера. Мера средних выходных потерь, вызванных отклонением функциональной характеристики от ее заданного значения. Представляя собой результат усреднения по множеству единиц изделия, выходная мера количественно характеризует качество проектирования изделия или процесса, а не качество отдельного изделия. Цель параметрического проектирования - поиск таких значений управляемых параметров, которые оптимизируют эту выходную меру.

Выходная мера, не зависящая от регулировки (PERMIA). Выходная мера, которая не зависит от значений регулируемых параметров. Использование меры PERMIA при параметрическом проектировании осуществляется в два этапа. Сначала идентифицируются значения нерегулируемых управляемых параметров, минимизирующие меру PERMIA. Затем идентифицируются значения регулируемых управляемых параметров, которые минимизируют выходную меру, при этом нерегулируемые параметры проекта сохраняют значения, полученные на первом этапе.

Выходная статистика. Статистическая оценка выходной меры.

Робастное проектирование. Подход к проектированию изделия или процесса, который заключается в уменьшении разбросов выходных характеристик путем использования таких методов проектирования, которые уменьшают чувствительность к источникам разбросов.

Мера робастности. Выходная мера, которая количественно выражает разброс функциональной характеристики изделия относительно ее среднего значения.

Робастная статистика. Статистическая оценка меры робастности.

Масштабный регулируемый параметр. Регулируемый параметр (параметры), который управляет величиной линейного воздействия сигнального параметра на функциональную характеристику изделия.

Сигнальный параметр. Переменная, которая используется для изменения значения функциональной характеристики с целью получения ее требуемого значения. Разработчик не выбирает значение этого параметра, однако он может пожелать спроектировать изделие или процесс так, чтобы они были очень чувствительны к его изменениям.

Отношения сигнал - шум¹ (при параметрическом проектировании). Набор статистик выходной характеристики, предложенный Тагути [2].

Этапы проектирования изделия или производственного процесса (с точки зрения техники качества).

1. Системное проектирование. Процесс использования научных и технических знаний для изготовления базового работоспособного опытного образца.
2. Параметрическое проектирование. Процесс идентификации таких значений управляемых параметров изделия или производственного процесса, которые уменьшают чувствительность к источникам разбросов.
3. Проектирование допусков. Процесс выбора экономически обоснованных допусков на управляемые параметры изделия или процесса.

Заданное значение. Требуемое значение выходной характеристики.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Ортогональные планы Тагучи. Примеры.
[\[https://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/orthogonal.htm \]](https://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/orthogonal.htm)

3.1. Три двухуровневых фактора (L4)

Experiment Number	Column		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

3.2. Семь двухуровневых факторов (L8)

Experiment Number	Column						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

3.3. Четыре фактора, действующих на трёх уровнях (L9)

Experiment Number	Column			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3.4. Одиннадцать двухуровневых факторов (L12)

Experiment Number	Column										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

3.5. Один двухуровневый и семь трехуровневых факторов (L18)

Experiment Number	Column							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Применение робастного проектирования параметров в различных областях (динамические и статические характеристики).
ГОСТ Р ИСО 16336 [раздел 4, с.68-73]

Таблица В.23 - Примеры параметрического проектирования (динамические характеристики)

Область применения	Система	Фактор сигнала (М)	Отклик (Y)	Фактор(ы) шума (N)	Управляемые факторы (Z, R)
Механика	Процесс пайки [8]	Ток	Напряжение	Температура, вибрация, позиция измерения	Форма электрода, температура электрода, диаметр проволочного припоя, время подогрева, время подачи припоя, время нагрева после подачи припоя, скорость подачи припоя, угол подачи припоя
Механика	Оборудование для литья под давлением пластмасс [9]	Произведение времени вращения шнека на скорость вращения шнека	Масса расплавленного полимера	Интервал между пластификациями	Степень сжатия шнека, шаг шнека, температура зоны нагрева 1, температура зоны нагрева 2, температура зоны нагрева 3, скорость вращения шнека, положение шнека
Механика	Токарно-карусельный центр [10]	Время вращения	Накопленная электрическая мощность	Двигатель + ведущий вал, только двигатель	Тип подшипника, размер корпуса, размер ведущего вала, размер ограничителя, форма ограничителя, помехозащищенность, форма подшипника, размер системы охлаждения
Механика	Обработка пресс-формы (фрезой по шаблону) [11]	Квадратный корень объема переработки	Квадратный корень энергии обработки	Материал (материал FC, соответствующий SKD61)	Метод обработки, скорость вращения, объем одного лезвия, нижний предел подачи, тип крепежа, тип инструмента, длина базы, смазочно-охлаждающая жидкость
Механика	Система очистки фоторецептора [12]	Время вращения фоторецептора	Крутящий момент, суммированный	Крутящий момент независимо от того, прекращено ли вращение фоторецептора при	Два разных состава тонирующего раствора, пять разных режимов обработки. Форма фоторецептора

Область применения	Система	Фактор сигнала (М)	Отклик (Y)	Фактор(ы) шума (N)	Управляемые факторы (Z, R)
			ый по времени	средних, мин./макс. значениях колебаний	
Механика	Процесс обработки резаньем [13]	Квадратный корень времени обработки. Квадратный корень массы срезанного материала	Квадратный корень электроэнергии	Мин. и макс. значения мощности электроэнергии, число проходов	Разжижение смазочно-охлаждающей жидкости, глубина резания, угол при вершине, передний угол, боковой угол резца в плане, фаска, скорость вращения, скорость подачи
Электрика	Электро-фотографическая система фиксирования ремня [14]	Напряжение	Ток/поперечное сечение	Частота подаваемого напряжения	Шесть разных действующих веществ, два разных технологических режима
Электрика	Магнитооптический диск (обменно-связанная перезапись) [15]	Длительность лазерного излучения	Длительность записи	Ухудшение качества окружающей среды (непрерывная запись, поле записи, мощность лазера), условия производства (конструкция запоминающего устройства, состав записывающего слоя, толщина всех слоев)	Материалы, процесс осаждения
Электрика	Электро-фотографическая система разработки [16]	Развитие потенциала различия	Количество электро-графического проявителя	Старение разрабатываемых материалов	Два разных опорных устройства, один набор электрографического проявителя, пять разных устройств для фотографического проявления

Область применения	Система	Фактор сигнала (М)	Отклик (Y)	Фактор(ы) шума (N)	Управляемые факторы (Z, R)
Фармацевтика	Сушка распылением фармацевтических параметров [17]	Количество вводимой жидкости	Количество собранного	Концентрация раствора	Скорость вращения распылителя, угол распыления, скорость воздушного потока, температура выпуска, скорость воздуха наверху, скорость воздуха внизу, угол наклона струи воздушного потока наверху, влажность воздуха
Фармацевтика	Обжиг неочищенных лекарственных препаратов [18]	Время обжига	Полное изменение массы неочищенных лекарственных препаратов	Содержание влаги в необработанных лекарственных препаратах	Скорость потока горячего воздуха, количество подготовленного сырого материала, температура сырого материала, температура обжига, скорость нагревания, скорость перемешивания, температура горячего воздуха
Фармацевтика	Смешивание лекарственных трав [19]	Время	Изменение уровня креатинина сыворотки	Патология (серьезная, умеренная, слабо выраженная)	Пять разных лекарственных препаратов
Продовольствие	Условия культивирования жаростойких бактерий [20]	Промежуток времени	Определение количества бактерий	pH разбавляющей воды	Бактериальный штамм, тип разбавителя, продолжительность испытаний, тип базальной среды, количество каталаза, количество лизоцима, количество пирувата натрия, количество аланина

Таблица В.24 - Примеры параметрического проектирования (статические характеристики)

Область применения	Система	Фактор сигнала (М)	Отклик (Y)	Фактор(ы) шума (N)	Управляемые факторы (Z, R)
Механика	Моделирование литья [21]	-	Число Рейнольдса расплавленного металла (отношение сигнал/шум характеристики "лучше всего - номинал")	Температура расплавленного металла, коэффициент заполнения, литник	Мел, вертикальный литник, вихревой горизонтальный литник, переливное устройство на входе, переливное устройство под перемычкой, горизонтальный литник, перемычка
Механика	Удобство и простота использования при замене картриджа принтера [22]	-	Простота при замене (отношение сигнал/шум характеристик "чем меньше, тем лучше")	Одна рука, две руки, использование откидной части, освещение комнаты, расположение	Передняя панель, замок, деблокировка, ручка, ограничитель, замок
Строительство	Распыление полимерцементного раствора [23]	-	Общее число пустот (отношение сигнал/шум характеристик "чем меньше, тем лучше")	Скорость нанесения покрытия, количество распылителя, температура, вязкость материала	Соотношение цементного раствора, тип добавки, количество добавки, диаметр частиц смеси, соотношение составляющих смеси
Биология	Улучшение среды выращивания энзима [24]	-	Общие титры (отношение сигнал/шум характеристик "чем больше, тем лучше")	Вид бактерии	Температура инкубации, количество активатора, количество цинковой добавки
Маркетинговые исследования	Классификация текста [25]	-	Два вида ошибок (отношение сигнал/шум дискретных характеристик)	-	Слово, используемое для классификации

5 Определение оценки робастности через отношение SN

5.1 Концепция отношения SN

При параметрическом проектировании оценивают и оптимизируют вариабельность функции системы с целью обеспечения робастности продукции. В случае оценки робастности подсистемы важно рассматривать условия в отношении шума в рамках системы в целом на этапе эксплуатации. Обеспечение робастности на уровне системы в целом имеет решающее значение.

На этапе эксплуатации функцию системы можно описать математической зависимостью вход-выход. Пользователь управляет сигналом с целью получения требуемого отклика системы на выходе. Сигнал служит входной характеристикой, которая специально настраивается для изменения выхода системы. Функцию, которая характеризует идеальную зависимость вход-выход для данной системы, называют идеальной функцией системы. Однако данную идеальную функцию невозможно безупречно реализовать в процессе производства продукции, а тем более обеспечить ее в условиях реальной эксплуатации; реальная функция может отклоняться от идеальной функции из-за воздействий шума. На первом этапе параметрического проектирования надо оценить отклонение от идеальной функции на этапе эксплуатации и выразить его в форме оценки отношения SN.

Условия эксплуатации, в которых система фактически функционирует, содержат только сигнал и шумы. Как отмечалось выше, сигнал - входная переменная системы, предназначенная для намеренного изменения ее выхода. Сигнал должен оказывать существенное воздействие на выход системы. С другой стороны, воздействие шумов оказывает негативное влияние на выход системы. Эффект от воздействия сигнала требуется максимизировать, а эффект от воздействия шума - минимизировать. В эксперименте по оценке робастности через отношение SN величину на входе следует рассматривать как фактор сигнала, а источники шума - как факторы шума. Классификация факторов в условиях эксплуатации важна для уточнения цели эксперимента.

Отношение SN - это величина, которая количественно выражает, насколько близко к идеальной функции фактическая зависимость вход-выход в различных условиях шума. Если отношение SN увеличивается, то реальная зависимость вход-выход приближаются к идеальной, а потери для общества снижаются. В противном случае отклонение от идеальной зависимости и потери для общества увеличиваются.

5.2 Типы отношений SN

При определении оценки робастности различают три типа отношений SN: для динамических характеристик, для статических или нединамических характеристик и для вычислительных систем.

Отношение SN для динамических характеристик отражает стабильность зависимости между сигналом и соответствующими выходами. Отношения SN для таких характеристик подразделяют на три типа в зависимости от формы идеальной функции системы: пропорциональная идеальная функция с нулевой точкой, пропорциональная идеальная функция с опорной точкой и линейная идеальная функция. Выбор формы функции зависит от физических особенностей и назначения системы. Во многих случаях идеальную функцию можно описать как пропорциональную зависимость с нулевой точкой, поскольку пропорциональная зависимость имеет широкое распространение в физике.

Отношение SN для статических (нединамических) характеристик отражает стабильность выхода системы. Целевой выход - это фиксированная величина, а сигнал - постоянная. Отношение SN для таких характеристик подразделяют на три типа в зависимости от фиксированного выхода системы: "номинал - лучше всего", "чем меньше,

тем лучше" и "чем больше, тем лучше". Выбор соответствующего фиксированного выхода зависит от назначения системы. Величина фиксированного выхода принимает конечное значение для системы с установкой "номинал - лучше всего", равно нулю - для системы с установкой "чем меньше, тем лучше" и бесконечна - для системы с установкой "чем больше, тем лучше".

Отношение SN для вычислительных систем применяют в отношении оценки функционирования систем с бинарными входом и выходом, значения которых составляют 0 или 1. В вычислительных системах, если вход принимает значения 0 или 1, выход, соответственно, должен быть 0 или 1. Такая зависимость вход-выход служит идеальной функцией вычислительной системы. Отношение SN для вычислительной системы характеризует ее функциональные возможности после калибровки порогового значения.

Процедуры для вычисления каждого типа отношений SN приведены в следующих подразделах.

5.3 Процедура количественной оценки робастности

Процедура вычисления отношения SN и чувствительности при оценке робастности содержит следующие этапы.

Этап 1. Определение идеальной функции системы

Функция - это действия, которые выполняет система для достижения своей цели. Любая функция имеет входной сигнал, обеспечивающий реализацию намерения оператора в динамическом режиме. Отклик системы варьируется за счет изменения входного сигнала до тех пор, пока не будет достигнуто целевое значение отклика. Функцию выражают математической зависимостью между входными сигналами и откликами.

Определение идеальной функции, то есть планируемой зависимости между входными сигналами и откликами, основано на целевой функции системы. Идеальная функция характеризует ожидаемые действия системы.

В случае статической (нединамической) характеристики определяют идеальный выход, целевое значение выхода системы, затем переходят к этапу 3.

Этап 2. Выбор фактора сигнала и его диапазона

В случае динамической характеристики сигнал - это активный или пассивный вход системы, изменяющий отклик системы в соответствии с установленными требованиями. Те характеристики в эксперименте, которые управляют входным сигналом, надо принять в качестве фактора сигнала. Фактор сигнала - это такая входная переменная, которую экспериментально задает оператор с целью получения отклика системы. Диапазон изменений фактора сигнала должен охватывать весь диапазон, соответствующий эксплуатации.

Этап 3. Выбор метода измерений выходной характеристики

Выходную характеристику также называют откликом. В случае динамической функции выход - это величина, которую пользователь ожидает получить. При измерении отклика, который зависит от времени, могут возникнуть некоторые трудности. В таких случаях должен быть разработан соответствующий метод измерения.

Этап 4. Разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней

Условия, которые вызывают отклонения идеальной функции в реальных условиях на этапе эксплуатации, называют условиями шума или условиями ошибки. В эксперименте по определению оценки отношения SN важно воссоздавать условия шума с использованием факторов шума. Факторы шума - это переменные, которые вызывают изменения отклика в реальных условиях эксплуатации. Поэтому при определении оценки робастности рекомендуется рассмотреть все возможные источники возникновения шума и определить

рациональные и эффективные стратегии управления шумом. Факторы шума обусловлены условиями использования, процессами старения/износа и производственной вариацией. При параметрическом проектировании рекомендуется рассматривать как можно большее число видов факторов. Кроме того, уровни факторов шума надо располагать в широком диапазоне, охватывающем реальные условия эксплуатации. С целью увеличения срока службы системы можно рассматривать факторы шума, обусловленные износом при длительном периоде эксплуатации.

Этап 5. Проведение эксперимента и сбор данных

На данном этапе считается известным план экспериментов по оцениванию робастности через отношение SN. В плане показано, какие комбинации уровней факторов сигнала и шума будут реализованы в эксперименте. Обычно выбирают двухуровневый полный факторный план для факторов сигнала и шума. Другими словами, измерения выходного отклика выполняют при различных комбинациях уровней сигнала и шума. Далее проводят эксперимент и собирают данные в таблице результатов экспериментов. На ее основании можно вычислить отношения SN для динамических характеристик. В случае статических (нединамических) характеристик фактор сигнала отсутствует, поэтому эксперимент проводят в условиях шума. План экспериментов по оцениванию робастности соответствует внешней таблице плана прямого произведения для робастного параметрического проектирования.

Этап 6. Вычисление отношения SN и чувствительности S

Отношение SN и чувствительность вычисляют на основании данных, полученных на этапе 5. Формулы для расчетов приведены в 5.4. Эти формулы основаны на форме идеальной функции системы, определенной на этапе 1. Отношение SN характеризует вариации функции, обусловленные условиями шума. Отношение SN - это характеристика робастности системы, а чувствительность S - показатель, характеризующий эффективность (правильно в 3.1.4 стр. 4).

5.4 Формирование отношения SN: вычисление методом декомпозиции общей суммы квадратов

5.4.1 Пропорциональная зависимость с нулевой точкой (динамическая характеристика)

Если сигнал равен нулю, выходной отклик - тоже ноль, и выходной отклик пропорционально возрастает с ростом сигнала. Если такая зависимость соответствует идеальному состоянию, как это бывает во многих случаях, то идеальную функцию можно описать пропорциональной зависимостью с нулевой точкой

$$y = \beta M \quad (1)$$

где отклик и входной сигнал обозначены y и M соответственно.

Такая функция называется пропорциональной идеальной функцией с нулевой точкой. Коэффициент β - коэффициент чувствительности.

а) Набор данных для вычисления отношения SN для пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой.

Набор данных для такой идеальной функции представлен в таблице 1, где фактор сигнала имеет k уровней, а фактор шума - n уровней.

Таблица 1 - Набор данных для пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой

Уровень сигнала		M_1	M_2		M_k	Линейная форма
Уровень шума	N_1	y_{11}	y_{12}		y_{1k}	L_1
	N_2	y_{21}	y_{22}		y_{2k}	L_2

	...	...	...		...	
	N_n	y_{n1}	y_{n2}		y_{nk}	L_n

б) Декомпозиция общей суммы квадратов для пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой.

Общая сумма квадратов

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{nk}^2 (f_T = n \cdot k) \quad (2)$$

Сумма квадратов уровней входного сигнала/эффективный делитель

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_k^2 \quad (3)$$

Линейные формы для уровней шума:

$$L_1 = M_1 y_{11} + M_2 y_{12} + \dots + M_k y_{1k}$$

$$L_2 = M_1 y_{21} + M_2 y_{22} + \dots + M_k y_{2k}$$

.....

$$L_n = M_1 y_{n1} + M_2 y_{n2} + \dots + M_k y_{nk} \quad (4)$$

Сумма квадратов, обусловленная угловым коэффициентом прямой β

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2 + \dots + L_n)^2}{n \cdot r}, (f_\beta = 1) \quad (5)$$

Сумма квадратов, обусловленная вариацией углового коэффициента прямой β между уровнями шума

$$S_{N\beta} = \frac{L_1^2 + L_2^2 + \dots + L_n^2}{r} - S_\beta, (f_{N\beta} = n - 1) \quad (6)$$

Сумма квадратов, обусловленная ошибкой

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N\beta} (f_e = f_T - f_\beta - f_{N\beta} = n \cdot k - n) \quad (7)$$

Дисперсия, обусловленная ошибкой/дисперсия ошибки

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{S_e}{n \cdot k - n} \quad (8)$$

Дисперсия, обусловленная объединенной ошибкой/дисперсия, обусловленная ошибкой и шумом

$$V_N = \frac{S_{N\beta} + S_e}{f_{N\beta} + f_e} \quad (9)$$

Отношение SN η и чувствительность S:

$$\eta = 10 \log \frac{\left(\frac{S_\beta - V_e}{n \cdot r} \right)}{V_N} \text{ (дБ)} \quad (10)$$

$$S = 10 \log \left(\frac{S_\beta - V_e}{n \cdot r} \right) \text{ (дБ)} \quad (11)$$

5.4.2 Линейная зависимость (динамическая характеристика)

Пропорциональная зависимость с нулевой точкой имеет очень широкое применение. Если энергия на входе равна нулю, то энергия на выходе - тоже ноль. Однако встречаются и другие случаи, когда начало координат не определено и/или нужна только линейная зависимость между входом и выходом. В таких случаях можно предположить, что идеальная функция описывается линейной зависимостью вида

$$y = \alpha + \beta M$$

Такая функция называется линейной зависимостью идеальной функции. Коэффициент β - это коэффициент чувствительности, а параметр α - это смещение прямой относительно нулевой точки.

а) Набор данных для вычисления отношения SN при линейной зависимости идеальной функции.

Набор данных для линейной зависимости представлен в таблице 2, где фактор сигнала имеет k уровней, а фактор шума - n .

Таблица 2 - Набор данных для линейной зависимости идеальной функции

Сигнал		M_1	M_2	...	M_k	Сумма
Уровень шума	N_1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1k}	N_1
	N_2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2k}	N_2
	...	...	...	...	...	
	N_n	y_{n1}	y_{n2}	...	y_{nk}	N_n
	Сумма	Y_1	Y_2	...	Y_k	

б) Декомпозиция суммы квадратов для линейной зависимости

Общая сумма квадратов

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{nk}^2 \quad (f_T = n \cdot k)$$

Среднее значение квадрата суммы

$$S_m = \frac{(y_{11} + y_{12} + \dots + y_{nk})^2}{n \cdot k} \quad (f_m = 1)$$

Среднее значение уровней сигнала

$$\bar{M} = \frac{(M_1 + M_2 + \dots + M_k)}{k}$$

Сумма квадратов, обусловленная уровнями входного сигнала, относительно среднего значения

$$r = (M_1 - \bar{M})^2 + (M_2 - \bar{M})^2 + \dots + (M_k - \bar{M})^2$$

Сумма квадратов, обусловленная угловым коэффициентом прямой β

$$S_\beta = \frac{[(M_1 - \bar{M})Y_1 + (M_2 - \bar{M})Y_2 + \dots + (M_k - \bar{M})Y_k]^2}{n \cdot r} \quad (f_\beta = 1)$$

Сумма квадратов, обусловленная основным эффектом шума

$$S_N = \frac{N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_n^2}{k} - S_m \quad (f_N = n - 1)$$

Сумма квадратов, обусловленная ошибкой

$$S_e = S_T - S_m - S_\beta - S_N \quad (f_e = n \cdot k - 1 - n)$$

Дисперсия, обусловленная ошибкой/дисперсия ошибки

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{S_e}{n \cdot k - 1 - n}$$

Дисперсия, обусловленная объединенной ошибкой

$$V_N = \frac{S_N + S_e}{f_N + f_e}$$

Отношение SN η и чувствительность S:

$$\eta = 10 \log \frac{\frac{1}{n \cdot r} (S_{\beta} - V_e)}{V_N} \text{ (дБ)}$$

$$S = 10 \log \frac{1}{n \cdot r} (S_{\beta} - V_e) \text{ (дБ)}$$

Примечание 1 - При вычислении отношения SN не используют результаты экспериментов, полученные исключительно в условиях повторяемости, а проводят многофакторный эксперимент, позволяющий получить данные при различных комбинациях уровней фактора шума и постоянных прочих условиях. В отличие от случайных воздействий шума, факторы шума целенаправленно вводят в параллельные опыты. Оценивание вариабельности при целенаправленно введенных факторах шума - это одна из особенностей оценивания отношения SN.

Примечание 2 - Формулы для декомпозиции суммы квадратов отличаются в зависимости от вида функциональной зависимости. Например, сумму квадратов, обусловленную средним значением (S_m), вычисляют в случае линейной зависимости, но не рассчитывают для пропорциональной зависимости с нулевой точкой. Существуют и другие различия в формулах, зависящие от вида функциональной зависимости.

5.4.3 Пропорциональная зависимость с нулевой точкой (динамическая характеристика)

Фиксированную точку, называемую опорной, рассматривают в качестве начала координат в пространстве. В этом случае отношение SN вычисляют на основании данных (M', y'), преобразованных следующим образом:

$$(M', y') = (M, y) - (M_0, y_0)$$

На основании вычислений разности координат опорной точки (M_0, y_0) и каждой точки из набора данных (M, y) записывают выражение для пропорциональной идеальной функции с опорной точкой в следующем виде:

$$(y - y_0) = \beta (M - M_0)$$

Эта функция называется пропорциональной идеальной функцией с опорной точкой. Коэффициент β - угловой коэффициент прямой или коэффициент чувствительности.

Если преобразованные данные (M', y') рассматривать в качестве исходных (M, y), то при вычислении отношения SN могут быть использованы те же выражения, как и в случае пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой.

5.4.4 Отклик вида "номинал - наилучший отклик" (статическая/нединамическая характеристика)

Если у системы имеется одна постоянная конечная цель, то отклик системы относится к виду "номинал - лучшая характеристика" или "номинал - наилучший отклик". Отношение SN можно использовать для определения оценки робастности в случае "номинал - наилучший отклик".

а) Набор данных для вычисления отношения SN в случае "номинал - наилучший отклик"

Набор данных для статического (нединамического) отклика приведен в таблице 3, где фактор шума имеет n уровней, а фактор сигнала отсутствует. Данные фиксируют в одной форме, как план типа А. Эта конфигурация - общая для всех типов статических (нединамических) характеристик.

Таблица 3 - Набор данных для статической (нединамической) характеристики

Сигнал		План типа А
Уровень шума	N_1	Y_1
	N_2	Y_2
	$\dots$	$\dots$
	N_n	Y_n

б) Декомпозиция суммы квадратов для вычисления отношения SN в случае "номинал - наилучший отклик".

Общая сумма квадратов

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2$$

Среднее значение квадрата суммы

$$S_m = \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2}{n}$$

Сумма квадратов, обусловленная ошибкой

$$S_e = S_T - S_m \quad (f_e = n - 1)$$

Дисперсия, обусловленная шумом и ошибкой

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{S_e}{n - 1}$$

Отношение SN η и чувствительность S:

$$\eta = 10 \log \frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e} \quad (\text{дБ})$$

$$S = 10 \log \frac{1}{n}(S_m - V_e) \quad (\text{дБ})$$

5.4.5 Отклик "чем меньше, тем лучше" (статическая/нединамическая характеристика)

Если отклик системы принимает неотрицательные значения и его идеальное значение равно нулю, отклик системы называют "чем меньше значение характеристики, тем лучше" или "чем меньше, тем лучше". Отношение SN можно использовать для оценивания робастности в случае отклика "чем меньше, тем лучше".

а) Набор данных для вычисления отношения SN в случае отклика "чем меньше, тем лучше"

Набор данных в случае отклика "чем меньше, тем лучше" приводят в общепринятой для статической (нединамической) характеристики форме, как показано в таблице 3, где у фактора шума n уровней.

б) Вычисление отношения SN для этого случая

Средний квадрат отклонений от идеального значения, равного нулю, вычисляют по формуле

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n}(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)$$

В настоящем стандарте обозначение $\hat{\sigma}^2$ использовано для оценки среднего квадратичного отклонения (СКО).

Отношение SN, η , вычисляют по формуле

$$\eta = -10 \log \hat{\sigma}^2 = 10 \log \frac{1}{\hat{\sigma}^2} \quad (\text{дБ})$$

5.4.6 Отклик вида "чем больше, тем лучше" (статическая/нединамическая характеристика)

Если желательно, чтобы отклик системы принимал как можно большее значение, это означает, что идеал - бесконечная величина. Тогда отклик системы называют откликом "чем больше, тем лучше". Отношение SN можно использовать для оценивания робастности в случае отклика "чем больше, тем лучше".

Если предельное значение y_0 теоретически известно, то после преобразования данных к разностям от предельного значения $y' = y_0 - y$ новую переменную y' можно рассматривать в качестве характеристики "чем меньше, тем лучше" или характеристики "номинал - лучше всего". Рекомендуется преобразовывать данные и использовать выражения, принятые для статических (нединамических) характеристик. Примером служат данные, выраженные в процентах.

а) Набор данных для вычисления отношения SN в случае отклика "чем больше, тем лучше"

Набор данных в случае отклика "чем больше, тем лучше" приводят в общепринятой форме для статической/нединамической характеристики, где y фактора шума n уровней, как показано в таблице 3.

б) Вычисление отношения SN в случае отклика "чем больше, тем лучше"

В случае отклика "чем больше, тем лучше" использование обратной величины y , $1/y$, приводит к изменению идеальной функции на ситуацию в случае отклика "чем меньше, тем лучше". Следовательно, выражение среднего квадратичного отклонения $\hat{\sigma}^2$ из формулы (33) преобразуется в следующее:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right)$$

Отношение SN, η , вычисляют по формуле

$$\eta = -10 \log \hat{\sigma}^2 = 10 \log \frac{1}{\hat{\sigma}^2} \text{ (дБ)}$$

5.4.7 Отношение SN для дискретных характеристик

В электронных вычислительных машинах, системах управления, цифровых системах передачи данных и других подобных системах данные входа и результирующего выхода содержат только два числовых значения, а именно единицы и нули. В системах с дискретным входом и выходом для оценивания робастности надо использовать нормированное отношение SN. "Нормированное отношение SN" означает отношение SN, полученное в результате корректировки порогового уровня. Такая корректировка также называется калибровкой или выравниванием.

а) Набор данных для вычисления нормированного отношения SN для дискретных характеристик

Рассматривают функцию передачи данных, для которой получение нуля в случае передачи единицы - это ошибка. Долю таких ошибок обозначают p . Ошибкой также будет получение единицы в случае передачи нуля, долю таких ошибок обозначают q . Эту информацию можно представить в обобщенной форме, как показано в таблице 4.

Таблица 4 - Таблица с долями ошибок двух типов

		Выход (детерминированный результат)		Число опытов
		1	0	
Вход (выборки)	1	$1-p$	p	n_1
	0	q	$1-q$	n_2

б) Вычисление нормированного отношения SN для дискретных характеристик

Если система передачи данных оптимизирована в результате коррекции порогового уровня так, что доли ошибок p и q не изменяются, нормированную долю ошибок p_0 вычисляют по формуле

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sqrt{\left(\frac{1}{p} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{q} - 1\right)}}$$

поскольку в этом случае справедливо следующее выражение:

$$\left(\frac{1}{p_0} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{q_0} - 1\right) = \left(\frac{1}{p} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{q} - 1\right).$$

Нормированный вклад доли p_0 следует вычислять по нормированной доле ошибок следующим образом:

$$P_0 = (1 - 2p_0)^2$$

Нормированное отношение SN равно

$$\eta_0 = -10 \log \left(\frac{1}{p_0} - 1 \right) \text{ (дБ)}$$

Для дискретных характеристик нормированное отношение SN характеризует робастность системы после оптимизации в результате выравнивания порогового уровня.

5.5 Использование отношения SN

5.5.1 Использование отношения SN при сравнении характеристик систем

Абсолютное значение отношения SN самостоятельно не несет существенной информации, но разницу в значениях, полученных для двух систем при одинаковых уровнях шума, можно использовать в качестве меры для их сравнения. Значения отношений SN, вычисленные при одинаковых уровнях шума, служат индикаторами рыночных потерь, вызванных неэффективностью и вариабельностью систем под воздействием шума. Такой подход позволяет сравнивать робастность систем, реализующих различные проектные решения. Он называется "оцениванием робастности".

Как отмечалось выше, отношение SN можно использовать для относительного сравнения систем или различных проектных решений. Оценивание робастности можно использовать не только в отношении новых систем, касающихся внедрения технологии или разработки продукции, но при сравнении выпускаемой продукции и продукции конкурентов в процессе бенчмаркинга с целью выявления продукции, которая превосходит по своим характеристикам все представленные на рынке аналоги.

5.5.2 Случаи нелинейной зависимости

Если идеальная зависимость между сигналом и откликом описывается нелинейной функцией, в некоторых случаях ее можно линеаризовать посредством простого преобразования переменных. Такое преобразование позволяет получить пропорциональную идеальную функцию с нулевой точкой. Соответственно, можно вычислить отношение SN.

Пример

Пусть "у" - выход, "М" - сигнал, и α - константа.

Идеальная функция системы имеет вид: $y = \alpha e^{\beta M}$.

Возьмем натуральный логарифм от обеих частей равенства: $\ln y = \ln \alpha + \beta M$

В этом случае применима линейная зависимость для отношения SN

5.5.3 Отношение SN для статических (нединамических) характеристик

Использование отношения SN для динамических характеристик наиболее результативно, и, следовательно, рекомендуется применять его на этапах процесса

разработки технологии/продукции вместо нединамических характеристик. В некоторых случаях отношение SN для нединамических характеристик можно использовать в обратном направлении по отношению к процессу внедрения технологии/разработки продукции

ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Процедура проведения эксперимента при параметрическом проектировании, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16336 [раздел 6, с.22-32].

6 Процедура проведения эксперимента при параметрическом проектировании

6.1 Основные положения

В данном разделе приведена процедура проведения эксперимента при параметрическом проектировании в случае пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой. Соответствующий пример рассмотрен в разделе 7.

С целью исследования области параметров проекта рекомендуется использовать ортогональный план для внутренней таблицы, поскольку именно такой план позволяет оценить комбинации многих параметров проекта одновременно. Число исследуемых параметров проекта в данном случае гораздо больше, чем в других экспериментальных планах при том же числе опытов. Это означает, что возможностей для повышения робастности при выборе оптимальных уровней параметров проекта становится гораздо больше.

В следующих подразделах более подробно рассмотрена последовательность проведения экспериментов при параметрическом планировании, упомянутая в 4.4⁷.

6.2 Определение идеальной функции системы (этап 1)

Функция характеризует действия, которые выполняет система для достижения своей цели. Для функции установлен входной сигнал, обеспечивающий реализацию намерений оператора. В соответствии с функциональной зависимостью входной сигнал изменяет отклик системы, обеспечивая достижение ее цели. Функцию можно представить в форме математической зависимости между входным сигналом и откликом.

Определяют идеальный вид этой функции, то есть идеальную зависимость между сигналом и откликом на основании функции системы. Идеальная функция характеризует действия, для выполнения которых предназначена система.

Описать идеальную функцию могут помочь следующие вопросы:

Какова предполагаемая функция системы?

Как система формирует предполагаемый отклик?

Какова физическая модель системы?

Какую энергию преобразует система в случае рассмотрения аппаратных средств системы?

Как преобразуется информация в случае рассмотрения программного обеспечения или систем обслуживания?

Что представляет собой входной сигнал, который изменяет отклик?

Что представляет собой отклик, формируемый системой?

Какова идеальная зависимость между сигналом и откликом?

Каким выражением можно описать существующую функциональную зависимость?

Если отклик должен быть нулем при нулевом сигнале (вход равен нулю, значит и выход равен нулю), а вход и выход должны быть пропорциональны, тогда функцию можно описать пропорциональной зависимостью с нулевой точкой. Пропорциональная зависимость между величинами справедлива во многих физических системах, следовательно, использование пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой

⁷ ГОСТ Р ИСО 16336-2020

физически обосновано. Использование линейных зависимостей обеспечивает простоту восприятия и управления системами.

Такие характеристики, выражаемые зависимостями вход-выход, также называют динамическими характеристиками.

Различают три основных типа зависимостей для динамических идеальных функций: пропорциональные с нулевой точкой, пропорциональные с опорной точкой и линейные зависимости, как было упомянуто в разделе 5. В некоторых случаях зависимость между входом и выходом можно выразить простым линейным выражением после определенных преобразований. Более подробная информация приведена в разделе 5⁸.

6.3 Выбор фактора сигнала и его диапазона (этап 2)

Определяют входной сигнал системы. Сигнал направлен на предполагаемое изменение отклика. Фактор сигнала - это условия, которыми управляет пользователь с целью ввода сигнала в систему. Иногда пользователь воздействует на вход косвенно, например с помощью ножной педали, вручную или посредством рычага. Выбирают сигнал и фактор сигнала для изменения сигнала.

Уровни фактора сигнала должны охватывать весь диапазон условий эксплуатации. В случае активных динамических характеристик диапазон откликов наиболее значим, поскольку требования к выходу устанавливает пользователь. Поэтому проверяют, охватывают ли условия эксплуатации диапазон отклика, формируемый за счет изменения сигнала. В случае пассивных динамических характеристик, таких как температура термометра, фактический диапазон сигнала должен охватывать уровни фактора сигнала в эксперименте.

Общий диапазон сигнала стоит выбирать более широким, поскольку результаты эксперимента могут быть применены в отношении различных ситуаций. Фактор сигнала должен иметь три или более уровня, поскольку нелинейность и искажения более высоких порядков могут быть оценены как эффекты шума. Если уровни сигнала находятся на равных расстояниях один от другого, то вычисления декомпозиции суммы квадратов упрощаются.

6.4 Выбор метода измерений отклика на выходе (этап 3)

Необходимо выбрать метод измерения отклика. В некоторых случаях подходящий метод может отсутствовать. В целом, в промышленности выполняют измерения нединамических откликов в целях валидации. Разработка эффективных и результативных измерительных систем, предназначенных для количественной оценки откликов идеальных функций, — важное направление.

6.5 Разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней (этап 4)

Выбирают факторы шума, чтобы исследовать их в эксперименте. Одного или двух факторов шума может быть достаточно, чтобы сравнить робастность системы во всем пространстве факторов шума. Если желательно иметь много факторов шума и их легко варьировать, то можно расположить их в ортогональной таблице.

Факторы шума в основном подразделяются на два вида: внутренний шум и внешний шум. Внутренний шум возникает по причине отклонения параметров системы от проектных значений, например, деградации в результате старения, неточности характеристик деталей, вариабельности процессов производства и сборки. Внешний шум поступает извне, например, воздействие факторов внешней среды в процессе эксплуатации, таких как температура, влажность, вибрация и т.д.

⁸ ГОСТ Р ИСО 16336-2020

Когда в план эксперимента включают много факторов шума, увеличивается область применения результатов эксперимента, но, с другой стороны, сильно возрастает число опытов. Следовательно, если для каждого фактора шума приблизительно известно направление градиента, то можно использовать метод смешивания. Смешанный фактор шума имеет два крайних уровня: на одном отклик имеет тенденцию снижаться, а на втором - повышаться. Тогда робастность можно оценить только на двух уровнях шума, обеспечивая предельную эффективность эксперимента. Чем меньше эффект смешанного фактора шума, тем система более робастна.

6.6 Выбор управляемых факторов и их уровней для параметров проекта (этап 5)

Параметры проекта, используемые в эксперименте, выбирают в качестве управляемых факторов. Рекомендуется использовать три уровня, один из которых - базовый уровень. На заключительном этапе оптимизации надо выбрать и проверить оптимальные уровни управляемых факторов. Устанавливать диапазон параметров проекта рекомендуется исходя из того, насколько требуется исследовать пространство факторов. Обычно диапазон должен быть выбран настолько широкий, насколько это возможно. Иногда оптимальные значения параметров проекта обнаруживаются в непредвиденном диапазоне.

Управляемые факторы могут быть непрерывными переменными, такими как длина или масса, а могут быть дискретными атрибутами, такими как тип или форма материала, зависящими от природы параметров проекта.

Прежде всего, управляемые факторы надо выбрать таким образом, чтобы можно было их варьировать независимо. Во-вторых, определять управляемые факторы рекомендуется таким образом, чтобы их эффекты тоже были независимыми. В некоторых случаях, когда управляемые факторы взаимодействуют, можно применять метод, который называют "скользящим уровнем", или переопределить управляемые факторы таким образом, чтобы их эффекты стали более независимыми.

Например, когда объем, удельный вес и массу кубической детали выбирают в качестве управляемых факторов в одном эксперименте, они оказываются коррелированными и зависимыми переменными. Два из них можно выбрать в качестве управляемых факторов. Вместо выбора времени и температуры в качестве управляемых факторов, можно переопределить их как тепловую энергию и время или просто назвать их временем и термодинамической характеристикой.

6.7 Распределение экспериментальных факторов между внутренней и внешней таблицами (этап 6)

Распределяют управляемые факторы во внутренней таблице, а факторы шума, выбранные на этапе 4, и фактор сигнала, выбранный на этапе 2, - во внешней таблице. Внутренняя таблица должна быть ортогональной матрицей, такой как матрица L_{18} , а внешняя таблица может быть каким-нибудь факторным планом. В имитационных экспериментах внешний план тоже может быть ортогональной матрицей, поскольку в таком случае параллельные опыты во внешней таблице проводить гораздо проще.

Ортогональный план имеет восемь столбцов. Один двухуровневый управляемый фактор А и семь трехуровневых факторов (В-Н) могут размещаться в столбцах этого ортогонального плана, как показано в таблице 5. Управляемый фактор А следует разместить в первом столбце. Строки представляют собой номера опытов. Числа в каждой ячейке — это уровни соответствующих факторов. Опыт номер 1 должен быть проведен при следующей комбинации уровней факторов: А1В1С1D1Е1F1G1Н1. А условия проведения опыта в строке 2 сформированы на основании комбинации уровней факторов: А1В1С2D2Е2F2G2Н2.

Таблица 5 - Ортогональный план L_{18}

Номер п/п	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Как и для внутренней таблицы в параметрическом проектировании, в данном случае тоже рекомендуется ортогональная таблица для результативного исследования факторного пространства. Исключение параметров проекта ввиду большого числа опытов противоречит целям параметрического проектирования. Следовательно, настоятельно рекомендуется использовать именно ортогональный план, который позволяет оценить комбинации многих параметров проекта одновременно. А также очень важно получить оценку параметра проекта в условиях, когда изменяются другие параметры.

Число строк в ортогональной таблице - это число опытов в эксперименте. Число столбцов - это число рассматриваемых факторов. Если число управляемых факторов не превосходит числа столбцов ортогонального плана, то можно включить в этот план все факторы. С целью повышения результативности рекомендуется также заполнить управляемыми факторами все свободные столбцы.

Обычно рекомендуется использовать ортогональный план L_{18} , где взаимодействия между любыми двумя трехуровневыми столбцами практически равномерно смешаны с остальными трехуровневыми столбцами. Разделенные эффекты в этом семействе ортогональных планов, таких как L_{12} , L_{18} , L_{36} , L_{54} , можно относительно строго идентифицировать без конкретных смешанных взаимодействий. Наоборот, в системе ортогональных планов 2^n , 3^n , 4^n взаимодействие любой пары столбцов смешано с конкретным столбцом (столбцами), так что отсутствует робастность против сильных взаимодействий управляемых факторов. Более подробная информация по данному вопросу приведена в библиографии.

6.8 Проведение эксперимента и сбор данных (этап 7)

Во внешнюю таблицу заносят данные для каждой строки внутренней таблицы. Отношение SN и чувствительность вычисляют на основании набора соответствующих данных внешней таблицы для каждой строки внутренней таблицы.

Следует отметить, что собранные во внешней таблице данные надо применять к каждой строке внутренней ортогональной таблицы. Другими словами, робастность надо оценивать для каждой комбинации параметров проекта, заданной во внутренней ортогональной таблице.

В таблице 6 приведен пример внешней таблицы для оценки робастности через отношение SN и чувствительность для каждой строки внутренней ортогональной таблицы.

Хотя в данном примере внешняя таблица - это полный факторный план для сигнала и факторов шума, но можно использовать и ортогональную таблицу.

Таблица 6 - Пример внешней таблицы для отношения SN и чувствительности (двухфакторный план)

Сигнал		M_1	M_2	M_k	Линейная форма
Фактор шума	N_1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{1k}	L_1
	N_2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{2k}	L_2
	...	...	...	...	
	N_n	Y_{n1}	Y_{n2}	Y_{nk}	L_n

6.9 Вычисление отношения SN и чувствительности S (этап 8)

Отношение SN и чувствительность необходимо вычислить для каждой строки внутренней ортогональной таблицы L_{18} . Выражения, приведенные в 5.4, зависят от типа идеальной функции.

В случае пропорциональной зависимости с нулевой точкой, вычисления, например, для набора данных из таблицы 6, выполняют следующим образом. Вычисляют следующие величины:

Общую сумму квадратов

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{nk}^2 \quad (f_T = n \cdot k)$$

Сумму квадратов уровней входного сигнала/эффективный делитель

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_k^2$$

Линейные формы для каждого уровня шума

$$L_1 = M_1 \cdot y_{11} + M_2 \cdot y_{12} + \dots + M_k \cdot y_{1k}$$

$$L_2 = M_1 \cdot y_{21} + M_2 \cdot y_{22} + \dots + M_k$$

.....

$$L_n = M_1 \cdot y_{n1} + M_2 \cdot y_{n2} + \dots + M_k \cdot y_{nk}$$

Сумму квадратов, обусловленную угловым коэффициентом прямой β

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2 + \dots + L_n)^2}{n \cdot r} \quad (f_{N\beta} = n - 1)$$

Сумму квадратов, обусловленную ошибкой

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N\beta} \quad (f_e = n \cdot k - n)$$

Дисперсию, обусловленную ошибкой/дисперсию ошибки

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{S_e}{n \cdot k - n}$$

Дисперсию, обусловленную объединенной ошибкой

$$V_N = \frac{S_e + S_{N\beta}}{f_e + f_{N\beta}} = \frac{S_e + S_{N\beta}}{n \cdot k - 1}$$

Отношение SN

$$\eta = 10 \log \frac{\left(\frac{S_\beta - V_e}{n \cdot r} \right)}{V_N} \quad (\text{дБ})$$

Чувствительность

$$S = 10 \log \left(\frac{S_\beta - V_e}{n \cdot r} \right) \quad (\text{дБ})$$

В таблице 7 приведены результаты вычислений отношения SN и чувствительности для каждой строки внутренней таблицы.

На основании результатов расчетов отношений SN и чувствительностей для каждой строки внутренней таблицы, приведенных в таблице 7, вычисляют средние значения отношений SN и чувствительностей для каждого уровня управляемого фактора (параметра проекта) во внутренней таблице для того, чтобы определить эффекты факторов.

Таблица 7 - Отношение SN и чувствительность для каждой строки внутренней таблицы

Номер п/п	Отношение SN, дБ	Чувствительность, дБ
1	η_1	S_1
2	η_2	S_2
3	η_3	S_3
4	η_4	S_4
5	η_5	S_5
6	η_6	S_6
7	η_7	S_7
8	η_8	S_8
9	η_9	S_9
10	η_{10}	S_{10}
11	η_{11}	S_{11}
12	η_{12}	S_{12}
13	η_{13}	S_{13}
14	η_{14}	S_{14}
15	η_{15}	S_{15}
16	η_{16}	S_{16}
17	η_{17}	S_{17}
18	η_{18}	S_{18}

Среднее значение отношений SN для уровня 1 фактора А вычисляют путем усреднения значений, приведенных в строках с 1 по 9. Также рассчитывают среднее значение отношений SN для уровня 2 фактора А, усредняя значения в строках с 10 до 18. Аналогично выполняют вычисления для управляемых факторов от В до Н, как приведено ниже.

Среднее значение отношений SN для каждого уровня управляемых факторов:

$$\begin{aligned}
 \eta_{A1} &= \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_9)}{9}; \\
 \eta_{A2} &= \frac{(\eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15} + \eta_{16} + \eta_{17} + \eta_{18})}{9}; \\
 \eta_{B1} &= \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12})}{6}; \\
 \eta_{H3} &= \frac{(\eta_3 + \eta_4 + \eta_7 + \eta_{12} + \eta_{14} + \eta_{17})}{6}
 \end{aligned} \tag{40}$$

Точно так же усредняют чувствительности для каждого уровня управляемых факторов, как показано ниже.

Среднее значение чувствительностей для каждого уровня управляемых факторов:

$$S_{A1} = \frac{(S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9)}{9};$$

$$S_{A2} = \frac{(S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} + S_{16} + S_{17} + S_{18})}{9}; \quad (41)$$

$$S_{H3} = \frac{(S_3 + S_4 + S_7 + S_{12} + S_{14} + S_{17})}{6}.$$

В таблице 8 приведены результаты вычислений всех средних значений отношений SN и чувствительностей для каждого уровня управляемых факторов во внутренней ортогональной таблице.

Таблица 8 - Средние значения отношений SN и чувствительностей.

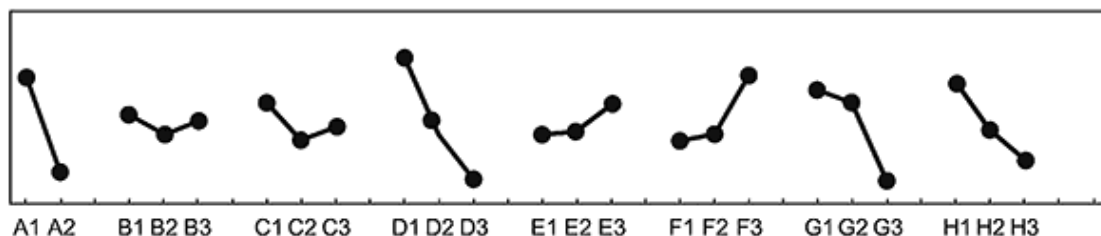
Управляемый фактор	Отношение SN, дБ			Чувствительность, дБ		
	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
A	η_{A1}	η_{A2}	η	S_{A1}	S_{A2}	S
B	η_{B1}	η_{B2}	η_{B3}	S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}
C	η_{C1}	η_{C2}	η_{C3}	S_{C1}	S_{C2}	S_{C3}
D	η_{D1}	η_{D2}	η_{D3}	S_{D1}	S_{D2}	S_{D3}
E	η_{E1}	η_{E2}	η_{E3}	S_{E1}	S_{E2}	S_{E3}
F	η_{F1}	η_{F2}	η_{F3}	S_{F1}	S_{F2}	S_{F3}
G	η_{G1}	η_{G2}	η_{G3}	S_{G1}	S_{G2}	S_{G3}
H	η_{H1}	η_{H2}	η_{H3}	S_{H1}	S_{H2}	S_{H3}

6.10 Построение диаграмм эффектов факторов для отношения SN и чувствительности (этап 9)

На диаграммы эффектов факторов наносят значения отношений SN и чувствительностей, основываясь на результатах вычислений средних значений, приведенных в таблице 8. Данные диаграммы демонстрируют влияние управляемых факторов на отношение SN и на чувствительность. Отношение SN характеризует вариабельность, а значение чувствительности - угловой коэффициент прямой или среднее значение отклика.

На рисунке 6 приведен пример диаграмм эффектов факторов для отношения SN и чувствительности.

Отношение сигнал/шум, дБ



Чувствительность, дБ

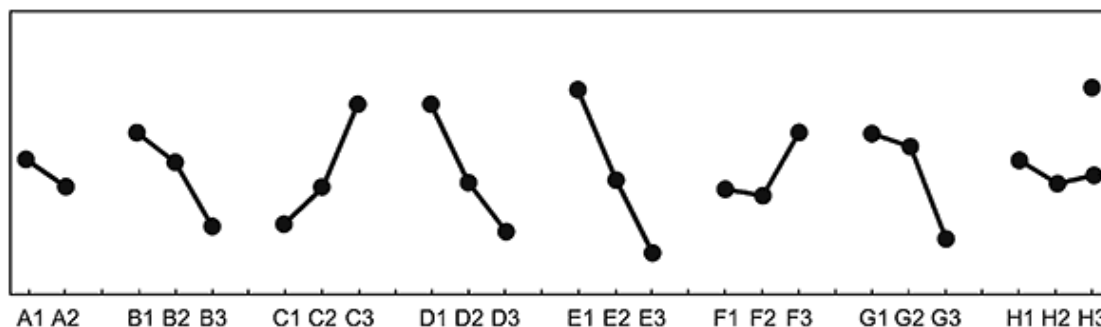


Рисунок 6 - Примеры диаграмм эффектов факторов для отношения SN и чувствительности

Поскольку среднее значение на каждом уровне управляемых факторов (параметров проекта) вычисляют из ортогонального плана, общее среднее значение для отношения SN

и чувствительности должно быть равно среднему значению для каждого управляемого фактора (параметра проекта). После построения диаграммы эффектов факторов легко выполнить проверку на наличие ошибок в вычислениях.

Общее среднее для отношения SN равно

$$\bar{T}_{sn} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_9 + \eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15} + \eta_{16} + \eta_{17} + \eta_{18}}{18} \quad (42)$$

Среднее значение отношений SN для каждого управляемого фактора должно быть таким же, как и общее среднее

$$\frac{\eta_{A1} + \eta_{A2}}{2} = \dots = \frac{\eta_{H1} + \eta_{H2} + \eta_{H3}}{3} = \bar{T}_{sn} \quad (43)$$

Общее среднее значение для чувствительности равно

$$\bar{T}_\beta = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} + S_{16} + S_{17} + S_{18}}{18} \quad (44)$$

Среднее значение чувствительности для каждого управляемого фактора должно быть равно общему среднему

$$\frac{S_{A1} + S_{A2}}{2} = \dots = \frac{S_{H1} + S_{H2} + S_{H3}}{3} = \bar{T}_\beta \quad (45)$$

Если управляемые факторы - непрерывные величины и на диаграмме эффектов не наблюдается монотонного возрастания или убывания, это может указывать на существование взаимодействия между управляемыми факторами, и следует ожидать неудовлетворительной оценки воспроизводимости результатов проверочного опыта ввиду наличия такого взаимодействия. Для непрерывной величины управляемого фактора нехарактерно такое влияние на отношение SN, при котором средний уровень не робастен, а верхний и нижний - робастны. Таким образом, благоприятная ситуация наблюдается в случае, когда на диаграмме эффектов управляемых факторов непрерывные величины монотонно возрастают или убывают.

6.11 Выбор оптимальных условий (этап 10)

При выборе оптимальных условий применяют двухэтапную стратегию.

Сначала рассматривают диаграмму эффектов факторов для отношения SN и выбирают в качестве оптимального уровня робастности такой уровень каждого управляемого фактора, для которого среднее значение данного отношения максимально.

Затем рассматривают диаграмму эффектов факторов в отношении чувствительности. После проверки правильности выполнения действий на предыдущем этапе, в случае необходимости корректировки выходной величины, определяют, за счет какого фактора (факторов) можно скорректировать угловой коэффициент прямой или среднее значение.

Так как параметрическое проектирование предполагает оптимизацию робастности, то важно выбирать уровни управляемых факторов с наибольшими значениями отношения SN. Это означает, что разработанной системе соответствует наименьшая вариабельность функции системы среди прочих представленных на рынке.

Например, исходя из диаграмм эффектов факторов на рисунке 6, в качестве оптимальных условий должна быть выбрана комбинация уровней факторов A1B1C1D1E3F3G1H1. Однако если выбрать другой уровень управляемого фактора ввиду малой разницы в децибелах значений отношения SN, то другой уровень можно выбрать с учетом чувствительности или иного критерия, чем отношение SN. На рисунке 6 управляемый фактор E демонстрирует малый эффект для отношения SN, но наблюдается сильная линейная зависимость в отношении чувствительности. Если для этого фактора

выбрать уровень 2 из соображений чувствительности, а не оптимальный для отношения SN уровень 3, то результат будет мало отличаться для отношения SN, то есть для робастности. Такого рода компромиссы могут применяться в двухэтапной оптимизации. В любом случае, стратегический выбор оптимальной комбинации можно сделать с учетом многих различных критериев, но робастность должна быть самым важным и иметь приоритет при выборе.

6.12 Оценка повышения робастности по величине прироста (этап 11)

Для оценки повышения робастности важно определить величину прироста как разность между отношениями SN, полученными для оптимальных и референтных, базовых, условий проектирования.

Оптимальными условиями для примера на рисунке 6 является A1B1C1D1E3F3G1H1.

Вычисления прироста выполняют в такой последовательности:

Вычисляют отношение SN для оптимальных условий проектирования.

Расчетное значение отношения SN равно

$$\eta_{opt} = \eta_{A1} + \eta_{B1} + \eta_{C1} + \eta_{D1} + \eta_{E3} + \eta_{F3} + \eta_{G1} + \eta_{H1} - 7\bar{T}_{sn} \quad (46)$$

Аналогичным способом вычисляют отношение SN для базовых условий проектирования, то есть для комбинации A1B2C2D2E2F2G2H2.

Расчетное значение отношения SN равно

$$\eta_{base} = \eta_{A1} + \eta_{B1} + \eta_{C2} + \eta_{D2} + \eta_{E2} + \eta_{F2} + \eta_{G2} + \eta_{H2} - 7\bar{T}_{sn} \quad (47)$$

Прирост отношения SN

$$\Delta\eta = \eta_{opt} - \eta_{base} \text{ (дБ)} \quad (48)$$

Прирост чувствительности вычисляют аналогичным способом.

Расчетное значение чувствительности для оптимальных условий проектирования равно

$$S_{opt} = S_{A1} + S_{B1} + S_{C1} + S_{D1} + S_{E3} + S_{F3} + S_{G1} + S_{H1} - 7\bar{T}_\beta \quad (49)$$

Расчетное значение чувствительности для базовых условий проектирования равно

$$S_{base} = S_{A1} + S_{B2} + S_{C2} + S_{D2} + S_{E2} + S_{F2} + S_{G2} + S_{H2} - 7\bar{T}_\beta \quad (50)$$

Прирост чувствительности

$$\Delta S = S_{opt} - S_{base} \quad (51)$$

6.13 Проведение проверочного эксперимента, контроль прироста и показателя "воспроизводимость" (этап 12)

Для проверки прироста следует провести проверочные опыты в базовых и в оптимальных условиях проектирования. Такой эксперимент называют проверочным. Проводят два опыта во внешней таблице, то есть опыт в базовых условиях и опыт в оптимальных условиях. Затем вычисляют значения отношения SN, чувствительности и прироста, предназначенные для проверки.

В таблице 9 приведены значения отношения SN и чувствительности, выраженные в децибелах и представляющие собой результаты расчета и проверочного эксперимента для базовых и оптимальных условий при параметрическом проектировании.

Таблица 9 - Результаты проверки

	Отношение SN, дБ		Чувствительность, дБ	
	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение
Оптимальные условия	η_{opt}	η'_{opt}	S_{opt}	S'_{opt}
Базовые условия	η_{cur}	η'_{cur}	S_{cur}	S'_{cur}
Прирост	$\Delta\eta$	$\Delta\eta'$	ΔS	$\Delta S'$

Если расчетные и проверочные значения приростов для отношения SN и чувствительности практически одинаковы, тогда результаты эксперимента при параметрическом проектировании демонстрируют высокую воспроизводимость и останутся таковыми в реальных условиях. В противном случае это свидетельствует о наличии проблем с воспроизводимостью вследствие слабой аддитивности эффектов факторов. Тогда возникнет потребность в перепроверке элементов в плане экспериментов, таких как определение идеальной функции, входных и выходных характеристик, формирование отношения SN, стратегия управления шумом, определение управляемых факторов и т.д.

Если значения прироста в проверочном эксперименте более воспроизводимы, то это может указывать на отличие абсолютных значений отношений SN и/или чувствительностей, полученных в результате расчета и в проверочном эксперименте. В таком случае могут существовать иные неизвестные факторы шума, которые сильно влияют на отклик или на отношение SN. Однако если приросты воспроизводимы, то и эффекты рассматриваемых управляемых факторов тоже должны быть воспроизводимыми, и повышение робастности за счет выбора оптимальных условий относительно базового уровня будет воспроизводиться в реальных условиях. Выгоду от улучшения, текущего или базового проекта при его оптимизации можно оценить через снижение потерь качества у пользователя и сравнение с затратами на улучшение. Во многих случаях выбор оптимальных значений параметров проекта ничего не стоит или совсем незначительно увеличивает затраты.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7 Параметрическое планирование экспериментов для системы охлаждения лампы [1, с. 32-41]

Пример - параметрическое планирование экспериментов для системы охлаждения лампы

В данном разделе приведен пример применения параметрического проектирования системы охлаждения лампы. В осветительном приборе с лампой нужна система охлаждения, например, охлаждающий вентилятор, предназначенный для предотвращения перегрева. Измерение температуры внутри и в непосредственной близости от прибора - непростая задача, поскольку для этого важно контролировать температуру окружающей среды в течение всего эксперимента. Более того, надо учитывать влияние выбора материала на теплопередачу, излучение и конвекцию. Следовательно, это потребует существенных затрат времени и финансовых ресурсов для экспериментальной проверки разных материалов. В данном исследовании для оценки выходных характеристик системы охлаждения выполнялось определение робастности, основанное на функции этой системы, представляющей собой зависимость между напряжением питания электродвигателя вентилятора и скоростью потока воздуха.

Этап 1. Описание идеальной функции системы

Система охлаждения должна поддерживать требуемую температуру вблизи источника освещения за счет работы вентилятора, приводимого в движение электродвигателем и обеспечивающего отток нагретого лампой воздуха. Функцию такой системы охлаждения можно сформулировать так: "Создание оттока теплого воздуха за счет вращения вентилятора с электродвигателем". Идеальную функцию можно описать: "Вход - это электрическая энергия, которая характеризуется напряжением питания электродвигателя вентилятора. Выход - скорость потока воздуха, создаваемого для удаления нагретого воздуха". Идеальную функцию можно записать в виде

$$y = \beta M$$

где M - входной сигнал: "напряжение питания";

y - отклик: "скорость воздушного потока".

На рисунке 7 показана идеальная функция системы охлаждения. При увеличении напряжения питания электродвигателя пропорционально увеличивается скорость потока воздуха. Любой вид утечки воздуха, завихрения или турбулентность являются причинами отклонения от идеальной функции в реальных условиях и снижения эффективности преобразования энергии.



Рисунок 7 - Идеальная функция системы охлаждения

Этап 2. Выбор фактора сигнала и его диапазона

Входной сигнал системы охлаждения - это напряжение питания, подаваемое на входные клеммы электродвигателя вентилятора, изменение напряжения питания приводит к изменению скорости воздушного потока. Значения напряжения обычно варьируются от 0 до 25 V. Значит, напряжение можно выбрать как фактор сигнала на трех уровнях: 5, 15 и 25 V, как показано в таблице 10.

Таблица 10 - Фактор сигнала и его уровни

Уровни	M1	M2	M3
Напряжение питания электродвигателя, V	5	15	25

Этап 3. Выбор метода измерений отклика на выходе

Отклик - это скорость воздушного потока, то есть скорость движения воздуха. Отклик может быть непосредственно измерен с использованием анемометра.

Этап 4. Разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней

Факторы шума следует выбирать в соответствии с условиями шума в эксплуатации, такими как условия окружающей среды или износ деталей системы. Достаточно выбрать один или два типичных фактора шума, если они оказывают существенное влияние на характеристики системы.

В данном исследовании в качестве фактора шума выбрано наличие препятствия около выходного отверстия, как это показано в таблице 11. Возникновение препятствия приводит к нарушению потока воздуха и снижению эффективности охлаждения. Однако система должна функционировать вне зависимости от наличия или отсутствия такого препятствия.

Таблица 11 - Фактор шума и его уровни

Уровни	N1	N2
Препятствие	Нет	Есть

Этап 5. Выбор управляемых факторов и их уровней в пространстве конструкции

В ортогональную таблицу L_{18} (ПРИЛОЖЕНИЕ X) можно включить один двухуровневый фактор и семь трехуровневых. В таблице 12 показаны отобранные управляемые факторы и их уровни.

Таблица 12 - Управляемые факторы и их уровни

Управляемые факторы		Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
A	Перегородка	Нет	Да	-
B	Расстояние от корпуса прибора до входного отверстия вентилятора, мм	20	40	60

C	Расстояние от входного отверстия вентилятора до источника освещения, мм	110	60	40
D	Высота отверстия, мм	30	15	0
E	Высота выпускного канала, мм	30	15	0
F	Диаметр отверстия в корпусе над источником тепла, мм	Большой	Средний	Нет
G	Диаметр отверстия в корпусе под источником тепла, мм	Нет	Средний	Большой
H	Расстояние между источником излучения и выпускным каналом, мм	60	50	40

Этап 6. Распределение экспериментальных факторов между внутренней и внешней таблицами (планами)

Управляемые факторы должны размещаться во внутренней таблице. В этом исследовании внутренняя таблица имеет ортогональную конфигурацию. В таблице 13 показано расположение управляемых факторов в столбцах этого плана. Каждая строка - это комбинация уровней управляемых факторов в каждом из 18 опытов.

Таблица 13 - Управляемые факторы во внутренней таблице

Номер п/п	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Нет	20	110	30	30	Большой	Нет	60
2	Нет	20	60	15	15	Средний	Средний	50
3	Нет	20	40	0	0	Нет	Большой	40
4	Нет	40	110	30	15	Средний	Большой	40
5	Нет	40	60	15	0	Нет	Нет	60
6	Нет	40	40	0	30	Большой	Средний	50
7	Нет	60	110	15	30	Нет	Средний	40
8	Нет	60	60	0	15	Большой	Большой	60
9	Нет	60	40	30	0	Средний	Нет	50
10	Да	20	110	0	0	Средний	Средний	60
11	Да	20	60	30	30	Нет	Большой	50
12	Да	20	40	15	15	Большой	Нет	40
13	Да	40	110	15	0	Большой	Большой	50
14	Да	40	60	0	30	Средний	Нет	40
15	Да	40	40	30	15	Нет	Средний	60
16	Да	60	110	0	15	Нет	Нет	50
17	Да	60	60	30	0	Большой	Средний	40
18	Да	60	40	15	30	Средний	Большой	60

Факторы шума и сигнала следует располагать во внешней таблице. В данном исследовании внешняя таблица - это двухуровневый полный факторный план.

Этап 7. Проведение эксперимента и сбор данных

В таблице 14 приведены результаты измерений скорости воздушного потока во всех опытах внутренней таблицы.

Таблица 14 - Результаты измерений скорости воздушного потока, м/с

Номер п/п	M_1		M_2		M_3	
	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2
1	0,12	0,09	0,31	0,26	0,44	0,41
2	0,18	0,15	0,28	0,23	0,44	0,32
3	0,36	0,31	1,20	0,96	1,56	1,46
4	0,25	0,22	0,77	0,66	1,24	1,20
5	0,24	0,19	0,84	0,73	1,26	1,08
6	0,23	0,20	0,79	0,67	1,24	1,02
7	0,13	0,08	0,14	0,34	0,30	0,56
8	0,23	0,19	0,57	0,26	0,91	0,56
9	0,24	0,19	0,86	0,68	1,32	1,12
10	0,26	0,17	0,86	0,67	1,30	0,98
11	0,06	0,04	0,23	0,28	0,37	0,27
12	0,36	0,34	1,14	1,04	1,70	1,58
13	0,21	0,12	0,77	0,60	1,18	1,04
14	0,31	0,30	1,12	0,93	1,66	1,42
15	0,10	0,04	0,33	0,24	0,56	0,47
16	0,28	0,23	1,10	0,82	1,66	1,24
17	0,27	0,23	0,83	0,72	1,30	1,08
18	0,28	0,19	0,76	0,57	1,06	0,71

Этап 8. Вычисление отношения SN и чувствительности S

Если напряжение питания на электродвигателе равно нулю, скорость воздушного потока тоже равна нулю. Значит, для вычислений отношения SN и чувствительности можно использовать выражение пропорциональной идеальной функции с нулевой точкой, как показано (в разделе 6 данного стандарта).

Ниже приведены вычисления для первого опыта во внутренней таблице.

Общая сумма квадратов

$$S_T = 0,12^2 + 0,09^2 + 0,31^2 + 0,26^2 + 0,44^2 + 0,41^2 = 0,547900, (f_T = 6).$$

Сумма квадратов уровней входного сигнала/эффективный делитель

$$r = 5^2 + 15^2 + 25^2 = 875$$

Линейные формы для каждого уровня шума

$$L_1 = 5 \cdot 0,12 + 15 \cdot 0,31 + 25 \cdot 0,44 = 16,250000;$$

$$L_2 = 5 \cdot 0,09 + 15 \cdot 0,26 + 25 \cdot 0,41 = 14,600000.$$

Сумма квадратов, обусловленная угловым коэффициентом прямой

$$S_p = \frac{(16,25 + 14,60)^2}{2 \cdot 875} = 0,543841, (f_p = 1).$$

Сумма квадратов, обусловленная дисперсией углового коэффициента прямой β между N_1 и N_2

$$S_{\beta} = \frac{(16,25 + 14,60)^2}{2 \cdot 875} = 0,543841, (f_{\beta} = 1).$$

Сумма квадратов, обусловленная ошибкой

$$S_e = 0,547900 - 0,543841 - 0,001556 = 0,002503, (f_e = 4).$$

Дисперсия ошибки/дисперсия, обусловленная ошибкой

$$V_e = \frac{0,002503}{4} = 0,000626.$$

Дисперсия, обусловленная объединенной ошибкой/дисперсия, обусловленная ошибкой и шумом

$$V_N = \frac{0,002503 + 0,001556}{1 + 4} = 0,000812.$$

Отношение SN и чувствительность:

$$\eta = 10 \log \left(\frac{0,543841 - 0,000626}{2 \cdot 875} \right) = -4,17 \text{ (дБ)};$$

$$S = 10 \log \left(\frac{0,543841 - 0,000626}{2 \cdot 875} \right) = -35,08 \text{ (дБ)}.$$

Аналогично выполняются вычисления для всех строк внутренней таблицы.

В таблице 15 приведены все результаты вычислений для внутренней таблицы.

Таблица 15 - Значения отношения SN и чувствительности для внутренней таблицы

Номер п/п	Отношение SN, дБ	Чувствительность, дБ
1	-4,17	-35,08
2	-12,77	-35,86
3	-5,99	-23,94
4	1,76	-26,29
5	-4,81	-26,36
6	-5,35	-26,74
7	-15,93	-35,41
8	-14,45	-30,67
9	-5,35	-26,15
10	-8,82	-26,58
11	-11,40	-37,24
12	-1,08	-23,41
13	-5,57	-27,06
14	-4,92	-23,97
15	-8,00	-33,99
16	-9,13	-24,54

17	-4,89	-26,25
18	-11,99	-28,41
	$T_{SN} = -7,37$	$T_{\beta} = -28,77$

Этап 9. Построение диаграмм эффектов факторов для отношения SN и чувствительности S

Для построения диаграмм эффектов факторов на основании данных таблицы 15 вычисляют средние значения отношений SN и чувствительностей для уровней управляемых факторов, включенных во внутреннюю таблицу 13.

Средние значения отношений SN для каждого уровня управляемых факторов, включенных во внутреннюю таблицу, вычисляют по формулам, приведенным в (разделе 6):

$$\eta_{A1} = \frac{(-4,17 - 12,77 - 5,99 + 1,76 - 4,81 - 5,35 - 15,93 - 14,45 - 5,35)}{9} = -7,454;$$

$$\eta_{A2} = \frac{(-8,82 - 11,40 - 1,08 - 5,57 - 4,92 - 8,00 - 9,13 - 4,89 - 11,99)}{9} = -7,31;$$

$$\eta_{B1} = \frac{(-4,17 - 12,77 - 5,99 - 8,82 - 11,40 - 1,08)}{6} = -7,37;$$

.....

$$\eta_{H3} = \frac{(-5,99 + 1,76 - 15,93 - 1,08 - 4,92 - 4,89)}{6} = -5,18.$$

Средние значения чувствительностей вычисляют аналогичным способом.

Результаты вычислений средних значений приведены в таблице 16.

Таблица 16 - Средние значения отношений SN и чувствительностей

Управляемый фактор		Отношение SN, дБ			Чувствительность, дБ		
		Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
A	Перегородка	-7,45	-7,31	-	-29,61	-27,94	-
B	Расстояние от корпуса прибора до входного отверстия вентилятора, мм	-7,37	-4,48	-10,29	-30,35	-27,40	-28,57
C	Расстояние от входного отверстия вентилятора до источника освещения, мм	-6,98	-8,87	-6,29	-29,16	-30,06	-27,11
D	Высота отверстия, мм	-5,34	-8,69	-8,11	-30,83	-29,42	-26,07
E	Высота выпускного канала, мм	-8,96	-7,28	-5,91	-31,14	-29,13	-26,05

F	Диаметр отверстия в корпусе над источником тепла, мм	-5,92	-7,01	-9,21	-28,20	-27,88	-30,24
G	Диаметр отверстия в корпусе под источником тепла, мм	-4,91	-9,29	-7,94	-26,58	-30,80	-28,94
H	Расстояние между источником тепла и выпускным каналом, мм	-8,71	-8,26	-5,18	-30,18	-29,60	-26,55

На рисунке 8 показаны диаграммы эффектов факторов для отношений SN и чувствительностей системы охлаждения.

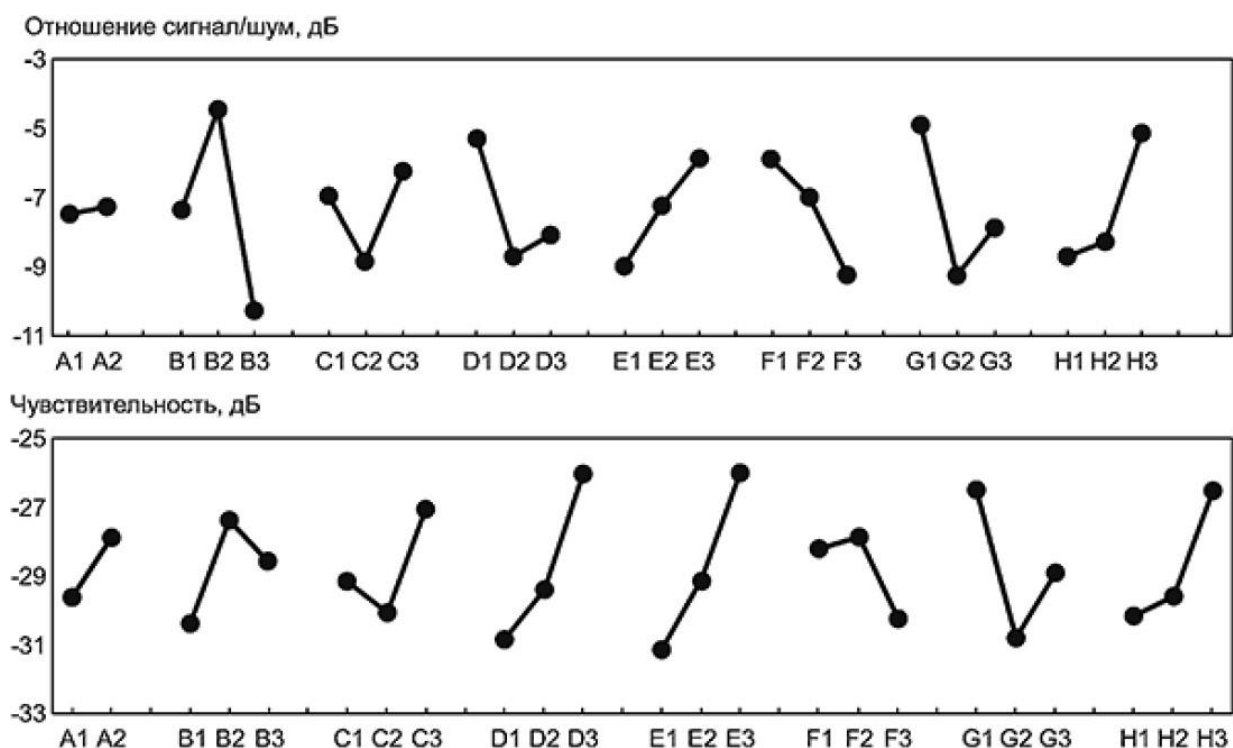


Рисунок 8 - Диаграммы эффектов факторов для системы охлаждения

Этап 10. Выбор оптимальных условий

Чтобы достичь максимального значения отношения SN, важно выбрать уровень с наибольшим значением отношения SN в качестве оптимального для каждого фактора. В данном примере оптимальной будет следующая комбинация уровней: A2B2C3D1E3F1G1H3. Из диаграмм эффектов факторов следует, что для фактора D наблюдается рассогласование между отношением SN и чувствительностью. С целью повышения чувствительности предпочтительнее было бы выбрать уровень 3, но в итоге был выбран уровень 1, поскольку отношение SN - более важный критерий для системы.

Этап 11. Оценка повышения робастности по величине прироста

Вычисляют значения отношения SN и чувствительности в оптимальных и базовых условиях.

Учет всех эффектов факторов в некоторых случаях нецелесообразен. Для адекватной оценки отношения SN и чувствительности можно выбрать лишь те эффекты факторов, которые относительно велики.

В данном примере для оценивания отношения SN выбраны факторы В, D, G и H, а для чувствительности - факторы D, E, G и H.

В качестве базового образца была принята исходная конструкция системы охлаждения, определяемая следующей комбинацией уровней управляемых факторов: A1B1C1D1E1F1G1H1.

На основании средних значений отношения SN, приведенных в таблице 16, вычислены отношения SN в оптимальных и базовых условиях следующим образом:

Общее среднее значение для отношения SN (среднее для 18 отношений сигнал/шум – таблица 15) T_{SN}

$$T_{SN} = -7,37$$

Расчетное значение отношения SN для оптимального проекта

$$\eta_{opt} = \eta_{B2} + \eta_{D1} + \eta_{G1} + \eta_{H3} - 3\bar{T}_{sn} = -4,48 - 5,34 - 4,91 - 5,18 - 3(-7,38) = 2,23.$$

Расчетное значение отношения SN для базового проекта

$$\eta_{base} = \eta_{B1} + \eta_{D1} + \eta_{G1} + \eta_{H1} - 3\bar{T}_{sn} = -7,37 - 5,34 - 4,91 - 8,71 - 3(-7,38) = -4,19.$$

Прирост отношения SN вычисляют как разность между значениями отношений SN для оптимального и базового проектов.

Прирост отношения SN

$$\Delta\eta = \eta_{opt} - \eta_{base} = 2,23 - (-4,19) = 6,42 \text{ (дБ)}.$$

Прирост чувствительности вычисляют аналогичным способом, как показано ниже.

Общее среднее для чувствительности (среднее для 18 значений чувствительности, таблица 15)

$$T_{\beta} = -28,77$$

Расчетное значение чувствительности для оптимального проекта

$$S_{opt} = S_{D1} + S_{E3} + S_{G1} + S_{H3} - 3\bar{T}_{\beta} = -30,83 - 26,05 - 26,58 - 26,55 - 3(-28,77) = -23,70.$$

Расчетное значение чувствительности для базового проекта

$$S_{base} = S_{D1} + S_{E1} + S_{G1} + S_{H1} - 3\bar{T}_{\beta} = -30,83 - 31,14 - 26,58 - 30,18 - 3(-28,77) = -32,42.$$

Прирост чувствительности вычисляют как разность между значениями чувствительностей для оптимального и базового проектов.

Прирост чувствительности

$$\Delta S = S_{opt} - S_{base} = -23,70 - (-32,42) = 8,72 \text{ (дБ)}.$$

Этап 12. Проведение проверочного эксперимента, контроль прироста и показателя "воспроизводимость"

В проверочном эксперименте задействованы базовый и оптимальный проекты. По результатам проверочного эксперимента вычисляют отношения SN и чувствительности. Полученные результаты проверочного эксперимента, приведенные в таблице 17, демонстрируют отличную воспроизводимость величины прироста, выраженную в децибелах.

Таблица 17 - Результаты проверочного эксперимента

	Отношение SN, дБ		Чувствительность, дБ	
	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение
Оптимальный проект	2,23	1,66	-23,70	-24,03
Базовый проект	-4,19	-4,17	-32,42	-35,08
Прирост	6,42	5,83	8,72	11,05

На рисунке 9 показаны зависимости величины выхода от величины входа для оптимального и базового проектов.

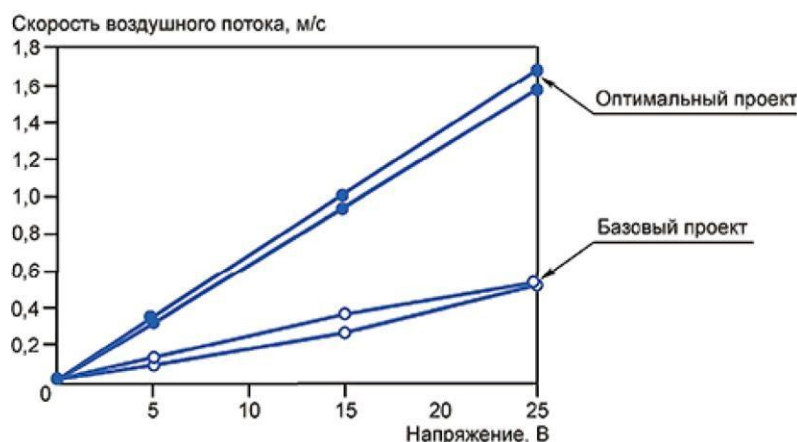


Рисунок 9 - Зависимости, полученные в результате проверочного эксперимента

Очевидно, что в результате параметрического проектирования удалось существенно повысить робастность и результативность системы охлаждения. Важно, что оптимальный проект позволяет достичь более высокой скорости потока воздуха при том же напряжении питания на электродвигателе. Это можно предсказать по величине прироста чувствительности. Как показывают результаты, за счет повышения эффективности процесса охлаждения происходит снижение температуры внутри осветительной установки.

Наконец, были выполнены измерения температуры для оптимального и базового проектов. Результаты измерений показаны на рисунке 10. Улучшение конструкции подтверждено.

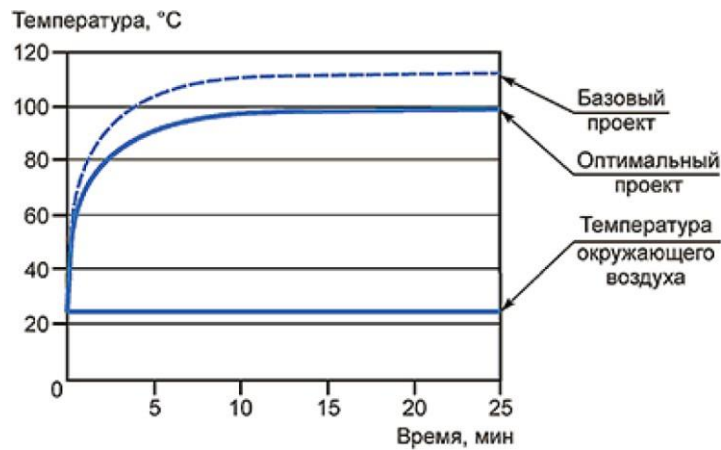


Рисунок 10 - Зависимость температуры от времени эксплуатации

Как видно из рисунка 10, для базового проекта температура поднималась в течение 20 мин после начала опыта. А для оптимального проекта она стабилизировалась через 3 мин и после этого не увеличивалась. Причем она поддерживалась ниже критического значения 100°C.

Поскольку исследования системы охлаждения на основании измерений температуры очень громоздки и трудоемки, был рассмотрен простой и быстрый метод исследования. Он основан на определении функции системы охлаждения, заключающейся в генерировании воздушного потока, и на оптимизации робастности через отношение SN. Отношение SN - это величина, числитель которой - результативность преобразования энергии, а знаменатель - вариабельность этого преобразования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Пример «Проектирование схемы температурного контроллера» [2]

На рис. 11 показана принципиальная схема температурного контроллера, в которой используются резистивный термометр R_T в качестве датчика температуры и реостат R_3 для установки нужной температуры. Значение сопротивления R_T , при котором замыкается реле, составляет

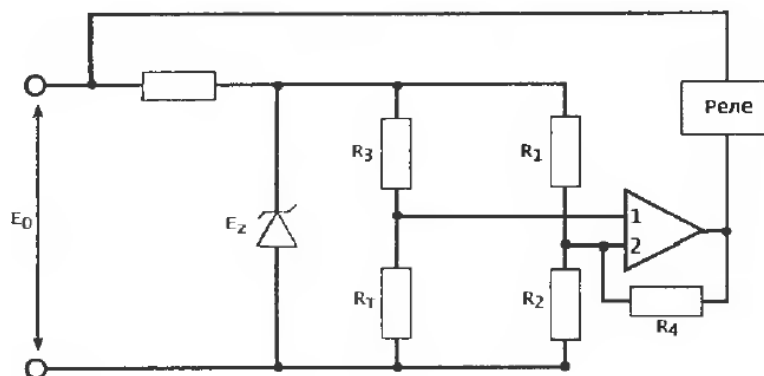


Рис. 11. Принципиальная схема температурного контроллера

$$R_{T, \text{зам}} = \frac{R_3 R_2 (E_z R_4 + E_0 R_1)}{R_1 (E_z R_2 + E_z R_4 - E_0 R_2)} \quad (52)$$

Очевидно, что эта проблема относится к типу «непрерывно-цифровая».

Этап 1. Отбор факторов.

Сигнальным фактор M является $M = R_3$. Пять управляемых факторов - это R_1 , R_2 , R_4 , E_0 и E_z . Удобно использовать отношения сопротивлений. Предпочтительнее рассматривать в качестве управляемых факторов отношения R_2/R_1 и R_4/R_1 , а не сами величины R_2 и R_4 . Тогда $Z = (R_1, R_2/R_1, R_4/R_1, E_0, E_z)^T$. Для двух параметров напряжения имеется естественное ограничение $E_z < E_0$. В табл. 18 даны начальные значения управляемых факторов и их выбранные уровни.

Таблица 18. Управляемые факторы и их уровни

Обозначение	Фактор	Уровень		
		1	2	3
A	R_1 , кОм	2,67	4,0	6,0
B	$\alpha = R_2/R_1$	1,33	2,0	3,0
C	$\lambda = R_4/R_1$	5,33	8,0	16,0
D	E_0	8,0	10,0	12,0
F	E_z	4,8	6,0	7,2
Начальные условия				

Допуски для пяти управляемых факторов образуют факторы помех (табл. 19). Факторы окружающей среды и ухудшение свойств в данном анализе не изучаются.

Предполагается, что их влияние адекватно представлено допусками. Отметим, что допуски задаются в процентах от номинального значения определенного управляемого фактора. Мы предполагаем, что допуски равны трем стандартным отклонениям.

Таблица 19. Факторы помех и их уровни

Обозначение	Фактор	Допуск, % номинального значения	Уровень, % номинального значения		
			1	2	3
A	R_r , кОм	5	-2,04	0	2,04
B	$\alpha = R_2/R_1$	5	-2,04	0	2,04
C	$\lambda = R_4/R_1$	5	-2,04	0	2,04
D	E_0	5	-2,04	0	2,04
F	E_z	5	-2,04	0	2,04

Этап 2. Оценивание отношения SN.

При оценивании отношения S/N неэффективно применять метод Монте-Карло для имитации помех. Стандартизованным и эффективным методом может быть использование ортогональных матриц. Для каждой переменной помехи выбираются три уровня (табл. 19). Три уровня для каждого из факторов помех выбраны таким образом, что их среднее значение равно нулю, а дисперсия составляет σ^2 . Этими тремя уровнями являются - $\sqrt{3/2}\sigma$, 0 и $\sqrt{3/2}\sigma$.

Рассмотрим три уровня для сигнального фактора: 0,898, 1 и 1,102 кОм. Преимущество назначения трех уровней для сигнального фактора состоит в том, что такое количество позволяет оценивать линейные и квадратичные эффекты. Линейные эффекты рассматриваются как сигнальные эффекты, а квадратичные эффекты - как помехи.

Ортогональная матрица L_{18} может быть использована для анализа до семи трехуровневых и одного двухуровневого факторов. Это достаточно для анализа влияния одного сигнального фактора и пяти факторов помех. Матрица L_{18} и соответствие столбцов помехе и сигнальным факторам показаны в табл. 20.

В последней колонке табл. 20 (вне матрицы L_{18}) даны значения $y = R_{T, \text{зам}}$, соответствующие 18 условиям сочетания сигнального фактора и факторов помех. Этим значениям y соответствуют следующие значения управляемых факторов: $R_1=2,67\text{кОм}$, $R_2/R_1 = 1,33$, $R_4/R_1 = 5,33$, $E_0 = 8,0\text{ В}$ и $E_z = 4,8\text{ В}$. При этом каждый управляемый фактор находится на уровне 1.

С помощью стандартного дисперсионного анализа 18 значений y можно вычислить ожидаемые значения параметра β^2 , который является квадратом линейной регрессии y по M , и дисперсии ошибки σ_e^2 . Пусть M_i - сумма всех значений y , для которых сигнальный фактор находится на уровне i . Пусть T - сумма всех 18 значений y . Тогда

$$S_{\beta} = \frac{(-M_1 + M_3)^2}{2 \cdot 6}, S_T = \sum_{i=1}^{18} y_i^2 - \frac{T^2}{18},$$

$$S_e = S_T - S_{\beta},$$

$$\eta = 10 \lg \left[\frac{1}{6} \left(S_{\beta} - \frac{S_e}{18-2} \right) / \frac{S_e}{18-2} \right].$$

Таблица 20. Ортогональная матрица L18

		Управляемый фактор									
			A	B		C	D	F			
Испытание 1	2	3	4	5	6	7	8	η			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	13,49	1,863	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	13,91	1,892	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	14,22	1,922	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	15,29	2,027	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	15,63	2,154	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	8,11	2,146	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	16,46	2,381	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	-5,52	2,310	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	16,35	2,281	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	8,59	1,922	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	15,77	1,863	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	15,19	1,892	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	8,96	2,030	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	15,52	2,215	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	15,59	2,087	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	15,76	2,456	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	14,82	2,215	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	9,76	2,309	
1		2	3	4	5	6	7	8			
		M	A	B	C	D	F		y		
Фактор помех											

Для данных в последней колонке табл. 20 имеем $\eta = 13,49$. Отметим, что расстояние между двумя последовательными уровнями М ($M_2 - M_1$ и $M_3 - M_1$) принято за единицу.

Этап 3. Оптимизация.

Эксперименты с использованием ортогональной матрицы - также эффективный путь максимизации нелинейной функции, в данном случае максимизации η по отношению к

управляемым факторам. Как отмечалось выше, ортогональная матрица L_{18} достаточна для одновременного анализа пяти управляемых факторов. Соответствие столбцов матрицы L_{18} управляемым факторам показано в табл. 20. Используя методику, описанную на этапе оценивания отношения SN вычислили отношение S/N для каждой из 18 комбинаций уровней управляемых факторов. Значения отношения S/N приведены в предпоследней колонке табл. 20.

Таблица 21. Дисперсионный анализ для η

Обозначение	Фактор	Значение уровней			Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F
		1	2	3				
A	R_1	13,09	11,69	13,20	8,56	2	4,28	0,5
B	R_2/R_1	15,22	13,32	9,46	103,84	2	51,92	6,6
C	R_4/R_1	9,17	13,24	15,57	125,73	2	62,87	8,0
D	E_0	15,32	13,91	9,75	93,84	2	46,92	5,9
F	E_z	9,59	13,14	15,25	98,18	2	49,09	6,2
	Ошибка				55,30	7	7,90	

Был выполнен стандартный дисперсионный анализ значений η (табл. 21). Среднее значение для уровня 1 величины R_1 было получено усреднением шести значений η , соответствующих единице в столбце R_1 (третий столбец). Другие средние значения были определены аналогично. Столбец сумм квадратов показывает относительный вклад каждого фактора в общую дисперсию 18 значений η . Величина F показывает влияние каждого фактора по отношению к ошибке.

Из табл. 21 видно, что R_1 незначительно влияет на η . Оптимальные уровни B, C, D и F - соответственно B_1 , C_3 , D_1 и F_3 . Отношение S/N , соответствующее этим оптимальным значениям управляемых факторов (A_2 , B_1 , C_3 , D_1 и F), составляет 17,57 дБ. Это означает улучшение по сравнению с 3,66 дБ для начальных уровней управляемых факторов (A_2 , B_2 , C_2 , D_2 и F_2). Дальнейшего улучшения η можно достичь анализом для меньших значений B и больших значений C. Поскольку два напряжения имеют естественное ограничение $E_z < E_0$, дальнейшие изменения D и F невозможны. После еще двух итераций было получено оптимальное значение η (18, 16 дБ).

Использование ортогональных матриц во многих более общих приложениях дает следующие преимущества по сравнению с методами нелинейного программирования: 1) не нужно вычислять производные, 2) не нужно вычислять гессиан, 3) алгоритм нечувствителен к начальным условиям, 4) можно легко обращаться с большим количеством переменных, 5) можно легко обращаться с комбинациями непрерывных и дискретных переменных.

При оптимальном проектировании не было уделено достаточно внимания реальным значениям $R_{T, \text{зам}}$, что необходимо для управления определенными температурами. Путем выбора подходящего среднего значения R_3 можно легко приспособить проектируемое устройство к различным температурным диапазонам. Значения управляемых факторов,

которые получили в данном примере, могут еще быть оптимальными для различных температурных диапазонов. Это явное преимущество использования отношения S/N как целевой функции. Здесь регулирование среднего значения R_3 является операцией масштабирования - выравнивания.

Что надо будет сделать, если дисперсия ошибки при оптимальных условиях превзойдет желаемый уровень? Очевидно, что в этом случае некоторые из допусков потребуется уменьшить, что приведет к более высоким производственным затратам. Чтобы увеличение затрат было минимальным, нужно сначала найти с помощью дисперсионного анализа вклад каждого фактора помех в дисперсию ошибки и затем уменьшить только те допуски, которые обеспечивают максимальную экономическую выгоду. Это называется проектированием допусков.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Пример «Снижение процента брака при производстве поликремниевых пластин. Improving the scrap rate in the manufacture of polysilicon wafers» в программе STATISTICA

Этот пример основан на данных, представленных Phadke (1989) о производстве поликремневых пластин. Предполагается, что вы ознакомились с разделом о методах Тагути во вводном обзоре. Целью исследования было сокращение:

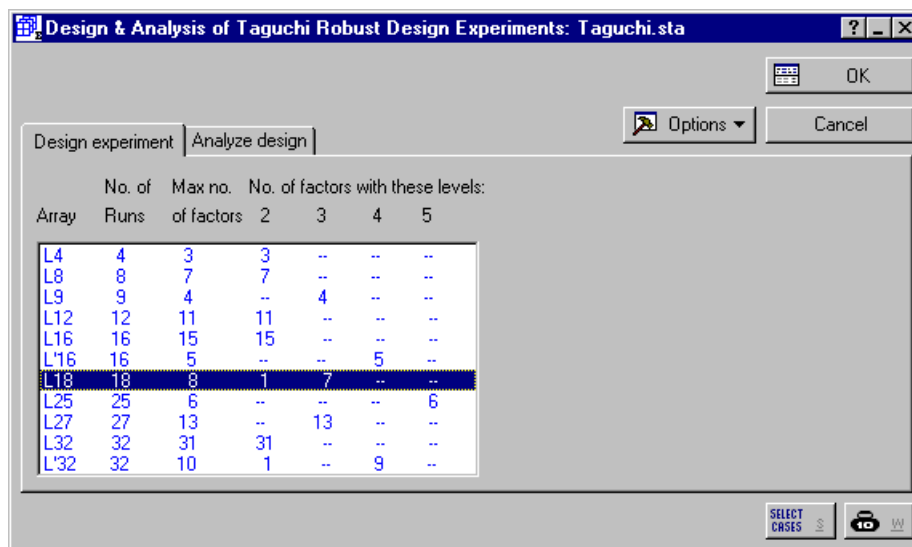
1. Количество поверхностных дефектов на пластине (DEFECT);
2. Вариабельность толщины слоя поликремния (THICK).

Управляемыми факторами в этом исследовании были:

1. Температура осаждения (TEMPERAT);
2. Давление осаждения (PRESSURE);
3. Поток азота (NITROGEN);
4. Расход силана (SILAN);
5. Время отстаивания (SETT_TIM);
6. Способ очистки (CLEANING).

Каждый коэффициент был установлен на трех уровнях. Откройте файл данных *Taguchi.sta* через меню **Файл - Открыть примеры (File - Open Examples)**; он находится в папке **Наборы данных (Datasets folder)**. Подробную информацию о конкретных настройках для каждой переменной в файле данных можно просмотреть **в редакторе спецификаций переменных (Variable Specification Editor)**, выбрав все спецификации переменных в меню **"Данные"**.

анализ экспериментов" (Design & Analysis of Experiments). Перейдите на вкладку «Дополнительно», выберите "Эксперименты по робастному проектированию Taguchi" (ортогональные массивы) и нажмите "ОК". В диалоговом окне *"Проектирование и анализ экспериментов по робастному проектированию Taguchi" (Design & Analysis of Taguchi Robust Design Experiments)* перейдите на вкладку *"Эксперимент по проектированию" (Design experiment tab)*. Вам будет предложено выбрать ортогональный массив.



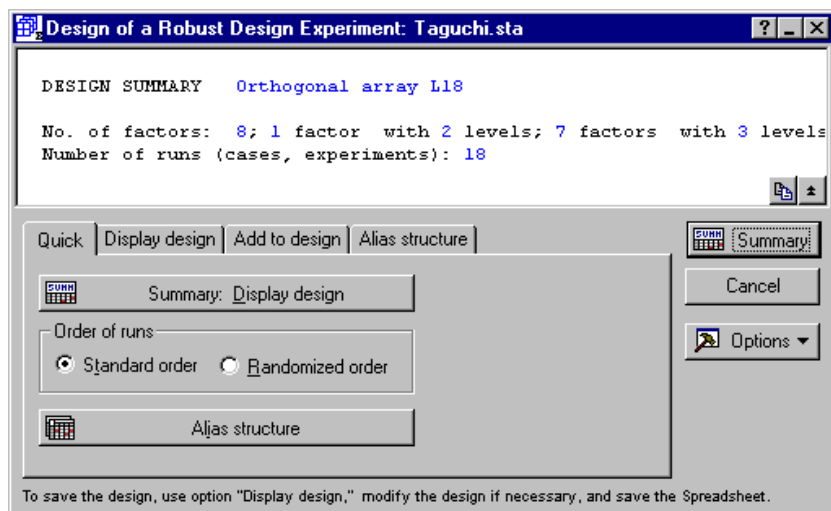
Для этого примера выберите массив L18. Этот массив очень хорошо подходит для исследования. Данный массив предполагает проведение эксперимента с 18 опытами, использует до 8 факторов, из которых 7 могут быть трехуровневыми. В этом исследовании используется 5 трехуровневых факторов, поэтому некоторые столбцы этого массива просто не будут использоваться.

Название ортогонального массива указывает на то, что столбцы массива независимы друг от друга. Если вы просто проигнорируете некоторые столбцы, но выполните все 18 прогонов, то оставшиеся столбцы по-прежнему будут ортогональны друг другу, и можно будет оценить влияние управляющих факторов.

Если ваш планируемый эксперимент (в дальнейшем в тексте - *ПЭ*) не соответствует ни одному из перечисленных. Тагучи (1987, глава 38) подробно описал, как создаются ортогональные матрицы. Что еще более важно, в некоторых случаях игнорирование столбцов позволяет оценить необоснованные взаимодействия. Кроме того, в некоторых случаях вы можете комбинировать столбцы (коэффициенты), чтобы сформировать новые ортогональные коэффициенты с большим количеством уровней.

Техническое обсуждение этих методов выходит за рамки данного примера; однако, если ваш конкретный *ПЭ* не соответствует ни одному из перечисленных здесь, вы можете обратиться к Taguchi (1987) или Phadke (1989) за методами "настройки массивов" (в частности, обратитесь к использованию линейных графов в эти источники, чтобы научиться манипулировать столбцами ортогональных массивов).

Просматриваем *ПЭ*. Теперь выберите массив L18 и нажмите ОК, чтобы открыть диалоговое окно *"Планирование эксперимента по робастному проектированию" (Design of a Robust Design Experiment)*.



В этом примере нажмите кнопку **"Стандартный заказ" (Standard order)** в разделе **"Порядок выполнения" (Order of runs)** и нажмите **"Сводка": Кнопка "Отобразить дизайн" (Summary: Display design)** позволяет отобразить план эксперимента в электронной таблице.

Data: Design Summar...								
Design Summary (Taguchi L18: 1 factor with 2 levels, 7 factors with 3 levels) (Factors are denoted by F)								
Standard Run	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Как и ранее, вы можете рандомизировать запуски в электронной таблице и добавить пустые столбцы для создания удобных форм ввода данных.

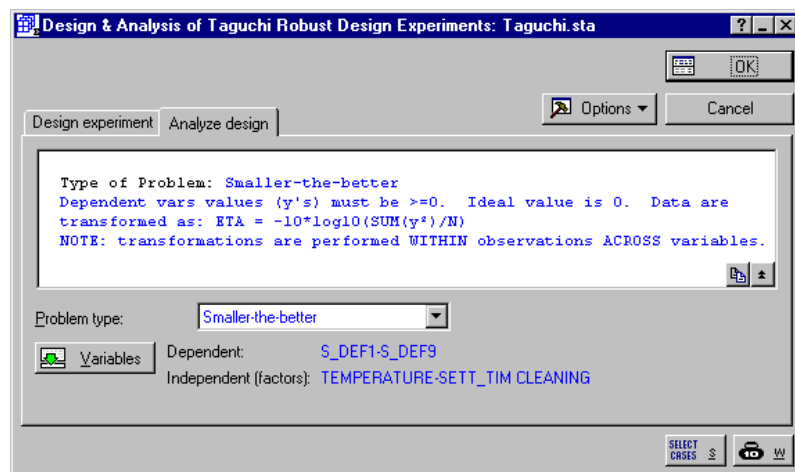
Структура псевдонимов (Alias structure). Теперь нажмите кнопку **"Структура псевдонимов" (Alias structure)**, чтобы просмотреть матрицу псевдонимов для двусторонних взаимодействий.

Data: Alias Structure (Taguchi)*	
Alias Structure (Taguchi.sta)	
L18: 1 factor with 2 levels; 7 factors with 3 levels	
* = partially or completely confounded	
Effect	1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 4 4 4 4 5 5 5 6 6 7
1	2 3 4 5 6 7 8 3 4 5 6 7 8 4 5 6 7 8 5 6 7 8 6 7 8 8
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

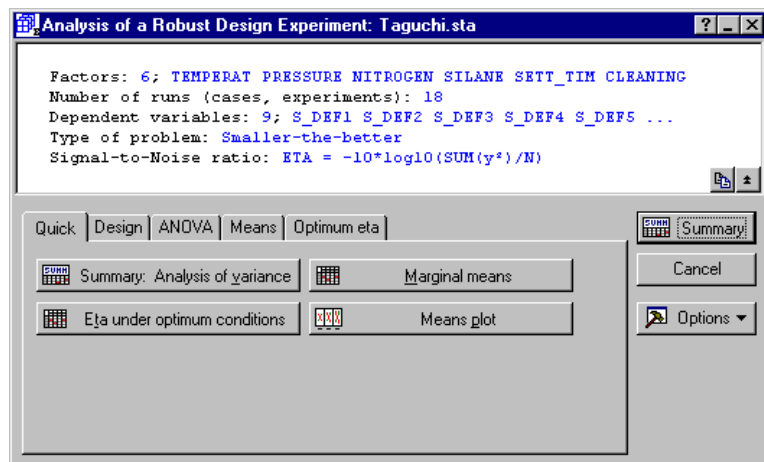
Каждая звездочка в этой таблице показывает, как определенное взаимодействие (столбец) связано (полностью или частично) с соответствующим основным эффектом (строка). Очевидно, что взаимодействие с коэффициентом 1 и коэффициентом 2 (первый столбец) не связано ни с какими основными эффектами. Таким образом, если бы в этом примере исследования у вас был двухуровневый фактор (чего нет; см. Выше), вы могли бы, используя массив L18, оценить двустороннее взаимодействие между первыми двумя факторами.

Сохранение дизайна (Saving the design). Вы можете сохранить этот план эксперимента с помощью кнопки «*сохранить*» в качестве опции в меню Файл.

Анализ дизайна (Analyzing the Design). Как упоминалось ранее, файл данных *Taguchi.sta* содержит результаты, этого исследования, полученных в рамках реальных экспериментов. Этот файл содержит подробные текстовые значения и метки переменных, и вы, возможно, захотите ознакомиться с ними на данном этапе. Однако природа переменных будет описана так, как они встречаются в примере. С указанием структуры. Выберите *"Экспериментальный проект Experimental Design (DOE)"* из статистики - *«Промышленная статистика и Шесть сигма» (Industrial Statistics & Six Sigma)* для отображения панели запуска *"Проектирование и анализ экспериментов" (Design & Analysis of Experiments)* (если у вас еще не открыт Taguchi.sta, откройте ее сейчас). Перейдите на вкладку *"Дополнительно"*, выберите *"Эксперименты по робастному проектированию Taguchi (ортогональные массивы)" (Taguchi robust design experiments (orthogonal arrays))* на панели запуска и нажмите "OK". В диалоговом окне *"Проектирование и анализ экспериментов по робастному проектированию" (Design & Analysis of Taguchi Robust Design Experiments)* перейдите на вкладку *"Анализ проектирования" (Analyze design)*. Сначала проанализируйте данные о дефектах поверхности. В идеале на пластинах вообще не должно быть дефектов поверхности, поэтому проблема заключается в том, что чем меньше дефектов, тем лучше. Различные соотношения сигнал/шум (S/N) были в *"Вводном обзоре" (Introductory Overview)*. Выберите *"Чем меньше, тем лучше"* в поле *"Тип задачи"*. Теперь осталось только указать переменные. Нажмите кнопку *"Переменные"* и выберите в качестве зависимых переменных 9 показателей количества дефектов поверхности, то есть выберите переменные от *S_def1* до *S_def9*. Независимыми переменными (факторами) являются переменные температуры (TEMPERATURE) с помощью SETT_TIM и переменной очистки. Помните, что ортогональная матрица L18 может содержать до 8 факторов, из которых необходимо использовать только 6, таким образом, переменные 1 и 7 использоваться не будут. Диалоговое окно *"Проектирование и анализ экспериментов по робастному проектированию Taguchi" (Design & Analysis of Taguchi Robust Design Experiments)* теперь будет выглядеть следующим образом:



Просмотр результатов (Reviewing results). Теперь нажмите "ОК", чтобы начать анализ, и откроется диалоговое окно *"Анализ эксперимента по робастному проектированию"* (*Analysis of a Robust Design Experiment*). В этом диалоговом окне доступно множество опций для просмотра исходных данных, а также коэффициентов мощности для каждого запуска.



Анализ предельных значений (Reviewing marginal means). Нажмите кнопку *"Предельные значения"* (*Marginal means*), чтобы просмотреть электронную таблицу с предельными значениями.

Data: Average Eta by Factor Levels (Taguchi)*					
Average Eta by Factor Levels (Taguchi.sta) Mean = -45.362 Sigma = 24.4841					
Effect	Level	Means	Paramet. Estimate	St.Dev.	St.Error
TEMPERATURE	T0_M25	-24.2275	21.1345	24.31904	1.286352
	T0	-50.1039	-4.7419	15.98027	1.042746
	T0_P25	-61.7547	-16.3926	17.49179	1.090947
PRESSURE	P0_M200	-27.5476	17.8144	24.05253	1.279284
	P0	-47.4418	-2.0798	26.11806	1.333082
	P0_P200	-61.0967	-15.7346	9.71640	0.813091
NITROGEN	N0	-39.0277	6.3343	32.94625	1.497234
	N0_M150	-55.9925	-10.6304	11.90224	0.899914
	N0_M75	-41.0659	4.2961	24.60026	1.293768
SILANE	S0_M100	-39.2027	6.1594	30.92540	1.450589
	S0_M50	-46.8477	-1.4857	19.48820	1.151523
	S0	-50.0357	-4.6737	25.05271	1.305611
SETT_TIM	T0	-51.5244	-6.1624	26.99544	1.355289
	T0_P8	-40.5367	4.8254	25.96641	1.329207
	T0_P16	-44.0250	1.3370	23.65441	1.268652
CLEANING	NONE	-45.5585	-0.1965	34.38173	1.529503
	CM_2	-41.5763	3.7857	23.44235	1.262953
	CM_3	-48.9513	-3.5893	16.54824	1.061115

В этой электронной таблице показаны средние значения (для Eta - соотношение S/N) для каждого уровня по каждому фактору; также рассчитаны (в третьем столбце) оценки параметров, то есть отклонения среднего значения соответствующего уровня фактора от общего среднего значения (μ). Помните, что вы хотите максимально увеличить соотношение S/N, поэтому, например, для коэффициента Температура наибольшее соотношение S/N было получено на уровне 1 (T0_M25). Вы можете отобразить все эти средние значения на сводном графике, нажав кнопку "Отобразить средние значения". Однако, прежде чем вы посмотрите на этот график, посмотрите на электронную таблицу ANOVA, потому что стандартные ошибки, отображаемые в графике, зависят от выбранных вами параметров в этой таблице. Просматриваем таблицу ANOVA. Вернувшись в диалоговое окно результатов, нажмите кнопку "Сводка: дисперсионный анализ", которую можно найти либо на вкладке "Краткое описание", либо в таблице ANOVA.

Data: Analysis of Variance (Taguchi)*					
Analysis of Variance (Taguchi.sta) Mean = -45.362 Sigma = 24.4841					
Effect	SS	df	MS	F	p
{1}TEMPERATURE	4427.238	2	2213.619	27.33269	0.002033
{2}PRESSURE	3415.549	2	1707.774	21.08677	0.003657
{3}NITROGEN	1029.517	2	514.759	6.35599	0.042341
{4}SILANE	371.932	2	185.966	2.29622	0.196156
{5}SETT_TIM	378.279	2	189.140	2.33541	0.192206
{6}CLEANING	163.519	2	81.759	1.00953	0.428281
Residual	404.940	5	80.988		

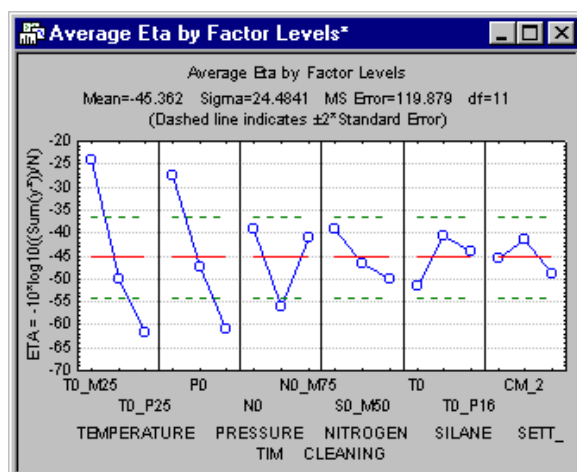
Обычно для получения более устойчивой оценки дисперсии ошибок малые или незначимые эффекты объединяются в член ошибки. Несмотря на то, что эта процедура основана на случайности (и результирующие значения p являются подозрительными), в дальнейшем она дает более устойчивые прогнозы (см. ниже). Чтобы объединить эффект с членом ошибки, перейдите на вкладку ANOVA и установите флажок **"Объединить некоторые эффекты"**. Это приведет к отображению диалогового окна **"Выбор эффектов для объединения"** (*Select effects to be pooled*). В этом примере выделите **"Эффект очистки"** (*Cleaning effect*) и нажмите "OK", чтобы объединить его в термин ошибки. Затем снова нажмите кнопку Сводка: дисперсионный анализ.

Data: Analysis of Variance (Taguchi)*					
Analysis of Variance (Taguchi.sta) Mean = -45.362 Sigma = 24.4841 * - effect pooled into error term					
Effect	SS	df	MS	F	p
{1}TEMPERATURE	4427.238	2	2213.619	27.25850	0.000497
{2}PRESSURE	3415.549	2	1707.774	21.02953	0.001097
{3}NITROGEN	1029.517	2	514.759	6.33874	0.026850
{4}SILANE	371.932	2	185.966	2.28999	0.171738
{5}SETT_TIM	378.279	2	189.140	2.32907	0.167742
*CLEANING	163.519	2			
Residual	568.459	7	81.208		

Обратите внимание, что вы можете "распаковать" эффекты (то есть поместить их обратно в оценку), сняв флажок **"Объединять некоторые эффекты"** (*Pool some effects*). Однако на данный момент оставьте очистку в поле "ошибка" и, кроме того, объедините коэффициенты **SILANE** и установите значение параметра **"Время"** (**SETT_TIM**) в поле "Ошибка", нажав кнопку "Выбрать" рядом с флажком "Объединить некоторые эффекты", выделив их и нажав "ОК". Снова нажмите кнопку "Сводка: анализ отклонений".

Data: Analysis of Variance (Taguchi)*					
Analysis of Variance (Taguchi.sta) Mean = -45.362 Sigma = 24.4841 * - effect pooled into error term					
Effect	SS	df	MS	F	p
{1}TEMPERATURE	4427.238	2	2213.619	18.46542	0.000305
{2}PRESSURE	3415.549	2	1707.774	14.24580	0.000885
{3}NITROGEN	1029.517	2	514.759	4.29398	0.041852
*SILANE	371.932	2			
*SETT_TIM	378.279	2			
*CLEANING	163.519	2			
Residual	1318.671	11	119.879		

График средних значений (Plot of means). Вернитесь в диалоговое окно результатов и нажмите кнопку **"График средних значений"** (*Means plot*) (либо на вкладке "Краткое описание", либо на вкладке "Средства").



Обратите внимание, что пунктирные линии на приведенном выше графике указывают пределы стандартной ошибки, превышающие среднее значение Eta в 2 раза. Эта стандартная ошибка вычисляется на основе последнего значения ошибки, указанного вами

в предыдущей таблице, то есть с учетом трех эффектов, объединенных в ошибку. Обычная погрешность (без каких-либо взаимодействий), полученная из общего анализа, используется, если ранее не было выбрано конкретное объединение. На этом графике вы можете легко определить наилучшие настройки для каждого фактора, то есть те, которые максимизируют соотношение S/N. Обратите внимание, что, хотя коэффициент азота был изменен, он не учитывался. Важно отметить, что ни одна из настроек не привела к эффекту, превышающему 2-кратную стандартную погрешность Eta; таким образом, полезность этого фактора также вызывает сомнения. Теперь вернитесь к диалоговому окну результатов.

Прогнозирование времени отстаивания, проверочные эксперименты. (Predicting Eta, verification experiments). Как упоминалось ранее, объединение незначимых эффектов в член ошибок накапливает влияние случайности, поэтому могут оказаться значимыми чисто случайные факторы. Один из способов "проверить" ваши результаты - это сначала спрогнозировать время **отстаивания** в оптимальных условиях, основываясь на факторах, которые вы определили как значимые, то есть на температуре (TEMPERATURE) и давлении (PRESSURE) в данном случае. Затем вы могли бы провести проверочный эксперимент, то есть несколько запусков с использованием этих фактических настроек. При значительных различиях если между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями есть расхождения, то вы либо ошибочно включили факторы, которые не были существенными, либо между факторами существуют неожиданные взаимодействия. Оба случая подробно рассмотрены в Phadke (1989). Таким образом, вам следует попытаться (в этом случае) изменить масштаб ваших показателей или уровней таким образом, чтобы не осталось существенных взаимодействий. Вы можете использовать традиционные двухуровневые факторные схемы (с достаточным разрешением) для обнаружения взаимодействий в ваших данных. Теперь перейдем к прогнозированию Eta. В диалоговом окне результатов выберите "Время отстаивания" (SETT_TIM) нажмите кнопку "Оптимальные условия" (либо на вкладке "Быстрый доступ", либо на вкладке "**Время отстаивания (SETT_TIM)**").

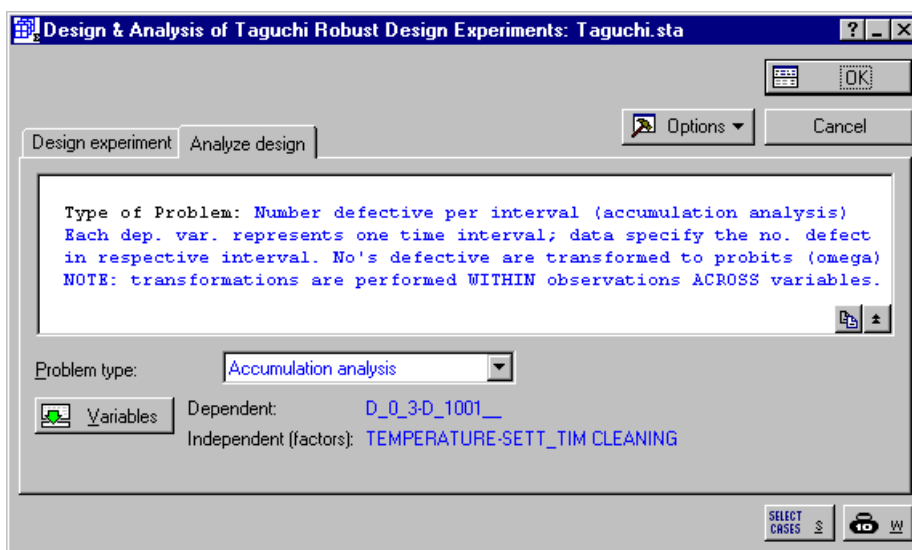
Factor	Level	Effect Size	Standard Error
{1}TEMPERATURE	TD_M25	21.13454	4.469883
{2}PRESSURE	PD_M200	17.81443	4.469883
{3}NITROGEN	ND	6.33433	4.469883
*SILANE	SD_M100	6.15938	
*SETT_TIM	TD_P8	4.82536	
*CLEANING	CM_2	3.78573	
Expected S/N		-0.07873	

Expected S/N Ratio under Optimum
Mean = -45.362 Sigma = 24.484
* - effect excluded from model

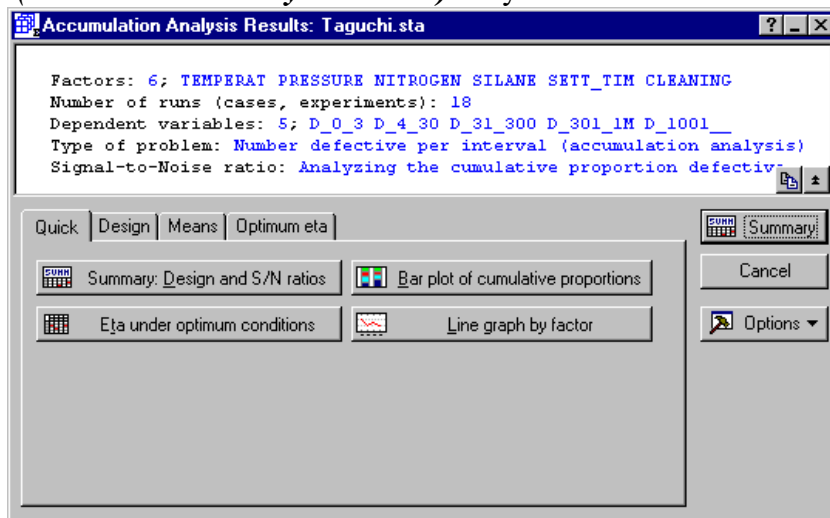
Обратите внимание, что на вкладке **Optimum eta** вы можете снова выбрать, следует ли объединять некоторые эффекты в член ошибки. С помощью этой опции вы также можете включить ранее исключенные факторы. Другие доступные параметры относятся к фактическим настройкам для каждого фактора. По умолчанию все уровни будут установлены на оптимальные значения, то есть на уровни, обеспечивающие наибольшее соотношение Сигнал/шум. Вы можете изменить эти настройки, установив флажок **«Устанавливать факторы» (Set selected factors at specific levels)** выбранные коэффициенты на определенных уровнях, а затем установив пользовательские параметры коэффициента откроется диалоговое окно, в котором вы сможете выбрать желаемые уровни для соответствующего коэффициента. На данный момент оставьте эти настройки на уровне

значений по умолчанию. Анализ накопления. Прежде чем завершить этот пример, просмотрите данные о совокупном количестве дефектов поверхности, обнаруженных в образце. В файле данных **Taguchi.sta** переменные от D_0_3 до D_1001__ содержат

количество дефектных поверхностей, обнаруженных в каждом цикле, с разбивкой по интервалам. В целом, в каждом цикле было проверено 9 образцов поверхности. Частоты в переменной D_0_3 представляют собой количество найденных поверхностей с дефектами от 0 до 3, переменная D_4_30 содержит количество найденных поверхностей с дефектами от 4 до 30 и т.д. Такие категориальные частотные данные могут быть проанализированы с помощью накопительного анализа. Вернитесь в диалоговое окно **"Проектирование и анализ экспериментов по робастному проектированию Taguchi" (Design & Analysis of Taguchi Robust Design Experiments)**, нажав кнопку "Отмена" в диалоговом окне "Анализ эксперимента по робастному проектированию". Выберите "Анализ накопления" в поле "Тип задачи". Затем нажмите кнопку Переменные и выберите переменные от D_0_3 до D_1001__ в качестве зависимых переменных, и выберите те же независимые переменные (факторы), что и раньше (переменные температуры с помощью SETT_TIM и переменные очистки).

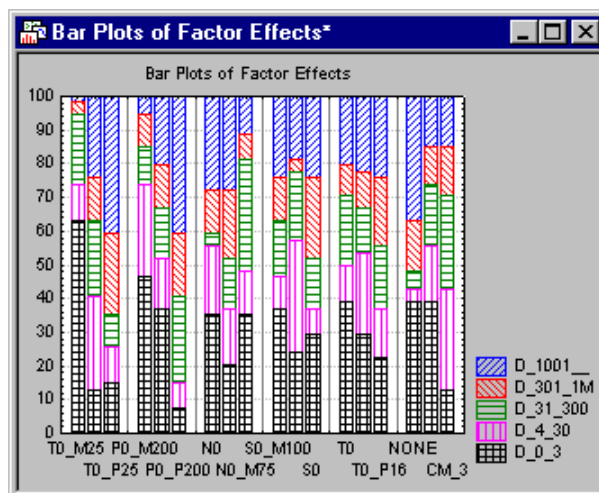


Результаты накопительного анализа (Results of Accumulation Analysis.). Теперь нажмите "OK", чтобы просмотреть результаты этого анализа в диалоговом окне **"Накопление" (Accumulation Analysis Results)** Результаты анализа.



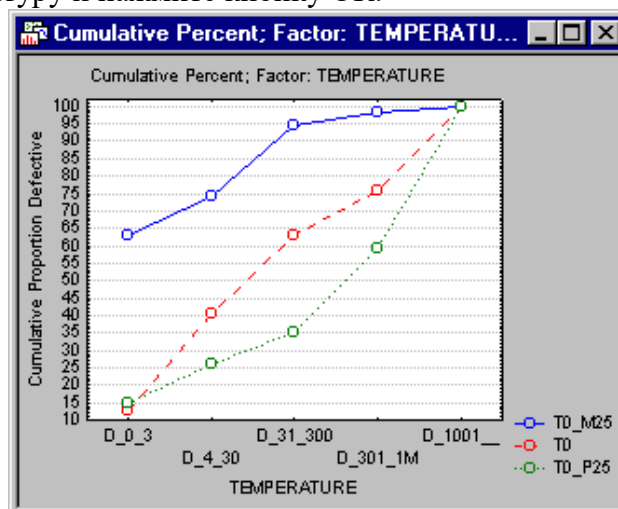
Результаты ANOVA недоступны для этого типа анализа (поскольку они не подходят). Однако вы можете визуализировать результаты с помощью линейчатых

графиков. Нажмите кнопку "Линейчатый график кумулятивных пропорций", чтобы создать график.



На этом графике относительные частоты (пропорции) в каждой категории (от D_0_3 до D_1001_) для каждого уровня каждого фактора показаны в виде столбцов с

суммированием. Например, по первому фактору (температуре) можно сразу определить, что наибольшая область затенения находится под уровнем T0_M25. Эта информация для данного коэффициента также может быть отображена в виде линейного графика совокупных пропорций по категориям; в диалоговом окне "Результаты" нажмите кнопку "Линейный график по коэффициенту", а затем в промежуточном диалоговом окне выберите коэффициент Температуру и нажмите кнопку ОК.



Как показано на рисунке выше, линия, показывающая общую долю дефектов, является самой высокой для данного уровня T0_M25; таким образом, большинство поверхностей с таким значением этого коэффициента имели 3 или менее дефектов (D_0_3). Мы прогнозируем время получения при оптимальных условиях. Кнопка Eta по-прежнему работает в оптимальных условиях, за исключением того, что прогнозы делаются в виде логарифма (см. Вводный обзор; Тагучи называет эти значения частотами, преобразованными в омега), которые рассчитываются для каждой категории.

Data: Effect Sizes and Expected S/N Ratios (Logits/Omegas) (Ta...					
Effect Sizes and Expected S/N Ratios (Logits/Omegas) (Mean Logit/Omega are shown)					
Effect	Level	D_0_3	D_4_30	D_31_300	D_301_1M
{1}TEMPERATURE	T0_M25	2.30449	4.55932	12.30449	17.24276
{2}PRESSURE	P0_M200	-0.64458	4.55932	7.59668	12.30449
{3}NITROGEN	N0_M75	-2.65314	-0.32185	6.43453	9.03090
{4}SILANE	S0_M50	-4.98841	1.29634	5.44068	6.43453
{5}SETT_TIM	T0	-1.96295	0.00000	3.75664	5.92076
{6}CLEANING	CM_2	-1.96295	0.96910	4.55932	7.59668
Mean S/N		-3.62882	-0.53685	2.53605	5.44068
Expected S/N		8.23659	13.74648	27.41208	31.32672

Резюме (Summary). Подводя итог проведенному анализу, можно сделать вывод, что факторы температуры и давления оказали наибольшее влияние на поверхностные дефекты, обнаруженные на пластинах из поликремния. Установив оба фактора на их начальных уровнях ((T0_M25 и P0_M200 соответственно) дали наилучшие результаты, то есть наименьшее количество дефектов поверхности. Теперь вы можете перейти к анализу данных о толщине поверхности (переменные Thick_1-Thick_9). Обратите внимание, что эти данные соответствуют задаче номинального оптимума, то есть желательна постоянная толщина слоя поликремния. Смотрите также Индекс экспериментального проектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рао С., Самант П., Кадампатта А., Шеной Р. Методы Тагути: эволюция, концепция и межотраслевое применение. «Методы менеджмента качества» Июнь 2016.
Рубрика: Статистическое мышление. Перевод с англ. В.А. Савинкиной
2. Леон Р., Шумейкер А., Тагути Г. и др. Управление качеством. Робастное проектирование. Методы Тагути. Пер. с англ. – М.: Сейфи, 2002. – 384 с.
3. Ю.К. Чернова, В.В. Щипанов. Первые шаги робастного проектирования в отечественном автомобилестроении / // Известия Тольяттинского государственного университета ТПУ. - 2006
4. Radosław W., The usage of Taguchi methods in Industry 4.0 conditions Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series · July 2024
5. Hisam M.W., · Dar A. A., · Elrasheed M.O., · Khan M.S., · Gera R., · Azad I. The Versatility of the Taguchi Method: Optimizing Experiments Across Diverse Disciplines. Article in Journal of Statistical Theory and Applications · October 2024
6. ГОСТ Р ИСО 16336–2020 Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD)
7. STATISTICA (версия 6.1) Электронное руководство STATISTICA