

И.Б. Бондаренко
 Д.В. Соловьев
 С.К. Евстропьев



Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

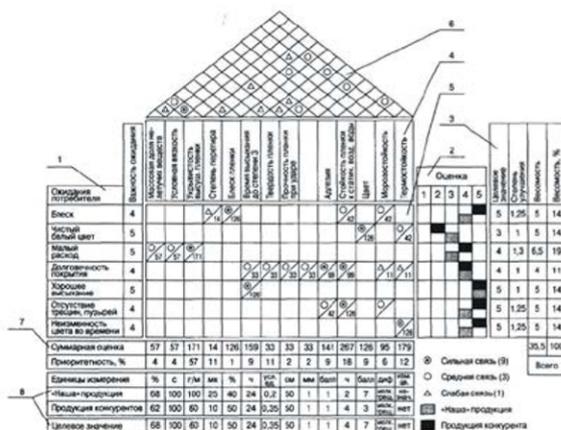
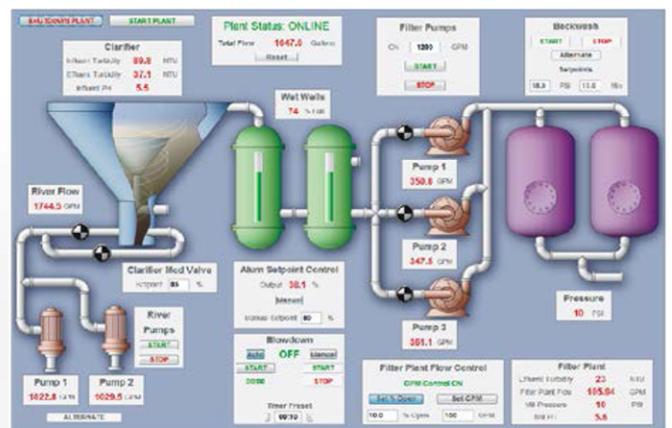
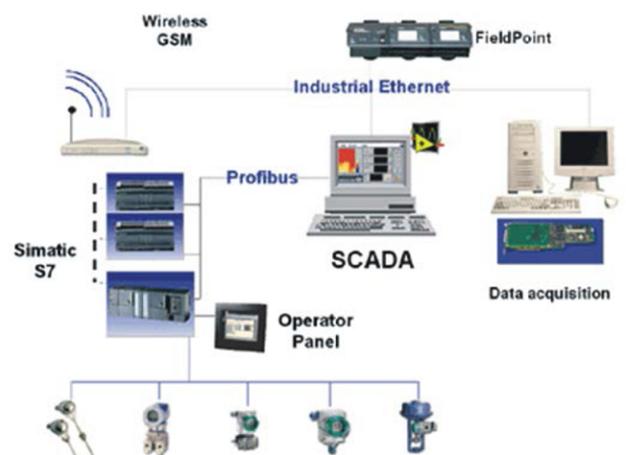


Рис. 5.7. «Дом качества», разработанный при планировании улучшения качества изделия ПФ-115 (белого цвета) (этап: выработка технических условий).



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

И. Б. Бондаренко, Д. В. Соловьев, С. К. Евстропьев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ**

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОННЫХ
СРЕДСТВ**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург
2016**

Бондаренко И. Б., Соловьев Д. В., Евстропьев С. К., Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине "Управление качеством электронных средств". – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 58 с.

В учебно-методическом пособии содержатся теоретические сведения и даны рекомендации для выполнения практических работ, как в отведенные аудиторские часы, так и при самостоятельной подготовке.

Работа предназначена для магистров, обучающихся по направлению подготовки: 11.04.03 "Конструирование и технология электронных средств" по дисциплинам: "Системы управления качеством электронных средств" и "Управление качеством электронного изделия в интегрированной информационной среде". Приведены примеры расчетов, позволяющие закрепить изученный материал.

Рекомендовано к печати на заседании Ученого совета факультета Компьютерных технологий и управления «8» декабря 2015г., протокол заседания № 10.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016.

© И. Б. Бондаренко, Д. В. Соловьев, С. К. Евстропьев 2016.

Содержание

	Стр.
Практическое занятие №1.	
Исследование принципов работы системы SCADA на ПК.....	4
1.1. Краткие теоретические сведения.....	4
1.2. Описание пакета SIMP Mini SCADA.....	7
1.3. Порядок выполнения работы и содержание отчета....	13
1.4. Контрольные вопросы.....	13
Практическое занятие №2.	
Построение модели технологического процесса методами	
статистического планирования эксперимента.....	14
2.1. Краткие теоретические сведения к первому этапу.....	14
2.2. Порядок выполнения первого этапа.	
Содержание отчета.....	24
2.3. Краткие теоретические сведения ко второму этапу....	25
2.4. Порядок выполнения второго этапа.	
Содержание отчета.....	33
2.5. Контрольные вопросы.....	33
Практическое занятие №3.	
Учет требований потребителя с помощью метода	
развертывания функции качества (QFD).....	35
3.1. Краткие теоретические сведения.....	35
3.2. Порядок выполнения работы. Содержание отчета....	42
3.3. Контрольные вопросы.....	42
Литература.....	44
Приложение I. Фрагмент таблицы случайных чисел.....	46
Приложение II. Квантили распределения Стьюдента.....	47
Приложение III. Таблица значений критерия Фишера для	
уровней значимости 0,05 и 0,01.....	48

Практическое занятие №1.

Исследование принципов работы системы SCADA на ПК

Цель работы: ознакомление с составом и основными принципами работы SCADA-системы, а также моделирование работы объектов на ПК.

1.1. Краткие теоретические сведения

Для управления производственным процессом и повышения эффективности предприятий служат системы, которые осуществляют: контроль и управление с помощью графического интерфейса оператора, обмен данными, обработку сигналов тревог, построение отчетов и графиков.

Разновидностью интегрированных систем, предназначенных для промышленной автоматизации, служат системы диспетчерского управления и сбора данных – SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Они представляют собой набор программно-аппаратных средств, взаимодействующих между собой через локальные и глобальные сети и обеспечивающих управление и мониторинг технологического процесса (ТП) [1–4].

SCADA-пакеты нового поколения позволяют строить на их основе интегрированные системы управления как для очень больших, так и компактных автоматизированных систем управления (АСУТП) в любой области промышленности.

Прообразом современных SCADA-систем являлись системы телеметрии и сигнализации, входившие в состав АСУ.

Основными функциями SCADA-систем являются:

- прием информации о контролируемых технологических параметрах от контроллеров нижних уровней и датчиков;
- сохранение принятой информации в архивах;
- вторичная обработка принятой информации;
- графическое представление хода ТП, а также принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме;
- прием команд оператора и передача их в адрес контроллеров нижних уровней и исполнительных механизмов;
- регистрация событий, связанных с контролируемым ТП и действиями персонала, ответственного за эксплуатацию и обслуживание системы;

- оповещение эксплуатационного и обслуживающего персонала об обнаруженных аварийных событиях с регистрацией действий персонала в аварийных ситуациях;
- формирование отчетов на основе архивной информации;
- обмен информацией с АСУ предприятия;
- непосредственное автоматическое управление ТП в соответствии с заданными алгоритмами.

SCADA-системы включают три компонента.

1. Удаленный терминал – Remote Terminal Unit (RTU). Один или несколько удаленных устройств: датчиков, осуществляющих съем информации с технологического оборудования, специализированных многопроцессорных отказоустойчивых вычислительных комплексов, осуществляющих обработку информации и управление в режиме жесткого реального времени. Так как каждый удаленный объект может содержать от 16 до 2000 измерительных датчиков, то низкоуровневая обработка информации позволяет снизить требования к пропускной способности каналов связи с центральным диспетчерским пунктом. Тенденция развития RTU – увеличение быстродействия и расширение интеллектуальных функций.

2. Диспетчерский пункт управления – Master Terminal Unit (MTU), или главный терминал – Master Station (MS) – осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого (квази-) реального времени. Одной из основных функций является обеспечение интерфейса между человеком-оператором и системой (HMI, MMI). MTU может быть реализован как в виде одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к каналам связи, так и в виде больших вычислительных систем (мэйнфреймов) и/или объединенных в локальную сеть рабочих станций и серверов. При организации MTU используются методы повышения надежности и безопасности работы системы.

3. Коммуникационная система (каналы связи) – Communication System (CS), необходима для передачи данных с RTU на центральный диспетчерский пункт и сигналов управления на RTU. CS объединяет контроллеры в сеть (RS-485, Ethernet, промышленные шины трех категорий Sensor, Device, Field). Наиболее перспективными шинами данных являются Ethernet и PROFIBUS. PROFIBUS обеспечивает передачу данных со скоростью до 12 Мбод на расстояние до 90 км.

В аппаратном обеспечении для SCADA-систем в настоящее время используются либо промышленные компьютеры (PC), либо промышленные контроллеры (PLC). PLC-архитектура используется

для систем с повышенными требованиями по надежности и быстродействию, а также с низкой стоимостью.

Человек-оператор в системе диспетчерского управления осуществляет:

- планирование выполнения необходимых операций;
- обучение (программирование) компьютерной системы реакциям на определенные события;
- контроль результатов работы системы;
- изменение параметров ТП в случае необходимости подстройки процесса или критических событий;
- обучение в процессе работы.

Процесс управления ТП с помощью SCADA-систем имеет следующие особенности:

- в технологических системах обязательно наличие человека (оператора, диспетчера);
- SCADA-системы разработаны для систем, в которых любое неправильное действие может привести к отказу объекта управления или катастрофическим последствиям;
- при нормальных условиях только изредка требуется подстройка параметров ТП для достижения оптимальной производительности;
- активное участие оператора в процессе управления происходит в случае наступления критических событий (отказы, штатные ситуации и пр.);
- действия оператора в критических ситуациях ограничены во времени (несколько минут или даже секунд).

К SCADA-системам предъявляются следующие требования: надежность, безопасность управления, быстродействие, точность обработки и представления данных, простота расширения. Единичные отказы оборудования, отдельные ошибки оператора не должны инициировать команду, поступающую на объект управления, а весь процесс управления должен иметь интуитивно понятный и простой интерфейс.

Масштабируемость SCADA-систем достигается клиент-серверной архитектурой, в которой сервер разделен на пять серверов, выполняющих функции: ввода/вывода, обработки данных, обработки тревожных событий, формирования отчетов, синхронизации во времени.

Типичное использование SCADA-систем: в генераторах электрической энергии, в преобразовательных и распределительных стан-

циях, нефте-газо-насосных и компрессорных станциях, водонасосных и водонапорных станциях, телевизионных сетях, транспортных сетях, сложных технологических установках химической промышленности, системах управления космическими объектами и т.д. Наиболее важным является внедрение SCADA-систем на предприятиях, оказывающих влияние на окружающую среду и жизнеобеспечение населения.

Не смотря на большое разнообразие SCADA-систем на рынке, большинство из них имеет схожий набор функциональных возможностей из-за определенного круга решаемых задач. Наиболее популярными представителями SCADA-систем являются: Factory Link, Genesis, RealFlex, RSView, FIX, Intouch (США), Sitex (Англия), IGSS (Дания), WinCC (Германия), TraceMode, Image (Россия). Выбор SCADA-системы сложен из-за большого числа взаимосвязанных характеристик. К ним относятся: операционная система (DOS, MS Windows, OS/2, VMS, AIX, HP-UX, QNX) и аппаратная платформа (PC, PS/2, VAX, RS6000, HP9000), средства сетевой поддержки, встроенные языки высокого уровня, поддерживаемые базы данных, графические возможности, открытость систем, возможность добавления программных модулей, драйверы ввода/вывода, встраиваемость объектов ActiveX, стоимость и т.д. Необходимо также учитывать эксплуатационные характеристики: удобство использования, сервисы SCADA-систем, качество поддержки продукта, русскоязычный интерфейс, и т.п.

1.2. Описание пакета SIMP Mini SCADA

SIMP Mini SCADA system – интегрированный пакет поддержки АСУТП, предназначенный для визуального представления, моделирования и мониторинга физических и виртуальных устройств, подключенных к ПК с целью обеспечения автоматизации или эмуляции ТП.

В работе использован виртуальный внутренний сервер, предназначенный для создания виртуальных каналов. Данный сервер служит для эмуляции ТП. Все каналы на этом сервере виртуальные, то есть работают в режиме моделирования процесса с помощью программируемого скрипта. На практике установленный и запущенный OPC DA сервер (OLE for Process Control – единый интерфейс для управления объектами автоматизации и ТП) считывает данные с устройств нижнего уровня через физические каналы.

OPC сервер – это программное обеспечение, предназначенное для сбора, передачи и синхронизации информации о внешних устройствах нижнего уровня, подключенных к компьютеру, таких как PLC и распределенные СУ. После запуска OPC сервер непрерывно считывает данные о состоянии устройства. Единицей считанных данных является текущее значение канала или тега. Данные различных типов записываются в различные каналы или теги на сервере. Каналы могут быть объединены в группы. Физические каналы могут использоваться для ввода или вывода аналогового или дискретного сигнала.

Основными преимуществами пакета SCADA SIMP являются: простота настроек, удобство использования и интуитивно понятный интерфейс по сравнению с другими представителями данного класса программного обеспечения. Для выполнения лабораторной работы используется бесплатно распространяемая версия (Light).

Пакет SIMP Light состоит из нескольких функциональных модулей: редактора мнемосхем и каналов, монитора, менеджера проектов и модуля просмотра графиков.

Кратко рассмотрим основные функции модулей, необходимые для выполнения задания.

Редактор мнемосхемы (Graphics Designer), или структурной схемы ТП, включающей графическое представление внешних устройств, подключенных к OPC серверу, содержит следующие компоненты: трубы, фигуры, индикаторы, тренды, изображения, элементы даты, времени и управления.

(Для создания новой мнемосхемы необходимо выполнить: *Файл→Новый*. Для открытия сохраненной ранее мнемосхемы: *Файл→Открыть*).

Редактор создаст файл мнемосхемы в папке текущего активного проекта, а также становятся доступными меню и рабочая область (см. рис. 1.1).

Теперь можно приступить к созданию мнемосхемы согласно заданию. Выбирать объекты необходимо из групп объектов, расположенных внизу слева.

(Выбрав объект, можете перетащить его на поле, зажав левую кнопку мыши. Отпустите ее, когда объект окажется в нужном месте.

Не забывайте периодически сохранять свою работу:

Файл→Сохранить или *Файл→Сохранить как ...*

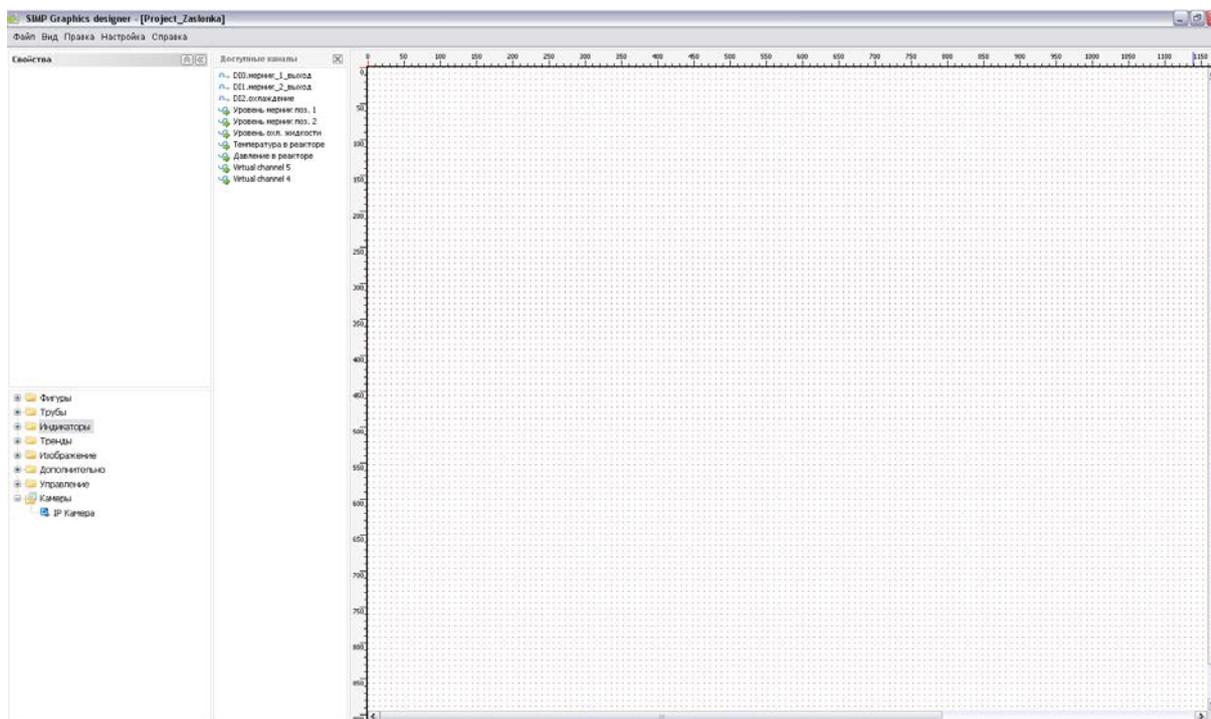


Рис. 1.1 – Интерфейс редактора мнемосхемы Mini SCADA SIMP Light

Проверить, что вы редактируете можно, взглянув в левый верхний угол окна. Изменить директорию для сохранения проекта можно, используя Менеджер проектов, хотя это здесь вам не понадобится).

Чтобы не загромождать рабочую область перетаскивайте и соединяйте объекты по одному. Вы уже заметили, что размеры объектов можно менять с помощью мыши, растягивая или сжимая их изображение, потянув курсор в одну из сторон или по диагонали. Добейтесь необходимых для вас пропорций и размеров.

(Щелкнув один раз по объекту левой кнопкой мыши, в левом верхнем углу окна появятся свойства объекта, которые потребуются менять).

В блоке свойств объекта обнаружите несколько групп:

1. Цвета рамки, заливки, фона; толщина линий, вид градиента.
2. Далее вы найдете (не для всех объектов) пункты "Привязка к каналу" и "Канал", которые описаны чуть ниже.

3. Цвета объекта в зависимости от значения параметра ТП относительно уставки (контрольное значение параметра ТП, которых у SCADA SIMP два – нижнее и верхнее, поэтому образуется три поддиапазона: до нижней уставки, норма и выше верхней уставки). Цвета можно выбрать по вашему вкусу.

4. Режим мигания можно выбрать на ваше усмотрение.

Вот и все, что есть в свойствах, главное внимательно включать все нужные вам функции.

Теперь самое важное – поработаем с каналами вашего проекта. Будьте внимательны!

(Для перехода в Конфигуратор (редактор) каналов выполните: *Настройка*→*Запустить конфигуратор каналов* из Редактора мнемосхем).

Теперь вы можете работать с каналами (см. рис. 1.2). В открывшемся окне можно увидеть три области – три панели. В левой – список доступных каналов под заголовком "Источник". Любой OPC сервер в списке обладает набором каналов (тегов) и приборов (групп каналов), предназначенных для считывания информации об устройстве.

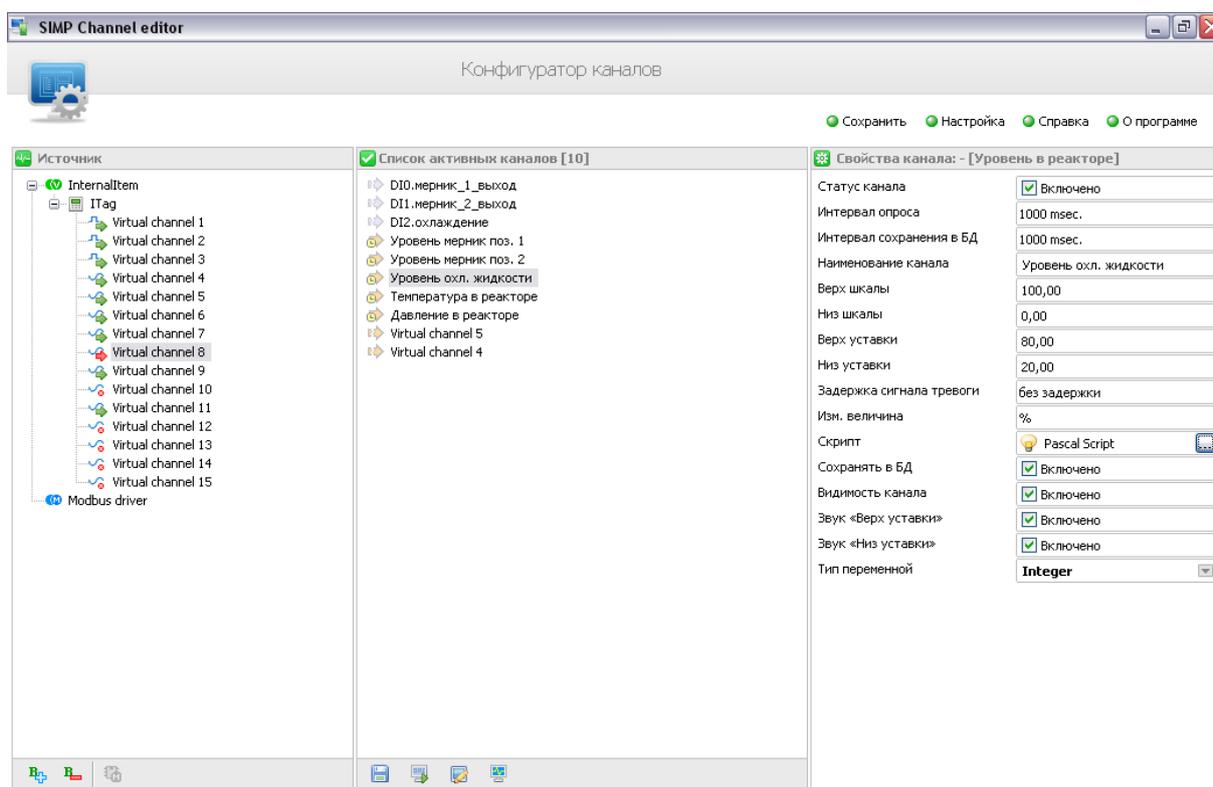


Рис. 1.2 – Окно Конфигуратора каналов

Настроить вид списка OPC серверов в панели Источник можно следующим образом: *Настройка*→*Список OPC серверов*.

Установите флажки видимости для каждого сервера. Нажмите кнопку "ОК". Изменения вступят в силу после перезапуска Редактора каналов.

Иконка с зеленой стрелкой означает, что текущий канал является активным, то есть данные могут считываться в программе SIMP.

Иконка с красным кружком означает, что информация из этого канала не отображается в SIMP.

Для того чтобы увидеть каналы в Источнике, необходимо перейти: *InternalItem*→*ITag*.

Все каналы, которые вы используете в работе – виртуальные, так что не бойтесь экспериментировать: ничего не испортите.

Аналогично перетаскиванию объектов, каналы тоже можно перетащить в средний столбец "Список активных каналов". При этом неактивный канал активируется в системе. Удалить канал из числа активных можно, нажав клавишу "Del", или сняв флажок в статусе каналов. Если вам не хватает каналов, то можно использовать символ В₊.

В версии Light активных каналов может быть не более 8.

В панели активных каналов могут отображаться следующие их типы (см. рис. 1.3).

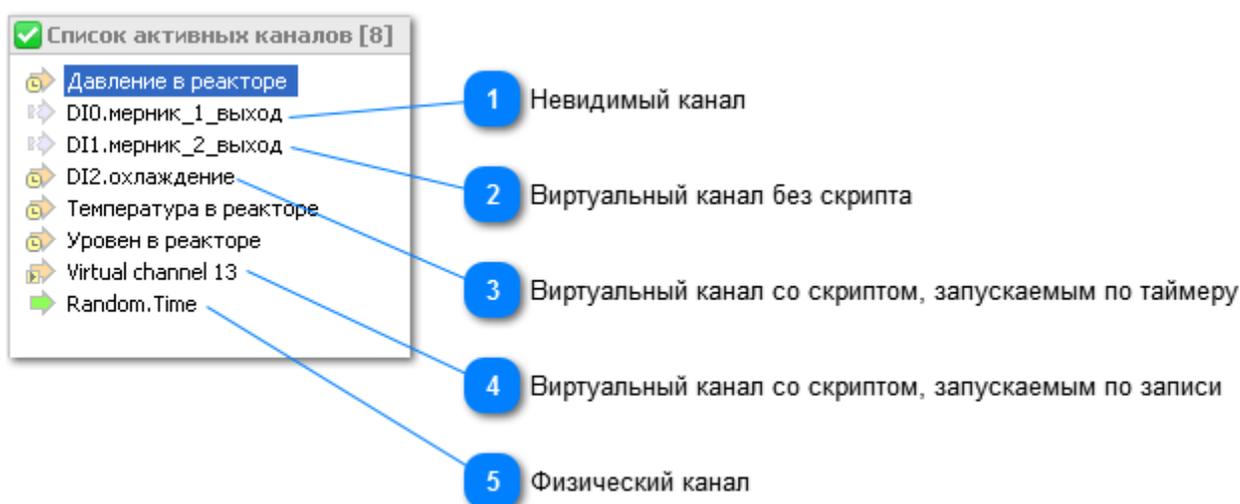


Рис. 1.3 – Типы каналов

Теперь в работе можно использовать каналы (создайте не менее семи штук). Теперь нажмите кнопку "Сохранить" в виде дискетки. Далее последовательно или в процессе работы над заданием, возвращаясь к Конфигуратору, необходимо задавать свойства задействованных вами каналов.

В свойствах каждого канала:

- отметьте флажком включено "Статус канала";
- "Интервал опроса" и "Интервал сохранения в БД" задаем в 1000 мс;
- "Наименование канала" – по вашему усмотрению;
- "Низ" и "Верх шкалы" – диапазон изменения параметра ТП (в работе рекомендуется выбрать значение 100);
- "Низ" и "Верх уставки" – вот здесь надо подумать;
- "Задержка сигнала" – без задержки;
- "Измеряемая величина" – единица измерения параметра;

– остальные параметры не трогаем (можете изменить "Тип переменной").

Когда закончите работу в Конфигураторе каналов, обязательно сохраните изменения (зеленый кружок и на всякий случай дискетку), а затем закройте приложение. Вы окажитесь снова в Редакторе мнемосхем. В противном случае загрузите мнемосхему заново.

Возвратившись в Редактор мнемосхем, доделайте задание преподавателя, используя готовые каналы.

Как только у вас начнет что-то получаться, можете запустить эмуляцию на ПК.

Для того чтобы увидеть что у вас получилось, перейдите:

Настройка→*Запустить режим эмуляции* или нажмите Ctrl+F9.

Появится меню, изображенное на рис. 1.4, а фон станет белым. В поля минимум и максимум вводим при необходимости диапазон изменения параметров от 0 до 100. В поле "Записать значение" надо ввести значение параметра, с которого начнется эмуляция (обычно 0) и нажать кнопку "Записать". Только после этого можно поставить галочку в поле "Использовать генератор".

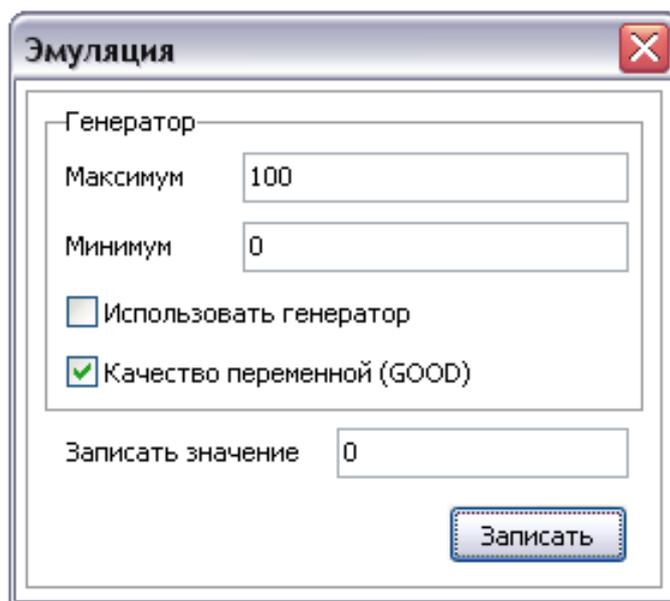


Рис. 1.4 – Меню эмулятора проекта

При достижении максимального значения генератор начнет уменьшать параметр с тем же шагом. Затем цикл повторится. Если что-то пошло не так, уберите галочку с поля "Использовать генератор" или выполните:

Настройка→*Остановить режим эмуляции* или Ctrl+F9.

1.3. Порядок выполнения работы и содержание отчета

Порядок работы

Получите задание для работы у преподавателя. Запустите Редактор мнемосхем и Конфигуратор каналов из пакета SIMP Light. Нарисуйте схему ТП, добавьте необходимое количество "оборудования", поставьте стрелки, обозначающие направления движения газов и жидкостей в трубопроводах. Настройте контрольное оборудование и каналы как описано в п. 1.2. Сохраните компоненты проекта из всех открытых приложений на диске. Распечатайте мнемосхему.

Разработайте схему соединений, предварительно выбрав необходимое оборудование (датчики, контроллеры, тип шины и т.д.).

Содержание отчета

- цель работы;
- краткие теоретические сведения;
- результаты работы – распечатка;
- схема соединений оборудования и состав выбранного оборудования.
- выводы по работе (объяснение результатов).

1.4. Контрольные вопросы

1. С какой целью используются в технике SCADA-системы.
2. Для чего необходимо высокое быстродействие SCADA-систем.
3. Какие требования предъявляются к SCADA-системам?
4. При каких условиях срабатывает режим тревоги?
5. Какие параметры используются для эмуляции схемы в SCADA-системе SIMP Light? Как этот процесс протекает на самом деле?
6. Что такое мнемосхема и для чего она служит?
7. Какие функции выполняет OPC сервер?
8. Для чего нужны уставки?
9. Будет ли работать SCADA-система при наличии ошибок в мнемосхеме? Каких ошибок?
10. В чем разница между виртуальным и невидимым каналами?

Практическое занятие №2.

Построение модели технологического процесса методами статистического планирования эксперимента

Цель работы: ознакомление с основными положениями статистического планирования эксперимента и построение планов проведения эксперимента.

Для достижения поставленных задач работу удобно разбить на два этапа [5-9].

2.1. Краткие теоретические сведения к первому этапу

Полный факторный эксперимент

Под экспериментом понимают совокупность действий, направленных на выяснение свойств некоторого объекта или его модели, в том числе и математической. Важность эксперимента в современной науке и технике не вызывает сомнений. Последовательность измерений при проведении эксперимента, варьирование переменными параметрами и т.д., определяется в основном интуицией экспериментатора. Однако происходящее постоянное усложнение экспериментальных установок, увеличение объема и удорожание экспериментов привели к необходимости разработки теории, позволяющей при ограниченных затратах извлекать наибольшее количество информации за счет оптимального построения самого эксперимента.

Для проведения эксперимента необходимо иметь возможность воздействовать на поведение исследуемого объекта или его модели. Все способы такого воздействия будем называть факторами и обозначать: X_1, X_2, \dots, X_n .

При изменении факторов будут меняться и свойства исследуемого объекта, которые в теории статистического планирования эксперимента (СПЭ) называют функциями отклика. При экспериментальном исследовании радиоэлектронной аппаратуры функциями отклика, как правило, являются выходные параметры радиотехнического объекта, а факторы – первичные параметры (параметры активных и пассивных элементов схемы и источников питания).

В общем случае можно выделить два больших класса задач, решаемых методами СПЭ. К первому классу относятся исследования, направленные на выявление механизма явления и называемые интерполяционными. Результатом эксперимента в этом случае является

математическая модель (ММ) исследуемого объекта или явления. Ко второму типу относятся задачи на оптимизацию или экстремальные. Результатом эксперимента в этом случае является определение такого набора значений факторов, при которых функция отклика принимает оптимальное значение, т.е. имеет место экстремум функции отклика.

Как правило, аналитическое выражение функции отклика (выходного параметра) не известно, поэтому приходится ограничиваться представлением ее в виде полинома вида:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \Delta X_i + \sum_{i < n} a_{in} \Delta X_i \Delta X_n + \sum_{i=1}^k a_{ii} \Delta X_i^2, \quad (2.1)$$

где y – оценка действительного значения выходного параметра, полученная экспериментально; ΔX_i – изменение (интервал варьирования) i -го фактора:

$$\Delta X = X_i - X_{i \text{ ном}},$$

где $X_{i \text{ ном}}$ – номинальное значение i -го фактора; a_0, a_1, \dots – коэффициенты, получаемые экспериментально.

При представлении неизвестной функции отклика полиномом (2.1) необходимо определить числовые значения его коэффициентов

$$a_0, \dots, a_i, \dots, a_{in}, \dots, a_{ii}, \dots$$

и тогда выражение (2.1) принимает конкретный вид.

Простейшим и часто используемым является полином первого порядка, когда определяются только коэффициенты a_0 и a_1 . Используется также неполный полином второго порядка, когда определяются коэффициенты a_{in} , т.е. находятся слагаемые второй суммы выражения (2.1). В более сложных случаях используют полный квадратичный полином (определяют a_{ii}).

Чем более простым полиномом описывается неизвестная функция отклика, тем меньше необходимо определять коэффициентов полинома и тем меньше нужно ставить опытов в эксперименте.

Если функция отклика описывается полиномом первого порядка, то такая функция отклика является линейной.

Полином может быть использован для аппроксимации функции в ограниченной области. Поэтому необходимо выбрать начальные значения X_i и отклонения факторов от их начальных значений ΔX_i .

В дальнейшем в работе рассмотрено только планирование первого порядка. При этом факторы могут принимать лишь два возможных значения:

$$X_i \pm \Delta X_i. \quad (2.2)$$

При этом уравнение (2.1) можно переписать в следующем виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \Delta X_i + \sum_{i < n} b_{in} \Delta X_i \Delta X_n + \sum_{i=1}^k b_{ii} \Delta X_i^2 . \quad (2.3)$$

Это уравнение называют уравнением регрессии, а числовые коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_i , входящие в него – коэффициентами регрессии, причем:

$$b_i = a_i |\Delta X_i|$$

и имеют размерность величины y .

В методе статистического планирования эксперимента в каждом опыте одновременно варьируются все факторы, при этом опыт дает существенно большую информацию, чем при последовательном варьировании только одного фактора, затем другого и т.д.

Условия проведения эксперимента записываются в таблице, которая называется матрицей планирования или просто планом. План эксперимента для двух факторов представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1. – Матрица планирования для двух факторов

№ опыта	X_1	X_2	Результат наблюдений
1	+	+	y_1
2	–	+	y_2
3	+	–	y_3
4	–	–	y_4

Знаки в таблице "+" или "–" обозначают, что значение нормированного фактора равно +1 или –1, причем, для простоты записи символ "1" опущен. Тогда знак "+" означает, что в данном опыте данный фактор должен иметь значение, соответствующее его верхнему уровню, а знак "–" обозначает, что фактор находится на нижнем уровне.

Как мы видим, план, представленный в таблице 2.1, состоит из опытов, включающих все возможные сочетания уровней факторов. Такой эксперимент называется полным факторным экспериментом (ПФЭ). При этом число проводимых опытов равно:

$$N = 2^k ,$$

где k – число факторов.

Для ПФЭ по таблице 2.1: $N=2^2=4$.

При увеличении числа факторов число опытов стремительно растет. При этом матрица планирования для трехфакторного эксперимента может быть получена на основе таблицы 2.1, например, сле-

дующим образом: план эксперимента, надо записать дважды – один раз для $X_3 = +1$, а второй раз для $X_3 = -1$.

Как отмечалось выше, результаты эксперимента должны быть использованы для расчета коэффициентов уравнения регрессии (2.3). При аппроксимации функции отклика полиномом первого рода, необходимо рассчитать коэффициенты регрессии: при факторах (b_i) и свободный коэффициент b_0 . Для расчета коэффициента b_0 вводится фиктивная переменная X_0 ; этой переменной в матрице планирования отводится специальный столбец и проставляются знаки "+" для всех опытов (см. табл. 2.2).

Если при аппроксимации функции отклика неполным полиномом второго рода необходимо рассчитать коэффициенты регрессии b_{in} при так называемых взаимодействиях факторов $X_i X_n$, то в матрицу планирования вводятся дополнительные столбцы для таких взаимодействий. Причем знаки, например, для взаимодействия $X_1 X_2$ получаются простым перемножением знаков X_1 и X_2 в соответствующей строке.

Полная матрица планирования для двух факторов с учетом фиктивной переменной X_0 и взаимодействий X_1 и X_2 представлена в табл. 2.2.

Таблица 2.2. – Пример матрицы планирования для двух факторов

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	Результат наблюдений
1	+	+	+	+	y_1
2	+	-	+	-	y_2
3	+	+	-	-	y_3
4	+	-	-	+	y_4

Еще раз отметим, что для проведения эксперимента достаточно только условий, задаваемых в столбцах при факторах X_1 и X_2 , остальные столбцы матрицы планирования введены не для задания условий проведения эксперимента, а для расчета коэффициентов регрессии в дальнейшем.

Остановимся на физическом смысле коэффициентов регрессии. Коэффициенты регрессии при факторах X_1, X_2, \dots, X_n показывают степень влияния данных факторов на функцию отклика. Коэффициенты регрессии при взаимодействиях имеют несколько иной смысл. Так, например, коэффициент регрессии b_{in} показывает, как влияет на функцию отклика фактор X_i , когда изменяется уровень фактора X_n , и,

наоборот, степень влияния фактора X_n – при изменении уровня X_i .

На основании приведённых правил можно строить планы ПФЭ для любого числа факторов и для любых форм их взаимодействий.

Дробный факторный эксперимент

Как показывает опыт, при проведении экспериментальных исследований зачастую можно пренебречь влиянием взаимодействия высоких порядков, начиная с тройных. В ряде случаев можно пренебречь и парными взаимодействиями. В то же время, например, ПФЭ типа 2^4 позволяет оценить 6 парных, 4 тройных и одно четырехкратное взаимодействие, а ПФЭ типа 2^5 оценивает уже по 10 двойных и тройных взаимодействий, 5 четырех- и одно пятикратное. Таким образом, в случае с ПФЭ с увеличением числа факторов с одной стороны растёт количество информации об эффектах взаимодействия, которая, как правило, является избыточной, с другой – растёт число опытов. Сокращения числа опытов можно добиться, используя дробные реплики от ПФЭ или дробные факторные эксперименты (ДФЭ).

Рассмотрим принцип построения матрицы планирования ДФЭ. Обратимся вновь к таблице 2.2, где приведена матрица планирования ПФЭ типа 2^2 . Пользуясь матрицей, можно вычислить четыре коэффициента регрессии: b_0, b_1, b_2, b_{12} .

Если заранее известно, что в выбранных интервалах варьирования испытываемое устройство может быть описано полиномом первого рода, то достаточно три коэффициента регрессии: b_0, b_1 и b_2 , а b_{12} можно не определять.

Поскольку матрица состоит из четырех опытов, а мы определяем лишь три коэффициента регрессии, то остается одна степень свободы, которую можно использовать для уменьшения числа опытов. Этот результат достигается при использовании ДФЭ. Для построения матрицы планирования ДФЭ при k факторах, необходимо воспользоваться матрицей планирования при $k-1$ факторах.

По таблице 2.2 ПФЭ для двух факторов можно построить матрицу планирования ДФЭ для трех факторов. Для этого будем считать взаимодействие третьим нормированным фактором, $X_3 = X_1X_2$, тогда матрица планирования представляет собой таблицу 2.3.

Таким образом, как видно из таблицы 2.3, полученные в результате ДФЭ коэффициенты регрессии для линейных эффектов, оказались смешанными с коэффициентами регрессии эффектов парных взаимодействий (знаки в матрице у фактора X_1 совпадают со знаками взаимодействия X_2X_3 , у фактора X_2 – с взаимодействием X_1X_3 , а у

фактора X_3 – с $X_1 X_2$), что записывается следующим образом:

Таблица 2.3. – Матрица планирования ДФЭ типа 2^{3-1}

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_3=X_1 X_2$	$X_2 X_3$	$X_1 X_3$	Результат наблюдений
1	+	+	+	+	+	+	y_1
2	+	–	+	–	–	+	y_2
3	+	+	–	–	+	–	y_3
4	+	–	–	+	–	–	y_4

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12},$$

где буквами греческого алфавита β_1, β_2, \dots обозначены действительные оценки коэффициентов регрессии, а латинскими буквами b_1, b_2, \dots – приближённые значения коэффициентов регрессии, полученные в результате эксперимента и называемые оценками.

Очень часто влияние взаимодействия на функцию отклика гораздо меньше линейных эффектов. В этом случае можно считать, что:

$$\beta_{23} = \beta_{13} = \beta_{12} = 0 ,$$

тогда:

$$b_1 \rightarrow \beta_1; \quad b_2 \rightarrow \beta_2; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 .$$

Поставив четыре опыта для оценки влияния трех факторов, мы воспользовались половиной ПФЭ 2^3 , который имел бы число опытов 8. Такой уменьшенный в два раза эксперимент называется полурепликой. Если бы мы приняли: $X_3 = -X_1 X_2$, то получили бы вторую половину матрицы 2^3 . В этом случае оценки коэффициентов регрессии при линейных членах и парных взаимодействиях также были бы смешаны:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{23}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{13}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{12} .$$

Объединение этих двух полуреплик и есть полный факторный эксперимент 2^3 , который дает отдельные оценки для линейных эффектов и эффектов взаимодействия.

Найденное правило получения матриц планирования дробных реплик на основе матрицы планирования ПФЭ для $k-1$ факторов можно сформулировать следующим образом: новому фактору присваивается столбец матрицы, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь. Для обозначения дробных реплик, в которых q линейных эффектов, приравнивая к эффектам взаимодействия, поль-

зуются обозначением 2^{k-q} . Так рассмотренная нами полуреплика от ПФЭ 2^3 запишется как 2^{3-1} , а четвертьреплика от 2^5 – в виде 2^{5-2} и т.д.

Определяющий контраст. Генерирующее соотношение

При построении полуреплики 2^{3-1} существует всего две возможности определения X_3 : $X_3 = X_1 X_2$ или $X_3 = -X_1 X_2$ (см. табл. 2.4).

Таблица 2.4. – Матрицы планирования полуреplik типа 2^{3-1}

1.	$X_3 = X_1 X_2$				2.	$X_3 = -X_1 X_2$			
№ опыта	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2 X_3$	№ опыта	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2 X_3$
1	+	+	+	+	1	+	+	-	-
2	-	+	-	+	2	-	+	+	-
3	+	-	-	+	3	+	-	+	-
4	-	-	+	+	4	-	-	-	-

Как видно из таблицы 2.4, для построчного произведения трёх столбцов первой матрицы выполняется соотношение:

$$X_1 X_2 X_3 = +1,$$

а второй части матрицы:

$$X_1 X_2 X_3 = -1.$$

Символическое обозначение произведения столбцов, равное +1 или -1 называется определяющим контрастом (ОК). Контраст помогает определять смешанные эффекты, или систему смешивания. Для того чтобы определить, какие эффекты смешаны с данными, нужно умножить обе части ОК на данный эффект. Так если ОК равен:

$$1 = X_1 X_2 X_3,$$

то для X_1 имеем: $X_1 = X_1^2 X_2 X_3$, а так как: $X_i^2 = 1$, то: $X_1 = X_2 X_3$.

Аналогично можно получить: $X_2 = X_1 X_3$, $X_3 = X_1 X_2$.

Это значит, что коэффициенты линейного уравнения будут оценками:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12} .$$

Соотношение, показывающее, с каким из эффектов смешан данный эффект, называется генерирующим соотношением (ГС). Например, для полуреплики 1, в таблице 2.4, ГС имеет вид:

$$X_3 = X_1 X_2,$$

для полуреплики 2, в таблице 2.4, ГС будет:

$$X_3 = -X_1 X_2.$$

При выборе полуреплики 2^{4-1} возможны уже восемь вариантов ГС:

1. $X_4 = X_1 X_2$, 5. $X_4 = X_1 X_3$,
2. $X_4 = -X_1 X_2$, 6. $X_4 = -X_1 X_3$,
3. $X_4 = X_2 X_3$, 7. $X_4 = X_1 X_2 X_3$,
4. $X_4 = -X_2 X_3$, 8. $X_4 = -X_1 X_2 X_3$.

Разрешающая способность полуреplik, построенных в соответствии с 8-ю приведёнными ГС, различна. Разрешающая способность будет максимальной, если линейные эффекты смешаны с эффектами взаимодействия наибольшего возможного порядка, поскольку, чем выше порядок взаимодействия, тем меньше его значимость, тем меньшая ошибка вносится в определение интересующих нас эффектов.

Для определения разрешающей способности ДФЭ необходимо написать систему смешивания, воспользовавшись ОК или ГС.

Определим разрешающую способность первого и седьмого вариантов дробных полуреplik 2^{4-1} , для чего вначале по ГС найдем ОК:

1. $X_4^2 = X_1 X_2 X_4$; $1 = X_1 X_2 X_4$.
2. $X_4^2 = X_1 X_2 X_3 X_4$; $1 = X_1 X_2 X_3 X_4$.

Затем, умножая левую и правую части ОК на соответствующий эффект, получим систему смешивания:

$$\begin{array}{ll}
 b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{24} & b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{234} \\
 1. \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{14} & \dots \quad 7. \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{134} \\
 b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{1234} & b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{124} \\
 b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{12} & b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{123}
 \end{array}$$

Как видим, при выборе ГС седьмого варианта все линейные эффекты оказались смешанными с тройными взаимодействиями, а в первом случае – в основном с двойными. Таким образом, полуреплика 7 имеет максимальную разрешающую способность, поэтому такая полуреплика называется главной. Среди полуреplik 2^{5-1} главными будут полуреплики, имеющие ОК:

$1 = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5$ и $-1 = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5$;
 среди полуреplik 2^{6-1} :

$1 = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$ и $-1 = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$;
 и т.д. Таким образом, при построении главных полуреplik, в ОК следует включать наибольшее число факторов (наибольшее возможное число).

Помимо полуреплик на практике широко применяютсяДФЭ более высокой дробности 1/4-реплики, 1/8-реплики и т.д.

Рассмотрим 1/4 реплику 2^{5-2} . Здесь возможно очень большое число вариантов, в частности, если приравнять X_4 к парному, а X_5 к тройному взаимодействию, то возможны 12 различных решений:

1. $X_4=X_1 X_2$, $X_5=X_1 X_2 X_3$
2. $X_4=X_1 X_2$, $X_5=-X_1 X_2 X_3$
3. $X_4=-X_1 X_2$, $X_5=X_1 X_2 X_3$
4. $X_4=-X_1 X_2$, $X_5=-X_1 X_2 X_3$
5. $X_4=X_1 X_3$, $X_5=X_1 X_2 X_3$
6. $X_4=X_1 X_3$, $X_5=-X_1 X_2 X_3$
- ,

Допустим, выбран пятый вариант:

$$X_4=X_1 X_3 \text{ и } X_5=X_1 X_2 X_3.$$

Тогда определяющими контрастами являются:

$$1=X_1 X_3 X_4 \text{ и } 1=X_1 X_2 X_3 X_5.$$

Если перемножить эти определяющие контрасты, то получится третье соотношение:

$$1=X_2 X_4 X_5.$$

Чтобы полностью охарактеризовать разрешающую способность реплики, необходимо записать так называемый обобщающий определяющий контраст (ООК):

$$1=X_1 X_3 X_4=X_2 X_4 X_5=X_1 X_2 X_3 X_5 .$$

В этом случае система смешивания определяется умножением ООК последовательно на X_1 , X_2 , X_3 и т.д. Аналогичным образом находятся ООК и система смешивания для реплик более высокой дробности.

В заключение покажем, как строится матрица планированияДФЭ на примере главной полуреплики 2^{4-1} .

1. Запишем генерирующее соотношение для одного из факторов:

$$X_4=X_1 X_2 X_3.$$

2. Строим матрицу ПФЭ типа 2^3 для трех факторов X_1 , X_2 , X_3 , исключая фактор X_4 , который варьируется в соответствии с ГС (табл. 2.5).

3. Добавляем к построенной матрице ПФЭ 2^3 столбец справа, варьируя X_4 в соответствии с генеральным соотношением.

Эффективность применения дробных реплик возрастает с ростом количества факторов. Так, при наличии 15 факторов для постановки ПФЭ 2^{15} потребовалось бы проделать 32 768 опытов, приме-

нение же дробной реплики 2^{15-11} позволяет уменьшить число опытов в 2048 раз, доведя его до 16.

Таблица 2.5. – Пример матрицы ПФЭ типа 2^{4-1}

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$X_4=X_1 X_2 X_3$
1	+	+	+	+
2	–	+	+	–
3	+	–	+	–
4	–	–	+	+
5	+	+	–	–
6	–	+	–	+
7	+	–	–	+
8	–	–	–	–

Таким образом, использование ДФЭ позволяет существенно сократить число опытов, причем выигрыш в числе опытов тем больше, чем выше дробность реплики.

Однако не следует забывать, что коэффициенты регрессии при ДФЭ определяются с погрешностью, так как всегда коэффициенты регрессии при линейных эффектах оказываются смешанными с коэффициентами регрессии при взаимодействиях. Причем система смешивания усложняется (точность определения коэффициентов регрессии падает) при повышении дробности реплики матрицы планирования. Следовательно, ДФЭ позволяет существенно сократить число опытов, но при этом точность определения коэффициентов регрессии, а значит и искомой функции отклика, снижается.

Рандомизация порядка проведения опытов

Чтобы исключить влияние ошибок, вызванных внешними условиями (переменной температуры, изменением питающих напряжений и т.д.) рекомендуется случайная последовательность проведения опытов, запланированных в матрице. Опыты необходимо рандомизировать во времени. Термин рандомизация опытов означает придание порядку опытов случайного характера.

При рандомизации опытов следует выполнять их не в последовательности номеров строк матрицы планирования, а в случайной последовательности, получаемой с использованием любых датчиков или таблиц случайных чисел. С помощью таблицы случайных чисел рандомизация производится следующим образом. Рассмотрим снова матрицу 2^{3-1} (см. табл. 2.3), номера опытов в ней пронумерованы с 1 по 4. Просматривая, начиная с любого столбца, таб-

лицу случайных чисел, фрагмент которой приведен в Приложении I к данной работе, выписываем из нее цифры с 1 по 4, отбрасывая повторяющиеся. Эти цифры из таблицы случайных чисел и дают рандомизированный порядок проведения опытов.

Часто для повышения точности экспериментальных исследований и определения ошибки измерений, эксперименты производят (по возможности в одинаковых условиях) несколько раз (проводят параллельные опыты). Если матрица планирования 2^{3-1} и приводится три параллельных опыта, то суммарное число опытов будет уже не 4, а 12. При рандомизации в этом случае, следует выписать из таблицы Приложения I числа с 1 по 12 и записать их в сводную матрицу планирования. В таблице 2.6 приведена матрица планирования 2^{3-1} для трех параллельных опытов с рандомизацией их проведения.

Таблица 2.6. – Рандомизированная матрица 2^{3-1}

№ Опыта по таблице случайных чисел			№ опыта по порядку	X_0	X_1	X_2	$X_3 = X_1 X_2$	Результаты измерений
2	6	8	1	+	+	+	+	Y_{11} Y_{12} Y_{13}
4	7	10	2	+	-	+	-	Y_{21} Y_{22} Y_{23}
12	11	1	3	+	+	-	-	Y_{31} Y_{32} Y_{33}
5	3	9	4	+	-	-	+	Y_{41} Y_{42} Y_{43}

2.2. Порядок выполнения первого этапа. Содержание отчета

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с краткой теорией и получить таблицу исходных данных (файл) у преподавателя.
2. Определите генерирующее соотношение, определяющий контраст и систему смешивания для вашего варианта.
3. Постройте матрицу планирования для заданного варианта.
4. Рандомизируйте порядок проведения опытов.
5. Сделайте выводы по работе.

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- краткие теоретические сведения (исключая примеры);
- исходные данные к работе;
- заполненную матрицу планирования эксперимента;

– выводы по работе (анализ результатов).

2.3. Краткие теоретические сведения ко второму этапу

Цель работы: ознакомление со статистической обработкой результатов эксперимента с использованием результатов планирования эксперимента.

Статистическая обработка результатов эксперимента

При статистической обработке результатов эксперимента в первую очередь необходимо определить ошибку каждого опыта. Для повышения точности эксперимента очень часто проводятся так называемые параллельные опыты, когда при одних и тех же значениях уровней факторов, выполняются несколько раз по возможности в одинаковых условиях. После проведения параллельных опытов можно рассчитать среднее арифметическое значение всех результатов (среднее значение в каждой строке), равное сумме всех r отдельных результатов, деленной на количество параллельных опытов:

$$\bar{y}_i = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_r}{r} = \frac{\sum_{j=1}^r y_{ji}}{r}, \quad (2.4)$$

где r – число повторных (параллельных) опытов в i -й строке, j – номер столбца.

Отклонение результатов любого опыта, поставленного в соответствии с i -й строкой матрицы планирования (y_{ji}), от среднего арифметического можно представить как разность ($y_{ji} - \bar{y}_i$). Для количественной оценки разброса результатов используем дисперсию.

Дисперсией называется среднее значение квадрата отклонения величины от ее среднего значения. Таким образом, строчная дисперсия, или дисперсия опыта S_i^2 определяется по формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^r (y_{ji} - \bar{y}_i)^2}{r - 1} \quad (2.5)$$

где $(r - 1)$ – число степеней свободы, равное количеству повторных опытов минус единица (одна степень свободы уже использована для вычисления среднего).

Очевидно, что дисперсия опыта определяется только ошибками эксперимента.

Корень квадратный из дисперсии, взятый с положительным зна-

ком, называется средним квадратичным отклонением (СКО), стандартом или среднеквадратичной ошибкой:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r (y_{ji} - \bar{y}_i)^2}{r-1}} \quad (2.6)$$

Среднее значение, дисперсия и СКО могут быть определены по формулам (2.4) – (2.6) только в том случае, если среди результатов измерений y_{ji} нет грубых ошибок (брака), т.е. результатов, заметно отклоняющихся от среднего. Для обнаружения брака используют ряд методов, в частности, оценку по критерию Стьюдента. Если какой-то результат действительно оказывается браком, он отбрасывается и в вычислениях среднего значения, дисперсии и СКО не участвует.

Проверка по критерию Стьюдента ведется следующим образом: отбрасывая подозрительный результат, вычисляют среднее \bar{y}_i по (2.4) и СКО S_i по (2.6). Далее подсчитывают экспериментальное значение критерия Стьюдента $t_{\text{эксп}}$:

$$t_{\text{эксп}} = \frac{|y_{ri}^* - \bar{y}_i|}{S_i}, \quad (2.7)$$

где y_{ri}^* – подозрительный результат.

Если при сравнении с табличным значением t -критерия Стьюдента (таблица Приложения II) окажется, что: $t_{\text{эксп}} > t_{\text{табл}}$, то опыт считается бракованным. Число степеней свободы, которое необходимо знать при использовании таблиц t -критерия, определяется как полное количество параллельных опытов минус число подозрительных опытов минус единица. Причем наличие грубых ошибок можно проверять с различной вероятностью. Вероятность проверки зависит от уровня значимости табличного значения критерия Стьюдента, с которым сравнивается экспериментальный. Наиболее часто применяют критерий Стьюдента при уровне значимости, равным 0,05, т.е. проверка тогда будет выполнена с вероятностью 0,95.

Определение дисперсии воспроизводимости. Проверка однородности дисперсий

Мы рассмотрели, как подсчитывается дисперсия в каждом опыте, т.е. в каждой горизонтальной строке матрицы планирования. Матрица планирования состоит из серии опытов, и дисперсия для всего эксперимента получается в результате усреднения дисперсий всех опытов. В технологии планирования эксперимента речь идет о вы-

числении дисперсии функции отклика $S^2\{y\}$ или, что то же самое, дисперсии воспроизводимости эксперимента. При подсчете дисперсии функции отклика квадрат разности между значением y_{ri} в каждом опыте и средним значением из r повторных наблюдений \bar{y}_i нужно просуммировать по числу опытов в матрице планирования m , а затем разделить на $m(r-1)$:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^r (y_{ji} - \bar{y}_i)^2}{m(r-1)} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i^2}{m}. \quad (2.8)$$

Такой формулой можно пользоваться в случае, когда число повторных опытов одинаково в каждой строке матрицы планирования.

На практике весьма часто приходится сталкиваться со случаями, когда число повторных опытов различно. Это происходит вследствие отброса грубых наблюдений, желания еще раз повторить опыт, результаты которого кажутся сомнительными и т.д. Тогда при усреднении дисперсий приходится пользоваться средним взвешенным значением дисперсий, взятым с учетом числа степеней свободы:

$$S^2\{y\} = \frac{S_1^2 f_1 + S_2^2 f_2 + \dots + S_m^2 f_m}{f_1 + f_2 + \dots + f_m} = \frac{\sum_{i=1}^m f_i S_i^2}{\sum_{i=1}^m f_i}, \quad (2.9)$$

где S_{12}, S_{22}, \dots – дисперсия первого, второго и т.д. опытов; $f_1 = r_1 - 1$ – число степеней свободы в первом опыте, равное числу параллельных опытов $r_1 - 1$; аналогично $f_2 = r_2 - 1$ и т.д.

Таким образом, число степеней свободы дисперсии функции отклика $[S^2\{y\}]$ определяется как сумма чисел степеней свободы дисперсий, из которых она вычислена, т.е.:

$$f = \sum_{i=1}^m f_i = \sum_{i=1}^m (r_i - 1). \quad (2.10)$$

При одинаковом числе параллельных опытов в каждой строке матрицы планирования ($r_1 = r_2 = \dots = r_m$) из (2.10) получаем:

$$f = m(r_i - 1). \quad (2.11)$$

Следует отметить, что выражения (2.8) и (2.9) применимы только при усреднении однородных дисперсий опыта. Однородность дисперсий означает, что среди всех суммируемых дисперсий опыта нет таких, которые бы значительно превышали все остальные.

Проверка однородности дисперсий производится с помощью различных статистических критериев: критерия Бартлета, Кохрена,

Фишера. Простейшим из них является критерий Фишера (F -критерий).

F -критерий представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей. Полученная величина сравнивается с табличным значением (см. таблицу Приложения III). Если полученное значение дисперсионного отношения больше приведенного в таблице для соответствующих степеней свободы и выбранного уровня значимости, то это значит, что дисперсии значительно отличаются друг от друга, т.е. они не однородны.

Приведенная в приложении таблица для определения F -критерия содержит значения при наиболее часто используемом уровне значимости, равном 0,05. В верхней горизонтальной строке даются значения степеней свободы для большей дисперсии, в левом вертикальном столбце – для меньшей. На пересечении соответствующих: строки и столбца можно найти значение F -критерия.

Рассмотрим на примере применение F -критерия для проверки однородности дисперсий. Пусть при известных значениях числа параллельных опытов экспериментальные данные дают следующие значения дисперсий:

$$S_1^2 = 8,12; \quad r_1 = 7, \\ S_2^2 = 0,7; \quad r_2 = 12.$$

Тогда мы получим следующее дисперсионное отношение:

$$F_{\text{эксп}} = 8,12 / 0,7 = 11,6.$$

Для числа степеней свободы:

$$f_1 = r_1 - 1 = 6 \text{ и } f_2 = r_2 - 1 = 11.$$

Из таблицы Приложения III получаем: $F_{\text{табл}} = 3,1$. Это говорит о том, что с вероятностью 0,95 дисперсии неоднородны.

На этом примере показано как определять однородность дисперсий в случае двух опытов. Практические задачи имеют число опытов, безусловно, больше двух. В таких случаях следует пользоваться критериями Кохрена или Бартлета. Последний более универсален, однако при его использовании приходится выполнять достаточно громоздкие вычисления.

Для упрощения громоздких вычислений можно использовать следующий простой прием: из всех дисперсий, рассчитанных для каждого опыта, выбираются наибольшая и наименьшая. По F -критерию проверяют, значимо ли они отличаются друг от друга. Ясно, что если наибольшая и наименьшая дисперсии не отличаются значимо, то дисперсии, имеющие промежуточные значения, также не могут значимо отличаться друг от друга, и всю группу дисперсий можно

считать однородной.

Если проверка покажет, что какие-то дисперсии неоднородны, то используют специальные приемы, которые в данной работе приводиться не будут.

Таким образом, очевидно, что тщательная разработка матрицы планирования, выбор соответствующих приборов и методов измерения – еще недостаточные условия для успешного проведения эксперимента. Исследователю следует критически подходить к полученным результатам, оценивая их по строгим, статистически обоснованным критериям.

Так, следует отбраковывать результаты, значительно отличающиеся от средних, пользуясь при этом, например, *t*-критерием Стьюдента.

Особое внимание следует уделять проверке однородности дисперсий. Для проверки дисперсий можно воспользоваться критерием Фишера.

Определение коэффициентов регрессии

После окончания эксперимента следует приступить к обработке результатов с целью расчета коэффициентов регрессии. Наибольшую и при этом статистически обоснованную информацию из результатов эксперимента можно извлечь, пользуясь регрессионным анализом. Не рассматривая детально этот метод, приведем лишь три основных постулата, имеющих значение в приложении регрессионного анализа к планированию эксперимента.

Первый постулат. Функция отклика y есть случайная величина, распределенная по нормальному закону. Дисперсия воспроизводимости – одна из характеристик этого закона распределения.

В том, что y – случайная величина, сомневаться не приходится. Однако, для того, чтобы проверить характер закона распределения пришлось бы собирать чрезмерно большой экспериментальный материал. Поэтому гипотезу о нормальном распределении приходится, как правило, принимать на веру.

Второй постулат. Дисперсия не зависит от абсолютной величины y . Выполнимость этого постулата проверяется с помощью критериев однородности дисперсий опыта в различных точках факторного пространства. С такой проверкой мы познакомились ранее.

Третий постулат. Значения факторов суть не случайные величины. Это утверждение практически означает, что установка и поддержание на выбранном уровне любого фактора существенно точнее,

чем ошибка определения функции отклика y .

Нарушение этого постулата приводит к трудностям при реализации матрицы планирования.

Регрессионный анализ дает следующую формулу для вычисления коэффициентов регрессии в случае ортогональных планов, которые и используются при статистическом планировании эксперимента:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^m X_{ji} \cdot \bar{n}_i}{m} \quad (2.12)$$

где i – номер опыта (строки матрицы планирования); m – число опытов (строк) в матрице планирования; X_{ji} – нормированный фактор j -го линейного эффекта или взаимодействия в i -ом опыте.

Проверка значимости коэффициентов регрессии

После расчета коэффициентов регрессии необходимо произвести проверку их значимости. Значимость коэффициента регрессии означает, что влияние линейного эффекта или взаимодействия при данном коэффициенте на функцию отклика существенно и это слагаемое необходимо оставить в уравнении регрессии. Если коэффициент регрессии незначим, то слагаемое с этим коэффициентом из уравнения регрессии можно убрать, то есть его можно не учитывать.

Проверка значимости каждого коэффициента регрессии проводится независимо. Такую проверку можно осуществить двумя равноценными способами: проверкой по t -критерию Стьюдента или построением доверительного интервала. Рассмотрим первый из них. Величину t определяют по формуле:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S\{b_j\}} \quad (2.13)$$

где b_j – проверяемый коэффициент.

Квадратичная ошибка коэффициента регрессий определяется по соотношению:

$$S\{b_j\} = \sqrt{\frac{S^2\{y\}}{m}} \quad (2.14)$$

где $S\{b_j\}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессий.

Если полученное по формуле (2.13) значение t_j больше табличного, то коэффициент регрессии – значим. Число степеней свободы, при котором определяется табличное значение t -критерия, равно числу степеней свободы, использованному при расчете $S^2\{y\}$.

Пример.

В результате проведения ПФЭ 2^2 , выполненного при дублировании всех опытов, были рассчитаны коэффициенты регрессии и получена следующая модель:

$$y = 10 + 12x_1 - 0,3x_2 .$$

Расчет показал, что $S^2\{y\} = 0,4$.

Определим значимость коэффициентов по t -критерию Стьюдента. Квадратичная ошибка коэффициентов регрессии из (2.14) составит:

$$S\{b_j\} = \sqrt{\frac{0,4}{4}} = 0,316$$

(так как для ПФЭ $m = 2^2 = 4$).

Далее определим число степеней свободы, при которой было вычислено значение $S^2\{y\}$. Из (2.11) получаем:

$$f = 4(2 - 1) = 4 .$$

По таблице 1 Приложения II находим значение t -критерия для четырех степеней свободы. Получаем $t_{\text{табл}} = 2,776$. В соответствии с формулой (2.13) определяем:

$$t_0 = 10 / 0,316 = 31,6;$$

$$t_1 = 12 / 0,316 = 38;$$

$$t_2 = 0,3 / 0,316 = 0,95.$$

Следовательно, незначимым оказался лишь коэффициент регрессии при втором факторе.

Проверка значимости коэффициентов регрессии с помощью доверительного интервала очень похожа на только что рассмотренную методику. Она заключается в следующем. Рассчитывается доверительный интервал:

$$\Delta b_j = \pm t_{\text{табл}} S\{b_j\}, \quad (2.15)$$

где $t_{\text{табл}}$ – табличное значение t -критерия при числе степеней свободы, с которым определялась дисперсия $S^2\{y\}$. Сравнивается каждый коэффициент b_j с величиной доверительного интервала Δb_j . Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала, т.е.:

$$|b_j| > \Delta b_j .$$

Проверка адекватности модели

Первый вопрос, который возникает после вычисления коэффициентов регрессии, это проверка адекватности модели, т.е. проверка того, насколько точно соответствуют значения y , рассчитанные по

модели, значениям y , полученным в эксперименте.

Неадекватность модели является следствием неправильного определения ММ. Вопрос о соответствии полученной ММ и реально-го объекта возникает из-за нескольких причин.

Во-первых, по результатам планирования первого порядка (факторы варьируются только на двух уровнях) можно получить только линейную функцию отклика. Если исследуемый объект описывается нелинейной функцией отклика, то совершенно очевидно, что полученная модель будет неадекватна.

Во-вторых, причиной неадекватности модели может быть неправильный выбор интервалов варьирования факторов. В этом случае можно перейти к исследованию объекта в более узкой области, т.е. уменьшить интервал варьирования.

Для проверки адекватности модели необходимо вначале найти дисперсию адекватности, которую в самом общем случае можно определить, как остаточную сумму квадратов, рассчитанную с учетом числа повторных опытов в каждой строке матрицы, деленную на число степеней свободы:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{f_{\text{ад}}}, \quad (2.16)$$

где m – число опытов (строк матрицы);

\bar{y}_i – среднее значение функции отклика, вычисленное по результатам опытов в i -ой строке;

\hat{y}_i – среднее значение функции отклика, вычисляемое по полученной модели для комбинации факторов i -ой строки;

$f_{\text{ад}}$ – число степеней свободы, равное количеству опытов, использованных при определении коэффициентов регрессии (m) минус число вычисленных по ним значимых коэффициентов регрессии (b_j).

После расчета $S_{\text{ад}}^2$ не представляет труда определить, адекватна ли полученная нами модель. Для этого воспользуемся ранее уже рассмотренным критерием Фишера (F -критерием):

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2\{y\}} \quad (2.17)$$

Если рассчитанное по формуле (2.17) значение F не превышает табличное, то с соответствующей доверительной вероятностью можно считать модель адекватной.

2.4. Порядок выполнения второго этапа. Содержание отчета

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать результаты измерений и найти два подозрительных значения из разных строк матрицы (меньше или больше двух соседних, полученных при параллельном опыте).
2. Сделать проверку с помощью критерия Стьюдента. При необходимости отбросить грубые результаты измерения.
3. Рассчитать среднее арифметическое, строчную дисперсию и среднеквадратическое отклонение, с учетом отбраковки.
4. Определить коэффициенты регрессии.
5. Проверить значимость коэффициентов регрессии.
6. Проверить адекватность модели с помощью критерия Фишера.

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- краткие теоретические сведения (исключая примеры);
- сводную матрицу планирования;
- расчет коэффициентов регрессии;
- проверочные расчеты значимости коэффициентов регрессии;
- проверку модели на адекватность;
- выводы по работе.

2.5. Контрольные вопросы

1. На скольких уровнях варьируются факторы в планировании эксперимента первого порядка?
2. Каким образом строится матрица планирования ПФЭ?
3. Каков физический смысл коэффициентов регрессии при линейных эффектах, при взаимодействиях?
4. Что такое параллельные опыты? С какой целью их проводят?
5. Как построить план ДФЭ? В чем его отличие от ПФЭ?
6. Как определяются грубые ошибки (брак) в опытах?
7. Что показывает число степеней свободы дисперсии функции отклика?
8. Как проверяется однородность дисперсии опытов?

9. Для чего применяются дробные реплики?
10. Что такое генерирующее соотношение и определяющий контраст?
11. Как с помощью ОК определить систему смешивания?
12. Как проверяется значимость коэффициентов регрессии?
13. Для реплик какой дробности вводится обобщающий определяющий контраст?
14. Как с помощью ООК определить систему смешивания?
15. Какие причины могут вызвать неадекватность полученной модели?
16. Как осуществляется переход от уравнения регрессии с нормированными факторами к уравнению с реальным масштабом переменных?
17. Какие достоинства и недостатки у способа определения коэффициентов влияния по результатам планируемого эксперимента?
18. Как производится проверка однородности дисперсий опытов посредством критерия Бартлета.
19. К каким ошибкам при обработке результатов эксперимента приводит нарушение первого постулата регрессионного анализа.
20. Перечислите три постулата регрессионного анализа.

Практическое занятие №3.

Учет требований потребителя с помощью метода развертывания функции качества (QFD)

Цель работы: ознакомление с методом развертывания функции качества на основе выполнения задания по построению матрицы QFD.

3.1. Краткие теоретические сведения

Насыщение рынка товарами и услугами и как следствие усиление конкуренции среди производителей ставят перед ними задачу глубокого исследования запросов потребителей и воплощения их желаний в готовой продукции.

Усилия удовлетворить клиента пропадут зря, если информация о его предпочтениях останется без внимания и в изделие не будут введены действительно необходимые новшества. Решение этой маркетинговой задачи должно позволить поставщику выйти на соответствующий рынок с предложением, которое уже ожидает потребитель, и в результате получить значительное преимущество перед своими конкурентами.

В силу различных причин маркетинг в нашей стране развивается только в одном из своих аспектов – сбытовом, а службы маркетинга занимаются лишь вопросами сбыта уже произведенной продукции. Исследования же запросов потребителей по отношению к продукции, планируемой к выпуску (стратегический маркетинг), фактически не проводится, в результате техническое задание на проектирование новой продукции разрабатывается исходя не из потребностей и ожиданий будущих потребителей, а совсем по другим, подчас неясным или случайным соображениям. Это определяет необходимость внедрения механизма реализации запросов покупателей.

На сегодняшний день таким инструментом прямого воплощения требований потребителя в непосредственные характеристики новой (или модернизируемой старой) продукции является методология QFD (Quality Function Deployment – развертывания функции качества).

Метод QFD имеет другие названия и в некоторых работах можно встретить такие: метод структурирования функции качества [10], метод домов качества, синхронного инжиниринга [11].

Первая апробация методологии QFD произошла на судостроительных верфях японской фирмы Мицубиси, в 1972 году. Благодаря грандиозному успеху метод очень быстро распространился по всей Японии. Впоследствии метод получил широкое применение в автомобильной корпорации Тойота, а через 10 лет метод завоевывает и США, позиционируясь для стратегического маркетинга как революционный, так как до него предприятия в основном концентрировали все свои усилия на удовлетворении технических требований к продукции, совсем забывая о запросах потребителя.

Метод QFD основан на использовании матриц или так называемых «домов качества», учитывающих требования потребителей и параметры, от которых зависит качество продукта. Название происходит из-за сходства некоторых элементов с настоящим домом. Структура такой матрицы представлена на рис. 3.1 [4, 11, 12].

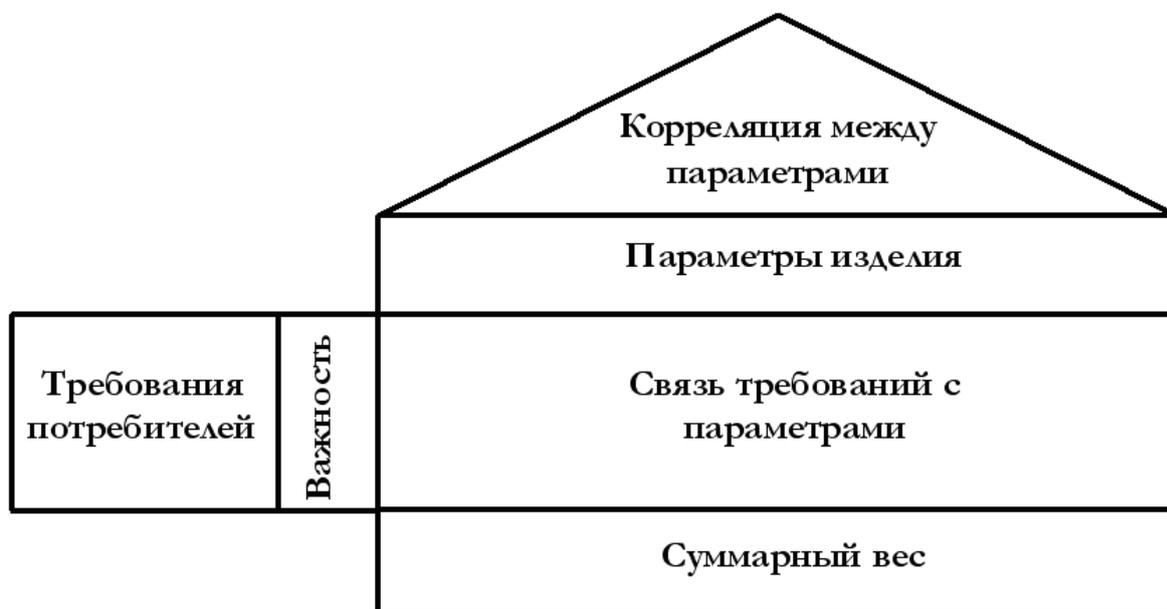


Рис. 3.1 – Структура дома качества

Опишем подробно, как формируются основные элементы "домов качества".

1. В левой части матрицы находится список требований потребителей, который составляется на основе анкетирования групп респондентов. Так как требования потребителей могут быть противоречивыми, специалисты фирмы-производителя должны решить: какие требования должны быть удовлетворены, а какие нет. К тому же потребитель часто формулирует свои требования в абстрактной форме (например, "экономичный ноутбук"), которые называют "голосом потребителя". Поэтому еще одной задачей является "перевод" запросов

потребителя из абстрактной формы в конкретную (низкая отпускная цена, оптимальная потребляемая мощность). Для формирования требований к будущей продукции необходимо ответить на два вопроса: что требует потребитель и как изделие будет им использоваться.

2. Важность или рейтинг показателя отражается по каждому параметру (обычно по десятибалльной шкале). Важность оценивается с помощью одного из методов:

- повторным опросом – каждый респондент оценивает важность каждого требования по десятибалльной шкале с усреднением результатов;

- процедурой парных сравнений – респондент оценивает все требования, разбитые на пары в процентах (до 100), а затем результаты по каждому требованию суммируются.

3. Затем формируется список параметров изделия, изменение которых позволит добиться удовлетворения требований заказчиков. То есть осуществляется перевод требований потребителя в общие характеристики изделия (параметры качества продукта). Специалистам необходимо ответить на вопрос "Как сделать?", или "Как воплотить?" в жизнь список пожеланий потребителя. Например, запрос потребителя "низкая отпускная цена" может быть достигнут за счет таких показателей качества, как быстродействие, надежность, срок службы и т.д. [4]. Но из-за многообразия связей параметров изделия со способами их удовлетворения, а также наличие взаимозависимых параметров и взаимоисключающих решений (уменьшить потребляемую мощность можно за счет снижения быстродействия компьютера) усложняет решение задачи этого этапа.

4. После этого, необходимо определить зависимости между требованиями потребителей и параметрами изделия в виде матрицы отношений. Обычно для этого используется балльная система, отражающая несколько степеней зависимости. Такие зависимости можно оценить с помощью:

- здравого смысла;
- мнения эксперта в данной области;
- наблюдений, практического опыта эксперта;
- проведения специальных исследований.

Степень корреляции между исследуемыми показателями обозначается в соответствии с методологией QFD в зависимости от веса в баллах: 9 баллов – сильная связь (обозначим "..."), 3 – средняя зависимость ("..") и 1 – слабая ("."). Она записывается в виде чисел или



Рис. 3.2 – Структура дома качества: начало

условных знаков в соответствующие пересечения строк и столбцов зависимых параметров (см. рис. 3.2).

5. Корреляция (зависимость) параметров изделия между собой отражается качественно в виде символов для того, чтобы специалисты различных направлений и уровня подготовки могли обработать и понять таблицу.

Значки для обозначения:

⊕ – положительной корреляции;

⊖ – отрицательной корреляции

проставляются в местах пересечения параметров изделия и формируют «крышу дома». Это наиболее трудоемкий и сложный этап (продолжительность может достигать 1,5 года, но так не стоит затягивать при выполнении данной работы).

6. Значение каждого параметра изделия может минимизироваться ("↓") или максимизироваться ("↑").

7. Абсолютный вес каждого параметра w_i вычисляется как:

$$w_i = A_j r_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где m – количество требований к будущему изделию, n – количество параметров, A_j – важность, r_{ij} – степень корреляции. Затем необходимо вычислить сумму абсолютных весов.

8. Относительный вес – это абсолютный вес, отнесенный к сумме всех абсолютных весов по всем параметрам изделия, выраженный в процентах.

9. Затем определяется параметр, который наиболее важен для потребителя. Как видно из приведенного на рис. 3.2 «дома качества» наиболее важным показателем для потребителя является параметр емкость аккумулятора 247 баллов или 30%.

10. Далее определяются технические и экономические трудности изменения параметров изделия в нужную сторону. Оценка выполняется экспертами и проставляется в нижней части «дома качества» или в его «подвале» обычно по пятибалльной шкале. Чем выше трудность изменения (улучшения) параметра, тем выше балл (см. рис. 3.3).

11. Для сравнения исследуемого продукта с продуктами-аналогами осуществляется оценка удовлетворения требованиям потребителей относительно конкурентов. Это так называемый *бенчмаркинг продукта*, но только не по техническим параметрам, а по степени удовлетворения потребностей потребителя.



Рис. 3.3 – Структура дома качества: окончательно

Цель бенчмаркинга – определить, имеет ли выпускаемое изделие параметры, которые наиболее важны для потребителя. При создании принципиально новой продукции или новой фирмы этот этап неприменим или применим частично. В качестве конкурента **А** может выступать фирма, рыночная доля которой немного больше, а в качестве конкурента **Б** – незначительно отстающая. Фирм-конкурентов может быть и больше, – важно, чтобы матрица не потеряла смысл. Эта часть таблицы заполняется данными по балльной шкале на основе опроса респондентов или с помощью экспертных оценок (на рис. 3.3 – по пятибалльной шкале с помощью экспертных оценок).

12. Затем определяются преимущества и недостатки проектируемого изделия, и определяется интегральный показатель важности. По показателю важности определяются наиболее важные параметры для повышения конкурентоспособности изделия.

13. Делаются выводы.

С помощью технологии QFD можно определить взаимосвязь, например, между: требованиями потребителя, техническими параметрами компонентов, операциями ТП, требованиями производства. Для этого строится серия "домов качества" [13-17].

Таким образом, метод QFD дает следующие преимущества [4]:

- устанавливаются связи между требованиями потребителей, техническими параметрами продукции, параметрами подсистем и компонентов;
- выделяются приоритетные ожидания потребителей и воплощаются в продукцию;
- создание базы данных для будущих разработок или усовершенствования ТП, которую можно использовать для удовлетворения будущих потребностей потребителей;
- повышается эффективность производства за счет целенаправленной работы в направлении конкурентных параметров качества продукции;
- происходит ориентация всех этапов жизненного цикла продукции на удовлетворение потребностей потребителей;
- обеспечивается более быстрое продвижение на рынок продукции с более высоким качеством, что дает дополнительную прибыль компании;
- повышается деловая культура и улучшается управление на всех этапах изготовления продукции.

Тем не менее, методологию QFD следует применять аккуратно, особенно в компаниях, недавно практикующих этот метод. Так, особо

следует обращать внимание на базовые характеристики и параметры изделия. Например, потребителя не так сильно будет интересовать технология изготовления товара, или внутренние процессы функционирования, а элементы дизайна окажутся важнее.

К тому же использование QFD сопряжено с большими затратами рабочего времени на обсуждение решаемых задач. Рекомендуется создание небольших групп, состоящих из представителей всех служб и отделов, вовлеченных, участвующих или заинтересованных в разработке нового товара (по 6...8 специалистов с одинаковым статусом).

Метод QFD является еще одной технологией, реализующей концепцию всеобщего менеджмента качества (TQM).

3.2. Порядок выполнения работы. Содержание отчета

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями.
2. Получить задание у преподавателя.
3. Определить требования (7...10) и параметры (6...12) к новому изделию заданного типа изделий.
4. Построить "дом качества" в виде таблицы, выбрав 2...3 товара-конкурента.
5. Определить достоинства и недостатки разрабатываемого изделия.
6. Сделать вывод о параметрах, дающих конкурентное преимущество разработке.

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- краткие теоретические сведения (исключая примеры);
- сводную матрицу качества с необходимыми пояснениями хода построения;
- выводы по работе.

3.3. Контрольные вопросы

1. Для каких целей используется метод QFD?
2. Перечислите достоинства и недостатки метода QFD?
3. Сколько конкурентных преимуществ проектируемого изделия можно определить?

4. Что такое корреляция? Положительная и отрицательная корреляция?
5. Можно ли использовать другое определение степени корреляции (не такое, как приведено в примере)?
6. Для чего строится несколько "домов качества"?
7. Почему нежелательно использовать множество конкурентов при оценке параметров?
8. Какой этап методологии QFD наиболее трудоемкий? Почему?
9. Что такое бенчмаркинг продукта? Для чего он определяется?
10. Можно ли включать в матрицу QFD параметры и требования, у которых отсутствует корреляция?

Литература

1. Стехин А.П. Основы конструирования, моделирования и проектирования систем управления производственными процессами: Учеб. пособие. – Донецк: ДонГАУ, 2008. – 160с.
2. Лукас В.А. Основы теории автоматического управления. – М.: "Недра", 1990. – 416 с.
3. Основы теории оптимального управления: Учеб. Пособие для эконом. вузов/ В.Ф. Кротов, Б.А. Лагоша, С.М. Лобанов и др.; Под ред.В.Ф. Кротова.– М.: Высш. Шк., 2008. – 431с.
4. И.Б. Бондаренко, Н.Ю. Иванова, В.В. Сухостат Управление качеством электронных средств. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. – 211 с.
5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. "Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий", М., "Наука", 1976. – 280с.
6. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
7. Зимин С.П., Горьков Г.Н., Григорьева Е.Ю., Букин А.С. Лабораторный практикум и сборник задач по дисциплине "Оптимизация технологических процессов". Учебное пособие. – Иваново: ИГТА, 2002. – 80 с.
8. Букаев П.Т. Оптимизация процесса ткачества на бесчелночных станках. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 176 с.
9. Гармаева И.А., Власова О.А., Лыгденов Б.Д. Поиск оптимальных условий химико-термической обработки стали 55Л и вывод математической модели//Ползуновский альманах №1-2, 2007. стр. 38-44.
10. Адлер Ю.П. Качество и рынок, или Как организация настраивается на обеспечение требований потребителей. – Поставщик и потребитель. – М.: РИА "Стандарты и качество", 2000. – 128 с.
11. Пустов Л.Ю. Метод развертывания функций качества (QFD - Quality Function Deployment) (<http://worldquality.ru/>)
12. Норман И. Моррел Структурирование функции качества: принуждение к управлению качеством (<http://www.markus.spb.ru/kase/qfd5.shtml>).
13. Всеобщее управление качеством: Учебник для Вузов/О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин: под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 600 с.

14. Е. Маркушина. Структурирование Функции Качества (QFD) / Е. Маркушина//электронный. журнал "Управление изменениями в компании". <http://www.ncspearson.com/research-notes/97-11.htm>.

15. Структурирование функции качества (QFD) <http://www.standard.ru/iso9000/iso9000-txt15.html>.

16. Михайлова Е.А Основы бенчмаркинга: использование методов бенчмаркинга и TQM в сфере творческого труда/ Михайлова Е.А //Менеджмент в России и за рубежом – 2001 – №6.

17. Ю.В. Брагин. Путь QFD: проектирование и производство продукции исходя из ожиданий потребителей / Брагин Ю.В., Корольков В.Ф. Изд. ННОУ, 2003 – 240с.

Приложение I.

Фрагмент таблицы случайных чисел

56 66 26 32 38 64 70 26 27 67 77 40 04 34 63 98
88 40 52 02 29 82 69 34 50 21 74 00 91 27 52 98
87 63 82 23 62 51 07 69 59 02 89 49 14 98 53 41
32 26 21 15 08 88 34 57 57 35 22 03 33 48 84 37
44 61 88 23 18 01 59 47 64 04 99 59 96 20 30 87
94 44 08 67 79 41 61 41 15 60 11 88 83 24 82 24
13 24 40 09 00 65 40 38 61 12 90 62 41 11 59 85
78 27 84 08 99 85 76 67 80 05 57 05 71 70 21 31
42 39 30 02 34 99 46 65 45 16 19 74 15 35 17 44
04 52 43 96 38 13 83 80 72 34 20 84 56 19 49 59
82 85 77 30 16 69 32 46 46 30 84 20 68 72 98 94
38 48 54 88 24 55 46 60 06 90 08 83 83 98 40 48
91 19 05 68 22 68 04 63 21 16 23 38 28 43 32 98
54 81 87 21 31 40 46 17 62 63 99 71 14 12 64 51
65 43 75 12 91 20 36 25 57 92 33 65 95 48 75 00
49 98 71 31 80 59 57 32 07 85 06 64 75 27 29 43
03 98 68 83 38 71 87 32 14 99 42 10 25 37 30 08
56 04 21 34 92 89 81 52 15 12 84 11 12 66 87 47
48 09 63 95 36 20 82 63 32 89 92 68 50 88 17 37
23 97 10 96 67 74 07 95 26 44 93 08 43 30 41 86
43 97 55 45 98 35 59 45 96 80 46 26 39 96 33 60
40 05 08 50 79 89 58 19 86 28 98 99 24 08 94 27
66 97 10 69 02 25 36 43 71 76 00 57 66 12 69 07
15 62 38 92 03 76 09 30 75 77 80 04 24 54 67 72

Приложение II.

Квантили распределения Стьюдента

Число степеней свободы k	Вероятность P									
	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,990	0,995	0,999	0,9995
1	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6
2	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,803	6,859
6	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,490	4,885	5,405
8	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,784	3,169	4,144	4,587
11	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	0,258	0,535	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,965
19	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767
24	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	0,255	0,529	0,851	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	0,255	0,528	0,849	1,298	1,676	2,002	2,403	2,678	3,262	3,495
60	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415
100	0,254	0,526	0,845	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389
200	0,254	0,525	0,843	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339
500	0,253	0,525	0,842	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,106	3,310
∞	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291
α_1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,998	0,999
$\beta_1, \%$	40	30	20	10	5	2,5	1	0,5	0,1	0,05
$\beta_2, \%$	80	60	40	20	10	5	2	1	0,2	0,1

Приложение III.

Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,05

k ₂	k ₁											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,40	19,41
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,94	5,91
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,57	2,53
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,46	2,42
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,38
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,24	2,20
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,22	2,18
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16
26	4,23	4,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,16	2,13
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,13	2,09

(k₁–число степеней свободы для выборки с большей дисперсией, k₂–число степеней свободы для выборки с меньшей дисперсией)

Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,05
(продолжение)

k ₂	k ₁											
	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	∞
1	245	246	248	249	250	251	252	253	253	254	254	254
2	19,42	19,43	19,44	19,45	19,46	19,47	19,48	19,48	19,49	19,49	19,50	19,50
3	8,71	8,69	8,66	8,64	8,62	8,59	8,58	8,57	8,55	8,54	8,53	8,53
4	5,87	5,84	5,80	5,77	5,75	5,72	5,70	5,68	5,66	5,65	5,64	5,63
5	4,64	4,60	4,56	4,53	4,50	4,46	4,44	4,42	4,41	4,39	4,37	4,36
6	3,96	3,92	3,87	3,84	3,81	3,77	3,75	3,72	3,71	3,69	3,68	3,67
7	3,53	3,49	3,44	3,41	3,38	3,34	3,32	3,29	3,27	3,25	3,24	3,23
8	3,24	3,20	3,15	3,12	3,08	3,05	3,02	3,00	2,97	2,95	2,94	2,93
9	3,03	2,99	2,93	2,90	2,86	2,83	2,80	2,77	2,76	2,73	2,72	2,71
10	2,86	2,83	2,77	2,74	2,70	2,66	2,64	2,61	2,59	2,56	2,55	2,54
11	2,74	2,70	2,65	2,61	2,57	2,53	2,51	2,47	2,46	2,43	2,42	2,40
12	2,64	2,60	2,54	2,51	2,47	2,43	2,40	2,36	2,35	2,32	2,31	2,30
13	2,55	2,51	2,46	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26	2,23	2,22	2,21
14	2,48	2,44	2,39	2,35	2,31	2,27	2,24	2,21	2,19	2,16	2,14	2,13
15	2,42	2,38	2,33	2,29	2,25	2,20	2,18	2,16	2,12	2,10	2,08	2,07
16	2,37	2,33	2,28	2,24	2,19	2,15	2,12	2,09	2,07	2,04	2,02	2,01
17	2,33	2,29	2,23	2,19	2,15	2,10	2,08	2,04	2,02	1,99	1,97	1,96
18	2,29	2,25	2,19	2,15	2,11	2,06	2,04	2,00	1,98	1,95	1,93	1,92
19	2,26	2,21	2,15	2,11	2,07	2,03	2,00	1,96	1,94	1,91	1,90	1,88
20	2,22	2,18	2,12	2,08	2,04	1,99	1,97	1,92	1,91	1,88	1,86	1,84
21	2,20	2,16	2,10	2,05	2,01	1,96	1,94	1,89	1,88	1,84	1,82	1,81
22	2,17	2,13	2,07	2,03	1,98	1,94	1,91	1,87	1,85	1,81	1,80	1,78
23	2,15	2,11	2,05	2,00	1,96	1,91	1,88	1,84	1,82	1,79	1,77	1,76
24	2,13	2,09	2,03	1,98	1,94	1,89	1,86	1,82	1,80	1,77	1,75	1,73
25	2,11	2,07	2,01	1,96	1,92	1,87	1,84	1,80	1,78	1,75	1,73	1,71
26	2,10	2,05	1,99	1,95	1,90	1,85	1,82	1,78	1,76	1,73	1,70	1,69
27	2,08	2,04	1,97	1,93	1,88	1,84	1,81	1,76	1,74	1,71	1,68	1,67
28	2,06	2,02	1,96	1,91	1,87	1,82	1,79	1,75	1,73	1,69	1,67	1,65
29	2,05	2,01	1,94	1,90	1,85	1,80	1,77	1,73	1,71	1,67	1,65	1,64
30	2,04	1,99	1,93	1,89	1,84	1,79	1,76	1,72	1,70	1,66	1,64	1,62

**Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,05
(продолжение)**

k_2	k_1											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
32	4,15	3,29	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14	2,10	2,07
34	4,13	3,28	2,88	2,65	2,49	2,38	2,29	2,23	2,17	2,12	2,08	2,05
36	4,11	3,26	2,87	2,63	2,48	2,36	2,28	2,21	2,15	2,11	2,07	2,03
38	4,10	3,24	2,85	2,62	2,46	2,35	2,26	2,19	2,14	2,09	2,05	2,02
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00
42	4,07	3,22	2,83	2,59	2,44	2,32	2,24	2,17	2,11	2,06	2,03	1,99
44	4,06	3,21	2,82	2,58	2,43	2,31	2,23	2,16	2,10	2,05	2,01	1,98
46	4,05	3,20	2,81	2,57	2,42	2,30	2,22	2,15	2,09	2,04	2,00	1,97
48	4,04	3,19	2,80	2,57	2,41	2,30	2,21	2,14	2,08	2,03	1,99	1,96
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03	1,99	1,95
55	4,02	3,16	2,78	2,54	2,38	2,27	2,18	2,11	2,06	2,01	1,97	1,93
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92
65	3,99	3,14	2,75	2,51	2,36	2,24	2,15	2,08	2,03	1,98	1,94	1,90
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,23	2,14	2,07	2,02	1,97	1,93	1,89
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95	1,91	1,88
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93	1,89	1,85
125	3,92	3,07	2,68	2,44	2,29	2,17	2,08	2,01	1,96	1,91	1,87	1,83
150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,07	2,00	1,94	1,89	1,85	1,82
200	3,89	3,04	2,65	2,42	2,26	2,14	2,06	1,98	1,93	1,88	1,84	1,80
400	3,86	3,02	2,62	2,39	2,23	2,12	2,03	1,96	1,90	1,85	1,81	1,78
10^3	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,11	2,02	1,95	1,89	1,84	1,80	1,76
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75

**Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,05
(продолжение)**

k ₂	k ₁											
	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	∞
32	2,01	1,97	1,91	1,86	1,82	1,77	1,74	1,69	1,67	1,63	1,61	1,59
34	1,99	1,95	1,89	1,84	1,80	1,75	1,71	1,67	1,65	1,61	1,59	1,57
36	1,98	1,93	1,87	1,82	1,78	1,73	1,69	1,65	1,62	1,59	1,56	1,55
38	1,96	1,92	1,85	1,81	1,76	1,71	1,68	1,63	1,61	1,57	1,54	1,53
40	1,95	1,90	1,84	1,79	1,74	1,69	1,66	1,61	1,59	1,55	1,53	1,51
42	1,93	1,89	1,83	1,78	1,73	1,68	1,65	1,60	1,57	1,53	1,51	1,49
44	1,92	1,88	1,81	1,77	1,72	1,67	1,63	1,58	1,56	1,52	1,49	1,48
46	1,91	1,87	1,80	1,76	1,71	1,65	1,62	1,57	1,55	1,51	1,48	1,46
48	1,90	1,86	1,79	1,75	1,70	1,64	1,61	1,56	1,54	1,49	1,47	1,45
50	1,89	1,85	1,78	1,74	1,69	1,63	1,60	1,55	1,52	1,48	1,46	1,44
55	1,88	1,83	1,76	1,72	1,67	1,61	1,58	1,52	1,50	1,46	1,43	1,41
60	1,86	1,82	1,75	1,70	1,65	1,59	1,56	1,50	1,48	1,44	1,41	1,39
65	1,85	1,80	1,73	1,69	1,63	1,58	1,54	1,49	1,46	1,42	1,39	1,37
70	1,84	1,79	1,72	1,67	1,62	1,57	1,53	1,47	1,45	1,40	1,37	1,35
80	1,82	1,77	1,70	1,65	1,60	1,54	1,51	1,45	1,43	1,38	1,35	1,32
100	1,79	1,75	1,68	1,63	1,57	1,52	1,48	1,42	1,39	1,34	1,31	1,28
125	1,77	1,72	1,65	1,60	1,55	1,49	1,45	1,39	1,36	1,31	1,27	1,25
150	1,76	1,71	1,64	1,59	1,53	1,48	1,44	1,37	1,34	1,29	1,25	1,22
200	1,74	1,69	1,62	1,57	1,52	1,46	1,41	1,35	1,32	1,26	1,22	1,19
400	1,72	1,67	1,60	1,54	1,49	1,42	1,38	1,32	1,28	1,22	1,16	1,13
10 ³	1,70	1,65	1,58	1,53	1,47	1,41	1,36	1,30	1,26	1,19	1,13	1,08
∞	1,69	1,64	1,57	1,52	1,46	1,39	1,35	1,28	1,24	1,17	1,11	1,00

Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,01

k ₂	k ₁											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6082	6106
2	98,50	99,00	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,37	99,39	99,40	99,41	99,42
3	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,91	27,67	27,49	27,34	27,23	27,13	27,05
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,45	14,37
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	10,16	10,05	9,96	9,89
6	13,74	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,79	7,72
7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	7,00	6,84	6,72	6,62	6,54	6,47
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,73	5,67
9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,18	5,11
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,77	4,71
11	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,68	4,54	4,46	4,40
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,22	4,16
13	9,07	6,70	5,74	5,21	4,86	4,62	4,44	4,30	4,19	4,10	4,02	3,96
14	8,86	6,51	5,56	5,04	4,70	4,46	4,28	4,14	4,03	3,94	3,86	3,80
15	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,78	3,67
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,62	3,55
17	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,52	3,46
18	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,43	3,37
19	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,36	3,30
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,29	3,23
21	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,64	3,51	3,40	3,31	3,24	3,17
22	7,95	5,72	4,82	4,81	3,99	3,76	3,59	3,45	3,35	3,26	3,18	3,12
23	7,88	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,54	3,41	3,30	3,21	3,14	3,07
24	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,26	3,17	3,09	3,03
25	7,77	5,57	4,68	4,18	3,86	3,63	3,46	3,32	3,22	3,13	3,06	2,99
26	7,72	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,42	3,29	3,18	3,09	3,02	2,96
27	7,68	5,49	4,60	4,11	3,78	3,56	3,39	3,26	3,15	3,06	2,99	2,83
28	7,64	5,45	4,57	4,07	3,76	3,53	3,36	3,23	3,12	3,03	2,96	2,90
29	7,60	5,42	4,54	4,04	3,73	3,50	3,33	3,20	3,09	3,00	2,93	2,87
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,90	2,84

Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,01
(продолжение)

k ₂	k ₁											
	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	∞
1	6143	6169	6209	6235	6261	6287	6302	6323	6334	6352	6361	6366
2	99,43	99,44	99,45	99,46	99,47	99,47	99,48	99,49	99,49	99,49	99,50	99,50
3	26,92	26,83	26,69	26,60	26,50	26,41	26,35	26,27	26,23	26,18	26,14	26,12
4	14,25	14,15	14,02	13,93	13,84	13,74	13,69	13,61	13,57	13,52	13,48	13,46
5	9,77	9,68	9,55	9,47	9,38	9,29	9,24	9,17	9,13	9,08	9,04	9,02
6	7,60	7,52	7,39	7,31	7,23	7,14	7,09	7,02	6,99	6,93	6,90	6,88
7	6,36	6,27	6,16	6,07	5,99	5,91	5,86	5,78	5,75	5,70	5,67	5,65
8	5,56	5,48	5,36	5,28	5,20	5,12	5,07	5,00	4,96	4,91	4,88	4,86
9	5,00	4,92	4,81	4,73	4,65	4,57	4,52	4,45	4,42	4,36	4,33	4,31
10	4,60	4,52	4,41	4,33	4,25	4,17	4,12	4,05	4,01	3,96	3,93	3,91
11	4,29	4,21	4,10	4,02	3,94	3,86	3,81	3,74	3,71	3,66	3,62	3,60
12	4,05	3,97	3,86	3,78	3,70	3,62	3,57	3,49	3,47	3,41	3,38	3,36
13	3,86	3,78	3,66	3,59	3,51	3,43	3,38	3,30	3,27	3,22	3,19	3,17
14	3,70	3,62	3,51	3,43	3,35	3,27	3,22	3,14	3,11	3,06	3,03	3,00
15	3,56	3,49	3,37	3,29	3,21	3,13	3,08	3,00	2,98	2,92	2,89	2,87
16	3,45	3,37	3,26	3,18	3,10	3,02	2,97	2,86	2,86	2,81	2,78	2,75
17	3,35	3,27	3,16	3,08	3,00	2,92	2,87	2,79	2,76	2,71	2,68	2,65
18	3,27	3,19	3,08	3,00	2,92	2,84	2,78	2,71	2,68	2,62	2,59	2,57
19	3,19	3,12	3,00	2,92	2,84	2,76	2,71	2,63	2,60	2,55	2,51	2,49
20	3,13	3,05	2,94	2,86	2,78	2,69	2,64	2,56	2,54	2,48	2,44	2,42
21	3,07	2,99	2,88	2,80	2,72	2,64	2,58	2,51	2,48	2,42	2,38	2,36
22	3,02	2,94	2,83	2,75	2,67	2,58	2,53	2,46	2,42	2,36	2,33	2,31
23	2,97	2,89	2,78	2,70	2,62	2,54	2,48	2,41	2,37	2,32	2,28	2,26
24	2,93	2,85	2,74	2,66	2,58	2,49	2,44	2,36	2,33	2,27	2,24	2,21
25	2,89	2,81	2,70	2,62	2,54	2,45	2,40	2,32	2,29	2,23	2,19	2,17
26	2,86	2,78	2,66	2,58	2,50	2,42	2,36	2,28	2,25	2,19	2,16	2,13
27	2,82	2,75	2,63	2,55	2,47	2,38	2,33	2,25	2,22	2,16	2,12	2,10
28	2,80	2,71	2,60	2,52	2,44	2,35	2,30	2,22	2,19	2,13	2,09	2,06
29	2,77	2,69	2,57	2,49	2,41	2,33	2,27	2,19	2,16	2,10	2,06	2,03
30	2,74	2,66	2,55	2,47	2,38	2,30	2,25	2,16	2,13	2,07	2,03	2,01

Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,01
(продолжение)

k ₂	k ₁											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
32	7,50	5,34	4,46	3,97	3,65	3,43	3,25	3,13	3,02	2,93	2,86	2,80
34	7,44	5,29	4,42	3,93	3,61	3,39	3,22	3,09	2,98	2,89	2,82	2,76
36	7,40	5,25	4,38	3,89	3,57	3,35	3,18	3,05	2,95	2,86	2,79	2,72
38	7,35	5,21	4,34	3,86	3,54	3,32	3,15	3,02	2,91	2,82	2,75	2,69
40	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,89	2,80	2,73	2,66
42	7,28	5,15	4,29	3,80	3,49	3,27	3,10	2,97	2,86	2,78	2,70	2,64
44	7,25	5,12	4,26	3,78	3,47	3,24	3,08	2,95	2,84	2,75	2,68	2,62
46	7,22	5,10	4,24	3,76	3,44	3,22	3,06	2,93	2,82	2,73	2,66	2,60
48	7,20	5,08	4,22	3,74	3,43	3,20	3,04	2,91	2,80	2,72	2,64	2,58
50	7,17	5,06	4,20	3,72	3,41	3,19	3,02	2,89	2,79	2,70	2,63	2,56
55	7,12	5,01	4,16	3,68	3,37	3,15	2,98	2,85	2,75	2,66	2,59	2,53
60	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,56	2,50
65	7,04	4,95	4,10	3,62	3,31	3,09	2,93	2,80	2,69	2,61	2,53	2,47
70	7,01	4,92	4,08	3,60	3,29	3,07	2,91	2,78	2,67	2,59	2,51	2,45
80	6,96	4,88	4,04	3,56	3,26	3,04	2,87	2,74	2,64	2,55	2,48	2,42
100	6,90	4,82	3,98	3,51	3,21	2,99	2,82	2,69	2,59	2,50	2,43	2,37
125	6,84	4,78	3,94	3,47	3,17	2,95	2,79	2,66	2,55	2,50	2,40	2,33
150	6,81	4,75	3,92	3,45	3,14	2,92	2,76	2,63	2,53	2,44	2,37	2,31
200	6,76	4,71	3,88	3,41	3,11	2,89	2,73	2,60	2,50	2,41	2,34	2,27
400	6,70	4,66	3,83	3,36	3,06	2,85	2,69	2,55	2,46	2,37	2,29	2,23
10 ³	6,66	4,63	3,80	3,34	3,04	2,82	2,66	2,53	2,43	2,34	2,27	2,20
∞	6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,80	2,64	2,51	2,41	2,32	2,25	2,18

Таблица значений критерия Фишера для уровня значимости 0,01
(продолжение)

k ₂	k ₁											
	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	∞
32	2,70	2,62	2,50	2,42	2,34	2,25	2,20	2,12	2,08	2,02	1,98	1,96
34	2,66	2,58	2,46	2,38	2,30	2,21	2,16	2,08	2,04	1,98	1,94	1,91
36	2,62	2,54	2,43	2,35	2,26	2,17	2,12	2,04	2,00	1,94	1,90	1,87
38	2,59	2,51	2,40	2,32	2,23	2,14	2,09	2,00	1,97	1,90	1,86	1,84
40	2,56	2,48	2,37	2,29	2,20	2,11	2,06	1,97	1,94	1,87	1,83	1,80
42	2,54	2,46	2,34	2,26	2,18	2,09	2,03	1,94	1,91	1,85	1,80	1,78
44	2,52	2,44	2,32	2,24	2,15	2,06	2,01	1,92	1,89	1,82	1,78	1,75
46	2,50	2,42	2,30	2,22	2,13	2,04	1,99	1,90	1,86	1,80	1,75	1,73
48	2,48	2,40	2,28	2,20	2,12	2,08	1,97	1,88	1,84	1,78	1,73	1,70
50	2,46	2,38	2,26	2,18	2,10	2,00	1,95	1,86	1,82	1,76	1,71	1,68
55	2,43	2,34	2,23	2,15	2,06	1,96	1,91	1,82	1,78	1,71	1,67	1,64
60	2,39	2,31	2,20	2,12	2,03	1,94	1,88	1,79	1,75	1,68	1,63	1,60
65	2,37	2,29	2,18	2,09	2,00	1,90	1,85	1,76	1,72	1,65	1,60	1,56
70	2,35	2,27	2,15	2,07	1,98	1,88	1,83	1,74	1,70	1,62	1,57	1,53
80	2,31	2,23	2,12	2,03	1,94	1,85	1,79	1,70	1,66	1,58	1,53	1,49
100	2,26	2,19	2,06	1,98	1,89	1,79	1,73	1,64	1,60	1,52	1,47	1,43
125	2,23	2,15	2,03	1,94	1,85	1,75	1,69	1,59	1,55	1,47	1,41	1,37
150	2,20	2,12	2,00	1,91	1,83	1,72	1,66	1,56	1,52	1,43	1,38	1,33
200	2,17	2,09	1,97	1,88	1,79	1,69	1,63	1,53	1,48	1,39	1,33	1,28
400	2,12	2,04	1,92	1,84	1,74	1,64	1,57	1,47	1,42	1,32	1,24	1,19
10 ³	2,09	2,02	1,89	1,81	1,71	1,61	1,54	1,44	1,38	1,28	1,19	1,11
∞	2,08	2,00	1,88	1,79	1,70	1,59	1,52	1,41	1,36	1,25	1,15	1,00

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ

1945-1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленаведение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д.т.н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. – радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б.С. Мишин, доцент И.П. Захаров, доцент А.Н. Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А.Н. Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям – автоматизация конструирования ЭВА и технология микроэлектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д.т.н., проф. В.В. Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г.А. Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров-конструкторов-технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф. С.А. Арустамов, затем снова проф. Г.А. Петухов.

С **1997 ПКС** (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, дизайна и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

За время своего существования кафедра выпустила более 4500 специалистов, бакалавров и магистров в области информационной безопасности компьютерных систем и проектирования электронно-вычислительных средств.

С **2011 ПБКС** (кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем). Готовит бакалавров и магистров по направлениям 090900 "Информационная безопасность" и 211000 "Конструирование и технология электронных средств".

В 2009 и 2010 кафедра заняла второе, а в 2011 году – почетное первое место в конкурсе среди кафедр университета.

На кафедре защищено 70 кандидатских и 7 докторских диссертаций.

Бондаренко Игорь Борисович
Соловьев Денис Викторович
Евстропьев Сергей Константинович

**Методические указания
по выполнению практических работ по дисциплине
"Управление качеством электронных средств"**

В авторской редакции дизайн обложки И.Б. Бондаренко

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе