

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабуров Э.Ф. Основы научных исследований / Э.Ф. Бабуров. - К.: Наук, думка, 2000. -212 с.
2. Говорущенко Н.Я. Системотехника проектирования транспортных машин / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко. - Харьков: ХНАДУ, 2002. - 166 с.
3. Кузнецов Ю.Н. Теория технических систем / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив - Севастополь: СевНТУ, 2010. -252с.
4. Новоселов Ю. К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / Ю. К. Новоселов, А.В. Королев - Из-во Саратов, ун-та, 1987. - 60 с.
5. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація) / Б.О. Пальчевський. - Львів: Світ, 2001. - 232 с.
6. Силин С.С. Теория подобия в приложении к технологии машиностроения / С.С. Силин. - М: Высш. шк., 1989. - 106 с.
7. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов. - М.: Высш. шк., 2001. -342 с.
8. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка. - М.: Мир, 1987. - 208с.

Заказ № ____ от « ____ » ____200___. Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям
и самостоятельной работе студентов
по дисциплине «Теория технических систем»

для студентов направлений
6.050502 «Инженерная механика»,
6.050503 «Машиностроение»
и 6.070106 «Автомобильный транспорт»
всех форм обучения

Севастополь
2011



УДК 621.01

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе студентов по дисциплине «Теория технических систем» для студентов направлений 6.050502 «Инженерная механика», 6.050503 «Машиностроение» и 6.070106 «Автомобильный транспорт» всех форм обучения / Сост. **Ю.К. Новоселов, В.А. Буштрук, Ю.О. Стреляная** – Севастополь, СевНТУ, 2011. - 48 с.

Целью настоящих методических указаний является оказание помощи при выполнении практических занятий и контрольной работы по курсу «Теория технических систем» для студентов всех форм обучения.

Методические указания утверждены на заседании кафедры Технологии машиностроения 16 февраля 2011 г., протокол № 6.

Рецензент: Харченко А.О., кандидат техн. наук, доцент, декан факультета ТАМППТ.

Рекомендованы в качестве методических указаний учебно-методическим центром и научно-методическим советом СевНТУ.

Ответственный за выпуск: Братан С.М., д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой Технологии машиностроения.

Фреза, резец, сборный инструмент, ... , муфта, обработка плоской детали, втулки.

9.4. Содержание отчета

1. Краткие сведения по морфологическому анализу при синтезе технических систем.
2. Выполнить морфологический анализ.
3. Выводы по работе.

9.5. Контрольные вопросы

1. Возможные ситуации при синтезе систем.
2. Какие существуют направления решения синтеза?
3. Какие существуют этапы морфологического анализа?



$K=1.5$, если вариант X_i лучше варианта X_j , например $K=1.5$ для отношения $X_1 < X_2$ при сравнении X_2 с X_1 ;

$K=0.5$, если вариант X_i хуже варианта X_j , например $K=0.5$ для отношения $X_2 > X_3$;

$K=1.0$, если вариант X_i равноценен варианту X_j , например $K=1.0$ при $X_1 = X_1$.

По результатам сравнений построим матрицу смежности, таблица 8.

Таблица 9.2 - Матрица смежности вариантов.

Вариант	X_1	X_2	X_3	X_4	$\sum_{i=1}^4 K_i$	Относительный	Место варианта
X_1	1.0	0.5	0.5	0.5	2.5	0.156	4
X_2	1.5	1.0	1.5	1.5	5.5	0.344	1
X_3	1.5	0.5	1.0	1.5	4.5	0.281	2
X_4	1.5	0.5	0.5	1.0	3.5	0.219	3
					16.0		

Таким образом, для рассматриваемого примера лучшим вариантом по критерию минимального расхода материала является вариант(X_2): 1.4 – 2.2 – 3.3 – 4.3 – 5.4 – 6.2.

9.2. Порядок выполнения работы

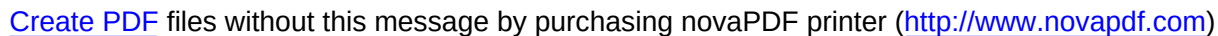
1. Получить задание у преподавателя;
2. Сформулировать задачу, отражающая основные требования к объекту;
3. Разделение объекта на функциональные элементы с составлением списка всех морфологических признаков и требований к ним, всех важных характеристик объекта, его параметров, от которых зависит решение проблемы и достижение основной цели;
4. Рассмотреть все элементы и выбрать для каждого различные варианты реализации, т.е. составить возможные варианты по каждой характеристике независимо от построения морфологической модели;
5. Выбрать наилучшие сочетания по заданному критерию.
6. Составить отчет о проделанной работе.

9.3. Индивидуальное задание

СОДЕРЖАНИЕ

1. Практическое занятие № 1 (2 часа)	
Научно-техническая информация и ее анализ.....	4
2. Практическое занятие № 2 (2 часа)	
Иерархическое описание технической системы.....	9
3. Практическое занятие № 3 (2 часа)	
Оценка погрешностей при моделировании систем.....	15
4. Практическое занятие № 4 (2 часа)	
Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов.....	19
5. Практическое занятие № 5 (2 часа)	
Многофакторное планирование экспериментов. Обработка экспериментальных данных.....	23
6. Практическое занятие № 6 (2 часа)	
Оптимизация маршрута обработки (перевозки груза) методом динамического программирования.....	29
7. Практическое занятие № 7 (2 часа)	
Оптимизация загрузки оборудования (транспортных средств) методом линейного программирования.....	34
8. Практическое занятие № 8 (2 часа)	
Моделирование технических систем с применением теории подобия.....	37
9. Практическое занятие № 9 (2 часа)	
Морфологический анализ при синтезе технических систем...	42
Библиографический список.....	48





1. Формулировка задачи, отражающая основные требования к объекту. Выясняют при этом, что должно быть усовершенствовано, доработано (способ или устройство);

2. Разделение объекта на функциональные элементы с составлением списка всех морфологических признаков и требований к ним, всех важных характеристик объекта, его параметров, от которых зависит решение проблемы и достижение основной цели;

3. Независимое рассмотрение всех элементов и выбор для каждого различных вариантов реализации, т. е. составление возможных вариантов по каждой характеристике независимо от построения морфологической модели;

4. Анализ решений, возникающих из матрицы, с оценкой ценности всех полученных вариантов, т. е. синтеза всех вариантов объекта;

5. Выбор наиболее рациональных вариантов конкретных решений, т. е. выбор лучших сочетаний по заданному критерию.

Рассмотрим пример последовательного решения задачи синтеза методом морфологического анализа.

Задача: изготовить двухступенчатую цилиндрическую, стальную деталь с минимальным расходом материала.

Технологический процесс изготовления детали разделим на три функциональные элемента: обрабатываемый объект (заготовка); обрабатывающая подсистема (инструмент); взаимодействие подсистем (рабочий процесс).

Рассмотрим все элементы процесса по признакам: заготовка (1 – вид; 2 – движение); рабочий процесс (3 – характер взаимодействия; 4 – состояние); режущий инструмент (5 – количество режущих кромок и тип; 6 – движение). Составим для всех перечисленных элементов и признаков морфологическую матрицу, таблица 9.1.

Таблица 9.1 - Морфологическая матрица.

Заготовка		Рабочий процесс		Режущий инструмент	
Вид	Движение	Характер взаимодействия	Состояние	Количество режущих кромок и вид	Движение
1.1 Круглый прут	2.1 Поступательное	3.1 Точечный	4.1 Холодное твердое	5.1 Один резец	6.1 Поступательное

Первичные документы могут быть публикуемые и непубликуемые. К публикуемым документам относятся различного рода издания.

Издание - произведение печати, прошедшее редакционно-издательскую обработку и предназначенное для передачи содержащейся в нем информации.

Характеристиками документальных источников информации являются полнота и достоверность данных, наличие теоретических обобщений, сроки их опубликования и возможность получения самих источников. Каждый из источников имеет свои достоинства и недостатки.

Публикуемые документы

Наиболее распространенными документальными источниками информации являются книги и брошюры. Книга представляет собой неперiodическое издание. Может издаваться однократно или многократно (переиздаваться). Вследствие значительного времени, необходимого для написания и издания книги, а также из-за помещения в ней ранее опубликованных материалов, к моменту выхода в свет информационная ценность книги снижается. Достоинством книги являются систематичность и полнота изложения, не присущие статьям периодических изданий. В виде книг издается научно-техническая, научно-популярная, техническая, учебная, справочно-энциклопедическая и официально-документальная литература.

К неперiodическим изданиям относятся монографии, сборники, материалы научных конференций, семинаров школ и т.д.

Монография представляет собой научный труд, опубликованный одним или несколькими авторами и посвященный специальному вопросу науки, разработанному с максимальной полнотой.

Сборник является изданием, составленным из отдельных работ разных авторов или одного автора, посвященных, как правило, одному направлению научных исследований.

Периодические издания представляют собой важные и сравнительно оперативные источники информации. Для специалистов любой отрасли науки и техники наибольший интерес представляют именно журналы. По сравнению с книгами они во много раз быстрее сообщают сведения о научно-технических достижениях.

Журналы по содержанию бывают научные, научно-популярные и производственные.

Продолжающиеся издания занимают промежуточное положение между книгами и журналами. Это сборники трудов научных



учреждений, вузов, публикуемые без строгой периодичности, бюллетени, ученые записки и т.п.

Специальные виды технических изданий также занимают важное место среди публикуемых источников научно-технической информации.

Патентно-лицензионные издания, относящиеся к рассматриваемым документам, включают описания изобретений к авторским свидетельствам и патентам, описания открытий, официальные патентные бюллетени. Сведения о выданных авторских свидетельствах и патентах публикуются в патентных бюллетенях.

По читательскому назначению непериодические научно-технические издания условно разделяются на 6 типов:

1. научная литература, предназначенная для высококвалифицированных специалистов (труды классиков науки; публикации научно-исследовательских учреждений, съездов, конгрессов; книги, отражающие содержание диссертаций);

2. научно-популярная литература;

3. производственно-техническая литература (описание различных технических устройств, способов производства и технологий);

4. учебные пособия (учебники для ВУЗов);

5. справочно-энциклопедическая литература (общие и отраслевые справочники, толковые и специальные словари);

6. официально-документальная литература (нормативные источники, сборники и отдельные издания стандартов, технических условий).

В научно-исследовательской работе невозможно обойтись без изучения патентной литературы. Научно-техническая информация, содержащаяся в патентно-лицензионных изданиях, представляет собой сведения обо всех достижениях человечества за последние 200 лет.

Нормативно-техническая документация по стандартизации

Стандарт - нормативный документ, разработанный, как правило, на основе отсутствия противоречий по существенным вопросам большинства заинтересованных сторон и утвержденный признанным органом, в котором установлены для общего и многократного использования правила, требования, общие принципы или характеристики, касающиеся разных видов деятельности или их результатов, для достижения оптимальной степени упорядочения в определенной области.

В национальной системе стандартизации существуют такие категории нормативной документации (НД):

- государственные стандарты Украины - ДСТУ;

Принята следующая последовательность синтеза технической системы: разработка принципа действия, принятие технического решения, оптимизация технического решения. При синтезе возможны две следующие ситуации: а) у проектируемой системы есть прототип; б) прототипа нет. При первой ситуации синтез системы начинается с анализа прототипа (рис. 9.1). После анализа прототипа следует синтез системы, после синтеза новый анализ. Процедура повторяется до получения требуемого результата. При отсутствии прототипа проектная работа начинается с синтеза, затем следует анализ. При отсутствии прототипа, процесс проектирования является более трудоемким, но часто приводит к пионерским решениям.

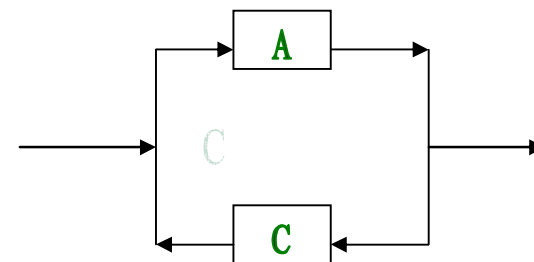


Рисунок 9.1 - Последовательность анализа *A* и синтеза *C* технической системы, варианта.

Как для первой, так и для второй ситуации выделяются три направления решения задачи синтеза:

1. Традиционный метод
2. Неполного перебора возможных вариантов.
3. Полный перебор возможных вариантов конструкции системы.

При первом направлении проектировщик выбирает решение из трех, четырех вариантов, что позволяет значительно сократить трудоемкость проектных работ и их сроки. Однако оптимальный вариант системы может оказаться за пределами области анализа. Третье направление осуществимо только при наличии четких критериев оценки вариантов конструкций изделия и использовании вычислительной техники. При реализации второго и третьего направления наиболее применим морфологический анализ проектируемой системы.

При морфологическом анализе выделяют 5 последовательных этапов:



Каждый студент выполняет индивидуальное задание, выбрав вариант по таблице 8.2.

Таблица 8.2 - Индивидуальное задание

№ варианта	Автомобиль, принимаемый за модель	Автомобиль, параметры которого надо определить
1	УАЗ-31512	ГАЗ-2705
2	ВАЗ-2110	ГАЗ-2705
3	ВАЗ-2110	ВАЗ-2111
4	МАЗ-5336	МАЗ-5551
5	ВАЗ-2111	ГАЗ-2705
6	МАЗ-525	МАЗ-530
7	МАЗ-5336	МАЗ-525
8	МАЗ-5336	МАЗ-530
9	МАЗ-5551	МАЗ-525
10	МАЗ-5551	МАЗ-530

8.4. Содержание отчета

1. Краткие сведения по теории подобия.
2. Коэффициенты подобия, определенные для двух автомобилей, обладающих динамическим подобием.
3. Выводы по работе.

8.5. Контрольные вопросы

1. Виды физического моделирования.
2. Математические зависимости, с помощью которых устанавливается связь между кинематическими и динамическими характеристиками систем.
3. Что необходимо учитывать при моделировании подобных систем?

9. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9 МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ СИНТЕЗЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель работы: приобретение навыков морфологического анализа при синтезе технических систем

9.1. Теоретический раздел

- отраслевые стандарты Украины - ГСТУ.
 - стандарты научно-технических и инженерных обществ и союзов Украины - СТТУ.
 - технические условия Украины - ТУ У;
 - стандарты предприятий.
- К государственным стандартам приравниваются:
- государственные строительные нормы и правила - ДБН.
 - государственные классификаторы технико-экономической и социальной информации - ДК.

Государственные стандарты издаются в виде отдельных брошюр, сборников, которые доступны широкому кругу потребителей информации.

Порядок разработки, утверждения и использования отраслевых стандартов, стандартов научно-технических и инженерных обществ и союзов устанавливается органом управления отрасли или соответствующим органом общества и союза. Эти стандарты подлежат государственной регистрации в Госстандарте Украины. К системе НД следует отнести также стандарты международных организаций и национальные стандарты ведущих стран:

- стандарты международных организаций ISO и IEC;
- публикации Международной организации законодательной метрологии (OIML);
- европейские стандарты (Е);
- национальные стандарты Великобритании (BS), Германии (DIN), Франции (NF) и др.

Промышленные каталоги содержат сведения об изделиях, серийно выпускаемых, рекомендованных к серийному производству, снимаемых с производства, а также сведения об изменениях параметров, технических и эксплуатационных характеристик.

К промышленным каталогам относятся: каталоги-справочники, номенклатурные справочники, отраслевые каталоги, листки - каталоги, пристендовые листки, инструкции по эксплуатации, паспорта на изделия и прейскуранты.

Патентная информация

Патентная информация - это любой вид информации, содержащийся в патентном документе. Патентный документ - официально публикуемый и непубликуемый документ, содержащий сведения о результатах научно-исследовательских, проектно-конструкторских, и других подобных работ заявленных или признанных объектами промышленной собственности (изобретениями,



полезными моделями, промышленными образцами), а также сведениями об охране прав изобретателей, патентовладельцев.

К источникам патентной документации относятся: патентные бюллетени патентных ведомств и описания к объектам промышленной собственности.

Опубликованные патентные документы в изданиях расположены по индексам международных классификаций

- патентной - МПК.
- «промышленных образцов - МКПО.
- товаров и услуг - МКТУ.

Международная патентная классификация (МПК)

МПК является средством для единообразного в Международном масштабе классифицирования патентных документов и представляет собой эффективный инструмент для патентных ведомств и других потребителей, осуществляющих поиск патентных документов с целью установления новизны и оценки вклада изобретателя в заявленное техническое решение (включая оценку технической прогрессивности и полезного результата или полезности). Важным назначением МПК, являются:

- служить инструментом для упорядоченного хранения патентных документов, что облегчает доступ к содержащейся в них технической и правовой информации;
- быть основой для избирательного распределения информации среди потребителей патентной информации;
- быть основой для определения уровня техники в отдельных областях;
- быть основой для получения статистических данных в области промышленной собственности, что в свою очередь позволит определять уровень развития различных отраслей техники.

1.2. Порядок выполнения работы

1. На основе анализа научно-технической информации привести примеры вторичных документов.
2. Подготовить отчет.

1.3. Содержание отчета

1. Краткие сведения о научно-технической информации.
2. Обзор состояния вопроса по теме, утвержденной преподавателем по публикациям последних лет изданий.

$$N'_c = \frac{N}{N_1}, \quad (8.14)$$

где N и N_1 - мощности автомобилей УАЗ-3741 и УАЗ-31512 соответственно, л.с.

Погрешность расчета согласно теории подобия и данных опыта составляет

$$\Delta N_c = N'_c - N_c. \quad (8.15)$$

Достаточная мощность двигателя для проектируемого автомобиля:

$$N = N_c N_1. \quad (8.16)$$

Таблица 8.1 - Сравнительная характеристика автомобилей

Модель автомобиля	Длина автомобиля, м	Полная масса, кг	Мощность, л.с.	Максимальная скорость, км/ч
УАЗ-31512	4,025	2350	55,9	110
УАЗ-3741	4,440	2720	61,8	120
ГАЗ-2705	5,500	3500	73,5	115
ВАЗ-2110	4,265	1010	53,0	165
ВАЗ-2111	4,285	1035	56,0	165
МАЗ-5336	8,620	16500	220,0	100
МАЗ-5551	5,990	17620	132,0	85
МАЗ-525	8,305	24380	300,0	80
МАЗ-530	10,555	38500	450,0	80

8.2. Порядок выполнения работы

1. Рассмотреть существование динамического подобия между станками, автомобилями.
2. Рассчитать коэффициенты подобия l_c , m_c , V_c , N_c , t_c .
3. Определить достаточную мощность двигателя для второго станка, автомобиля.

8.3. Индивидуальное задание



влияние которых незначительно; пользоваться усредненными значениями переменных величин.

О возможной погрешности моделирования часто можно судить по результатам исследования модели, выясняя значение различных параметров и критериев подобия для характеристики процесса.

Приняв автомобиль УАЗ-31512 в качестве модели, необходимо определить, в какой мере соблюдается динамическое подобие его с автомобилем УАЗ-3741. В этом случае

$$l_c = \frac{l}{l_1}, \quad (8.9)$$

где l – масса автомобилей УАЗ-3741 м; l_1 – длина автомобиля УАЗ-31512, м (таблица 8.1)

Отношение масс автомобилей

$$m_c = \frac{m}{m_1}, \quad (8.10)$$

где m и m_1 – масса автомобилей УАЗ-3741 и УАЗ-31512 соответственно, кг.

Отношение скоростей

$$V_c = \frac{V}{V_1}, \quad (8.11)$$

где V и V_1 – скорости автомобилей УАЗ-3741 и УАЗ-31512 соответственно, км/ч.

Отношение времен совершающихся процессов

$$t_c = \frac{t}{t_1}, \quad (8.12)$$

Отсюда выражение для мощности

$$N_c = \frac{m_c V_c^2}{t_c}. \quad (8.13)$$

По данным из таблицы 8.1 определяют отношение мощностей

3. Выводы по работе.

1.3. Контрольные вопросы

1. Каким образом классифицируется научно-техническая информация?
2. Что относится к первичным документам?
3. Какие существуют категории нормативной документации в системе стандартизации?
4. Назначение Международной патентной классификации.

2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2 ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цель занятия: выполнение декомпозиции системы с описанием связей подсистем со средой и друг с другом.

2.1. Теоретический раздел

Технические системы (ТС), как правило, имеют сложную, иерархическую структуру. Каждая из систем может расчленяться на отдельные подсистемы, которые в свою очередь могут рассматриваться как совокупность отдельных подсистем и элементов. Система может являться и подсистемой более крупной системы. Например, станок состоит из отдельных агрегатов и узлов (подсистем) и одновременно может рассматриваться в качестве подсистемы машиностроительного предприятия [2]. Технологическая операция часто рассматривается как подсистема технологического процесса.

Иерархическое описание выполняется как при анализе системы, так и при ее конструировании. Оно позволяет наиболее полно отразить процессы и явления, протекающие в системе, а при конструировании – определить служебное назначение каждого агрегата, узла и детали, сформулировать технические требования, предъявляемые к каждому элементу. Технологический процесс, например, не может быть спроектирован без его расчленения на отдельные технологические операции, а операции – без расчленения на отдельные позиции и переходы.

Процесс проектирования ТС является многоуровневым и многокритериальным [3]. Любая техническая задача имеет множество конкретных решений. В вопросах прогнозирования и создания новых



систем должен быть использован фреймовый подход, согласно которому цепочка поиска, разветвляющаяся в виде дерева альтернатив, рассматривается на нескольких уровнях.

Существуют следующие методы описания ТС [8]:

- *параметрическое* - описание свойств, признаков и отношений исследуемого объекта, основанное на эмпирических наблюдениях; простейшая форма и исходный уровень исследования автомобиля (станка) как ТС - основные технические характеристики (динамические, силовые, технологические, кинематические и т.д.) и показатели (мощность, расход топлива, габариты, производительность, точность, жесткость);

- *морфологическое* - переход к определению поэлементного состава, строения объекта и взаимосвязи параметров, выявленных на предыдущем уровне (источник энергии, двигатели, передаточно-преобразовательные и исполнительные механизмы, система управления);

- *функциональное* - переход к определению функциональной зависимости между параметрами (функционально-параметрическое описание, например, зависимость точности обработки от жесткости ТС), между элементами объекта (функционально-морфологическое описание, например, уравнение баланса кинематической цепи) или между параметрами и строением объекта;

- *поведение объекта* - выявление целостной картины «жизни» объекта и механизмов, обеспечивающих смену направлений и «режимов» его работы. Поведение описывается такими фундаментальными законами, как закон сохранения энергии, количества вещества, импульса силы и т.д.

Выявляемые в процессе решения технических задач противоречия разделяются на три типа: административные, технические и физические. Административные - присутствуют первоначально в изобретательской задаче. Технические - возникают между частями и параметрами системы при попытке их изменения: если известными способами улучшить одну часть (параметр), то недопустимо ухудшится другая часть (параметр). Физические - заключаются в предъявлении к одной и той же части системы взаимно-противоположных требований.

Анализ технической системы как иерархической структуры является основой и при ее математическом моделировании. Процедуру расчленения системы на подсистемы при этом принято называть декомпозицией. В основу декомпозиции не обязательно принимается ее конструктивные признаки. Так, например, процесс резания часто рассматривается как совокупность процессов пластических

$$a_c = \frac{l_c}{t_c^2}, \quad (8.5)$$

где a_c - отношение ускорений природы и модели.

Отношение работ природы и модели

$$A_c = \frac{m_c l_c^2}{t_c^3}, \quad (8.6)$$

где m_c - отношение масс природы и модели.

Отношение работ природы и модели

$$N_c = m_c \frac{l_c^2}{t_c^3}, \quad (8.7)$$

или

$$N_c = \frac{\sqrt{F_c^3}}{l_c \sqrt{\rho_c}}, \quad (8.8)$$

где F_c - отношение сил природы и модели; ρ_c - отношение коэффициентов использования природы и модели.

Если системы – две динамически подобные машины одинаковых размеров (или одна и та же машина, но в двух различных режимах), т. е. $\rho_c=1$, $l_c=1$, то $F_c=V_c^2$ - приложенные к соответствующим точкам машин силы относят так же, как квадраты скоростей точек машин. Отношение мощностей обеих машин в этом случае $N_c=F_c V_c=V_c^3$, так что, если скорость машины возросла вдвое, силы увеличатся в 4 раза, мощность в 8 раз.

При моделировании процесса или машины составляют критерии подобия, равенство которых обеспечивает подобие модели и природы. При решении конкретной задачи возникают трудности следующего характера:

1. Известны не все определяющие параметры данного явления;
2. Среди определяющих параметров можно выделить такие, влияние которых на процесс наиболее значительно и такие, влияние которых сравнительно невелико.

В таком случае при моделировании приходится использовать те параметры, которые известны; исключать из рассмотрения параметры,



Наиболее важными видами физического моделирования являются: натурное или макетное; экспериментальное.

При макетном моделировании изготавливают макет, который представляет собой физическую модель исследуемой ТС, или ее элементов (частей, узлов). Эта модель, как правило, реализует одну или несколько характеристик ТС или физического процесса, который протекает в ТС. Макет может быть наглядной объемной моделью ТС. Например, модель металлорежущего станка воспроизводит компоновку станка в масштабе, тепловая модель станины предназначена для анализа тепловых деформаций.

Экспериментальное моделирование заключается в отработке конструкции ТС на стенде, который имитирует основные узлы ТС и условия работы ТС. Уменьшение стоимости экспериментального стенда достигается за счет изготовления лишь тех узлов, работоспособность которых вызывает сомнение. Изменяя конструктивные элементы стенда, добиваются такого запаса работоспособности этих узлов, который может гарантировать необходимые характеристики проектируемой ТС.

При физическом моделировании значения определенной натуральной величины x_n получают из значения соответствующей величины на модели x_m делением на коэффициент подобия k_n :

$$x_n = x_m / k_n,$$

При наличии динамического подобия очень легко устанавливается связь между всеми кинематическими и динамическими характеристиками систем.

Так, для скоростей характерна связь

$$\frac{(V_x)_{ni}}{(V_x)_{mi}} = V_c = \frac{l_c}{t_c}, \quad (8.4)$$

где $(V_x)_{ni}$ - скорость натуре, км/ч; $(V_x)_{mi}$ - скорость модели, км/ч; l_c - отношение длин натуре и модели; t_c - отношение времен изменения динамических характеристик; V_c - отношение скоростей движения натуре и модели.

Для ускорений

деформаций, хрупкого разрушения, трения, температурного воздействия и т. д. [4].

При декомпозиции каждая подсистема расчленяется на подсистемы и элементы до уровня, соответствующего решению поставленной задачи. При этом для каждой из подсистем учитываются все ее связи с окружающей средой и другими подсистемами. Выделяются вектора входных переменных, управляющего воздействия, возмущающего воздействия, выходных переменных. Входные переменные обозначают вектором $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. К ним относят такие, которые поступают из среды на техническую систему и при работе системы в заданный промежуток времени остаются неизменными. Примерами входных переменных являются параметры настройки станка, которые не меняются при обработке одной детали. Для автомобильного транспорта к входным переменным могут быть отнесены: вид и масса перевозимого груза; качество бензина и других эксплуатационных материалов.

Управляющее воздействие принято обозначать вектором $U(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t))$. Оно представляет собой совокупность входных переменных, которые изменяют в процессе работы системы по заданному закону. К таким переменным, например, относят поперечную подачу при круглом наружном шлифовании, которую изменяют за период обработки одной поверхности. За счет такого изменения обеспечиваются высокое качество детали. Для автомобильного транспорта управляющее воздействие это - рулевое управление, газ, механизм переключения передач. Наличие вектора управления в значительной степени расширяет эксплуатационные свойства технической системы. Вектор $\Omega(t)$ объединяет неконтролируемые, случайно изменяющиеся переменные, поступающие из среды на систему, а также случайные отклонения от заданных значений составляющих векторов X и U . В среду от системы поступают выходные переменные, которые обозначают вектором

$Y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t))$. Состояние системы в любой момент времени характеризуют совокупностью параметров состояния $Z(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_r(t))$, которые могут изменяться в процессе работы системы. Приведем пример декомпозиции операции круглого наружного шлифования, рисунок 2.1.



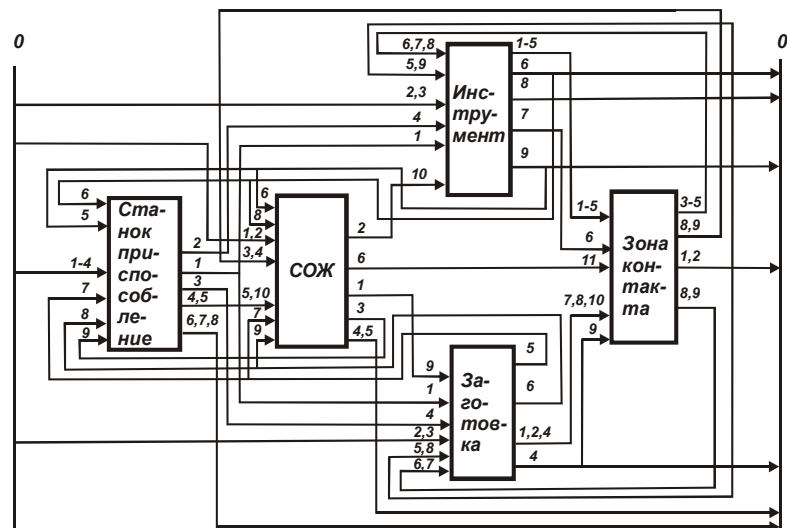


Рисунок 2.1 - Схема связей между подсистемами операции шлифования

По функциональным признакам операция разбита на подсистемы станка, приспособления, инструмента, заготовки, СОЖ. Кроме того выделена подсистема «зона контакта». Она представляет собой область взаимного проникновения абразивных зерен в обрабатываемый материал и выступов неровностей заготовки в промежутки между зернами. В зоне контакта протекают сложные процессы, не присущие по отдельности ни инструменту, ни заготовке. Каждая из выделенных подсистем имеет свой набор параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, вектор возмущающих воздействий. Управление процессом осуществляется подсистемой станка, в которую может быть включена и подсистема приспособления.

При рассмотрении сложной ТС, такой как автомобиль, существует несколько вариантов декомпозиции, в зависимости от решаемой задачи. Например, задача запуска двигателя автомобиля (традиционно решаемая при диагностировании). ТС «автомобильный двигатель» делим на следующие составляющие: система пуска, система зажигания, система питания, блок цилиндров. На втором уровне декомпозиции каждую подсистему разбиваем на составляющие, и т.д.

При выполнении системно-структурного анализа необходимо описание свойств подсистем, связей между ними, законов функционирования подсистем и системы в целом. Свойства подсистем

Каждый студент выполняет индивидуальное задание, выбрав вариант по таблице

Таблица 7.1 - Индивидуальное задание

№ варианта	n_1	n_2	n_3	C_1	C_2
1	4	7	10	4	7
2	7	5	9	8	6
3	5	6	9	5	8
4	6	5	8	8	5
5	5	7	9	6	8
6	7	4	8	7	4
7	4	5	8	5	3
8	6	7	10	8	5
9	8	5	10	9	6
10	8	7	12	9	8

7.4. Содержание отчета

1. Краткие сведения из теории линейного программирования.
2. Задание на оптимизацию загрузки оборудования.
3. Запись системы неравенств и функция оптимизации.
4. Графо-аналитическое решение задачи.
5. Выводы по работе.

7.5. Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность метода линейного программирования?
2. Принципы построения математической модели процесса?
3. Что необходимо учитывать при составлении целевой функции?

8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Цель занятия: ознакомление с основными положениями теории подобия, приобретение навыков практического применения моделирования технических систем.

8.1. Теоретический раздел



Так для прямой $x_1=10$ слева расположена область допустимых, справа - недопустимых значений переменной x_1 . Точки, лежащие на прямой, включаются в область допустимых значений. Совокупность прямых образуют многогранник возможных решений, многогранник ABCDE.

Для определения оптимальных значений переменных придадим критерию оптимизации некоторое значение, например $f^0=16$.

Подставим это значение в уравнение (7.4)

$$16 = 2x_1 + x_2. \quad (7.5)$$

Построим прямую, соответствующую полученному уравнению, на рис. 7.1. Будем увеличивать значение критерия эффективности, прямая, соответствующая функции (7.4) будет перемещаться параллельно самой себе и последний раз коснется многоугольника возможных решений в точке D. Эта точка и будет определять оптимальное решение: $x_1=10$; $x_2=4$.

7.2. Порядок выполнения работы

1. Получить задание от преподавателя.
2. Выполнить оптимизацию загрузки транспортных оборудования методом линейного программирования.

7.3. Индивидуальное задание

Имеется два вида станка - X_1 и X_2 . Суммарный доход, который получается при одновременной эксплуатации X_1 и X_2 составляет $J^0 = C_1 X_1 + C_2 X_2$.

В работе одновременно могут находиться не более n_1 станков типа X_1 и n_2 станков типа X_2 . Суммарное значение X_1 и X_2 не может быть взято более n_3 . Рассмотренные условия записываются в виде неравенств

$$\left. \begin{array}{l} X_1 \geq 0 \\ X_1 \leq n_1 \\ X_2 \geq 0 \\ X_2 \leq n_2 \\ X_1 + X_2 \leq n_3 \end{array} \right\}. \quad (7.6)$$

включают: временные, пространственные, пространственно-временные, физико-механические и химические характеристики. Входные и выходные переменные отражают связи (отношения) в системе и образуют ее структуру. Переход входных переменных к выходным осуществляется через параметры состояния подсистем.

Последовательный анализ свойств, связей, состояний, законов функционирования подсистем обеспечивает их полное пространственно-временное описание. Так, для подсистемы абразивного инструмента устанавливают:

1. Временные характеристики (календарь подсистемы): а) время работы инструмента до полного износа; б) стойкость инструмента между правками; в) время обработки заготовки; г) время прохода; д) время оборота заготовки; е) время оборота круга; ж) время прохождения зерном зоны контакта; з) бесконечно малый промежуток времени;

2. Входные переменные и начальные условия:

а) начальное пространственное положение; б) исходная геометрия рабочей поверхности инструмента, физико-механические свойства зерна и связки; в) начальная температура; г) движущие силы и моменты; д) силы и моменты реакций; е) скорость износа инструмента; ж) скорость изнашивания и разрушения режущих кромок; з) тепловой поток из зоны контакта; и) параметры, характеризующие влияние на инструмент СОЖ; к) скорости изменения количества, геометрии и свойств налипающих частичек материала.

3. Координаты (параметры) состояния:

а) координаты положения относительно системы; б) скорости и ускорения движения инструмента и режущих кромок; в) текущая температура; г) текущие размеры, форма инструмента, число, форма, распределение режущих кромок, пор; д) физико-механические и химические свойства материалов зерна и связки; е) количество, геометрия и свойство налипающих частичек материала.

4. Выходные переменные:

а) координаты положения относительно заготовки; б) скорости движения инструмента и режущих кромок; в) размеры, форма инструмента, число, форма, распределение режущих кромок; г) физико-механические и химические свойства материала зерна и связки; д) количество, геометрия и свойства налипающих частичек материала; е) параметры теплового потока в СОЖ, станок и среду.

Математическая модель системы при описании структуры записывается в виде функций переходов и выходов вида



$$Z(t) = F(X, U(t));$$

$$Y(t) = G(Z(t)).$$

Эти зависимости устанавливают для каждой из подсистем и системы в целом. С целью упрощения математической модели считается, что часть переменных оказывают несущественное влияние на процессы, протекающие в системе. Принимаются допущения. Например, при абразивной обработке часто считают, что рабочая поверхность инструмента однородна. При движении автомобиля - плотность воздуха постоянна. Каждое из принятых допущений должно быть строго обосновано, целесообразно также проводить анализ погрешности математической модели, вносимой допущением.

2.2. Порядок выполнения работы

1. Получить задание от преподавателя.
2. Для данной технической системы составить иерархическое описание.
3. Составить декомпозицию ТС.
4. Описать входные и выходные переменные ТС, параметры состояния подсистем.

2.3. Индивидуальное задание

Выполнить декомпозицию:

1. токарной обработки; фрезерования; плоского шлифования, растачивания отверстий; сверления; протягивания;
2. систем: дорога - колесо - подвеска автомобиля; цилиндр - поршневая группа - коленчатый вал; корпус - подвеска.
3. конструкций: торцовой фрезы, суппорта станка, задней бабки токарного станка, кузова легкового автомобиля, рамы грузового автомобиля, смазочной, охлаждающей систем автомобиля, рулевого управления, узла сцепления, трансмиссии, электрооборудования автомобиля.

2.4. Содержание отчета

1. Краткие сведения из теории иерархического описания систем.
2. Схема процесса обработки, чертеж (ксерокопия) конструкции узла или агрегата.

рого наименования за x_2 . В течении смены на станке можно обработать не более 10 деталей первого наименования, не более 10 деталей второго наименования и не более 14 деталей, если обрабатывать в течении смены и те и другие. Прибыль, получаемая от производства деталей, определяется из соотношения $f^o = 2x_1 + x_2$. Представим ограничения на производство деталей в виде системы неравенств:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &\leq 10 \\ x_2 &\leq 10 \\ x_1 + x_2 &\leq 14 \\ x_1 &\geq 0 \\ x_2 &\geq 0 \end{aligned} \right\}. \quad (7.3)$$

Функция оптимизации в соответствии с поставленной задачей имеет вид

$$f^o = 2x_1 + x_2. \quad (7.4)$$

В системе координат x_1, x_2 каждая прямая соответствующая неравенству при знаке равенства разделяет плоскость на две полуплоскости: полуплоскость допустимых и недопустимых значений переменных, рис. 7.1.

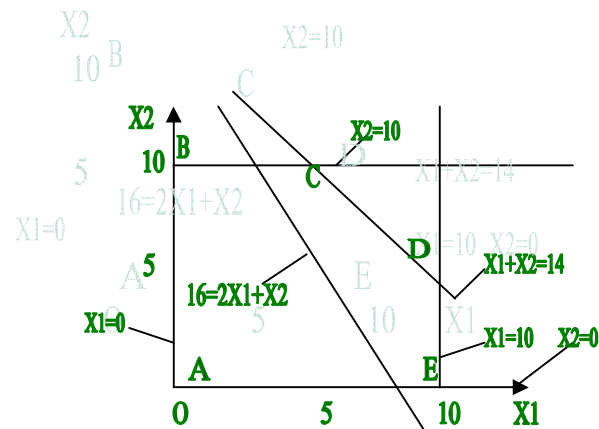


Рисунок 7.1 - Геометрическая интерпретация задачи линейного программирования.



7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ (ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ) МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Цель занятия: приобретение навыков оптимизации загрузки оборудования методом линейного программирования.

7.1. Теоретический раздел

Сущность метода линейного программирования заключается в том, что на основании известных закономерностей процесса с учетом технических ограничений составляется математическая модель процесса в виде системы неравенств. При обработке материалов резанием, например, учитываются ограничения обусловленные возможностями станка, режущего инструмента, требованиями обеспечения заданного качества детали. Кроме ограничений, принимается определенный критерий оптимизации, выражаемый в виде функции от переменных параметров. Система равенств и неравенств сводится к системе независимых линейных неравенств

[illegible]

Функция оптимизации (целевая функция, критерий эффективности) сводится также к линейному виду

$$f_0 = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \dots + C_n x_n. \quad (7.2)$$

Нахождение максимального или минимального значения функции (7.2) среди возможных решений системы (7.1) является общей задачей линейного программирования. Обычно задачи линейного программирования решаются на ЭВМ. Наибольшее применение нашли симплексный метод и метод обратных матриц. При 2-х и 3-х переменных задача может быть решена графо-аналитически [7]. Рассмотрим геометрическую интерпретацию задачи линейного программирования.

Допустим, что на станке обрабатывается два вида деталей. Обозначим число деталей первого наименования за x_1 , число деталей вто-

3. Схема декомпозиции системы.
4. Описание входных, выходных переменных, управляющих воздействий, параметров состояния подсистем.
5. Технические и физические противоречия для данной ТС.
6. Запись в общем виде функций переходов и выходов
7. Выводы по работе.

2.5. Контрольные вопросы

1. Что такое система?
2. В чем заключается системный подход?
3. В каких случаях необходимо выполнять иерархическое описание систем?
4. Методы описания ТС.
5. В чем заключается декомпозиция системы?
6. Какие переменные и параметры учитываются при декомпозиции?
7. Что такое функции переходов и выходов?

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ

Цель занятия: выполнение оценки погрешностей, возникающих при моделировании системы.

3.1. Теоретический раздел

Функциональное описание ТС необходимо для дальнейшего управления системой, предсказания ее поведения, прогнозирования времени необходимого ремонта и обслуживания.

Существует два пути функционального описания:

- математическое описание ТС на основе известных законов статики и динамики, законов сохранения энергии. Такому моделированию поддаются простые ТС, не отягощенные большим количеством связей, возмущающих воздействий и входных переменных. Применение такого моделирования к многоуровневым ТС приводит к возникновению погрешностей в расчетах, ввиду невозможности учесть все возмущения;

- эмпирическое моделирование на основе результатов экспериментальных данных [5]. Такие модели более точно описывают



поведение ТС, но имеют узкую область использования (в условиях проведения эксперимента). Для получения зависимостей эмпирическим путем используют теорию планирования эксперимента.

При выполнении модели выбирают из справочной литературы. Для каждой модели устанавливают функции переходов и функции выходов, управления изменений фазовых координат объекта, определяют входные переменные, параметры состояния системы, выходные переменные. Делают вывод о возможности использования этих моделей в целях оптимизации операций и оптимального управления [7].

Погрешности измерений.

Погрешности прямых и косвенных измерений оценивают для различных операций.

Одним из важнейших этапов подготовки экспериментальных исследований являются этапы оценки точности измерения всех входных и выходных переменных. Только при наличии данных о погрешностях измерения параметров можно говорить о достоверности экспериментальных данных и делать оценку тех или иных направлений совершенствования технологических процессов и отдельных операций. Например, при исследовании процессов резания возникают задачи оценки точности поверхности, размеров заготовки, размеров обработанной детали. При исследовании процессов движения: точности измерения скорости, точности установки углов развала, схождения, балансировки колёс. Часть из этих параметров измеряют стандартными приборами, другую часть - специально создаваемыми установками. Точность измерения на этих установках заранее неизвестна.

Погрешности, возникающие при оценке параметров технологического процесса и параметров изделия, могут быть прямыми и косвенными. К первым относятся погрешности, которые появляются при непосредственном измерении исследуемого параметра. При их анализе различают три основных типа ошибок:

1. *систематические*, величина которых одинакова при всех измерениях, проводящихся одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов;

2. *случайные*, величина которых различна даже для измерений, выполненных одинаковым способом. Случайные ошибки обязаны своим происхождением ряду причин, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено;

3. *промахи*, источником которых является недостаток внимания экспериментатора. Для устранения промахов нужно соблюдать аккуратность при проведении эксперимента и при записях результатов.

Таблица 6.1 – Варианты заданий для расчета оптимального маршрута

Маршруты			№ Варианта									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A-1	6-9	8-12	18	21	16	18	11	10	20	25	24	18
A-2	5-11	15-B	16	13	11	16	27	22	12	11	14	31
A-3	6-10	9-13	19	16	14	31	22	32	29	14	31	16
A-4	5-10	14-B	17	11	16	18	10	20	18	22	25	13
1-5	6-11	9-14	35	11	13	14	21	-	12	16	21	27
1-6	5-9	13-B	24	23	11	19	16	14	31	22	29	18
2-5	7-10	10-13	17	-	16	14	31	22	-	32	14	-
2-6	4-8	12-15	-	18	21	-	16	11	25	20	18	31
2-7	7-11	10-14	13	35	-	11	21	16	12	18	11	16
3-6	4-7	11-15	17	11	16	18	-	10	20	-	18	30
3-7	8-11	11-14	21	13	31	22	16	19	18	32	14	19
3-8	7-12	10-15	16	27	12	28	31	15	24	18	20	32

6.4. Содержание отчета

1. Краткие сведения из теории оптимального управления и методе динамического программирования.
2. Граф маршрута обработки детали (перевозки груза) с указанием стоимости отдельных этапов.
3. Расчет оптимального маршрута.
4. Выводы по работе.

6.5. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте задачу оптимального управления.
2. Что принимается за критерий оптимизации в технических системах?
3. В чем заключается сущность динамического программирования?
4. Что такое рекуррентное соотношение?
5. Какие задачи решаются методом динамического программирования?



При выполнении работы над каждой стрелкой необходимо проставить себестоимость выполнения операции (стоимость перевозки груза).

Оптимальный маршрут определяется по рекуррентному соотношению

$$\omega_{j-1}(Y) = \max_{U \in U(Z)} [f_j^0(Y, U) + \omega_j(Y, U)], \quad j=1, 2, \dots, N, \quad (6.10)$$

где ω_{j-1} и ω_j – максимальные значения критерия эффективности заключительной части процесса соответственно начиная с j -го этапов; $f_j^0(Y, U)$ – значение критерия эффективности j -го этапа.

Возможные маршруты обработки заготовок представлены графом.

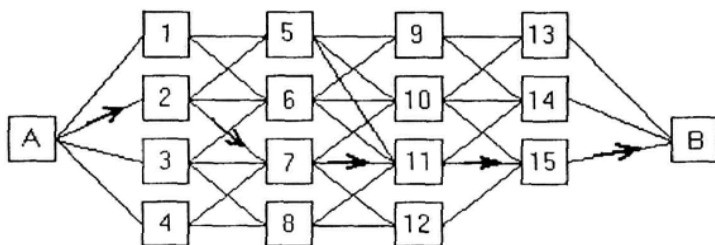


Рисунок 6.1 – Возможные маршруты обработки заготовок

Цифрами обозначены состояния заготовки после операций, стрелками – операции.

6.2. Порядок выполнения работы

Рассчитать оптимальный маршрут обработки заготовки из начального состояния A в конечное состояние B, обеспечивающий наименьшую себестоимость, методом динамического программирования.

6.3. Индивидуальное задание

Каждый студент выполняет индивидуальное задание, выбрав вариант по таблице 6.1. Стоимость обработки для вариантов приведена в таблице в гривнах.

Систематические погрешности устраняются при тщательной проверке, юстировке и аттестации измерительных средств.

Величина случайных погрешностей может быть уменьшена при снижении влияния на результат измерения возмущающих факторов. Другим путем повышения точности является многократное измерение исследуемого параметра. В связи с тем, что полностью устранить влияние случайных погрешностей весьма трудно, второй способ при проведении исследований находит широкое применение.

По результатам таких измерений вычисляют среднее арифметическое значение исследуемой величины $\bar{X}$ и среднюю квадратичную ошибку единичного результата S при n измерениях

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; \quad (3.1)$$

$$S = \frac{\sqrt{(X_i - \bar{X})^2}}{n-1}. \quad (3.2)$$

где $\bar{X}_i$ – результат i -го измерения; n – число измерений.

Средняя квадратичная погрешность среднего арифметического S_i , равна средней квадратичной погрешности отдельного результата S , деленной на корень квадратный из числа измерений n

$$S_i = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (3.3)$$

Если известна средняя квадратичная ошибка, с которой необходимо получить результат, и средняя квадратичная ошибка единичного результата, то зависимость (3.3) позволяет рассчитать число необходимых измерений.

В ряде случаев при выполнении технологических исследований измеряется не непосредственно интересующая величина, а другая, зависящая от нее тем или иным образом. Возникающая при таких вычислениях погрешность определения исследуемой величины, называется *погрешностью косвенных измерений*.

Расчетные зависимости для определения погрешности имеют вид:

4. при оценке влияния на точность результата точности измерения одного параметра



$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x; \quad (3.4)$$

где Δy - погрешность определения исследуемого параметра (функции);

5. при оценке погрешности результата, вызванной неточностью измерения нескольких аргументов

$$\Delta y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (3.5)$$

где Δx_i - погрешность определения i -го аргумента.

3.2. Порядок выполнения работы

1. Получить задание от преподавателя.
2. Рассчитать среднюю квадратичную погрешность единичного результата при известных единичных измерениях шероховатости поверхности R_a .
3. Подготовить отчет.

3.3. Индивидуальное задание

Каждый студент выполняет индивидуальное задание, выбрав вариант по таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Индивидуальное задание

№ варианта	Единичные измерения шероховатости R_a , мкм						
1	0,63	0,43	0,74	0,62	0,56	0,47	0,70
2	0,15	0,17	0,23	0,18	0,26	0,33	0,27
3	0,22	0,37	0,24	0,46	0,32	0,40	0,42
4	0,78	0,68	0,72	0,56	0,81	0,63	0,71
5	0,28	0,36	0,43	0,22	0,34	0,31	0,23
Продолжение таблицы 3.1							
6	0,86	0,92	0,99	0,78	0,95	0,93	0,80
7	0,16	0,12	0,22	0,18	0,13	0,25	0,17
8	0,96	0,77	1,03	0,86	0,75	1,0	0,99
9	0,55	0,61	0,73	0,76	0,68	0,78	0,63

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= f_1(Y(t-1), U(t)) \\ \dot{y}_2(t) &= f_2(Y(t-1), U(t)) \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{y}_n(t) &= f_n(Y(t-1), U(t)) \end{aligned} \right\}, \quad (6.4)$$

$$U(t) \in U(Y(t)), \quad (6.5)$$

$$J = f^0(Y(t), U(t)). \quad (6.6)$$

Для процесса, который не имеет управляющего воздействия, ставится задача определения оптимальных значений входных переменных. Зависимости математической модели будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= f_1(X) \\ y_2 &= f_2(X) \\ &\dots\dots\dots \\ y_n &= f_n(X) \end{aligned} \right\}, \quad (6.7)$$

$$X \in X_{\text{дон}}, \quad (6.8)$$

$$J = f^0(X). \quad (6.9)$$

Для таких процессов необходимо при известных начальных и конечных значениях фазовых координат объекта найти такие допустимые значения входных переменных, которые придают критерию эффективности максимальное (минимальное) значение.

Наиболее распространенным методом решения задач оптимального управления дискретными системами является метод динамического программирования. Для выбора оптимальных значений входных переменных применяют метод линейного программирования, метод геометрического программирования и другие.

Граф возможных комбинаций маршрута технологического процесса обработки заготовки (перевозки груза) представлен на рисунке 6.1. Квадратами обозначены состояния объекта (промежуточные пункты), стрелками – операции (дороги).



а) за период обработки параметры состояния объекта изменяются от начального $Y(0)$ до конечного $Y(N)$. Начальное и конечное состояния, как правило, не могут изменяться произвольно;

б) изменение параметров может происходить либо непрерывно, либо дискретно;

в) в текущий момент времени параметры объекта (фазовые координаты), как правило, отличаются от начальных и конечных;

г) скорость изменения параметров существенно зависят от входных переменных и законов изменения управляющих воздействий.

Закон изменения фазовых координат объекта для дискретной системы может быть записан в виде уравнений

$$\left. \begin{aligned} y_1(t) &= f_1(Y(t-1), U(t)) \\ y_2(t) &= f_2(Y(t-1), U(t)) \\ &\dots\dots\dots \\ y_n(t) &= f_n(Y(t-1), U(t)) \end{aligned} \right\}, \quad (6.1)$$

где t (иногда время) принимает дискретные значения $0, 1, 2, \dots, N$.

Для каждой точки фазового пространства имеется допустимая область управления $U(t)$, причем

$$U(t) \in U(Y(t-1)). \quad (6.2)$$

Для выбора оптимальной траектории имеется критерий эффективности, который зависит от текущих значений фазовых координат и принятого управления каждого этапа

$$J = f_1^0(Y(0), U(1)) + f_2^0(Y(1), U(2)) + \dots + f_N^0(Y(N-1), U(N)), \quad (6.3)$$

где $f_1^0(Y(0), U(1))$ - значение критерия эффективности первого этапа, определяемого по состоянию объекта предшествующего этапа и принятому управлению.

Общая задача оптимального управления может быть сформулирована следующим образом: зная начальное и конечное состояния объекта (6.1) найти такое допустимое управление (6.2), которое придает функционалу (6.3) максимальное (минимальное) значение.

Для непрерывных процессов зависимости (6.1) - (6.3) принимают вид

10	1,05	0,78	0,95	1,02	0,81	0,98	0,77
----	------	------	------	------	------	------	------

3.4. Содержание отчета

- 1) Краткие сведения по оценке погрешностей при моделировании.
- 2) Математические зависимости по определению погрешностей измерений.
- 3) Выводы по работе.

3.5. Контрольные вопросы

- 1) Какие существуют способы описания систем?
- 2) Какие существуют виды погрешностей измерения?
- 3) Как выполняется анализ систематических погрешностей?
- 4) Как определяется средняя квадратичная погрешность?
- 5) Как вычисляются погрешности косвенных измерений?

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Цель занятия: приобретение навыков практического применения метода наименьших квадратов при обработке экспериментальных и статистических данных.

4.1. Теоретический раздел

При описании поведения системы изучают влияние входных переменных и законов изменения управляющих воздействий на выходные переменные. Внутренняя структура и процессы, протекающие в системе, при этом не рассматриваются, она представляется в виде черного ящика.

Описание поведения системы возможно следующими способами:

1. За счёт наблюдения за работой системы, накопления опыта её эксплуатации, создания неформализованных моделей.
2. Наблюдением за работой системы с регистрацией входных и выходных переменных и последующей обработкой статистических данных.
3. Постановкой специальных экспериментов, при проведении которых изменяют входные переменные, управляющие воздействия и



регистрируют выходные переменные. Результаты обрабатывают и представляют в виде таблиц, графиков, зависимостей.

Наиболее информативным является третий подход, конечным результатом которого является получение по экспериментальным данным математической модели процесса вида

$$Y(t) = f(X; U(t)), \quad (4.1)$$

где X - вектор входных переменных;

$U(t)$ - вектор управляющих воздействий;

$Y(t)$ - вектор выходных переменных.

Для представления результатов экспериментов в виде зависимости подбирается вид уравнения. Наиболее часто с целью аппроксимации экспериментальных данных применяют линейные и логарифмические зависимости

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2, \quad (4.2)$$

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2}. \quad (4.3)$$

Уравнение (4.3) приводится к линейному виду (4.2) логарифмированием:

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x_1 + a_2 \ln x_2.$$

При обработке экспериментальных данных методами математической статистики в зависимости (4.2) известны для каждого i -го опыта y_i , x_{1i} и x_{2i} необходимо определить коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 . Задача решается методом наименьших квадратов. При определении коэффициентов уравнения (4.2) методом наименьших квадратов исходят из требования минимизации квадратов отклонений экспериментальных данных от расчетных [5]

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 = \min, \quad (4.4)$$

где $\hat{y}_i$ - расчетные значения выходной переменной, определяемые по уравнению (4.2) для i -го опыта. При подстановке y из уравнения (4.2) в уравнение (4.4) при одной входной переменной получим

5.3. Содержание отчета

1. Краткие сведения из теории многофакторного планирования экспериментов.
2. Данные задания на выполнение работы.
3. Математическая обработка экспериментальных данных.
4. Выводы по работе.

5.4 Контрольные вопросы

1. Какие методы планирования экспериментов используются при моделировании поведения системы?
2. С какой целью применяют методы многофакторного планирования экспериментов?
3. Чем отличаются полный и дробный факторные эксперименты?
4. С какой целью проводится анализ воспроизводимости экспериментальных данных?
5. С какой целью проводится проверка адекватности математической модели?

6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6 ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ (ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗА) МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Цель занятия: закрепление теоретического материала, приобретение навыков решения задач оптимального управления техническими системами.

6.1. Теоретический раздел

Системный подход позволяет не только исследовать поведение и структуру системы, но и определить наиболее рациональные условия ее эксплуатации.

Рассмотрим систему, имеющую вектора входных X , выходных $Y(t)$ переменных, управляющих $U(t)$ и возмущающих $\Omega(t)$ воздействий. Из векторов входных и выходных переменных выделим параметры объекта (состояние заготовки, состояние перевозимого груза). Отметим особенности изменения параметров состояния объекта:



$$y = 80 - 5X_1 - 2X_2, \quad (5.9)$$

5. Оценка адекватности линейной модели выполняется по критерию Фишера, для чего определяется дисперсия адекватности

$$S_A^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \bar{y}_j)^2}{N - k - 1}, \quad (5.10)$$

где k - число коэффициентов линейной модели не считая a_0 . Для примера

$$S_A^2 = \frac{1}{4 - 2 - 1} = 1.$$

Критерий Фишера по дисперсии адекватности вычисляют по уравнению

$$F = \frac{S_A^2}{S_y^2}. \quad (5.11)$$

Для примера $F = 1 / 0,39 = 2,6$. Табличное значение критерия равно 7,7.

Следовательно, полученная линейная модель адекватна реальному процессу.

При получении адекватной модели она записывается в явном виде подстановкой входных переменных из уравнения (5.2) в уравнение (5.1).

5.2. Порядок выполнения работы

1. Составить матрицу планирования и выполнить обработку экспериментальных данных при исследовании влияния режима резания на стойкость режущего инструмента и шероховатость поверхности.

2. Составить матрицу планирования и выполнить обработку экспериментальных данных при исследовании влияния пробега автомобиля от начала эксплуатации, массы перевозимого груза и скорости на расход топлива.

Данные для расчетов выдаются преподавателем.

$$\sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 = \min. \quad (4.5)$$

Для вычисления коэффициентов определим частные производные уравнения (4.5) по a_0 и a_1

$$\left. \begin{aligned} -2 \sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1 x_i) &= 0 \\ -2 \sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4.6)$$

После несложных преобразований окончательно получим систему двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N y_i - N a_0 - a_1 \sum_{i=1}^N x_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^N y_i x_i - a_0 \sum_{i=1}^N x_i - a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4.7)$$

При вычислениях в систему (4.7) подставляются экспериментальные значения переменных y_i и x_i , определяются значения коэффициентов a_0 и a_1 .

4.2. Порядок выполнения работы

1. Определить коэффициенты зависимостей (4.2) и (4.3), устанавливающих связь шероховатости поверхности R_a с глубиной резания t и подачей s (табл. 4.1).

2. Определить коэффициенты зависимостей (4.2) и (4.3), устанавливающих связь расхода топлива Q со скоростью движения автомобиля V и массой перевозимого груза m (табл. 4.2).

3. Построить графики полученных зависимостей.

4. Нанести на графики экспериментальные значения выходных переменных (шероховатости поверхности, расхода топлива).



5. Сопоставить экспериментальные и расчетные значения выходных переменных и сделать выводы.

4.3. Индивидуальное задание

Каждый студент выполняет индивидуальное задание, выбрав варианты по таблицам 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 - Индивидуальное задание 1

№ вар.	Глубина резания, t мм	R _{a1} , мкм	R _{a2} , мкм	R _{a3} , мкм	№ вар.	Подача, мм/об	R _{a1} , мкм	R _{a2} , мкм	R _{a3} , мкм
1	0,4	1,4	1,2	1,3	4	0,4	1,2	1,0	1,1
	0,8	1,6	1,5	1,6		0,8	1,9	1,7	1,9
	1,2	2,1	2,4	2,3		1,2	2,6	2,8	2,4
2	0,6	1,6	1,8	1,5	5	0,5	1,4	1,2	1,3
	0,9	1,6	1,9	1,8		0,9	2,1	2,2	2,0
	1,2	2,6	2,4	2,3		3,3	2,9	3,0	3,2
3	0,5	1,4	1,6	1,4	6	0,3	0,8	0,9	1,0
	1,0	1,8	1,7	1,9		0,5	1,3	1,2	1,5
	1,5	2,5	2,3	2,7		1,0	2,1	2,0	2,1

Таблица 4.2 - Индивидуальное задание 2

№ вар	Скорость V, км/ч	Q ₁ , л/100 км	Q ₂ , л/100 км	Q ₃ , л/100 км	№ вар.	Масса груза m, кг	Q ₁ , л/100 км	Q ₂ , л/100 км	Q ₃ , л/100 км
1	60	30,0	32,0	28,0	4	6000	30,0	31,0	34,0
	50	34,0	35,0	37,0		5000	28,0	26,0	24,0
	90	32,0	31,0	28,0		3500	22,0	20,0	25,0
2	60	12,2	13,0	12,5	5	8000	40,0	42,0	39,0
	45	15,1	14,8	15,3		2000	19,3	18,2	18,0
	100	13,6	13,8	13,2		7000	36,0	38,0	41,0
3	60	3,2	3,6	3,1	6	1000	8,9	9,4	9,1
	90	4,5	4,7	5,0		500	3,3	3,5	2,9
	110	4,8	5,4	5,2		800	4,2	4,7	3,9

4.4. Содержание отчета

- 1) Краткие сведения из теории.
- 2) Данные задания для выполнения расчетов.
- 3) Расчеты коэффициентов зависимостей.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}, \quad (5.5)$$

Для примера $S_y^2 = 1,56/4 = 0,39$.

3. Вычисление коэффициентов регрессии полинома

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N}, \quad a_1 = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} \bar{y}_j}{N}. \quad (5.6)$$

где X_{ij} - значение i -й переменной в j -й строке;

$\bar{y}_j$ - среднее значение выходной переменной в j -й строке.

Для примера

$$a_0 = 240,0/4 = 60; \quad a_1 = ((-1)67,5 + (+1)56,5 +$$

$$+ (-1)62,5 + (+1)53,5)/4 = -5;$$

$$a_2 = -2; \quad a_3 = 0,5.$$

Зависимость для расчета выходной переменной с учетом полученных значений коэффициентов примет вид

$$y = 80 - 5X_1 - 2X_2 + 0,5X_1X_2, \quad (5.7)$$

4. Выполним оценку значимости коэффициентов регрессии с помощью критерия Стьюдента. Коэффициент считается значимым если выполняется неравенство

$$|a_i| \geq \Delta a_i = t_{1-\alpha/2} \frac{S_y}{\sqrt{N}}, \quad (5.8)$$

где $t_{1-\alpha/2}$ определяется по таблицам, для примера $t_{1-\alpha/2} = 2,77$ и

$$\Delta a = 2,77 \frac{\sqrt{0,39}}{\sqrt{4}} = 0,86.$$

В уравнении (5.6) незначим коэффициент $a_3 = 0,5$. С учетом этого уравнение переписывается



Таблица 5.1 - Результаты экспериментальных исследований

№ точки	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ · X ₂	y ₁	y ₂	$\bar{y}$	S ²	ƒ
1	+	-	-	+	67.0	68.0	67.5	0.5	67.0
2	+	+	-	-	55.9	57.1	56.5	0.72	57.0
3	+	-	+	-	62.1	62.8	62.5	0.32	63.0
4	+	+	+	+	53.4	53.6	53.5	0.02	53.0

При составлении матрицы, табл. 5.1, столбик X₁ · X₂, определяющий взаимодействие переменных, получен их произведением. С целью возможности определения дисперсии и оценки воспроизводимости в каждой точке плана выполнено по два опыта. Математическая модель процесса представляется линейным полиномом, который для рассматриваемого примера имеет вид

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1X_2. \quad (5.3)$$

Обработка экспериментальных данных выполняется в следующей последовательности:

1. Оценка воспроизводимости процесса. При одинаковом числе параллельных опытов при каждом сочетании уровней факторов воспроизводимость процесса (отсутствие значительных отклонений) определяют по критерию Кохрена. Сравнивают максимальную величину дисперсии с суммарной.

Критерий вычисляются по формуле

$$G = \frac{S_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (5.4)$$

где N - число параллельных опытов (число строк в табл. 5.1).

Если расчетный критерий оказывается меньше табличного или равен ему, то процесс считается воспроизводимым. Для выполненных экспериментов

$G = 0,72/1,56 = 0,46$; $G_{табл.} = 0,9065$, следовательно, процесс является воспроизводимым.

2. Если процесс воспроизводим, то определяют дисперсию воспроизводимости или ошибку опыта

4) Графики уравнений и экспериментальных значений выходных переменных.

5) Выводы по работе.

4.5. Контрольные вопросы

6) Какие зависимости используют для моделирования поведения технических систем?

7) В чем заключается методика обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов?

8) Как рассчитать коэффициенты линейной зависимости при применении метода наименьших квадратов?

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5 МНОГОФАКТОРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Цель занятия: закрепление теоретических знаний, получение практических навыков по планированию экспериментов и обработке экспериментальных данных.

5.1. Теоретический раздел

Описание любой технической системы и получение информации об объекте традиционно начинается с эксперимента. Все методы планирования экспериментов можно разделить на 2 блока [5]:

1. Методы пассивного планирования экспериментов.
2. Методы активного планирования экспериментов.

При применении методов пассивного планирования план проведения экспериментов составляют один раз и при выполнении исследований его, как правило, не меняют. Наиболее ярким представителем этого блока является метод последовательного изменения переменных. При применении методов активного планирования, эксперименты ставят небольшими сериями, результаты каждой серии обрабатывают и анализируют. При необходимости создаётся план следующей серии, по результатам обработки которой вырабатывается дальнейшая стратегия. К рассматриваемым методам относятся: полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, метод латинских квадратов, симплекс-решетчатое планирование и ряд других.



При применении методов полного и дробного факторных экспериментов изменяют одновременно не один, а несколько факторов. На первом этапе математическая модель процесса представляется в виде линейной зависимости вида

$$y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n, \quad (5.1)$$

где $a_0, a_1, \dots, a_n$ - коэффициенты модели, которые определяют по экспериментальным данным;

$x_1, \dots, x_n$ - входные переменные.

При применении степенных зависимостей вида $y = a_0x_1^{a_1} \dots x_n^{a_n}$ они приводятся к виду (5.1) логарифмированием. Экспериментальные значения выходных переменных и входных переменных также предварительно логарифмируют.

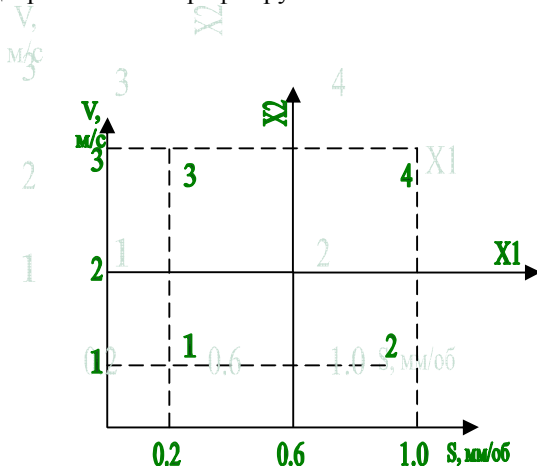


Рисунок 5.1 - Графическое представление плана полного факторного эксперимента

При применении полного и дробного факторных экспериментов можно учитывать также взаимодействия входных переменных, уравнение (5.1) дополняется членами вида $a_{ij}x_i x_j$. Для удобства вычислений план эксперимента преобразовывают. Переносят начала координат и меняют масштаб переменных.

Например, при исследовании влияния режима резания на стойкость режущего инструмента T , (рисунок 5.1), будем одновременно изменять скорость резания V и подачу S , опыты проводим при значениях переменных, определяемых точками 1, 2, 3, 4 плана.

Для унификации процедуры планирования и обработки экспериментальных данных введем новую систему координат X_1, X_2 с началом в центре плана ($S=0,6$ мм/об, $V=2$ м/с). Выберем масштаб новых переменных так, чтобы при минимальных значениях V и S (нижний уровень варьирования) переменные X_1, X_2 были равны -1, а при максимальных значениях V и S (верхний уровень варьирования) - +1. Расчет координат точек в новой системе выполняется по зависимости

$$X_i = \frac{S_i - S_0}{\varepsilon'_s}, \quad (5.2)$$

где S_0 - значение переменной на основном уровне $S_0 = (S_{\max} + S_{\min})/2 = 0,6$; ε'_s - интервал варьирования переменной (для S равен $\varepsilon'_s = (S_{\max} - S_{\min})/2 = 0,4$). Например, для точки 1

$$X_1 = \frac{0,2 - 0,6}{0,4} = -1.$$

Рассмотрим последовательность обработки экспериментальных данных при многофакторном планировании на примере исследования скорости резания и подачи на стойкость инструмента. Данные экспериментальных исследований сведены в таблицу 5.1.

