

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Детали машин, путевые и строительные машины»

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ МАШИН

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по специальности
«Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины
и оборудование»*

Электронная копия издания

Гомель 2009

УДК 625.08
ББК 39.01
Т38

Авторы : В. А. Довгяло, А. М. Щемелев, А. В. Вавилов, И. И. Леонович.

Рецензенты : *кафедра лесных машин и технологии лесозаготовок УО «Белорусский государственный технологический университет»* (заведующий кафедрой канд. техн. наук, доцент С. П. Мохов);
главный научный сотрудник филиала «Институт дорожных исследований» РУП «Белорусский дорожный инженерно-технический центр» д-р техн. наук, профессор В. Н. Яромко.

Технические основы создания машин : учеб. пособие / В. А. Довгяло [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 330 с.
ISBN 978-985-468-627-1

Приведены основные сведения, которые необходимо учитывать при создании новой строительной, дорожной и подъемно-транспортной техники. Рассмотрены основные направления развития мобильной техники, критерии совершенства конструкции и принципы проектирования и конструирования, технологичность конструкции деталей и узлов машин, факторы, обеспечивающие надежность деталей, агрегатов и машин в целом. Освещены вопросы автоматизации проектирования и эксплуатации машин, стандартизации, сертификации и экономической эффективности продукции машиностроения.

Предназначено для студентов механических специальностей, связанных с проектированием, модернизацией и эксплуатацией строительных, путевых, дорожных и подъемно-транспортных машин, в том числе для студентов специальности "Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования"

Учебное пособие подготовлено коллективом авторов, в написании глав 4 и 9 приняла участие Т. В. Захарова, главы 8 – В. А. Ташбаев, глав 6 и 10 – Ю. А. Шебзухов, которому соавторы выражают глубокую благодарность за подготовку рукописи пособия к изданию.

УДК 625.08
ББК 39.01

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Разработка новой техники как фактор развития производства	8
1.1 Основные направления развития техники	10
1.2 Техническая база перспективной техники	12
1.3 Оптимизация типоразмерных рядов машин	16
1.4 Оценка технического уровня машины	19
2 Критерии совершенства конструкции	26
2.1 Функциональная целесообразность и конструктивная преемственность	26
2.2 Техническая эстетика и эргономика	29
2.3 Безопасность конструктивных решений	34
2.4 Технологичность конструктивных решений	41
2.5 Обеспечение новизны технических решений	46
3 Принципы конструирования	50
3.1 Обеспечение надежности узлов машин	51
3.2 Стандартизация и унификация	57
3.3 Общие правила конструирования	61
3.4 Методика конструирования	65
3.5 Этапы создания машин	68
3.6 Методика проектирования машин	73
3.7 Компонование	79
3.8 Экологические приоритеты при конструировании машин	83
4 Техника и художественное конструирование	94
4.1 Категории композиции	96
4.2 Основные принципы конструирования форм с пространственной структурой ..	101
4.3 Свойства и средства композиции	106
5 Надежность машин	124
5.1 Показатели надежности	126
5.2 Основные распределения случайных величин, используемые при оценке надежности	130
5.3 Основные факторы, снижающие надежность машин	136
5.4 Прогнозирование и оценка надежности деталей и конструкций	150
5.5 Методы испытаний и контроля надежности	169
5.6 Методы повышения надежности машин	176
6 Технологичность конструкции машин	195
6.1 Общие сведения о технологичности	195
6.2 Показатели технологичности	198
6.3 Производственная технологичность	201
6.4 Эксплуатационная и ремонтная технологичности	213
7 Автоматизация работы машин	218
7.1 Контроль, управление и регулирование	219
7.2 Технические средства автоматизации	227
8 Применение систем автоматизированного проектирования машин (САПР) ...	240

8.1 Классификация САПР	241
8.2 Методологические принципы проектирования с использованием САПР	251
8.3 Математическое моделирование	255
9 Стандартизация и сертификация в машиностроении	269
9.1 Нормативные документы в области технического нормирования и стандартизации	271
9.2 Основные методы стандартизации	286
9.3 Качество продукции и его менеджмент	297
9.4 Сертификация продукции машиностроения	303
10 Экономическая эффективность машин	314
10.1 Себестоимость, окупаемость и экономичность техники	314
10.2 Пути повышения эффективности создания машин	323
Заключение	327
Список литературы	329

ВВЕДЕНИЕ

Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины оказывают существенное влияние на развитие многих отраслей народного хозяйства и в первую очередь на промышленное, гражданское и дорожное строительство. Современное состояние строительной индустрии требует повышения качества выполняемых работ и увеличения их темпов без прироста ресурсов, что возможно только при наличии специальных машин различного назначения, разработанных с учетом потребностей производства. К числу таких потребностей относятся обеспечение предельно возможной производительности и высокого качества работ при минимальной стоимости единицы продукции, низкие показатели удельной материалоемкости и высокий уровень надежности деталей, узлов и агрегатов. Кроме того, машина должна иметь простую и технологичную конструкцию с максимально возможным набором стандартных деталей и унифицированных сборочных единиц, быть удобной для монтажа и демонтажа, отличаться простотой технического обслуживания и ремонта. Она должна обеспечивать комфортные и безопасные условия труда обслуживающего персонала и не оказывать вредного влияния на окружающую среду.

Современное машиностроение развивается по пути снижения потребления энергии, топлива, материалов и сырья, а также уменьшения трудозатрат при производстве машин. Актуальность этих задач для отечественных производителей во многом обусловлена дефицитом энергоносителей и сырья, а также увеличенными показателями удельной энерго- и материалоемкости выпускаемой продукции.

К основным направлениям развития производства строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин, характерным для современного машиностроения, относятся:

– снижение удельных показателей энергоемкости за счет совершенствования систем привода, использования новых типов передач, узлов бесступенчатого регулирования скоростных характеристик машин;

- снижение удельных показателей материалоемкости за счет применения материалов с высокими и стабильными значениями прочности и ресурсосберегающих технологий их обработки;

- создание многоцелевых и многофункциональных машин на унифицированной базе с набором легкоъемных рабочих органов различного назначения;

- повышение надежности узлов и механизмов машин современными конструктивными и технологическими методами;

- расширение диапазона типоразмерных рядов путем разработки как малогабаритной техники (5–30 кВт), так и машин большой единичной мощности (500–1500 кВт);

- увеличение степени применения автоматизированных и роботизированных систем управления на основе современных ЭВМ и микропроцессорной техники;

- совершенствование методов и средств повышения безопасности эксплуатации, эргономических и экологических характеристик машин;

- расширенное применение методов унификации, блочной компоновки и агрегатирования, дальнейшая специализация производства деталей и конструкций машин.

До приобретения суверенитета промышленность Беларуси, в том числе машиностроение, была интегрирована в общую союзную структуру, имея большое число смежников и соисполнителей за пределами республики. В годы суверенитета нашим машиностроителям пришлось осваивать значительно большую номенклатуру машин и их комплектующих и развивать производство, базирясь, в первую очередь, на требованиях отечественных потребителей. В настоящее время в Беларуси имеется более тридцати машиностроительных предприятий, которые производят строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и комплектующие. В основном это небольшие заводы, выпускающие машины и оборудование мелкими сериями с невысоким уровнем унификации, что делает их дорогими и недостаточно надежными в эксплуатации.

Крупные предприятия страны (Амкодор, МТЗ, БелАЗ, ранее МоАЗ и др.) решают ряд важных народнохозяйственных задач, необходимых на данном этапе развития строительной индустрии. Разрабатываются и изготавливаются модельные ряды машин с широким диапазоном изменения их главного параметра. На базе разработан-

ных конструкций расширяется номенклатура машин, обеспечивающих комплексную механизацию земляных, дорожных и строительных работ. Кроме того, разрабатываются и изготавливаются различные виды навесного, прицепного и другого оборудования, а также осуществляется производство основных комплектующих изделий, в том числе импортозамещающих.

Жизненный цикл любой машины состоит из ряда основных этапов, в числе которых проектирование и конструирование, производство, эксплуатация и утилизация. Процесс начинается с проведения информационной подготовки и научных исследований, которые предшествуют проектно-конструкторским работам. При проектировании закладывается комплекс заданных характеристик машины, который затем реализуется при ее изготовлении, доводится до необходимого уровня при испытаниях и поддерживается при эксплуатации машины.

Создание машины (строительной, дорожной, подъемно-транспортной и др.), обладающей более высоким уровнем технико-экономических, эксплуатационных, конструктивных и технологических характеристик по сравнению с существующими машинами, является сложным многоплановым и многофакторным процессом, который требует от разработчиков (инженеров, конструкторов, дизайнеров, технологов) многосторонних знаний.

1

РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНИКИ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Развитие промышленного производства, в том числе машиностроительного, осуществляется, как правило, по двум основным направлениям – *экстенсивному* и *интенсивному*. В основе первого из них лежат количественные факторы (увеличение количества средств труда, капитальных вложений, численности работающих), в основе второго – качественные факторы, которые обуславливают повышение производительности и эффективности труда, интенсификацию процессов производства на основе достижений науки и техники.

На практике эти пути развития экономики дополняют друг друга, они взаимосвязаны, но с течением времени их соотношение меняется в пользу действия интенсивных факторов. Об этом свидетельствует оценка доли влияния экстенсивных и интенсивных факторов на рост промышленного производства (на примере США) в различные периоды (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Влияние различных путей развития экономики США на рост производства

Периоды	Доля факторов, %	
	экстенсивных	интенсивных
1889–1909	74,4	25,6
1909–1919	60,5	39,5
1919–1929	54,8	45,2
1948–1953	48,9	51,1
1953–1957	31,8	68,2

Как видно из таблицы, при рыночной системе хозяйствования наблюдается устойчивая тенденция усиления влияния интенсивных факторов на рост производства. Если до 1929 г. было явное преобладание доли экстенсивных факторов, то в период 1948–1953 гг. влияние обоих факторов оказалось примерно равным, а уже в следующие четыре года интенсивные факторы более чем в два раза превосходили экстенсивные. Аналогичное положение имело место в ряде стран Западной Европы, где доля интенсивных факторов в развитии экономики в 1949–1959 годах составляла: в ФРГ – 60, Франции – 75, Италии –

59 %. Современные темпы развития науки и техники обеспечивают преобладающее влияние интенсивных факторов: их доля в странах с развитой рыночной экономикой в 3–4 раза превышает долю экстенсивных факторов. В Беларуси интенсивными факторами производства (повышение производительности труда, внедрение научно-технических достижений, модернизация производства) обеспечивается около 90 % прироста внутреннего валового продукта (ВВП), что значительно выше показателей белорусской экономики советского периода (не многим более 50 %). Характер изменения отдельных параметров во времени t при интенсивном развитии производства показан на рисунке 1.1. Видно, что прирост объемов продукции осуществляется в основном за счет увеличения производительности труда.

Выражением экстенсивного развития производства является неравенство

$$J_{\Pi} \leq J_{\text{р}},$$

где J_{Π} , $J_{\text{р}}$ – индексы динамики объема производства и используемых ресурсов.

Интенсивное развитие производства определяется соотношением

$$J_{\Pi} > J_{\text{р}},$$

что означает опережение получаемых результатов по сравнению с ростом затрат ресурсов, необходимых для достижения этих результатов.

Темпы развития научно-технического прогресса в большой мере определяются соотношением темпов развития науки, техники и производства. Если условно представить приращение темпов развития во времени (t) науки (Н), техники (Т) и производства (П), то в прошлом столетии наиболее характерным соотношением динамики развития этих трех составляющих было

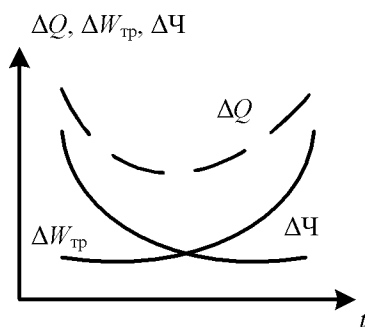


Рисунок 1.1 – Зависимость различных факторов производства от времени:

ΔQ – прирост объема производства; $\Delta W_{\text{тр}}$ – прирост производительности труда; $\Delta \text{Ч}$ – прирост численности работающих

$$\frac{d\Pi}{dt} > \frac{dT}{dt} > \frac{dH}{dt},$$

т. е. наиболее быстрыми темпами развивалось производство, которое обуславливало ускорение темпов развития техники, а последняя определяла возможность и необходимость увеличения объема научных исследований.

На современном этапе оптимальным признается соотношение

$$\frac{dH}{dt} > \frac{dT}{dt} > \frac{d\Pi}{dt}.$$

Отмеченные соотношения условно можно изобразить в виде графиков на рисунке 1.2.

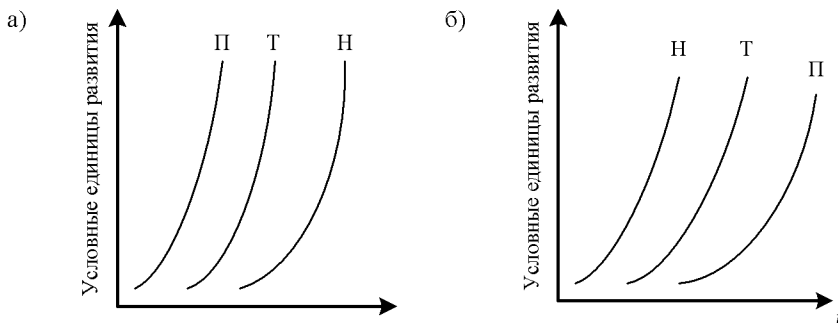


Рисунок 1.2 – Соотношения науки – техники – производства:
а – во второй половине XX в.; б – в XXI в.

Наиболее высокими темпами должна развиваться наука, которая является основой для ускорения темпов развития новой техники, в свою очередь создающей техническую базу для дальнейшего развития производства. Очевидно, что между этими тремя компонентами существуют и обратные связи: каждый из них взаимодействует друг с другом и обуславливает их развитие.

1.1 Основные направления развития техники

Одним из приоритетных направлений развития науки и техники Беларуси являются ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии в производстве продукции машиностроения, в том числе

строительных и дорожных машин. Повышение их конкурентоспособности, обеспечение высокого технического уровня, надежности и безопасности во многом связано с развитием следующих *направлений научных исследований и прикладных работ*:

- разработка и освоение наукоемких технологий, обеспечивающих резкое повышение производительности труда при одновременном сбережении трудовых, материальных и энергетических ресурсов;
- разработка новой перспективной мобильной техники, основанной на электронизации и компьютеризации основных систем;
- создание и внедрение в производство новых конструкционных, в том числе адаптивных, материалов;
- комплексная механизация и автоматизация производства, основанная на использовании перспективных и гибких производственных систем, автоматизированного проектирования и управления производственными процессами;
- создание и освоение новых источников энергии, в том числе нетрадиционных (альтернативных) и возобновляемых экологически чистых источников;
- разработка и реализация биотехнологий, в том числе для получения экологически чистого топлива.

В числе основных задач при разработке *новой перспективной техники* рассматриваются:

- компьютерные модели, позволяющие осуществлять имитационное моделирование и испытания основных систем машин и механизмов, которые способствуют выбору оптимальных характеристик эксплуатации машин;
- разработка типоразмерного ряда унифицированных бортовых электронных модулей, электрических и электрогидравлических исполнительных механизмов для тракторов и другой мобильной техники;
- нетрадиционные (альтернативные) ресурсосберегающие источники энергии, в том числе для пневмоколесных и гусеничных машин;
- создание гидрообъемных и электрических вариаторов для трансмиссий тракторов и мобильных машин различной мощности;
- системы автоматизированного проектирования и автоматизированных рабочих мест, интеллектуально организованных автоматизированных систем управления производством;

- манипуляторы и промышленные роботы, программируемые и быстро приспособляющиеся к изменяющимся условиям эксплуатации;
- системы оперативного диагностирования (без разборки) приводов, гидросистем и несущих конструкций мобильных машин;
- аналитическое оборудование и приборы контроля качества и сертификации продукции, в том числе машиностроительной;
- система управления и контроля работы машин с применением спутниковых систем.

При *создании новых материалов* особое внимание уделяется:

- новым многофункциональным полимерным материалам с комплексом особых свойств для тракторо- и автомобилестроения;
- материалам, изменяющим свои физические и другие свойства при изменении условий эксплуатации (созданным с применением интеллектуальных компьютерных систем);
- принципиально новым конструкционным материалам, многократно превосходящим по своим свойствам имеющиеся материалы (сверхпрочные и сверхтвердые, коррозионно- и износостойкие и др.);
- новым магнитным, сегнетоэлектрическим и полупроводниковым материалам с особыми физическими свойствами;
- новым конструкционным материалам на основе высокопрочного чугуна и производству из него высоконагруженных крупногабаритных деталей.

В области *освоения прогрессивных технологий* заслуживают внимания:

- основы получения наноструктурных материалов для силовых элементов конструкций;
- технологии материалов с новыми свойствами, обеспечивающие создание микро- и наноэлектронных систем и устройств;
- плазменные технологии для производства высококачественной стали и специальных сплавов, получения редких металлов и химического сырья;
- новые высокоэффективные технологии обработки металлических материалов с использованием импульсных нагрузок и сверхвысоких давлений.

1.2 Техническая база перспективной техники

Разработка новой техники осуществляется, как правило, с учетом перспективных типажей и систем машин. Типаж машин связан с параметрическим рядом, типоразмером и типоразмерным рядом машин. *Параметрический ряд* является упорядоченной совокупностью числовых значений параметра, которые построены в определенном диапазоне и с учетом принятой системы градации.

Параметр машины – это независимая или взаимосвязанная величина, характеризующая ее определенный конструктивно-эксплуатационный показатель.

Совокупность значений параметров, определяющих машину данного конструктивного исполнения (типа), называют *типоразмером* машины.

Совокупность типоразмеров, числовые значения главного параметра которых соответствуют параметрическому ряду, определяют *типоразмерный ряд* машин.









Параметрический ряд строится на основе рядов предпочтительных чисел, регламентированных стандартами. Система предпочтительных чисел позволяет выбрать лишь такие значения параметров, которые подчиняются строго определенной математической закономерности. Предпочтительные числа могут быть выражены, например, в виде арифметической (25-50-75-100...) или геометрической (1-2-4-8-16-32...) прогрессий.

На базе параметрического ряда может быть получен конструктивно-унифицированный ряд, т. е. совокупность технических средств одинакового или различного функционального назначения, построенных на основе общности конструкций основных агрегатов, узлов и деталей.

Если техническое средство данного типоразмера является основой для образования других моделей ряда, то такое техническое средство называют *базовым* или *базовой моделью*. Различное исполнение базовой модели называют модификациями. Совокупность базовой модели и ее модификаций определяет семейство машин. В таблице 1.2 приведен пример семейства автомобильного подвижного состава, базовой моделью которого является грузовой автомобиль ГАЗ-3302 грузоподъемностью 1,5 т.

С учетом названных выше понятий и определений можно сформулировать понятие типажа машин: *типаж машин* представляет собой совокупность членов типоразмерного ряда машин, систематизированных по функциональным, технологическим, конструктивным и размерным признакам. В полном объеме типаж технических средств должен включать функциональное назначение машин, их параметрические ряды, основные технические, эксплуатационные и экономические характеристики; сроки постановки машин на производство или снятия их с производства.

Таблица 1.2 – Семейство пневмоколесного подвижного состава на базе автомобиля ГАЗ-3302

Модификации грузового автомобиля ГАЗ-3302	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Двигатель, модель ЗМЗ			
				4025.10	4026.10	4061.10*	4063.10*
 фургон	5440	2100	2770	4025.10	4026.10	4061.10*	4063.10*
 бортовая	5440	2100	2120	4025.10	4026.10	4061.10*	4063.10*
 с тентом	5500	2075	2220	4025.10	4026.10	4061.10*	4063.10*
 самосвал	5390	2080	2120	4025.10	4061.10*		
 полноприводная	5440	2180	2200	4061.10*	4063.10*		
 автобус	5500	2075	2220	4026.10*	4063.10*		
 милиция	5500	2075	2220	4026.10	4063.10*		
 медпомощь	5500	2075	2540	4063.10*			
* Устанавливается на заказ: двигатель ЗМЗ.4025.10 – бензиновый, карбюраторный, максимальная мощность – 66,2 кВт (90 л. с.) при 4500 об/мин.							

Типаж машин разрабатывается на определенный период и на этот же период устанавливаются исходные данные для разработки технических заданий на проектирование новых моделей. Новые модели машин должны разрабатываться в соответствии с основными направлениями

работ по обеспечению качества и повышению технического уровня продукции, экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов, снижения эксплуатационных затрат, безопасности для жизни и здоровья человека и охраны окружающей среды. Стандартизация и унификация конструкций базовых моделей и их модификаций должна учитывать требования и нормы международных стандартов.

Периодичность модернизации и полного обновления моделей устанавливается, исходя из расчета технико-экономической эффективности моделей, динамики спроса на внешнем и внутреннем рынках и оценки их технического уровня. Основная информация по этим вопросам должна основываться на данных, накопленных при эксплуатации парка различных моделей. На рисунке 1.3 показаны этапы разработки новой продукции в автомобильной промышленности, характерные для условий рыночной экономики.

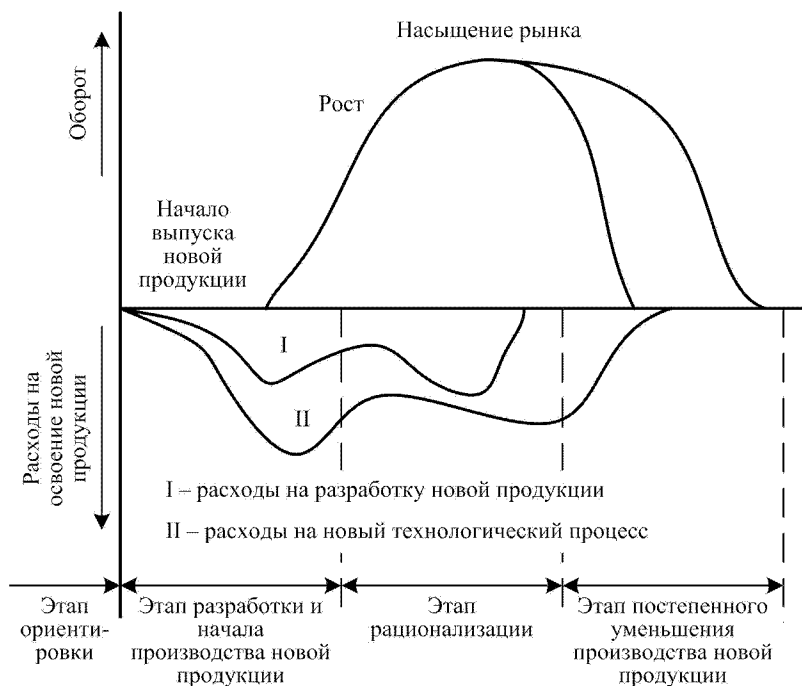


Рисунок 1.3 – Этапы разработки новой продукции в автомобильной промышленности

Разработка перспективных типажей и семейств машин позволяет:

- обеспечить возможность более полного удовлетворения потребностей отраслей народного хозяйства в соответствующих технических средствах;

- удовлетворить эти потребности с помощью минимально необходимого количества базовых моделей;

- экономически обосновать необходимые для создания технических средств ресурсы и капитальные вложения в основную и смежные отрасли промышленности;

- расширить внутренний рынок соответствующей продукции и экспортные поставки.

В ряде отраслей разрабатываются системы машин, представляющие собой функционально разнородные, но технологически взаимосвязанные между собой технические средства, позволяющие осуществить комплексную механизацию (автоматизацию) операций того или иного производственного процесса. Система машин должна разрабатываться с учетом результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В рамках системы машин ведется разработка новой техники, решаются вопросы модернизации машин и снятия с производства устаревших конструкций.

1.3 Оптимизация типоразмерных рядов машин

Одной из наиболее актуальных проблем проектирования новой техники является выбор оптимальной частоты параметрического ряда машин, лежащего в основе разработки перспективного типажа машин. Такой ряд представляет собой совокупность заданного количества числовых значений технических признаков функционально-однородной группы машин. Как правило, типоразмер машины определяется числовым значением ее главного параметра, обуславливающим во многом потребительские свойства машины. Например, для одноковшовых экскаваторов и скреперов это вместимость ковша, для бульдозеров – мощность или номинальное тяговое усилие, для автогрейдеров и катков – масса, для кранов – грузоподъемность.

Оптимальным параметрическим (типоразмерным) рядом можно считать такой ряд машин, который обеспечивает выполнение запланированного объема работ с минимальными затратами. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальное число значений главного пара-

метра для данного класса машин, удовлетворяющих требованиям потребителей и современным экономическим показателям.

Суммарные текущие затраты и капиталовложения для всех машин, входящих в параметрический ряд, зависят от количества машин каждого типоразмера или от их годового выпуска $A_{\text{год}}$. Следует отметить, что годовой выпуск или серийность производства машин оказывают существенное влияние на величину капиталовложений, но с увеличением серийности производства снижаются капиталовложения.

Для выбора оптимальной структуры выпуска машин соответствующих типоразмеров необходимо, прежде всего, определить годовой объем работ, подлежащих выполнению этими машинами. В основу его определения могут быть положены следующие соображения. Во-первых, нужно учесть, что для выполнения плановых объемов работ используют ранее выпущенные машины. Поэтому при расчете объема работ, который должна выполнить новая техника, следует учитывать лишь годовой прирост объема работ, соответствующих началу серийного выпуска новой техники. Во-вторых, необходимо учесть, что некоторое количество старой техники из-за ее износа и выхода из строя должно быть заменено новой техникой.

При расчете необходимого количества новой техники следует иметь в виду, что она должна быть, как правило, более производительной по сравнению с прежней техникой. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо учесть и относительные показатели производительности сравниваемых моделей машин.

Общий объем работ, подлежащих выполнению машинами данного функционального назначения, определяют, исходя из потребностей народного хозяйства и современных технологий выполнения, а затем ориентировочно устанавливают необходимые типоразмеры машин и примерное соотношение между машинами легкого, среднего и тяжелого классов. Оптимальная частота параметрического ряда машин должна обеспечивать минимальные затраты как на производство, так и на эксплуатацию новой техники.

Для определения оптимальной частоты типоразмерного ряда машин используют различные методы, которые базируются на учете ряда экономических показателей. Например, предполагают равномерное распределение годового выпуска между отдельными значениями главного параметра, например, грузоподъемности q транспортных средств, и определяют, при каком количестве типоразмеров приведенные затраты будут минимальными.

Можно начать расчет приведенных затрат R , считая, что весь объем работ будет выполняться с одним типоразмером, соответствующим максимальному значению главного параметра. Тогда для машины с грузоподъемностью $q_1 = q_{\max}$ годовой выпуск будет равен A_1 . В этом случае

$$R_1 = (S_1 + E_n K_1) A_1,$$

где S_1 и K_1 – соответственно текущие затраты и капиталовложения для машины грузоподъемностью q_1 ;

E_n – нормативный коэффициент эффективности.

Затем определяют величину приведенных затрат при равномерном распределении годового выпуска машин A_1 между двумя значениями q_i (между q_1 и q_2), т. е. предполагается, что годовой выпуск машин q_1 и q_2 равняется $A_1 / 2$. Для этого случая суммарная величина приведенных затрат

$$\sum_1^2 R_2 = [(s_1 + s_2) + E_n (K_1 + K_2)] \frac{A_1}{2}.$$

Аналогичным образом вычисляют величину приведенных затрат при равномерной разбивке объема выполняемых работ и годового выпуска машин q_1, q_2, \dots, q_n :

$$\sum_{i=1}^n R_i = [(s_1 + s_2 + \dots + s_n) + E_n (K_1 + K_2 + \dots + K_n)] \frac{A_1}{n}.$$

Результаты расчета сводят в таблицу 1.3 (приведенные цифры носят условный характер).

Таблица 1.3 – Приведенные затраты при равномерной разбивке объема выполняемых работ и годового выпуска машин

Число типоразмеров машин по их грузоподъемности	Значение грузоподъемностей q_i	Количественный выпуск машин одного типоразмера A_i	Приведенные затраты R , у. е.
1	40	30000	250000
2	40; 5	15000	170000
3	40; 20; 5	10000	150000
9	40; 35; 30; 25; 20; 15; 12; 7; 5	3300	120000
36	40; 37; 35; 32; ... 10; 7; 5	833	168000

По данным этой таблицы построен график зависимости суммарных приведенных затрат от количества типоразмеров ряда машин (рисунок 1.4).

Видно, что эта зависимость носит экстремальный характер, который связан с влиянием различных факторов (эксплуатационные расходы, серийность выпуска, затраты на освоение производства и др.). Снижение приведенных затрат на начальном участке кривой обусловлено преобладающим влиянием снижения эксплуатационных расходов и капиталовложений. При дальнейшем увеличении числа типоразмеров более существенное влияние начинает оказывать рост капитальных (из-за сокращения серийности выпуска) и дополнительных расходов, связанных с проектированием, подготовкой и освоением производства. Оптимальное число типоразмеров, соответствующее минимальным затратам, для различных машин может существенно различаться.

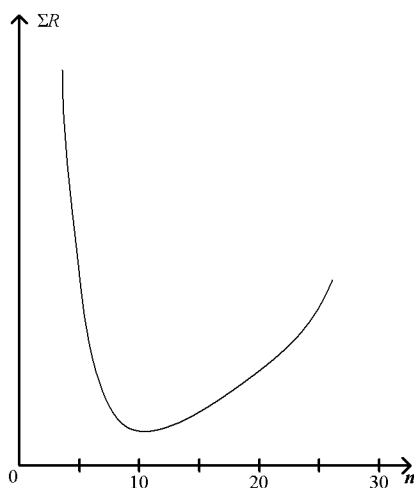


Рисунок 1.4 – Зависимость суммарных приведенных затрат от количества типоразмеров ряда машин

1.4 Оценка технического уровня машины

Для определения ближайших перспектив развития и освоения новой техники представляется весьма важным оценка ее технического уровня, который характеризует количественное изменение показателей сравниваемых машин по отношению к аналогичным показателям машин, принятых за эталон. Для оценки технического уровня машин могут быть использованы различные характеристики, например, режимные (максимальная скорость движения, тяговые усилия или мощность двигателя и т. п.); размерные и весовые характеристики (удельная масса машины, номинальная грузоподъемность, вместимость рабочего органа и т. п.); эксплуатационные (производительность, экономич-

ность и т. п.); конструктивно-производственные (надежность, конструктивная сложность, технологичность конструкции и т. п.).

Таблица 1.4 – Показатели бортовых автомобилей

Марка автомобиля	Год выпуска	η_G	η_N	W_0 , т·км/ч
АМО-Ф-15	1924	1,28	18,2	75
АМО-2	1931	1,39	21,4	130
ГАЗ-АА	1932	1,21	22,1	105
ЗИС-5	1934	1,03	23,5	180
ГАЗ-ММ	1938	1,21	27,6	105
Урал-ЗИС-5	1943	1,03	24,5	180
ЗИС-150	1946	0,97	23,1	260
ГАЗ-51А	1955	1,00	28,0	175
Урал-ЗИС-355	1956	1,04	30,2	210
ЗИЛ-164	1957	1,02	24,4	300
ГАЗ-53А	1965	0,82	35,4	460
ГАЗ-52-04	1975	1,01	27,8	175
ЗИЛ-130	1977	0,72	34,9	540

Таблица 1.5 – Показатели автосамосвалов

Марка автомобиля	Год выпуска	η_G	η_N	W_0 , т·км/ч
ГАЗ-410	1936	1,59	26,0	84
ГАЗ-93	1948	1,33	23,3	157
ЗИЛ-585	1949	1,19	23,8	227
ЗИЛ-ММЗ-585М	1961	1,22	23,2	227
ГАЗ-53Б	1966	1,07	30,6	288
ГАЗ-САЗ-53Б	1969	1,04	31,1	284
ЗИЛ-ММЗ-4502	1975	0,83	31,3	522
ЗИЛ-ММЗ-554М	1978	0,93	29,2	494

Выбор базового образца в общем случае зависит от поставленной цели. Если предполагается определить технический уровень проектируемой машины, то за базовый следует принять лучший отечественный или мировой образец, аналогичный по функциональному назначению, условиям изготовления и эксплуатации. Если необходимо проанализировать динамику изменения технического

уровня группы машин, то за базовые образцы целесообразно принять машины начальных периодов выпуска. В качестве примера можно использовать грузовые автомобили, выпускавшиеся в СССР (на Горьковском автозаводе и автозаводе им. Лихачева) с 1924 по 1977 годы (бортовые автомобили) и с 1936 по 1978 годы (автосамосвалы). Для сравнения приняты следующие показатели:

η_G – удельная масса автомобиля, равная отношению собственной массы (m) к номинальной грузоподъемности (q);

η_N – энергонасыщенность автомобиля, равная отношению максимальной мощности двигателя (N) к собственной массе автомобиля (m);

W_0 – теоретическая производительность автомобиля.

Расчеты этих показателей приведены в таблицах 1.4 и 1.5.

Сопоставление рассматриваемых автомобилей по двум периодам их выпуска (до и после 1950 года) показывает следующие тенденции изменения анализируемых показателей, характерные также для ныне выпускаемых автомобилей:

– снижение удельной массы (удельная масса автомобилей второго периода выпуска снизилась примерно на 20 % по сравнению с аналогичным показателем автомобилей первого периода выпуска, т. е. $\eta_G^{(2)} / \eta_G^{(1)} = 1,2$ (индексом (1) обозначен выпуск автомобилей до 1950 года, индексом (2) – после 1950 года));

– повышение энергонасыщенности (она увеличилась для автомобилей второго периода выпуска в среднем на 30 % по сравнению с аналогичным показателем для автомобилей первого периода выпуска, т. е. $\eta_N^{(2)} / \eta_N^{(1)} = 1,3$);

– увеличение теоретической производительности (она повысилась в среднем на 95 % в основном за счет увеличения максимальных скоростей автомобилей, т. е. $W_0^{(2)} / W_0^{(1)} = 1,95$).

В таблице 1.6 приведены сравнительные данные по показателям удельной массы и энергонасыщенности отдельных моделей автомобилей, имеющих близкие показатели номинальной грузоподъемности. Из таблицы 1.6 видно, что автомобили российского производства проигрывают по удельной массе и энергонасыщенности машинам, производимым в других странах.

Таблица 1.6 – Показатели грузовых автомобилей

Марка автомобиля	Грузоподъемность q , т	η_G	η_N
<i>Бортовые автомобили 4x2</i>			
ГАЗ-52-04 (Россия)	2,50	1,01	27,8
Форд АО-610 (Великобритания)	2,86	0,83	42,0
Робур 10300 (Германия)	2,87	0,93	28,0
<i>Автомобили-самосвалы 6x4</i>			
КамАЗ-551 1 (Россия)	10,00	0,88	24,8
КрАЗ-256-Б1 (Россия)	12,50	0,86	21,4
Роман 12.215-ДЕК (Румыния)	10,35	0,73	28,4
Магirus-290Д26К (ФРГ)	14,50	0,52	38,4

Общий показатель изменения технического уровня машины $\lambda_{\text{тy}}$ за рассматриваемые периоды их выпуска (за счет снижения удельной

массы автомобилей и повышения их энергонасыщенности и теоретической производительности), равен произведению относительных показателей отмеченных величин

$$\lambda_{\text{ты}} = \prod_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_G \lambda_N \lambda_W,$$

где λ_i – относительный показатель по i -му показателю;
 n – число анализируемых показателей.

Соответственно

$$\lambda_G = \frac{\eta_G^{(1)}}{\eta_G^{(2)}}; \lambda_N = \frac{\eta_N^{(2)}}{\eta_N^{(1)}}; \lambda_W = \frac{W_0^{(2)}}{W_0^{(1)}}.$$

С учетом полученных выше расчетных данных относительных показателей $\lambda_{\text{ты}} = 1,2 \cdot 1,30 \cdot 1,95 = 3,04$. Таким образом, общий технический уровень автомобилей по анализируемым показателям повысился в 3,04 раза.

Расчет и обоснование показателей повышения технического уровня машин имеет важное значение при определении предельных затрат, связанных с улучшением качества машин.

Между тем, даже относительно высокий технический уровень машин не всегда является положительным результатом только инженерных разработок. Так, улучшение отмеченных выше показателей для автомобилей, тракторов и других самоходных машин не всегда сопровождается повышением таких показателей потребительских свойств, как производительность и надежность. Например, за 1961–1985 гг. в СССР было выпущено около 1 млн зерноуборочных комбайнов (при выработке на одну машину около 215 т зерна). За этот же период в США количество комбайнов сократилось с 980 тысяч до 600 тысяч единиц за счет повышения производительности: выработка на один комбайн увеличилась со 180 т до 650 т зерна, т. е. более чем в 3 раза. При значительном (в 5–6 раз) превосходстве СССР в производстве тракторов по сравнению с США, примерно половина отечественного парка тракторов простаивала из-за технических неисправностей, а каждый 2-3-й трактор разбирался на запасные части. Из общего количества грузовых автомобилей, выпускаемых советской промышленностью, на линию выходили не более 50 %, остальные простаивали по

техническим причинам. Еще один пример: по выпуску дорожно-строительных машин СССР превосходил в 3–3,5 раза США, но производительность отечественного парка этих машин составляла только 40–45 % от производительности американских аналогов.

Имеются и другие методы определения технического уровня новой техники. В частности, количественная оценка повышения технического уровня проектируемой техники по сравнению с заменяемой может быть проведена также с помощью относительных показателей изменения этого уровня. Если изменение показателя новой техники (P_n) по сравнению с заменяемой (P_3) приводит к улучшению технического уровня, то коэффициент его изменения определяют по формуле $\varphi' = P_n / P_3$. Если же изменение показателя новой техники приводит к ухудшению технического уровня, то относительный показатель рассчитывают по формуле $\varphi'' = P_3 / P_n$.

Общий показатель изменения технического уровня новой техники

$$\varphi_{\text{об}} = \prod_{i=1}^n \varphi_i,$$

где φ_i – относительный показатель изменения технического уровня по i -му показателю потребительского свойства продукции.

В качестве примера расчета используем исходные данные, приведенные в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Данные для расчета изменения показателя технического уровня машины

Показатель	Новая техника	Заменяемая техника
Производительность W , т/ч	120	90
Надежность (простой из-за отказов) T , %	3	6
Стоимость C , тыс. руб.	200	150
Масса m , кг	1300	900

Следует определить коэффициенты изменения технического уровня по отдельным показателям качества:

– по производительности и надежности:

$$\varphi'_W = \frac{120}{90} = 1,33; \quad \varphi'_T = \frac{6}{3} = 2,00; \quad \varphi' = \varphi'_W \varphi'_T = 1,33 \cdot 2,00 = 2,66;$$

– по стоимости и массе:

$$\varphi''_C = \frac{150}{200} = 0,75; \quad \varphi''_G = \frac{900}{1300} = 0,69; \quad \varphi'' = \varphi''_C \cdot \varphi''_G = 0,75 \cdot 0,69 = 0,52.$$

Таким образом, общий коэффициент изменения технического уровня будет $\varphi_{об} = \varphi' \varphi'' = 2,66 \cdot 0,52 = 1,38$, т. е. повышение технического уровня новой техники составляет 38 %.

Очевидно, что при $\varphi_{об} \leq 1$ необходимо проанализировать целесообразность улучшения качества машины за счет повышения тех или иных показателей потребительских свойств. При решении этого вопроса одним из главных критериев является спрос на продукцию с улучшенными потребительскими свойствами. Если спрос на такую продукцию повышается, то выпуск данной машины является оправданным с технической и экономической точек зрения.

Необходимо иметь в виду, что не всегда оправдано повышение технического уровня машин за счет, казалось бы, "улучшенных" показателей. Например, не менее 50–60 % фонда рабочего времени колесных тракторов приходится на транспортный режим. При этом мощность двигателя энергонасыщенных тракторов используется только на 60–70 %, а максимальная скорость движения лимитируется не мощностью двигателя, а дорожными условиями. В этом случае стремление повысить энергонасыщенность машин может привести к перерасходу энергопотребления. Поэтому конструкция подобных самоходных машин должна предусматривать возможность их установки на шасси различных (не менее двух) по мощности модификаций двигателей, наиболее приспособленных к конкретным условиям эксплуатации.

Итак, повышение технического уровня машин за счет улучшения тех или иных показателей потребительских свойств должно быть соизмеримо с увеличением их стоимости. Новая машина может быть признана эффективной, если ее применение экономит больше общественно необходимого труда, чем израсходовано на ее создание.

Для определения предельных затрат на новую машину целесообразно использовать следующую формулу:

$$Ц_{п} = Ц_{з} \eta_{к} + \frac{\mathcal{E}_{п}}{E_{п} + H_{а}},$$

где $C_{п}$ – предельные затраты на создание одного изделия повышенного качества, обеспечивающие нормативную экономическую эффективность капитальных вложений, у. е.;

$C_{э}$ – отпускная цена заменяемой модели, у. е.;

$\eta_{к}$ – показатель относительного повышения качества изделия;

$\mathcal{E}_{п}$ – годовая экономия от использования одного изделия повышенного качества без учета изменения затрат на амортизацию, у. е.;

$E_{н}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$N_{а}$ – коэффициент амортизационных отчислений.

2.1 Функциональная целесообразность и конструктивная преемственность

Процесс конструирования многогранен. Его целью является наиболее полное решение поставленной функциональной задачи. Разработку проекта начинают с понимания функций будущего изделия и представления в общих чертах возможного решения. При этом следует учитывать исторические тенденции, уровень развития материалов и технологий. Для решения такой задачи одинаково важны конструкция, материалы и технология изготовления (рисунок 2.1, а).

Функциональная целесообразность – это принцип соответствия выбранного решения поставленной задаче, которая должна быть выполнена с минимальными затратами. В частности, она предусматривает обеспечение минимально допустимых прочности и жесткости материалов конструкции, поскольку их повышение сопряжено с увеличением массы, удорожанием изготовления и эксплуатации машин и механизмов. Вместе с тем, решение функциональной задачи должно базироваться на возможности выбора оптимального варианта из широкого спектра схем и конструкций.

Как отмечалось, выбор оптимального конструктивного решения должен учитывать особенности материалов и технологий, а также условия эксплуатации деталей и узлов машин. Так, для деталей привода систем управления и трансмиссий машин целесообразно использовать углеродистые стали, улучшенные термической или химико-термической обработкой, а также углеродистые стали с тонкослойными покрытиями из сплавов, обеспечивающих увеличение их износостойкости и коррозионной стойкости, взамен дорогостоящих легированных сталей. В качестве конструкционных материалов несилловых и малонагруженных конструкций следует более широко применять пластмассы и композиты на основе полимеров.

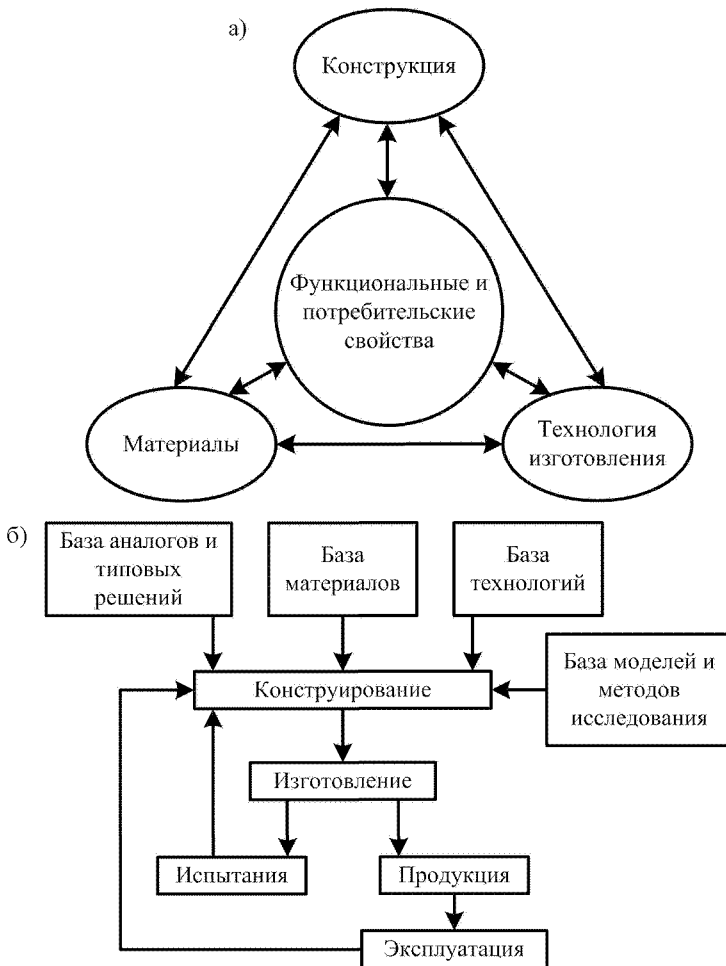


Рисунок 2.1 – Конструирование технических объектов

Штампованные и штампованно-сварные детали предпочитают литым деталям. Блочные конструкции, составленные из неразборных и неремонтируемых узлов, целесообразно использовать вместо конструкций из отдельных последовательно присоединяемых деталей.

Неразъемные, автоматически изготавливаемые соединения следует использовать вместо разъемных соединений, в частности, соеди-

нения на основе термоактивных полимерных клеев предпочитают болтовым соединениям. Уплотнение неподвижных стыков целесообразно осуществлять с помощью анаэробных герметиков на основе терморезактивных полимеров, а не с помощью упругих прокладок. В качестве уплотнения подвижных соединений имеет смысл использовать разделительные уплотнения при ограниченных перемещениях или торцовые (осевые) при неограниченных перемещениях вместо соответственно скользящих или окружных скользящих уплотнениях.

При возможности выбора механизмов, их привода и узлов следует стремиться к упрощению структурных и кинематических схем и повышению эффективности работы механизмов, опираясь на принципы материало- и энергосбережения. Например, механизмы и приводы вращательного движения предпочитают устройствам, в которых присутствует возвратно-вращательное движение, а индивидуальный привод каждого исполнительного звена – общему приводу с разветвленной трансмиссией. Целесообразно также использовать быстросходные малогабаритные приводы и механизмы из высококачественных материалов вместо громоздких тихоходных приводов из материалов с малостабильными прочностными характеристиками. Планетарные передачи с высоким КПД, как правило, предпочитают червячным передачам. Вместо колодочных и ленточных тормозов и муфт используют дисковые и многодисковые фрикционные тормоза и муфты.

Многopotочные системы с параллельным соединением приводов и механизмов значительно эффективнее однопоточных последовательных систем. Кинематические схемы с разделением функций целесообразно использовать вместо совместной реализации различного вида движения или нагружения. Следует отдавать предпочтение схемам с независимой передачей движения или распределения нагрузки. Динамические или статические системы с самым коротким путем замыкания силовых линий (по количеству последовательно нагружаемых стыков, подвижных соединений и деформируемых звеньев) предпочитают системам с более длинным путем замыкания силовых линий, системы с плавным изменением плотности или градиента плотности силовых линий – системам с резким изменением упомянутых параметров.

Системы, требующие регулировки или подгонки взаимного расположения звеньев, являются менее эффективными, чем системы звеньев, опор и подвески агрегатов, обеспечивающие их самоустановку. При этом самоустанавливаемость целесообразно решать за счет конструкции механизма, а не за счет системы управления.

Компоновку и размещение деталей и узлов в пространстве с совмещением их функций предпочитают компоновке с отдельной реализацией функций.

Одним из наиболее важных аспектов конструирования является *преимущество* технических решений. Применение персональных компьютеров позволяет конструктору не вычерчивать деталь или сборочную единицу вручную, а использовать прототип из компьютерной базы. Укрупненно схема процесса конструирования представлена на рисунке 2.1, б. Кроме баз конструкций и комплексных решений, существуют базы материалов и технологий, а также базы данных об испытаниях и эксплуатации разработанных ранее конструкций. Эффективность конструирования значительно повышается за счет оперативного и грамотного выбора прототипа и апробированных эффективных решений, а также совершенствования конструкций элементов узлов и системы в целом с учетом накопленного опыта и анализа перспективных технических решений.

Крупнейшие производители машин обладают обширной интеллектуальной собственностью, сосредоточенной в закрытых компьютерных базах данных, что позволяет им оперативно модернизировать продукцию и осваивать новые поколения машин. Дальнейшее развитие отечественного машиностроения также связано с совершенствованием подобных систематизированных баз данных на основе патентной, научно-технической и справочной литературы.

2.2 Техническая эстетика и эргономика

При конструировании технических объектов очень важно установить связь между конструкцией и внешним видом, между технологией изготовления и эффективностью эксплуатации, между красотой и комфортом. Взаимосвязь формы, функций и содержания технического объекта является основным критерием **технической эстетики**. Если изделие способно выполнять заданные функции, то его форма

должна соответствовать этим функциям. Поэтому любой технический объект, в том числе строительная или дорожная машина, воспринимается как композиция, обладающая рядом характеристик и свойств, которые обеспечивают не только его необходимый технический уровень, но и эстетическое восприятие объекта.

Композицией (применительно к техническим объектам) можно считать совокупность функционально связанных между собой элементов, которые визуально воспринимаются как единое целое. При создании подобной композиции следует опираться на ряд основных положений и правил.

Во-первых, следует обеспечить *целостность формы объекта* так, чтобы взаимное расположение и геометрические характеристики элементов (их должно быть не более 5–7) не препятствовали зрительному восприятию единой структуры композиции.

Для создания цельной формы в структуре машины следует зрительно выделить центральный элемент или группу элементов, вокруг которых скомпонованы менее значимые узлы машины. Часто роль ведущего звена в формообразовании машины может играть явно выраженная ось симметрии. Как правило, сложно добиться целостности восприятия объекта, если каждый из составляющих элементов воспринимается как самостоятельное изделие. Если же элементы и узлы, взятые по отдельности, выглядят незавершенными, то в составе машины они могут органично сформировать композицию, обладающую целостностью формы. В этом состоит требование сопряженности основных элементов, которое обеспечивает достижение единства структуры композиции в целом.

Во-вторых, следует учитывать пропорции и соразмерность элементов композиции, т. е. *пропорциональность размеров машины* и составляющих ее узлов. Давно замечено, что между пропорциональностью и художественной выразительностью существует глубокая связь. Это относится не только к размерам элементов, но и к их форме, рельефу, цвету и т. п.

Для машины как сложной системы разнообразных функциональных элементов пропорциональность проявляется как закономерное соотношение размеров между различными составными элементами, а также между ними и машиной в целом. Известны многие гармонические пропорции, на основе которых составляются ряды размеров

геометрически подобных элементов конструкций, но не существует универсальной пропорции, поскольку в основном размеры элементов машины определяются их функциональным назначением. Между тем наличие классических закономерностей в соотношении размеров является неременным условием целостности формы. При этом различные пропорции могут дать различный визуальный эффект: одни пропорции могут подчеркнуть статичность конструкции, другие – усилить впечатление динамичности.

В-третьих, необходимо учитывать *масштабность*, которая должна отражать соизмеримость входных параметров машины с человеком, непосредственно контактирующим с машиной, например, соотношение размеров кабины, элементов системы управления машины и оператора. При этом машины различных габаритов не могут иметь одни и те же пропорции, что необходимо учитывать при конструировании.

В-четвертых, не менее важным элементом художественного конструирования является *тектоничность*, т. е. выразительность формы машины, которая отражает ее функциональные характеристики, а также взаимосвязь ее узлов и элементов. Если форма машины обладает тектоничностью, то это обеспечивает такие визуальные параметры машины, как устойчивость, уравновешенность и др.

Характерной особенностью строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин является реализация больших усилий на их рабочих органах и конструкциях. Это, как правило, отражается на их форме, которая выражает силовую составляющую динамичности машины в расположении и размерах несущих конструкций, в виде визуально логического распределения нагрузок между агрегатами машины.

Следует отметить, что перечисленными положениями не ограничивается спектр средств отображения выразительности, в главе 4 закономерности художественного конструирования будут рассмотрены более детально.

Значительную роль в обеспечении эффективной эксплуатации технических объектов играет соответствие условий труда функциональным возможностям человека. Создание оптимальной системы взаимодействия человека с машиной является важным фактором повышения производительности работ. Этому способствует эргономи-

ка, которая использует наработки биомеханики и биофизики, анатомии и антропологии.

Эргономика (с греч. *ergon* – работа, *nomos* – закон) – это наука, комплексно изучающая функциональные возможности человека в трудовых процессах в производственной среде, во взаимодействии с машиной и при проектировании механизмов, рабочих мест, наиболее удобных для работника. Целью эргономики является создание условий, способствующих повышению надежности и производительности труда при сохранении здоровья и работоспособности человека и открывающих возможности для интеллектуального и физического развития. Термин "эргономика" появился в Англии в 1949 году, где было организовано эргономическое исследовательское общество.

Важная часть эргономики – инженерная психология, которая ставит своей задачей согласование возможностей человека и техники в рамках единой системы "человек–машина". Эргономика также основывается на таких науках, как медицина, физиология, гигиена труда, социология, промышленный дизайн, антропометрия, биомеханика (изучение мускульных усилий) и т. д.

Эргономика занимается следующими проблемами: оптимизацией физической среды на производстве; конструированием средств индикации (световая, цветовая, звуковая сигнализация, лицевые части приборов, шкал, символические изображения управляемых объектов на панелях информации и т. п.); конструированием органов управления, компоновкой постов управления; организацией рабочих мест.

С учетом эргономических норм и требований разрабатываются рабочие места и конструируются органы управления, создаются оптимальные условия труда. Взаимодействие человека с машиной имеет три основных направления, характеризующие соответствие параметров машины функциональным возможностям человека.

Во-первых, физическое, или *антропометрическое, соответствие*, которое зависит от того, насколько элементы системы управления, их расположение, геометрические характеристики и нагрузки приспособлены к физическим возможностям человека. Как правило, для достижения соответствия при проектировании учитываются усредненные антропометрические характеристики, которые включают более 30 характерных параметров. Их учет позволяет обеспечить достаточно высокий комфорт для 90 % предполагаемых операторов.

Во-вторых, *физиологическое соответствие*, которое зависит от органолептических свойств человека, т. е. от особенностей его органов чувств. Учет этих особенностей необходим для создания оптимальной физической среды на производстве, в частности комфортных условий в кабине машиниста, за счет снабжения ее системой кондиционирования воздуха, снижения уровня шума и др.

В-третьих, *эстетическое соответствие*, которое достигается балансом эмоционального воздействия машины на человека и созданием у него оптимального психологического состояния.

Различные параметры окружающей среды, характеризующие гигиенические требования, представлены на рисунке 2.2.

Невыносимая для человека зона имеет место, если одно из условий выходит за физиологическую границу (работа допустима в скафандрах, в герметичных костюмах и помещениях). Некомфортная зона – это среда, один из параметров которой выходит за психологическую границу. К этой зоне относятся горячие цехи, цехи лакокрасочных покрытий, некоторые дробильно-сортировочные установки.

Комфортная зона и зона высшего комфорта – это среды, параметры которых обеспечивают достаточные и наилучшие условия трудовой деятельности человека.

В процессе выполнения работы функциональное состояние человека меняется и зависит от ряда факторов: физических усилий, напряжения внимания, интенсивности работы, рабочего положения, монотонности в работе, состояния внешней среды. На работоспособность оператора влияют факторы микроклимата (температура, влажность, содержание углекислого газа и т. д.); факторы, связанные с использованием техники (шум, вибрация, загазованность, освещение и т. д.) и с нарушением режима труда и отдыха (недостаток времени



Рисунок 2.2 – Параметры окружающей среды

на отдых и восстановление сил, неправильное использование перерывов в работе и т. д.).

К эргономическим показателям, определяющим удобство и легкость управления машиной, относятся следующие показатели: физиологические (силовые и скоростные возможности человека), психофизиологические (возможности слуха и зрения), антропометрические (компоновка рабочего места водителя) и гигиенические (условия жизнедеятельности и работоспособность человека).

Физиологические показатели учитывают, что энергетические ресурсы человека расходуются на себя (кровообращение, дыхание, поддержание тела в нормальном состоянии) и на производительную работу. Человек в среднем за смену расходует 8400 кДж своей энергии. Работа считается легкой, если за смену затрачивается 2100 кДж, средней трудности – 2100–4200, выше средней трудности – 4200–6300, тяжелой – 6300–8400, особо тяжелой – 8400–10500 кДж.

На большинстве дорожных и строительных машин прежних лет выпуска условия работы, как правило, превышали вышесреднюю трудность. Например, на экскаваторе приходилось выполнять до 4300, на самоходном скрепере – более 2600, на автогрейдер – 600 включений в час. Современные машины, оборудованные с учетом достижений компьютерной техники и электроники, позволили значительно улучшить условия труда оператора.

Психофизиологические требования определяют соответствие машины особенностям функционирования органов чувств человека (порогу слуха, зрения, осязания и т. п.). Без реализации психофизиологических требований оперативная информация об объекте управления не может быть получена оператором или, в лучшем случае, может быть получена с искажениями.

2.3 Безопасность конструктивных решений

Обеспечение безопасности машин является самой важной задачей при их проектировании, поскольку от ее решения зависит здоровье и жизнь людей. Поэтому требования к безопасности жестко регламентированы нормативно-техническими правовыми актами в области технического нормирования и стандартизации. Эти документы четко определяют критерии безопасности машин при их эксплуатации,

хранении и транспортировании. На стадии проектирования следует учитывать жесткие **требования к безопасности** машины и всем ее системам и агрегатам. В их числе:

- общие требования к безопасности машин в целом;
- требования к безопасному управлению машиной, рабочему месту оператора, включая оснащение кабины и расположение органов управления;
- требования к безопасной эксплуатации привода, включая силовую установку, передачи, электро-, пневмо- и гидросистемы;
- требования безопасности к рабочим органам, ходовой части и др.

Различают активную и пассивную безопасность. Активная безопасность базируется на комплексе эксплуатационных и технических характеристик, способствующих предотвращению аварийных ситуаций. К ним можно отнести тормозные и динамические свойства, устойчивость против заносов и опрокидывания, обзорность, обеспеченность устройствами и приборами, предупреждающими о критических ситуациях, надежность элементов конструкции, разрушение которых может привести к неблагоприятным последствиям, обеспеченность световой и звуковой сигнализацией, а также автоматическими системами безопасности и блокировки.

Пассивная безопасность включает комплекс конструктивных мер, исключающих или уменьшающих возможность возникновения аварийных ситуаций: обеспечение необходимой прочности и жесткости конструкции кабины и защитных элементов, применение безосколочных стекол, предотвращение самопроизвольного открывания дверей, отсутствие в кабине выступающих частей с острыми кромками и углами, наличие предохранительных ремней и др.

Еще раз отметим, что безопасность конструктивных решений должна базироваться на учете требований нормативно-технической документации по техническому нормированию и стандартизации. Поэтому общие принципы конструирования должны априори обеспечивать безопасность при эксплуатации, хранении и транспортировании машин. Известные мероприятия по обеспечению безопасности, которые закладываются на этапе проектирования и конструирования тесно связаны с эргономикой и надежностью машин, наличием эффективных средств автоматики и уровнем автоматизации.

Безопасность эксплуатации всех систем машины (привода, рабочих органов, ходового оборудования и металлоконструкций) обеспечивается в основном за счет реализации основных требований к их надежности, которая будет рассмотрена в пятой главе.

Что касается безопасности системы управления машины, то она во многом связана с учетом эргономических факторов при разработке конструкции машины. К ним можно отнести ряд мероприятий, описанных ниже.

1 *Пространственная организация рабочего места оператора*, включая обеспечение широкого обзора за зоной рабочего процесса и окружающей территорией (известно, что более 20 % несчастных случаев при эксплуатации дорожно-строительных машин происходит из-за недостаточной обзорности). Эти требования достигаются различными конструктивными решениями, например, башенные краны оснащают унифицированными кабинами, световые проемы которых расположены по основным направлениям обеспечения обзорности. Для машин, взаимодействующих с другими машинами в пределах строительной площадки, обзор должен быть круговым. Это достигается увеличением проемов окон, уменьшением числа и ширины перемычек, установлением системы внутренних и внешних зеркал.

2 *Удобное расположение рабочего места машиниста и пульта управления*; так в конструкции сидений должны быть предусмотрены его регулировка по высоте и наклону спинки сидения; при необходимости целесообразно конструировать сиденья с переменной жесткостью подвески. Кроме того, расположение рабочего места должно быть таким, чтобы выполнение операций управления не требовало от оператора резких изменений положения тела, рук или ног. Средства управления (рычаги, педали, кнопки и др.) следует располагать с учетом частоты их включения в зоне легкой досягаемости или же в оптимальной зоне управления.

3 *Оснащение рабочего места оператора активной вибрационной защитой от низко- и высокочастотных колебаний*. Влияние вибрации на человека зависит от многих факторов (спектральный состав, место приложения, направление и продолжительность действия). Наиболее опасными являются низкочастотные вибрации с частотой 1–30 Гц, поскольку в этом диапазоне находятся собственные частоты большинства внутренних органов человека и может возникнуть не-

благоприятный резонансный эффект. Защищает от вибраций, как правило, сиденье оператора. В зависимости от типа машины и условий ее эксплуатации используют сиденья с переменной или постоянной жесткостью подвески. В машинах, эксплуатирующихся в стационарных условиях (например, башенные краны), применяют сиденья без подвесок, в одноковшовых экскаваторах, катках, асфальтоукладчиках, стреловых самоходных кранах применяют сиденья с короткоходовой подвеской, в скреперах, погрузчиках и автогрейдерах – сиденья с длинноходовой подвеской.

4 *Поддержание параметров среды с учетом физиологических возможностей человека*, в том числе оснащение кабины системой кондиционирования и очистки воздуха, обеспечивающей заданный уровень температуры и влажности воздушной среды, а также допустимое содержание вредных примесей. Вероятность возникновения опасных ситуаций зависит от работоспособности оператора и его реакции на непредвиденные обстоятельства, которая во многом определяется микроклиматом кабины. Комплекс физических параметров среды (т. е. микроклимат) включает температуру, влажность и скорость движения воздуха, а также наличие вредных примесей и запыленности воздуха. Температуру в кабине целесообразно поддерживать в интервале 14–28 °С при относительной влажности воздуха 60–80 %. Скорость подачи воздуха не должна превышать 0,5 м/с при температуре до 22 °С и 1,5 м/с – выше 22 °С. Запыленность воздуха в кабине должна быть не более 1–4 мг/м³.

5 *Ограничение звука и шума*. Чувствительность человека к восприятию звука существенно зависит от его частоты. Нормативными документами установлены предельно допустимые уровни звука в интервале частот от 3 до 8000 Гц, а также время их воздействия. Так, например, недопустимо даже кратковременное пребывание человека без специальных средств защиты в зонах с уровнем звука свыше 135 дБ. Допустимые уровни и дозы шума, учитывающие акустическую энергию, воздействующую на человека за определенный период времени, нормированы в стандартах для различных условий работы. Рекомендуемая продолжительность пребывания человека в условиях повышенного шума зависит от его уровня. Если при предельно допустимом уровне шума (85 дБ) человек может работать не более 8 часов, то повышение шума на каждые 3 дБ сокращает продолжитель-

ность работы в 2 раза. В машинах имеются в основном аэродинамические источники шума, в частности, выпускная система двигателя, система впуска воздуха, вентилятор системы охлаждения. Снижение шума достигается различными конструктивными и технологическими способами: уменьшение допусков при изготовлении и сборке деталей и узлов, совершенствование кинематической схемы, применение вязкоупругих материалов и демпфирующих покрытий, снижение жесткости и твердости взаимодействующих деталей, уравнивание вращающихся масс. Кроме того, источники шума изолируют звукопоглощающими капотами, экранами и другими устройствами подобного типа, а также используют специальные глушители для двигателей внутреннего сгорания и некоторых машин с пневматическими системами.

Помимо отмеченных эргономических факторов, имеются *мероприятия специального назначения*, обеспечивающие безопасность рабочего процесса. К ним относятся предупреждающие и контролируемые методы и средства:

1) защитные ограждения, кожухи и колпаки, предохраняющие от ударного воздействия;

2) защитные кожухи и решетки, которыми должны быть оснащены представляющие повышенную опасность вращающиеся элементы машины (тормозные шкивы, цепные и ременные передачи, открытые зубчатые передачи и др.);

3) ограничительные устройства в виде муфт, предохранительных клапанов, защитных реле и др.;

4) блокировочные приспособления, исключающие поражение электротоком;

5) звуковая и световая сигнализация, предупреждающая о превышении допустимого предела функциональных или параметрических характеристик машины, в том числе для кранов ограничители и сигнализаторы высоты подъема груза, вылета стрелы, их передвижения и вращения;

6) устройства, обеспечивающие устойчивость машины и предохраняющие оператора при опрокидывании;

7) оптимальная освещенность рабочих зон машин; в частности для бульдозеров, автогрейдеров, катков и др. освещенность должна быть не менее 10 лк; освещенность рабочей зоны экскаваторов должна быть в пределах 5–10 лк;

8) сигнальная окраска частей машины, представляющих повышенную опасность для обслуживающего персонала.

Следует отметить важную роль автоматизации машин и средств автоматики в обеспечении безопасности, которые позволяют минимизировать последствия потери бдительности оператора и снизить эмоциональное и психологическое воздействие неблагоприятных ситуаций, возникающих при эксплуатации машин.

Окраску машин и их элементов производят с учетом их функционального назначения, особенностей конструкции, условий эксплуатации, композиционного решения. На основании анализа причин производственного травматизма при эксплуатации машин были выделены основные показатели оценки опыта применения цветов при оформлении машин. К ним относятся цвета: корпуса машины, наружной и внутренней поверхностей оградительных устройств, рукояток и кнопок управления; цвет и фон символа «молния»; цветовое оформление места присоединения заземления; цвета масленок и малозаметных мест смазки, шкалы скоростей, крюков для захвата при транспортировке, неогражденных частей машины и, особенно, рабочих органов.

К основным сигнальным цветам относятся: красный, желтый, зеленый. Красный цвет обозначает запрещение, сигнализирует о непосредственной опасности, возможности аварии, указывает устройства для прерывания процесса или движения. Цветовые решения машин и механизмов, в которых не заложено понятие об опасности, не должны содержать сигнальные и близкие к сигнальным цвета. Красный цвет, для усиления значения основного сигнала в сочетании с белым, используется для ограждения участков машин и знаков, запрещающих различные действия, а также для символов «молния», кнопок и рычагов выключения и аварийных «Стоп».

Желтый цвет предназначен для предупреждения, сигнализации о необходимости внимания, осторожности действий. Для усиления значения желтого используется черный цвет. Контрастные желтые и черные полосы наносятся на открытые предметы и задние движущиеся части машин, причем должны соблюдаться нормативы полос.

Зеленый цвет – разрешающий, сигнализирующий о безопасности. Зеленый цвет может быть подчеркнут белым; его можно увидеть в

кнопках и рычагах «Пуск», знаках, разрешающих различные действия, для информации, направленной на обеспечение безопасности.

Вспомогательные сигнальные цвета – оранжевый, синий, черный и белый. Оранжевый цвет занимает промежуточное значение между красным и желтым; для его контраста используется черный цвет. Применяется для повышения контраста между машинами и фоном для строительных, дорожных и других машин, работающих на открытом воздухе. Допускается нанесение цвета на внутренние поверхности ограждающих устройств и ограждаемые участки машин и механизмов.

Синий цвет подчеркивается белым, является носителем производственно-технической информации, не связанной с понятиями об опасности или предосторожности (технические таблицы, плакаты, инструкции).

Назначение черного цвета – усиление контраста основных цветов безопасности, надписей на желтом, белом и оранжевом фоне. Применяется для обозначения направления движения и пояснительных надписей, а также для приборов контроля, оксидированных инструментов.

Белый цвет усиливает контраст основных цветов безопасности, надписей на красном, зеленом, синем и черном фоне. Им обозначаются границы проходов, проездов, рабочих мест, направления движения и пояснительные надписи на знаках.

На элементах оборудования сигнальные цвета могут наноситься в виде знаков, чередующихся полос, символов. Например, символ «молния» предупреждает об опасности поражения электрическим током, символы зубчатых колес и ременной передачи информируют об опасности травмирования ими и т. д.

Для безопасности труда важную роль имеет значение сигнальных цветов при оформлении шкал скоростей и давлений.

При окраске машины, несмотря на многообразную палитру цветов, рекомендуется использовать не более двух-трех цветов. Целесообразно цветовые решения принимать в соответствии с климатическими условиями эксплуатации машины. В светлые тона рекомендуется окрашивать внутренние поверхности корпусных деталей. Такая окраска облегчает сборку, контроль и регулировку механизмов. В яркие цвета окрашиваются внутренние поверхности открывающихся

деталей. При окраске машин желтый цвет рекомендуется как весьма надежный. Согласно статистике машины желтого цвета значительно реже попадают в дорожные происшествия. Опыты показывают, что автомобиль, окрашенный в желтый цвет, воспринимается водителем на 4 м ближе, чем автомобиль серого цвета.

Сигнальными цветами окрашиваются некоторые элементы строительных конструкций, производственных помещений. К ним относятся транспортные проемы в стенах производственных и складских помещений (открытые проемы, двери, ворота) перепады в плоскости пола и перила; ограждения открытых проемов в полу, углы стен при наличии перекрывающегося движения людей и транспортных средств, ступени лестниц. Преобладающим при оформлении строительных конструкций является желтый цвет, контрастирующий с черным.

Производственное оборудование рекомендуется окрашивать в светлые серые, голубые, зеленые тона, создающие ощущение легкости, прохлады, покоя. Следует выделять одним цветом рабочую зону, другим – пульт управления, и т. д., что способствует достижению большей выразительности. Цвет фона должен контрастировать с цветом обрабатываемых деталей. Для холодных серых оттенков стали и алюминия в качестве фона рекомендуются бежевые цвета желтых оттенков. Теплые металлы медь и латунь будут контрастировать с фоном в гамме холодных серых цветов. Применение контраста помогает повышать производительность труда и улучшить качество работ.

2.4 Технологичность конструктивных решений

При наличии нескольких вариантов исполнения, как правило, выбирается наиболее простой и дешевый. При этом конструкция всегда находится в неразрывной связи с материалами и технологией. Создаются новые материалы, появляются новые методы их обработки и в соответствии с этим изменяются конструктивные исполнения. Поэтому при решении любой конструкторской задачи необходимо учитывать взаимосвязь и взаимовлияние конструкции, материалов и технологий. Важную роль в обеспечении их баланса играет технологичность конструкции.

Технологичность – это совокупность свойств конструкции, обеспечивающая удовлетворение эксплуатационных требований при ми-

нимальных затратах на ее изготовление. При этом следует учитывать конкретные условия производства и объем выпуска.

В процессе технологической подготовки производства конструкцию машины отрабатывают на технологичность деталей, сборочных единиц и машины в целом. Технологический процесс должен быть выбран в соответствии с конструктивным решением. При этом само решение можно совершенствовать с учетом возможностей процесса, но без ущерба для функциональных качеств детали.

Общими подходами к выбору конструктивных решений независимо от функции машины и применяемых технологий и материалов являются *простота геометрической формы, плавные переходы от одного элемента конструкции к другому и унификация деталей, сборочных единиц и агрегатов.*

Для обеспечения необходимого уровня технологичности конструкции машины, а также ее сборочных единиц и деталей необходимо выполнить ряд требований, к которым относятся:

- 1) оптимальное расчленение машин и их составных частей на независимые сборочные единицы;
- 2) широкое использование принципов конструкторской и технологической преемственности, а также унификации, стандартизации и симплификации;
- 3) рациональное ограничение марок и сортментов материалов;
- 4) рациональное назначение допусков и параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей;
- 5) разработка деталей, форма которых позволяет использовать высокопроизводительные методы и оборудование механической обработки;
- 6) обеспечение удобства базирования деталей при их обработке;
- 7) соблюдение условий взаимозаменяемости деталей, упрощение сборочных работ и создание возможности их механизации и автоматизации;
- 8) оптимальное упрощение конструкции сборочных единиц и деталей;
- 9) широкое использование стандартных, нормализованных и унифицированных деталей и узлов, а также их конструктивных элементов (модулей зубчатых колес, резьб, радиусов, галтелей и др.).

При отработке конструкции деталей на технологичность следует, прежде всего, учитывать организационно-технические условия их производства, а также возможность реализации эффективных технологических процессов. При этом следует иметь в виду объемы производства и серийность выпуска деталей, поскольку эффективные технические решения в условиях массового производства могут оказаться неэффективными в мелкосерийном производстве (и наоборот).

Конструкция детали должна обеспечивать ее надежное и удобное закрепление на станке и в приспособлении. Жесткость крепления должна быть достаточной для выполнения обработки одним или одновременно несколькими инструментами.

Технологичность конструкции детали во многом связана с выбором баз при обработке детали, от которого зависят точность выполнения заданных размеров и точность обработки детали, конструкции приспособлений, режущего и измерительного инструментов. Поэтому при их выборе руководствуются принципами единства и постоянства баз. Принцип единства баз (совпадение конструкторских, технологических и измерительных баз) обеспечивает минимальную технологическую себестоимость детали из-за отсутствия погрешностей базирования, ухудшающих точность обработки. Принцип постоянства баз (использование одной технологической базы при обработке детали) также способствует повышению точности обработки, что, в конечном счете, отражается на технологичности детали в целом.

Уровень технологичности деталей определяется возможностями их механической обработки. Конфигурация детали должна быть образована из элементов простых геометрических форм (цилиндров, плоскостей, конусов и др.), что позволяет использовать эффективные типовые технологические процессы обработки, а также применять высокопроизводительное оборудование, оснастку, средства механизации и автоматизации производства.

При отработке конструкции деталей на технологичность важную роль играет *уменьшение материалоемкости* изделий, которое обеспечивается комплексным решением ряда задач. Мероприятия по сокращению расхода материалов можно разделить на две группы.

Во-первых, конструкторские мероприятия, которые включают оптимизацию и совершенствование методов расчета, использование принципов конструирования с обеспечением равнопрочности дета-

лей, а также применение материалов со стабильными показателями физико-механических свойств и высокой удельной прочностью.

Важную роль в снижении материало- и энергоемкости играет широкое применение пластмасс и конструкционных композиционных материалов на основе полимеров, поскольку их плотность в 2–4 раза ниже плотности металлов и сплавов. Кроме того, существуют высокопрочные композиты (углепластики, органопластики и др.), армированные волокнистыми наполнителями, которые, как уже отмечалось, обладают высокими показателями удельной прочности. Помимо этого коэффициент их применяемости достигает 0,90–0,95 (для металлов он не превышает 0,5–0,6), а трудоемкость изготовления из них деталей (литьевым и прямым прессованием, литьем под давлением, экструзией и др.) в 5–6 раз ниже, чем изделий из металлов. Поэтому в узлах, агрегатах и механизмах машин, где силовая нагрузка и температурные режимы эксплуатации позволяют использовать детали из полимеров и материалов на их основе, их применение дает выигрыш в трудо-, материало- и энергоемкости. При этом следует отметить, что исходное состояние перерабатываемых полимеров и их технологические характеристики накладывают значительные ограничения на конфигурацию деталей, которые можно из них изготовить.

Во-вторых, технологические мероприятия, которые включают разработку конструкций деталей под ресурсосберегающие технологические процессы их изготовления, использование эффективных технологических методов упрочнения материалов с учетом состава материала и свойств заготовки, расширение номенклатуры используемых видов проката, а также уменьшение поля допусков на его размеры.

При использовании робототехнических систем, станков с ЧПУ, гибких автоматизированных производств имеют место специфичные требования к технологичности конструкций. Эффективность их применения связана с возможностью ускорить режимы обработки, уменьшить сроки подготовки программ и сократить время на переналадку оборудования при переходе к деталям другого типоразмера. Наиболее технологичными являются детали, конструкция которых обеспечивает обработку поверхностей с одной установки и одним комплектом инструмента без применения сложных приспособлений и поворотных устройств. При этом симметричность конструкции детали

сокращает количество требуемых программ. Кроме того, размеры конструктивных элементов должны быть унифицированы и приведены в соответствие размерам стандартного режущего инструмента. Для повышения точности базирования на станках с ЧПУ целесообразно предпочтительно обрабатывать базовые поверхности на универсальных станках.

Применение промышленных роботов определяет свои требования к технологичности конструкций. Они зависят от вида производства, поскольку промышленные роботы используют при основных (литье, механическая обработка, сварка, сборка, окраска и др.) и вспомогательных (транспортных, складских, погрузочно-разгрузочных и т. п.) технологических процессах. Применение этих средств во многом определяется соответствием массы и конфигурации заготовок конструкции устройств захвата и техническим характеристикам используемых роботов. Наиболее технологичными для автоматизации технологического процесса являются заготовки и детали, при изготовлении которых можно применять роботы сравнительно простой конфигурации. В механообрабатывающем производстве с помощью промышленных роботов в первую очередь целесообразно автоматизировать установку на станок деталей простейших типов, которые имеют однородные по форме и расположению поверхности для базирования и захвата. Применять роботы при обработке деталей сложной конфигурации с разнообразием форм и различным расположением базовых поверхностей (вилки, рычаги, сложные корпуса и т. д.) в условиях мелкосерийного производства достаточно сложно и неэкономично.

Необходимость качественного проведения сборочных работ определяет ряд требований к конструкции машин. Конструкция должна иметь простую компоновку и состоять из минимально возможного числа деталей и сборочных единиц. Следует максимально использовать стандартные, нормализованные и унифицированные детали и сборочные единицы, что способствует сокращению их общей номенклатуры и типоразмеров, повышению серийности изготовления и снижению себестоимости.

Для повышения точности сборки желательно ограничивать число кинематических и сборочных размерных цепей, а также совмещать технологические и измерительные базы. Все это повышает уровень взаимозаменяемости и сокращает объем ручных пригоночных работ.

Конструкция машины должна обеспечивать выполнение общей сборки из предварительно собранных узлов. Кроме того, следует предусматривать возможность параллельной сборки сборочных единиц, в результате чего значительно сокращается цикл сборки, а также появляется возможность контроля качества каждой сборочной единицы.

Сборочные единицы должны быть рассчитаны на минимальное количество различных видов технологических процессов сборки (соединение болтами, клепкой, сваркой, пайкой, склеиванием). Они должны представлять собой законченные изделия для конкретного производства и иметь минимально возможное число сочленений.

Расчленение сложной сборочной единицы должно предусматривать соединение простых сборочных единиц в определенной последовательности так, чтобы сборочные операции не мешали выполнению других. При этом следует учитывать возможность замены любой простой сборочной единицы без нарушения других соединений простых сборочных единиц.

Конструкция сборочной единицы должна обеспечивать возможность проведения регулировочных и контрольных операций.

2.5 Обеспечение новизны технических решений

Достижение высоких технико-экономических показателей создаваемой техники зависит не только от высокого изобретательского уровня технических решений, на основе которых разрабатывается продукция, но и от степени ее новизны, качества и конкурентоспособности. В связи с этим необходимо всестороннее изучение конъюнктуры рынка посредством комплексного анализа патентной, научно-технической и экономической информации, т. е. **патентные исследования**.

В соответствии с требованиями Государственного стандарта Республики Беларусь "Патентные исследования. Содержание и порядок проведения" (СТБ 1180-99) патентные исследования – это исследования технического уровня и тенденций развития объектов техники, их патентоспособности, патентной чистоты, конкурентоспособности на основе патентной и другой информации.

Патентные исследования проводятся с целью исследования технического уровня техники, выявления тенденций и направлений ее развития; технико-экономического анализа и обоснования выбора технических, художественно-конструкторских решений, отвечающих требованиям создания новой техники, а также определения их патентной чистоты, патентоспособности и обоснования целесообразности правовой охраны.

Цели патентного поиска в целом определяются задачами использования патентной информации на конкретной стадии создания, освоения и реализации новой техники.

При планировании тематики патентный поиск проводится для того, чтобы выяснить, решалась ли поставленная техническая задача ранее, какие решения охраняются патентами, какие предприятия работают в данной области техники, каковы перспективы разработки. Поиск проводится также с целью технико-экономического анализа изобретений при прогнозировании тенденций развития техники.

На стадии создания техники, включающей проведение научных исследований и разработку конструкторско-технологической документации, основными целями патентного поиска являются выявление имеющихся технических решений и определение уровня этих решений, а также отбор перспективных в научно-техническом отношении изобретений, определение патентоспособности создаваемых технических решений.

На стадии освоения и реализации новой техники изучение патентной информации необходимо для определения патентной чистоты выпускаемой продукции, юридически грамотного использования новейших изобретений, поскольку выпуск продукции, подпадающей под действие патентов иных владельцев, влечет за собой ряд санкций, вплоть до ареста, запрета дальнейшего выпуска, наложения штрафа или обязательств компенсации материальных потерь патентообладателю. За рубежом затраты на патентование довольно велики, особенно сильно они увеличиваются с каждым последующим годом срока действия патента.

В этой связи общим правилом при освоении новой продукции должно быть наличие ее патентной чистоты. Продукция может обладать патентной чистотой в следующих случаях:

– все технические решения (общая схема, конструкция частей, материалы, техпроцесс) запатентованы разработчиком и производителем продукции (это наиболее предпочтительный вариант, но требует больших интеллектуальных затрат);

– все технические решения выполнены в соответствии с лицензиями иных патентообладателей (такой вариант сопряжен обычно с наибольшим первоначальным вкладом средств);

– все технические решения оговорены в патентах, срок действия которых уже истек, или являются общеизвестными и не подлежащими патентованию (этот вариант самый дешевый, но он не позволяет создать конкурентоспособную продукцию);

– в продукции имеет место соотношение упомянутых вариантов.

Патентная чистота объекта – это понятие, неразрывно связанное с существованием патента, предоставляющего его владельцу исключительное право на использование изобретения. При этом следует помнить, что если хотя бы на один элемент продукции действует патент, то вся продукция в целом не удовлетворяет требованиям патентной чистоты. Однако изделие может обладать патентной чистотой в тех случаях, когда оно подпадает под патенты, срок действия которых истек, или в случае отсутствия действующего патента на территории данной страны. Так, например, изобретение, подпадающее под действие патента на территории одной страны, обладает патентной чистотой на территории другой страны. Таким образом, патентная чистота является понятием относительным. Она определяется только в отношении конкретных стран и только на определенную дату.

Проверка патентной чистоты изделий, выпускаемых предприятиями, является обязательной на стадии постановки продукции на производство. Проверке на патентную чистоту подлежат результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, объекты техники, технологии, технологические процессы, выставочные экспонаты, государственные стандарты, комплектные поставки, объекты капитального строительства, объекты лицензий.

Проверку на патентную чистоту проводят научно-исследовательские институты и проектные организации, разрабатывающие новые изделия; организации, изготавливающие данные изделия; организации, реализующие данные изделия.

Государственная защита интеллектуальной собственности обеспечивает для ее владельца ее охрану. Защитить можно только те технические решения, факт использования которых может быть проверен и установлен доступными государству средствами. Невозможно защитить техническое решение, если оно при этом не опубликовано – автор не сможет доказать, что это он изобрел данное решение. Невозможно защитить опубликованный метод расчета, так как его использование практически невозможно проконтролировать, а полученные с помощью его результаты – не основания для доказательства заимствования метода. Но имеются средства (юридические и технические) защиты компьютерных программ для расчета и конструирования, в которых воплощены новые и известные методы.

Не могут быть защищены прибор, оборудование или машина в целом. защите подлежит принципиальная структура, геометрия и связи отдельных частей, а также визуально воспринимаемая характеристика объекта.

Патент, полученный у государства, обеспечивает охрану предлагаемого технического решения только на территории данного государства. Государство берет на себя охрану исключительного права патентообладателя на использование патентуемого решения при определенных условиях, в том числе не затрагивать интересы, обусловленные действующими патентами и способствовать экономическому развитию государства. Это необходимо учитывать при выборе стран поиска информации и определении ретроспективности поиска. Поиск должен проводиться среди фондов стран, в которых наиболее развита данная область техники, или стран, в которые будет осуществляться экспорт продукции или продажа лицензий. Технический уровень и тенденции развития техники должен оцениваться путем анализа патентной литературы не старше 15 лет. Новизна разработок оценивается патентным поиском, как правило, на глубину порядка 50 лет, а при проверке объекта на патентную чистоту глубина поиска определяется сроком действия патента в стране поиска. Глубина поиска по источникам конъюнктурно-экономической информации ограничивается пятью годами.

Задача конструктора состоит в создании машин, отвечающих потребностям экономики, дающих наибольший экономический эффект и обладающих наиболее высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями:

- высокой производительностью, надежностью, экономичностью;
- высоким техническим ресурсом и степенью автоматизации;
- малыми габаритами и массой, материало- и энергоемкостью, объемом и стоимостью ремонтных работ;
- простотой и безопасностью обслуживания;
- удобством управления, сборки и разборки.

В конструкции машин необходимо соблюдать требования технической эстетики. Машины должны иметь красивый внешний вид, изящную, строгую отделку.

Значимость каждого из перечисленных факторов зависит от функционального назначения машины:

- в машинах-генераторах и преобразователях энергии на первом плане стоит значение КПД, определяющего совершенство преобразования затрачиваемой энергии в полезную;
- машинах-орудиях – производительность, четкость и безотказность действия, степень автоматизации;
- металлорежущих станках – производительность, точность обработки, диапазон выполняемых операций;
- приборостроении – чувствительность, точность, стабильность показаний;
- транспортной технике – малая масса конструкции, высокий КПД двигателя, обуславливающий небольшой расход топлива.

Проектируя машину, конструктор должен конструировать, не слепо копируя существующие образцы, а выбирая из арсенала конструктивных решений современного машиностроения наиболее эффективные в данных условиях; уметь сочетать различные решения и находить новые, улучшенные, т. е. конструировать с творческой иници-

ативой на уровне изобретений; учитывать динамику развития соответствующей отрасли машиностроения.

Надежность машин в первую очередь определяется комплексом мер, обеспечивающих их работоспособность.

Безаварийность работы и длительность межремонтных сроков во многом зависят от правильности эксплуатации, бережного отношения к машине, тщательного ухода, своевременной профилактики, предотвращения перегрузок. Но было бы неверным всецело полагаться на качество обслуживания. Условия правильной эксплуатации машины должны быть заложены в ее конструкции. Необходимо обеспечить надежную работу даже в условиях недостаточно квалифицированного обслуживания. Если машина утрачивает работоспособность в неумелых руках, это значит, что конструкция недостаточно продумана в отношении ее надежности.

3.1 Обеспечение надежности узлов машин

Из многочисленных технико-экономических, конструктивных, технологических и эксплуатационных показателей, характеризующих качество и технический уровень машин, наиболее значимым является **надежность**. Она существенно влияет на производительность работ, продолжительность и трудоемкость технического обслуживания и ремонта, потребность в запасных частях и материалах для производства ремонтных работ и, в конечном счете, на себестоимость машины. Управление надежностью осуществляется на всех этапах создания и использования машин. Уровень надежности закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и поддерживается при эксплуатации машины.

Надежность характеризует способность машины сохранять во времени свои технические характеристики и эксплуатационные показатели. Вместе с тем со временем под воздействием механических нагрузок, окружающей среды, перепадов температуры и радиации происходит старение ее элементов, что сопровождается ухудшением функциональных свойств вплоть до перехода машины в неработоспособное или предельное состояние. В основе нарушений ее работоспособности лежат процессы изменения формы и свойств материалов деталей, конструкций и узлов машины.

Различают исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное **состояния машин**.

В исправном состоянии машина соответствует всем требованиям нормативно-технической документации, в неисправном – не соответствует хотя бы одному из них.

В работоспособном состоянии машина способна выполнять заданные функции и сохранять значения всех параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией, в неработоспособном – не способна выполнять заданные функции, если хотя бы один параметр не соответствует этим требованиям.

Как видно из этих определений, исправность как понятие шире, чем работоспособность. Исправная машина должна удовлетворять всем требованиям, а работоспособная – только тем, которые обеспечивают ее нормальное функционирование, т. е. машина может быть работоспособной, но неисправной (например, машина с вмятиной на капоте).

Предельное состояние машины – это состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена по ряду причин:

- 1) неустранимое ухудшение требований безопасности;
- 2) недопустимое ухудшение параметров по сравнению с заданными значениями;
- 3) недопустимое снижение эффективности эксплуатации;
- 4) необходимость проведения среднего или капитального ремонта.

За критерий предельного состояния можно принять признак или совокупность признаков, характеризующих нарушения работоспособного состояния машины. Для машины в целом к ним целесообразно отнести следующие *признаки*:

- 1) необходимость ремонта или замены нескольких составных частей машины;
- 2) необходимость полной разборки машины, обусловленной повреждением базовой сборочной единицы (например, несущей рамной конструкции).

Для узлов и агрегатов машины критериями предельного состояния может служить необходимость:

- 1) замены или трудоемкого ремонта корпусной детали;
- 2) замены или ремонта нескольких основных деталей;

3) трудоемкого ремонта при выходе одного из основных параметров функционирования машины за пределы, установленные нормативно-технической документацией.

Количественная оценка выбранного критерия, как правило, базируется на требованиях нормативно-технической документации и зависит от характера отказа.

Последствием предельного состояния деталей является их замена, а последствием предельного состояния машины, а также ее узлов и агрегатов – списание или капитальный ремонт.

Как отмечалось, переход машины или ее элементов из работоспособного в неработоспособное состояние происходит после наступления отказа – события, которое заключается в нарушении работоспособности машины. Иными словами, **отказ** можно квалифицировать как *состояние машины, при котором она частично или полностью теряет свою работоспособность и не может выполнять заданные функции, регламентированные нормативно-технической документацией* (стандартами, техническими условиями и др.). Время, затрачиваемое на восстановление машины в условиях эксплуатации, принято называть простоями. Причины перехода машины в неработоспособное состояние могут быть самыми разными. Для облегчения их выявления и устранения причин возникновения отказы целесообразно классифицировать по ряду основных признаков: по критерию и причине возникновения, развитию и сложности устранения отказа.

По критерию отказы разделяют на функциональные и параметрические. *Функциональные* отказы приводят к частичному или полному прекращению выполнения функций машины в целом или ее элементов. Очень часто отказы функционирования связаны с разрушениями элементов (поломками, недопустимыми деформациями, увеличенным износом и др.).

Параметрические отказы характеризуются отклонением значений параметров функционирования элементов машин за пределы допускаемых норм. К ним можно отнести увеличенный расход горюче-смазочных материалов, состав выбрасываемых в атмосферу вредных веществ, уровень шума и вибрации и др. Как известно, подобные отказы не препятствуют функционированию машины, однако с учетом требований нормативно-технической документации машина считается неработоспособной.

По причине возникновения отказы разделяют на конструкционные, технологические и эксплуатационные. *Конструкционные* отказы могут быть обусловлены отказами на этапе проектирования и конструирования. К ним относятся неудачная конструкция сборочной единицы или узла машины, ошибочно выбранный материал, неверно подобранная посадка в соединениях, несоответствие расчетных данных по прочности и износостойкости деталей и узлов машины нагрузочным режимам ее эксплуатации.

Технологические отказы могут возникать на этапе изготовления машины из-за нарушения требований технологии и контроля состояния ее элементов. К ним относятся дефекты в материале деталей, нарушение расположения поверхностей и осей при механической обработке деталей, несоблюдение режимов термической и химико-термической обработки, отступление от условий сборки-разборки узлов и машины в целом.

Эксплуатационные отказы могут быть связаны с нарушениями режимов работы или правил эксплуатации машины, например, с увеличенными нагрузками, превышающими установленные пределы, с низким уровнем технического обслуживания, ошибочным выбором горюче-смазочных материалов. Кроме того, они могут быть следствием естественного старения или изнашивания.

Конструкционные и технологические отказы выявляются в основном в приработочный период. Количество эксплуатационных отказов резко возрастает на заключительной стадии эксплуатации машины в основном из-за увеличения износа деталей в узлах трения машины.

По условиям возникновения и развития отказы разделяют на внезапные и постепенные. Наиболее опасными для машины являются *внезапные* отказы, которые характеризуются резким (скачкообразным) ухудшением одного или нескольких параметров машины. Как правило, они возникают в результате случайного внезапного воздействия внешних факторов, превышающих допускаемые нормы, или грубых нарушений условий эксплуатации (поломок, ударов, перегрузок и др.). Вследствие этого элементы машины теряют свои свойства, необходимые для нормального функционирования машины, или же разрушаются.

Постепенные отказы характеризуются постепенным ухудшением одного или нескольких параметров машины, обусловленным в ос-

новном процессах старения деталей и узлов машины. Как правило, развитие постепенных отказов можно предупредить с помощью системы технического обслуживания и ремонта машины.

По сложности устранения отказов их можно разделить на отказы, устраняемые при техническом обслуживании, в ходе текущего ремонта, при капитальном ремонте. Так, например, в средней по сложности машине, производимой ранее в СССР, отказ появлялся через 15–20 дней эксплуатации. Для его устранения требовалось в среднем 50–70 чел.·ч труда квалифицированных специалистов.

Отказы приводят к частичной или полной потере работоспособности машины. Анализ причин их возникновения и понимание физической сущности отказов являются неременным условием решения задач обеспечения надежности машины.

Дорожные, строительные, путевые и другие машины являются сложными системами, состоящими из отдельных элементов, которые находятся между собой во взаимодействии. Отказ любого элемента в большей или меньшей степени отражается на работоспособности машины в целом, поскольку она зависит как от работоспособности входящих в нее элементов, так и от способа их взаимодействия. При оценке надежности машин различают два основных вида соединений – последовательное и параллельное.

Последовательным (рисунок 3.1, а) считают такое соединение элементов, составляющих систему, при котором отказ каждого из них приводит к выходу из строя всей системы. К таким системам относятся большинство приводов и механизмов передач машин, поскольку выход из строя любого элемента (подшипника, муфты, шестерни, насоса) вызывает потерю работоспособности всей системы. Конструктивно эти элементы не обязательно последовательно соединены, но в структурной схеме они расположены в последовательном соединении.

Параллельным соединением называют совокупность элементов, работоспособность которой нарушается при условии отказа всех па-

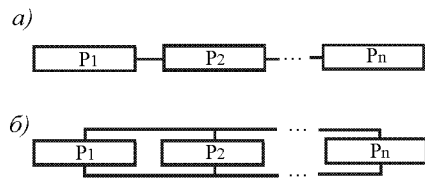


Рисунок 3.1 – Структурные схемы надежности систем:
а – с последовательным соединением элементов; б – с параллельным соединением

раллельных элементов, входящих в совокупность (рисунок 3.1, б). В случае отказа одного из элементов функции всего соединения распределяются между другими его элементами. Следует отметить, что параллельное соединение элементов является основой резервирования (метода повышения надежности системы путем введения дублирующих элементов).

Поскольку резервирование у машин практически не используют, любую машину следует рассматривать как систему, состоящую из последовательно соединенных элементов. При этом **вероятность безотказной работы машины** P_M равна произведению вероятностей P_i безотказной работы ее элементов:

$$P_M = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i .$$

Для случая возникновения внезапных отказов, которые подчиняются экспоненциальному закону распределения, данное выражение приобретает вид

$$P_M = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_0 t} ,$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$;

λ_i – интенсивность отказов i -го элемента;

t – время работы.

Соответственно **вероятность отказа**

$$F_M = 1 - e^{-\lambda_0 t} .$$

Из этого следует, что надежность сложной системы при последовательном соединении элементов меньше надежности любого элемента и снижается с увеличением количества элементов, составляющих систему. Поэтому при проектировании новой машины стремятся не усложнять конструкцию машины.

Повышение надежности дорожно-строительных, путевых, подъемно-транспортных машин и оборудования является одним из основ-

ных путей повышения эффективности производства соответствующих работ. При этом следует учитывать современные тенденции развития машиностроения в целом, направленные на минимизацию удельных показателей энерго- и материалоемкости (т. е. мощности силовой установки и массы машины, приходящихся на единицу вырабатываемой ею продукции). Решение этой сложной задачи возможно при условии использования прогрессивных современных материалов и ресурсосберегающих технологий.

3.2 Стандартизация и унификация

Снижение стоимости машиностроительной продукции представляет комплексную задачу – производственную и конструкторскую. Основную роль играет рационализация производства (механизация и автоматизация производственных процессов, концентрация технологических операций, специализация заводов, производственное кооперирование и др.). Эти меры осуществимы и дают наибольший эффект при больших масштабах производства и стабильной продукции и здесь на первый план выступает роль конструктора. Он должен обеспечить высокий потенциал развития, заложив в конструкцию предпосылки изготовления одной модели в течение длительного периода времени при наибольшем возможном масштабе выпуска, т. е. создать конструкцию, обладающую широкой применяемостью и ресурсами совершенствования.

Большое значение имеет уменьшение количества типоразмеров машины путем рационального выбора типажа и ее параметров, что позволяет повысить серийность производства и снизить стоимость изготовления.

Важно обеспечить технологичность конструкции за счет применения прогрессивных методов обработки при одновременном повышении качества, точности и взаимозаменяемости частей, т. е. за счет технологичности сборки и ремонта.

Значительный экономический эффект дают стандартизация и унификация деталей, узлов и агрегатов. Под *стандартизацией* понимают регламентирование конструкции и типоразмеров широко применяемых машиностроительных деталей, узлов и агрегатов.

Почти в каждой специализированной проектной организации стандартизованы типовые для данной отрасли машиностроения детали и узлы. Стандартизация ускоряет проектирование, облегчает изготовление, эксплуатацию и ремонт машин и при целесообразной конструкции стандартных деталей способствует повышению надежности машин. Она дает наибольший эффект при сокращении числа применяемых типоразмеров стандартов, т. е. при их унификации.

Преимущества стандартизации реализуются в полной мере при централизованном изготовлении стандартных изделий на специализированных заводах. Это разгружает машиностроительные заводы от трудоемкой работы по изготовлению стандартных изделий и упрощает снабжение ремонтных предприятий запасными частями.

Стандартизация является существенным фактором снижения себестоимости машин и ускорения проектирования. Однако применение стандартов не должно стеснять творческую инициативу конструктора и препятствовать поискам новых, более рациональных конструктивных решений. При конструировании машин не следует останавливаться перед применением новых решений в областях, охватываемых стандартами, если эти решения имеют явное преимущество.

Под *унификацией* как методом стандартизации понимают рациональное сокращение многообразия типов конструкций (а также материалов, техпроцессов изготовления, документации и др.) изделий одинакового функционального назначения. Применение унификации позволяет существенно уменьшить количество конструкторской документации и значительно сократить сроки разработки изделий и объемы испытаний. Сокращение общего числа типоразмеров при унификации составных частей конструкции обеспечивает увеличение серийности производства. Унификация позволяет увеличить серийность и тем самым снизить стоимость изготовления деталей. Она облегчает обслуживание и ремонт за счет уменьшения номенклатуры инструмента и запасных частей, позволяет предприятию специализироваться на изготовлении ограниченного числа деталей и соединений, а остальные получать в готовом виде.

Для конструкторской унификации следует отметить следующие основные направления работ:

- 1) создание или выбор базовых конструкций машины на основе наиболее эффективных разработок;

2) использование унифицированных блочно-модульных конструкций;

3) реализация преемственности технических решений за счет заимствования узлов машины (из других конструкций или предшествующих разработок);

4) ограничение номенклатуры применяемых изделий и материалов.

Технологическая унификация связана с конструкторской и зависит от преемственности технологических процессов. Повышение уровня технологической унификации позволяет:

1) улучшить преемственность оборудования, оснастки и технологических процессов, что сокращает затраты на подготовку производственной базы для выпуска новых машин;

2) создать типовую, универсальную, переналаживаемую и сборочную технологическую оснастку, что обеспечивает уменьшение количества объектов работ и ресурсных затрат;

3) применить типовые технологические процессы, что способствует внедрению групповых форм организации труда, сокращению сроков и затрат на разработку необходимой технологической документации при подготовке производства машин.

Унификация состоит в многократном применении в конструкции одинаковых элементов, что способствует сокращению номенклатуры деталей и уменьшению стоимости их изготовления, упрощению эксплуатации и ремонта машин, а также сокращению номенклатуры обрабатывающего, мерительного и монтажного инструмента. Унифицируют посадочные сопряжения (по посадочным размерам, посадкам и точности размеров), резьбовые соединения (по диаметрам, типам резьб, посадкам и точности размеров, размерам под ключ), шпоночные и шлицевые соединения (по диаметрам, формам шпонок и шлицев, посадкам и точности размеров), зубчатые зацепления (по модулям, типам зубьев и точности размеров), фаски и галтели (по размерам и типам) и т. д.

Унификация оригинальных деталей и узлов может быть *внутренней* (в пределах данного изделия) и *внешней* (заимствование деталей с иных машин). Наибольший экономический эффект дает заимствова-

ние деталей серийно изготавливаемых машин, когда детали можно получить в готовом виде.

Унификация марок и сортамента материалов, электродов, типоразмеров крепежных деталей, подшипников качения и других стандартных деталей и узлов облегчает снабжение завода-изготовителя и ремонтных предприятий материалами, стандартными и покупными изделиями.

Унификация представляет собой эффективный и экономичный способ создания на базе исходной модели ряда машин одинакового назначения, но с различными показателями мощности и производительности.

При конструировании машин следует предусматривать резервы их развития, что позволяет систематически совершенствовать машины и поддерживать их показатели на уровне возрастающих требований техники, избавляет от необходимости периодической замены устаревающих моделей, обеспечивает на долгие годы стабильный выпуск одной конструкции, дает большой экономический эффект и является одним из главных способов снижения стоимости машиностроительной продукции.

Конкретные резервы, закладываемые в конструкцию, зависят от назначения машины. У тепловых машин исходная модель должна обладать резервом рабочего объема, ресурсами увеличения частоты вращения и улучшения теплового процесса. Машины-орудия, для которых на первом плане стоит производительность, должны иметь ресурсы повышения быстроходности, увеличения объема и диапазона выполняемых операций. И во всех случаях следует обеспечить запасы прочности и жесткости исходной модели. Это не значит, что базовая модель должна иметь избыточную массу. Важно усилить наиболее напряженные детали и узлы.

Совершенствование машин нередко требует последующего введения дополнительных агрегатов (редукторов, коробок скоростей, средств автоматизации). Необходимо обеспечить возможность их установки без нарушения целостности машины, оставляя для них место и в некоторых случаях заранее предусматривая привалочные поверхности и крепежные точки.

Предусмотрев в конструируемых машинах исходные резервы, следует непрерывно совершенствовать машины, пользуясь появляющимися с течением времени новыми технологическими и конструктивными приемами и добиваясь снижения массы, энергоемкости, повышения долговечности, степени автоматизации и удобства обслуживания.

3.3 Общие правила конструирования

При создании машин следует придерживаться общепринятых правил:

- подчинять конструирование задаче увеличения экономического эффекта, определяемого полезной отдачей машины, ее надежностью и эксплуатационными расходами за весь период использования машины;

- добиваться максимального повышения полезной отдачи путем увеличения производительности машин и объема выполняемых ими операций;

- учитывать возможность снижения расходов на эксплуатацию машин за счет уменьшения энергопотребления, стоимости обслуживания и ремонта;

- предусматривать максимальную степень автоматизации машин с целью увеличения производительности, улучшения качества продукции и сокращения расходов на оплату труда операторов;

- предупреждать техническое устаревание машин, обеспечивая их длительное использование, закладывая в них высокие исходные параметры и предусматривая резервы развития и последовательного совершенствования;

- предусматривать возможность создания производных машин с максимальным использованием конструктивных элементов базовой машины;

- стремиться к сокращению числа типоразмеров машин, добиваясь удовлетворения потребностей экономики минимальным числом моделей путем рационального выбора их параметров, повышения эксплуатационной гибкости, увеличения их полезной отдачи и долговечности;

– конструировать машины с расчетом на эксплуатацию с полным устранением капитальных ремонтов и с заменой восстановительных ремонтов комплектацией машин сменными узлами;

– избегать выполнения трущихся поверхностей непосредственно на корпусных деталях; для облегчения ремонта поверхности трения выполнять на отдельных, легко заменяемых деталях;

– последовательно выдерживать принцип агрегатности; конструировать узлы в виде независимых агрегатов, устанавливаемых на машину в собранном виде;

– по возможности исключать подбор и пригонку деталей при сборке, операции выверки, регулирования деталей и узлов по месту; предусматривать в конструкции фиксирующие элементы, обеспечивающие правильную установку деталей и узлов при сборке;

– обеспечивать необходимую прочность деталей и машины в целом способами, не требующими увеличения массы (придание деталям рациональных форм, применение материалов повышенной и стабильной прочности, введение упрочняющей обработки);

– вводить в машины, узлы и механизмы, работающие при циклических и динамических нагрузках, упругие элементы, смягчающие толчки и колебания нагрузки;

– придавать конструкциям необходимую жесткость не требующими увеличения массы способами (применение пустотелых и оболочковых конструкций, блокирование деформаций поперечными и диагональными связями, рациональное расположение опор и ребер жесткости);

– упрощать обслуживание машин, сокращать объем операций обслуживания, устранять периодические регулировки, конструировать механизмы в виде самообслуживающихся агрегатов;

– предупреждать возможность перенапряжения машины в эксплуатации; вводить автоматические регуляторы, предохранительные и предельные устройства, исключающие возможность эксплуатации машины на опасных режимах;

– устранять возможность поломок и аварий в результате неумелого или небрежного обращения с машиной; вводить блокировки, предупреждающие возможность неправильного манипулирования органами управления; максимально автоматизировать управление машиной;

– исключать возможность неправильной сборки деталей и узлов, нуждающихся в точной координации одного относительно другого; вводить блокировки, допускающие сборку только в нужном положении;

– избегать применения периодического смазывания; предусматривать постоянную и непрерывную подачу смазочного материала к трущимся поверхностям;

– избегать открытых поверхностей трения; заключать механизмы в закрытые корпуса, предотвращающие проникновение грязи, пыли и влаги на трущиеся поверхности;

– обеспечивать надежную страховку резьбовых соединений от самоотвинчивания; внутренние соединения желательно фиксировать применением дополнительных деталей (шплинты, отгибные шайбы);

– предупреждать коррозию деталей применением стойких лакокрасочных и гальванических покрытий и изготовлением деталей из коррозионностойких материалов;

– снижать стоимость изготовления машин путем обеспечения технологичности конструкции, уменьшения металлоемкости, сокращения числа типоразмеров машин;

– уменьшать массу машин путем создания компактных конструкций, применения рациональных кинематических и силовых схем, устранения нерациональных видов нагружения, замены изгиба растяжением-сжатием, а также путем применения легких сплавов и неметаллических материалов;

– упрощать конструкцию машин, избегать сложных многодетальных конструкций;

– заменять во всех случаях, где это возможно, механизмы с прямолинейным поступательно-возвратным движением более рациональными механизмами с вращательным движением;

– обеспечивать максимальную технологичность деталей, узлов и машины в целом, закладывая в конструкцию предпосылки наиболее производительного изготовления и сборки;

– сокращать объем механической обработки, предусматривая изготовление деталей из заготовок с формой, близкой к окончательной форме изделия; заменять механическую обработку более производительными способами обработки без снятия стружки;

– осуществлять максимальную унификацию элементов конструкции, расширять применение стандартных узлов и деталей, соблюдать действующие стандарты для удешевления машины, а также сокращения сроков ее изготовления и доводки;

– экономить дорогостоящие и дефицитные материалы, применяя их заменители; при необходимости применения дефицитных материалов сводить их расход к минимуму;

– соблюдать требования технической эстетики, придавая машинам стройные архитектурные формы; улучшать внешнюю отделку машин;

– сосредоточивать органы управления и контроля по возможности в одном месте, удобном для обзора и манипулирования;

– делать доступными и удобными для осмотра узлы и механизмы, нуждающиеся в периодической проверке;

– обеспечивать безопасность обслуживающего персонала; предупреждать возможность несчастных случаев путем максимальной автоматизации рабочих операций, введения блокировок, применения закрытых механизмов и установки защитных ограждений;

– в машинах с приводом от электродвигателя учитывать возможность неправильного включения двигателя, а в машинах с приводом от двигателя внутреннего сгорания – обратных вспышек; обеспечивать возможность реверсной работы машины или вводить предохранительные устройства (обгонные муфты);

– тщательно изучать опыт эксплуатации машин и оперативно вводить в конструкцию изменения для устранения дефектов, обнаруживающихся в эксплуатации;

– непрерывно совершенствовать конструкцию машин, находящихся в серийном производстве, поддерживая их на уровне возрастающих требований промышленности;

– обеспечивать конструктивный задел, подготавливая выпуск новых машин с более высокими показателями на смену устаревающим;

– проверять новые элементы при проектировании новых конструкций с помощью экспериментов и моделирования;

– изучать тенденции развития отраслей национальной экономики, использующих проектируемые машины; вести перспективное проектирование, рассчитанное на удовлетворение дальних запросов потребителей машин.

3.4 Методика конструирования

Исходным материалом для проектирования служит *техническое задание*, выдаваемое заказчиком и определяющее параметры машины, область и условия ее применения.

К техническому заданию необходимо подходить критически. Конструктор должен хорошо знать отрасль промышленности, для которой проектируют машину. Он обязан проверить задание и в нужных случаях обоснованно доказать необходимость его корректирования.

Не всегда учитывают то обстоятельство, что с момента начала проектирования до срока внедрения машины в промышленность проходит некоторый период времени, как правило, тем более длительный, чем сложнее машина. Этот период складывается из следующих *этапов*: проектирования, изготовления, заводской отладки и доводки опытного образца, промышленных испытаний, внесения выявившихся в ходе испытаний изменений, государственных испытаний и приемки опытного образца. Далее следует разработка технической документации головной серии, изготовление головной серии и ее промышленные испытания. Вслед за этим разрабатывают серийную документацию, подготавливают производство к серийному выпуску и, наконец, организуют серийный выпуск.

В лучшем случае при отсутствии крупных неполадок и осложненный этот процесс длится полтора-два года. Иногда между началом проектирования и началом широкого выпуска машин проходят два-три года и больше. При современных темпах технического прогресса в машиностроении это большой срок. Следует учитывать, что машины с заниженными параметрами, основанные на шаблонных решениях, несовместимых с современными представлениями о роли качества, надежности и ресурсосбережения, устаревают уже к началу серийного выпуска. Работа, затраченная на проектирование, изготовление и доводку образца, оказывается напрасной, а промышленность не получает нужной машины. Поэтому при создании новой машины необходимо опираться не только на свои собственные (предыдущие) разработки и требования заказчика, но и на современные аналоги ведущих разработчиков в данной области, на достижения науки и техники.

Как отмечалось, *конструктивная преемственность* – это использование при проектировании предшествующего опыта конструирования, введение в проектируемый агрегат всего полезного, что есть в существующих конструкциях машин. Почти каждая современная машина представляет собой итог работы конструкторов нескольких поколений. Начальную модель машины постепенно совершенствуют, снабжают новыми узлами и агрегатами, обогащают новыми конструктивными решениями, являющимися плодом творческих усилий и изобретательности последующих поколений конструкторов. Некоторые конструктивные решения с появлением более рациональных решений, новых технологических приемов, с повышением эксплуатационных требований отмирают, другие оказываются исключительно живучими и сохраняются.

С течением времени повышаются технико-экономические показатели машин, возрастают их мощность и производительность, увеличивается степень автоматизации, эксплуатационная надежность, появляются новые машины одинакового назначения, но принципиально различных конструктивных схем. В соревновании побеждают наиболее прогрессивные и конкурентоспособные конструкции.

Изучая историю развития любой отрасли машиностроения, можно обнаружить огромное многообразие перепробованных схем и конструктивных решений. Многие из них, исчезнувшие и основательно забытые, возрождаются через десятки лет на новой технической основе и снова получают путевку в жизнь. Изучение истории позволяет избежать ошибок и повторения пройденных этапов и вместе с тем наметить перспективы развития машин.

Выбору параметров машины должно предшествовать полное исследование всех факторов, определяющих ее конкурентоспособность. Необходимо изучить опыт зарубежных и отечественных производителей машин, провести сравнительный анализ их достоинств и недостатков, выявить особенности конструкции и эксплуатации, выбрать правильный аналог и прототип, выяснить тенденции развития и потребности данной отрасли машиностроения.

Важным условием рационального проектирования является наличие фонда справочного конструктивного материала. Помимо архивов собственной продукции конструкторские организации должны иметь альбомы конструкций смежных организаций.

Конструктор должен быть в курсе поисковых и перспективных работ, проводимых научно-исследовательскими институтами в данной отрасли машиностроения, углубленно и систематически изучать отечественную и зарубежную научно-техническую и патентную литературу.

Наряду с изучением опыта отрасли машиностроения, в которой работает данная конструкторская организация, следует использовать опыт смежных отраслей машиностроения. Это расширяет кругозор конструктора и обогащает арсенал его конструкторских средств. Особенно полезно изучать опыт наукоемких отраслей машиностроения, где конструкторская и технологическая мысль, побуждаемая высокими требованиями к качеству продукции (например, авиационная и космическая техника) и массовости изготовления (например, автомобиль- и тракторостроение), непрерывно создает новые конструктивные формы, способы повышения прочности, надежности и приемы производительного изготовления.

Направление конструктивной преемственности не означает ограничения творческой инициативы. Процесс постоянного совершенствования машин под влиянием возрастающих требований промышленности должен находить отражение в выработке склада конструкторского мышления. Конструктор должен непрерывно обогащать и пополнять свой банк конструктивных решений, всегда подмечать интересные конструктивные решения в любой попадающей в поле его зрения машине. Он обязан знать новейшие технологические процессы, в том числе физические, электрофизические и электрохимические способы обработки, в противном случае он будет стеснен в выборе рациональных форм деталей и не сможет заложить в конструкцию современную технологию ее изготовления.

Развитие машиностроения неразрывно связано с развитием отраслей народного хозяйства, являющихся потребителями машин. В промышленности происходит процесс непрерывного совершенствования: растет объем продукции, сокращается производственный цикл, появляются новые технологические процессы, меняются компоновка линий, состав и компоновка оборудования, непрерывно повышается уровень механизации и автоматизации производства. При этом возрастают требования к показателям машин, вследствие чего

возникает необходимость создания новых машин или модернизации существующих.

Проектированию машин для конкретной отрасли промышленности должно предшествовать тщательное изучение этой отрасли, динамики ее количественного и качественного развития, потребности в данной категории машин и вероятности появления новых технологических процессов и новых методов производства.

3.5 Этапы создания машин

Как уже отмечалось, жизненный цикл машины начинается зарождением идеи, включает этапы проектирования и конструирования, изготовления и эксплуатации и заканчивается ее утилизацией. Каждый из этапов, как правило, является многоплановым, состоящим из нескольких стадий.

Создание машины как технического средства, предназначенного для удовлетворения потребностей общества, основывается, прежде всего, на изучении потребности в такой машине и формулировании конкретных требований к ней. Далее следует этап проектирования, включающий в себя обоснование принципа действия, разработку структурной и конструктивной схем, выбор типов и параметров главных составных частей. На этой основе осуществляется конструирование, результат которого – выдача документации, достаточной для дальнейшего изготовления машины.

Задача разработчиков при проектировании и конструировании – создание новой машины, обеспечивающей выполнение заданного технологического процесса и обладающей лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с существующими машинами аналогичного назначения.

Создание технических средств в зависимости от их сложности может быть предметом деятельности одного человека, выполняющего функции проектировщика, конструктора и изготовителя, или коллектива исполнителей, между которыми эти функции распределены таким образом, чтобы их способности и квалификация были использованы наиболее рационально.

Успех технического творчества зависит от того, в какой мере проектировщики и конструкторы обладают достоверной информацией о требованиях, предъявляемых к продукции, производимой проектируемой

машиной, о физической сущности выполняемых ею процессов, а также о состоянии развития технических возможностей изготовителей. В некоторых случаях для получения таких сведений необходима постановка специальных научных исследований.

Научные исследования должны сопровождать все этапы создания машин (рисунок 3.2) и включать изучение потребностей общества и разработку стратегических направлений по удовлетворению этих потребностей, обоснование требований к техническим системам, предназначенным для дальнейшего развития соответствующих отраслей техники, внедрение новых технологических принципов, повышающих качество продукции и обеспечивающих снижение материало-, энерго- и трудозатрат при изготовлении, разработку методов рационального применения и содержания машин. От технической идеи и соответствующей заявки заказчика разработчику на создание машины до момента получения от нее полной отдачи проходит определенный срок, обусловленный выполнением этапов разработки конструкторской документации, установленных ГОСТ 2.103-68, технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей конструкторской документации. Необходимость выполнения перечисленных этапов устанавливается техническим заданием. Последовательность процесса создания машины показана на рисунке 3.3.

Техническое предложение – этап предварительного проектирования, характеризующийся активизацией творческого мышления, большим количеством идей и возможных вариантов их воплощения. На этой стадии особенно важны научно-техническая и патентная информация.

Техническое предложение предусматривает предварительную конструкторскую проработку и анализ различных вариантов, подбор материалов для выявления уточненных требований к машине. Варианты анализируют по основным показателям качества (надежности,

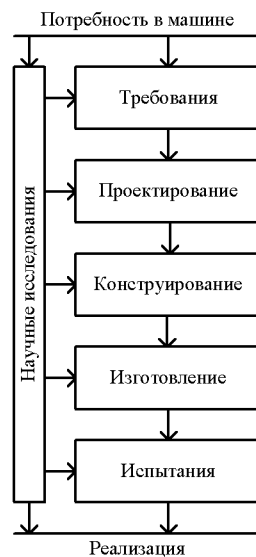


Рисунок 3.2 – Общая структура процесса создания машины

экономическим, эргономическим) и технологичности (удельной трудоемкости изготовления, удельной энергоемкости и др.), а также по уровню стандартизации и унификации.

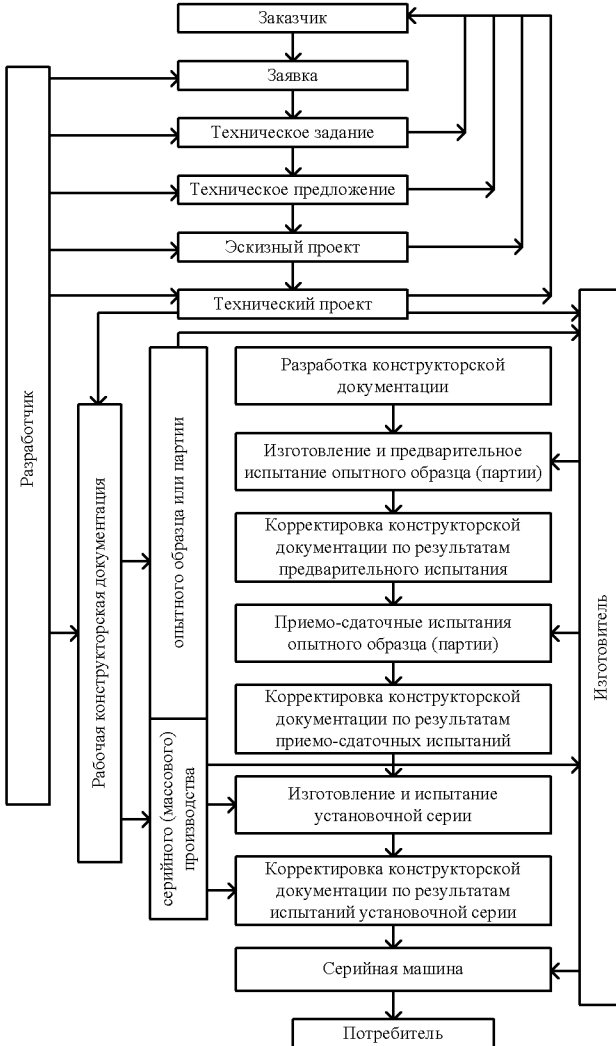


Рисунок 3.3 – Последовательность процесса создания машины

Согласованное и утвержденное техническое предложение – основание для разработки эскизного или технического проекта.

Эскизный проект – этап опытно-конструкторской разработки наиболее общих решений машины, позволяющих определить принцип ее работы. Прорабатывают различные варианты компоновки машины в целом, а также ее составных частей. Глубина проработки должна быть достаточной для сравнительного анализа по показателям качества машины с учетом ее конструктивных и эксплуатационных особенностей. Разрабатываемые варианты проверяют на патентную чистоту и конкурентоспособность. При выявлении новых решений оформляют заявки на изобретения. Для проверки принципа работы принятого варианта машины и ее составных частей могут быть изготовлены и испытаны макеты.

В результате разработки эскизного проекта должен быть принят оптимальный вариант машины, подтверждены и уточнены предъявляемые к машине требования.

На стадии эскизного проекта работы, выполненные при разработке технического предложения, отражаются в пояснительной записке. Эскизный проект согласовывают с заказчиком и изготовителем. После согласования и утверждения эскизный проект является основой для разработки технического проекта и рабочей конструкторской документации.

Технический проект предусматривает разработку комплекса конструкторских документов, которые содержат окончательные технические решения по разрабатываемой машине: соответствие проекта требованиям технического задания, степень сложности изготовления, правила эксплуатации и ремонта машины.

При работе над техническим проектом осуществляют разработку конструкций машины и ее основных составных частей, расчеты (в том числе технико-экономические), анализ технологичности конструкции (с учетом конкретных условий завода-изготовителя), мероприятия по обеспечению заданного уровня стандартизации и унификации, проверку патентной чистоты. Габаритные, установочные и присоединительные размеры машины, а также возможности ее транспортирования и монтажа согласовывают с основным потребителем.

Если для изготовления отдельных оригинальных деталей нужно разработать специализированное оборудование, для ускорения про-

цесса в целом на стадии технического проекта разрабатывают чертежи сборочных единиц (куда входят эти детали) и самих деталей. Технический проект содержит те же основные документы, что и эскизный проект. Однако степень и глубина их проработки носят окончательный характер. После согласования и утверждения технический проект является основанием для разработки рабочей конструкторской документации.

Рабочая конструкторская документация – завершающий этап проектирования и конструирования машины. Непосредственно по рабочей конструкторской документации на заводе-изготовителе создают машину.

На всех этапах разработки конструкторскую документацию подвергают технологическому контролю, содержание и цели которого определяются стадией разработки. Так, на стадии технического предложения проверяют правильность выбора варианта конструктивного решения в соответствии с требованиями технологичности; на стадии эскизного проекта – правильность выбора принципиальной схемы машины, компоновку основных сборочных единиц, рациональность конструктивных решений с учетом простоты их изготовления, возможность применения рациональных методов обработки для наиболее сложных деталей; на стадии технического проекта – возможность проведения сборки и контроля машины и ее основных частей, удобство и доступность мест сборки, отсутствие (либо минимум) механической обработки при сборке, возможность обеспечения взаимозаменяемости сборочных единиц и деталей; на стадии разработки рабочей документации – технологичность изготовления деталей, сборки машины и ее составных частей, контролируют наличие сборочных баз.

После того как проектная и конструкторская техническая документация разработана и проконтролирована, приступают к изготовлению машины.

На первом этапе создают опытный образец (или опытную партию машин) и производят предварительные заводские испытания, в процессе которых отрабатывают рациональные эксплуатационные режимы, выявляют необходимость внесения каких-либо изменений в конструкцию машины или ее составных частей. По результатам

предварительных испытаний, которые проводят совместно разработчик и изготовитель, решают вопрос о возможности осуществления приемочных испытаний, корректируют конструкторскую документацию, вносят изменения в конструкцию опытного образца. При положительном решении проводят приемочные испытания, которые в зависимости от характера связи между соисполнителями могут быть ведомственными, межведомственными и государственными.

При прямо-сдаточных испытаниях устанавливают соответствие продукции разработанной технической документации и возможность постановки машины на производство с участием разработчика, изготовителя и заказчика.

3.6 Методика проектирования машин

Методика проектирования машин – это последовательность, приемы и правила оформления графических и текстовых документов при создании машин. Под этим термином понимают совокупность практических приемов проектирования. Методика проектирования позволяет определить, во-первых, какие практические шаги и в какой последовательности необходимо выполнить для достижения конечного результата, во-вторых, какие научные или инженерные приемы используются для реализации этих шагов.

Проектирование определяется как процесс составления описания (технического задания), необходимого для создания еще не существующего объекта, преобразования первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта или алгоритма его функционирования.

Конечная цель проектирования – это достижение заданных показателей машины при рациональных затратах имеющихся ресурсов. Описанные в предыдущем параграфе этапы проектирования, дополненные сопутствующими операциями, составляют алгоритм процесса проектирования (рисунок 3.4), который разделен на непосредственно проектирование и конструирование. Это деление условно, поскольку некоторые аспекты создания машин являются общими для всего процесса. Проектирование предполагает определение технологических функций машины, выявление особенностей ее работы, рассмотрение

различных вариантов принципиальной схемы и выбор решения, компоновку машины и разработку общих видов и необходимых схем.

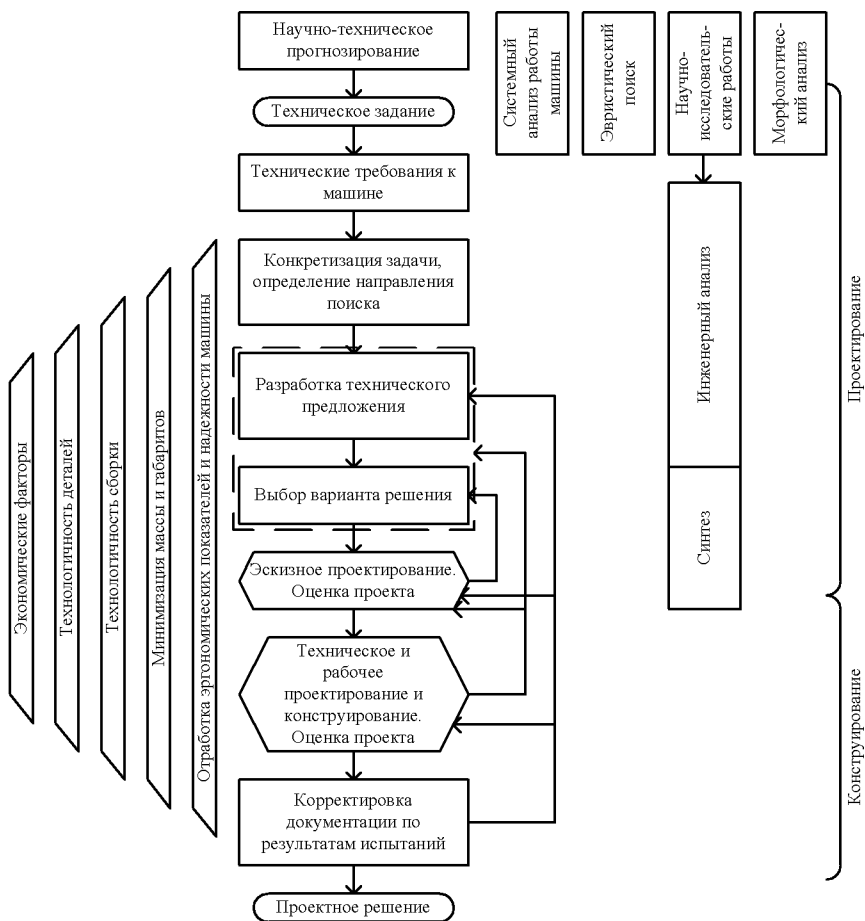


Рисунок 3.4 – Алгоритм процесса проектирования

Конструирование – это последующая часть проектирования, которая начинается тогда, когда проект машины уже составлен и необходимо определить ее конструкцию. Изображая машину в виде "черного ящика", имеющего "вход" и "выход", можно сказать, что проектирование – это выбор типа "черного ящика", а конструирование –

его поэлементное расчленение. Конструирование обеспечивает более частные требования к машине.

Рассмотрим подробнее приемы, способствующие выполнению отдельных этапов проектирования (см. рисунок 3.4).

Разработку технического задания в каждом конкретном случае предваряет научно-техническое прогнозирование, цель которого – определить с достаточной точностью главное направление будущих разработок. Анализ результатов прогнозирования и собственный опыт разработчиков – основа выработки требований технического задания.

Научно-технические прогнозы в машиностроении – это разработка общей концепции будущей машины, а также оценка требуемых для этого ресурсов и организационных мер. Методы прогнозирования основываются на профессиональном опыте, объективном анализе возможностей производства и сырьевой базы, предвидении перспектив развития данной отрасли машиностроения.

В результате обоснованного научно-технического прогноза определяют генеральную линию создания машины, обеспечивающую ее высокие технические свойства и конкурентоспособность на прогнозируемый период. После этого приступают к синтезу принципиальной схемы машины и установлению ее основных рабочих параметров. При этом обязательно используют принцип конструктивно-параметрической преемственности, сущность которого состоит в том, что при разработке, например, дорожно-строительных машин учитывают передовой опыт машиностроения, в частности, лучшие аналоги дорожно-строительной техники. Выбор параметров машин также основывается на наиболее прогрессивных технологиях. Конструкция машины должна обеспечивать регулирование параметров в заданных пределах. Для решения этих задач используют такие приемы нахождения решений, как проведение системного анализа, использование морфологического метода, эвристический поиск.

Системный анализ, используемый в процессе создания принципиальной схемы машины, позволяет учитывать взаимосвязи элементов машины, а также работу машины в системе "технология работ – окружающая среда – оператор" (рисунок 3.5). Для выявления рациональных конструктивных решений ответственных сборочных единиц и целесообразного диапазона параметров проводят морфологическое исследование машин конкретного типа или их сборочных единиц. *Морфологическое исследование* (анализ и синтез) – это построение

многофакторного множества вариантов решений и выбор наиболее приемлемого из них. При этом преимущество аналогов предполагает не копирование, а возможность использования наиболее прогрессивных конструктивно-параметрических решений, их развитие в соответствии с новизной поставленной цели.

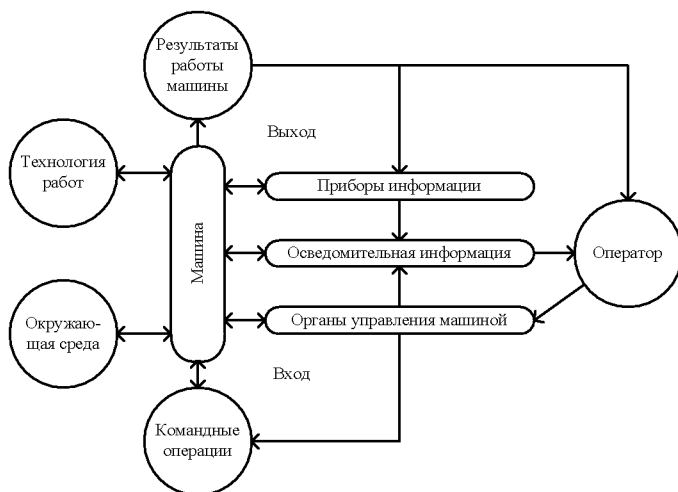


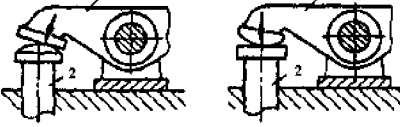
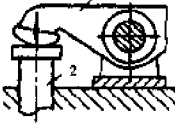
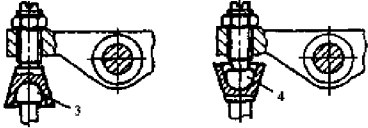
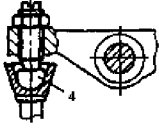
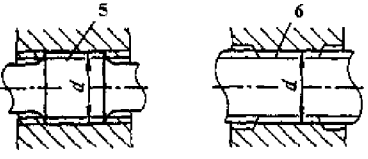
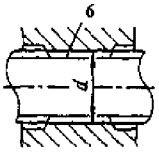
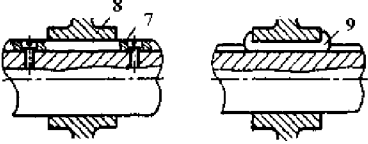
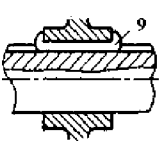
Рисунок 3.5 – Взаимосвязи в системе оператор – машина – среда

Для генерирования новых конструктивных решений используют *эвристические методы поиска* (мозговой штурм, методы мгновенной оценки, трансформации и инверсии). Мозговой штурм предполагает сбор идей (в течение получаса) от группы компетентных лиц (специалистов в смежных областях техники). По конкретной задаче высказанные идеи взаимно обогащаются и совершенствуются. Их фиксируют, классифицируют по направлениям и рассматривают специалисты. Метод трансформации и инверсии состоит в обращении функций или форм системы (машины) или ее элементов.

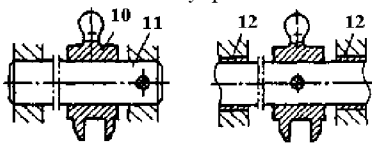
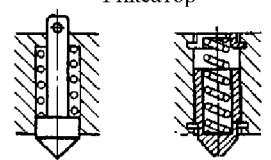
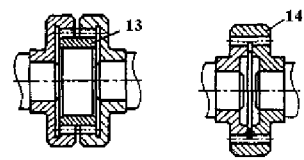
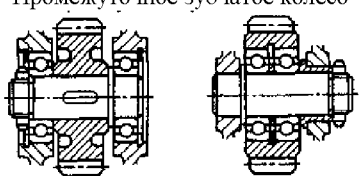
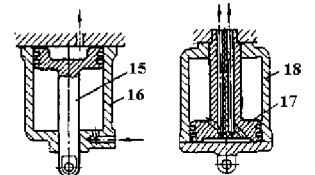
Метод инверсии занимает видное место среди приемов, облегчающих сложную работу конструирования. В узлах машин нередко бывает выгодным поменять детали ролями. Например, ведущую деталь сделать ведомой, направляющую – направляемой, охватывающую – охватываемой, неподвижную – подвижной. В ряде случаев целесообразно видоизменить форму детали, например, наружный конус заменить внутренним, выпуклую сферическую поверхность – вогнутой. В других случаях оказывается выгодным переместить кон-

структивные элементы с одной детали на другую, например, шпонку с вала – на ступицу, боек с рычага – на толкатель. Метод инверсии является неотъемлемым инструментом конструирования и значительно облегчает процесс поиска решений, в результате которого рождается рациональная конструкция. В таблице 3.1 приведены примеры инверсии типовых машиностроительных узлов.

Таблица 3.1 – Примеры инверсии типовых узлов

Схема I	Схема II	Сравнительная характеристика схем
<p data-bbox="232 480 418 507">Привод толкателя</p> 		<p>В схеме I боек коромысла I плоский, тарелка толкателя 2 – сферическая, в схеме II – наоборот: боек – сферический, тарелка толкателя – плоская. Инверсия уменьшает поперечную силу на толкатель. Кроме того, боек можно выполнить цилиндрическим, что обеспечивает линейный контакт, тогда как в конструкции по схеме I контакт точечный</p>
<p data-bbox="232 699 418 726">Привод коромысла</p> 		<p>В схеме I тяга выполнена со сферическим наконечником 3, в схеме II сферическим выполнен боек 4 коромысла. Инверсия улучшает смазывание соединения (масло, находящееся в полости привода, скапливается в чаше тяги)</p>
<p data-bbox="255 906 396 933">Ходовой винт</p> 		<p>В схеме I винт с коротким резьбовым поясом 5 перемещается в резьбовом отверстии корпуса, длина которого равна ходу винта. В схеме II резьба нарезана по всей длине винта; корпус имеет короткий резьбовой пояс 6. Облегчено изготовление (нарезание длинной резьбы в отверстии затруднительно). При тех же диаметре d резьбы и габаритах соединения прочность винта в схеме II выше</p>
<p data-bbox="206 1187 441 1214">Направляющая шпонка</p> 		<p>В схеме I направляющая шпонка 7 установлена на валу и имеет длину, равную ходу ступицы 8. В схеме II шпонка 9 установлена в ступице и перемещается в продольном пазу вала; упрощено изготовление узла (отпадает трудоемкая операция подгонки длинной шпонки), обеспечено более точное направление ступицы, так как паз на валу можно выполнить точнее, чем длинную шпонку</p>

Окончание таблицы 3.1

Схема I	Схема II	Сравнительная характеристика схем
<p>Механизм управления</p> 		В схеме I ползун 10 перемещается по неподвижной штанге 11. В схеме II ползун закреплен на штанге, которая перемещается в направляющих втулках 12 корпуса. Точность направления значительно повышена, необходимая для перемещения сила уменьшена
<p>Фиксатор</p> 		В схеме I фиксатор расположен в ступенчатом отверстии и направляется хвостовиком и головкой; в схеме II фиксатор выполнен в виде стакана, внутри которого размещена пружина. Схема II технологичнее (сквозное отверстие), конструкция, однако, сложнее
<p>Шлицевая муфта</p> 		В схеме I переходник 13 имеет наружные шлицы, а приводные диски – внутренние. В схеме II переходник 14 выполнен с внутренними шлицами, а диски – с наружными. Схема II выгоднее по осевым размерам и технологичности (внутренние шлицы обрабатываются напроход)
<p>Промежуточное зубчатое колесо</p> 		Установка шестерни на подшипниках качения на оси (схема II) уменьшает долговечность подшипников (вращаются наружные кольца подшипников, тогда как на схеме I – внутренние). Нагрузка на наружные кольца в схеме I – постоянного направления. Схема II иногда целесообразна по габаритным условиям (например, консольная установка шестерни)
<p>Гидравлический сервоцилиндр</p> 		В схеме I поршень 15 перемещается в неподвижном цилиндре 16, в схеме II неподвижен поршень 17, по нему перемещается цилиндр 18. В схеме II возможен привод от любой точки по высоте цилиндра. Масло-распределительная система и конструкция узла сложнее, чем в схеме I

При определении расчетных нагрузок на элементы проводят специальные теоретические и экспериментальные научно-исследовательские работы, позволяющие оценить удельные силы сопротивления, возникающие при реализации рабочего процесса (копание, перемешивания, уплотнения и т. д.).

Перечисленный комплекс работ (прогнозирование, системный и морфологический анализ, эвристический поиск и исследование действующих сопротивлений) положен в основу разработки требований технического задания, позволяет выбрать вариант принципиальной схемы машины и перейти к ее компоновке, т. е. приступить непосредственно к поисковому проектированию и разработке технического предложения. При этом прорабатывают различные варианты машины, что позволяет более четко выбрать решение. Результатом поискового проектирования может быть усовершенствованная ранее известная модель либо принципиально новый вариант решения. Окончательный выбор принципиальной схемы определяет основные свойства машины.

3.7 Компонование

После выбора схемы и основных показателей машины разрабатывают эскизную, а затем рабочую компоновку, на основе которых составляют эскизный, технический и рабочий проекты.

Эскизная компоновка предназначена для разработки основной конструктивной схемы машины и конструкции ее основных узлов. На этом же этапе подбирают технологию изготовления деталей.

В период времени, когда складывается основной конструктивный замысел машины и разрабатывают эскизную компоновку, обычно проводят эксперименты для проверки работоспособности некоторых новых конструктивных решений. Так, например, определяют жесткость и прочность отдельных деталей и соединений в новых узлах и агрегатах.

На основании анализа эскизной компоновки составляют *рабочую компоновку*, уточняющую конструкцию машины и служащую исходным материалом для дальнейшего проектирования. Рабочая компоновка должна не только давать общее представление о машине, но и определять конструкцию и размеры всех ее деталей с полнотой, достаточной для разработки рабочих чертежей. На этой стадии должны быть решены все конструктивные проблемы проектируемого изделия. Основным приемом составления рабочей компоновки является конструктивная разработка узлов, сопровождаемая проверочными расчетами по соответствующим критериям работоспособности. На компоновочных чертежах проставляют увязочные размеры, позво-

ляющие произвести детализовку узла. Узловые чертежи сводят в сборочный чертеж.

После просмотра и утверждения рабочей компоновки выполняют разработку детальных (рабочих) чертежей. При детализовке в первую очередь разрабатывают чертежи крупных литых деталей, требующих изготовления сложных моделей, и чертежи сложных кованых деталей, процесс механической обработки которых занимает много времени.

Процесс компонования во многом зависит от опыта, навыков и способностей конструктора. В связи с этим могут быть различными ход компонования, последовательность разработки конструкции, а также конструктивные решения задач, возникающих при проектировании. Однако можно выделить *закономерности, присущие любому процессу компонования*:

- последовательность разработки, проработка на первых этапах только основных элементов конструкции;
- анализ нескольких вариантов компоновки и выбор лучшего из них на основе сопоставления конструктивной, технологической и эксплуатационной целесообразности;
- параллельно с проектированием проверка работоспособности вариантов новых конструктивных решений по основным критериям (прочность, жесткость и др.);
- придание технологичности разрабатываемой конструкции;
- разработка схемы сборки-разборки машины и ее основных узлов;
- обеспечение резервов для совершенствования и развития машин с учетом возрастающих требований потребителей.

При компоновании важно уметь выделить главное из второстепенного и установить правильную последовательность разработки конструкции. Компоновку следует начинать с решения главных вопросов – *выбора рациональных кинематической и силовой схем, размеров и формы деталей, их наиболее целесообразного расположения*. При компоновании следует идти от общего к частному.

Другое основное правило компонования – *разработка вариантов, их углубленный анализ и выбор наиболее рационального*. Вначале необходимо рассмотреть возможные решения и выбрать из них оптимальное для данных условий. В этом случае полная разработка вариантов необязательна. Как правило, достаточно набросков от руки, чтобы по-

лучить представление о перспективности варианта и решить вопрос о целесообразности продолжения работы над ним.

В процессе компонования необходимо производить расчеты, хотя бы ориентировочные и приближенные. Основные детали новой конструкции должны быть рассчитаны по основным критериям работоспособности.

Необходимое условие правильного конструирования – постоянно иметь в виду вопросы изготовления и с самого начала придавать деталям технологически целесообразные формы, при необходимости консультируясь с технологами. Следует использовать опыт уже реализованных и апробированных конструкций, внося обоснованные коррективы. Поэтому необходимые размеры деталей могут быть обусловлены условиями изготовления. Конструкция литых деталей определяется, в первую очередь, требованиями литейной технологии. Для механически обрабатываемых деталей следует учитывать сопротивляемость силам резания и придавать им необходимую жесткость. Термически обрабатываемые детали должны быть достаточно массивными во избежание коробления.

Компоновку необходимо вести на основе нормальных размеров (диаметры посадочных поверхностей, размеры шпоночных и шлицевых соединений, диаметры резьб и т. д.). Это особенно важно при компоновании узлов с несколькими концентричными посадочными поверхностями, а также ступенчатых деталей, форма которых в значительной степени зависит от градации диаметров.

Одновременно следует добиваться *максимальной унификации стандартных элементов* (канавок, проточек и др.). Элементы конструкций главных деталей и узлов рекомендуется использовать в других агрегатах машины.

При компоновании *должны быть учтены все условия, определяющие работоспособность агрегата*, разработаны системы смазывания, охлаждения, сборки-разборки, крепления агрегата и присоединения к нему смежных деталей (приводных валов, коммуникаций, электропроводки); предусмотрены условия удобного обслуживания, осмотра и регулирования механизмов; выбраны материалы для основных деталей; продуманы способы повышения долговечности и износостойкости узлов трения, способы защиты от коррозии; исследованы возможности форсирования агрегата и определены его границы.

В процессе проектирования часто обнаруживаются не замеченные в первоначальных прикидках недостатки, для устранения которых приходится возвращаться к ранее забракованным схемам или разрабатывать новые. Отдельные узлы не всегда получаются с первых попыток. Приходится создавать "временные" конструкции и доводить их до необходимого конструктивного уровня в процессе дальнейшей работы.

На всех стадиях компонования следует прибегать к консультациям производителей и эксплуатационников. Консультации производителей имеют целью выяснить удобство изготовления отдельных деталей, их приспособленность к производству. Чем шире поставлено обсуждение компоновки, тем лучше становится компоновка и совершеннее конструкция.

Проектирование сложных или новых конструктивных задач требует творческой работы, поиска аналогов из смежных отраслей машиностроения, а иногда и постановки экспериментов. При этом стоимость проектных работ составляет, как правило, незначительную часть стоимости выпуска машин (за исключением машин единичного и мелкосерийного производства). Поэтому более глубокая проработка конструкции в конечном счете дает выигрыш в стоимости, сроках изготовления и доводки, в качестве и экономической эффективности машины.

Компонование следует вести в масштабе 1:1, если это допускают размеры проектируемого объекта. При этом легче выбрать нужные размеры и сечения деталей, составить представление о соразмерности частей конструкции, прочности и жесткости деталей и конструкции в целом. Кроме того, такой масштаб избавляет от необходимости нанесения большого числа размеров и облегчает последующие процессы проектирования, в частности, детализовку. Размеры деталей в этом случае можно брать непосредственно с чертежа.

Вычерчивание в уменьшенном масштабе, особенно при сокращениях, превышающих 1:2, сильно затрудняет процесс компонования, искажая пропорции и лишая чертеж наглядности. Если размеры объекта не позволяют применить масштаб 1:1, то отдельные сборочные единицы и агрегаты объекта следует, во всяком случае, компоновать в натуральную величину.

Компоновку простейших объектов можно разрабатывать в одной проекции, в которой конструкция выявляется наиболее полно. При компоновке более сложных объектов обязательна разработка всех необходимых видов, разрезов и сечений.

3.8 Экологические приоритеты при конструировании машин

Конкурентоспособность новой техники во многом зависит от ее экологической безопасности, современные требования к которой заставляют пересмотреть традиционные методы проектирования, производства, эксплуатации и утилизации машин, а также методы стандартизации и сертификации.

Серия международных стандартов *ISO 14000* "Система экологического управления" включает организацию системы экологического управления и аудита, а также оценку экологичности производства и продукции на всех стадиях жизненного цикла. Оценка экологической безопасности машин, а также направления для совершенствования их конструкции ("конструирование для экологии") осуществляются на основе концепции полного жизненного цикла (ПЖЦ).

Относительно новый термин "конструирование для экологии" (*Design for the Environment*) показывает важность экологического аспекта создания и функционирования машин, т. е. уже на начальном этапе создания машин планируются мероприятия (материаловедческие, конструкторские, технологические и эксплуатационные) для обеспечения экологической безопасности и энергосбережения.

Концепция ПЖЦ состоит в том, что экологическая безопасность является приоритетным звеном взаимосвязи всех этапов жизненного цикла машин, включая их утилизацию. При этом эффективность утилизации машины по окончании срока ее эксплуатации во многом является основой для ряда упомянутых ранее мероприятий по экологической безопасности, которые реализуются на предшествующих утилизации этапах жизненного цикла машины.

Требования к утилизации машины по окончании срока эксплуатации (дополнительно к стандартам серии *ISO 14000*) определяются директивой Европейского Союза *ЕС 97/с337/02*.

В общем виде жизненный цикл машины можно представить схемой, представленной на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Схема жизненного цикла машины с потоками веществ и энергии (под выбросами понимается любое материальное загрязнение окружающей среды)

Экологическая безопасность является очень серьезной проблемой, значимость которой возрастает по мере развития промышленного производства. Основными потребителями природных ресурсов и энергии являются машиностроение и транспортные системы, которые играют определяющую роль в загрязнении окружающей среды. Оценку экологической безопасности машин производили для продукции машиностроения. В качестве примера был использован грузовой автомобиль с бензиновым двигателем грузоподъемностью 4500 кг и пробегом за период эксплуатации 500 тыс. км, для которого были выполнены расчеты экологической безопасности по ПЖЦ.

На рисунке 3.7 приведен расход энергии в отдельных стадиях ПЖЦ автомобиля. Видно, что наибольшие затраты энергии приходятся на стадию эксплуатации автомобиля. Затраты энергии на стадии производства (включая добычу сырья, производство материалов, топлива и изготовление автомобиля) составляют только 45 % от затрат энергии при эксплуатации автомобиля.

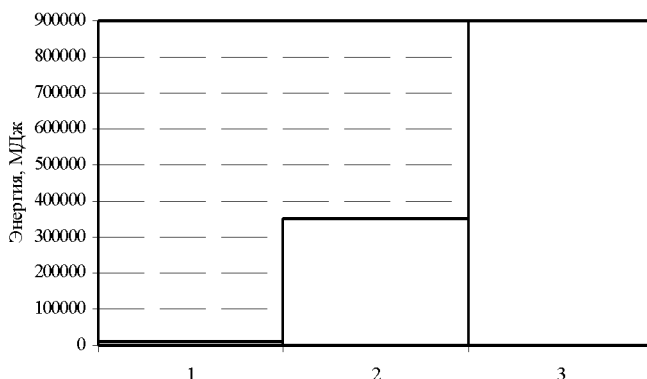


Рисунок 3.7 – Энергия на осуществление отдельных стадий ПЖЦ:
1 – переработка; 2 – производство; 3 – эксплуатация

Очень широк спектр вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу на протяжении полного жизненного цикла машины. При этом следует отметить очень высокий уровень выброса углекислого газа при эксплуатации машин: он сопоставим с выбросом этого газа на тепловых электростанциях.

Общей целью оценки экологической безопасности машин является выявление их конкурентоспособности и определение направлений улучшения экологических показателей машин или их отдельных узлов на всех стадиях жизненного цикла, в частности новых материалов и современных технологий изготовления на уровень экологической безопасности машины в жизненном цикле. На практике часто возникает необходимость оценки влияния тех или иных усовершенствований конструкции автомобиля на его экологические показатели (например, применения каталитических нейтрализаторов, систем впрыска топлива, шин с уменьшенным сопротивлением качению, обтекателей и т. д.).

Помимо выявления влияния модернизации на экологическую безопасность, такие оценки позволяют сопоставить различные варианты конструкции машин, существенно отличающихся друг от друга (например, машины с различными силовыми установками – дизельной, бензиновой, гибридной; транспортные средства в двух- или трехосном исполнении и т. п.). Кроме того, важно установить уровень экологической безопасности отдельных узлов и деталей комплектации автомобиля и разработать технические условия на их поставку.

Оценка экологического ущерба, наносимого окружающей среде вредными выбросами, может быть использована при обосновании выбора наиболее целесообразных методов улучшения экологических показателей машин и их составных частей. Так, например, уменьшение расхода топлива и выброса вредных веществ машиной в условиях эксплуатации может быть достигнуто уменьшением ее массы, снижением сопротивления движению (аэродинамического или сопротивления качению), улучшением технических показателей и КПД двигателя.

Как отмечалось, важной стадией полного жизненного цикла машины является ее утилизация по окончании срока службы. В 1997 г. Совет Евросоюза принял директиву 97/с 337/02 "Транспортные средства, вышедшие из эксплуатации", а в 1999 г. в эту директиву был внесен ряд поправок. В основе этих мероприятий – установление мер по предотвращению образования отходов, связанных с выводом из эксплуатации машин, а также с их повторным использованием, рециклированием и другими формами восстановления. Государства-участники обязаны гарантировать воплощение в жизнь этих мероприятий по предотвращению негативного воздействия, наносимого окружающей среде отслужившими свой срок машинами. В их числе:

– совместный контроль (производителей машин, материалов и оборудования) использования вредных веществ в машинах и сокращения их содержания до минимально возможного количества; совершенствование концепции создания машин с учетом необходимости предотвращения выбросов в окружающую среду, упро-

щения процесса рециклирования и предотвращения захоронения опасных отходов. Помимо этого, поставлена задача проектировать и производить новые машины, которые приспособлены к разборке, повторному использованию и утилизации (в особенности рециклированию) по окончании срока службы.

Начиная с 1 января 2005 г., машины должны не менее, чем на 95 масс. % по массе утилизироваться путем рециклинга материалов, повторного использования отдельных узлов и деталей либо сжиганием отходов (с регенерацией энергии). При этом на повторное использование или рециклинг должно идти не менее 85 % массы машины. Кроме того, введены очень жесткие ограничения на количество (в абсолютных величинах или по концентрации) опасных и вредных веществ в различных узлах и агрегатах машин. В их числе кадмий, свинец, ртуть и шестивалентный хром.

Экологические стандарты по ПЖЦ требуют пересмотра всего процесса разработки новой техники. С учетом упомянутой концепции "конструирование для экологии" алгоритм процесса конструирования будет иметь вид, представленный на рисунке 3.8.

Как видно из рисунка, процесс разделяют на три стадии:

- оценка существующей конструкции и планирование необходимых изменений;
- усовершенствование конструкции и технологических процессов;
- подготовка документации и ввод новой конструкции в производство.

Упомянутая новая концепция содержит в основном апробированные рекомендации по обеспечению высокого качества машиностроительной продукции, но каждая из этих рекомендаций рассматривается с экологической точки зрения (рисунок 3.9). В их числе использование рециклируемых и рециклированных материалов, проектирование технологических процессов, способствующих снижению энергоемкости и уменьшению выбросов вредных веществ, использование материалов, которые не требуют дополнительной обработки (доводки) поверхности деталей; совершенствование технологических процессов, чтобы до минимума снизить образование отходов и обеспечить повторное использование отходов переработки в том же производственном процессе.

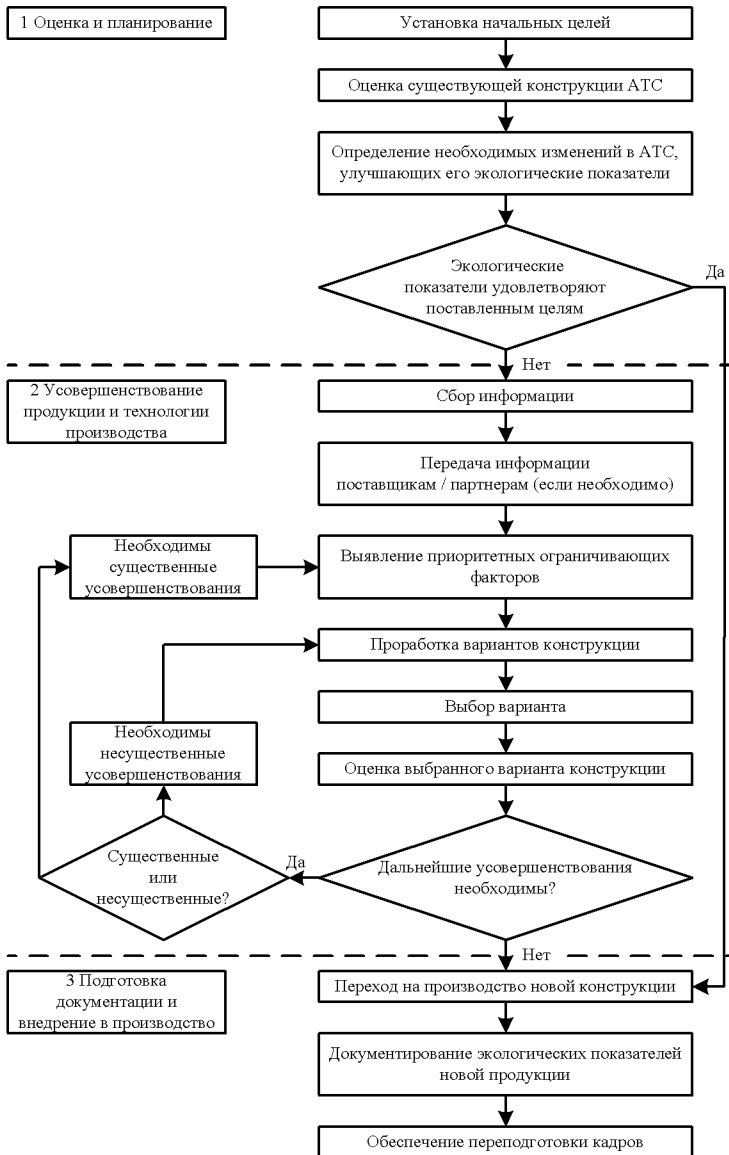


Рисунок 3.8 – Алгоритм процесса конструирования в соответствии с концепцией "Конструирование для экологии"

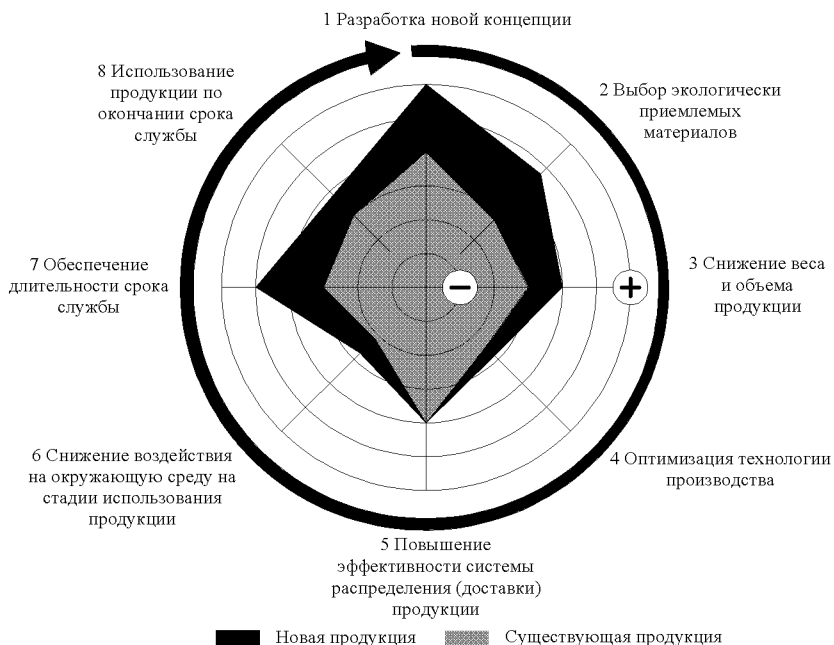


Рисунок 3.9 – Экологические приоритеты при конструировании новой техники с учетом ее полного жизненного цикла

Достаточно важными представляются рекомендации по использованию наиболее экологически приемлемой упаковки (рециклируемой, минимально возможной массы и объема, не содержащей токсичных компонентов), при стремлении к минимизации выбросов вредных веществ и образования отходов, а также предотвращению неправильного использования продукции, которое может привести к повышенному расходу энергоресурсов или загрязнению окружающей среды.

Не менее важны: использование модульной конструкции для упрощения разборки и замены узлов; возможность повторного использования продукции и ее отдельных узлов после соответствующего ремонта; разработка такой конструкции машины, которая обеспечивает простое и удобное разделение материалов при наличии маркировки (для ускорения их сортировки и переработки при повторном использовании или утилизации).

В таблице 3.2 приведена сравнительная оценка вредного воздействия производства и рециклинга некоторых материалов на окружающую среду. Видно, что наиболее высокий показатель рециклирования (более 80 %) у стекла, у остальных материалов он сравнительно невелик, что свидетельствует о больших резервах и необходимости дальнейшей работы в этом направлении.

Таблица 3.2 – Сравнительная оценка воздействия на окружающую среду при производстве и рециклинге 1 кг материалов

Материал	Экоиндикатор для материалов, мПт		Отношение рециклированный / новый
	вновь произведенных	рециклированных	
Алюминий	18,0	1,8	0,10
Медь	85,0	23,0	0,27
Сталь	4,1	1,3	0,30
Пластмасса	3,3	1,3	0,40
Стекло	2,1	1,7	0,81













Ведущие фирмы ведут работы по введению в практику требований ПЖЦ по утилизации машин, вышедших из эксплуатации. Наиболее впечатляющие результаты имеют автомобилестроители, например, в фирмах "BMW", "Volvo", "Fiat", "Ford" и "Nissan", где степень повторного использования материалов составляет 85–90 %. Там разработаны стандарты предприятий по "конструированию для рециклинга", а также руководства по разборке и утилизации машин по окончании срока их службы. Узлы машины проектируются таким образом, чтобы снизить время, требуемое для их разборки, а также уменьшить количество узлов, которые разбираются только путем предварительной разборки других узлов (т. е. снижают количество уровней разборки).

Большой интерес представляет для операций разборки таблица 3.3 (составленная на основании немецкого стандарта VDI 2243). В ней даны рекомендации по способам соединений деталей в зависимости от требований к ним и приведена сравнительная оценка их различных параметров (несущая способность, рециклируемость и др.).

Концепция рассмотрения машиностроительной продукции в рамках полного жизненного цикла вызывает необходимость информационного сопровождения продукта на всех его стадиях. Эту задачу решают CALS-технологии (англ. *Continuous Acquisition and Lifecycle Support* – непрерывная информационная поддержка поставок и жиз-

ненного цикла), в основу идеи которых было положено единообразное представление информации о конструкции изделий, их характеристиках, технологической оснастке, технологий производства и обслуживания, ремонта и утилизации.

Таблица 3.3 – Сравнительная оценка различных способов соединения деталей

Характеристики соединения		Несущая способность		Использование				Рециклируемость		
		Статическая прочность	Усталостная прочность	Затраты на сборку	Сложность сборки	Затраты на разборку	Затраты на разрушающую разборку	Рециклинг изделия	Рециклинг материалов	
Неразборные соединения	 склеивание	±	±	±	–	–	±	–	±	
	 сварка	+	+	±	–	–	±	–	+	
Фрикционные соединения	 магнитное	±	±	+	±	+		±	±	
	 "липучка"	–	–		+	+		±	±	
	 болтовое	M	+	+	±	±	±	±	±	±
		П	±	±	±	±	±	+	+	+
 пружинное	±	–	+	+	+		+	+		
Быстро-разъемные соединения	 защелка	+	±	+	+	–	+	–	+	
	 рычажный зажим	+	±	+	±	+	±	+	+	
	 крепеж ¼ оборота		+	±	+	+	+	±	+	+
		 футорка	±	±	+	+	+	±	+	±
	 пружина+штифт	±	–	+	+	+	±	+	±	
	 бандаж	+	±	+	±	±	+	+	+	

Примечание "+" – хорошо; "±" – средние; "–" – плохо; м – металлические детали; п – пластмассовые детали.

CALS представляет собой концепцию создания единой информационной среды для всех этапов жизненного цикла, обеспечивающей интеграцию не только информационных, но и электронных техноло-

гий описания изделий, применяемых на различных предприятиях. Эта концепция позволяет объединять в единое целое интегрированные автоматизированные системы управления технологическими процессами и проектными работами, а также системы передачи данных на основе телекоммуникаций.

Начало разработки *CALS*-технологии относится к середине 1970-х годов, когда в оборонном ведомстве США возникла необходимость в оперативном электронном обмене данными между заказчиком, производителями и потребителями средств вооружения и военной техники. Сегодня *CALS*-технологии получили достаточно широкое распространение во многих странах, существует уже более 25 национальных организаций по развитию *CALS*.

Во взаимоотношениях между предприятиями становится нормой требование компьютерного представления и обмена данными о поставляемой продукции на всех этапах ее жизненного цикла. Белорусские предприятия в рамках международного сотрудничества, в частности, при продаже сложных наукоемких изделий и лицензий на их производство, также должны соблюдать требования стандартов *CALS* применительно к поставляемой с изделием технической документации в электронной форме. Компьютерная информационная поддержка должна быть обеспечена и для процессов технического обслуживания, материально-технического снабжения, заказа запасных частей, ремонта.

CALS-технологии включены в стандарты серии ИСО 10303 *STEP – Standard for the Exchange of Product Model Data* (Стандарт по обмену данными о модели изделия). Это весьма обширные документы, состоящие из множества томов. В качестве примера можно привести стандарт ИСО 10303-214 (по автомобилестроению). В нем описано использование интегрированных ресурсов, необходимых для обмена информацией между приложениями (компьютерными программами), которые обеспечивают процесс проектирования механических частей автомобиля. В этих документах приводятся самые разнообразные сведения:

- конструкторская документация об изделии;
- ссылки на документацию об изделии, представленную в формате, отличающемся от указанного в ИСО 10303;
- данные моделирования для описания кинематических структур;

- размерные данные и геометрические данные о допусках;
- данные о форме изделия;
- информация по контролю конфигурации изделия для создания различных модификаций на этапе конструирования;
- данные, описывающие изменения, которые произошли на этапе конструирования;
 - идентификация стандартных элементов, основанных на международных или национальных стандартах;
 - идентификация уже изготовленных элементов, узлов или инструментальных средств, например, для разработки прототипа;
 - данные о выпуске изделия;
 - данные об изделиях производителей и их поставщиков, включая детали, сборочные единицы, инструментальные средства, комплексы инструментальных средств и сырьевые материалы;
 - технологическая информация, используемая для производства и управления взаимосвязями между промежуточными стадиями разработки инструментов или деталей;
 - данные о поставщике изделия с необходимой контактной информацией.

Особый вид творчества, который специализируется на создании изделий с помощью новых технологий и оборудования и выпускаемых массовым тиражом, получил название *промышленное искусство*. Отличительной способностью этих изделий является их целесообразность, соответствие эстетическим и эргономическим требованиям. В промышленном искусстве художественной формой, выражающей структуру содержания, является конструкция изделия.

Важной формой художественно-конструкторской деятельности в промышленности по созданию новых видов и типов изделий, отвечающих требованиям общественной пользы, удобства и красоты, является *конструкторский дизайн* (от англ. *design* – замысел, проект). Он охватывает творчество художника-конструктора (дизайнера), методы и результаты его труда, условия их реализации в производстве.

Между тем, термины "конструкторский дизайн" и "промышленное искусство" не следует отождествлять, поскольку промышленное искусство используется для обозначения продуктов дизайна, которые реализованы серийно в промышленном производстве и удовлетворяют утилитарные и эстетические требования.

Теория конструкторского дизайна получила название технической эстетики (от греч. *aisthetikas* – чувственность, способность воспринимать окружающий мир с позиции красоты) – науки, изучающей общие закономерности и принципы художественного творчества. Это научная дисциплина, изучающая социально-культурные, технические и эстетические проблемы формирования гармоничной предметной среды, создаваемой средствами промышленного производства для жизни и деятельности человека. Главной целью технической эстетики является создание (на основе достижений теории и практики художественного конструирования) наилучших условий труда, быта и отдыха людей в создаваемом ими предметном мире. Являясь теоретической основой конструкторского дизайна, техническая эстетика

изучает его общественную природу и закономерности развития, принципы и методы художественного конструирования.

Сравнительно молодой областью творчества является *художественное конструирование*, общественная потребность в котором возникла только в прошлом веке в связи с переходом производства изделий на машинную технику и обслуживание массового рынка. Тогда же начали формироваться новые профессии, в том числе профессия художника-конструктора. Создавая предметную среду с набором заданных функций и эстетических свойств, художник-конструктор формирует в человеке, живущем в этой среде, определенное отношение к вещам, а через них – к людям, обществу и труду. Отсюда следует важная воспитательная и социально-культурная роль художественного проектирования в жизни общества.

Художественное проектирование не является работой только над формой промышленных изделий, поскольку машина – это целостный и сложный комплекс, в котором нельзя механически отделить форму от конструкции и ее функции. Поэтому проектирование дает действительно хорошие результаты тогда, когда конструктор, технолог и художник-конструктор действуют в творческом контакте с использованием теории композиции в технике. Примером связи "функция – форма" может служить система управления машиной: оператор быстро устает, его внимание рассеивается и он может принять неверное решение, если приборы на панели управления будут иметь различные размеры и форму с нарушенными пропорциями и колористическими связями.

В современных условиях растет роль технологии производства в работе художника-конструктора над формой серийного промышленного изделия. Это объясняется, в первую очередь, широким применением новых легко формуемых материалов, а также процессов их обработки (вакуумное прессование пластмасс, литье по выплавляемым моделям, нанотехнологии т.п.). Новые технологии позволяют резко сократить количество деталей, из которых изготавливаются многие изделия, а вместе с этим заставляют художника искать формы, соответствующие назначению изделия.

Совершенство формы предопределяется рациональностью технического решения, логикой конструкции и эффективностью технологии – только на этой основе художник может создать подлинно гармоничную форму. По мнению академика И.И. Артоболевского: "Какое бы то ни было украшательство ... особенно нетерпимо в индустриальном производстве, в оформлении машин, где каждая линия, каждый штрих, цветное пятно должны нести смысловую нагрузку, быть строго продуманы, лаконичны, продиктованы целесообразностью". По существу, красота машины должна быть отражением современного состояния техники.

Художественно-конструкторский анализ необходим на протяжении всего творческого процесса, но особенно – на предпроектной стадии работы, когда следует ознакомиться с существующими аналогами и изучить тенденции формообразования. При этом происходит творческое осмысление решений, принимаемых на всех этапах конструирования. Конечный результат является своего рода *сплавом* многих компонентов. Красота и удобство техники никого не оставляют равнодушным. Судить об этих характеристиках изделий можно, не являясь специалистом. Хотя удовлетворить вкусам каждого потребителя очень трудно, тем не менее, существуют общие критерии красоты, которые понимает и подсознательно воспринимает любой человек.

При создании изделия в целом необходимо специально работать над красотой и удобством, руководствуясь критериями, правилами и рекомендациями технической эстетики и эргономики (конструктор любого уровня должен быть хорошо знаком хотя бы с их общими положениями).

4.1 Категории композиции

Особенность художественного конструирования заключается в том, что в процессе формообразования конечное решение принимается на основе выявления и отражения связи формы с функцией, конструкцией и материалом.

Художник-конструктор призван разрешить противоречие между стандартом и массовостью производства промышленных изделий с

одной стороны, и необходимостью создания образной предметно-пространственной среды – с другой. Это является одной из наиболее трудных задач художественного конструирования.

Большое значение при создании условий для трудовой деятельности имеет использование закономерностей композиции. Приведение к композиционной целостности производственной среды является одним из средств повышения производительности труда, снижения утомляемости и достижения положительного эмоционального воздействия на человека. Как уже отмечалось, композиция (от лат. *composition* – составление, соединение, расположение, структура, компоновка) – это система взаимосвязи элементов. Теория композиции выявляет закономерности и раскрывает специфические приемы и средства, применяемые в процессе работы над художественным образом при создании гармонично организованной, эстетически воспринимаемой формы. Основой теории композиции являются категории, выражающие наиболее существенные связи и отношения рассматриваемых явлений. Этими основными категориями являются тектоника и объемно-пространственная структура.

Тектоникой (от греч. *tekonikos* – относящийся к строительству) называют зримое отражение в форме работы конструкции и организации материала. Композицию всего изделия определяет взаимообусловленность конструкции и формы изделия, выраженной в конкретном материале. Понятие "тектоника" неразрывно связывает две важнейшие характеристики промышленного изделия: форму и конструктивную основу, под которой понимается работа несущей части конструкции. Закономерности тектоники отражают логику работы конструкции и материалов и основываются на законах механики, сопротивления материалов, теории упругости. У человека каждый материал вызывает определенные ощущения, ассоциации, которые остаются в его сознании. Так, с некоторыми материалами связаны представления о легкости и прочности, другие, наоборот, вызывают ощущения тяжеловесности и светонепроницаемости. Художник-конструктор часто сознательно усиливает характерные свойства материала, его массу, монолитность или подчеркивает легкость, воздушность, выявляет его фактуру, цвет и текстуру.

Нагруженные элементы конструкции должны найти свое отражение в форме, ненагруженные – не следует маскировать под работающие. Литая несущая конструкция должна быть выражена в форме так, чтобы было ясно, что это литье, а не сварная или какая-либо другая конструкция. Нередко, к сожалению, встречаются промышленные изделия, форма которых лишена тектонической ясности и не понятно, как работает конструкция, каково распределение усилий. Эти формы можно считать ложными в тектоническом отношении.

Существуют общие закономерности, связанные с особенностями функционирования неподвижных и движущихся предметов, на конструкцию которых влияют законы статики и динамики. В форме статичных предметов, прежде всего, отражается их устойчивость, весомость, материальность, прочность. Специфика тектоники многих движущихся предметов обусловлена тем, что равновесие и устойчивое положение в движении часто обеспечиваются особенностью их формы, которая определяется характером напряжений, возникающих в конструкции, и сопротивлением среды.

Независимо от сложности форма изделия рассматривается с точки зрения взаимодействия всех ее элементов между собой и с пространством, т. е. как объемно-пространственная структура, которая наряду с тектоникой имеет решающее значение для достижения гармонии формы. Человек испытывает неудобство, если ему непонятен замысел компоновки, например, когда имеет место бессистемное нагромождение элементов (речь идет не о физических, а о зрительно воспринимаемых категориях); если каждый из элементов выглядит изолированным, оторванным один от другого и неясно, какой из элементов главный, а какие находятся в подчинении.

По признаку объемно-пространственного строения предметы разделяются на следующие группы:

- 1) с открытыми техническими структурами действующих механизмов или несущих конструкций;
- 2) относительно просто организованные моноблочные структуры со скрытым механизмом, размещенным в корпусе;
- 3) сложные объемно-пространственные структуры, сочетающие элементы первых групп.

На рисунке 4.1 показаны примеры постепенного нарастания плотности объемно-пространственной структуры. Ряды основаны на принципе нарастания плотности материала, в них можно найти место для любого изделия.

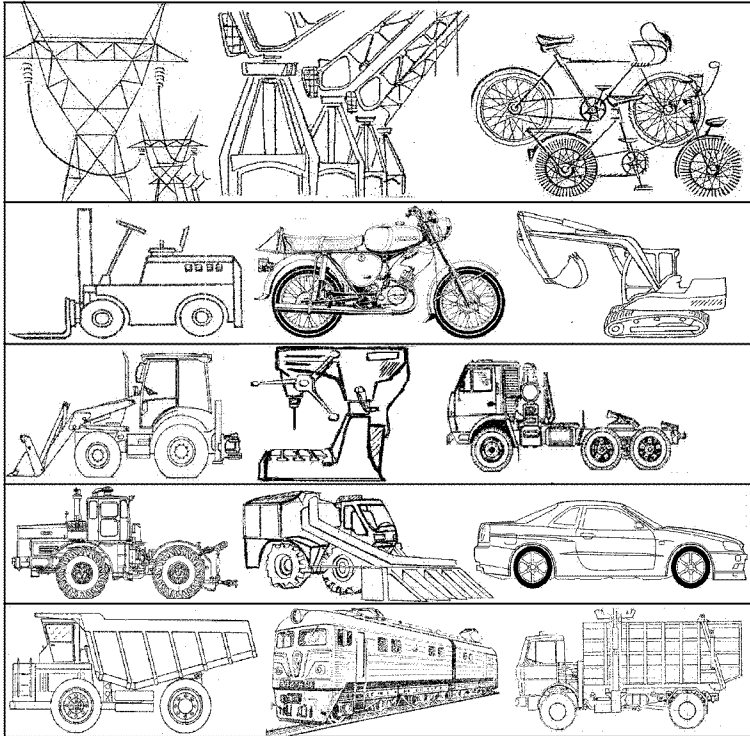


Рисунок 4.1 – Примеры постепенного нарастания плотности объемно-пространственной структуры

Создание эстетически полноценного изделия требует от конструктора учета характера взаимодействия пространства с объемом, организации в форме не только материала, но и пространства. Закономерности связи между элементами объемно-пространственной структуры должны быть органичными. На рисунке 4.2, *а* показана связь всех элементов структуры, основанная на прямоугольной сетке. Отношение между объемами и пространством определяет прямой угол. На рисунке 4.2, *б* элемент в контуре 1–2–3–4 с тупыми и острыми

углами не вписывается в геометрическую сетку данной структуры и в таком виде он недопустим. Но если он неизбежен, то для сохранения целостности композиции его требуется поддержать, увязать со всеми остальными элементами. Для этого необходимо найти ответные наклонные, хотя бы во второстепенных элементах, причем возможны наклонные и в обратную сторону, что изображено на рисунке 4.2, в.

Одним из основных условий достижения целостности объемно-пространственной структуры является ее общая упорядоченность. В

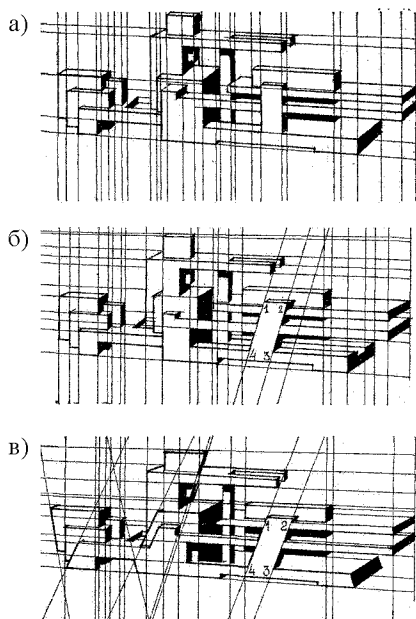


Рисунок 4.2 – Связи между элементами объемно-пространственной структуры

сложных конструкциях такую закономерность организовать трудно, она может восприниматься как неупорядоченность. Композиционно подчеркнутые улучшения в пределах целой конструкции позволяют организовать упорядоченную объемно-пространственную структуру. Единство строя, общий характер структуры, поддержание и развитие главных элементов в строе малых, частных элементов являются важной закономерностью объемно-пространственной структуры.

Важную роль играет место расположения предмета. Представим себе 100 одинаковых элементов (квадратов), равномерно расположенных в большом квадрате. Известно, что элементам в левом верхнем углу будет уделено 40 %

внимания зрителя, и столько же элементов в правом нижнем углу получают только 15 % внимания. Мало того, что внимание рассеивается из-за большого числа элементов, оно еще и распределяется неравномерно. Поэтому, если создается новая композиция, необходимо, чтобы элементов было не больше 5–7, иначе их будет трудно объединить в единую систему. Кроме того, следует позаботиться о соответ-

ствующих размерах и взаимном расположении, чтобы каждому элементу было уделено столько внимания, сколько он заслуживает по своему содержанию.

Тектоника и объемно-пространственная структура между собой взаимосвязаны и взаимообусловлены. На рисунке 4.3, *а* показаны два цилиндра химического реактора, которые смонтированы на опорах из швеллеров. Мощные опоры, примыкающие к цилиндрам, создают впечатление, что они проходят насквозь. Установка производит впечатление тяжелой и громоздкой. Цилиндры выглядят неработающими, так как они способны выдержать нагрузку, во много раз превышающую фактическую.

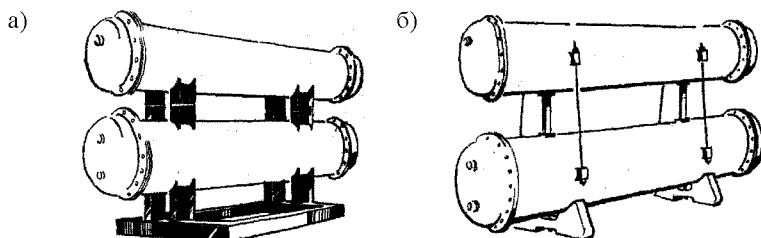


Рисунок 4.3 – Взаимосвязь тектоники и объемно-пространственной структуры

На рисунке 4.3, *б* показано принципиально новое решение конструкции. Здесь четко выявлены тяжесть цилиндров и загрузка опор, сечение которых соответствует расчетным значениям. При этом снижена общая масса агрегата и изменена его объемно-пространственная структура.

4.2 Основные принципы конструирования форм с пространственной структурой

При работе над формой изделия и идеей композиции базовой информацией является техническое задание, определяющее назначение, структуру и эксплуатационные свойства будущего изделия. Владея вариациями технической композиционной схемы, после определения на начальных стадиях разработки конструкторской документации структуры, состава и основных элементов изделия, дизайнер создает свои художественно-конструкторские варианты компоновки, определяет общую картину формообразования.

Относительное расположение и размеры составляющих элементов являются важным свойством количественно определенной структуры. Другим важным свойством являются размеры деталей и расстояния между ними. Относительное расположение элементов и размеры их составляющих могут быть использованы как переменные параметры при поиске конструктивных решений.

Метод изменения структуры выбирают на основе анализа ряда решений, в числе которых изменения геометрии формы и размеров, применение различных функциональных поверхностей, а также учет запретных зон.

Выбор количественно определенной структуры создает основание для конструирования формы изделия. Имеются два аспекта конструкции, которые надо анализировать совместно, а именно: общая форма изделия и форма элементов. Отправным пунктом при конструировании формы должно быть формулирование функции, которую должен выполнять элемент. После этого можно эскизировать наиболее важные поверхности (или функциональные поверхности) и затем конструировать остальные части элемента.

Под функциональной поверхностью понимают поверхность, выполняющую активную функцию в процессе эксплуатации, например шлиц в головке винта, зубья пилы, ударная поверхность головки молотка. Функциональные поверхности являются основой конструирования формы любого изделия. В изделии, состоящем более чем из одного элемента, имеются два типа функциональных поверхностей: наружные и внутренние. Наружные поверхности выполняют активную роль по отношению к окружающей среде, например, ручка, опорная поверхность и т. д. Внутренние поверхности обладают активной функцией по отношению к другим элементам изделия.

Художник-конструктор должен творчески подходить к вопросам формы, в своих поисках почувствовать новые возможности материала и предложить более эффективную технологию. Технологичность изделий является одним из важнейших критериев оценки качества. Но это не только косвенно-экономическая оценка, это оценка формы, ее художественного обобщения, нового технического характера. Нетехнологичность изделия обязательно скажется на форме, проявится

то торчащими под декоративным покрытием шляпками гвоздей и шурупов, то раскрытым швом, то волнистыми сборками листового материала. В процессе работы над опытным образцом многие недостатки устраняют вручную при доводке образца, т. е. с помощью кустарных методов маскируются или частично скрываются имеющиеся дефекты. Этим объясняется, что качество серийного изделия бывает хуже по сравнению с опытным образцом. Поэтому разработчики не должны оставлять в проекте изделия технологически нерешенных или плохо сочетающихся элементов.

Конструкция должна быть выполнена с рациональным использованием материала, что является одной из важной предпосылок эстетически осмысленной формы. На рисунке 4.4 приведены примеры решения облицовки радиатора на тракторах различных марок. Во всех случаях облицовка усилена за счет использования литья или стального листа, который работает не плоскостью, а ребром. При этом обеспечена надежная защита радиатора, который декорирован легкой решеткой или сеткой.

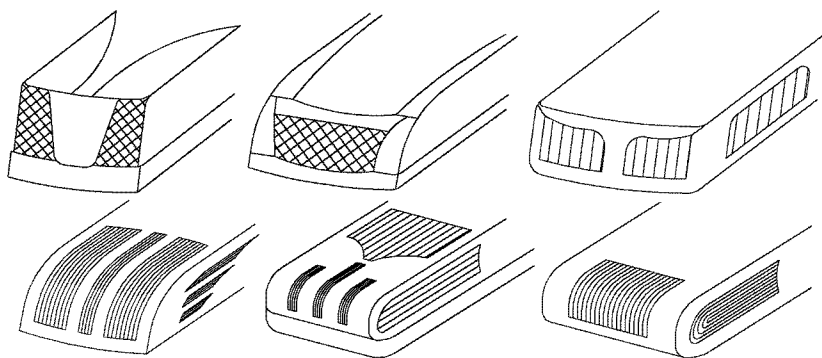


Рисунок 4.4 – Примеры облицовки радиатора

К категориям визуальной выразительности относятся категории визуальной прочности, устойчивости, напряженности и равновесия. Они отличаются от физических категорий тем, что характеризуют субъективное, чисто зрительное восприятие объекта в пространстве. Объективно форма может обладать механической устойчивостью положения или движения, а зрительно восприниматься как неустойчи-

вая и опасная для эксплуатации. Например, параллелепипед на горизонтальной плоскости и шар в сферическом углублении обладают высокой степенью устойчивости. Низкой степенью устойчивости обладают формы, элементы которых зрительно перенапряжены сжимающей нагрузкой или изгибающим моментом.

Общее правило для элементов формы, опирающихся на поверхности, заключается в следующем: чем ниже визуально воспринимаемый центр тяжести, тем выше устойчивость.

Визуальная напряженность характеризует соотношение зрительно воспринимаемых нагрузок и несущей способности элементов, воспринимающих эти нагрузки. Высокая напряженность ассоциируется с недостаточной прочностью, а низкая имеет место, когда формы несущих частей воспринимаются расплывчатыми и недогруженными.

При оценке визуального равновесия учитывается не физическое значение массы, а зрительно воспринимаемое. Например, большей массой обладают формы более компактного вида (куб и шар по сравнению со стержнем) при одинаковом объеме и с монолитной структурой (сплошное тело по сравнению с решетчатым). Визуально различаются по массе формы, отличающиеся от общего фона рельефом, освещенностью, яркостью, насыщенностью или тоном цвета поверхности.

Чтобы обеспечить устойчивое визуальное равновесие при различии размеров и объемов элементов, требуется перераспределить значимость элементов по другим свойствам и выразить структуру формы более активно. Например, при рассмотрении крана при различной значимости элементов формы (монолитность противовеса, выступающие части платформы и легкая листовая с поперечными связями конструкция стрелы), ось визуального равновесия совпадает с осью вращения. Отверстия в коробчатом сечении стрелы обеспечивают конструкции легковесность.

Форма как результат конструктивного взаимодействия всех элементов у изделий с различной структурой проявляется неодинаково. В частности, в пространственных конструкциях, системах с четко просматриваемой конструктивной основой, главные элементы которой выполняют зрительно хорошо воспринимаемую работу, связь между формой и кон-

струкцией оказывается очевидной и прямой. Форма таких изделий представляет собой легко "читаемую" конструкцию. Она является работающей формой, т. е. конструктивной системой в действии. Оценка формы в этом случае носит особый характер.

В качестве примера приведенных соображений представлены строительные машины (рисунок 4.5), форма которых полностью отождествляется с конструкцией.

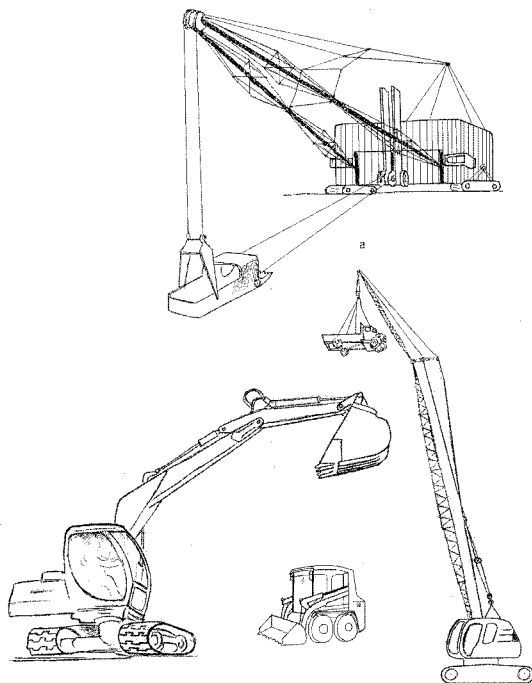


Рисунок 4.5 – Отождествление формы и конструкции машины

Работая над такими машинами, художник-конструктор должен увидеть самое характерное в них. Шагающий экскаватор (рисунок 4.5, *a*) является примером интересной пространственной конструкции, в которой в полной мере – от общего целого до узлов – удалось раскрыть характер машины. Огромная стрела с гигантским ковшом, воспринимается как конструктивно изящный элемент. Несущая конструкция выполнена из стальных труб, которые для придания всей

стреле устойчивости на продольный изгиб поддержаны системой сопровождающих тонких элементов. Поэтому, несмотря на большие абсолютные размеры диаметра главных несущих стержней, вся стрела воспринимается как легкая конструкция, создающая впечатление масштабности огромного механизма. В форме стрелы с ковшом (рисунок 4.5, б) чувствуется напряженность формообразующих контуров и рабочих частей конструкции. Совершенно иной характер у мини-погрузчика, показанного на рисунке 4.5, в. Это также пространственная конструкция, но уже с гораздо более компактной массой. Строительный кран с его относительно тонкой опорой и большим выносом стрелы производит впечатление необычайно легкой конструкции (рисунок 4.5, г).

Таким образом, при работе над пространственными конструкциями следует выявить рациональность и гармоничность всей системы. Найденные соотношения должны слиться с эстетически совершенной формой, чтобы создать впечатление устойчивого равновесия всей системы.

4.3 Свойства и средства композиции

Свойства композиции разделяются на главные, определяющие форму, и вторичные. Обязательными для композиции характеристиками, помимо тектоники и объемно-пространственной структуры, являются целостность, пропорциональность, масштабность, композиционное равновесие и единство характера формы.

Гармоничная целостность. "Гармония ... лежит в основе искусства на всем протяжении человеческой истории" – эти слова принадлежат известному архитектору И. В. Жолтовскому. Дизайн лежит на стыке искусства и техники, в нем целостность формы отражает логику и органичность связи конструктивного решения изделия с его композиционным воплощением. Конструктивные элементы изделий необходимо объединить не только технически (с помощью разъемных или неразъемных соединений), но и композиционно.

Целостность связана с другим средством композиции – соподчиненностью и достигается при соблюдении закономерностей соподчинения элементов, а без этого условия она отсутствует. В дорожном машиностроении элементы композиции (кабина, шасси, погрузочное

оборудование и т. д.) приводятся к художественному образу за счет применения единого принципа художественно-конструкторского формообразования. На рисунке 4.6 показан пример проявления целостности технической формы, которая создается тонкими и выразительными средствами. В частности, художник-конструктор немного наклоняет, скашивая вперед, облицовку радиатора. Эта наклонная (а не вертикальная) линия хорошо взаимодействует с наклонными линиями, которые обрисовывают у несущих элементов контуры рабочего оборудования, приводящего в движение ковш. В свою очередь, форма этих элементов и их контуры хорошо найдены.

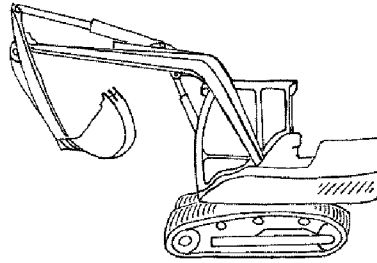


Рисунок 4.6 – Пример целостности технической формы

При создании изделия необходимо стремиться к композиционному равновесию, т. е. к такому состоянию формы, при котором все элементы сбалансированы между собой. Композиционное равновесие зависит от распределения основных масс композиции относительно центра и связано с характером организации пространства, пропорциями, расположением главной и второстепенной осей, с пластикой формы, с цветовыми и тональными отношениями отдельных частей.

В качестве примера регулирования визуальной устойчивости при конструировании можно привести различные варианты пульта управления (рисунок 4.7). Вариант "а" создает впечатление зрительной устойчивости, которая не теряется при незначительном увеличении длины панели (вариант "б"). При ее дальнейшем увеличении появляется чувство потери устойчивости конструкции. Тот же эффект (неустойчивости) производит вариант "г" при одинаковом сечении основания ($S_1 = S_2$). Для достижения визуальной устойчивости приходится использовать ползки (вариант "д") или же формировать обратный уклон задней стенки (плоскости 2–2' и 2–2'' в варианте "е"), а также уравнивать его уклоном передней стенки (плоскости 1–1' и 1–1'' в варианте "з"). При увеличении обратного уклона задней стенки

вариант "ж" производит визуальное впечатление опрокидывающейся назад конструкции, хотя физически она может быть совершенно устойчивой. При неперпендикулярности задней стенки основанию и наличии скосов передней стенки и панели пульта вправо, конструкция также становится зрительно абсолютно неустойчивой (вариант "и"). Создается впечатление ее падения вправо. Если же основание и панель пульта уравнивают друг друга (вариант "к"), то конструкция обретает зрительную устойчивость.

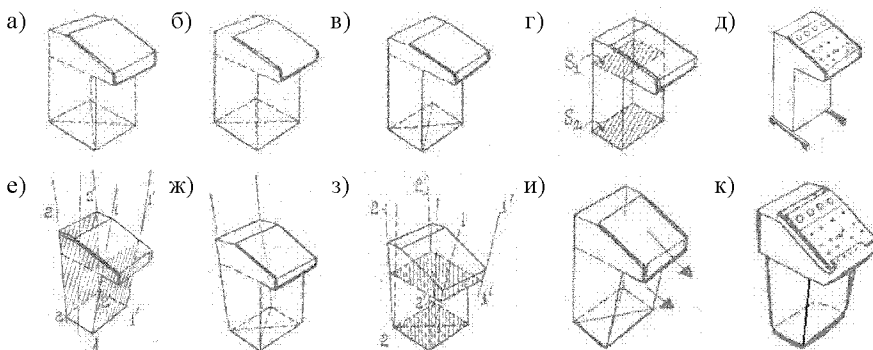


Рисунок 4.7 – Пульты управления с различной визуальной устойчивостью

Композиционное равновесие определяется таким состоянием формы, когда все предметы зрительно сбалансированы между собой. Достаточно убедительно выглядит равновесие погрузчика, которое зависит от положения центра тяжести при различных положениях ковша (рисунок 4.8). Композиционное равновесие может быть также достигнуто соподчинением (строю, формы цвета и т. д.), которое особенно важно для приборов, панелей и других элементов системы управления.

При проектировании симметричных форм легче всего достигается композиционное равновесие, поскольку его создает, как правило, ось симметрии. Под *симметрией* (греч. *simmetria* – соразмерность) в эстетике понимают гармоническое расположение в пространстве отдельных частей целого, соразмерность и соответствие между ними. Широко известны простейшие виды симметрии: зеркальная, цен-

тральная, плоскостная и осевая. В практике художественного конструирования они используются редко, поскольку большое количество элементов изделий и правила работы человека с машинами не позволяют создавать строго симметричные структуры. Чаще всего дизайнеру приходится иметь дело с частичной асимметрией формы изделия, с асимметричными, но композиционно уравновешенными структурами.

Статичность – это подчеркнуто устойчивое состояние покоя, формы, непоколебимости. Статичными являются предметы, имеющие явный центр, и у которых ось симметрии служит главной организующей осью, например, шар, куб или параллелепипед.

В транспортных средствах статичность исключается. Для них характерна динамичность формы, которая выражает активное односторонне направленное состояние объекта, как будто вторгающегося в пространство. Реакция на форму определяется зрительным движением вдоль длинной стороны объекта.

Динамичностью обладают и неподвижные и быстродвижущиеся объекты. Горизонтально расположенный конус является примером динамичных фигур – он как будто движется в сторону вершины. Даже прямоугольнику можно придать динамичность, если его разделить на неравные части, причем чем больше знаменатель прогрессии в отношении частей, тем выше кажущаяся динамичность формы.

Равномерное членение формы по горизонталям подчеркивает ее статичность. Если неравномерное членение симметричных частей формы направлено к ее оси симметрии, то форма будет статично направленной.

Динамичность движущихся объектов обусловлена функционально и вытекает из условий аэродинамики. Она должна соответствовать функциям изделия. Для движущихся объектов функционально и композиционно оправдана односторонне направленная форма (ри-

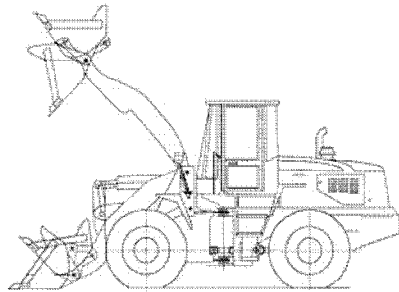


Рисунок 4.8 – Фронтальный погрузчик

сунки 4.9, а и 4.9, б). Для неподвижных машин, например, экскаваторов и самоходных кранов, характерна статическая, устойчивая форма (рисунки 4.9, в и 4.9, г).

Единство характера формы – одно из важных свойств композиции, которым определяется единый подход к формообразованию всех элементов. Определяющим фактором при выборе характера формы являются продолжительность срока службы изделия, направление развития формы, особенности материала и конструкция. Единство характера формы относят к свойствам композиции, но его следует рассматривать как особое средство композиции, которое тесно связано с другими средствами: пропорциями, пластикой, нюансными особенностями. Как особое средство композиции характер формы создает образность изделия и может быть использован при решении сложных композиционных задач.

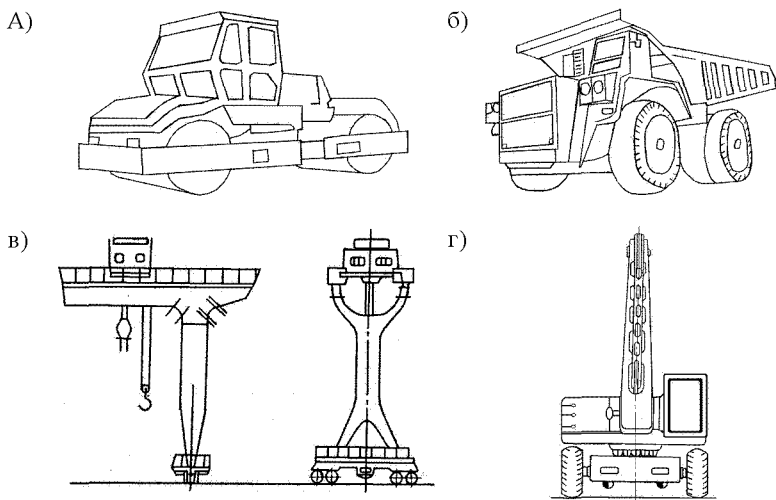


Рисунок 4.9 – Динамичность машин

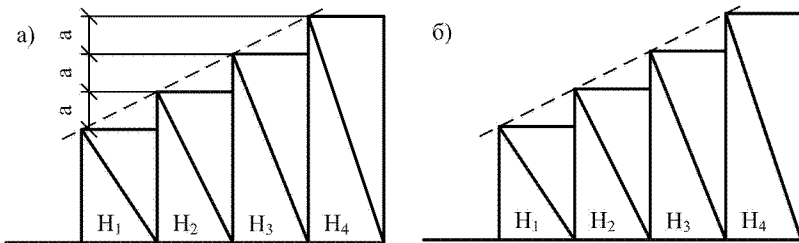
Пропорции являются одним из значимых средств гармонизации формы. На размерных отношениях элементов формы строится вся композиция. Пропорции определяются в виде различных математических отношений и выражают правильность геометрического строения формы при соблюдении единой пропорциональной зависимости как целого, так и отдельных частей предмета. Восприятие пропорций

зависит от характера поверхности, формы ее рисунка, влияющих на зрительное восприятие. Пропорционированию должны подчиняться все элементы формы в единой системе пропорций, обязательно соотношенных с человеком.

Возможны два варианта пропорционирования изделий. Первый вариант предусматривает возможность относительно свободного обращения с пропорциями, т. е. вначале разрабатывается форма, а затем – конструкция. Такой подход оправдан при проектировании пультов и приборов системы управления. Второй подход целесообразен при разработке сложных изделий, размерные отношения частей которых определяются конструкцией. В этом случае художник и инженер работают совместно и вносят изменения в конструкцию.

В области техники пропорции имеют большое значение. Это следует из того, что многие современные изделия являются системами многократно повторяющихся унифицированных элементов. В то же время унификация отдельных элементов предполагает строгую унификацию структуры в целом.

На практике различают следующие виды пропорций: арифметическую $H_1 - H_2 = H_2 - H_3$; геометрическую $H_1 / H_2 = H_2 / H_3$; различные виды гармонической. На рисунке 4.10, а представлено графическое выражение пропорциональной зависимости, где система пропорций подчинена метрическому ряду – высота прямоугольника увеличивается на одинаковую величину a . Геометрическая пропорция, которую называют “непрерывной”, изображена на рисунке 4.10, б.



Особое место принадлежит пропорции “золотого сечения”, в которое входят лишь две величины $a / b = b / (a - b)$. При выражении ряда пропорций в целых числах получается ряд, который носит имя открывшего его итальянского математика Фибоначчи: 1–2–3–5–8–

13–21–34–55 и т. д. Каждый член ряда получается суммированием двух предыдущих членов. На рисунке 4.11 показана схема деления отрезков в золотом отношении.

Следует отметить, что пропорции “золотого сечения” широко применяются для стандартизации и унификации машиностроительной продукции. Гармоничная целостность, функциональные и конструктивные характеристики технических изделий зависят от правильно найденных пропорций, которые должны учитываться на начальных этапах работы.

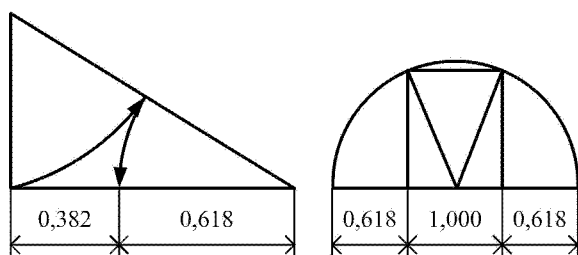


Рисунок 4.11 – Деление отрезков в “золотом” соотношении

Под масштабностью понимают особый вид пропорционирования по отношению к человеку. Масштаб может быть характерен для любой вещи, но не каждая вещь может быть масштабной, т. е. соразмерной человеку и окружающей среде. Например, элементами, определяющими масштабность дорожно-строительных машин, являются размеры кабины, органы управления и контроля и т. д.

Восприятие масштаба тесно связано с целесообразностью и удобством пользования. При создании машин и механизмов большой мощности должен учитываться масштаб человека. При разработке конструкции изделия нужно соблюдать масштабные закономерности построения его формы – небольшие агрегаты должны иметь относительно крупные детали, а большие – относительно мелкие. Следует стремиться к соблюдению масштабности и масштаба технических объектов, конструкторские решения которых должны задаваться не только техническими условиями, кинематикой и конструкцией, но и эргономическими требованиями. “Указателями масштаба” считают такие детали, которые сохраняют относительно постоянный размер независимо от того, какому по величине

объекту они принадлежат. К ним относятся, например, дверцы, рукоятки управления, сидения и т. д.

Под контрастом понимают противопоставление композиционных элементов изделия друг другу, резкое отличие однородных свойств в виде формы, текстуры, цвета, светотени и т. п. Контрасты бывают различными – контрасты направления, массы, формы, размеров, цвета, света структуры и фактуры поверхности.

Контраст придает форме активность и выразительность. Наиболее сильным воздействием обладает контраст светотени, в меньшей степени – цветовой. Контраст является сильным композиционным средством и поэтому достижение гармонии осуществляется соблюдением меры контраста, использованием плавных переходов, применением так называемых композиционных мостиков. Чрезмерное усиление контраста (как и его отсутствие) в значительной степени сказывается на работоспособности человека. Поэтому элементы, которыми пользуются постоянно (например, ручки управления), выполняют не черными, а серыми или коричневыми, что способствует уменьшению психофизиологической нагрузки при длительной работе.

Композиция, построенная на контрасте, имеет активное визуальное воздействие, но для достижения гармонии ее нужно дополнить теми необходимыми нюансными отношениями, без которых она может оказаться слишком резкой.

В отличие от контраста нюанс – постепенное, слабо выраженное различие свойств. Усиление нюанса способствует его переходу в контраст, ослабление – делает его неразличимым. Зависимость нюанса от функциональной компоновки и объемно-пространственной структуры выражена слабо. Нюансировка является сферой чисто художественного осмысления материала, формы и цвета и требует от художника-конструктора высокой квалификации.

В работе над формой изделия можно выделить многие нюансы, проявление которых возможно в пропорциях, ритме, цвете, пластике, фактуре поверхности. Технология производства и особенности материала значительно влияют на нюансную проработку формы.

Метрический повтор – это определенное повторение закономерности элементов формы. Он характеризуется постоянством шагов повтора. Метрический повтор в конструкции машин характерен для

элементов крепления, органов управления и контроля, зубцов на шестернях и храповиках, прорезей в жалюзи и т. д. Повторы могут быть разнообразными и зависят от размеров и шага, повторяемости одного или нескольких элементов с одним или несколькими шагами чередования. Метрический повтор зависит от конструктивных особенностей, но при необходимости организации формы может использоваться и в качестве декоративного средства. Между тем применение повтора еще не обеспечивает гармонии, поскольку при повторении только одного элемента создается впечатление монотонности. Как правило, композиция воспринимается особенно насыщенной и интересной, если развивается одновременно несколько рядов метрически повторяющихся элементов. На рисунке 4.12 представлен довольно сложный метрический повтор окон, шага дверей, межвагонных предметов поезда метро. Влияние метрического повтора в зависимости от целей может быть усилено или ослаблено. В варианте "а" цветом выделены двери, подчеркнут их шаг. На рисунке 4.12, б через весь вагон проведена горизонтальная полоса, т. е. метрический повтор нейтрализован. В первом варианте первый композиционный прием создал бы неприятный стробоскопический эффект – мелькание темных дверей перед глазами пассажиров. Во втором случае теряются двери, что неудобно для пассажиров. Одно из решений этой проблемы – выделение дверей остеклением и небольшим западом при одноцветной окраске вагона, что не требует ни усиления, ни ослабления повтора.

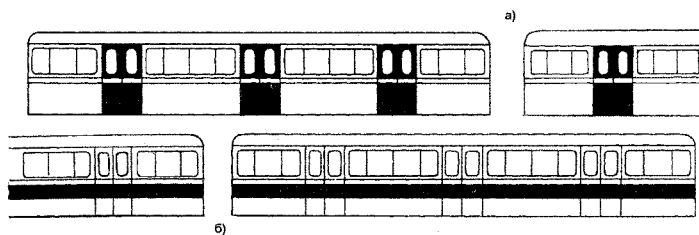


Рисунок 4.12 – Метрический повтор

Ряд может восприниматься как перенасыщенный при слишком близком расположении повторяющихся элементов, и фон не окажет заметного влияния. Использование нюансных решений будет способствовать восстановлению его целостности. Контрасты, наоборот, могут привести к перенасыщению ряда.

Элементы разреженного ряда будут выглядеть потерянными на большом фоне, поэтому их необходимо выделить, особенно в том случае, когда метрический ряд является основой композиции.

С помощью метрического повтора можно решать как композиционные задачи, так и задачи, связанные с функционированием изделия, поскольку этот элемент в технике является не только средством композиции, но и одной из ее наиболее ярких закономерностей.

В отличие от метрического повтора ритм (от греч. *rhuthmos* – соразмерность, стройность) – это закономерное изменение порядка структуры элементов, когда шаг повтора меняется. Для ритма характерны постепенные изменения в ряду чередующихся элементов – нарастание или убывание объема или площади, сгущение или выражение структуры и т. д. Даже сложный метрический повтор воспринимается проще ритма. Постепенные количественные изменения свойств чередующихся элементов задают форме динамичность и композиционное равновесие. Ритм “концентрирует” глаз наблюдателя на композиционных центрах изделия, который очень чутко реагирует на отступление от его закономерностей.

На рисунке 4.13, *а* ритм проявляется только в закономерном уменьшении сторон квадратов. На рисунке 4.13, *б* убывание толщины решетки к центру обеспечивает возрастание активности ритма. При одномерном изменении промежутков и толщин ритм предельно активен (рисунке 4.13, *в*). При изменяющемся интервале и неизменных решетках ритм нарушен.

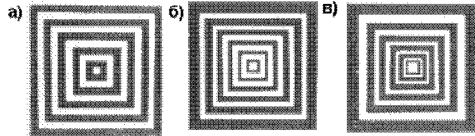


Рисунок 4.13 – Примеры проявления ритма

Ритм в композиции тем активнее, чем сильнее выражена эта закономерность, и может служить главным началом композиции. Ритм выражен слабо при незначительном изменении чередований. Поэтому ритмический ряд должен насчитывать не менее четырех-пяти элементов, для трех элементов ритм выявляется слабо. Правильное завершение ряда не создает впечатления случайного обрыва, поскольку сложный ритм задает сильное композиционное движение. Ритм как

средство композиции наиболее тесно связан с психофизиологией восприятия и поэтому является объективно обусловленным.

Для транспортных машин характерен единый, непрерывно изменяющийся пропорциональный ритм, не имеющий фиксированных точек перехода. Такой ритм обеспечивает динамическую форму в быстходном транспорте. Сильным средством может служить ритм, основанный на изменении формы элементов.

Одним из важных средств композиции при разработке объемно-пространственной структуры является цвет. Чем сложнее объемно-пространственная структура, тем больше степень влияния цвета. Правильно подобранное цветовое решение создает ощущение гармонии. При помощи цвета можно произвести корректировку пропорций и усилий, ослабить контраст, обострить или нейтрализовать характер формы. Цвет должен соотноситься с формой, которая находится в поле зрения оператора. Он является одним из самых объективных средств композиции. Вместе с тем, цвет является одним из самых серьезных факторов воздействия на психофизиологическое состояние человека, что следует учитывать при конструировании машин.

Особенности объемно-пространственной структуры характеризует пластика формы. Форма является пластичной, если она рельефна, скульптурна и имеет мягкие плавные переходы. Недостаток рельефности, резкость переходов создает впечатление сухости и аскетичности светотеневой формы.

Свет и тени не являются компонентами формы изделия, поскольку зависят от освещения и места расположения источника света, но определяют пластичность формы. При работе над формой художнику-конструктору приходится учитывать различные варианты освещения, распределение световых бликов, характер поверхностей, изменение светотеневой структуры при движении объектов.

Роль теней и света в композиции не всегда одинакова. Свет и тень могут играть различную организующую роль. Если простая форма создана крупными плоскостями, то легкие тени являются значимыми. Они являются контрастными на фоне больших освещенных поверхностей, объем приобретает выразительность и графическую остроту. Для достижения целостности малых форм особенно значима роль

пластики, которая тесно связана с нюансом и световой структурой. Пластическая проработка формы определяет ее светотеневую структуру, поэтому начальный этап эскизирования следует начинать с набросков теней изделия на белой бумаге.

Формы с глубокими рельефными элементами целесообразно прорисовывать одними тенями, а освещенная поверхность будет выглядеть светлой. Такой прием дисциплинирует глаз, позволяет подчеркнуть главное в форме и уточнить детали. Подобная проработка совместно с работой на макетах позволяет избежать в дальнейшем серьезных ошибок в объемно-пространственной структуре, которые впоследствии очень трудно исправить.

Дорожно-строительные машины (дорожные катки, скреперы, самосвалы и т. д.) представляют интерес с точки зрения композиционной целостности агрегата. Достижение единства формы является весьма сложной задачей, поскольку в ряде случаев следует учитывать конструктивные особенности базовой машины и навесность оборудования. Для этих машин форма непосредственно связана с компоновкой основных агрегатов, а также с эргономическими и психофизиологическими факторами.

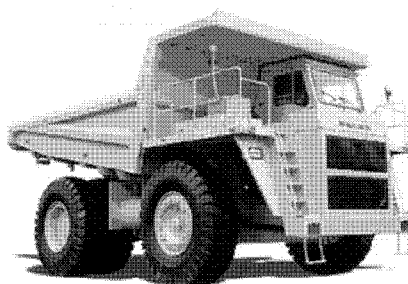


Рисунок 4.14 – Самосвал БелАЗ

Примером удачного сочетания формы и функции машины может служить представленный на рисунке 4.14 самосвал "БелАЗ". Динамичность формы связана не только со скоростью, ее подчеркивает мощь автомобиля-гиганта. Надстройка самосвала над шасси представляется состоящей из двух частей. Передняя часть завершается кабиной водителя, а заднюю часть представляет кузов самосвала с сильным защитным козырьком над кабиной, усиленным ребрами жесткости. Все части машины воспринимаются композиционно связанными. Просматривается энергичное движение вверх и стремительный вынос вперед в виде могучей консоли-козырька мощной полосы верхнего силового контура, который берет начало у заднего борта

кузова. Эта "линия" вдоль примыкания ребер жесткости проявлена светотенью, а местами (в консоли) силуэтно. Она играет в композиции важную роль и является одним из главных элементов, определяющих основу динамичной формы.

Как средство композиции удачно используется в данном примере контраст. Под надежной защитой козырька форма кабины водителя (легкая и зрительно почти хрупкая) создает необходимую сомасштабность человеку. При более грубой по форме и мощной по конструкции кабине гармония мощности и легкости не смогла бы проявиться. Форма самосвала богата и в контурах и в пластике, хотя в целом она воспринимается достаточно простой. В качестве композиционного приема художники использовали различные наклонные линии, строго скоординированные между собой. Наклонные линии передней стенки кабины, линии ребер кузова, скосы перехода от козырька к кузову, внутренней линии крыла не случайны – они точно найдены и композиционно взаимосвязаны. Наклонная стойка кабины как бы подхватывает и продолжает наклон выреза крыла, а ребра жесткости кузова гармонируют с наклонной линией передней части кабины.

Смелым решением является введение элемента асимметрии по отношению к оси симметрии. Здесь кабина смещена в одну сторону, а проходной мостик с поручнем – в другую. Могучую форму самосвала смягчает такой уравнивающий элемент асимметрии, а его пластика просматривается богаче и выразительнее при наличии чередования сочных теней и света.

Художниками-конструкторами тонко подмечены и умело использованы сложные нюансы, связанные с проявлением динамичности. Основные формообразующие линии машины как будто заряжены движением. В форме машины просматривается современный стиль. Благодаря своим техническим достоинствам и высоким эстетическим качествам карьерные самосвалы БелАЗ завоевали достойное место на мировом рынке.

При работе над объемно-пространственной структурой машины подбор световой и цветовой гаммы композиций является очень важным аспектом психофизиологии, поскольку затрагивает зрительные

возможности человека. В зависимости от четкости восприятия предметов его зрительное поле подразделяется на три основные зоны: центрального зрения, мгновенного зрения, эффективной видимости. Зона центрального зрения с углом 1,5–3 градуса – это часть зрительного поля, в пределах которого возможно четкое восприятие предметов. Зона мгновенного зрения (угол около 18 градусов) – это часть поля, в пределах которого возможно зрительное восприятие при ограниченном времени. Зона эффективной видимости (угол около 30 градусов) – это пространство, в пределах которого возможно достаточно четкое восприятие. При движении глаз и повороте головы происходит перемещение зон, и поле обзора увеличивается.

Следует учитывать, что чувствительность глаза от центра к периферии существенно изменяется. Так, если чувствительность зрения при повороте на нуль градусов принять за единицу, то при повороте на 20 градусов она составит $1/4$, а при повороте на 80 градусов – $1/36$. Периферическое зрение является ахроматическим, поскольку цвета воспринимаются центральными областями сетчатки. Области цветового зрения в пределах зрительного поля для разных монохроматических цветов неодинаковы: в вертикальной плоскости для белого цвета оно равно 120, желтого – 90, синего – 80, красного – 45, зеленого – 40 градусов.

Глаза человека различают в солнечном спектре более 120 градаций по световому тону, более 10 – по насыщенности, более 25 – по яркости, что дает свыше 30 тысяч различных цветов и оттенков.

Обстановка, достаточно разнообразная по цвету, способствует меньшему утомлению глаз. Цвет может дать успокоение или вызвать возбуждение (потрясение), создать гармонию или дисгармонию и даже привести к катастрофе.

Цвета, отличающиеся по цветовому тону, вызывают различные эмоции и оказывают различное воздействие на человека. На рисунке 4.15 дана **краткая характеристика основных цветов**. К этому можно добавить следующее:

– красный цвет – действует возбуждающе, но быстро утомляет зрение;



Рисунок 4.15 – Воздействие цвета на человека

стимулирует к активной деятельности;

- желтый – теплый, веселый, располагающий к хорошему настроению, однако, в избытке может вызвать головокружение и тошноту;

- зеленый – символ покоя и свежести, полезен для глаз, снижает внутриглазное давление и обостряет слух, улучшает двигательную способность, успокаивает и умиротворяет человека, снимает раздражение;

- синий – напоминает о воде, холоде; он свеж и прозрачен, кажется воздушным и легким; под его воздействием уменьшается физическое напряжение, успокаивается дыхание и пульс;

- фиолетовый – цвет утомленности и беспокойной взволнованности;

- белый – холодный и благородный;

- черный – мрачный и тяжелый, резко снижает настроение.

Как отмечалось, при выборе сочетания цветов, как правило, используют **три вида цветовой гармонии**:

- контраст – цвета по тону расположены на противоположных сторонах цветового круга (см. рисунок 4.15) или по насыщенности – один близко к центру, другой – далеко от центра, по яркости – один характеризуется слабым излучением, другой – сильным излучением;

- коричневым – создает ощущение теплоты, мягкое и спокойное настроение, выражает крепость и устойчивость, но способен располагать к мрачному настроению (коричневый цвет с серым оттенком угнетает, настораживает, вызывает тревогу и ожидание неприятностей);

- оранжевый – воспринимается как раскаленный, горячий, согревает, бодрит и

– нюанс – цвета близки по своим характеристикам;
– цветовая триада – три цвета, равноудаленные на цветовом круге.

В восприятии цветов важную роль играет явление цветового контраста, т. е. преувеличение действительной разницы между одновременными впечатлениями. На красном фоне серый цвет кажется зеленоватым, а на синем – отдает желтизной. Черный цвет на голубом – почти оранжевый, а на фиолетовом – желто-зеленый. В зависимости от фона четкость восприятия цветов различна. Основные четко воспринимаемые сочетания цветов по степени убывания: 1) синий на белом; 2) черный на желтом; 3) зеленый на белом; 4) черный на белом; 5) зеленый на красном; 6) красный на желтом; 7) красный на белом; 8) оранжевый на черном; 9) черный на пурпуровом; 10) оранжевый на белом; 11) красный на зеленом.

Контрасты цветов позволяют быстро воспринимать нужную информацию (черные буквы на белой бумаге, красный и зеленый цвета светофоров). Однако резкие контрасты быстро утомляют, поэтому их следует избегать там, где это возможно. Нюансные отношения цветов в технологическом процессе также могут вызвать перенапряжение или снижение внимания. Так, например, черную нитку на темном фоне заметить в 2000 раз труднее, чем на белом.

Цвет оказывает влияние на качественное восприятие объекта. В качестве примеров можно привести некоторые сочетания цветов при окраске изделий и создания интерьеров.

Опасные зоны машин и механизмов (вращающиеся детали, крюки кранов, бамперы дорожных машин) окрашивают в оранжевый цвет с белыми или черными полосами.

В приборах, сигнальных лампочках, элементах управления сочетают контрастные и нюансные отношения цветов. Выбор окраски машин определяется конкретными условиями применения, например: дорожные машины (асфальтоукладчики, катки) имеют оранжевый, хорошо заметный на расстоянии цвет; битумовозные машины – серый цвет; цементовозы, цементопогрузчики – серебристый цвет; экскаваторы окрашивают в светло-коричневый цвет.

Станки окрашивают в зеленый цвет разных оттенков. Рабочую зону станка выделяют, например, зеленым цветом меньшей насыщенности или желто-зеленым.

Стены цеха могут быть окрашены в тот же цвет, что и станки, но отличаться по яркости (необходим хорошо заметный яркостный контраст).

В горячих цехах целесообразны холодные цвета – голубой, светло-синий.

Цвет и свет неразрывно связаны между собой. Окружающие человека предметы и цвета могут восприниматься лишь при достаточном освещении. Световой поток, падая на поверхность, частично отражается, частично пропускается телом, частично поглощается. Белый цвет почти полностью отражает световой поток, черный – почти полностью поглощает, поэтому рекомендуются светлые тона окраски.

В зависимости от характера отражения светового потока различают виды направленного (зеркального), рассеянного и смешанного отражения. *Направленное* отражение получается при освещении гладких поверхностей, поэтому рекомендуется исключать из поля зрения оператора источники направленного отражения (блестящие предметы). Шероховатые поверхности вызывают *рассеянное* отражение, а матовые – *направленно-рассеянное*. Фарфоровая эмаль, молочное стекло вызывают *смешанное* отражение.

Таким образом, выбор материалов обуславливается также требованиями **освещения**. Для естественного освещения требуется максимальное остекление помещений. При искусственном освещении необходимы следующие условия:

1) интенсивность освещения должна соответствовать данному производству;

2) освещение должно быть достаточно равномерным;

3) отсутствие резких теней;

4) освещение должно соответствовать цветовому решению объекта и не нарушать правильность восприятия цветов;

5) светильники и отражатели света необходимо размещать так, чтобы свет не попадал в глаза.

При рассматривании объектов глаз движется скачкообразно – 3 % времени расходуется на движение, причем продолжительность фиксации паузы невелика и составляет 0,2–0,5 с, но и во время паузы глаз совершает произвольные мелкие движения. В связи с этим установлены следующие закономерности:

1 Горизонтальные движения глаз осуществляются быстрее вертикальных, поэтому первые менее утомительны, а горизонтальные размеры и пропорции оцениваются точнее вертикальных.

2 Прямолинейные контуры прослеживаются легче, чем криволинейные, а плавные сопряжения – легче, чем ломаные, так как глаз обладает инерционностью.

3 Ритмические композиции воспринимаются лучше и быстрее, чем метрические.

4 Предшествующие образы оказывают влияние на последующие в процессе быстрой смены объектов восприятия. Например, если после продолжительного рассматривания кривой перевести взгляд на прямую линию, то прямая кажется изогнутой.

Надежность – это свойство машины выполнять заданные функции, сохраняя во времени эксплуатационные показатели в заданных пределах в соответствии с режимом работы и условиями использования, технического обслуживания (ТО), текущего ремонта (ТР), хранения и транспортирования (ГОСТ 24.002–9). Уровень надежности машин оказывает существенное влияние на их эксплуатационные, технологические и технико-экономические показатели. Выбор оптимального уровня надежности машин является важной задачей, поскольку при недостаточной надежности резко возрастают затраты на техническое обслуживание и ремонт, а при избыточной – снижается эффективность их производственного использования и происходит перерасход ресурсов.

Надежность включает следующие свойства: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Безотказность – свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки (т. е. продолжительности или объема работ). Ее оценивают в единицах времени или в виде числа рабочих циклов.

Свойство безотказности проявляется в зависимости от назначения машины как при ее эксплуатации, так и в режиме ожидания работы.

Долговечность – свойство машины сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ТР.

В отличие от безотказности свойство долговечности характеризует продолжительность работы машины по суммарной наработке, которая прерывается периодами для восстановления ее работоспособности в плановых и внеплановых ремонтах, при техническом обслуживании.

Ремонтпригодность – приспособленность машины к предупреждению и обнаружению причин возникновения ее отказов (повреждений) и устранению их последствий путем ТО и ТР.

Свойство ремонтпригодности количественно характеризует компоновку машины (ее агрегатов и сборочных единиц), а также их доступность и съёмность при сборке и разборке.

Сохраняемость – свойство машины непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в процессе хранения и транспортирования.

Свойство сохраняемости характеризует способность машины противостоять отрицательному влиянию факторов ее длительного хранения и транспортирования, а также обеспечить после этого ее применение с заданными функциональными параметрами при сохранении показателей безотказности и долговечности.

Для разных машин эти свойства имеют различную значимость. Для машин, отказ которых может повлечь крупные убытки от простоев (краны и другие ПТМ), наиболее важным свойством является их безотказность, а для транспортирующих машин – ремонтпригодность, поскольку непродолжительные отказы существенно не влияют на их производительность.

Наглядное представление о надежности машины дает график ее работы (рисунок 5.1), на котором представлены периоды наработки, ремонта и технического обслуживания, т. е. периоды работоспособного (наработка) и неработоспособного (простой в ремонте) состояния машины.

Эти периоды могут различаться по продолжительности и чередованию, что дает информацию о надежности машины. В частности, длина участков t_n характеризует ее безотказность: чем они длиннее, тем выше безотказность. Длина участков t_p и $t_{то}$ свидетельствует о ремонтпригодности машины (с их уменьшением ремонтпригодность возрастает). И, наконец, с увеличением длины участков $t_n + t_p$ и $t_n + t_{то}$ растет долговечность машины.

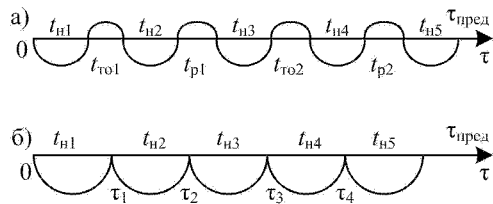


Рисунок 5.1 – Графики эксплуатации (а) и потока отказов элементов (б) машины:
 t_n – период времени наработки; t_{pi} – период времени ремонта при возникновении отказа; t_{toi} – период времени технического обслуживания (профилактики);
 τ_i – моменты отказов; $\tau_{пред}$ – момент наступления предельного состояния

5.1 Показатели надежности

Для решения практических задач по определению надежности машины используют многочисленные единичные и комплексные показатели, дающие количественную оценку одной или нескольких характеристик надежности. Из их числа следует выбрать такие показатели, которые в достаточно полной мере могут дать информацию о надежности. Эффективность эксплуатации машины в первую очередь зависит от показателей надежности, которые характеризуют длительность периодов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, а также затрат на поддержание работоспособного состояния при эксплуатации. Поэтому в качестве **основных характеристик** надежности целесообразно использовать следующие показатели: средний и гамма-процентный ресурсы до капитального ремонта или до списания; вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа или на отказ; интенсивность отказов или параметры потока отказов; среднее время восстановления работоспособного состояния; коэффициент технического использования и коэффициент готовности.

Из перечисленных характеристик к показателям надежности, присущим только *восстанавливаемым* элементам, следует отнести среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, среднее время восстановления.

Ресурсные показатели характеризуют *долговечность* машин и их элементов. Статистическая оценка среднего ресурса до капитального ремонта (или до списания) при наличии сведений о ресурсах N машин выражается формулой

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i,$$

где T_i – величина ресурса машины.

Гамма-процентным ресурсом T_j считается наработка, в течение которой машина не достигает предельного состояния с заданной вероятностью j процентов ($j, \%$), т. е. j (регламентированная вероятность) – это заданный процент машин, каждая из которых достигает установленного ресурса T_j . Он выражается зависимостью

$$P(T_j) = \frac{j}{100}.$$

Для $j = 50$ % ресурс называют *медианным*.

Следующая группа показателей характеризует безотказность машин. К ним относятся вероятность безотказной работы, наработка на отказ, среднее число отказов.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки не произойдет отказа машины. При достаточно большом числе анализируемых машин статистическую вероятность безотказной работы можно оценить с помощью выражения

$$P(t) = \frac{1}{N}(N - n),$$

где N – общее число машин, работоспособных в начальный момент времени;

n – число машин, отказавших ко времени t .

Это выражение можно представить в виде

$$P(T) = 1 - F(T),$$

где $F(T) = n / N$ – статистическая оценка вероятности отказа.

Наработка на отказ – это отношение наработки восстанавливаемой машины к математическому ожиданию (среднему значению) числа ее отказов в период этой наработки. Статистическая наработка на отказ восстанавливаемых машин

$$T_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^N t_i,$$

где $\sum_{i=1}^N t_i$ – суммарная наработка восстанавливаемых машин;

N_0 – суммарное число их отказов.

Параметр потока отказов зависит от периодов работы до отказа и восстановления. Он характеризует среднее число отказов восстанавливаемой машины за заданное время наработки

$$\omega(t) = n(t) / \sum t_i,$$

где $n(t)$ – число отказов за промежуток времени t ;

$\sum t_i$ – наработка за тот же промежуток времени.

В число показателей безотказности *невосстанавливаемых* деталей и узлов машин входят вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа и интенсивность отказов.

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание наработки до первого отказа. Эта характеристика *невосстанавливаемых* элементов соответствует показателю средней наработки на отказ *восстанавливаемых* элементов. Статистически наработку до отказа определяют из выражения

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{1i},$$

где N – общее число этих элементов;

$\sum_{i=1}^N t_{1i}$ – суммарная наработка *неремонтируемых* элементов до отказа;

t_{1i} – наработка до первого отказа i -го изделия.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это вероятность отказа *невосстанавливаемого* элемента, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник, т. е. это число отказов Δn , происшедших в единицу времени Δt , начиная с момента времени t , отнесенное к числу элементов, работоспособных в этот момент. Статистическая оценка $\lambda(t)$ может быть выражена в виде

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t} \frac{1}{N_p},$$

где N_p – число работоспособных элементов.

Как правило, для многих элементов машин зависимость интенсивности отказов (или опасности отказа) от времени наработки имеет вид, представленный на рисунке 5.2.

Время наработки можно условно разбить на три этапа. На *первом этапе*, который характеризуется повышенной интенсивностью отказов, происходит приработка и выявление скрытых дефектов, как конструктивных, так и технологических. Часто окончание прирабо-

точного этапа связывают с завершением гарантийного обслуживания машин заводом-изготовителем. На *втором этапе* реализуется режим стабильной работы, для которого характерна постоянная интенсивность отказов, которые носят случайный характер и появляются внезапно от действия случайных факторов. При этом время появления отказов не связано с предыдущей наработкой. И, наконец, на *третьем этапе* – этапе усиленного старения – происходит увеличение интенсивности отказов вплоть до достижения предельного состояния из-за массового числа отказов вследствие усиленного износа, усталостного разрушения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией. Ресурс машины назначают, как правило, в конце второго – начале третьего этапов наработки.

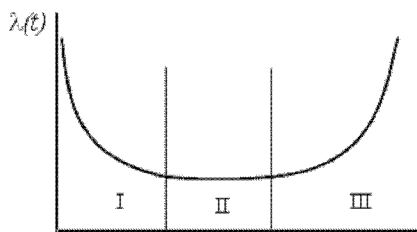


Рисунок 5.2 – Зависимость интенсивности отказов от времени наработки

Среднее время восстановления работоспособного состояния (математическое ожидание времени восстановления работоспособности) относится к показателям ремонтпригодности машин и их элементов. Оно характеризует продолжительность вынужденного простоя, необходимого для поиска причины отказа. Статистически среднее время восстановления определяют по формуле

$$T_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{vi} ,$$

где N – общее число восстанавливаемых машин;

t_{vi} – время восстановления i -й машины.

Помимо указанных единичных показателей, характеризующих одно из свойств надежности, используют **комплексные показатели**, которые позволяют одновременно оценить несколько характеристик надежности машины. К ним относят коэффициенты технического использования и готовности.

Коэффициент технического использования $k_{ти}$ статистически определяют отношением суммарного времени пребывания машин в работоспособном состоянии к суммарному времени их экс-

плуатации, включающем периоды пребывания машины в работоспособном состоянии и периоды простоев:

$$k_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}} + t_{\text{то}} + t_{\text{в}}},$$

где $t_{\text{н}}$ – суммарная наработка (пребывание в работоспособном состоянии) всех машин;

$t_{\text{п}}$ – суммарное время простоев при проведении плановых и внеплановых ремонтов всех машин;

$t_{\text{то}}$ – суммарное время простоев при проведении всех видов технического обслуживания машин;

$t_{\text{в}}$ – суммарное время восстановления работоспособности машин.

Коэффициент готовности $k_{\text{г}}$ характеризует вероятность того, что машина окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания. Статистически $k_{\text{г}}$ определяют отношением времени безотказной работы к сумме времени безотказной работы и времени простоя (за исключением периодов времени плановых ремонтов и технического обслуживания):

$$k_{\text{г}} = \frac{T_{\text{о}}}{T_{\text{о}} + T_{\text{в}}},$$

где $T_{\text{о}}$ – среднее время безотказной работы (наработка на отказ);

$T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления.

Как видно из данного выражения, коэффициент готовности дает информацию о таких единичных показателях, как наработка на отказ, характеризующая безотказность, и среднее время восстановления, которое характеризует эксплуатационную технологичность и ремонтпригодность.

Из определений $k_{\text{ти}}$ и $k_{\text{г}}$ следует, что чем меньше среднее время восстановления и суммарные простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, тем выше $k_{\text{ти}}$ и $k_{\text{г}}$.

5.2 Основные распределения случайных величин, используемые при оценке надежности

Основные показатели надежности, а также характеристики режимов нагружения машин и другие параметры являются **случайными**

величинами, которые могут быть непрерывного или дискретного типа. Значения случайных величин могут повторяться с частотой, определяемой функцией распределения $F(t) = P(T < t)$ и плотностью распределения $f(t) = F'(t)$, где t – значение случайной величины T .

Для решения ряда практических задач достаточно характеризовать распределение случайной величины рядом основных числовых характеристик (рисунок 5.3). К ним относятся математическое ожидание (среднее значение), дисперсия или среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, мода, медиана и квантиль. Последние характеризуют положение центров группирования случайных величин на числовой прямой. Эти характеристики используют как при статистической обработке результатов, так и в вероятностных расчетах при прогнозировании надежности.

Математическое ожидание (среднее значение) $m(t)$ является основной характеристикой случайной величины. Это постоянное число, к которому устойчиво приближается с ростом числа испытаний арифметическое значение случайной величины, найденное по опытным данным. Значение математического ожидания, определяемое по результатам наблюдений или испытаний (как для дискретных, так и для непрерывных величин), называют статистической оценкой математического ожидания или оценкой среднего арифметического значения

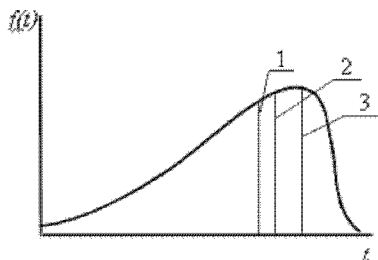


Рисунок 5.3 – Плотность вероятности $f(t)$ и числовые значения центра группирования случайной величины:
1 – медиана; 2 – математическое ожидание; 3 – мода

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad \text{или} \quad \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i t_i,$$

где N – общее число наблюдений (значений случайной величины);

g_i – число одинаковых значений t_i ;

t_i – текущее значение случайной величины.

При достаточно большом числе наблюдений полагают, что $m(t) = \bar{t}$.

В вероятностных расчетах математическое ожидание определяют в зависимости от плотности распределения $f(t)$ (для непрерывных величин) или вероятности P_i появления значения t_i (для дискретных величин) из выражений

$$m(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt \quad \text{и} \quad m(t) = \sum_{i=1}^N P_i t_i.$$

Дисперсией случайной величины называют математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания. Она характеризует разброс (рассеяние) случайной величины. Оценка дисперсии случайной величины – это среднее значение квадрата разности между текущим значением случайной величины и ее средним значением:

$$D(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2 \quad \text{или} \quad D(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N g_i (t_i - \bar{t})^2.$$

В вероятностных расчетах дисперсию оценивают по следующим выражениям:

– для дискретных случайных величин –

$$D(t) = \sum_{i=1}^N (t_i - m(t))^2 P_i;$$

– для непрерывных случайных величин –

$$D(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - m(t))^2 f(t) dt.$$

Поскольку дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, для удобства принято использовать характеристику, совпадающую по размерности со случайной величиной. Ее называют *среднеквадратическим отклонением* случайной величины. Она представляет собой корень квадратный из дисперсии, т. е.

$$S(t) = \sqrt{D(t)}.$$

Для оценки разброса случайных величин используют также *коэффициент вариации* (безразмерный показатель), равный отношению

среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию случайной величины:

$$v(t) = D(t) / m(t).$$

Модой случайной величины называют ее наиболее вероятное значение или то значение, при котором плотность вероятности максимальна.

Медиана характеризует расположение центра группирования случайной величины. Площадь под кривой $f(t)$ делится медианой пополам (см. рисунок 5.3).

Квантилью называют значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности. Квантиль, соответствующую вероятности 0,5, называют медианой.

В теории надежности применяют ряд **законов распределения случайных величин**. Выбор того или иного закона обусловлен характером изменения надежности машин, особенностями проявления отказов. Для инженерных расчетов наиболее часто используют экспоненциальное, нормальное и распределение Вейбулла.

Экспоненциальное распределение применяют для положительных непрерывных случайных величин. В общем случае его можно представить в виде

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где $P(t)$ – вероятность того, что случайная величина имеет значение, большее t ;

λ – параметр распределения.

Если в качестве переменной t используют время, закон экспоненциального распределения считают *основным уравнением надежности*, которое характеризует вероятность безотказной работы. $P(t)$ называют также функцией надежности.

Экспоненциальное распределение применяют для описания отказов агрегатов, узлов и машин, эксплуатирующихся в тяжелых условиях, в частности строительных и дорожных машин. Его широко используют для изучения внезапных отказов, которые вызваны неблагоприятным стечением обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность независимо от срока службы машины.

Следует отметить, что решение задач надежности при использовании экспоненциального закона оказывается намного проще, чем при использовании других законов распределения. Это связано с тем, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности периода и не зависит от времени предыдущей работы.

При описании внезапных отказов из закона экспоненциального распределения можно определить вероятность безотказной работы, которая одинакова за любой равный промежуток времени в период нормальной эксплуатации машины.

Для экспоненциального распределения функции вероятности отказа $F(t)$, плотности вероятности отказа $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ имеют следующий вид:

$$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda.$$

Среднее время до возникновения отказа можно определить из выражения

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Экспоненциальное распределение является *однопараметрическим*, определяемое только параметром λ . Для его определения достаточно получить оценку средней наработки до отказа T_1 . На рисунке 5.4 представлены зависимости параметра $\lambda(t)$, а также $P(t)$ и $f(t)$.

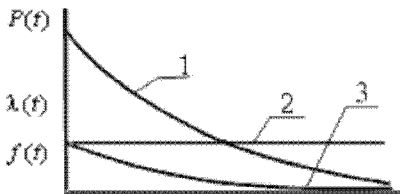


Рисунок 5.4 – Функции надежности $P(t)$ (1), параметра $\lambda(t)$ (2) и плотности вероятности отказа $f(t)$ (3)

Нормальное распределение (распределение Гаусса) применяют для любых непрерывных случайных величин. Оно является наиболее универсальным и используется для описания постепенных отказов. Для нормального распределения плотность вероятности отказа, вероятность отказа и вероят-

ность безотказной работы (функцию надежности) можно определить по формулам:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2S^2}}, \quad F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt, \quad P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt.$$

Нормальное распределение имеет два независимых параметра: математическое ожидание, или среднюю наработку на отказ, и среднеквадратическое отклонение.

Особенностью нормального распределения является ограничение подавляющего большинства отклонений от математического ожидания интервалом $\pm 3S$.

Распределение Вейбулла также является наиболее распространенным. Его используют для описания наработки деталей по усталостным разрушениям, а также для оценки надежности деталей и узлов дорожно-строительной, подъемно-транспортной и другой техники, в частности времени их безотказной работы, времени наработки до предельного состояния. Это распределение является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределения.

В основном используют двухпараметрическое распределение, для которого плотность распределения описывается зависимостью

$$f(t) = \alpha\lambda \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t^\alpha},$$

где α – параметр формы кривой распределения;

λ – параметр масштаба.

На рисунке 5.5 представлена зависимость плотности распределения при $\lambda = 1$.

Функции распределения Вейбулла и вероятности безотказной работы имеют вид

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t^\alpha}, \quad P(t) = e^{-\lambda t^\alpha}.$$

В этом случае выражение для расчета математического ожидания принимает вид

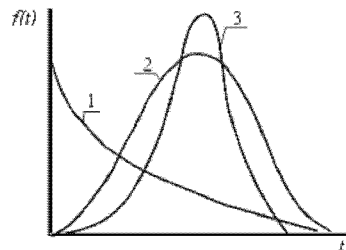


Рисунок 5.5 – Функции плотности распределения Вейбулла для $\lambda = 1$ при различных значениях α : 1–1; 2–2; 3–3

$$m(t) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \lambda^{-\frac{1}{\alpha}},$$

где $\Gamma(t)$ – гамма-функция.

Значения параметров определяют по специальным таблицам в зависимости от оценки коэффициента вариации.

Распределение Вейбулла имеет более широкие возможности и позволяет получить лучшее соответствие расчетных значений экспериментальным или опытным данным по сравнению с экспоненциальным распределением.

При значениях параметра $\alpha < 1$ это распределение используют для описания надежности детали на этапе приработки. Если $\alpha > 1$, его можно использовать для описания надежности деталей при быстром старении. При $\alpha = 3,3$ распределение Вейбулла близко к нормальному.

Следует отметить, что при решении задач по оценке надежности не обязательно знать упомянутые аналитические зависимости этого распределения, а также их коэффициенты вариации, поскольку все необходимые расчетные данные с использованием закона Вейбулла табулированы.

5.3 Основные факторы, снижающие надежность машин

Наиболее существенным фактором, влияющим на отказы деталей и узлов машины, является **усталостное разрушение**, которое вызывает необратимые изменения структуры и физико-механических характеристик материалов.

Большое число отказов в машинах связано с механическим разрушением деталей и конструкций. Как правило, имеют место **два типа отказов по критерию прочности**: во-первых, внезапные отказы, вызванные мгновенным разрушением детали (действующие в детали или элементе конструкции напряжения превышают допускаемые напряжения, обусловленные пределом прочности или текучести материала детали); во-вторых, постепенные отказы, связанные с накоплением повреждений при многократно повторяющихся нагрузках, значения которых значительно ниже упомянутых выше статических нагрузок.

Разрушение деталей и конструкций строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин происходит, в основном, по механизму постепенного накопления повреждений при переменных внешних нагрузках, изменяющихся по величине и частоте воздействий. Значительно реже происходят разрушения деталей, конструкций и узлов машины, вызванные внезапными статическими нагрузками (обычно это аварийные ситуации, например, наезд машины на непреодолимое препятствие и др.).

Переменные нагрузки при установившихся режимах нагружения могут вызывать в деталях и конструкциях циклические изменения напряжений различного характера. Различают симметричный, пульсирующий, асимметричный и сложный **циклы напряжений**. У симметричного цикла наибольшее σ_{\max} и наименьшее σ_{\min} напряжения противоположны по знаку и одинаковы по величине. У пульсирующего (отнулевого) напряжения меняются от нуля до σ_{\max} . Асимметричный цикл имеет неодинаковые по величине σ_{\max} и σ_{\min} , которые могут быть знакопеременными и знакопостоянными. И, наконец, сложный цикл сочетает особенности перечисленных циклов.

Кроме σ_{\max} и σ_{\min} к характеристикам напряжений относятся:

амплитуда цикла $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$;

среднее напряжение $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$;

коэффициент асимметрии цикла $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

В результате малозаметного, но весьма ощутимого воздействия на материалы циклических нагрузок со временем в деталях происходят необратимые явления, связанные с **накоплением повреждений**. Процесс их накопления под воздействием переменных напряжений (нагрузок) называют усталостью. Если эти напряжения периодически превышают допускаемые напряжения, называемые пределом выносливости, в материале постепенно накапливаются микротрещины, которые, развиваясь, вызывают появление трещин недопустимых размеров либо полное разрушение детали или конструкции.

Способность материала выдерживать переменные нагрузки, называют усталостной прочностью, которая существенно ниже статической прочности материалов.

Количественно усталостный процесс описывают зависимостью, связывающей максимальное напряжение σ в материале детали при ее нагружении с числом циклов нагружения N (кривая Веллера). В каче-

стве характеристики усталостной прочности принимают предел выносливости σ_{-1} , представляющий собой максимальное напряжение, которое может выдержать деталь без разрушения при длительной эксплуатации. Для большинства конструкционных материалов кривая усталости в полулогарифмических координатах имеет вид прямой с изломом (рисунок 5.6).

Число N_0 (точка перелома кривой) называют базовым числом циклов ($N_0 = 10^7$). Если величина действующего напряжения σ_i не превышает предела выносливости (σ_{-1}), то она не оказывает разрушающего воздействия на деталь и не вызывает ее отказа. Наклонная (левая) часть кривой усталости аппроксимируется степенной

зависимостью
$$\frac{N_i}{N_0} = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_i} \right)^m.$$

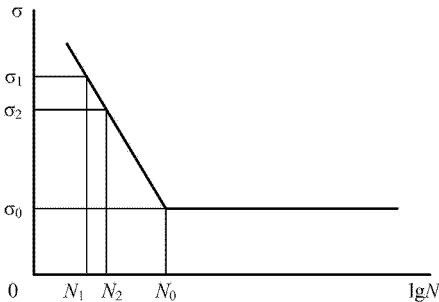


Рисунок 5.6 – Зависимость напряжений в материале детали от числа циклов нагружения

Эта зависимость позволяет определить разрушающее число циклов N_i (т. е. ограниченную долговечность) при напряжениях в детали σ_i , которые превышают предел выносливости детали. Показатель степени m зависит от свойств материала, формы и размера детали, условий нагружения и других факторов. Соответственно из-за

этого его величина меняется в довольно широких пределах ($m = 3 \dots 20$).

На рисунке 5.6 видно, что при увеличении напряжений с σ_2 до σ_1 ресурс детали уменьшается с N_2 до N_1 циклов. Число циклов, которое выдерживает деталь без разрушения (в данном случае N_1 и N_2) при определенном напряжении (соответственно при σ_1 и σ_2), называют усталостной долговечностью.

Приведенные выше кривые усталости характерны для так называемых многоцикловых усталостных разрушений, область которых охватывает диапазон от 10^5 до 10^7 и более циклов. Кроме того, имеется и малоцикловая усталость, которая возникает при числе циклов нагружения в диапазоне 10^2 – 10^5 циклов. Возникновение малоцикло-

вых разрушений происходит из-за того, что в локальных зонах детали вследствие наличия концентраторов напряжения появляются напряжения, близкие к пределу текучести материала.

К основным факторам, определяющим выносливость детали или конструкции, относятся: 1) конструктивные (наличие и количество концентраторов напряжений, масштабный фактор, форма поперечного сечения и др.); 2) технологические (структура металла, наличие объемных и поверхностных дефектов, шероховатость поверхности, поверхностное упрочнение); 3) эксплуатационные (режим и вид нагружения, характер нагрузки и др.).

Конструктивные особенности деталей вносят значительный вклад в обеспечение их выносливости. С увеличением размеров детали ее выносливость ощутимо снижается. Вместе с тем масштабный фактор не оказывает влияния на угол наклона кривых усталости и положение их точки излома. Поэтому для определения пределов выносливости крупногабаритных деталей можно использовать результаты испытаний образцов из тех же материалов, моделирующих работу и повторяющих форму изделий.

Конструктивные концентраторы напряжений (резкое изменение формы, острые углы, резкие переходы и др.) также снижают показатели выносливости. Наиболее опасными местами деталей являются впадины зубьев и резьб, галтели, шпоночные пазы и шлицы, поверхности с острыми углами. Чувствительность материала детали к концентраторам напряжений оценивают коэффициентом концентрации напряжений α_k , связывающим пределы выносливости гладкого образца σ_{-1}^I и образца с надрезом σ_{-1}^H , $\alpha_k = \sigma_{-1}^I / \sigma_{-1}^H$. Для устранения влияния концентраторов напряжений изменяют форму детали за счет оптимизации конфигурации опасных сечений, по возможности устраняют острые углы и подрезы в деталях и конструкциях (например, за счет скругления впадин зубьев в зубчатых колесах), устраняют резкие переходы или изменяют конфигурацию переходных зон в деталях, сближают размеры различных зон деталей, увеличивают радиусы закруглений.

Характеристики усталостной прочности реальных конструкций существенно отличаются от результатов испытаний на усталость образцов тех же материалов. Это обусловлено в основном действием

концентраторов напряжений, возникающих в различных соединениях (сварных, заклепочных, резьбовых, прессовых).

В сварных соединениях концентрация напряжений возможна в сварных швах из-за неоднородности металла (литейная структура шва, выгорание углерода и легирующих элементов) и в зонах соединения шва с основным металлом из-за структурных изменений в металле околосшовной зоны, например, на границе закаленной и незакаленной областей сварных соединений. Это может вызвать значительное снижение предела выносливости сварных соединений – в 2–5 раз по сравнению с гладкими образцами из основного металла. К этому следует добавить отрицательное влияние остаточных внутренних напряжений, возникающих при сварке. В ряде случаев растягивающие остаточные напряжения в сварных соединениях могут на 50 % снизить их усталостную прочность. Кроме того, предел выносливости во многом зависит от качества выполнения сварки и значительно уменьшается из-за сварных дефектов (пор, непроваров, шлаковых включений и др.).

Существенное влияние на выносливость деталей и конструкций оказывают *структурная неоднородность металла*, а также наличие примесей, неметаллических включений, пор и других объемных дефектов, которые могут инициировать возникновение усталостных трещин и значительно (на порядок и более) снизить долговечность детали. Меньшее, но достаточно ощутимое влияние оказывает *качество поверхности*, в частности, ее шероховатость: поверхностные дефекты (царапины, задиры, риски и др.) на 30–40 % снижают выносливость детали.

Влияние режимов нагружения и характера нагрузок при эксплуатации машины на усталостную прочность ее деталей и конструкций зависит от свойств материала, особенностей конструкций деталей и других факторов. К наиболее значимым эксплуатационным факторам относятся *частота нагружений* и *асимметрия цикла нагружений*. Установлено, что в широком диапазоне частот с увеличением частоты приложения нагрузки срок службы изделия снижается, а рост величины действующих напряжений способствует возрастанию влияния частоты нагружения. Вместе с тем в наиболее распространенном интервале частот (от 10 до 100 Гц) усталостная прочность незначительно зависит от частотных характеристик нагружения детали. При

этом угол наклона кривой усталости при изменении частоты нагружений не меняется, что свидетельствует об отсутствии влияния этого фактора на скорость накопления повреждений.

Степень асимметрии (она характеризуется соотношением между минимальным σ_{\min} и максимальным σ_{\max} напряжениями) существенно снижает предел выносливости деталей и конструкций. Еще большее влияние на усталость оказывает наложение на основную частоту редких перегрузочных импульсов. Установлено, что нагружение импульсными перегрузками на фоне основного нагружения, описываемого синусоидой, снижает усталостную прочность деталей и конструкций в 2–3 раза. О большой чувствительности к асимметрии цикла напряжений говорят величины коэффициента $\psi_{\sigma} = 0,1 \dots 0,3$ для стальных изделий. Этот коэффициент связывает предел выносливости при симметричном σ_{-1} и пульсирующем (отнулевом) σ_0 циклах:

$$\psi_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}.$$

Выносливость деталей и конструкций существенно зависит от *среды, температурных режимов эксплуатации* и других факторов. Если циклическим напряжениям сопутствуют коррозионные процессы, воздействие высоких температур или радиации, предел выносливости может значительно снижаться, а в ряде случаев и вовсе отсутствовать (на кривой усталости).

На рисунке 5.7 представлены кривые усталости стальных образцов, которые были испытаны на воздухе, в минеральном масле и в воде. Видно, что даже масло, которое является химически инертной средой, оказывает отрицательное влияние на предел выносливости и базовое число циклов.

Это явление обусловлено снижением выносливости из-за расклинивающего действия масла, адсорбированного на поверхности образ-

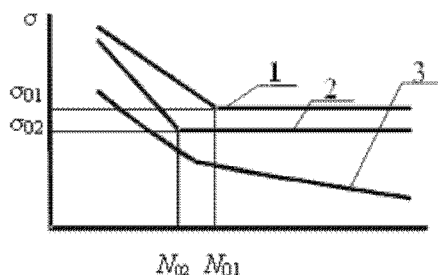


Рисунок 5.7 – Кривые усталости стальных (20Х) деталей, полученные при испытаниях в различных средах:
1 – на воздухе; 2 – в минеральном масле;
3 – в воде

цов, которое ускоряет процесс развития поверхностных микротрещин (эффект Ребиндера).

Следует отметить, что расчеты на выносливость обеспечивают высокую точность только при стационарном циклическом нагружении, когда параметры всех циклов одинаковы.

При **нестационарном режиме нагружения** используют расчеты на усталость, основанные на гипотезе суммирования усталостных повреждений, возникающих под действием различных нагрузок. Учет их влияния производится на основе различных гипотез. Наиболее распространенной является *гипотеза линейного суммирования напряжений* (*гипотеза Пальмгрейна–Майнера*). Согласно этой гипотезе разрушение детали происходит в результате постепенного накопления в материале повреждений. Если деталь работает в переменном (ступенчатом) режиме нагружений, то на каждой i -й ступени степень повреждения детали можно приближенно оценить ее относительной долговечностью, т. е. отношением числа циклов нагружения на этой ступени n_i при напряжении σ_i к числу циклов нагружения N_{pi} до разрушения (n_i / N_{pi}). При этом число повреждений будет нарастать пропорционально относительной долговечности детали на каждой ступени и может линейно суммироваться, т. е.

$$n_1 / N_{p_1} + n_2 / N_{p_2} + \dots + n_k / N_{p_k} = \sum_{i=1}^k n_i / N_{p_i} .$$
 Условие разрушения при

ступенчатом изменении нагрузок можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_{p_i}) = \omega ,$$

где n_i – число циклов нагружения за время эксплуатации при напряжении σ_i ;

N_{pi} – число циклов нагружения до разрушения при напряжении σ_i ;

k – число уровней нагружения до разрушения;

ω – параметр, учитывающий особенности материала детали и условия нагружения.

В самом простом случае при $\omega = 1$ согласно этой гипотезе, если деталь, например, при напряжении σ_1 (см. рисунок 5.7) выработала 30 % своего ресурса ($n_1 = 0,3N_1$), то при напряжении σ_2 она может выработать 70 % ресурса ($n_2 = 0,7N_2$), т. е.

$$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i} = \frac{0,3N_1}{N_1} + \frac{0,7N_2}{N_2} = 1.$$

Из-за своей простоты гипотеза линейного суммирования повреждений более распространена, чем гипотезы нелинейного суммирования. Многочисленные проверки показали, что она дает вполне достаточную для инженерных расчетов точность результатов при различных видах нагружений.

Описанный нестационарный режим можно привести (с рядом допущений) к некоторому эквивалентному стационарному режиму работы, при котором деталь приобретает такую же степень повреждений, что и при нестационарном процессе. Если в качестве эквивалентного принять режим с напряжением $\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_{-1}$ и долговечность N_0 , то из уравнения кривой усталости получим $\sigma_i^m N_{p_i} = \sigma_{-1}^m N_0$. Отсюда

$$N_{p_i} = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_i} \right)^m N_0.$$

Если подставить данное равенство в условие разрушения, то получим выражение

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt[m]{\frac{1}{\omega N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_i^m N_i}.$$

Полученное соотношение можно использовать и для определения эквивалентной нагрузки, если заданы нагрузки на отдельных ступенях нестационарного режима.

Как уже отмечалось, обычно принимают $\omega = 1$, т. е. считают, что деталь разрушается, если сумма накопленных повреждений в ней достигает единицы.

Изнашиванием (износом) деталей и узлов называют процесс постепенного изменения геометрических размеров и форм элементов машины (рабочих органов, ходового оборудования, деталей в сопряжениях) при трении, которое проявляется в отделении с поверхности трения частиц материала и в его остаточной деформации. В современных машинах отказы из-за износа достигают 80–90 % от общего числа отказов. Отказы в узлах трения могут возникать по ряду *причин*: во-

первых, из-за износа трущихся поверхностей до предельного состояния; во-вторых, из-за резкого увеличения коэффициента трения вплоть до схватывания и заедания поверхностей трения; в-третьих, из-за недопустимого уменьшения коэффициента трения в тормозных системах и фрикционных передачах. Из них основной причиной отказов является износ трущихся поверхностей.

Как правило, изнашивание характеризуют величиной линейного износа, т. е. изменением размеров детали в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. В ряде случаев для оценки изнашивания используют величину объемного и массового износа. К **основным показателям износа** относят скорость и интенсивность изнашивания. Скорость изнашивания определяют как отношение величины износа ко времени, в течение которого он возникает. Интенсивность изнашивания определяют как отношение величины износа к длине пути трения, на котором происходит изнашивание.

Свойство материала при трении оказывать сопротивление изнашиванию называют **износостойкостью**. Для ее оценки используют показатели, обратные скорости или интенсивности изнашивания.

Одним из важных факторов трения и изнашивания является характер взаимных перемещений, во многом определяющий динамику изнашивания. Относительное перемещение сопряженных элементов в узле трения может сопровождаться трением скольжения, трением качения и трением качения с проскальзыванием.

При трении скольжения происходит наибольший износ сопряженных деталей, что сопровождается высокой энергоемкостью процесса трения. Например, червячная пара (при однозаходном червяке), в которой реализовано трение скольжения, имеет наименьший КПД ($\eta \leq 0,75$) из всех зубчатых передач. Оно характерно для кинематических пар, содержащих подшипники скольжения, манжетные уплотнители, направляющие и др. Кроме того, в машинах используют такой положительный эффект трения скольжения как возможность реализации больших сил трения при относительно малых нормальных силах (в тормозных системах, фрикционных передачах и др.).

Трение качения имеет наибольшее распространение в машинах в связи с минимальным износом и низкой энергоемкостью. Этот вид трения реализуется в парах вал – подшипник качения, колесо – рельс, ролик – лента и др.

При трении качения с проскальзыванием относительное перемещение деталей осуществляется одновременно с качением и скольжением. Этот вид трения по износу и энергетическим характеристикам занимает промежуточное положение между трением скольжения и трением качения. Трение качения с проскальзыванием осуществляется в кулачковых механизмах, в зубчатых передачах, обеспечивая в последних значительно меньшие потери на трение по сравнению с червячными передачами.

Вместе с тем вид трения не является постоянной характеристикой узла трения. Даже для правильно сконструированного и изготовленного узла в зависимости от многих эксплуатационных факторов вид трения может меняться, и, как правило, его изменение сопровождается снижением и потерей работоспособности узла. Так, при загрязнении подшипников качения трение качения переходит в трение скольжения их промежуточных тел (роликов или шариков) по поверхности одного из колец или в трение скольжения подшипника по поверхности гнезда. При движении колес по рельсам трение качения колеса по рельсу переходит в трение качения с проскальзыванием в паре обод колеса – рабочая поверхность рельса и в трение скольжения в паре реборда колеса – боковая поверхность головки рельса.

Изнашивание протекает в местах фактического контакта трущихся поверхностей, размеры которых намного меньше номинальной площади контакта, определяемой размерами сопряженных деталей. Силы, действующие в местах фактического контакта, вызывают деформации в поверхностных слоях, которые при многократном повторении приводят к усталостному разрушению поверхностных слоев. Помимо этого, на микровыступах площадок контакта может происходить микрорезание (отделение частиц материала), которое существенно интенсифицируется, если в зону трения попадают абразивные частицы.

Описанные явления часто сопровождаются физическим и химическим взаимодействием материалов трущихся деталей. Все это свидетельствует о сложности процессов изнашивания, зависящего от многих факторов, в числе которых макро- и микрорельеф поверхности, нагрузки и скорости относительного перемещения деталей, свойства материалов и состояние трущихся поверхностей, наличие

смазочного материала и загрязнений, форма детали и особенности конструкции узла трения.

Многочисленные и разнообразные **виды изнашивания** классифицированы в ГОСТ 16429–70 и разделены на три основных группы: механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое изнашивания. На практике наиболее часто встречается *механическое* изнашивание, которое, в свою очередь, разделяют на усталостное, абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное и кавитационное. Следует отметить, что это разделение в известной мере условно, поскольку чаще всего встречаются комбинации различных видов изнашивания. Тем не менее, при эксплуатации строительных, дорожных, подъемно-транспортных и других машин в нормальных (не экстремальных) условиях основными видами изнашивания деталей, узлов и элементов рабочего оборудования являются абразивное и усталостное.

Абразивное изнашивание происходит в результате микрорезания или многократного деформирования металла частицами твердых материалов (гравия, щебня, песка, пыли). С увеличением нагрузки и размеров частиц величина износа возрастает, а с увеличением твердости металла снижается. Микрорезание наступает при отношении твердости материала поверхностного слоя детали (H_d) к твердости частиц абразива (H_A) – $H_d/H_A < 0,5$.

Преимущественно абразивному изнашиванию подвергаются поверхности элементов рабочего оборудования машин, которые взаимодействуют с перерабатываемым материалом или разрабатываемым грунтом, а также элементы ходового оборудования. К ним относятся режущие элементы рабочих органов строительных, дорожных и других машин (ножи, зубья и отвалы бульдозеров и грейдеров, зубья, ножи и режущие кромки ковшей экскаваторов и скреперов, долота, зубила и другое сменное рабочее оборудование одноковшовых экскаваторов, лопасти шнеков и фрез распределителей дорожно-строительных материалов и асфальтоукладчиков), а также детали и элементы ходовых устройств (протекторы пневмошин, звенья и катки гусениц, обода колес на рельсах) и многое другое. Для примера порядка величины износа можно привести изнашивание рабочих органов бульдозера. При линейном износе ножей отвала 14–15 мм удельное сопротивление резанию увеличивается в 1,5 раза при росте рас-

хода мощности и снижении производительности машины. Однако отметим, что даже при большом износе рабочих органов машина продолжает оставаться в работоспособном состоянии.

Усталостное изнашивание в основном возникает при трении деталей в подвижных сопряжениях (вал – подшипник, вал – втулка и др.). Оно обусловлено знакопеременным деформированием металла деталей в зоне трения, которое приводит к накоплению повреждений в виде подповерхностных пор и перерастанию их в трещины, а затем – отслаиванию частиц металла или выкрашиванию на поверхности трения. Усталостное изнашивание характерно для узлов трения, защищенных от коррозии и попадания абразивных частиц, в частности, для элементов силовых передач и других сопряжений. При увеличении износа деталей в подвижных сопряжениях растут зазоры между ними, вызывая усиление динамических нагрузок, ухудшение условий смазывания в зоне трения, и, в конечном счете, выход из строя узла трения.

Для прогнозирования величины износа деталей в узлах трения машины важно знать **характер зависимости износа от времени наработки**, т. е. **динамику процесса изнашивания**. Все виды этих зависимостей можно описать несколькими моделями, представленными на рисунках 5.8. и 5.9.

Кривая 2 (см. рисунок 5.8) характеризует линейную зависимость величины износа от времени. Она удовлетворительно описывает абразивное изнашивание рабочих элементов машины, контактирующих с разрабатываемым грунтом (отвалов, ножей, зубьев, стенок ковшей и др.). Кривая 4 имеет период приработки и период с постоянной скоростью изнашивания, что характерно для некоторых шарнирных соединений и подшипников скольжения. Кривая 3 отличается монотонно убывающей скоростью изнашивания, что характерно для зубчатых колес и подшипников скольжения при абразивном изнашива-

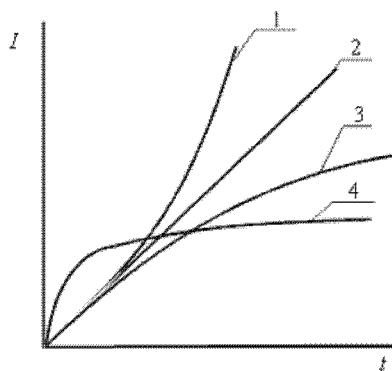


Рисунок 5.8 – Различные типы зависимости износа деталей от времени работы в узле трения

нии. Кривая 1 имеет монотонно повышающуюся скорость изнашивания и описывает износ шарнирных соединений гусеничных цепей и других деталей подобного типа, где из-за увеличивающегося зазора в сопряжение попадают все большие частицы абразива.

Для моделей изнашивания, описанных кривыми 3 и 1, можно использовать соотношение, связывающее ресурс детали с характеристиками износа,

$$T = \sqrt[n]{I_{\text{пред}} / i},$$

где i – скорость изнашивания;

$I_{\text{пред}}$ – предельно допустимая величина износа.

Указанное соотношение справедливо для кривой 3 при $n < 1$ и для кривой 1 при $n > 1$.

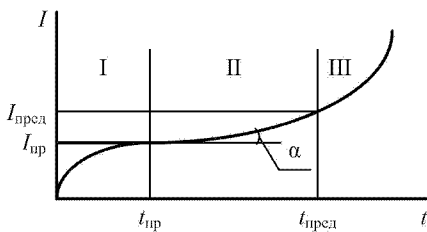


Рисунок 5.9 – Обобщенная зависимость износа от времени (кривая Лоренца)

И, наконец, наиболее общая модель изнашивания (кривая Лоренца), представленная на рисунке 5.9, включает три основных периода:

1 – *период приработки* ($0 - t_{\text{пр}}$), для которого характерен резкий рост износа (до величины $I_{\text{пр}}$) с образованием большого количества продуктов изнашивания, загрязняющих смазку, и с повыше-

нием температуры в зоне трения;

2 – *период стабильной эксплуатации узла трения* ($t_{\text{пр}} - t_{\text{пред}}$) с установившейся скоростью изнашивания до предельно допустимой величины износа ($I_{\text{пред}}$);

3 – *период критического (катастрофического) изнашивания* ($t > t_{\text{пред}}$), в результате которого растут зазоры в сопряжении, вызывая дополнительные динамические нагрузки и ухудшение условий смазывания трущихся поверхностей, а по достижении критической (предельной) величины износа – ударные нагрузки на детали, резкое повышение температуры, заедание и выход из строя узла трения.

Таким образом, для периода нормальной эксплуатации узла трения характерна практически постоянная скорость изнашивания по-

верхности сопряженных деталей. С учетом этого можно определить ресурс детали из выражения

$$T = (I_{\text{пред}} - I_{\text{пр}}) / i,$$

где $i = \text{tg}\alpha$; α – угол наклона кривой.

Как правило, узлы трения работают с перерывами и в ступенчатом режиме, что отражается и на кривых изнашивания деталей узла, которые, в свою очередь, будут иметь ступенчатый вид. В общем случае ресурс детали узла трения, работающего в ступенчатом режиме, можно найти из зависимости

$$\sum_{i=1}^N t_i i_i = I_{\text{пред}},$$

где t_i – длительность i -го цикла (ступени);

N – число циклов работы за весь ресурс детали.

Если длительность цикла t_i выразить через ее относительную долговечность f_i ($t_i = T f_i$), то ресурс детали будет

$$T = \frac{I_{\text{пред}}}{N} = \frac{I_{\text{пред}}}{\bar{i}},$$

где f_i – относительная долговечность i -го цикла;

\bar{i} – средняя скорость изнашивания детали.

Как видно из данного выражения, ресурс деталей узла трения связан с величинами предельного износа и средней скорости изнашивания.

В ряде случаев ресурс детали оценивают с помощью метода подобия, согласно которому определение срока службы рассчитываемой детали T_p базируется на известном сроке службы детали-аналога T_a . Если эти детали (рассчитываемая и аналог) эксплуатируются в одинаковых узлах машин одного типа, то срок службы рассчитываемой детали можно определить из выражения

$$\frac{T_p}{T_a} = \frac{K_p}{K_a},$$

где K_p и K_a – обобщенные коэффициенты рассчитываемой детали и аналога соответственно;

$$K_p = K_{p1}K_{p2}\dots K_{pn}; \quad K_a = K_{a1}K_{a2}\dots K_{an};$$

где K_{pi} и K_{ai} – коэффициенты учета влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов рассчитываемой детали и аналога соответственно ($i = 1, \dots, n$).

В общем случае отказы в узлах трения по причине износа определяются состоянием контактирующих поверхностей, наличием смазочного материала, нагрузкой в узле трения, скоростью взаимных перемещений трущихся деталей, а также допустимыми величинами износа. Прогнозирование надежности узлов трения осложняется тем, что упомянутые факторы (за исключением допустимых величин износа) могут изменяться в процессе работы узла трения.

5.4 Прогнозирование и оценка надежности деталей и конструкций

Работоспособность деталей, конструкций и узлов машин характеризуется рядом критериев: прочностью, износостойкостью, устойчивостью, жесткостью, теплостойкостью и др. Расчет надежности базируется на сопоставлении расчетного значения заданного критерия с его предельным значением, которое выбирают по нормативным и справочным материалам или устанавливают опытным путем (по результатам специальных испытаний или наблюдений при эксплуатации).

Работоспособность деталей, конструкций или узлов по заданному критерию считают обеспеченной, если расчетное значение критерия Y меньше его предельного значения $Y_{\text{пред}}$. Это условие выполняют, используя коэффициент безопасности n , связывающий упомянутые значения параметров ($n = Y_{\text{пред}} / Y$); соответственно расчетное условие можно выразить неравенством

$$Y \leq Y_{\text{пред}} / n.$$

В вероятностных расчетах значения Y и $Y_{\text{пред}}$ рассматривают как случайные и независимые величины, распределенные по нормальному закону. В свою очередь, их разность также считают случайной

величиной, распределенной по тому же закону. Показателем надежности является вероятность безотказной работы P по заданному критерию. Для обеспечения вероятности P должно быть выполнено условие

$$\bar{Y} - \bar{Y}_{\text{пред}} = u_p S,$$

где $\bar{Y}, \bar{Y}_{\text{пред}}$ – средние значения величин Y и $Y_{\text{пред}}$;

u_p – квантиль нормированного нормального распределения;

$S = \sqrt{S_Y^2 + S_{Y_{\text{пред}}}^2}$ – среднее квадратическое отклонение разности двух случайных величин Y и $Y_{\text{пред}}$;

S_Y и $S_{Y_{\text{пред}}}$ – средние квадратические отклонения величин Y и $Y_{\text{пред}}$.

Вероятность безотказной работы P по заданному критерию определяют по таблицам в зависимости от величины квантили:

$$u_p = - \frac{\bar{Y}_{\text{пред}} - \bar{Y}}{\sqrt{S_{Y_{\text{пред}}}^2 + S_Y^2}}.$$

Связь между квантилью u_p и коэффициентом безопасности, рассчитанным по средним значениям ($\bar{n} = \bar{Y}_{\text{пред}} / \bar{Y}$), имеет вид

$$u_p = - \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n})v_{Y_{\text{пред}}}^2 + v_Y^2}},$$

где $v_{Y_{\text{пред}}}$ и v_Y – коэффициенты вариации,

$$v_{Y_{\text{пред}}} = S_{Y_{\text{пред}}} / \bar{Y}_{\text{пред}}; \quad v_Y = S_Y / \bar{Y}.$$

Таким образом, зная квантиль или вероятность безотказной работы P , можно оценить коэффициент безопасности \bar{n} .

В общем случае параметр Y может зависеть от различных факторов и может быть выражен функциональной зависимостью

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где x_i – случайный фактор.

В свою очередь, среднее значение \bar{Y} выражают зависимостью

$$\bar{Y} = \varphi(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n).$$

Среднее квадратическое отклонение параметра Y определяют из выражения

$$S_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 S_i^2},$$

где $\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$ – частная производная функции φ по фактору x_i , в которую

подставляют среднее значение фактора \bar{x}_i ;

S_i – среднее квадратическое отклонение i -го фактора.

На практике широко используются следующие **методы оценки прочностной надежности деталей и конструкций**, основанные на расчетах:

- 1) по допускаемым напряжениям;
- 2) по запасам прочности;
- 3) прочностной надежности по вероятности разрушения или вероятности безотказной работы.

Расчеты на прочность по допускаемым напряжениям и запасам прочности позволяют на стадии проектирования дать приближенную оценку прочности деталей и конструкций, но они не учитывают случайного характера влияния нагружения.

Вероятностные расчеты прочности позволяют учесть фактор случайности и перейти от оценки прочности по коэффициентам прочности к оценке вероятности безотказной работы и прогнозированию ресурса деталей и конструкций.

Необходимо отметить, что использование вероятностных расчетов усложняет этап конструирования и проектирования машин. Поэтому предварительно необходимо определить номенклатуру деталей и конструкций, для которых подобные расчеты целесообразны. При этом нужно учитывать следующие соображения.

Во-первых, одним из факторов, определяющих необходимость использования вероятностных методов расчета прочности, является ограничение проектируемой детали или конструкции по размерам, т. е. отсутствие возможности обеспечения больших запасов прочности. Например, в механических трансмиссиях машин к ним можно отнести зубчатые передачи и подшипники качения. В таких случаях, когда необходимо обеспечить малые запасы прочности, целесообразно производить вероятностные расчеты.

Во-вторых, необходимо учитывать характер нагружения деталей и конструкций машины. При действии случайных нагрузок методы оценки их прочности по коэффициентам запаса прочности дают большую погрешность.

И, наконец, в-третьих, следует учитывать возможность изменения прочностных характеристик материалов при нагружении деталей и конструкций. Случайный характер их изменения также является основанием для вероятностных расчетов.

Таким образом, каждый из перечисленных факторов (необходимость обеспечения малых запасов прочности, случайные характеры нагружения и изменения физико-механических характеристик материалов) обуславливает целесообразность проведения вероятностных расчетов.

В расчетах вероятности безотказной работы по критерию прочности обычно рассматривают три вида ресурсных отказов деталей и конструкций, происходящих из-за разрушений:

1) статические, происходящие в результате кратковременного (от одного до нескольких десятков циклов нагружения) приложения больших сил;

2) малоцикловые, которые являются основными для конструкций, работающих в течение 10^2 – 10^5 циклов нагружения;

3) усталостные (многоцикловые), возникающие в деталях при большом числе циклов нагружения (более 10^5);

В качестве расчетных параметров Y при оценке надежности по критерию прочности выбирают расчетные напряжения или нагрузку. Предельными параметрами $Y_{\text{пред}}$ считают пределы прочности, текучести, выносливости или несущую способность.

При расчетах прочности деталей и конструкций машин полагают, что распределения нагрузок F и прочности σ подчиняются нормаль-

ному закону распределения с плотностями вероятностей $f(F)$ и $f(\sigma)$ соответственно. Количественно эти параметры задают их числовыми характеристиками – средними значениями (математическими ожиданиями) \bar{F} и $\bar{\sigma}$, средними квадратическими отклонениями S_F и S_σ или коэффициентами вариации v_F и v_σ . Если плотности распределения $f(F)$ и $f(\sigma)$ имеют участок взаимного пересечения (рисунок 5.10), то вероятность отказа будет определяться площадью этого участка.

Как видно из рисунка 5.10, с увеличением рассеяния нагрузок и механических свойств материала она будет возрастать.

Функцию надежности можно определить из выражения

$$P = \Phi \left(- \frac{\bar{F} - \bar{\sigma}}{\sqrt{S_F^2 + S_\sigma^2}} \right),$$

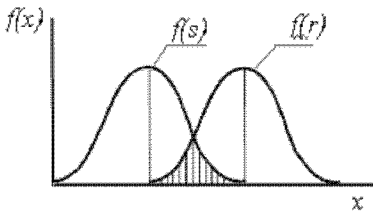


Рисунок 5.10 – Распределение плотностей вероятности нагрузки и прочности при расчете на статическую прочность

где $\Phi(u)$ – нормированная нормальная функция распределения, которая, как уже отмечалось, табулирована и ее значения можно определить по соответствующим таблицам нормального распределения.

В расчетах деталей машин прочность оценивают по соотношению расчетного σ_p и предельного $\sigma_{пред}$ (по критерию прочности) напряжений, превышение которого вызывает отказ детали. Вероятность безотказной работы определяют как вероятность того, что расчетные напряжения не превышают предельных. Числовое значение этой вероятности определяют по таблицам нормального распределения в зависимости от квантили, если известны средние значения параметров $\bar{\sigma}_p$ и $\bar{\sigma}_{пред}$, средние квадратические отклонения S_{σ_p} и $S_{\sigma_{пред}}$ или коэффициенты вариации $v_{\sigma_p} = S_{\sigma_p} / \bar{\sigma}_p$ и $v_{\sigma_{пред}} = S_{\sigma_{пред}} / \bar{\sigma}_{пред}$. В этом случае квантиль можно получить из выражения

$$u_p = -\frac{\bar{\sigma}_{\text{пред}} - \bar{\sigma}_p}{\sqrt{S_{\sigma_{\text{пред}}}^2 + S_{\sigma_p}^2}},$$

которое можно выразить через запас прочности $\bar{n} = \bar{\sigma}_{\text{пред}} / \bar{\sigma}_p$:

$$u_p = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n} v_{\sigma_{\text{пред}}})^2 + v_{\sigma_p}^2}}.$$

Оценка надежности при изнашивании. Как отмечалось, наиболее характерным для дорожных, строительных и других машин является абразивное изнашивание, которое происходит в результате микрорезания или многократного деформирования материала детали под действием абразивных частиц. Этот вид изнашивания является преобладающим для элементов рабочего и ходового оборудования, а также узлов трения машин при попадании абразивных частиц в зону трения.

При оценке надежности по критерию износостойкости в инженерных расчетах ее наиболее информативной характеристикой является **линейный износ**: чем ниже износ, тем выше износостойкость детали. Оценку надежности можно вести по изменению (уменьшению) линейного размера одной детали при изнашивании, а также по изменению соотношения линейных размеров сопряженных деталей (увеличению зазора в подшипниках, шага зубчатых и цепных передач и др.). Текущую величину износа I можно оценить, используя выражение

$$I = Jvt,$$

где J – интенсивность изнашивания;

v – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей;

t – время работы узла трения.

Предельно допустимая величина износа Δ связана с размерами детали (начальным значением $L_{\text{нач}}$ и предельно допустимым значением, при износе до которого наступает отказ, $L_{\text{пред}}$) простым соотношением

$$\Delta = L_{\text{нач}} - L_{\text{пред}}.$$

Если известны параметры $L_{\text{нач}}$ и $L_{\text{пред}}$, а также другие характеристики изнашивания, вероятность безотказной работы детали P можно определить по квантили нормального распределения

$$u_p = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n}v_{\Delta})^2 + v_J^2}},$$

где $\bar{n} = \bar{\Delta}/(\bar{J}vt)$ – условный коэффициент запаса по износу (отношение средних значений предельно допустимого износа $\bar{\Delta}$ к действительному);

\bar{J} – среднее значение интенсивности изнашивания;

$v_{\Delta} = S_L / \bar{\Delta}$ – коэффициент вариации размера детали;

$\bar{\Delta} = \bar{L}_{\text{нач}} - L_{\text{пред}}$ – для предельно допустимого уменьшения размера;

$\bar{\Delta} = L_{\text{пред}} - \bar{L}_{\text{нач}}$ – для предельно допустимого увеличения размера (зазора);

$\bar{L}_{\text{нач}}$ – среднее значение начального размера;

S_L – среднее квадратическое отклонение начального размера;

v_J – коэффициент вариации интенсивности изнашивания.

При оценке работоспособности узла трения важной задачей является правильный выбор предельно допустимых величин износа деталей узла, поскольку нормативы на эти величины имеются для ограниченной номенклатуры деталей. Она не имеет общих рекомендаций, поскольку предельное состояние определяют для конкретного типа сопряжений, узлов и машин с учетом последствий отказов. В общем случае следствием достижения предельного состояния изнашивающихся деталей и их сопряжений могут быть функциональные нарушения, увеличение энергетических потерь и снижение КПД, уменьшение прочности и жесткости деталей, возникновение ошибок положений деталей в результате изнашивания сопряженных деталей узла трения.

Важность поиска оптимальной величины предельного износа обусловлена, с одной стороны, неоправданным уменьшением срока службы деталей при ее занижении, а с другой – повышением теку-

щих затрат из-за аварийных ремонтов при ее завышении. В настоящее время имеется несколько критериев оценки величины предельного износа в зависимости от вида узла трения и типа сопряжения: по потере прочности детали, по снижению производительности и увеличению энергоемкости, по нарушению нормального взаимодействия деталей (в зубчатых передачах, в шарнирных соединениях) или по невыполнению заданных функций.

Предельный износ элементов может быть установлен из условия обеспечения их нормальной работы или других ограничений. В качестве примера таких ограничений для рабочих органов можно привести уменьшение зубьев ковша на половину их длины, уменьшение длины ножей отвала бульдозера на величину, определяемую началом изнашивания рамы, и др. Кроме того, установление величин предельного износа имеет существенное значение при выборе такого конструктивного параметра деталей узлов трения и элементов рабочего оборудования как толщина упрочненного (тем или иным методом) слоя на поверхности детали с учетом запаса на износ.

Не менее важное значение имеет оценка скоростей изнашивания деталей узлов трения и элементов рабочего оборудования. В настоящее время имеется большой экспериментальный материал о динамике изнашивания с описанием процесса различными эмпирическими уравнениями. Среднюю скорость изнашивания определяют различными методами, отличающимися подходом к оценке основных параметров трения и их связи со скоростью изнашивания. Один из них связывает скорость изнашивания с мощностью процесса трения и площадью фрикционного контакта. В этом случае среднюю скорость изнашивания элементов рабочего оборудования в абразивной среде можно определить по формуле

$$i = a\bar{N}_{\text{тр}}K_{\text{абр}}/(F\varepsilon_{\text{и}}),$$

где a – коэффициент износа (коэффициент пропорциональности);

$\bar{N}_{\text{тр}}$ – средняя мощность трения;

$K_{\text{абр}}$ – коэффициент абразивности среды ($K_{\text{абр}} = 1 \dots 6$);

F – площадь трения (площадь контакта трущихся элементов);

$\varepsilon_{\text{и}}$ – относительная износостойкость трущегося элемента ($\varepsilon_{\text{и}} = 1,0 \dots 2,2$).

Среднюю мощность трения находят из выражения

$$\bar{N}_{\text{тр}} = fPv,$$

где f – коэффициент трения между рабочим органом и средой;

P – нормальная сила, действующая в зоне трения;

v – скорость относительного движения.

Формулу для определения средней скорости изнашивания элементов рабочего оборудования в абразивной среде можно также использовать для оценки скорости изнашивания трущихся поверхностей в узле трения в случае контактно-абразивного изнашивания. Оно возникает в сопряжениях при наличии в смазочном материале большого количества абразива (более 3 масс. %). При этом износостойкость $\varepsilon_{\text{и}}$ детали в основном определяется твердостью материала H , из которого она изготовлена,

$$\varepsilon_{\text{и}} = H/H_{\text{эт}},$$

где $H_{\text{эт}}$ – твердость материала эталонной детали.

При оценке надежности деталей узлов и агрегатов дорожно-строительных, путевых, подъемно-транспортных и других машин наибольший интерес представляют *типовые детали и элементы трансмиссий* (зубчатые колеса, валы, подшипники и др.).

Надежность зубчатых передач. Значительную часть цилиндрических зубчатых колес используют в приводах упомянутых машин для передачи больших мощностей в условиях воздействия динамических нагрузок. Поэтому оценка их надежной работы и прогнозирования ресурса имеют актуальное значение как на этапе проектирования, так и на этапе их эксплуатации.

Вероятность безотказной работы по критерию контактной прочности определяют как вероятность того, что расчетные контактные напряжения σ_{H} не превышают предела контактной выносливости σ_{Hlim} . Ее определяют в зависимости от квантили u_p нормального распределения разности этих напряжений из выражения

$$u_p = -\frac{\sigma_{\text{Hlim}} - \sigma_{\text{H}}}{\sqrt{D_{\sigma_{\text{H}}} + D_{\sigma_{\text{H}}}}},$$

где $D_{\sigma_{Hl}}$ – дисперсия предела контактной выносливости;

D_{σ_H} – дисперсия контактного напряжения.

Как уже отмечалось, в инженерной практике нередко более удобно пользоваться оценкой величины квантили через коэффициент запаса прочности (безопасности) n_p , связывающий значения предела выносливости σ_{Hlim} и контактных напряжений σ_H . Если в формулу для определения квантили u_p подставить его среднее значение $\bar{n}_p = \bar{\sigma}_{Hlim} / \bar{\sigma}_H$ и ввести коэффициенты вариации величин σ_{Hlim} и σ_H (соответственно $v_{\sigma_{Hl}} = D_{\sigma_{Hl}} / \bar{\sigma}_{Hlim}$ и $v_{\sigma_H} = D_{\sigma_H} / \bar{\sigma}_H$), то она будет выглядеть следующим образом:

$$u_p = - \frac{\bar{n}_p - 1}{\sqrt{\bar{n}_p^2 v_{\sigma_{Hl}}^2 + v_{\sigma_H}^2}}.$$

Как известно, выход из строя зубчатых передач обусловлен усталостными процессами, которые развиваются и накапливаются при циклическом контакте зубьев колеса и шестерни. Поэтому основным расчетом при оценке прочностных параметров зубчатых передач является расчет на контактную прочность.

Величину контактных напряжений в прямозубой цилиндрической зубчатой передаче внешнего зацепления можно рассчитать по формуле

$$\sigma_H = Z_H Z_M Z_\Sigma \sqrt{K_H \frac{F_{Ht}}{b_\omega d_1} \cdot \frac{u+1}{u}} \leq \sigma_{Hp},$$

где Z_H – коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей зубьев ($Z_H = 1,77$);

Z_M – коэффициент, учитывающий механические свойства материала сопряженных колес ($Z_M = 190 \text{ МПа}^{-1/2}$);

Z_Σ – коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий ($Z_\Sigma = 0,9$);

$K_H = K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{H\nu}$ – коэффициент нагрузки;

$K_{H\alpha}$ – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями (для прямозубых передач $K_{H\alpha} = 1$);

$K_{H\beta}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки;

K_{Hv} – коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку;

$$F_{Ht} = 2 \cdot 10^3 \frac{T_{1H}}{d_1} \text{ – окружная сила, Н;}$$

T_{1H} – крутящий момент на валу шестерни, Н·м;

d_1 – делительный диаметр шестерни, мм;

b_w – рабочая ширина зубчатого венца, мм;

u – передаточное число;

$\sigma_{H\beta} = \sigma_{H\lim} Z_N Z_R Z_v Z_X / S_N$ – допускаемое контактное напряжение (меньшее из напряжений для шестерни и колеса), МПа;

S_N – коэффициент безопасности (запаса прочности)

$S_N = 1,10 \dots 1,25$ – для колес без упрочнения;

$S_N = 1,20 \dots 1,35$ – для колес с упрочнением;

Z_N – коэффициент долговечности ($Z_N = 0,9 \dots 1,0$ для постоянного режима работы);

Z_R – коэффициент, учитывающий шероховатость сопряженных поверхностей зубьев ($Z_R = 0,9 \dots 1,0$);

Z_v – коэффициент, учитывающий окружную скорость;

Z_X – коэффициент, учитывающий размер зубчатого колеса ($Z_X = 1,0$ для колес с диаметром менее 700 мм).

Как правило, принимают $Z_N Z_R Z_v Z_X = 0,9$.

Взаимосвязь допускаемого контактного напряжения $\sigma_{H\beta}$ с долговечностью колес зубчатой передачи устанавливают коэффициентом Z_N , величина которого зависит от числа циклов напряжения N_K в соответствии с заданным сроком службы и базовым числом циклов перемены напряжений $N_{H\lim}$.

При постоянной нагрузке N_K , равное суммарному числу циклов перемены напряжений, определяют из выражения

$$N_K = 60n\bar{T}_n,$$

где n – частота вращения вала шестерни, мин⁻¹;

\bar{T}_n – средний заданный ресурс передачи, ч.

При переменной нагрузке вместо N_K используют эквивалентное число циклов перемены напряжений, зависящее от циклограммы нагружения.

При оценке вероятности неразрушения детали зубчатой передачи расчет ведут по величине квантили u_p с учетом рассеяния действующего контактного напряжения σ_H как функции комплексного коэффициента нагрузки K_H (случайной величины) и предела контактной выносливости зубьев σ_{Hlim} как функции твердости зубьев, которая также является случайной величиной. Для этого следует:

1) оценить величину вариации коэффициента нагрузки $K_H = K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{H\nu}$ и определить коэффициент вариации контактного напряжения $v_{\sigma H}$;

2) рассчитать коэффициент вариации $v_{\sigma_{Hlim}}$ предела контактной выносливости зубьев;

3) определить величину квантили;

4) оценить вероятность неразрушения детали, исходя из величины квантили, для рассчитанных контактных напряжений и их рассеяния.

Величину вариации $v_{H\Sigma}$ коэффициента K_H можно определить как сумму независимых величин вариации коэффициентов $K_{H\alpha}$, $K_{H\beta}$ и $K_{H\nu}$ из выражения

$$v_{H\Sigma} = \sqrt{v_{H\alpha}^2 + v_{H\beta}^2 + v_{H\nu}^2},$$

где $v_{H\alpha}$ – коэффициент вариации нагрузки между зубьями, оцениваемый величиной $K_{H\alpha}$,

$$v_{H\alpha} = \frac{\bar{K}_{H\alpha} - 1}{3\bar{K}_{H\alpha}};$$

$v_{H\beta}$ – коэффициент вариации нагрузки по ширине зубчатого венца, выраженной через $K_{H\beta}$,

$$v_{H\beta} = \frac{\bar{K}_{H\beta} - 1}{9\bar{K}_{H\beta}};$$

$v_{H\nu}$ – коэффициент вариации динамической нагрузки в зацеплении, характеризуемой величиной $K_{H\nu}$,

$$v_{Hv} = \frac{\bar{K}_{Hv} - 1}{3\bar{K}_{Hv}},$$

$\bar{K}_{H\alpha}$, $\bar{K}_{H\beta}$ и \bar{K}_{Hv} – соответственно средние значения коэффициентов $K_{H\alpha}$, $K_{H\beta}$ и K_{Hv} .

Далее следует определить коэффициент вариации $v_{H\sigma}$ расчетного контактного напряжения σ_H (с учетом величины коэффициента вариации $v_{H\Sigma}$):

$$v_{H\sigma} = 0,5v_{H\Sigma}.$$

При оценке коэффициента вариации $v_{\sigma_{Hl}}$ предела выносливости следует учитывать величину коэффициента вариации базового предела контактной выносливости $v_{\sigma_{Hl}}^6$:

$$v_{\sigma_{Hl}} = \sqrt{\left(v_{\sigma_{Hl}}^6\right)^2 + 0,05^2},$$

где для зубьев без термообработки $v_{\sigma_{Hl}}^6 = 0,08$ К 0,10;

для упрочненных зубьев $v_{\sigma_{Hl}}^6 = 0,10$ К 0,12.

Далее, имея известные значения $v_{\sigma_{Hl}}$ и $v_{\sigma_{Hl}}$, а также величину \bar{n}_{II} , определяют величину квантили u_p , после чего оценивают показатель надежности детали, а именно вероятность ее безотказности для данного уровня контактных напряжений и степени их рассеяния.

Надежность валов. Для большинства валов современных машин решающую роль в обеспечении их долговечности имеет сопротивление усталости. Проверка обеспечения требований к их долговечности по критерию усталости включает составление расчетной схемы, построение эпюр изгибающих и крутящих моментов, а также определение величины этих моментов в опасных сечениях вала.

В процессе нагружения вал подвергается действию взаимосвязанных нормальных и касательных напряжений, которые образуют несколько опасных зон, распределенных по длине вала. Нормальные напряжения, как известно, значительно превосходят касательные.

Основными нагрузками для большинства валов являются силы от зубчатых колес, звездочек, шкивов, а также от муфт из-за несоосности соединяемых муфтами деталей.

При расчетах на выносливость наибольшее значение имеют изгибающие моменты $M_{иa}$, поэтому опасные сечения находятся в области их действия в сочетании с источником концентрации напряжений.

Для переменного режима действия длительных нагрузок в расчетах используют приведенную (по долговечности) амплитуду нормальных ($\sigma_{aпр}$) и касательных ($\tau_{aпр}$) напряжений:

$$\sigma_{aпр} = \sigma_a K_{L\sigma}; \quad \tau_{aпр} = \tau_a K_{L\tau},$$

где $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$,
 $\tau_a = (\tau_{\max} - \tau_{\min})/2$ – амплитуды цикла нормальных и касательных напряжений соответственно;

$$K_{L\sigma} = \sqrt[m]{\sum_i (\sigma_{ai}/\sigma_a)^m (N_i/N_6)},$$

$$K_{L\tau} = \sqrt[m]{\sum_i (\tau_{ai}/\tau_a)^m (N_i/N_6)} \text{ – коэффициенты долговечности по нормальным и касательным напряжениям соответственно;}$$

N_i, N_6 – соответственно общее число циклов при напряжении σ_{ai} (τ_{ai}) и базовое число циклов (в точке перелома кривой усталости);

m – показатель степени кривой усталости ($m = 6 \dots 10$).

Общий запас прочности по пределу выносливости при совместном действии изгиба и кручения

$$n_o = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \geq n_{op},$$

где $n_\sigma = \sigma_{\text{илim}}^{(c)} / (\sigma_{aпр} + \psi_\sigma^{(c)} \sigma_m)$ – запас усталостной прочности по изгибу;

$\sigma_{\text{илim}}^{(c)} = \sigma_{\text{илim}} / K_\sigma^{(c)}$ – предел выносливости вала по изгибу в данном сечении;

$\sigma_{\text{илim}}$ – предел выносливости материала вала по изгибу;

$\Psi_{\sigma}^{(c)} = \Psi_{\sigma} / K_{\sigma}^{(c)}$ – коэффициент асимметрии цикла напряжений по изгибу для данного сечения вала;

Ψ_{σ} – коэффициент асимметрии цикла напряжений по изгибу;

$K_{\sigma}^{(c)}$ – коэффициент концентрации напряжений по изгибу для данного сечения вала;

$\sigma_m = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ – среднее значение напряжения изгиба;

$n_{\tau} = \tau_{\text{к lim}}^{(c)} / (\tau_{\text{анп}} + \Psi_{\tau}^{(c)} \tau_m)$ – запас усталостной прочности по кручению;

$\tau_{\text{к lim}}^{(c)} = \tau_{\text{к lim}} / K_{\tau}^{(c)}$ – предел выносливости материала вала по кручению в данном сечении;

$\tau_{\text{к lim}}$ – предел выносливости материала вала по кручению;

$\Psi_{\tau}^{(c)} = \Psi_{\tau} / K_{\tau}^{(c)}$ – коэффициент асимметрии цикла напряжений по кручению для данного сечения вала;

Ψ_{τ} – коэффициент асимметрии цикла напряжений по кручению;

$K_{\tau}^{(c)}$ – коэффициент концентрации напряжений по кручению для данного сечения вала;

$\tau_m = (\tau_{\max} - \tau_{\min})/2$ – среднее значение напряжения кручения;

$n_{\text{оп}}$ – допускаемая величина запаса прочности ($n_{\text{оп}} = 1,5 \dots 3$).

Вероятность безотказной работы вала по критерию усталостной выносливости оценивают в зависимости от величины квантили нормального закона распределения нагрузки и предела выносливости вала в заданных ранее сечениях.

При расчетах следует учитывать основные факторы, влияющие на долговечность вала. К ним относятся статические и усталостные характеристики металла, его напряженное состояние, изменение предела выносливости из-за концентрации напряжений и влияния разме-

ров вала, качества обработки поверхностей и метода поверхностного упрочнения.

Расчет вероятности неразрушения вала ведут способом, аналогичным используемому для оценки вероятности неразрушения детали зубчатой передачи.

Как отмечалось, нормальные и касательные напряжения взаимосвязаны, причем нормальные напряжения существенно выше касательных. Поэтому коэффициент вариации нагрузки принимают общим.

Нагрузочный режим оценивают по нормальным напряжениям (при изгибе) через коэффициент вариации нагрузки, который, в свою очередь, зависит от коэффициента концентрации нагрузки и коэффициента асимметрии цикла. Коэффициент концентрации нагрузки принимают $v_{K\sigma} = (0,20K - 0,25)(K_{\sigma} - 1) / K_{\sigma}$; коэффициент асимметрии цикла принимают $v_{\psi\sigma} = 0,12 \dots 0,15$. Суммарный коэффициент вариации нагрузки вала $v_{\sigma\Sigma} = \sqrt{v_{K\sigma}^2 + v_{\psi\sigma}^2}$. Тогда коэффициент вариации напряжений при изгибе, определяющих кинетику усталостных процессов, $v_{\text{ис}} = 0,5v_{\sigma\Sigma}$.

Оценку коэффициента вариации предела выносливости вала по изгибу производят по формуле

$$v_{\sigma \text{lim}} = \sqrt{(v_{\sigma \text{lim}}^{(6)})^2 + 0,05^2},$$

где $v_{\sigma \text{lim}}^{(6)} = \sqrt{v_{\sigma_n}^2 + v_{\sigma_o}^2 + v_{\sigma_k}^2}$ – коэффициент вариации длительного предела выносливости базового образца;

$v_{\sigma_n}, v_{\sigma_o}$ – коэффициенты вариации предела выносливости соответственно детали из металла данной плавки ($v_{\sigma_n} = 0,03 \dots 0,06$) и между плавками ($v_{\sigma_o} = 0,06 \dots 0,08$);

$v_{\sigma_k} = (0,33K - 0,45)v_p$ – коэффициент вариации параметра концентрации напряжений;

v_p – коэффициент вариации размерных параметров при изготовлении кольцевой выточки (или галтели) ($v_p = 0,08 \dots 0,10$).

Запас прочности \bar{n} определяют по средним напряжениям при изгибе из выражения

$$\bar{n}_\sigma = \bar{\sigma}_{\text{илим}} / (\bar{\sigma}_a K_{L\sigma} + \psi_\sigma \bar{\sigma}_m),$$

где $\bar{\sigma}_{\text{илим}} = 0,43\bar{\sigma}_B$;

$\bar{\sigma}_B$ – предел прочности металла;

$\bar{\sigma}_a = \bar{M}_{\text{иа}} / \omega_{\text{и}}$ – средняя амплитуда цикла;

$\bar{M}_{\text{иа}}$ – средний изгибающий момент от переменных нагрузок;

$W_{\text{и}}$ – момент сопротивления сечения вала при изгибе ($W_{\text{и}} = 0,1d^3$);

$\bar{\sigma}_m = \bar{M}_{\text{им}} / \omega_{\text{и}}$ – среднее напряжение цикла;

$\bar{M}_{\text{им}} = (M_{\text{макс}} + M_{\text{мин}}) / 2$ – средний изгибающий момент от постоянных нагрузок.

Надежность подшипников качения. Для подшипников качения расчеты на долговечность были первыми вероятностными расчетами деталей машин. Для них накоплен обширный материал испытаний, изучена их работоспособность в различных условиях нагружения, на базе чего составлен каталог данных по параметрам нагрузки и долговечности. Однако в этих расчетах учитывалось рассеяние только динамической грузоподъемности подшипников, предполагая детерминированную расчетную нагрузку.

В вероятностных расчетах динамическую эквивалентную нагрузку P также рассматривают как случайную величину. В этом случае вероятность безотказной работы подшипника качения отождествляют с вероятностью выполнения условия

$$PL^m < [C],$$

где L – номинальная долговечность (ресурс);

$[C]$ – динамическая грузоподъемность по каталогу;

m – показатель степени ($m = 3$ для шарикоподшипников, $m = 10/3$ для роликоподшипников).

Отметим, что паспортная грузоподъемность $[c]$ – это постоянная нагрузка, которую подшипник может выдержать в течение 10^6 оборотов без проявления усталостных разрушений не менее чем у 90 % подшипников, поставленных на испытания. 90%-ную динамическую грузоподъемность, представленную в каталогах, обозначают C_{90} .

Ресурс подшипников (в часах) можно определить из выражения

$$L_h = 10^6 L / (60n),$$

где n – частота вращения, мин^{-1} .

Величину эквивалентной динамической нагрузки определяют в зависимости от типа подшипника по следующим формулам:

для радиальных шариковых и радиально-упорных подшипников –

$$P_r = (XVF_r + YF_a)K_\sigma K_T;$$

для радиальных роликоподшипников (двух- и однорядных с короткими цилиндрическими роликами, не обладающими осевой грузоподъемностью) –

$$P_r = VF_r K_\sigma K_T;$$

для шариковых и роликовых упорных подшипников –

$$P_a = F_r K_\sigma K_T;$$

для радиально-упорных подшипников –

$$P_a = (XF_r + YF_a)K_\sigma K_T;$$

для упорных сферических подшипников –

$$P_a = F_a + 1,2F_r,$$

где P_r, P_a – соответственно эквивалентные динамические радиальная и осевая нагрузки;

F_r, F_a – соответственно радиальная и осевая нагрузки;

V – коэффициент учета вращения элементов подшипника, $V = 1,0$ (при вращении внутреннего кольца), $V = 1,2$ (при вращении наружного кольца);

X, Y – коэффициенты соответственно радиальной и осевой нагрузок, принимаемые по каталогам;

K_6 – коэффициент безопасности, учитывающий характер нагрузки;

K_T – температурный коэффициент.

При оценке надежности подшипников качения предполагают, что динамическая эквивалентная нагрузка и динамическая грузоподъемность распределены по нормальному закону, а при определении вероятности неразрушения подшипников качения исходят из того, что и динамическая эквивалентная нагрузка, и динамическая грузоподъемность являются величинами случайными, рассеяние которых учитывают соответствующими коэффициентами вариации.

Коэффициент вариации v_p динамической эквивалентной нагрузки принимают равным коэффициенту вариации внешней нагрузки, действующей на подшипник ($v_p = 0,12$).

Коэффициент вариации v_c динамической грузоподъемности принимают равным: $v_c = 0,25$ – для роликоподшипников, $v_c = 0,27$ – для шарикоподшипников.

Запас прочности по средним нагрузкам

$$\bar{n} = \frac{\bar{C}}{\bar{P}L^{1/m}},$$

где \bar{C} – среднее значение динамической грузоподъемности, $\bar{C} = 1,46C_{90}$ (для роликоподшипников), $\bar{C} = 1,52C_{90}$ (для шарикоподшипников);

\bar{P} – среднее значение динамической эквивалентной нагрузки, которую вычисляют по приведенным выше зависимостям, в которые подставляют средние значения радиальной и осевой нагрузок, действующих на подшипник.

Таким образом, запас прочности по средним нагрузкам будет иметь следующий вид:

для шарикоподшипников –

$$\bar{n} = \frac{1,52C_{90}}{\bar{P}L^{1/3}},$$

для роликоподшипников –

$$\bar{n} = \frac{1,46C_{90}}{\bar{P}L^{0,3}}.$$

Подставить приведенные значения в выражение для определения квантили u_p нормального закона и по ней оценить вероятность безотказной работы подшипников.

5.5 Методы испытаний и контроля надежности

Система испытаний и контроля имеет важное значение в обеспечении показателей надежности машин, поскольку только в процессе специальных испытаний или в условиях подконтрольной эксплуатации выявляются факторы (не только эксплуатационные, но и конструктивно-технологические), учесть которые на стадиях проектирования и изготовления не представляется возможным.

Испытания на надежность позволяют решить ряд задач, в числе которых проверка количественных показателей надежности, которые были приняты на этапе проектирования, выявление отказов и установление причин их возникновения, определение наиболее слабых элементов или узлов в машине и разработка мероприятий по повышению их надежности. По результатам испытаний можно оценить все показатели надежности машин и их узлов, в том числе средние ресурсы до капитального ремонта, средние ресурсы неремонтируемых деталей, гамма-процентные ресурсы, интенсивность и параметр потока отказов, наработки на отказ и до отказа, среднее время обслуживания и восстановлений, коэффициенты готовности и технического использования.

Различают определительные и контрольные испытания. По результатам определительных испытаний оценивают количественные показатели надежности машин и их зависимость от различных факторов. При контрольных испытаниях определяют соответствие показателей надежности серийных машин требованиям по надежности, которые приведены в нормативной документации и учитывают результаты определительных испытаний.

Для обеспечения своевременной оценки надежности и возможности повышения ее показателей применяют, как правило, систему ус-

коренных испытаний, которые проводят в заданной последовательности, в определенном объеме и по специальным методикам.

Ускоренные испытания можно разделить на две основные группы: уплотненные по времени и форсированные по условиям нагружения.

Уплотненными по времени считают испытания, при которых ускоренное получение информации достигается за счет круглосуточных испытаний или учащенного приложения нагрузки, но без увеличения силового нагружения, т. е. без изменения условий потери работоспособности узлов, агрегатов и деталей машин. Опыт использования уплотненных во времени испытаний показывает возможность сокращения времени достижения предельного состояния в несколько раз за счет точного планирования испытаний и реализации неблагоприятного сочетания различных факторов.

Эффективность ускоренных испытаний характеризуют коэффициентом ускорения K_y , который равен отношению времени $T_э$, затраченному на получение требуемой информации о надежности в эксплуатационных условиях, ко времени T_y , в течение которого эта же информация получена методом ускоренных испытаний:

$$K_y = T_э / T_y .$$

При проведении ускоренных испытаний можно использовать коэффициент ускорения для пересчета среднего ресурса по ускоренной методике \bar{T}_y на ожидаемый средний ресурс $\bar{T}_э$ в эксплуатационных условиях

$$\bar{T}_э = K_y \bar{T}_y .$$

Форсированными по нагружению испытаниями считают испытания, при которых ускоренное получение информации достигается за счет увеличения силового воздействия (по сравнению с условиями эксплуатации) и интенсификации разрушения объекта испытаний. Для обеспечения эффективности форсированных испытаний следует обеспечить их подобие с эксплуатационными испытаниями, в частности, создать такие условия, чтобы отказы при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях были одинаковыми по характеру и виду разрушения.

Результаты ускоренных испытаний можно использовать, если известна функциональная зависимость между вероятностными характеристиками при испытаниях в форсированном и нормальном режимах. Например, связь между вероятностями отказа при форсированных и эксплуатационных испытаниях можно представить в виде

$$q(t_3, \varepsilon) = f[q(t_y, \varepsilon_y)],$$

где $q(t_3, \varepsilon)$ – вероятность отказа в режиме эксплуатации ε за время t_3 ;

$q(t_y, \varepsilon_y)$ – вероятность отказа в ускоренном режиме ε_y за время t_y .

Тогда по графику этой функциональной зависимости можно пересчитать результаты ускоренных испытаний на нормальные условия.

Функциональная зависимость может иметь различный характер, как линейный, так и нелинейный. Например, если функции распределения безотказной работы $F(t_3)$ и $F(t_y)$ имеют экспоненциальный характер, то

$$\exp(-t_3/\bar{T}_0(\varepsilon)) = \exp(-t_y/\bar{T}_{0y}(\varepsilon_y)) \quad \text{или} \quad \bar{T}_0(\varepsilon) = \bar{T}_{0y}(\varepsilon_y) t_3/t_y,$$

где $\bar{T}_0(\varepsilon)$ и $\bar{T}_{0y}(\varepsilon_y)$ – среднее время безотказной работы в нормальном и ускоренном режимах соответственно.

Зная соотношение t_3/t_y , можно использовать последнее выражение для оценки $\bar{T}_0(\varepsilon)$ по результатам ускоренных испытаний.

Ускоренные испытания можно применять в качестве как определятельных, так и контрольных для оценки соответствия контролируемых объектов требованиям нормативной документации по надежности.

Очень важным видом испытаний являются **контрольные испытания**, предназначенные для проверки установленных норм показателей надежности серийных машин и узлов и их стабильности при эксплуатации. Обычно при оценке надежности партии применяют выборочный статистический контроль, при котором делают выборку части объектов и по ней принимают заключение о надежности партии в целом.

В основном используют два вида статистической выборочной оценки надежности: контроль по альтернативному признаку и контроль по количественному признаку. Эти виды контроля выполняют

методами однократной выборки, многократной выборки и последовательного контроля.

При контрольных испытаниях по альтернативному признаку (с использованием наиболее распространенного метода однократной выборки) надежность партии оценивают по доле дефектных объектов в общем числе проверенных объектов. Испытания проводят в течение заданного времени, фиксируя только число отказавших объектов. Основной характеристикой контролируемой партии является доля q дефектных объектов в партии:

$$q = M/N,$$

где M – число дефектных объектов в партии;

N – общее число объектов в партии.

При этом контроле из партии отбирается случайная выборка, состоящая из n объектов. Если в этой выборке обнаружено m дефектных объектов, то партию принимают при условии, что m меньше или равно приемочному числу объектов c . Если же $m > c$, то партию бракуют.

Вероятность приемки партии по выборке зависит от доли q дефектных объектов в партии. Чем меньше q , тем выше вероятность приемки партии. Зависимость $P(q)$ называют оперативной характеристикой контроля

$$P(q) = P(m < c),$$

где $P(m < c)$ – вероятность того, что в выборке n число дефектных объектов m меньше c .

Вероятность приемки партии ограничивают верхним $(1 - \alpha)$ и нижним β уровнями (рисунок 5.11, a), которым соответствуют следующие доли дефектных объектов:

$$P(q_0) = 1 - \alpha; \quad P(q_m) = \beta.$$

Величину q_0 называют приемочным уровнем качества, а q_m – браковочным уровнем. В свою очередь, вероятность α называют риском изготовителя (вероятность забраковать партию с приемочным уровнем качества q_0), а β – риском потребителя (вероятность принять партию с браковочным уровнем q_m). Их обычно выбирают достаточно малыми ($\alpha \approx \beta \approx 0,1$).

Значения q_0 и q_m должны удовлетворять следующим условиям:

$$q_0 \geq \bar{q}, \quad q_m \leq q_r,$$

где \bar{q} – средняя доля дефектных объектов в нормально изготовленной партии;

q_r – предельная доля дефектных объектов в партии.

Для малых выборок ($n < 0,1N$) и малых долей дефектных объектов в партии ($q \leq 0,1$) вероятность $P(q)$ имеет следующий вид:

$$P(q) = e^{-nq}.$$

Соответственно, $P(q_0) = e^{-nq_0} = 1 - \alpha$; $P(q_m) = e^{-nq_m} = \beta$.

Если задаться величинами вероятности α и β , то можно рассчитать приемочный уровень (q_0), а также при заданном браковочном уровне (q_m) необходимый объем выборки (n) объектов, которые следует испытать и не получить отказов в течение заданного времени.

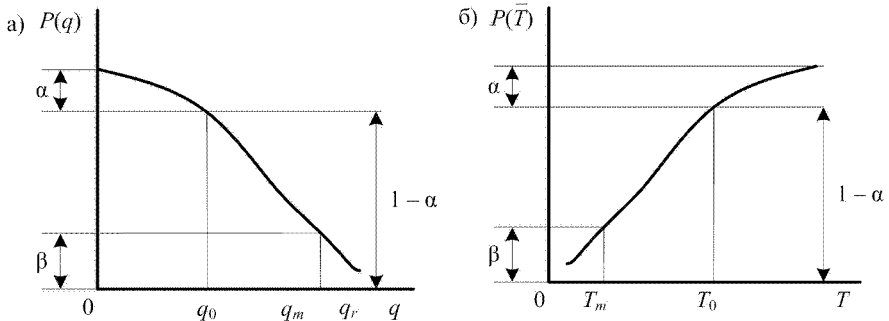


Рисунок 5.11 – Оперативные характеристики контроля партии объектов:
а – по альтернативному признаку; б – по количественному показателю

Как правило, данный метод используют для испытаний деталей, для которых удобнее контролировать их отказ, а не изменение параметров их состояния. К ним относятся подшипники, пружины, манжеты, прокладки и др.

При контрольных испытаниях по количественному признаку оценку надежности партии проводят по статистическим характери-

стикам распределения одного (или нескольких) параметра, который определяют для каждого объекта.

Если в качестве такого параметра рассматривают наработку до отказа каждого объекта T_i в выборке n , то в качестве контролируемого параметра партии служит средняя наработка до отказа \bar{T} . При нормальном законе распределения наработки до отказа

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i ;$$

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} .$$

Среднеквадратическое отклонение средней выборочной наработки до отказа можно определить из выражения

$$S_{\bar{T}} = \frac{\bar{S}}{\sqrt{n}} .$$

Для оценки приемки партии следует связать верхний и нижний уровни вероятности приемки партии с наработкой до отказа. В частности, вероятности $(1 - \alpha)$ соответствует средняя наработка до отказа \bar{T}_0 , а вероятности β – наработка \bar{T}_m при выполнении условия $\bar{T}_0 > \bar{T}_m$.

Для контроля партии объектов также следует определить объем выборки n и приемочный норматив наработки до отказа T^* . Партия принимается в том случае, если $\bar{T} > T^*$.

Вероятность приемки партии в соответствии с оперативной характеристикой (рисунок 5.11, б) имеет вид

$$P(T) = P(\bar{T} > T^*) .$$

Вероятность приемки

$$1 - \alpha = P(T_0) .$$

Вероятность выбраковки

$$\beta = P(T_m) .$$

Для нормального закона распределения

$$P(\bar{T} > T^*) = \Phi\left(\frac{\bar{T}_0 - T^*}{\bar{\sigma}\sqrt{n}}\right),$$

где Φ – функция Лапласа.

Из рисунка 5.11, б видно, что

$$1 - \alpha = \Phi\left(\frac{\bar{T}_0 - T^*}{\bar{\sigma}\sqrt{n}}\right); \quad \beta = \Phi\left(\frac{\bar{T}_m - T^*}{\bar{\sigma}\sqrt{n}}\right).$$

После введения квантилей $u_{1-\alpha}$ и $u_{1-\beta}$ и несложных преобразований объем выборки определяют из выражения

$$n = \bar{\sigma}^2 \left(\frac{u_{1-\alpha} + u_{1-\beta}}{\bar{T}_0 - \bar{T}_m} \right)^2.$$

Приемочный норматив T^* должен превышать среднюю наработку до отказа, при которой партия должна приниматься с вероятностью, не большей β , а именно

$$\bar{T} \geq T^* = \bar{T}_m + u_{1-\beta} \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}.$$

Последние два выражения справедливы при выборке $n \geq 15 \dots 20$.

Для оценки надежности машин, помимо упомянутых расчетных методов и результатов испытаний, используют также сбор статистической информации в условиях подконтрольной эксплуатации.

В конечном счете, оценка надежности машины и ее элементов состоит в оценке периодов наработки, в течение которых она находится в работоспособном состоянии, и периодов времени, в течение которых она восстанавливается или ремонтируется. Поэтому наиболее эффективным методом оценки надежности является сбор статистической информации в эксплуатационных условиях, который не требует капитальных затрат и учитывает комплексное воздействие эксплуатационных факторов на показатели надежности.

На практике в условиях эксплуатации проверяют средний и гамма-процентный ресурс машины, а также ее основных агрегатов, среднюю наработку на отказ, а также среднее время восстановления (или удельную суммарную оперативную трудоемкость устранения отказов, или коэффициент готовности). Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации машин довольно сложно получить достоверную информацию об отказах, которая включала бы сведения о наработке и условиях работы, характере и причине отказов, а также другие данные. Поэтому организационные формы работы по сбору статистической информации о надежности в эксплуатационных условиях регламентированы нормативными документами. ГОСТ 24.410–87 обуславливает проведение испытаний по различным планам, которые устанавливают количество анализируемых объектов, порядок проведения испытаний и критерии их завершения.

На основании статистической информации о надежности машин решают ряд задач, позволяющих повысить эффективность их эксплуатации. К ним относятся определение показателей надежности машин, выявление статистических закономерностей потоков отказов и восстановлений, а также установление законов распределения ресурсов. В результате этой работы определяют наиболее слабые элементы и узлы машин, ограничивающие их надежность, устанавливают причину отказов и условия эксплуатации, оказывающие определяющее влияние на надежность машины, а также обобщают полученные данные в целях совершенствования системы технического обслуживания и ремонта.

5.6 Методы повышения надежности машин

Как отмечалось, надежность закладывается на этапе проектирования и конструирования машины, а на последующих этапах – при изготовлении и эксплуатации – реализуется и поддерживается на заданном уровне. На всех перечисленных этапах существуют значительные возможности для обеспечения требуемого или повышения существующего уровня надежности. Эти возможности можно реализовать с помощью различных методов, которые целесообразно разделить на конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Конструктивные методы предусматривают создание необходимых запасов прочности металлоконструкций, упрощение конструкций, использование стандартных деталей и узлов, обеспечение ремонтпригодности, обоснование применения методов резервирования и многое другое. К конструктивным методам повышения надежности относятся:

1) выбор конструктивных решений сборочных единиц, узлов и агрегатов, обеспечивающих наиболее рациональную схему машины с сохранением работоспособности в широком диапазоне изменения рабочих параметров;

2) совершенствование конструкции деталей, узлов и механизмов машины, их проектирование под энерго- и трудосберегающие технологические процессы изготовления;

3) рациональная компоновка узлов и агрегатов машины, обеспечивающая повышение ремонтпригодности и упрощение технического обслуживания;

4) совершенствование схем унификации и агрегатирования блоков и сборочных единиц, повышение уровня стандартизации деталей, узлов и агрегатов машины;

5) выбор конструкционных материалов со стабильными и высокими физико-механическими характеристиками, расширение применения высокопрочных и высокомодульных композиционных материалов на основе полимерных (и металлических) матриц и волокнистых наполнителей;

6) применение триботехнических (антифрикционных, фрикционных) материалов с высокой износостойкостью и стабильными значениями коэффициента трения для деталей узлов трения машин;

7) использование смазочных материалов, обеспечивающих работоспособность узлов трения машин в широком диапазоне рабочих нагрузок и скоростей.

Значительным резервом в обеспечении заданных параметров надежности является повышение точности оценки действующих при эксплуатации нагрузок и их влияния на работу различных механизмов машины, а также учет реальных условий, отражающих специфику работы машины (ее узлов, сборочных единиц и механизмов), что особенно важно при динамических нагрузках и неустановившихся режимах ее эксплуатации.

Значительную роль в обеспечении надежности машин играет выбор конструкционных, триботехнических и смазочных материалов с учетом условий эксплуатации соответствующих деталей, конструкций, узлов и агрегатов машин.

Долговечность машины во многом зависит от силовых элементов несущих металлоконструкций. Для деталей, работающих в стационарных условиях нагружения, как правило, используют углеродистые стали, для деталей, эксплуатирующихся в условиях переменных нагрузок, – легированные стали. В зависимости от условий нагружения и внешних факторов следует подбирать материалы, обеспечивающие требуемые показатели надежности.

Отказы по критерию статической прочности являются наиболее характерными для деталей и узлов ходового оборудования и рабочих органов. Отказы по критерию усталостной прочности возникают, как правило, для приводов рабочих органов, а также для деталей двигателей и элементов трансмиссий.

Выбор материалов со стабильными механическими характеристиками, которые имеют низкий разброс параметров прочности, снижает вероятность разрушения и увеличивает ресурс детали. Использование материалов с высокими показателями механических характеристик позволяет уменьшить массу проектируемых деталей и снизить удельную материалоемкость машины в целом.

Снижение вредного влияния износа на работоспособность машины осуществляют за счет обеспечения благоприятных условий трения в узлах машин, повышения качества и упрочнения трущихся поверхностей, а также оптимизации характера внешних воздействий. К ним можно отнести реализацию трения качения вместо трения качения с проскальзыванием или вместо трения скольжения; эффективную защиту от абразивного загрязнения зубчатых и червячных передач, подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, опорно-поворотных устройств; замену открытых зубчатых передач закрытыми и др.

К триботехническим материалам узлов трения предъявляются требования повышенной износостойкости и стабильных значений коэффициента трения, что достигается высокими показателями механических характеристик, теплопроводности и теплостойкости, низ-

ким коэффициентом теплового расширения и хорошей прирабатываемостью.

На рисунке 5.12 представлены данные по влиянию упрочнения поверхностных слоев стальных деталей на интенсивность изнашивания, которые свидетельствуют о существенном снижении износа с ростом твердости стали во всем диапазоне удельных нагрузок в узле трения.

Важным требованием к выбору материалов в паре трения является исключение возможности схватывания трущихся поверхностей, что обеспечивается применением смазочных материалов и обработкой одной из них (фосфатированием, сульфидированием или сульфоцианированием, т. е. насыщением поверхностных слоев фосфором, серой, азотом и углеродом).

Помимо традиционных материалов (черных и цветных металлов, их сплавов), широкие перспективы имеют полимерные композиционные материалы (компози́ты) конструкционного и триботехнического назначения. К ним относят материалы, состоящие из двух и более разнородных компонентов с границей раздела между ними. В составе композита обязательно имеются два вида основных компонентов: матрица (связующее), непрерывная по всему объему материала и обеспечивающая его монолитность, и наполнитель, распределенный в матрице.

В полимерных композитах матрицами являются синтетические полимеры, макромолекулы которых состоят из многочисленных элементарных звеньев одинаковой структуры. Макромолекулы полимеров могут быть линейного, разветвленного и сетчатого строения, что отражается на физико-механических, теплофизических, триботехнических и других свойствах полимеров и композитов на их основе. В макромолекулах атомы связаны между собой прочными химическими связями ковалентного и ионного типов, которые обеспечивают

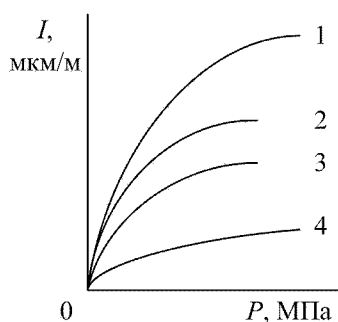


Рисунок 5.12 – Зависимость интенсивности изнашивания образцов из стали (У10) от удельной нагрузки при различных значениях твердости (HRC): 1 – 25–35 (без обработки); 2 – 35–55 (объемная закалка); 3 – 55–62 (цементация); 4 – 58–66 (нитроцементация)

высокий уровень электроизоляционных свойств и химической стойкости, а также низкую плотность полимеров (в 2–8 раз меньше, чем металлов). Наполнители, которые могут быть химически активными или инертными, вводят в полимеры, как правило, для усиления эксплуатационных свойств (прочности, теплостойкости, сопротивления ударным нагрузкам, износостойкости и др.) композитов на основе полимеров. В качестве наполнителей используют материалы различной природы в виде порошка, волокон, нитей, лент, тканей. В машиностроении используют в основном порошкообразные и волокнистые наполнители (углеродные, стеклянные, органические и др.), которые позволяют значительно улучшить прочностные и триботехнические свойства.

О возможностях полимерных композитов и изделий из них, о широком диапазоне изменения их свойств свидетельствуют данные таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Некоторые характеристики полимерных композитов

Характеристика	Величина
Плотность, кг/м ³	900–2200
Прочность при растяжении, МПа	1–10 ⁴
Модуль упругости при растяжении, ГПа	10 ⁻² –10 ³
Температура эксплуатации, °С	-270...+400
Твердость, НВ	10–500
Коэффициент линейного температурного расширения, 10 ⁻⁶	-0,8...+10 ³

Полимерные композиты и изделия из них получают пропиткой расплавом (или раствором) полимера армирующего наполнителя при изготовлении изделий различными способами (литьем под давлением, экструзией, прессованием и др.). Удельные затраты энергии при производстве полимерных материалов в 15 раз меньше, чем при изготовлении изделий из алюминия. При этом коэффициент использования композитов составляет 0,9–0,95, а металлов и сплавов – всего 0,5–0,6.

Изделия из композитов благодаря многообразию полимеров и наполнителей, способов их совмещения и модифицирования обладают комплексами технологических свойств и эксплуатирующих характеристик, недостижимыми для традиционных материалов. Это делает их незаменимыми во многих областях машиностроения, включая

транспортное, в авиационной и космической технике, судостроении. В настоящее время в странах СНГ используют в основном полимерные композиты, которые обладают ограниченными возможностями. Они работоспособны при температурах до 100–140 °С и при постоянных внешних нагрузках до 15–20 МПа, что позволяет их использовать в основном для декоративно-защитной отделки, в малонагруженных узлах трения и для несилевых элементов конструкций машин. Между тем современные полимерные композиты, как видно из таблицы 5.1, обладают значительно более широкими возможностями.

К **технологическим методам** повышения надежности можно отнести:

- 1) упрочнение поверхностных слоев деталей механическими, термическими, химико-термическими и другими способами;
- 2) нанесение упрочняющих, износостойких и коррозионностойких покрытий на детали машин.

Технологические методы позволяют на заключительных стадиях изготовления деталей машин повысить их прочностные характеристики (по показателям статической и усталостной прочности), износостойкость, коррозионную стойкость, жаропрочность и другие свойства. Первичной задачей технологических методов является создание оптимального микрорельефа поверхности детали путем инструментальной *механической обработки*. Снижение шероховатости поверхности способствует уменьшению коэффициента трения, повышению циклической прочности и коррозионной стойкости.

Следует отметить, что в узлах трения в процессе приработки устанавливается оптимальная топография сопрягаемых поверхностей деталей, которая фактически не зависит от исходного микрорельефа поверхности и обусловлена конструкцией узла и условиями его эксплуатации. Поэтому инструментальную механическую обработку следует проводить так, чтобы она давала топографию поверхности, близкую к оптимальной.

Для повышения усталостной прочности и износостойкости широко используют механические методы обработки поверхности деталей (дробеструйную обработку, обкатывание шариками и роликами, алмазное выглаживание, дорнование и др.). В результате происходит наклеп, т. е. упрочнение поверхностных слоев металла при их пластическом деформировании, которое сопровождается изменением шероховатости поверхности. Толщина упрочненного слоя составляет

0,3–1,5 мм. При этом возрастает твердость на 20–40 % и повышается циклическая долговечность ряда деталей (зубчатых колес, осей, пружин и др.) в 2–10 раз. Установлено, что износостойкость упрочненных слоев металла повышается до тех пор, пока он проявляет способность к пластическому деформированию.

В отличие от механических методов упрочнения поверхностная закалка и химико-термическая обработка деталей обеспечивают упрочнение их поверхностных слоев, в то время как металл в объеме детали остается достаточно пластичным и вязким. В результате существенно повышается несущая способность деталей при ударных нагрузках. Кроме того, в упрочненном поверхностном слое возникают большие остаточные напряжения сжатия, которые ослабляют неравномерность распределения внутренних напряжений от внешней нагрузки и повышают сопротивление усталостному разрушению. При этом размеры обработанных деталей остаются без изменений.

Закалка является основным видом упрочняющей термообработки конструкционных и инструментальных сталей. Поверхностная закалка обеспечивает двукратное повышение износостойкости и стойкости к динамическим нагрузкам. Если деталь испытывает усталостное разрушение, ограничиваются толщиной упрочненного слоя до 3 мм, при высоких контактных нагрузках используют толщины более 3 мм. К самым эффективным видам поверхностной закалки относятся закалка с индукционным нагревом ТВЧ, газопламенная, лазерная и электронно-лучевая закалки. Последние виды не требуют применения закалочных сред, поскольку их роль выполняет сам металл, отводя тепло, что обеспечивает высокую скорость охлаждения.

Химико-термическая обработка является упрочняющей тепловой обработкой стальных изделий в химически активных средах и проводится для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев. Она позволяет повысить твердость и износостойкость, усталостную и контактную выносливость, а также коррозионную стойкость. В этом плане возможности химико-термической обработки выше, чем термообработки, в несколько раз, поскольку она меняет не только структуру, но и химический состав поверхностных слоев в интервале от 0,02 до 3 мм.

Наиболее распространенными методами химико-термической обработки являются цементация (насыщение углеродом), азотирование (насыщение азотом), нитроцементация и цианирование (насыщение

углеродом и азотом), алитирование (насыщение алюминием) и хромирование, а также комплексные методы насыщения титаном, ванадием, вольфрамом, цирконием, медью и другими металлами. Каждый из этих методов имеет свои особенности, оптимальную толщину упрочненного слоя и различный уровень усиления эксплуатационных свойств стальных деталей. В зависимости от вида обработки и толщины упрочненного слоя продолжительность химико-термической обработки может достигать 10–12 часов.

Процессы диффузионного насыщения поверхностных слоев стальных изделий упомянутыми химическими элементами можно существенно ускорить с использованием высокоэнергетических методов химического модифицирования. Из них наиболее эффективными являются ионно-диффузионное модифицирование в тлеющем разряде, а также комбинированные методы ионно-плазменной обработки с лазерной или электронно-лучевой обработкой. Ионно-диффузионное модифицирование реализуют в тлеющем разряде постоянного напряжения в среде модифицирующей добавки. Ионы модификатора разгоняются до высоких энергий в электрическом поле и бомбардируют поверхность стальной детали, одновременно очищая ее от окисных пленок и разогревая. Таким методом можно осуществлять ионное азотирование, цементацию, силицирование (насыщение кремнием), борирование и комплексное насыщение поверхностных слоев стальных деталей модифицирующими элементами. Длительность ионного модифицирования по сравнению с традиционными методами химико-термической обработки сокращается в десятки раз, а механические свойства поверхностных слоев значительно (в 1,5–2 раза) повышаются.

Ионное легирование (ионная имплантация) также основано на бомбардировании поверхности детали пучками ионов высоких энергий (10–200 кэВ). С помощью ионной имплантации можно осуществить азотирование, борирование, оксидирование поверхностного слоя детали и его легирование различными металлами. При этом значительно возрастают коррозионная стойкость и износостойкость поверхностных слоев.

Методы лазерного легирования стальных деталей отличаются вводом легирующего элемента на их поверхность. Для этого на обрабатываемую поверхность предварительно наносят тонкое покрытие из модификатора (электролитическим осаждением или плазменным напылением) или осуществляют его имплантацию в поверхностный

слой. Последующая лазерная обработка вызывает проплавление поверхностного слоя и смешение легирующего элемента с металлом основы; в результате скоростной кристаллизации возникают такие фазы, которые невозможно получить в равновесном состоянии, например, из-за ограниченной взаимной растворимости компонентов.

В настоящее время высокоэнергетические методы модифицирования используют для обработки ответственных деталей из-за высокой стоимости технологического оборудования. Однако их потенциальные возможности обуславливают более широкое применение в машиностроении.

Эффективным средством расширения функциональных возможностей деталей, узлов и машин является применение покрытий различного назначения: износостойких, коррозионностойких, защитно-декоративных, специальных. Создание покрытий относится к поверхностной обработке деталей путем нанесения на их поверхность слоя (0,05–2 мм) другого материала с требуемыми свойствами. Такая обработка дает возможность получить сочетание свойств, присущих как материалу покрытия, так и материалу основы (детали), а также в широких пределах регулировать эксплуатационные характеристики поверхности.

Долговечность детали с покрытием, как правило, определяется долговечностью самого покрытия, которое, в свою очередь, зависит от прочности сцепления покрытия с основой. Это накладывает ограничения на область применения покрытий, исключая их использование в случаях эксплуатации деталей при ударных нагрузках и высоких контактных напряжениях. С помощью покрытий успешно решаются задачи, направленные на обеспечение комплекса эксплуатационных характеристик деталей в сопряжениях, включающего низкий коэффициент трения, хорошую приработку и исключение схватывания сопряженных поверхностей, высокую износостойкость в условиях повышенных температур и агрессивных сред.

Покрытия разделяют на металлические, неметаллические и полимерные. Наибольшее распространение получили *покрытия из металлов* (алюминия, цинка, меди, хрома, никеля, олова, молибдена, железа, вольфрама и др.) и их сплавов. Они позволяют в несколько раз повысить долговечность и эксплуатационные свойства деталей и узлов машин, эксплуатирующихся в экстремальных условиях, при воздействии высоких температур и радиации, в абразивно-агрес-

сивных средах. Нанесение металлических покрытий (металлизацию) осуществляют газотермическим (газопламенным) и электротермическим напылением. Предпочтение отдают электротермическим методам, из которых наиболее эффективными и универсальными являются дуговой и плазменный методы. Для нанесения покрытий этими методами применяют электрический дуговой разряд двух видов, различающихся межэлектродным расстоянием. В зоне дуги материал покрытия (в исходном состоянии – порошок, проволока или пруток) расплавляют и осаждают на обрабатываемую поверхность. Капли расплава покрываемого металла растекаются по поверхности и при охлаждении образуют сплошную пленку покрытия.

Длительность процесса нанесения зависит от размеров детали и составляет обычно несколько минут, что выгодно отличает эти методы от способов химико-термической и другой обработки. Минимальная толщина покрытия должна включать припуск на обработку после нанесения и допуск на предполагаемый износ. Например, при нанесении покрытий на вал диаметром 60–100 мм, участки которого будут изнашиваться в контакте с сопрягаемыми деталями, толщина покрытий должна быть не менее 0,6 мм. На участках, где необходима запрессовка, толщина покрытия, как правило, не превышает 0,15 мм, независимо от диаметра вала.

Плазменное напыление обеспечивает покрытиям малую пористость и высокую прочность сцепления с основой. Оно позволяет наносить высококачественные покрытия из тугоплавких металлов, керамики и органических материалов, включая композиционные, что существенно расширяет диапазон эксплуатационных свойств поверхностных слоев детали.

Наиболее эффективно используют плазменные покрытия для повышения долговечности деталей и узлов привода машин, включая детали двигателей внутреннего сгорания (поршни, кольца, гильзы цилиндров и др.), элементы передач (коленчатые валы и др.), а также детали систем управления.

Все более широкое применение находят *покрытия из неорганических материалов*, включая карбиды, оксиды, нитриды и фосфаты металлов. Их формируют на поверхности стальных изделий, как правило, для защиты от коррозии, снижения коэффициента трения, повышения жаро- и износостойкости. Толщина наносимого слоя зависит

от назначения покрытий. Покрытия малой толщины (2–5 мкм) используют для защиты деталей от атмосферной коррозии; покрытия большой толщины (до 1–2 мм) – для повышения стойкости к жидким агрессивным средам.

Карбидные, нитридные и карбидонитридные покрытия наносят на стальные детали в основном ионно-плазменными методами. Высокую прочность и износостойкость имеют покрытия из оксида алюминия, сформированные на стальных деталях плазменными методами. При толщине 4–10 мкм, износостойкость покрытий из нитрида титана (на поверхности стали) в 2–5 раз превосходит аналогичную характеристику высоколегированных сталей. Для ответственных изделий нередко используют композиционные и многослойные покрытия из карбида, нитрида и карбонитрида титана, а также карбидов хрома и молибдена.

Кроме того, неорганические покрытия используют в виде твердых смазок для снижения коэффициента трения в узлах машин, где невозможно применить жидкие смазочные материалы (при повышенных температурах, высоких скоростях и т. д.). Материалами для твердосмазочных покрытий являются графит, дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама, а также галогенные соединения металлов. Рабочие температуры твердосмазочных покрытий на воздухе достигают 400–500 °С при низком (около 0,1) и стабильном коэффициенте трения.

Важным фактором повышения долговечности корпусных деталей, металлоконструкций и элементов узлов машин в условиях атмосферного воздействия является применение *полимерных покрытий*. Как правило, для защитно-декоративной отделки и противокоррозионной защиты используют лакокрасочные материалы холодного отверждения, не требующие нагрева обрабатываемых поверхностей деталей машин и обеспечивающие их атмосферостойкость.

При эксплуатации машин для реализации высоких показателей надежности необходим системный подход к профилактическим и ремонтным работам, который базируется на научно обоснованных методах эксплуатации. Об их значимости свидетельствует то, что затраты на техническое обслуживание и ремонт превышают в 5–8 раз первоначальную стоимость машины.

К числу **основных мероприятий, обеспечивающих поддержание высокого уровня надежности машин**, относятся:

- 1) контроль соответствия технических характеристик машин режимам их эксплуатации;
- 2) совершенствование системы технического обслуживания, включая применение современных методов и средств технического диагностирования;
- 3) оптимизация организации всех видов ремонта с использованием современных ресурсосберегающих технологий восстановления деталей, узлов и агрегатов машин;
- 4) повышение квалификации и специальное обучение обслуживающего персонала.

Основой обеспечения надежности является *эксплуатация машины в соответствии с нормативно-технической документацией*, в частности точное соблюдение требований и рекомендаций, изложенных в руководствах и инструкциях по эксплуатации, подготовленных разработчиками и базирующихся на статистических исследованиях накопленного опыта эксплуатации машин соответствующего назначения. Соблюдение требований эксплуатационной документации во многом зависит от подготовки и квалификации обслуживающего персонала.

Научно обоснованная организация системы технического обслуживания и ремонта ставит конечной целью обеспечение запланированных на этапе проектирования показателей надежности путем проведения комплекса организационно-технических мероприятий при минимальных затратах энерго-, трудо- и материальных ресурсов.

При рассмотрении вопросов, связанных с совершенствованием технического обслуживания, следует выявить оптимальное сочетание таких ее характеристик, как периодичность и объем профилактических работ, число специалистов и время проведения профилактики с учетом стоимости технического обслуживания, появления и числа отказов после проведения этих работ.

Организация работ по поддержанию работоспособности машин базируется на планово-предупредительной системе, связанной с научно обоснованным прогнозированием потребности в профилактических мероприятиях. Их долгосрочное планирование (на год, сезон, квартал) необходимо осуществлять на основе методов теории надеж-

ности, а краткосрочное прогнозирование – на основе методов и средств технической диагностики.

Профилактические работы включают такие мероприятия, как ежедневное, периодическое и сезонное техническое обслуживание. Наиболее ответственным видом профилактики является периодическое (или плановое) техническое обслуживание (ТО), которое предотвращает рост интенсивности потока отказов и различается объемом, составом и трудоемкостью работ.

Следует отметить значимость уровня организационных мероприятий и технической оснащенности работ по содержанию машин. Как правило, материальные потери вследствие низкого уровня организации таких работ при эксплуатации транспортных средств в два раза превышают затраты, связанные непосредственно с надежностью.

Эффективность этих работ существенно возрастает, если техническое обслуживание проводят по результатам оценки технического состояния машины с использованием современных методов технического диагностирования. Диагностика, не оказывая влияния на техническое состояние машины и ее основных агрегатов, позволяет существенно снизить затраты на поддержание заданных показателей надежности и обеспечить более высокое качество технического обслуживания и ремонта. Использование современных диагностических средств (акустических, виброметрических и др.) снижает стоимость проверки основных агрегатов машин на 70–75 % по сравнению с их проверкой традиционными способами с частичной разборкой агрегатов. Кроме того, техническая диагностика способствует снижению аварийности машин, сокращению расхода горюче-смазочных материалов и рабочих жидкостей, повышению эффективности использования машин за счет уменьшения времени простоев при техническом обслуживании и ремонте.

Работы по восстановлению работоспособности машин, включающие текущий и капитальный ремонты, также сопровождаются значительными энерго-, трудо- и материальными затратами. Поэтому повышение их эффективности должно базироваться на экономически обоснованном подходе к подготовительным работам, техническому диагностированию, выбору технологий восстановления деталей и узлов, обеспечению запасными частями.

Важным направлением снижения себестоимости ремонта машин и повышения рентабельности ремонтного производства в целом является восстановление деталей, поврежденных и изношенных в процессе эксплуатации. Как правило, ремонт и восстановление деталей, утративших работоспособность, обходится ремонтным службам значительно дешевле, чем изготовление новых деталей.

В настоящее время в ремонтном производстве используют более 50 различных методов восстановления деталей. Представление о технологических возможностях различных процессов упрочнения деталей машин дает таблица 5.2. Эффективность их применения, а также выбор наиболее рационального технологического процесса восстановления зависят от многих факторов, в том числе от материалов, из которых изготовлены детали (стали, чугуны, цветные металлы и сплавы, полимерные и композиционные материалы), их конструктивно-технологических особенностей, а также от условий эксплуатации деталей и узлов машин.

Таблица 5.2 – Технологические процессы и способы упрочнения деталей машин

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
<i>Термическая обработка</i>				
Объемная закалка	До HRC 40–55	Не изменяется	Не ограничивается	Повышение прочности углеродистых сталей в 1,5–2 раза, легированных в 2–3 раза. Упрочнение отливок, поковок, штамповок, механически обработанных деталей, проката, сварных элементов
Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ и газовым пламенем	HRC 40–70	300–800	0,2–10	Повышение предела выносливости на 40–100 % и износостойкости в 2 раза и более. Упрочнение поверхностей зубьев зубчатых колес, звездочек и муфт, шлицев, тормозных шкивов, осей, деталей шарниров тяговых цепей и других деталей из средне-, высокоуглеродистых и цементируемых сталей

Продолжение таблицы 5.2

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
<i>Химико-термическая обработка</i>				
Цементация	HRC 60–65	400–1000	0,5–2	По сравнению с закалкой ТВЧ повышение пределов выносливости при изгибе до 3 раз, повышение износостойкости в 1,5–2 раза
Азотирование	До HV 9000–11000	400–1000	0,05–0,6	То же и повышение коррозионно-усталостной прочности
Нитроцементация (газовое цианирование)	HRC 60–75	400–1000	0,05–2,5	То же, что и цементация, но достигаемый эффект более значителен: предел выносливости шестерен повышается в 2–3 раза, износостойкость в 1,5–1,9 раза выше, чем при цементации
Алигирование	–	–	0,5	Повышение долговечности деталей из сталей обычного качества, работающих при повышенной температуре, до уровня долговечности деталей из жаростойких сталей
Хромирование (высокотемпературное термодиффузионное)	HV 16000–20000	–	0,02–0,3	Повышение ударной вязкости и коррозионной стойкости. Износостойкость в 3–5 раз выше, чем при цементации; в 1,5–2,8 раза выше, чем при нитроцементации
Силицирование	–	–	0,02–0,3	Повышение коррозионной стойкости и износостойкости при хорошей пластичности

Продолжение таблицы 5.2

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
Сульфидирование	Не изменяется	–	0,05–1,0	Повышение сопротивления схватыванию при трении без смазочного материала и со смазочным материалом (пестерни, втулки, гайки, плунжеры, клапаны и др.)
<i>Пластическое деформирование (наклеп поверхности)</i>				
Дробеструйная обработка	Увеличивается на 20–40 %	400–800	0,4–1,5	Упрочнение деталей сложной формы. Повышение циклической долговечности: рессор – в 2–7 раз; пружин – в 3–10 раз; осей – в 3–5 раз; зубчатых колес (после закалки ТВЧ) – в 8–12 раз
Центробежно-шариковый наклеп	Увеличивается на 15–60 %	400–800	0,3–1,5	Упрочнение наружных и внутренних цилиндрических поверхностей (коленчатые и тормозные валы, гильзы цилиндров, поршневые кольца, вкладыши подшипников и др.)
Обкатка роликами	Увеличивается на 20–50 %	До 1000	1–3,5	Упрочнение цилиндрических и винтовых поверхностей. Повышение циклической долговечности: пггоков – в 3–4 раза; болтов, шпилек (обкатка резьбы) – в 2 раза
Чеканка	Увеличивается на 20–50 %	До 1000	0,5–3,5	Упрочнение деталей сложной формы и крупногабаритных. Повышение циклической долговечности крупно-модульных зубчатых колес (впадины), крупных валов (галтели), сварных металлоконструкций (швы и околошовные зоны)

Окончание таблицы 5.2

Способ	Технологические возможности			Назначение и эффективность процессов и способов
	HRC, HV	σ_0 , МПа	δ_y , мм	
<i>Термомеханическая обработка</i>				
Высокотемпературная ТМО (ВТМО)	–	–	Все сечение	Упрочнение проката, поковок, штамповок, изделий, полученных волочением и выдавливанием (экструзией)
Низкотемпературная ТМО (НТМО)	–	–	Все сечение	Повышение пределов прочности легированных сталей в 5–6 раз (до 3100 МПа) при увеличении пластических свойств стали (относительное удлинение до 9–12 %, относительное сужение до 45 %)
Обозначения: HRC, HV – твердость поверхности; σ_0 – остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое; δ_y – толщина упрочненного слоя.				

Представляют интерес данные таблицы 5.3, в которой приведены показатели относительной долговечности восстановленных деталей, а также трудо-, энерго- и материальные затраты для различных способов восстановления, реализованных в сопоставимых условиях.

Наиболее широкими возможностями по восстановлению различных деталей обладают электротермические методы напыления и наплавки, с помощью которых ремонтируется до 80 % всех восстанавливаемых деталей. Наряду с традиционно распространенными способами наплавки (вибродуговая наплавка, наплавка в среде защитных газов, под слоем флюса и др.) все шире используют плазменные и лазерные технологии. Незначительная глубина проплавления основного металла (до 0,5 мм) и его низкое содержание в наплавленном слое (до 0,5–5,0 масс. %) позволяют сохранить практически без изменений исходные свойства наплавляемого материала. Плазменная наплавка позволяет наносить износостойкие слои (толщиной от 0,3 до 5,0 мм) из сталей и сплавов на основе никеля, кобальта, железа, бора и меди, имеющие высокую прочность сцепления с основным металлом и повышенную долговечность.

Таблица 5.3 – Характеристики способов восстановления деталей

Способ восстановления	Коэффициент относительной долговечности				Затраты на 1 м ² при расчетной толщине покрытия			
	по износостойкости	по прочности	по усталостной прочности	по сцеплению слоя покрытия с основным металлом	Толщина покрытия, мм	Трудоемкость, чел·ч	Энергоемкость, кВт·ч	Расход материалов, кг
Сварка и наплавка ручная:								
электродуговая	0,70	0,95	0,60	1,00	5	60	580	48,0
газовая	0,70	0,90	0,70	1,00	3	72	80	38,0
аргонодуговая	0,70	0,95	0,70	1,00	4	56	520	36,0
Сварка и наплавка механизированная:								
в среде углекислого газа	0,72	0,95	0,90	1,00	2–3	28	256	30,0
под слоем флюса	0,41	0,95	0,87	1,00	3–4	30	286	38,0
вибродуговая	1,00	0,90	0,52	0,95	2–3	32	235	31,0
в среде пара	0,90	0,95	0,75	1,00	2–3	28	235	31,0
Хромирование	1,07	0,95	0,97	0,82	0,3	55	324	21,0
Осталивание	0,91	0,95	0,82	0,65	0,5	19	121	23,0
Пластические деформации	1,00	0,90	1,00	1,00	2,0	36	126	3,5
Химическое никелирование	0,37	0,95	0,74	0,70	0,05	24	–	4,5
Ремонтные размеры	0,95	0,80	0,90	1,00	–	17	97	2,5
Постановка дополнительной детали	0,90	0,75	0,90	1,00	–	148	129	78,0
Металлизация напылением	0,55	0,85	0,60	0,10	0,5	25	250	25,0

Одним из перспективных направлений восстановления деталей машин является их ремонт с помощью полимерных и композицион-

ных материалов. Традиционные методы восстановления поврежденных деталей и конструкций базируются, как правило, на восстановлении целостности деталей сваркой и пайкой при достаточно высокой температуре нагрева поврежденного участка или детали в целом. Современные полимерные и композиционные материалы холодного отверждения в виде клеев и герметиков не требуют предварительного нагрева ремонтируемых деталей. Они обеспечивают возможность устранения таких дефектов, как трещины, пробоины в корпусных деталях и емкостях, восстановления разъемных (резьбовых, шпоночных, фланцевых, шлицевых) и неразъемных соединений, а также посадочных мест в корпусных изделиях. Для этих целей используют эпоксидные, акриловые и силиконовые клеи, а также композиционные материалы на основе эпоксидных и других олигомерных связующих, наполненные порошками различных металлов (никеля, хрома, цинка и др.). Их применяют при ремонте деталей, эксплуатирующихся в диапазоне температур от $-70 \dots -90$ °С до $+120 \dots 180$ °С, а также при давлениях в соединениях до 40 МПа. Армирование этих материалов слоями стеклотканей позволяет существенно расширить диапазон их технологических возможностей по устранению повреждений корпусных деталей, в частности успешно ремонтировать трещины длиной до 200 мм и более, пробоины площадью до 50 см^2 в корпусах различных агрегатов и несилowych элементах металлоконструкций. Эти методы на порядок менее энергоемки, чем методы сварки, а себестоимость ремонта с их помощью составляет 10–20 % от стоимости ремонта традиционными способами.

6 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ МАШИН

6.1 Общие сведения о технологичности

Под технологичностью конструкции понимают совокупность свойств конструкции машины, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации, ремонте и утилизации для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Таким образом, технологичность можно характеризовать как свойство конструкции, проявляющееся в оптимальных затратах труда, средств и материалов при ее изготовлении, эксплуатации, ремонте и утилизации.

Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции (рисунок 6.1).

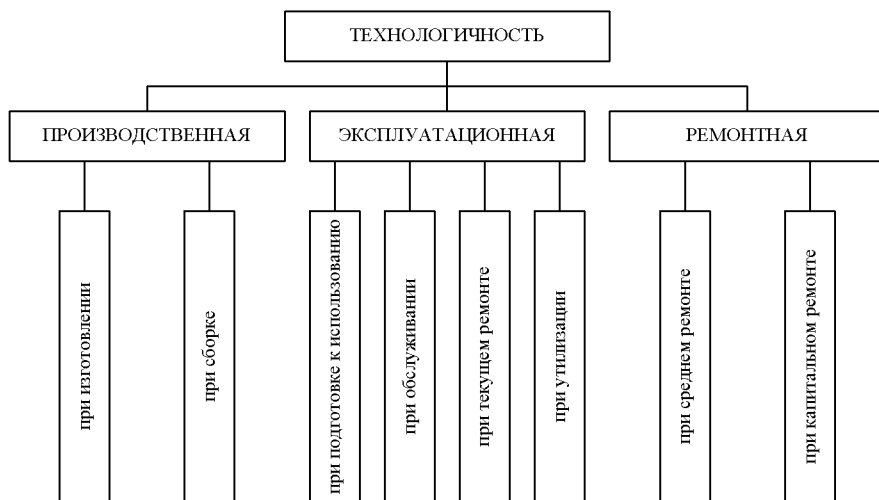


Рисунок 6.1 – Виды технологичности конструкции машины

Производственной технологичностью конструкции машины называют свойство конструкции, позволяющее изготовить и собрать

машину в условиях данного производства с наименьшими затратами труда и материалов при обеспечении заданного качества. Ее связывают с сокращением времени и средств на конструкторскую (разработку проектной и рабочей конструкторской документации) и технологическую (проектирование всех видов технологических процессов, разработку и изготовление необходимого оборудования и технологической оснастки) подготовку производства, а также на изготовление, контроль и испытания изделий.

Ремонтная технологичность конструкции машины – это свойство конструкции, позволяющее ремонтировать машину в условиях данного производства с наименьшими затратами труда и материалов. Ее связывают с сокращением времени и средств на все виды ремонта, кроме текущего, т. е. плано-предупредительного.

Эксплуатационной технологичностью конструкции машины является свойство конструкции, обеспечивающее наиболее длительное сохранение функциональных и эксплуатационных характеристик машины. Ее связывают с сокращением времени и средств на подготовку изделия к использованию по назначению, его техническое обслуживание, текущий ремонт и утилизацию по окончании срока эксплуатации.

Как следует из приведенных определений, критерием технологичности конструкции является ее экономическая целесообразность при заданном уровне качества и конкретных условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

Отработка конструкции на производственную технологичность должна обеспечивать снижение трудоемкости и себестоимости изготовления машины за счет повышения серийности посредством стандартизации, унификации и группирования деталей по конструктивно-технологическим признакам; ограничения номенклатуры конструкций и применяемых материалов, преемственности конструктивных решений; снижения материалоемкости и применения высокопроизводительных типовых технологических процессов.

Отработка конструкции на эксплуатационную технологичность должна способствовать снижению трудоемкости и себестоимости эксплуатации за счет рационального выполнения конструкций, обеспечивающих удобство эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, а также оснащения машин средствами диагностики и при-

способлениями, обеспечивающими комфорт и безопасность обслуживающего персонала.

Важную роль в обеспечении технологичности играет *единая система технологической подготовки производства* (ЕСТПП), которая предусматривает широкое применение прогрессивных технологических процессов, техоснастки и оборудования, эффективных инженерно-технических и управленческих методов, средств механизации и автоматизации производственных процессов. ЕСТПП обязывает обрабатывать новые конструкции машин на технологичность на всех этапах их создания, в том числе на всех стадиях разработки конструкторской документации.

На этапе разработки технического предложения анализируют варианты принципиальных схем и компоновок машины.

На этапе эскизного проекта осуществляют выбор оптимального варианта принципиальной схемы и базовой конструкции, которая должна лежать в основе проектируемой машины; унифицируют сборочные единицы и основные детали; производят расчленение машины на самостоятельные сборочные единицы; обеспечивают технологичность оригинальных деталей и выбирают для них рациональные заготовки.

На этапе технического проекта уточняют конструкцию машины и ее сборочных единиц и определяют конструктивную форму всех деталей; отрабатывают технологичность заготовок и выбирают для них наиболее простые конструкции сборочных единиц и деталей, а также баз сборки; определяют основные размерные цепи; обеспечивают выполнение основных технологических требований при механической обработке и сборке.

При разработке рабочей документации завершают отработку технологичности конструкции каждой детали, сборочной единицы и машины в целом. При этом проверяют выбор технологических баз деталей, постановку размеров и назначение допусков с учетом конструктивных и технологических требований; выбирают наиболее дешевые и недефицитные материалы; ограничивают номенклатуру применяемых марок и сортамента материала; проверяют соблюдение требований к конструкции заготовок (толщина стенок, радиусы переходов, уклоны, линии разъема и др.) и технологичности конструкции при механической обработке (доступность обработки, возможность входа и выхода инструментов, наличие надежных поверхностей для

крепления деталей при обработке и др.), а также максимальную унификацию элементов конструкции (модулей, диаметров, резьб, шлицевых соединений и др.).

При отработке конструкции машины на технологичность необходимо заложить свойства, обеспечивающие ее качественное изготовление и рациональное использование ресурсов. Это требует установления соответствия между конструкцией машины и производственными условиями ее изготовления, обоснованного применения материалов и рациональной преэмптентности конструктивно-технологических решений. Технологичность конструкции, являясь одним из показателей качества машины, в значительной мере определяет уровень технико-экономических показателей производства: тип и форму организации, наличие соответствующих условий и оборудования, продолжительность и серийность выпуска.

6.2 Показатели технологичности

Различают качественные и количественные виды оценки технологичности конструкции машин. Качественная оценка, как правило, предваряет количественную и базируется на сопоставлении и анализе разрабатываемого и базового вариантов. Если в результате качественной оценки выявлены очевидные преимущества разрабатываемой конструкции детали, узла или агрегата, то отпадает необходимость количественных оценок. Однако чаще всего количественная оценка конструкции необходима.

Ее дают с помощью количественных показателей, номенклатура которых достаточно обширна и позволяет детально раскрыть уровень технологичности конструкции проектируемого объекта. Из широкого перечня показателей технологичности, приведенных в стандартах, следует выбирать показатели, которые в наибольшей степени дают объективную оценку разрабатываемой машины. Их классифицируют по ряду признаков. В частности, по значимости различают базовые (основные) и дополнительные (вспомогательные) показатели, которые в свою очередь могут быть абсолютными и относительными (последние дают сравнительную характеристику проектируемого и базового варианта машины).

Выбор показателей является важным этапом оценки машины на технологичность. К наиболее значимым можно отнести:

- 1) трудоемкость изготовления;
- 2) удельную материалоемкость;
- 3) технологическую себестоимость;
- 4) коэффициент применяемости материала;
- 5) коэффициент унификации конструктивных элементов.

Кроме того, при оценке эксплуатационной и ремонтной технологичности следует учитывать трудоемкость и стоимость технического обслуживания и ремонта машин.

Для определения основных показателей используют статистические данные о машинах, имеющих общие конструктивно-технологические признаки с проектируемой машиной. Значения основных показателей технологичности конструкции часто приводят в техническом задании на проектирование.

Уровень технологичности конструкции в целом K определяют как отношение достигнутого проектного уровня технологичности K'_d к базовому $K'_б$, установленному техническим заданием на проектирование:

$$K = K'_d / K'_б.$$

Его оценивают по показателям, принятым для оценки технологичности конструкции в техническом задании на машину.

Трудоемкость изготовления $T_{и}$ проектируемой машины рассчитывают по формуле

$$T_{и} = \sum T_i n_i + \sum T_j n_j + T_{сб} + T_{ис},$$

где T_i – трудоемкость i -й сборочной единицы в изготовлении;

T_j – трудоемкость j -й детали, не вошедшей в состав сборочных единиц;

n_i, n_j – число i -х сборочных единиц и j -х деталей соответственно;

$T_{сб}, T_{ис}$ – трудоемкость процесса сборки и испытания изделия соответственно.

Уровень технологичности конструкции по трудоемкости изготовления характеризуют отношением достигнутой (проектной) трудоемкости T_d к базовой $T_б$, т. е. коэффициентом

$$K_T = T_d / T_b.$$

Технологическую себестоимость можно найти из выражения

$$C_T = M + T + Z_o + C_c + C_o + C_{и},$$

где M – расходы на сырье и материалы без учета стоимости отходов;

T – стоимость топлива и энергии, идущих на технологические цели;

Z_o – основная и дополнительная заработная плата производственных работ;

C_c – отчисления на социальное страхование от суммы основной заработной платы;

C_o – расходы на содержание и эксплуатацию оборудования;

$C_{и}$ – расходы на износ инструмента и приспособлений целевого назначения.

Уровень технологичности конструкции по технологической себестоимости характеризуют коэффициентом

$$K_{C_T} = C_{T,d} / C_{T,b},$$

где $C_{T,d}$, $C_{T,b}$ – достигнутая (проектная) и базовая технологическая себестоимость машины соответственно.

Материалоемкость машины M характеризует общее количество затраченного материала на производство одного образца. Уровень технологичности по материалоемкости определяют соотношением достигнутой (проектной) материалоемкости машины M_d и базовой M_b :

$$K_M = M_d / M_b.$$

При оценке технологичности заготовки применяют *коэффициент использования материала*

$$K_{и.м.} = M_{дет} / M_{заг},$$

где $M_{дет}$ – масса детали;

$M_{заг}$ – масса заготовки для этой детали.

Массу заготовки рассчитывают после выбора способа ее получения и определения общих припусков на механическую обработку.

Коэффициент применяемости материала рассчитывают по формуле

$$K_{пр.мi} = H_i / H,$$

где N_i , N – норма расхода i -го материала и всех материалов на изготовление изделия соответственно (очевидно, что $N = M$).

Данный коэффициент характеризует степень унификации материалов изделия. Для повышения технологичности изделия стремятся к сокращению номенклатуры используемых материалов, т. е. к максимально возможному увеличению значений коэффициента применимости.

Помимо перечисленных показателей, важной характеристикой расхода материала является удельная материалоемкость $M_{уд.м}$ машины. Для строительных и дорожных машин ее, как правило, определяют отношением материалоемкости машины M_m к сменной эксплуатационной производительности $\Pi_э$,

$$M_{уд.м} = M_m / \Pi_э.$$

Чем ниже $M_{уд.м}$, тем меньше расход материалов на единицу выполненных земляных, строительных, дорожных и других работ.

Коэффициент унификации деталей машины определяют из выражения

$$K_{у.д} = D_y / D,$$

где D_y – число унифицированных деталей;

D – общее число деталей в машине.

Коэффициент унификации конструктивных элементов

$$K_{у.э} = Q_{у.э} / Q_э,$$

где $Q_{у.э}$ – число унифицированных типоразмеров конструктивных элементов;

$Q_э$ – общее число типоразмеров конструктивных элементов в изделии.

Чем больше коэффициент унификации деталей и конструктивных элементов, тем более технологичными считаются конструкции в производстве.

6.3 Производственная технологичность

Как отмечалось, внедрение в производство высокопроизводительного оборудования и энергосберегающих технологий требует расширения и углубления специализации на предприятиях, ком-

плексной отработки конструкции изделия на технологичность, применения методов стандартизации и унификации при конструкторской и технологической подготовке производства.

При выборе конструктивных решений конструктор должен от начала до конца представлять процесс изготовления детали и предусматривать по возможности минимальный объем механической обработки резанием. Целесообразно детали изготавливать точным литьем, а еще лучше – штамповкой. Зубья, резьбу и другие подобные элементы лучше получать накатыванием, а не резанием. Вместе с тем механическая обработка резанием остается преобладающей для металлических деталей, особенно в случаях, когда требуется получить высокую точность в сочетании с малой шероховатостью поверхности.

Соответствие технологического процесса принятому материалу обеспечивает возможность получения заданных физико-механических свойств материала на этапах термической и химико-термической обработки и технических характеристик детали (точности размеров, шероховатости поверхности) на этапе механической обработки.

Рациональная последовательность технологических процессов и операций обусловлена как конструкцией и материалом детали, так и выбранными способами изготовления. Целесообразно предусмотреть геометрическую форму детали, для воспроизведения которой необходимо минимальное количество и разнообразие способов и операций.

Совмещение технологической и измерительной баз позволяет упростить технологический процесс, избежать погрешностей базирования и сравнительно легко обеспечить заданную точность.

Выбор технологических баз должен быть продиктован принципом однозначности положения заготовки в пространстве. Например, если заготовка обладает достаточной жесткостью во всех направлениях, то можно использовать сочетание установочной базы (ограничивающей три из шести возможных перемещений – два угловых и одно линейное), направляющей базы (ограничивающей угловое и линейное перемещение) и опорной базы (ограничивающей одно линейное перемещение). Могут быть использованы и другие сочетания, в которые входят двойная опорная или двойная направляющая база. При этом должно быть принято во внимание направление силы резания, силы тяжести и силы трения, т. е. обеспечение ими силового замыкания и однозначности положения заготовки. В случае недоста-

точной жесткости в каком-либо из направлений или на каком-либо участке детали предусматривают избыточное базирование.

Выбор измерительной базы не должен приводить к дополнительным погрешностям измерения, вызванным формой и расположением базы. В качестве измерительной базы используют функциональные элементы или вводят дополнительные элементы для контроля размеров, исключая легко сминаемые или неточно расположенные элементы. Размер канавки на цилиндрической детали определяют, как правило, относительно цилиндрической поверхности, а не относительно острых кромок канавки. Для измерения диаметра конических и сферических поверхностей вводят дополнительно цилиндрические пояски, а на острых кромках снимают фаски.

Выбор конструктивных решений деталей предусматривает минимизацию затрат и потерь материалов при их изготовлении. На рисунке 6.2, а в качестве примера показано нарезание крупномодульного зубчатого венца так называемой полуобкатной передачи. Зубья колеса имеют прямобочный профиль, а зубья шестерни – специальный профиль, получаемый из условия сопряжения с зубьями колеса. Нарезание зубьев колеса осуществляют дисковыми фрезами, удаленными одна от другой на расстоянии, равном длине общей нормали W . Фрезы образуют прорезы при циклическом последовательном повороте заготовки колеса, и часть металла, заключенная между прорезями, выпадает. В результате такой операции только небольшое количество металла перерабатывается в стружку (заштрихованные участки), а производительность нарезания зубьев существенно повышается.

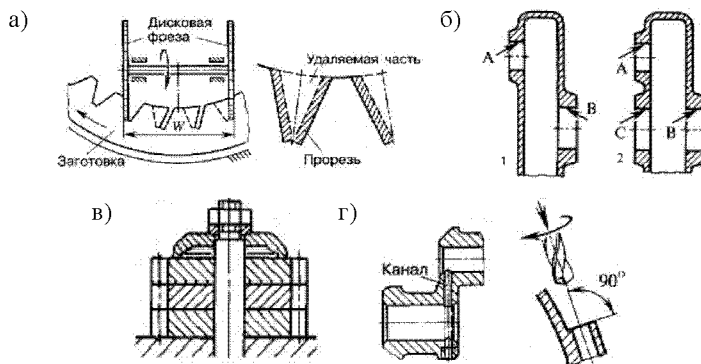


Рисунок 6.2 – Варианты обеспечения технологичности изготовления детали

Примером обеспечения технологичности может служить обработка посадочных, центрирующих и других рабочих поверхностей резанием. При обработке напроход, показано, что не следует использовать для опорных поверхностей углубления (получаемые, например, зенкерованием) или выступы на разных уровнях, что затрудняет их обработку и расположение инструмента. Целесообразно предусмотреть поверхности на одном уровне, которые легко обрабатываются фрезой или шлифовальным кругом напроход.

Из соображений технологичности сборки довольно часто используют корпуса, в которых разъем проходит через отверстия под подшипники, уплотнения и маслопроводные каналы. В этих случаях целесообразно осуществлять обработку в сборе. Для обеспечения точности относительного положения деталей при сборке, обработке и последующих разборках и сборках предусматривают штифтовое соединение или центрирующие сопрягаемые поверхности.

Высокой точности достигают при обработке целой детали, которую только перед сборкой разламывают по специально ослабленному сечению. При сборке части детали благодаря неровностям поверхностей разлома занимают точно такое относительное положение, что и в процессе обработки.

Один из наиболее эффективных приемов получения высокой точности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей – обработка с одного установка нескольких рабочих поверхностей. На рисунке 6.2, б (схема 1) показано такое расположение отверстий *A* и *B*, которое не позволяет их обработать на координатно-расточном станке, не переворачивая деталь. Чтобы обеспечить обработку с одного установка, в стене корпуса (на схеме 2) предусмотрено технологическое отверстие *C*. Кроме высокой точности изготовления, данный прием обеспечивает и экономичность процесса.

Существенного увеличения производительности достигают, используя обработку в пакете, – обработку напроход нескольких одинаковых деталей, установленных на одном станке или на одной оправке. Однако качественная обработка невозможна при их неточной установке или при недостаточной жесткости деталей в направлении силового воздействия инструмента. Поэтому зубчатые колеса (рисунок 6.2, в) должны иметь торцовые поверхности, строго перпендикулярные осям отверстий. Следует отметить, что не только консольное

расположение детали и инструмента влияет на точность изготовления. Если сама деталь будет иметь переменное (по длине) сечение, то и реакция воздействия со стороны режущего инструмента также будет переменной.

При конструировании литых деталей (металлических отливок) следует придерживаться приемов конструирования, обеспечивающих технологичность отливок – деталей или заготовок, получаемых литьем. Отливка должна обеспечивать простое изготовление формы с минимальным числом плоскостей разъема формы и возможностью извлечения модели или стержней без разрушения. Следует избегать замкнутых внутренних полостей и ступенчатых разъемов. Крупные и сложные изделия целесообразно разделить на простые детали, соединяемые в последующем болтами или сваркой. Конструкции должны иметь минимальное количество сопряжений, без разветвлений контуров стенок. Для извлечения моделей из формы предусматривают на отливках формовочный (литейный) уклон, величина которого зависит от способа литья. Для обеспечения равномерного остывания и уменьшения внутренних напряжений в результате неравномерной усадки (с целью исключения раковин, трещин и коробления отливки) стенки отливки должны иметь равномерную толщину, а переходы и сопряжения между стенками, соединяемыми под углом, должны быть плавными. Для обеспечения точности механической обработки отливок следует предусмотреть *черновую* базу достаточной протяженности, параллельную поверхности, обрабатываемой при первой механической операции, или перпендикулярную к ней. В общем случае необходимо иметь три черновых базы для ориентации детали в пространстве.

Для литых заготовок действуют следующие ограничения: наружные поверхности должны состоять из прямолинейных контуров, соединенных плавными переходами; толщина стенок должна назначаться такой, чтобы исключить резкие отклонения в их размерах; необходимо избегать выступающих частей, больших тонких ребер и таких сочетаний поверхностей, которые затрудняли бы изготовление литейной формы; форма заготовки должна исключать затруднения при разъеме модели. В зависимости от применяемого вида литья (литье в кокиль, в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, под давлением и др.) требования к технологичности литых деталей могут

дополняться и уточняться с учетом особенностей конструкции детали, ее назначения и условий эксплуатации, а также производственных возможностей.

Корпусные детали изготавливают литыми, сварно-литыми или штампованными. Конструкции литых заготовок корпусных деталей должны отвечать указанным ранее требованиям машинной формовки: толщина стенок в различных сечениях не должна иметь резких изменений, деталь должна иметь правильную геометрическую форму с возможностью ее полной обработки от одной базы, должна быть обеспечена возможность обработки плоскостей и торцов с отверстиями на проход (для этого плоскости и торцы не должны иметь выступов, мешающих обработке), размеры обрабатываемых отверстий внутри детали не должны превышать соосных им отверстий в наружных стенках детали, поверхности должны быть перпендикулярны осям отверстий.

Для деталей, представляющих собой тела вращения (без отверстий), которые изготавливают из прутка или штампованной заготовки, их конструкция должна иметь небольшое количество обрабатываемых поверхностей, сопрягаемых с другими деталями. Их форма должна обеспечивать возможность штамповки заготовок в закрытых штампах, поэтому следует избегать удлиненных выступов, сечений с большой разностью площадей, глубоких полостей и др.

Детали указанной формы со сквозными отверстиями должны иметь конструкцию, предусматривающую обработку только сопрягаемых поверхностей; их форма должна обеспечивать возможность получения заготовок с минимальными припусками. Следует исключать возможность их деформирования при термической обработке.

Технологичность конструкций мелких деталей (из отливок, штамповок и прутков) обеспечивается небольшим количеством обрабатываемых поверхностей с минимальными припусками на обработку. Мелкие детали должны иметь форму, которая позволяет изготавливать их высокопроизводительными методами: штамповкой на ковочных машинах или ковочных прессах, литьем под давлением с одновременной формовкой и заливкой нескольких заготовок, изготовлением деталей из ленты на автоматизированных прессах, а также формообразованием деталей из пруткового материала методом холодной высадки или высадки с индукционным нагревом.

Для деталей, работающих при различных видах нагрузок (изгиб, растяжение и кручение) целесообразно применять штампованные заготовки или заготовки в виде поковок. Штамповка обеспечивает получение более качественной заготовки, но требует применения дорогостоящих штампов. Поэтому использование этого вида формообразования деталей должно быть экономически обоснованным.

Особенности технологических процессов обработки давлением следует учитывать при выборе формы деталей, к которым предъявляются специфические требования к технологичности конструкции. При использовании горячей штамповки необходимо предусмотреть возможность сокращения числа переходов, операций и минимизацию последующей механической обработки, а также изготовление деталей на простых и доступных штампах. При штамповке на молотах и прессах деталь должна иметь разъемную геометрическую форму с наличием штамповочных уклонов на вертикальных стенках, а также плавные скругленные контуры. Пространственные детали сложной формы технологично изготавливать с применением холодной штамповки. Вид холодной штамповки (гибка, вытяжка, холодное выдавливание, холодная объемная штамповка и др.) во многом определяет совокупность требований, характеризующих технологичность детали.

Основные требования, характерные для конструирования отливок, используются и для конструирования деталей, получаемых другими способами. Например, в штампованных деталях также следует избегать малых радиусов скруглений, резких перегибов или переходов от одного сечения к другому, существенных различий в толщине стенок одной детали. В них также предусматривают технологические уклоны, технологические отверстия и другие технологические элементы.

При механической обработке деталей, независимо от способа их получения, очень важными являются условия размещения инструмента в зоне обработки, его входа и выхода. На рисунке 6.2, *г* для образования технологического отверстия (маслопроводного канала) вход и выход сверла необходимо осуществлять под прямым углом, чтобы избежать больших боковых нагрузок на консольно закрепленный инструмент. Кроме того, в конструкции детали должно быть предусмотрено место для размещения инструмента при ее обработке. Проверку на возможность выхода инструмента из зоны обработки

осуществляют при конструировании шлицев, шпоночных канавок, резьбовых отверстий и т. п.

Развитие направления совместного использования различных способов изготовления деталей упрощает процесс выполнения отдельных деталей и их соединения в сложный узел. На рисунке 6.3, а показана конструкция водила планетарной передачи автомобиля, составленная из двух частей: штампованной детали водила и корпуса муфты. Составные части конструкции соединены с помощью автоматической сварки с последующей зачисткой сварного шва шлифовальным кругом.

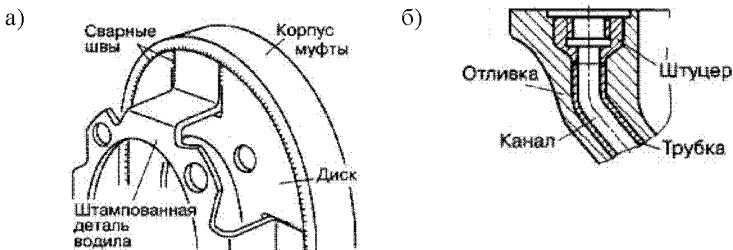


Рисунок 6.3 – Конструктивные решения обеспечения технологичности изготовления детали

На рисунке 6.3, б показана возможность получения полости сложной конфигурации внутри тела литой детали. Стальной маслопровод, составленный из трубки и штуцера, соединенных с помощью сварки, размещают в литейной форме, а затем форму заполняют расплавленным металлом – в данном случае алюминиевым сплавом.

Использование закладных деталей находит все большее распространение для сочетания металлических, пластмассовых и керамических деталей, которые соединяют литьем, спеканием или пластическим деформированием. Благодаря таким решениям удается совмещать электроизоляционные и электропроводящие материалы, трущиеся и несущие детали, закладывать во внутренние полости и каналы пружины, клапаны, фильтры, подшипники, направляющие и другие детали.

Одной из наиболее значительных проблем конструирования является обеспечение технологичности сборочной единицы, поскольку автоматизировать процесс сборки достаточно сложно. Важную роль в

обеспечении технологичности сборки играет принцип наименьшей размерной цепи, для реализации которого следует выбирать конструкцию с минимальным числом деталей и стыков в замкнутом контуре размерной цепи. К основным приемам обеспечения рациональной сборки относятся блочность конструкции и простота траектории относительного движения и относительного ориентирования при соединении деталей или сборочных единиц. На рисунке 6.4, а показана сборка мотор-барабана. Предварительно соединяют первую и вторую ступени редуктора, затем вводят редуктор с одной стороны барабана и закрепляют его, а с другой стороны вводят и закрепляют двигатель. Особенность такой сборки заключается в соединении двигателя и редуктора вне поля зрения и без доступа к месту соединения. Поэтому при разработке конструкции должно быть предусмотрено самоцентрирование (например, в виде конических поверхностей) и обеспечена компенсация перекосов в месте соединения.

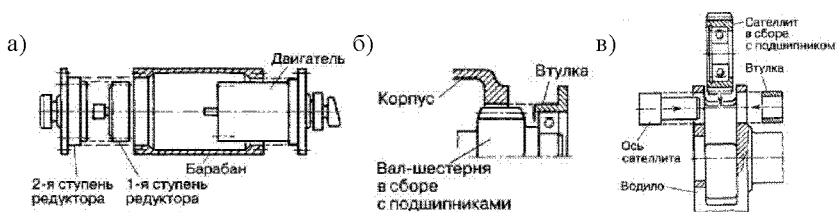


Рисунок 6.4 – Конструктивные приемы обеспечения сборки

Как правило, в современных конструкциях стараются избегать разборки сборочной единицы в процессе ремонта, а заменяют ее полностью. Для этого необходима такая конструкция сборочной единицы и корпуса узла, чтобы ее можно было ввести через имеющееся или специально выполненное окно в корпусе. На рисунке 6.4, б для обеспечения осевой сборки диаметр отверстия в корпусе должен быть больше диаметра вводимой через него шестерни. Это, в свою очередь, требует установки дополнительной детали – втулки для центрирования подшипника. На рисунке 6.4, в показан пример сравнительно простого соединения деталей: сателлит вводят между щек водила, не имеющего разъемов, совмещают отверстие подшипника сателлита с отверстиями в водиле, а затем вставляют в отверстия водила втулку и ось сателлита и стопорят их в осевом направлении.

Для стопорения используют пластические замки, после чего конструкция становится неразборной.

Возможность размещения деталей перед сборкой и их ориентирование при сборке определяют как общую компоновку, так и конструкцию отдельной детали или соединения. На рисунке 6.5, а детали 1 и 2 (резервуара или трубы) должны иметь углубления, чтобы можно было завести в отверстие винт и закрутить гайку. Такое решение обуславливает довольно большие габаритные размеры такого соединения и сложную конфигурацию внутреннего рабочего пространства устройства в целом. На рисунке 6.5, б показано более рациональное решение, в котором использована шпилька с двумя гайками (одна из гаек выполнена в виде закладной детали – резьбового вкладыша). Все шпильки предварительно вворачивают в деталь 1, затем осевым перемещением пристыкуют деталь 2, вставляют и закручивают гайки. Ширина полости под гайку определяется размещением гаечного ключа, а ее высота должна быть достаточной для свободного размещения гайки и рабочего участка резьбы шпильки.

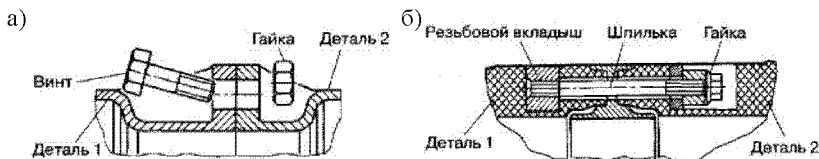


Рисунок 6.5 – Конструктивные приемы обеспечения сборки

Автоматизированная (тем более автоматическая) сборка обуславливает дополнительные требования к форме деталей и соединениям сборочных единиц, к предварительной ориентации и направлению движения детали при сборке, к вспомогательному оборудованию и способам сборки разъемных и неразъемных соединений. Как правило, стремятся использовать детали простой симметричной формы с односложным, желательно прямолинейным движением при сборке без поворота детали. При конструировании изделий, подлежащих автоматизированной сборке, рекомендуется не применять гибкие детали и соединения (провода, кабели, ремни), а использовать армированные детали и жесткие разъемные соединения. При автоматизированной сборке используют различные приемы повышения технологичности сборочного процесса, в частности осуществляют совмещение процес-

сов изготовления отдельных простых деталей и их сборки, а также предсборочное группирование деталей. Кроме того, используют центрирующие элементы, обеспечивающие точность ориентации деталей в начальный момент соединения и последовательное сопряжение поверхностей, а также направляющие элементы, фаски, скругления, конусы и канавки, облегчающие начальную ориентацию деталей соединения. Конструкция деталей должна исключать их заклинивание и непредусмотренное взаимное сцепление. Следует в максимальной степени использовать унифицированные элементы соединений. При выборе вида соединений следует иметь в виду, что винтовое соединение с резьбовым отверстием в теле детали проще для автоматизированной сборки, чем болтовое соединение, в котором больше деталей (гайки, шайбы). Шпоночные соединения при сборке валов целесообразно заменять шлицевыми или неподвижными фрикционными соединениями; следует также заменять резьбовые соединения клепаными или сварными (например, контактной сваркой).

На рисунке 6.6 представлены технологичные и нетехнологичные варианты сборочных единиц.

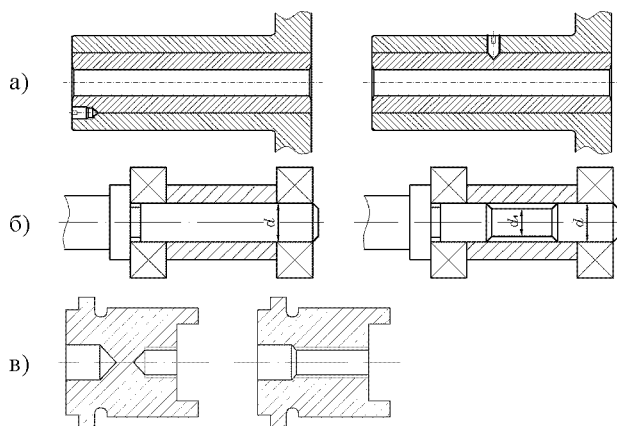


Рисунок 6.6 – Примеры технологичных (справа) и нетехнологичных (слева) сборочных единиц:

а – фиксация компенсатора износа; б – конструкция вала; в – конструкция втулки

Сборка упрощается при использовании разрезных стопорных колец для фиксации подшипников качения и других деталей в осевом

направлении на шейках валов и в расточках корпусных деталей вместо установки шайб с винтами и фиксирующих гаек.

Следует избегать сборки соединений склеиванием, поскольку продолжительные процессы затрудняют синхронизацию переходов сборочных работ.

Автоматизированное сборочное оборудование требует по сравнению с ручной сборкой более жестких допусков на детали. При автоматизированной сборке методы полной, неполной или групповой взаимозаменяемости, пригонки и регулирования используют в различной степени. Наиболее просто осуществляется сборка при полной взаимозаменяемости. Неполная и групповая взаимозаменяемость требуют дополнительных устройств контроля и усложняют систему управления. Еще сложнее осуществить автоматизированную сборку, используя пригонку или регулирование.

Значительную роль в обеспечении технологичности при сборке играют приспособления. При конструировании следует учитывать их функциональное назначение и необходимость выдерживать собственную многократную сборку и разборку. При этом приспособление не должно повреждать отдельные элементы собираемого устройства, а также предотвращать такие повреждения собственными деталями устройств. Например, в качестве приспособлений используют защитные кожухи (на время транспортировки и сборки), жесткие контейнеры (для транспортировки и сборки гибких деталей и сборочных единиц). Особое внимание уделяют установке в корпус и на вал манжетных уплотнений, монтаж которых целесообразно осуществлять с помощью оправок, поскольку при протягивании уплотнения по шлицам, шпоночным пазам или резьбе возможны их повреждения.

При разработке конструкции деталей и соединений, особенно тяжелых деталей или сложно собираемых соединений, должны быть предусмотрены специальные монтажные элементы (детали, поверхности, отверстия и другие части устройств), за которые можно захватить деталь (или сборочную единицу) или на которые можно нажимать, не боясь разрушения детали, или которые используются для облегчения направления, ориентации, центрирования. Для размещения элементов съемника предусматривают специальные реборды или гнезда.

Технологичность в значительной степени зависит от конструкции отдельных *неразборных* узлов, агрегатов и приборов. В современных

машинах пока предусматривают только простые малогабаритные неразборные узлы при их массовом и автоматизированном производстве (электродвигатели, насосы, клапаны, форсунки и другие узлы). Основным условием для выбора подобных решений является экономическая эффективность замены узла в целом.

Целесообразно заменять съемные соединения неразъемными для неразборных узлов, применяя методы сборки, основанные на пластическом деформировании (развальцовка, клепка и др.).

6.4 Эксплуатационная и ремонтная технологичность

Как отмечалось, эксплуатационная технологичность характеризует свойство машины сохранять эксплуатационные и функциональные показатели при минимальных затратах. Возможности машины по сокращению простоев (при подготовке к эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте и др.) и ускорению ее перевода в работоспособное состояние зависят от многих факторов, из которых к основным можно отнести контролепригодность, доступность, легкоъемность, взаимозаменяемость, восстанавливаемость, преемственность, эргономичность, безопасность обслуживания, нормы расхода эксплуатационных материалов, степень воздействия объекта на окружающую среду, возможность консервации и хранения, транспортабельность и др.

Контролепригодность характеризуется наличием встроенных средств контроля технического состояния и режимов работы машины и ее сборочных единиц, а также устройств, обеспечивающих подключение внешних средств диагностической аппаратуры; возможностью технической диагностики параметров без демонтажа составных частей и сборочных единиц. Контроль состояния машины при техническом диагностировании способствует предотвращению простоев из-за технических неисправностей. Применение современных диагностических средств на 70–75 % ускоряет процесс технического диагностирования по сравнению с обычными методами проверки основных систем машин (с частичной разборкой механизмов). Как правило, оценке подвергаются структурные и диагностические параметры.

К структурным относятся параметры, непосредственно характеризующие работоспособность составных частей машин (зазоры, натяг, размеры деталей и др.). Изменение структурных параметров, как правило, связано с износом и усталостным разрушением деталей. Ди-

агностические параметры (температура, шум, вибрация, давление, расход масла и топлива и др.), как правило, косвенно характеризуют состояние и работоспособность составных частей. Их используют для определения технического состояния машины без ее разборки. Измерение диагностических параметров должно осуществляться с достаточной точностью, поскольку большая погрешность измерения может привести к ошибочному диагнозу, а малая – к увеличению стоимости средств диагностирования.

Доступность с учетом требований эргономики характеризуется достаточно свободным доступом к местам технического обслуживания и ремонта с необходимым инструментом, возможностью применения средств механизации и автоматизации, а также выполнением технического обслуживания сборочных единиц без демонтажа.

Легкосъемность связана с рациональным расчленением составных частей за счет применения блочного принципа компоновки машин. Монтажная законченность сборочных единиц позволяет организовать агрегатный метод ремонта (с использованием обменного фонда) и снизить трудоемкость устранения отказов. Легкосъемность составных частей и сборочных единиц обеспечивается с помощью износостойких элементов стыковки, демонтажных баз для деталей, имеющих посадку с натягом, приспособлений (захватов, рым-болтов, проушин и т. д.), облегчающих снятие и установку составных частей большой массы; штекерных соединений в системе электрооборудования; выполнение на крышках люков и аккумуляторов замков, не требующих применения инструмента для их закрывания и открывания.

Взаимозаменяемость составных частей и сборочных единиц позволяет производить их сборку или замену без предварительной подгонки. В противном случае усложняется процесс разборки, дефектации и комплектования деталей, а отказ изготовленных без учета взаимозаменяемости деталей приводит к необходимости замены всей сборочной единицы и увеличению расхода запасных частей, что усложняет ремонт.

Восстанавливаемость машины определяется, прежде всего, возможностями восстанавливаемости ее деталей, составных частей и механизмов. Она зависит от применяемых материалов, конструкций деталей и узлов, технологии их восстановления. В частности, можно отметить следующие факторы:

1) широкое использование деталей и элементов, конструкция которых позволяет применять экономичные и эффективные методы восстановления;

2) применение легкоъемных элементов (втулок, венцов, колец, вкладышей и др.), подвергающихся интенсивному износу; так, корпусные детали (сцепления, коробки передач, бортовые редукторы и др.) должны иметь съемные элементы в посадочных местах подшипников;

3) возможность повторного использования деталей путем изменения их положения или места в сборочной единице;

4) расширенное применение стандартных и унифицированных деталей, элементов, стыковочных узлов, разъемов, элементов электрооборудования, инструмента и т. п.;

5) наличие деталей и конструкций, требующих для восстановления сложной термо- или химико-термической обработки и специальных приспособлений.

Преимственность технологических процессов технического обслуживания обеспечивает возможность применения к новым машинам типовых процессов технического обслуживания и ремонта, технологических процессов восстановления деталей, подготовки машины к эксплуатации и хранению. Повышению уровня преимственности способствует не только унификация, но и типизация конструкции.

Эргономичность характеризуется удобством размещения оператора, управления машиной и ее обслуживания с минимальными затратами труда. Повышению эргономических параметров машин способствуют адаптирующиеся системы управления, активные системы гашения колебаний места оператора в широком диапазоне частот и амплитуд, сиденья с регулируемыми параметрами в зависимости от антропологических данных оператора, звуко-, пыле- и температурная изоляция кабины и ее кондиционирование.

Значительно облегчается работа оператора по управлению агрегатами и механизмами при оснащении машины бортовыми компьютерами и микропроцессорной техникой.

Для обеспечения удобства диагностирования широко применяются узлы и агрегаты со встроенными диагностическими системами с индексацией данных на панели приборов, где указывается место и характер дефекта, что значительно ускоряет поиск и устранение неисправностей.

Транспортабельность оценивается приспособленностью машин к передвижению и определяется временем переналадки из рабочего положения в транспортное и обратно, а также удобством перевозки машины другим видом транспорта (например, железнодорожным). Транспортабельность повышается путем применения гидравлических и пневматических приспособлений, механизмов, специальных тележек. Транспортабельность характеризуют показателем, равным произведению конструктивной массы машины на ее площадь, занимаемую в транспортном положении.

Сохраняемость машины оценивается возможностью ее хранения на открытой площадке, под навесом или в помещении; числом составных частей и сборочных единиц, требующих герметизации или консервации; количеством необходимых консервационных материалов, а также потребностью в специальной установке или упаковке.

Гигиеничность определяется внешним видом и состоянием поверхностей составных частей машины, подлежащих обслуживанию, необходимостью и возможностью их очистки и мойки перед проведением работ. Наибольшую загрязненность имеют поверхности с подтеками смазывающих, рабочих и других жидкостей, которые плохо поддаются мойке и очистке. Опасность загрязнения обслуживающего персонала снижает производительность работ и часто приводит к их некачественному исполнению.

Высокому уровню ремонтной технологичности машин способствует повышение эффективности их использования, а также снижение затрат труда и материалов при обеспечении необходимого качества ремонта.

Уменьшение числа текущих и капитальных ремонтов без сокращения срока службы обеспечивается при разработке составных частей и сборочных единиц с высокими показателями надежности, а снижение трудоемкости и стоимости ремонтов, потребность в ремонтно-технологическом оборудовании – технологичностью конструкции.

Компоновка сборочных единиц должна обеспечивать общую сборку машины без промежуточной разборки и последующих сборок составных частей. Средние ресурсы составных частей и сборочных единиц машины по возможности должны быть кратными между собой или близкими к ним.

Точность расположения составных частей и сборочных единиц должна быть обоснована и взаимосвязана с точностью их изготовле-

ния, конструкции составных частей должны предусматривать центрирующие, ориентирующие и компенсирующие устройства, обеспечивающие снижение затрат труда при разборке и сборке.

Отработка конструкции на эксплуатационную и ремонтную технологичность направлена на снижение трудоемкости и стоимости технического обслуживания и ремонта, а также на сокращение простоев. Этому способствуют следующие мероприятия:

- 1) широкое использование современных методов и средств диагностирования технического состояния машин;
- 2) совершенствование организации технического обслуживания и ремонта машин;
- 3) расширение сервисной службы предприятий-изготовителей машин;
- 4) разработка типовых процессов технического обслуживания и ремонта основных узлов и механизмов машин;
- 5) повышение квалификации обслуживающего персонала;
- 6) развитие системы постоянного контроля за работой машин, включая спутниковую или радионавигационную систему наблюдения, комплект датчиков контроля за работой узлов и агрегатов машин, бортовые компьютеры для анализа и вывода данных и соответствующее программное обеспечение.

7 АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ МАШИН

Современные требования, предъявляемые к машинам и механизмам, могут быть удовлетворены только за счет средств автоматизации, позволяющих освободить человека от непосредственного управления технологическим процессом.

Все машины, функционирующие без непосредственного участия человека, действуют в соответствии с заданной программой, в которой должен содержаться алгоритм последовательности выполнения операций.

При автоматизированной системе управления функции человека сводятся к наблюдению за поведением автоматических устройств.

Автоматическая работа машин и агрегатов обеспечивается приборами и устройствами, выполняющими следующие функции:

1) получение информации о состоянии механизмов и агрегатов (чувствительные элементы, датчики);

2) формирование удобного вида информации по физической сущности, объему и форме (вторичные приборы измерительных систем, усилители);

3) использование информации для обеспечения воздействия на машину (исполнительные устройства);

4) передачу информации на расстояние (применение телемеханики).

Основными задачами автоматизации машин и оборудования, применяемых в строительном комплексе, являются:

1) повышение производительности машин и улучшение качества выполняемых работ;

2) непрерывный контроль технического состояния машины путем проверки работоспособности ее основных систем (двигателя, трансмиссии, гидросистемы, электрооборудования и др.);

3) совершенствование системы учета работы машин с целью экономии материальных и трудовых ресурсов;

4) повышение безопасности выполняемых работ и обеспечение экологической безопасности окружающей среды.

Повышение производительности машин при внедрении средств автоматизации достигается за счет оптимизации траектории движения и заданного положения рабочего органа; повышения точности исполнения заданной технологической операции; оптимизации нагрузок на рабочие органы и элементы машины; сокращения функций оператора по управлению машиной; блокировки работы машины при неправильных действиях оператора или в опасных режимах.

7.1 Контроль, управление и регулирование

Автоматизация производства и работы строительных машин развивается в направлениях автоматизации контроля, управления и регулирования.

Автоматический контроль – это контроль с помощью датчиков и преобразователей характеристик управляемого объекта. Системы автоматического контроля (САК) осуществляют восприятие информации о состоянии объекта и ее преобразование к виду, удобному для дальнейшей обработки.

Автоматическое управление – это совокупность воздействий, направленных на функционирование управляемого объекта в соответствии с заданным алгоритмом управления. Такое управление осуществляется системой автоматического управления (САУ), которая управляет объектом с помощью устройств измерения, управления и защиты без участия технического оператора.

Автоматическое регулирование – это поддержание постоянного или изменение по заданному закону выходного параметра, характеризующего процесс. Устройства, обеспечивающие такое регулирование, называют системой автоматического регулирования (САР). Различают следующие системы автоматического регулирования:

1) стабилизирующая – поддерживает постоянное значение регулируемого параметра (например, стабилизация толщины срезаемой стружки грунта путем регулирования скорости напорного механизма одноковшового экскаватора);

2) логико-программная – задает требуемую последовательность рабочих операций управляемого объекта по заданной программе (на-

пример, автоматизация поточно-транспортных систем, состоящих из ряда ленточных или винтовых конвейеров);

3) следящая – содержит предписание изменения регулируемого выходного параметра в зависимости от изменения известного входного параметра (например, универсальные следящие системы контроля положения строительных машин в пространстве по копиру или лазерному лучу);

4) самонастраивающаяся (адаптивная) – определяет такое значение регулируемого параметра, которое обеспечивает оптимальный режим работы управляемого объекта.

Автоматические устройства, устанавливаемые на машинах (таблица 7.1), позволяют при выполнении функций управления стабилизировать положение рабочего органа в пространстве или перемещение его по заданной программе, обеспечивать максимальную производительность машины и движение ее по заданному курсу, защищать от перегрузок различные узлы, обеспечивать охрану труда машиниста, контролировать работу отдельных узлов и вести учет производительности машин.

В настоящее время для строительных машин разработаны следующие **системы и средства автоматизации**:

1) устройства автоматического контроля технического состояния и работоспособности основных узлов машины;

2) системы оптимизации нагрузок на рабочие органы и перемещений элементов машины;

3) копирные, в том числе лазерные, системы;

4) следящие имитационные системы;

5) микропроцессорные ограничители грузоподъемности и системы контроля глубины копания;

6) системы контроля плотности грунта.

В последние годы промышленность СНГ освоила выпуск систем автоматического управления для автогрейдеров, скреперов, бульдозеров и асфальтоукладчиков, обеспечивающих высокое качество планировочных и других работ, а также рост производительности труда.

Таблица 7.1 – Назначение систем автоматизации строительных и дорожных машин

Группа машин	Управление рабочими органами			Контроль параметров работы (диагностирование)	Обеспечение безопасности работы			Учет (измерения) показателей		Управление режимами работы двигателя и трансмиссии
	Двигатели	Гидросистемы	Другие агрегаты		Контроль грунтовых характеристик	Отключение при опасном состоянии	Предупреждение опасных воздействий	Производительность	Выполнение заданных технических параметров	
Строительные краны	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	
Подъемники						Δ				
Транспортирующие машины	Δ									
Одноковшовые экскаваторы	Δ									
Многоковшовые экскаваторы	Δ	Δ	Δ			Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
Бульдозеры и рыхлители	Δ	Δ				Δ			Δ	Δ
Автогрейдеры	Δ	Δ								Δ
Скреперы	Δ	Δ	Δ					Δ	Δ	Δ
Грунтоуплотняющие машины					Δ				Δ	
Бетоно- и растворосмесительные установки				Δ						
Асфальтоукладчики	Δ								Δ	
Машины для бестраншейной прокладки коммуникаций	Δ								Δ	
Трубоукладчики					Δ					

Например, ВНИИСтройДорМашем разработан набор унифицированных приборов регулирования и управления машинами, входящими в ряд агрегатированных комплексов автоматической аппаратуры (АКА). В частности, автоматизация контроля безопасности работы кранов и погрузчиков, ограничение их грузоподъемности, применение дистанционного и автоматического управления осуществляются системой "АКА – Кран"; автоматическое управление перемещением, взвешиванием, перемешиванием, контролем за работой и порционной выдачей материалов асфальто- и цементосмесительными установками всех типов и назначений – системой "АКА – Бетон"; автоматическое саморегулирование рабочих органов, элементов управления и контроля дорожно-строительных и аэродромных машин при выполнении земляных работ и укладке покрытий – системой "АКА – Дормаш", в комплект которой входят системы:

"Автоплан" – для бульдозеров;

"Профиль" – для автогрейдеров;

"Стабилослой" – для различных укладочных машин.

Системы автоматического управления по положению рабочего органа машин разделяют на одно-, двух- и трехканальные. При одноканальных системах рабочий орган машин удерживается в заданном положении в одной плоскости: продольной – у бульдозеров, поперечной – у автогрейдеров. К таким системам относятся "Автоплан-1" и "Автоплан-10" – для бульдозеров, "Профиль-1" и "Профиль-10" – для легких и средних грейдеров.

При двухканальных системах управления стабилизация положения рабочего органа обеспечивается одновременно в продольной и поперечной плоскостях. К этим системам относятся "Комбиплан" – для бульдозеров, "Профиль-2" и "Профиль-20" – для средних и тяжелых автогрейдеров, "Стабилослой-10" и "Стабилослой-20" – для укладчиков покрытий.

При трехканальных системах управления, помимо фиксации положения рабочего органа в двух ортогональных вертикальных плоскостях, имеется еще и управление движением машины в плане ("по курсу").

Копирные следящие системы, использующие внешний копир – проволоку (тросик), имеют недостатки, связанные с погрешностями

копирно-щуповой системы из-за колебания щупа, провисания тросика, а также ошибок при его установке.

Наиболее эффективными являются **лазерные системы управления**. В них широко применяются элементы микроэлектроники, интегральные схемы, микропроцессоры, логические запоминающие и вычислительные устройства. Такие системы используются для управления машиной или группой машин на значительных площадях и расстояниях (до 1500 м) при достаточно высоких скоростях движения. Их применение для укладочных машин обеспечивает как раздельное, так и одновременное управление курсом машины и толщиной укладываемого слоя материала (бетон, асфальт), а также автоматическую ориентацию рабочих органов в пространстве.

В качестве примера можно также назвать использование лазерных приборов в управлении рабочим органом бульдозера в системе "Комбиплан-10ЛП".

САУ (САР) могут быть построены с использованием следующих принципов:

- управление по разомкнутому циклу;
- управление по замкнутому циклу;
- комбинированное управление.

В разомкнутых системах (рисунок 7.1, а) управляющее воздействие задается без учета выходного значения управляемой величины. Такое управление называют *жестким*, без обратной связи. Разомкнутые системы используют для *дистанционного управления*. В такой системе задающий сигнал X поступает в управляющее устройство УУ, из которого сигнал управляющего воздействия УВ направляется к объекту управления ОУ для получения выходных координат Y с учетом возможного воздействия сторонних помех F .

В замкнутых системах (рисунок 7.1, б) управляющее воздействие формируется в зависимости от управляемой величины. В случае отклонения выходного параметра от заданного значения сигнал возвращается объектом управления на управляющее устройство для корректировки. Такие системы работают с изменяемыми структурой и законом управления. Главным элементом замкнутой системы управления является звено *обратной связи*, с помощью которого формируется управляющее воздействие. Существует два вида обратной связи: главная, которая соединяет выход системы с ее входом, и

местная (внутренняя), с помощью которой передается воздействие от выхода какого-либо звена на его вход (или на вход одного из предыдущих звеньев). Системы, содержащие только одну главную обратную связь, называют одноконтурными, а содержащие дополнительные местные обратные связи, – многоконтурными.

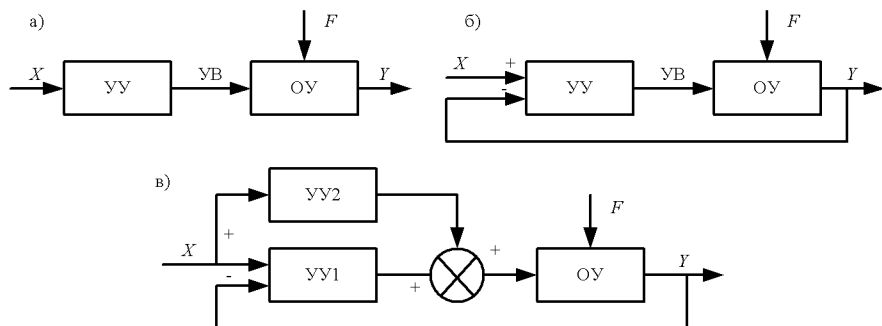


Рисунок 7.1 – Управление по разомкнутому (а), замкнутому (б) циклам и по комбинированной схеме (в):

УУ – управляющее устройство; УВ – управляющее воздействие; X – задающее воздействие; Y – выходные управляемые величины; F – помехи

Комбинированное управление (рисунок 7.1, в) характеризуется наличием в системе обратной связи и резервного управляющего устройства, подключаемого параллельно первому через элемент сравнения (анализатор). Установленные на схемах знаки "плюс" и "минус" характеризуют положительные или отрицательные значения задающего воздействия.

Автоматические системы различают по ряду признаков:

1) по назначению (характеру изменения задающего воздействия) различают системы:

- автоматической стабилизации (задающее воздействие X – постоянная величина);
- программного управления (задающее воздействие X – заранее заданная функция времени);
- следящие (задающее воздействие X заранее не известно);

2) по принципу управления (характеру используемых для управления сигналов):

- непрерывные;

- дискретные;
- 3) по характеру используемой информации об условиях работы:
 - с жесткими законами управления и структурой;
 - с изменяемыми структурой и законами управления, к которым относятся системы автоматической настройки, самообучающиеся и самоорганизующиеся системы;
- 4) по характеру математических соотношений:
 - линейные;
 - нелинейные;
- 5) по количеству выходных координат объекта управления:
 - одномерные;
 - многомерные, которые делятся на системы связанного и несвязанного управления.

В системах связанного управления отдельные управляющие устройства связаны друг с другом внешними связями. Входящую в состав многомерной системы отдельную систему управления называют автономной, если управляемый ею выходной параметр не зависит от значений остальных управляемых параметров.

Элементы САУ (САР) классифицируют по следующим основным признакам:

- функциональному назначению – измерительные, усилительно-преобразовательные, исполнительные, корректирующие;
- виду энергии, используемой для работы, – электрические, механические, гидравлические, пневматические, комбинированные;
- наличие или отсутствие вспомогательного источника энергии – активные, пассивные;
- способу воздействия – прямого и непрямого действия.

Любое автоматическое устройство является достаточно сложной системой. В частности, система автоматического измерения включает датчик (чувствительный элемент и элемент преобразования), усилители, линию связи и измерительный прибор. Для системы автоматического контроля необходимо наличие задающего элемента и элемента сравнения.

Принцип измерения заключается в сравнении измеряемой величины с другой величиной, условно принятой за единицу; различают два вида измерений:

– *прямые* – определение величины путем непосредственного сравнения этой величины с единицей измерения, например, измерение длины с помощью линейки;

– *косвенные* – определение измеряемой величины путем вычисления по результатам прямых измерений одной или нескольких величин, связанных с искомой функциональной зависимостью.

Существенную роль в устройствах автоматики играют задающие элементы. Они устанавливают требуемый параметр процесса, закон его изменения или порядок воздействия сигналов. В зависимости от назначения задающие элементы бывают стабилизирующие, программные, следящие и самонастраивающиеся.

Элемент сравнения (нуль-орган) сравнивает воспринятую величину с заданной и выдает их разность, т. е. рассогласование двух сигналов.

Каждый из названных элементов может быть дискретного действия, т. е. сигнал на выходе элемента отсутствует или присутствует (принцип "да – нет"), и аналогового (пропорционального) действия, т. е. величина сигнала на выходе элемента пропорциональна величине сигнала на входе (сигнал может изменяться постепенно от нуля до максимума).

Система автоматического контроля (рисунок 7.2) может быть представлена следующим образом: восприятие информации (например, давление в гидросистеме); преобразование этой информации в удобный для дальнейшего использования сигнал (например, электрический, гидравлический); промежуточное преобразование сигнала (усиление, модуляция); измерительное преобразование (преобразование в воспринимаемый сигнал – визуальный или звуковой); обнаружение признаков контролируемого параметра (давление выше нормы). В соответствии с этой последовательностью прохождения сигнала можно выделить также элементы системы контроля: ЧЭ – чувствительный элемент – восприятие состояния объекта; ПЭ – преобразовательный элемент – преобразование состояния в сигнал; Д – датчик (первичный прибор) – восприятие и преобразование; У – усилитель, модулятор – промежуточное преобразование; ЛС – линия связи – передача и восприятие сигнала на расстоянии; ИП – измерительный прибор (вторичный прибор) – преобразование в сигнал, удобный для получения окончательного результата; ЭС –

элемент сравнения – обнаружение признаков контролируемого параметра; ЗЭ – задающий элемент. Элемент сравнения, задающие элементы и приемник сигнала могут быть как в самом измерительном приборе (пунктир на схеме), так и вне его.

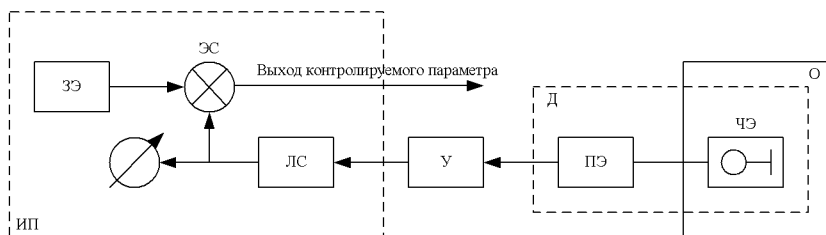


Рисунок 7.2 – Структурная схема автоматического контроля

7.2 Технические средства автоматизации

По функциональному признаку технические средства автоматизации можно подразделить на четыре группы:

1) средства получения информации о параметрах состояния объектов контроля, регулирования или управления, включающие измерительные элементы (датчики);

2) средства приема, передачи и переработки измерительной информации, а также преобразования и передачи управляющих команд, включающие усилители сигналов, каналы связи, преобразователи и сравнивающие устройства, называемые преобразующими элементами;

3) средства получения информации о задачах автоматического контроля, регулирования или управления, включающие запоминающие и программные устройства (на базе микропроцессоров и микроЭВМ), которые называют задающими элементами;

4) средства регулирования параметров контролируемых процессов (исполнительные элементы), которые состоят из усилителей входных сигналов и исполнительных механизмов, преобразующих эти сигналы в энергию механических перемещений.

В некоторых автоматических системах присутствуют не все перечисленные элементы, однако отдельные элементы могут выполнять сразу несколько функций. Например, центробежный регулятор час-

тоты вращения вала двигателя прямого действия является как измерительным элементом, так и исполнительным устройством.

Датчики контроля и регулирования. Датчиком называют первичный измерительный преобразователь контролируемой или измеряемой величины (давление, усилие, температура и др.) в выходной электрический сигнал, удобный для дистанционной передачи и дальнейшего использования. Он характеризуется входными и выходными величинами, чувствительностью, погрешностью и инерционностью. Их классифицируют по ряду признаков.

По принципу действия датчики разделяют на механические, оптические, тепловые, акустические и радиоактивные.

По способу преобразования неэлектрических величин в электрические датчики подразделяют на активные (генераторные) и пассивные (индуктивные, емкостные, фотоэлектрические, термоэлектрические, радиоактивные).

По назначению различают силовые, скоростные, температурные, частотные и другие датчики (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Основные типы датчиков систем управления и контроля, используемых в строительных и дорожных машинах

Измеряемые параметры	Тип датчика
Механическая деформация	Измеритель смещения, датчик давления, датчик массы
Частота	Доплеровский измеритель скорости
Температура	Термометр, пирометр излучения, датчик уровня жидкости
Давление	Измеритель нагрузки, расходомер
Влажность, состав газов	Гигрометр, газовый сигнализатор
Звук (в том числе ультразвук)	Эхолот, устройства неразрушающего контроля
Свет (в том числе инфракрасное излучение)	Фотодатчик, датчик цвета
Радиация, рентгеновское излучение	Датчик уровня, рентгеновский томограф
Волновое излучение	Радар, измеритель скорости

По конструкции и принципу действия чувствительного элемента датчики разделяют на контактные и бесконтактные. Чувствительный элемент в контактных датчиках непосредственно соприкасается с контролируемым веществом, а в бесконтактных – не

соприкасается. К бесконтактным относятся радиоактивные, ультразвуковые и фотоэлектрические датчики. Для пассивных (параметрических) датчиков необходим электрический источник питания. В генераторных датчиках под действием измеряемой величины вырабатывается электрическая энергия.

Величину, воспринимаемую и контролируруемую датчиком, называют входной (X), а величину, преобразованную датчиком или вырабатываемую им, – выходной (Y). Изменение выходной величины в зависимости от изменения входной величины называют чувствительностью датчика. Основной характеристикой преобразователя является функциональная зависимость между выходной и входной величинами в установившемся режиме.

Помимо этого, эффективность их работы зависит от статических, динамических и частотных характеристик, а также от чувствительности, инерционности и погрешности. Поскольку измерение одной и той же физической величины может выполняться с помощью различных датчиков, то их выбор зависит от технических требований, предъявляемых к разрабатываемой системе автоматики.

В строительных и дорожных машинах наибольшее распространение получили механические датчики перемещения. К наиболее простым устройствам относятся конечные выключатели, ограничивающие линейные или угловые перемещения механизма. Например, при достижении машиной (башенным, козловым или мостовым краном) во время перемещения по подкрановым путям крайнего положения конечный выключатель отключает контактную группу, прерывая подачу электроэнергии к механизму передвижения.

Из генераторных преобразователей наибольшее распространение получили резистивные преобразователи неэлектрических величин, действие которых основано на изменении омического сопротивления от воздействия измеряемой величины. К ним относятся потенциометрические датчики, преобразующие линейные и угловые перемещения в электрический сигнал. Их выполняют в виде переменного сопротивления, т. е. реостата, подвижный контакт которого связан с преобразуемым элементом.

К генераторным датчикам относятся *тахогенераторы*, которые представляют собой маломощные (до 100 Вт) электрические машины, преобразующие механическое вращение в электрический сигнал. Тахогенераторы на выходе дают напряжение, пропорциональное частоте вращения, и применяются в качестве электрических датчиков

угловой и линейной скоростей. В зависимости от вида выходного напряжения и конструкции их разделяют на тахогенераторы постоянно-го и переменного тока.

К параметрическим датчикам относятся индуктивные и емкостные преобразователи, питание которых осуществляется от источников переменного тока. Принцип их работы основан на изменении реактивного сопротивления в зависимости от величины зазора между подвижной и неподвижной частями датчиков.

В индуктивных датчиках изменение индуктивного сопротивления электромагнитного дросселя происходит при перемещении его подвижного элемента (якоря). Они широко применяются для измерения малых угловых и линейных механических перемещений, деформаций, а также для управления следящими системами.

Для измерений деформаций в элементах конструкций и узлов машин используются *тензометрические* и *пьезоэлектрические* преобразователи. Их работа основана на тензометрическом эффекте, т. е. на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента (тензолита) от его деформации. В последнее время широкое применение получили полупроводниковые тензодатчики (из германия и кремния), чувствительность которых в 50–100 раз выше проводочных (из нихрома или константана), а значительный уровень выходного сигнала позволяет обходиться без усилительной аппаратуры.

С помощью пьезоэлектрических преобразователей механическая энергия преобразуется в электрическую из-за возникновения электрических зарядов на поверхностях кристаллов некоторых диэлектриков (например, титаната бария). К этому типу датчиков относятся металлические и полупроводниковые термометры сопротивления, предназначенные для измерения температуры в диапазоне от -50 до $+180$ °С для медных и от -250 до $+650$ °С для платиновых термометров сопротивления.

Для дистанционного измерения перемещений применяют фотоэлектрические датчики, принцип работы которых основан на фотоэлектрическом эффекте.

Для контроля и регулирования температуры различных процессов используют методы, основанные на термоэлектрических эффектах и явлениях теплового расширения биметаллических чувствительных элементов с различными коэффициентами линейного расширения, изменения давления газа внутри замкнутого объема или

электрического сопротивления проводников и полупроводников при изменении температуры.

В строительных и дорожных машинах с двигателями внутреннего сгорания датчиком температуры в системе охлаждения двигателя является термостат, который представляет собой гофрированный баллон (сильфон), внутри которого находится легкоиспаряющаяся жидкость или твердый наполнитель с большим коэффициентом линейного расширения. При повышении температуры баллон удлиняется, а при понижении – сокращается. При этом закрепленный на баллоне клапан включает и отключает радиатор, поддерживая таким образом необходимую температуру.

К датчикам, используемым в строительных и дорожных машинах, предъявляются требования, обусловленные условиями эксплуатации этих машин. Они должны выдерживать вибрационные и ударные перегрузки, падения напряжения в сети и при рабочей нагрузке, высокую влажность (до 98 %), а также перепады температуры окружающей среды. Кроме того, они должны обладать водонепроницаемостью, коррозионной стойкостью, помехоустойчивостью, надежностью и сохранять работоспособность при воздействии паров масел, жидкого топлива и выхлопных газов.

В большинстве случаев мощность выходного сигнала воспринимающего или преобразующего элемента недостаточна для управления исполнительным элементом. Для количественного изменения этой мощности применяют усилительные элементы. Усилителем называют устройство, которое увеличивает энергию входного сигнала за счет вспомогательного источника питания. Основным показателем усилителя является коэффициент усиления. Различают коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности.

В системах автоматики широко используют усилители-преобразователи, которые помимо усиления осуществляют преобразование входного сигнала в другой вид выходного сигнала, например, постоянного тока в переменный.

В электрических системах используют электронные, электромагнитные и при больших мощностях электромашинные, а в неэлектрических – механические, пневматические и гидравлические усилители.

Кроме того, по принципу действия усилители классифицируют на усилители аналогового действия и дискретного, т. е. релейного (переключатели).

Электромагнитные усилители применяют в системах, где необходимо иметь скачкообразную (релейную) статическую характеристику. Эти усилители отличаются простотой конструкции, сравнительно малыми размерами, высокой стабильностью характеристик и малой стоимостью. В них используется свойство изменения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов в зависимости от величины постоянного подмагничивающего поля.

Электромагнитные реле клапанного типа с втяжным или поворотным якорем, работающие как на переменном, так и на постоянном токе, используют в качестве переключателей в системах автоматики.

Электронные (полупроводниковые) усилители отличаются долговечностью, малыми размерами и массой, экономичностью, мгновенной готовностью к работе, высоким коэффициентом усиления, вибро- и ударостойкостью, а также способностью усиления слабых сигналов и большим диапазоном усиливаемых частот.

Электромашинные усилители применяют в качестве усилителей мощности для управления объединенными с ними исполнительными элементами постоянного тока. Эти усилители целесообразно использовать в системах мощностью более 100 Вт. Простейшие усилители представляют собой систему из вспомогательного двигателя и генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Достоинством этих усилителей является возможность управления большими мощностями, высокий коэффициент усиления и сравнительно малая инерционность.

Гидравлические и пневматические усилители применяют в системах гидро- и пневмоавтоматики. Достоинства этих усилителей – высокая помехоустойчивость, большой коэффициент усиления, возможность управления исполнительными элементами большой мощности. Как правило, эти усилители выполнены с исполнительными элементами как единый механизм.

В современных строительных и дорожных машинах для их управления используют микроэлектронные интегральные схемы, которые являются основой микропроцессоров и микро-ЭВМ. Микропроцессор представляет собой программно-управляемое устройство, которое осуществляет обработку поступившей информации и управление этим процессом. Бортовые микропроцессорные системы строительных и дорожных машин обеспечивают программирование арифметических и логических операций, а также управление исполнительными

устройствами и системой в целом, включая информационное обеспечение (сбор, обработку и выдачу информации).

В общем случае в состав бортовой микро-ЭВМ входят следующие элементы:

- 1) устройства входа (сигналы от датчиков) и выхода (управляющие сигналы на исполнительные устройства);
- 2) оперативное и постоянное запоминающее устройство;
- 3) микропроцессор и соединительные элементы.

Основой микропроцессорной системы (рисунок 7.3) является модель реально протекающего процесса. Она включает три основных компонента: 1) модельное состояние, описывающее реальный процесс во времени; 2) функцию модификации состояний, т. е. переход от одного модельного состояния к другому на основании сигналов датчиков; 3) функцию предсказания, т. е. установление требуемого модельного состояния и формирование набора машинных команд исполнительным органам.

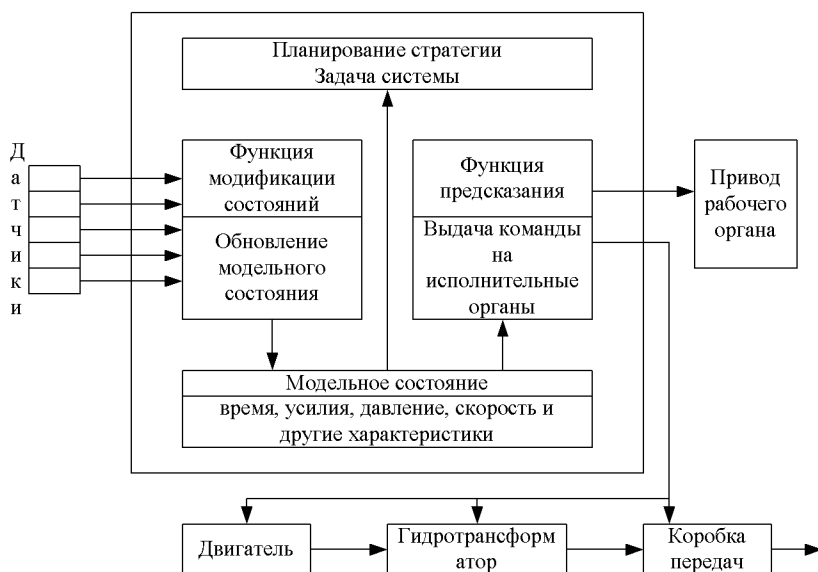


Рисунок 7.3 – Основные компоненты микропроцессорной программы управления машинами

Применение в строительных и дорожных машинах микропроцессорной техники обеспечивает повышение качества и безопасности выполняемых работ, а также увеличение производительности за счет оптимизации режимов работы машин по критериям минимального потребления топлива и наименьших нагрузок на основные узлы, а также за счет постоянного контроля работоспособности узлов и агрегатов машин путем их автоматического диагностирования.

Конечным звеном цепи автоматического регулирования являются *исполнительные устройства*, которые преобразуют управляющие сигналы в воздействия на объект управления. Как правило, воздействие является механическим и обеспечивает изменение величины перемещения, усилия и скорости возвратно-поступательного или вращательного движения. В общем случае исполнительное устройство состоит из блока усиления, исполнительного механизма, регулирующего и дополнительных органов.

Исполнительные механизмы классифицируют по ряду признаков. Так, по виду используемой энергии их разделяют на электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные; по конструктивному исполнению различают мембранные и поршневые механизмы.

Наиболее распространенными являются электрические исполнительные механизмы. Они, как правило, состоят из электродвигателя, редуктора, тормоза, соединительных муфт, контрольно-пусковой аппаратуры и специальных устройств для перемещения рабочих органов.

Автоматизация строительных и дорожных машин ведется по нескольким основным направлениям. Во-первых, это управление пространственным положением рабочих органов машин для получения необходимого профиля и уклона планируемой поверхности. Это направление обеспечивается унифицированным рядом систем автоматики типа "Профиль" с микроэлектронными блоками управления (автономными, копирными и комбинированными). Автономные системы обеспечивают контроль положения рабочих органов относительно вертикали с помощью бортовых датчиков (как правило, маятникового типа). В копирных системах датчик, установленный на одной стороне машины, по ходу контролирует положение рабочего органа в соответствии с заданным профилем – по тросу, лучу лазера, точно построенной полосе дороги или бордюру. В комбинированных

системах требуемый уклон рабочего органа в поперечной плоскости обеспечивается автономным датчиком, а его высотное положение – по копирному устройству.

Обычно рабочий орган землеройно-транспортной, профилировочной или укладочной машины при их движении по неровной поверхности перемещается по высоте относительно заданного положения $H_{\text{зад}}$ (рисунок 7.4). В этом случае щуповой датчик ДЩБ или фотоприемное устройство ФПУ лазерного излучения определяют отклонение одной из кромок рабочего органа относительно копирной поверхности. При этом выходной сигнал i_2 поступает в первый микрорезисторный блок управления БУ1 и сравнивается с сигналом i_1 задатчика толщины срезаемой стружки ЗД_т. Разность сигналов ($\Delta i_{1-2} = i_1 - i_2$) проходит через первый усилитель мощности УМ1 и поступает на электромагниты ЭМ1 и ЭМ2 первого электрогидравлического распределителя ЭГР1, который направляет требуемый поток рабочей жидкости в одну из полостей гидроцилиндра ГЦ1. Перемещение поршня со штоком изменяет высоту $H_{\text{п}}$ управляемой кромки рабочего органа до совпадения ее с требуемым положением $H_{\text{зад}}$.

При осуществленном изменении высоты первой кромки рабочего органа или наклоне машины в процессе ее движения по неровностям рабочим органом совершаются угловые перемещения в поперечной плоскости относительно вертикали. В этом случае в работу включается второй автономный канал управления системы. Автономным маятниковым датчиком ДКБ измеряется величина угла поперечного наклона рабочего органа, которая преобразуется в электросигнал i_3 и подается в блок управления БУ2. Здесь i_3 сравнивается с сигналом датчика ЗД_у угла наклона, управляемого машинистом-оператором. При возникшем рассогласовании разность этих сигналов подается в усилитель мощности УМ2, а из него на электромагниты ЭМ3 и ЭМ4 электрогидрораспределителя ЭГР2, направляющего поток рабочей жидкости в требуемую полость гидроцилиндра ГЦ2. Перемещение штока гидроцилиндра поднимает или опускает вторую кромку рабочего органа до углового положения γ , равного заданному углу $\gamma_{\text{зад}}$.

Во-вторых, автоматизация наиболее энергоемких технологических процессов. Для оптимизации и регулирования рабочих процессов разработаны унифицированные системы типа "Режим". При этом изменение тягово-скоростных характеристик машин позволяет управ-

лять нагрузкой при автоматическом заглублении и выглублении рабочего органа. Управляющим параметром может быть скорость машины, частота оборотов двигателя или гидротрансформатора, угловое положение тяговой рамы или толкающего бруса. Стабилизация каждого из этих параметров осуществляется при заданных ограничениях на другие. В строительных машинах эта система может использоваться как автономно, так и совместно с системами типа "Профиль".

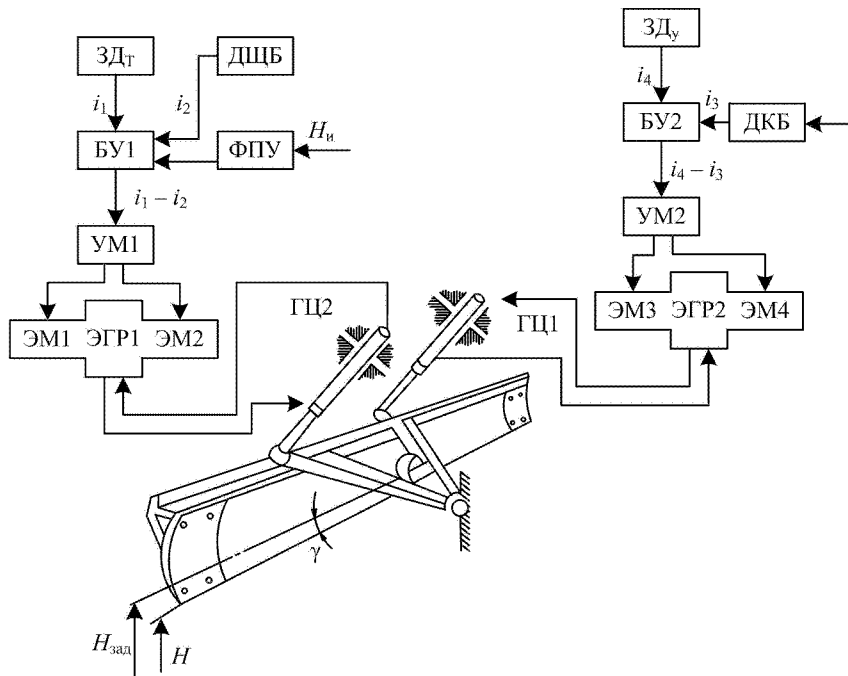


Рисунок 7.4 – Функциональная схема системы "Профиль-30"

Принцип работы такой системы представлен на рисунке 7.5. Для предотвращения остановки двигателя при перегрузке в процессе копания аппаратура обеспечивает стабилизацию частоты вращения вала двигателя $n_{дв}$ на заданном уровне n_3 . При этом сигнал датчика частоты вращения ДЧВ сравнивается с заданным значением частоты n_3 , после чего вырабатывается сигнал на подъем или опускание рабочего

органа. Одновременно с этим измеряются и сравниваются со своими граничными значениями такие параметры, как угловое положение, скорость и буксование. При достижении граничных значений управление отключается и вырабатывается команда на выглубление рабочего органа.

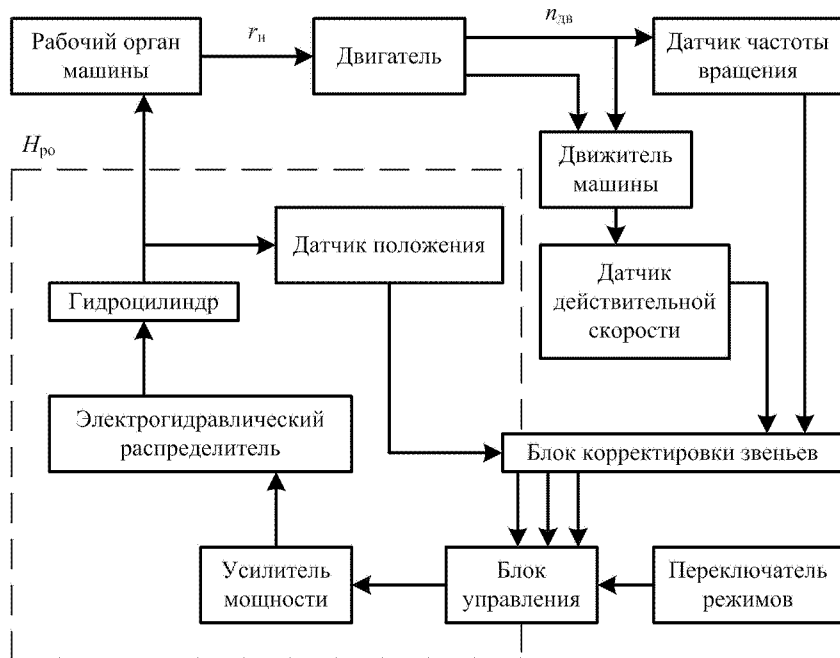


Рисунок 7.5 – Функциональная схема аппаратуры "Режим"

В процессе транспортирования грунта обеспечивается поддержание действительной скорости машины на заданном уровне.

При планировочных работах система "Режим" работает совместно с системой "Профиль". В этом случае разность частот вращения вала ($n_{дв} - n_з$) усиливается по мощности и подается на блок управления "Профиль" вместе с выходным сигналом задатчика толщины срезаемой стружки. Это обеспечивает непрерывную регулировку толщины стружки и нагрузки, действующей на отвал, а также частоты вращения вала двигателя.

И, наконец, в-третьих, это создание на базе лазерной и микропроцессорной техники комплексной системы дистанционного программного или автоматического управления машинами, а также приборов оперативного контроля качества укладываемых дорожно-строительных материалов. Системы управления с помощью лазерной техники обеспечивают и контролируют требуемые высотные отметки, продольный и поперечный профиль разрабатываемых и укладываемых дорожно-строительных материалов для каждой машины. Для машин, занятых строительством дорог, разработан комплект аппаратуры "Дорога" (рисунок 7.6).

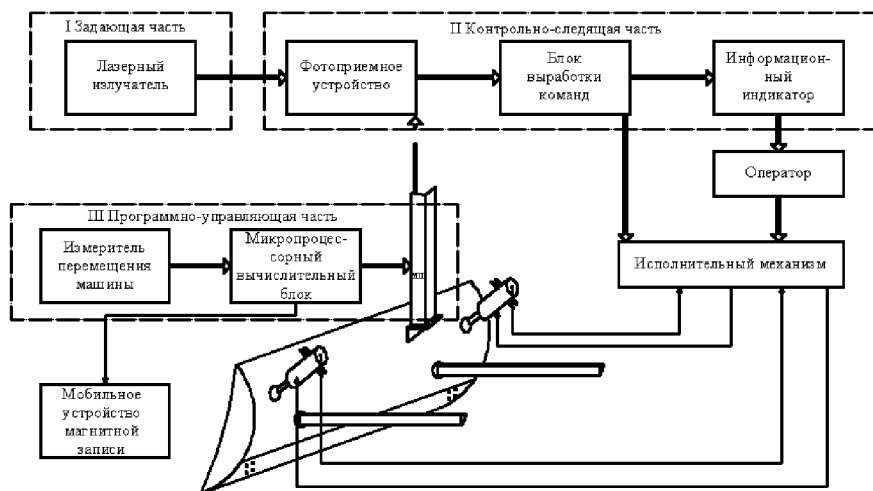


Рисунок 7.6 – Функциональная схема аппаратуры "Дорога"

Система управления состоит из задающей *I*, контрольно-следающей *II* и программно-управляющей *III* частей. Задающая часть с помощью лазерного излучателя устанавливает параллельно проектной поверхности дороги световую опорную плоскость. При этом оптический пучок в приборе подается на пентопризму, которая разворачивает излучение на 90° и осуществляет его вращение вокруг вертикальной оси излучателя.

Контрольно-следающая часть включает в себя фотоприемное устройство (ФПУ), установленное на штанге механизма перемещения (МП), которая закреплена на рабочем органе машины (например, на

отвале). ФПУ служит для преобразования лазерного сигнала в электрический, поступающий в блок выработки команд управления (БВК), где формируются управляющие сигналы для исполнительных механизмов с одновременным отображением на информационном табло-индикаторе положения режущей кромки отвала относительно проектной поверхности.

Программно-управляющая часть состоит из измерителя перемещения машины, микропроцессорного вычислительного блока выработки команд управления высотным положением ФПУ, механизма перемещения ФПУ и устройства для записи данных. При работе в ручном режиме оператор по показаниям индикатора сам устанавливает требуемое положение рабочего органа. В автоматическом режиме управляющие сигналы с БВК подаются на исполнительный механизм, т. е. на систему типа "Профиль". ФПУ автоматически удерживается в плоскости лазерного излучения, а величина его перемещения несет информацию о неровностях возводимой дороги. Необходимый уклон возводимой поверхности на постоянных продольных участках поверхности может задаваться отклонением оси излучателя от вертикали.

При работе на переходных вертикальных кривых требуется более сложное управление машиной, которое обеспечивается программным устройством. В этом случае микропроцессор рассчитывает необходимое высотное положение рабочего органа и формирует сигнал для механизма перемещения. При изменении положения ФПУ по высоте в БВК вырабатывается сигнал управления, по которому рабочий орган поднимается или опускается на высоту перемещения ФПУ. Такая система обладает большими возможностями, т. к. световая опорная поверхность позволяет не только управлять работой машины или комплекта машин, но и осуществлять постоянный геодезический контроль высотных отметок в любой точке и на любом этапе строительства дороги.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) – это организационно-технические системы, предназначенные для выполнения проектных работ и разработки конструкторской и технологической документации с применением вычислительной техники.

Англоязычным аналогом САПР является *CAD Systems (Computer Aided Design)* переводится как черчение с помощью компьютера). Кроме того, используют системы *CADD* (дизайн и черчение с помощью компьютера), *CAID* (промышленный дизайн с применением компьютера) и др.

Машиностроительные САПР (*MCAD*) применяют для проектирования деталей и трехмерных моделей. Благодаря САПР удалось значительно снизить затраты производства и сократить цикл разработки технических объектов, поскольку проектно-конструкторские решения отражаются на экране компьютера, могут быть мгновенно выведены на печать и сохранены для последующего редактирования.

Как уже отмечалось, проектирование технического объекта это создание, преобразование и представление в принятой форме образа этого еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей формируется в воображении конструктора в результате творческого процесса или в процессе взаимодействия человека и компьютера (ПК), т. е. процесс проектирование заключается в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса исследовательских, расчетных и проектно-конструкторских работ.

Различают следующие **виды проектирования**:

- ручное (без применения ПК);
- автоматизированное;
- автоматическое.

Проектирование, при котором проектные решения получают путем взаимодействия человека и ПК, называют *автоматизированным* проектированием, в отличие от *ручного* (без использования ПК) или

автоматического (без участия человека на промежуточных этапах). Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой САПР. Автоматическое проектирование возможно в частных случаях для сравнительно несложных объектов.

8.1 Классификация САПР

САПР целесообразно классифицировать по следующим основным признакам.

По области решаемых задач различают САПР:

– *на базе подсистемы машинной графики и геометрического моделирования*. Эти САПР ориентированы на приложения, где основной процедурой проектирования является конструирование, т. е. определение пространственных форм и взаимного расположения объектов. Поэтому к этой группе систем относится большинство САПР в области машиностроения, построенных на базе графических ядер. В настоящее время широко используются унифицированные графические ядра, применяемые в ряде САПР, например, ядра *Parasolid* фирмы *EDS Unigraphics* и *ACIS* фирмы *Intergraph*.

– *на основе систем управления базами данных (СУБД)*. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах перерабатывается большой объем данных. Такие САПР преимущественно встречаются в технико-экономических приложениях, например, при проектировании бизнес-планов, но имеют место также при проектировании объектов, подобных щитам управления в системах автоматики.

– *на базе конкретного прикладного пакета*. Фактически это автономно используемые программно-методические комплексы, например, имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по методу конечных элементов, синтеза и анализа систем автоматического управления и т. п. Примерами могут служить программы логического проектирования на базе языка *VHDL*, математические пакеты типа *MathCAD*.

– *комплексные (интегрированные) САПР*, состоящие из совокупности подсистем предыдущих видов. Характерными примерами комплексных САПР являются *CAD*-системы в машиностроении. Для

управления столь сложными системами применяют специализированные системные среды.

По сложности решаемых задач различают:

– *системы нижнего уровня (или легкие)* – для двумерной (2D) графики, т. е. для автоматизации преимущественно чертежных работ. Техническим обеспечением легких САПР являются ПК; примером таких систем являются двумерные чертежные системы, например, *AutoCAD, MicroStation*;

– *системы среднего уровня* – для разработки трехмерных твердотельных моделей; примером являются трехмерные моделлеры, такие как *Inventor, TopSolid, SolidWorks, SolidEdge, Alibre Design, VariCAD*;

– *системы верхнего уровня*, называемые также "тяжелыми" САПР (или *hi-end*), – для геометрического твердотельного и поверхностного моделирования. Оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей. К ним относятся высококлассные гибридные трехмерные программные продукты *CATIA, NX (Unigraphics), Pro/ENGINEER*.

Однако следует отметить, что классификация по уровню сложности является достаточно условной, поскольку во многих системах среднего уровня появились средства поверхностного моделирования, а возможности ПК стали приемлемыми для систем верхнего уровня.

Двумерные САПР позволяют проектировать различные узлы и агрегаты как обыкновенные чертежи на бумаге. Трехмерные системы позволяют создавать объемные модели, вращать их в пространстве, использовать перспективу, анимацию и т. п. В профессиональных трехмерных системах существует возможность автоматического создания чертежей из трехмерной модели, так что все проводимые изменения в трех измерениях будут сразу же отражаться на плоскости.

Трехмерное каркасное моделирование представляет собой развитие двумерной технологии черчения. Каждая линия вручную вносится в проект. Окончательная модель не обладает какими-либо свойствами и в нее нельзя вносить значительных изменений. В такой системе моделирования пользователь работает, как в двумерном приложении, тем не менее, каркасное моделирование включено и в более сложные трехмерные программные продукты.

Трехмерные “простые” твердотельные модели (в качестве примера приложений для их создания можно привести *AutoCAD* или *Cadkey 19*) создаются примерно так же, как и в реальной жизни. Если пользователь хочет изменить какой-либо объект, он должен добавить ему определенные свойства или удалить их, а может и начать весь процесс сначала. Не имеет значения, как будет создан тот или иной компонент, важен конечный результат. Способ получения компонента в большинстве случаев не влияет на его последующие преобразования. Легко можно получить чертеж каждой конкретной модели. Однако в приложении такого рода нелегко наделить компоненты динамическими характеристиками и проследить их взаимодействие.

Трехмерное параметрическое твердотельное моделирование (к программам, использующим такую технологию, относятся *Alibre Design*, *TopSolid*, *SolidWorks* и *Solid Edge*) требует, чтобы пользователь определял каждый параметр объекта проектирования. Последующее преобразование будет простым или сложным, в зависимости от методики создания исходного компонента. Параметрическое моделирование требует от конструктора четкого понимания того, что он хочет получить в результате работы. В отличие от простого твердотельного моделирования, параметрическое позволяет проектировать с учетом их динамических характеристик и дает возможность проверить корректность взаимодействия различных частей модели.

Составными структурными частями САПР являются подсистемы, которые различают по характеру выполняемых работ:

– *проектирующие подсистемы*, непосредственно выполняющие проектные процедуры. Примерами таких подсистем могут служить подсистемы конструкторского и технологического проектирования: к первой группе относятся подсистемы геометрического трехмерного моделирования механических объектов, изготовления конструкторской документации и компоновки машины; проектирования сборочных единиц и проектирования деталей; проектирования схем управления.

Преобразование исходного описания в окончательное порождает ряд промежуточных описаний, подводящих итоги решения некоторых задач и используемых для обсуждения и принятия решений для окончания или продолжения проектирования. Такие промежуточные описания разделяют на проектные процедуры и операции.

Под *проектной процедурой* понимают формализованную совокупность действий, выполнение которых оканчивается *проектным решением*, промежуточным или конечным. Например, проектными процедурами являются расчет каких-либо параметров и характеристик проектируемого объекта, поиск и оптимизация проектных решений, корректировка проектной задачи, анализ или синтез проектируемого объекта и т. п. Проектная процедура, алгоритм которой остается неизменным для различных объектов или различных стадий проектирования одного и того же объекта, называется *унифицированной проектной процедурой*. Для выполнения проектной процедуры в составе САПР формируются так называемые *проектные модули* с соответствующим программно-техническим обеспечением. Модули могут быть объединены в *подсистемы*, которые в свою очередь формируются по функциональному признаку или по назначению. Например, при проектировании землеройно-транспортных машин в автономно функционирующие подсистемы проектирования (ПСП) могут быть выделены: ПСП рабочего оборудования; ПСП ходовой части; ПСП трансмиссии; ПСП рамы; ПСП системы автоматики; ПСП гидравлической системы и т. п. Такие подсистемы обладают всеми свойствами и функциями САПР, но относятся не к объекту в целом, а к его составным частям.

Частью проектной процедуры является *проектная операция* – формализованная совокупность действий, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур. К проектным операциям относятся, например, ввод и вывод данных, вычерчивание графиков, составление таблиц с данными вычислений, нанесение данных на носители и т. п.

– *обслуживающие подсистемы*, которые обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют *системной средой (или оболочкой)* САПР. Типичными обслуживающими подсистемами являются подсистемы управления проектными данными, разработки и сопровождения программного обеспечения *CASE (Computer Aided Software Engineering)*, обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

В свою очередь проектирующие подсистемы в зависимости от отношения к объекту проектирования делят на **два вида**:

- объектно-ориентированные (объектные);
- объектно-независимые (инвариантные).

К *объектно-ориентированным* подсистемам относят подсистемы, выполняющие одну или несколько проектных процедур или операций, непосредственно зависящих от конкретного объекта проектирования, например, подсистемы проектирования технологических систем, моделирования динамики проектируемой конструкции и др.

К *инвариантным* относят подсистемы, выполняющие унифицированные проектные процедуры и операции, например, такие как расчеты деталей машин, режимов резания, технико-экономических показателей.

Рассмотрим, например, САПР коробки передач. Здесь инвариантными могут быть подсистемы проектирования валов, зубчатых передач, подшипниковых узлов, шпонок, а объектно-ориентированными – подсистемы построения кинематической и компоновочной схем коробки передач, узла переключения скоростей, корпуса коробки передач.

Объектно-ориентированной является САПР проектирования технологических процессов для изготовления конкретных изделий. К объектно-ориентированной системе может быть отнесена подсистема, предназначенная для моделирования или построения схемы нагружения заданного объекта или его части, но подсистема, предназначенная для определения динамических нагрузок этого объекта, использующая типовые расчетные методики, будет инвариантной составляющей САПР. Инвариантной также будет подсистема расчета технико-экономических показателей данного объекта.

При постановке оптимизационных задач объектно-ориентированными составляющими САПР являются подсистемы или модули, выполняющие процедуры выбора и формирования критерия оптимальности (эффективности) и установления зависимости критерия от переменных проектирования; к инвариантной составляющей относятся действия, связанные с отысканием экстремального значения критерия с помощью выбранных общематематических методов.

Хотя проектные модули, как и специализированные подсистемы САПР, функционируют автономно, полученные ими результаты в виде промежуточных проектных решений подлежат обязательному согласованию, как на горизонтальном, так и на вертикальном уровнях в соответствии с установленной иерархией. Такое согласование

необходимо также и по той причине, что информационные взаимосвязи между отдельными проектными модулями могут изменяться (исчезать или появляться) в ходе самого проектирования в результате вносимых конструкторами изменений. Последние могут касаться самой постановки проектной задачи, математической модели проектируемого объекта, критерия оптимальности, входных данных.

Функции согласования осуществляются *операционными системами* (управляющими модулями), которые обеспечивают в соответствии с заданным алгоритмом не только информационную согласованность, но и согласованность самих подсистем между собой. Управляющие подсистемы (модули) могут рассматриваться как инвариантные составляющие САПР.

Компоненты подсистем САПР, объединенные по функциональному признаку, образуют различные виды *обеспечения*:

- *техническое (ТО)*;
- *математическое (МО)*, объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования;
- *программное (ПО)*, представляемое компьютерными программами САПР;
- *информационное (ИО)*, состоящее из баз данных (БД), систем управления базами данных (СУБД), и других данных, используемых при проектировании (ЕСКД, ЕСТД, типовые проектные решения и т. д.);
- *лингвистическое (ЛО)*, выражаемое языками общения между проектировщиками и ПК, языками программирования и языками обмена данными между техническими средствами САПР;
- *методическое (МетО)*, включающее различные методики проектирования, иногда к МетО относят также математическое обеспечение;
- *организационное (ОО)*, представляемое штатными расписаниями, должностными инструкциями и другими документами, регламентирующими работу проектного предприятия.

Техническое обеспечение САПР включает в себя различные технические средства (*hardware*), используемые для выполнения автоматизированного проектирования, а именно вычислительные системы, ПК, периферийные устройства, сетевое оборудование, а также оборудование некоторых вспомогательных систем (например, измерительных), поддерживающих проектирование. Отметим, что *вычислитель-*

ной системой (в отличие от ПК и вычислительной сети) называют совокупность аппаратных и программных средств, совместно используемых при решении задач и размещаемых компактно на территории, размеры которой соизмеримы с размерами аппаратных средств.

Используемые в САПР технические средства должны обеспечивать:

- выполнение всех необходимых проектных процедур, для которых имеется соответствующее ПО;
- взаимодействие между проектировщиками и ЭВМ, поддержку интерактивного режима работы;
- взаимодействие между членами коллектива, выполняющими работу над общим проектом.

Первое из этих требований выполняется при наличии в САПР вычислительных машин и систем с достаточными производительностью и емкостью памяти.

Второе требование относится к пользовательскому интерфейсу и выполняется за счет включения в САПР удобных средств ввода-вывода данных и прежде всего устройств обмена графической информацией.

Третье требование обуславливает объединение аппаратных средств САПР в вычислительную сеть.

В результате общая структура ТО САПР представляет собой сеть узлов, связанных между собой средой передачи данных. Узлами (станциями данных) являются рабочие места проектировщиков, часто называемые автоматизированными рабочими местами (АРМ) или рабочими станциями (*WS – Workstation*), ими могут быть также большие ЭВМ (мейнфреймы), отдельные периферийные и измерительные устройства. Именно в АРМ должны быть средства для интерфейса проектировщика с ЭВМ. Что касается вычислительной мощности, то она может быть распределена между различными узлами вычислительной сети.

Среда передачи данных представлена каналами передачи данных, состоящими из линий связи и коммутационного оборудования.

Вся совокупность используемых при проектировании данных называется *информационным фондом САПР*.

Возможности современных САПР можно реализовать в следующих направлениях:

– *каркасное моделирование* (графическое отображение электронного представления трехмерного объекта). Оно создается путем указания каждого угла, где встречаются две плоскости объекта, или путем соединения вершин объекта прямыми либо кривыми линиями. Объект проецируется на экран компьютера путем отображения линий каждого ребра исходной трехмерной модели. Возможно создание традиционных двумерных изображений с помощью вращения объекта и удаления линий каркаса, скрытых на заднем плане;

– *трехмерное параметрическое моделирование* и твердотельное (объемное) моделирование основано на трехмерном представлении объекта в приемлемом для компьютерной обработки виде. Программное обеспечение для работы с твердотельным моделированием создает трехмерную модель, пригодную для анализа и проектирования. Пользовательский интерфейс программного продукта позволяет использовать при проектировании программируемые команды, динамическое изменение объекта в реальном времени, затенение и другие функции, помогающие представить наиболее близкий к реальности образ;

– *моделирование поверхностей произвольной формы* (создание деталей, обладающих динамическими характеристиками);

– *изготовление конструкторской и технологической документации.*

Последнее направление, связанное с разработкой документации, в свою очередь можно разделить на следующие группы в зависимости от типа проектно-конструкторских задач:

– *геометрическое моделирование* включает решение *позиционных* и *метрических задач* на основе преобразования геометрических моделей. Элементарными геометрическими объектами являются точка, прямая, окружность, плоскость, кривая второго порядка, цилиндр, шар, пространственная кривая и т. д.

К *позиционным задачам* относят определение инцидентности точки плоской области, ограниченной замкнутыми контурами; определение координат точки пересечения прямой с криволинейным контуром или поверхностью; установление пересечения контуров и вычисление координат их точек пересечения; определение взаимного расположения плоских или пространственных областей. На основе типовых позиционных задач решаются следующие конструкторские задачи: определение факта касания или столкновения движущихся деталей, про-

верка гарантированных зазоров между деталями, оценка погрешности обработки контуров и поверхностей деталей на станках.

К *метрическим задачам* относят, например, вычисление геометрических характеристик (длины, площади, периметра), центра масс, моментов инерции:

– *геометрический синтез* включает решение задач двух групп. *Первая группа* задач – задачи формирования (компоновки) сложных геометрических объектов (ГО) из элементарных ГО заданной структуры, возникающих, например, при оформлении деталировочного чертежа. Основным критерием геометрического синтеза сложных ГО является точность их воспроизведения. *Вторая группа* обеспечивает получение рациональной или оптимальной формы (облика) деталей, узлов или агрегатов, влияющей на качество функционирования объектов конструирования. Задачи формирования облика возникают на ранних стадиях проектирования при определении конфигурации корпуса транспортного средства (машины, тепловоза, самолета) или конфигурации сопла реактивного двигателя и т. д. Большое число задач связано с синтезом формы корпусов узлов с учетом максимальной теплоотдачи;

– *оформление конструкторской документации* включает изготовление текстовых и графических документов. Текстовые документы кроме описательной части содержат характеристики и паспортные данные узлов и агрегатов; технические условия на изготовление, сборку, наладку и эксплуатацию; спецификации и т. д. К графическим документам относятся чертежи сборочные и деталировочные, графики структурных сеток кинематических цепей, циклограммы и зависимости для выбора параметров режимов работы агрегатов и устройств, схемы структурные, функциональные и принципиальные (электрические, электронные, гидравлические и т. д.);

– *компоновка* конструктивных элементов высшего иерархического уровня из элементов низшего уровня в большинстве случаев является наиболее трудоемкой частью конструкторского проектирования (часто под компоновкой понимают собственно процесс конструирования). Задача компоновки машиностроительных узлов обычно состоит из двух частей: *эскизной* и *рабочей*. При решении эскизной части задачи компоновки по функциональной схеме разрабатывают общую конструкцию узла. На основе эскизной компоновки состав-

ляют рабочую компоновку с более детальной проработкой конструкции узла. Например, процесс компоновки редуктора выполняется по его кинематической схеме с предварительным расчетом передаточных чисел ступеней. Компоновка заключается в установке валов и зубчатых колес, обеспечивающих заданные передаточные числа, установке подшипников, уплотнений и других конструктивных элементов. Критериями компоновки зубчатого редуктора могут быть масса редуктора и его габаритные размеры, удобство ремонта и обслуживания;

– *покрытие* заключается в преобразовании функциональной схемы соединений логических элементов узла в схему соединений типовых конструктивных элементов (модулей). Критериями качества при решении задачи покрытия могут быть суммарная стоимость и общее число модулей, число типов используемых модулей, число связей между модулями, общее число неиспользованных логических элементов в модулях и др.;

– *разбиение* включает разделение на конструктивно обособленные части (узлы) схемы соединений конструктивных элементов на заданном иерархическом уровне. Основными критериями при решении задачи разбиения являются: длина внешних связей, характеризующая либо числом межузловых соединений, либо числом внешних выводов всех узлов; число образующихся узлов; число различных типов узлов. При решении задачи разбиения необходимо учитывать количество элементов в узлах, число внешних выводов узлов, суммарную площадь, занимаемую элементами и соединениями, электромагнитную совместимость отдельных элементов в узле, обеспечение нормального температурного режима и т. д.;

– *размещение электронных устройств* состоит в определении оптимального пространственного расположения элементов на коммутационном поле. Критерии и ограничения при решении задачи размещения можно разделить на *метрические* и *топологические*: к *метрическим* относятся размеры элементов и расстояния между ними, размеры коммутационного поля, расстояния между выводами элементов, допустимые длины соединений; к *топологическим* – число пространственных пересечений соединений, число межслойных переходов, близость расположения друг к другу тепловыделяющих элементов или электромагнитно несовместимых элементов и соеди-

нений. Если связи между элементами осуществляются проводным монтажом, то основным критерием оптимальности решения задачи размещения будет суммарная взвешенная длина соединений.

– *трассировка электронных устройств* заключается в определении геометрии соединений конструктивных элементов. Выделяют трассировку проводных, печатных и пленочных соединений. Критериями оптимальности решения задачи трассировки могут быть: минимальная суммарная длина соединений; минимальное число слоев монтажа; минимальное число переходов из слоя в слой; минимальные наводки в цепях связи элементов и т. д. При этом необходимо учитывать технологические и конструктивные ограничения и условия, например, для проводного монтажа – максимальное число соединений на один контакт, тип монтажа, максимальную длину проводов и т. д.; для печатного монтажа – ширина проводников и расстояние между ними, число проводников, подводимых к одному контакту, максимальное число слоев, наличие одного слоя для шин питания и т. п. Примерами конструктивных ограничений служат размеры коммутационного поля, наличие проводников, трассы которых заданы, максимальная длина проводников и др. Качество решения задачи трассировки в большой степени определяется результатами, полученными при размещении конструктивных элементов.

Большинство задач конструирования – это *задачи структурного синтеза*, их решение основано на использовании структурных математических моделей (ММ). Однако для анализа качества конструкций применение только структурных моделей недостаточно, поскольку они не отражают процессы функционирования изделий. Поэтому для полной оценки результатов конструирования применяют модели и методы, характерные для функционального проектирования. В этом проявляется тесная взаимосвязь подсистем функционального и конструкторского проектирования в САПР.

8.2 Методологические принципы проектирования с использованием САПР

Выполнение проектных работ распределяется как по *времени*, так и по *подразделениям* проектной организации.

Как уже отмечалось ранее, при распределении по времени работы, связанные с проектированием объекта, разбиваются на этапы и стадии. При создании новых объектов можно выделить этапы:

1) *научно-исследовательских работ*. Этот этап, в свою очередь, разбивается на стадии предпроектных исследований, разработки технического задания для его последующего обоснования (техническое предложение);

2) *опытно-конструкторских работ*. Этап состоит из стадий уточнения технического предложения, эскизного и технического проектирования;

3) *разработки рабочей конструкторской документации*. Данный этап включает стадии изготовления опытного образца, его испытания и выпуска установочной партии.

Для каждого из этих этапов определяются работы, выполняемые техническими средствами проектирования, только проектировщиком (исследователем), и работы, осуществляемые проектировщиком совместно с техническими средствами САПР. За проектировщиком обычно закрепляются работы, связанные с выбором, оценкой и принятием проектных решений, за ПК – выполнение действий по заданным алгоритмам, прежде всего предоставление необходимой информации и ее обработка.

Распределение работ по подразделениям производится на основе *блочного-иерархического подхода*, подразумевающего разделение процесса проектирования на *горизонтальные* и *вертикальные* уровни.

В общем случае при проектировании технических объектов можно выделить несколько вертикальных уровней: *функциональный, конструкторский и технологический*.

Функциональный уровень проектирования включает в себя анализ технического задания и выбор по результатам анализа методики проектирования объекта. К основным задачам функционального уровня относятся разработка структурных схем, определение требований к выходным параметрам объекта, а также анализ и формирование технического задания на разработку отдельных частей объекта.

Конструкторский уровень проектирования заключается в реализации принципиальных схем, выборе форм, типоразмеров, компоно-

вочного решения и материалов, расчет основных параметров конструкции, выпуск конструкторско-технологической документации.

Технологический уровень проектирования предназначен для решения задач технологической подготовки производства – разработки маршрутов, операций и переходов технологических процессов изготовления деталей, сборки и монтажа узлов, включая выбор оснастки, инструмента, технологического оборудования и т. п.

При выделении *горизонтальных уровней* проектирования объект разделяется на отдельные блоки (модули), а последние – на узлы и детали.

Методология *блочно-иерархического проектирования* базируется на трех концепциях: *разбиении* и *локальной оптимизации*, согласно которым проектируемые части и элементы объекта оптимизируются с последующей оптимизацией объекта в целом; *абстрагировании*, согласно которому в математических моделях проектируемых объектов отражаются только наиболее значимые факторы и свойства объекта, и, наконец, *повторяемости*, заключающейся в использовании опыта проектирования аналогичных объектов и их составных частей.

При использовании *блочно-иерархического подхода к проектированию* представления о проектируемой системе расчленяют на иерархические уровни. На верхнем уровне используют наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень подробности описания возрастает, при этом рассматривают уже отдельные блоки системы, но с учетом воздействий на каждый из них его соседей. Такой подход позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности, поддающиеся решению с помощью имеющихся средств проектирования. Разбиение на уровни должно быть таким, чтобы документация на блок любого уровня была обозрима и воспринимается одним человеком.

Блочно-иерархический подход можно также назвать *декомпозиционным* или *диакоптическим*, который основан на разбиении сложной задачи большой размерности на последовательно и параллельно решаемые группы задач малой размерности, что существенно сокращает требования к используемым вычислительным ресурсам или время решения задач.

Можно говорить не только об иерархических уровнях спецификаций, но и об иерархических уровнях проектирования, понимая под каждым из них совокупность спецификаций некоторого иерархического уровня совместно с постановками задач, методами получения описаний и решения возникающих проектных задач.

Список иерархических уровней в каждом приложении может быть специфичным, но для большинства приложений характерно следующее наиболее крупное выделение уровней:

– *системный уровень*, на котором решают наиболее общие задачи проектирования систем, машин и процессов; результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования, диаграмм потоков данных и т. п.;

– *макроуровень*, на котором проектируют отдельные устройства, узлы машин и приборов; результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. п.;

– *микроуровень*, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В зависимости от последовательности решения задач иерархических уровней различают *нисходящее*, *восходящее* и *смешанное* проектирование (стили проектирования). Последовательность решения задач от нижних уровней к верхним характеризует восходящее проектирование, обратная последовательность приводит к нисходящему проектированию; в смешанном стиле имеются элементы как восходящего, так и нисходящего проектирования. В большинстве случаев для сложных систем предпочитают нисходящее проектирование. Отметим, однако, что при наличии заранее спроектированных составных блоков (устройств) целесообразно отдать предпочтение смешанному проектированию.

Неопределенность и нечеткость исходных данных при нисходящем проектировании (поскольку еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при восходящем проектировании (поскольку ТЗ имеется на всю систему, а не на ее части) обуславливают необходимость прогнозирования недостающих данных с последующим их уточнением, т. е. последовательного приближения к окончательному решению (*итерационность* проектирования).

8.3 Математическое моделирование

Как уже отмечалось ранее, большинство задач конструирования – это задачи *структурного анализа, синтеза и оптимизации*. *Проектные процедуры анализа* сводятся к исследованию поведения (функционирования) объекта при известных его параметрах и структуре. Проектные процедуры *синтеза* сводятся к построению структуры объекта и определению его параметров, которые должны обеспечить заданное функционирование объекта. Если задачи синтеза связаны с созданием проектных документов, то задачи анализа связаны с оценкой проектных решений.

Процедуры анализа могут быть одновариантными и многовариантными (рисунок 8.1).

Для *одновариантного анализа* характерны исследования состояний системы (статическое, динамическое), анализ поведения динамической системы во временной и частотной областях. При проведении *многовариантного анализа* (помимо решения тех же задач) при варьировании параметров математической модели, описывающей исследуемую систему, проводится анализ чувствительности модели, а также статистический анализ, если система описывается в терминах теории вероятности.

Проектные процедуры *синтеза* делятся на процедуры *структурного* и *параметрического синтеза*. В первом случае определяется структура проектируемого объекта, его составные части и элементы, способ их соединения между собой, а во втором – параметры объекта и составных частей при известной структуре объекта.

Синтез называется *оптимальным*, если по заданным критериям оптимизации определяются такие структуры и параметры, которые наилучшим образом удовлетворяют этим критериям. При этом задача выбора оптимальной структуры называется *структурной оптимизацией*, а расчет оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта – *параметрической оптимизацией*.

При проектировании в САПР особенно важно применение таких методов анализа и синтеза систем, которые бы обеспечивали достаточно высокую точность и надежность получаемых результатов, а также высокую экономичность.

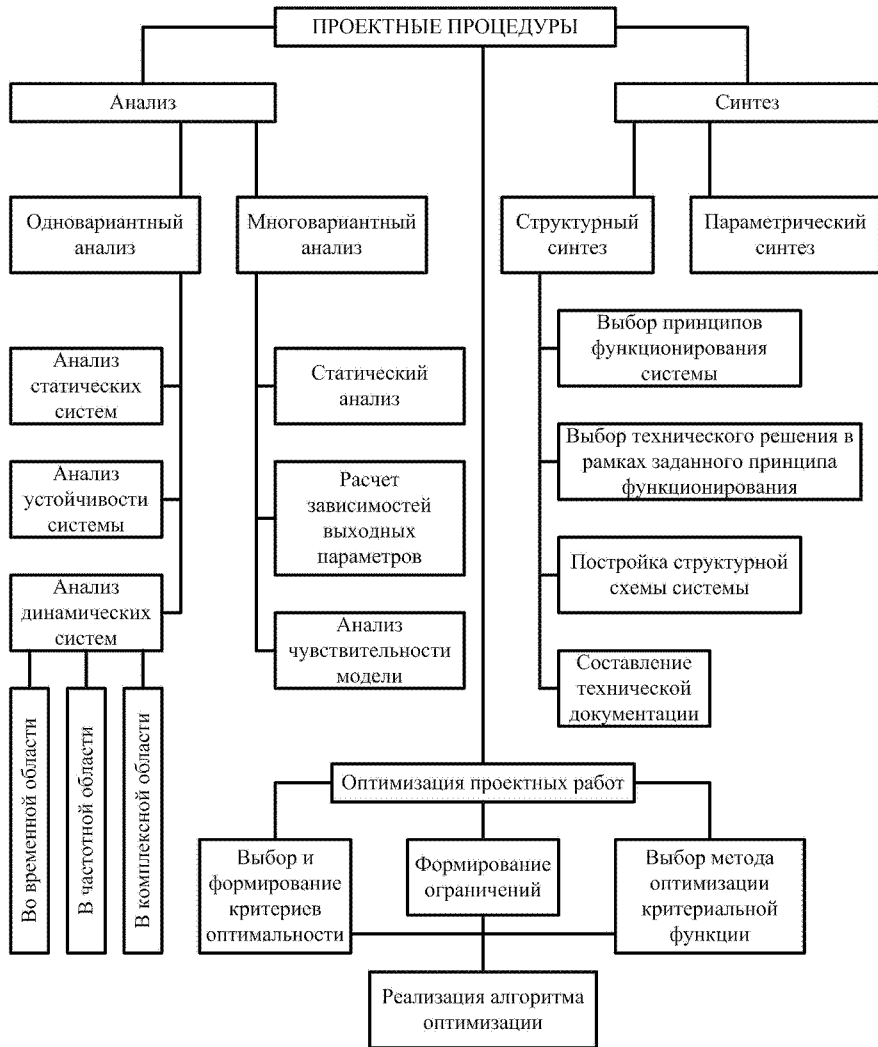


Рисунок 8.1 – Проектные процедуры САПР

Решение задач анализа, синтеза и оптимизации основано на использовании структурных математических моделей.

Различают *многоуровневые математические модели* и *сетевую структуру математических моделей*.

Многоуровневые математические модели. Подобный характер математических моделей подразумевает такую схему процесса проектирования объекта, при которой от одного уровня проектирования к другому происходит последовательная детализация проекта. На первом уровне учитываются лишь основные факторы, влияние которых на изучаемые свойства и параметры проектируемого объекта наиболее значимо. На втором и последующих уровнях с учетом результатов, полученных на предыдущих уровнях проектирования, происходит более полное математическое описание и детализация объекта. При этом на каждом уровне проектирования (или на каждом этапе решения проектной задачи) переменные математической модели ранжируются по степени важности их влияния на характеристики объекта.

Таким образом, многоуровневая математическая модель, заменяющая исходную модель проектируемого объекта, позволяет разбить общую задачу проектирования на ряд подзадач меньшей размерности, в основе которых лежат более простые математические модели, связанные между собой соответствующими входами и выходами (выходные величины предыдущей модели воздействуют на входы последующей модели).

Примером описанного подхода к проектированию объектов являются, в частности, прочностные расчеты сложных конструкций. Так, при расчете конструкций кабин землеройно-транспортных машин на первом этапе расчета обычно используют традиционные формулы сопротивления материалов, дающие приближенные оценки напряжений. На последующем этапе прочностного расчета переходят к более точным оценкам, учитывающим большее число переменных проектирования и нелинейные факторы, используя для этого методы конечных разностей или конечных элементов.

На начальных стадиях детализации проектируемого объекта могут быть использованы уравнения, полученные на основе статистических данных, например, уравнения *линейной прогрессии* одного переменного, устанавливающие связь между массой машины и мощностью ее двигателя или ее номинальным тяговым усилием, между массой машины и ее грузоподъемностью, между грузоподъемностью машины и базой или колесей ее ходовой части и т. д. На базе таких данных рассматривается предварительная компоновочная схема объ-

екта. На следующей стадии детализации также могут быть использованы корреляционные зависимости, но уже нелинейные уравнения регрессии двух и более переменных, устанавливающие совокупное влияние аргументов модели на искомую зависимую переменную.

По мере разработки конструкции на последующих уровнях детализации представляется возможность на основании построенной силовой схемы проектируемого объекта перейти к прочностному расчету конструкции. Результаты прочностного расчета позволяют уточнить и соответственно скорректировать массу и другие параметры объекта. При этом, наряду с традиционными методами прочностного расчета, могут быть использованы диакоптические методы, основанные на фрагментации сложного объекта, организации отдельных вычислений по фрагментам с периодическим согласованием результатов, получаемых в отдельных фрагментах.

Сетевая структура математических моделей. При использовании сетевой структуры математической модели исходная модель проектируемого объекта преобразуется (агрегируется) в подмодели и элементарные модели, описывающие составные части и элементы объекта, которые по сравнению с исходной моделью дают его приближенное описание. Такие математические модели представляются в виде *графов*, в которых вершины соответствуют операторам элементарных моделей, а дуги (ребра), соединяющие вершины, определяют информационные связи между ними, причем входящие дуги каждой вершины определяют векторы входов, а исходящие – векторы выходов.

Такое представление структуры модели часто применяется при решении задач планирования вычислений на пакете прикладных программ модульной структуры, когда требуется гибкое построение различных расчетных схем при формировании программных модулей. При этом имеются различные пути представить исходную модель проектируемого объекта, состоящую из множества подмоделей, которые можно сформировать из элементарных моделей, порождающих этот граф.

В результате оценки проектных решений, применяемых на промежуточных этапах проектирования, пользователь может внести изменения в исходные данные и ограничения задачи, изменить физический принцип действия проектируемого объекта и методы решения

самой задачи, что повлечет соответствующую корректировку исходной математической модели объекта. Возможность вносить необходимые изменения в исходную модель будет во многом зависеть от ее гибкости, т. е. способности составлять на ее основе различные комбинации *агрегированных* моделей.

Гибкость исходной модели зависит от двух факторов: числа агрегированных подмоделей, сформированных на ее основе, и способа формирования агрегированных моделей из их элементарных составляющих. Чем выше степень разбиения исходной модели на элементарные подмодели, представляющие собой неделимые составные части (программные модули) пакета прикладных программ, тем больше гибкость исходной модели.

Разделение исходной модели на элементарные подмодели производится при ее программной реализации.

Таким образом, при проектировании сложных технических объектов, для которых набор переменных проектирования, описывающих принятую концепцию проекта, весьма велик, и, следовательно, проектная задача имеет большую размерность, процесс проектирования в САПР сводится к автономному решению частных проектно-конструкторских задач (проектированию подсистем и их составляющих) с последующим согласованием полученных результатов. В процессе согласования результатов осуществляется поиск и выбор компромиссного решения для объекта в целом, наилучшим образом удовлетворяющего требованиям технического задания.

Иерархия математических моделей. Иерархия математических моделей в САПР определяется уровнем абстрагирования при описании объекта проектирования. Чем выше уровень абстрагирования и соответственно иерархический уровень математической модели, тем меньше степень детализации описываемого ею объекта.

На самом *нижнем уровне* иерархии применяют *микромодели*, описывающие внутренние процессы, происходящие в объекте и, в частности, межэлементные связи в отдельных блоках (подсистемах) объекта. На *более высоком* иерархическом уровне – *макромодели*, которые, абстрагируясь от описания межэлементных связей, описывают только процесс взаимодействия между блоками данного объекта (или между подсистемами данной системы). Наконец, на *верхнем* иерархическом уровне расположены *метамодели*, с помощью кото-

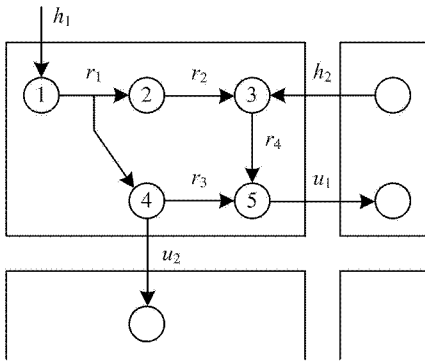


Рисунок 8.2 – Разбиение объекта проектирования на блоки и элементы

используется микромодель, составленная из уравнений, связывающих входные и выходные переменные:

$$\left. \begin{aligned} f_1(r_1, h_1) \\ f_2(r_1, r_2) \\ f_3(r_2, h_2, r_4) \\ f_4(r_1, r_3, u_2) \\ f_5(r_3, r_4, u_1) \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

В векторной форме эта модель может быть записана так:

$$\left. \begin{aligned} F(R, H) = 0 \\ U = \Phi(R, H) \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

Здесь R , H и U – соответственно векторы внутренних, входных и выходных фазовых переменных.

При переходе к более высокому иерархическому уровню математического описания объекта, т. е. от микромодели к макромоделю, из модели (8.2) следует исключить вектор внутренних переменных, так как макромодель описывает только процесс взаимодействия между блоками объекта без учета внутренних связей между элементами,

рых описывается взаимодействие данного объекта с другими объектами (системами) или с окружающей средой без учета связей между отдельными блоками (подсистемами) объекта.

Для иллюстрации рассмотрим некоторый объект, в котором выделено четыре блока и составляющие их элементы (рисунок 8.2). Для математического описания процессов, происходящих внутри первого блока, состоящего из элементов 1–5,

входящими в каждый блок. Полученная таким образом макро модель будет представлять систему уравнений вида

$$\varphi(U, H) = 0, \quad (8.3)$$

которая, очевидно, будет иметь существенно меньшую размерность, чем модель (8.2).

Таким образом, рассматриваемый объект, представляемый как сложная система, может быть описан на двух уровнях иерархии – нижнем с помощью модели (8.2) и верхнем с помощью модели (8.3).

Более сложные системы могут иметь большее число уравнений абстракции. В этом случае в проектируемой системе выделяют подсистемы нескольких уровней, расположенных по отношению друг к другу в нисходящем порядке: на верхних этажах – подсистемы с меньшим уровнем абстракции, а на самом нижнем уровне располагаются элементы соседней с ними подсистемы.

Имитационное моделирование. Обязательным этапом проектирования новой техники является *испытание проектируемого объекта (системы)*, которое может проводиться в реальных условиях эксплуатации либо на специальных стендах в лабораторных условиях или на полигонах. Последние обычно оборудуют специальными устройствами – имитаторами, которые сообщают испытываемому объекту необходимые скорости, ускорения, нагружают его динамическими усилиями и сопротивлениями, создают определенный температурный режим, обеспечивая тем самым такие условия проведения испытаний, которые отражают действительные условия эксплуатации объекта.

Имитационное моделирование заключается в том, что проектируемая система заменяется ее математической моделью, выполняющей в данном случае роль имитатора исследуемой системы. С помощью ПК имитатором производятся действия, позволяющие получить необходимую информацию о поведении системы при различных входных данных и параметрах. С этой целью на основе математической модели составляется *моделирующий алгоритм*, реализуемый ПК. При имитационном моделировании нет необходимости преобразовывать аналитические выражения в специальную систему уравнений относительно искомых величин. Достаточно сохранить логическую последовательность и чередование во времени выполнения тех или

иных вычислительных операций над соотношениями моделирующего алгоритма. Такие отношения в зависимости от природы исследуемой системы или отдельных ее частей и элементов могут быть дискретными или непрерывными, детерминированными или стохастическими.

При проектировании сложных объектов они расчленяются на блоки (модули), каждый из которых имеет свое математическое описание. В этом случае и сама имитационная модель имеет модульную структуру, и каждый ее модуль по определенной схеме, установленной моделирующим алгоритмом, сопрягается с другими модулями модели.

Моделирующий алгоритм имеет два основных класса операторов: *вычислительные* и *логические*. *Вычислительные операторы* производят действия, связанные с вычислениями соответствующих соотношений и величин, входящих в алгоритм. По окончании вычислительной операции независимо от результатов расчета производится переход к определенному – единственному пути, соответствующему схеме моделирующего алгоритма. *Логические операторы* предназначены для проверки справедливости заданных условий. В зависимости от того, выполнено ли заданное условие или нет, логические операторы передают управление одному из двух операторов алгоритма. Поэтому направление дальнейшего продолжения вычислительных операций будет зависеть от результатов предыдущего расчета и их оценки ("да" или "нет") логическим оператором.

Если исследуемая система находится под действием тех или иных случайных факторов, возникает необходимость в ходе вычислительного эксперимента формировать реализации случайных событий, случайных величин или случайных процессов. Эту задачу решают операторы формирования реализации случайных процессов. В этом случае в основу имитационного моделирования положены методы статистического моделирования, называемые также *методами Монте-Карло*.

Программы имитационного моделирования, применяемые в САПР, обычно носят универсальный характер в том смысле, что каждая такая программа может быть использована для имитационного моделирования различных проектируемых объектов данного класса, например, дорожных машин, подъемно-транспортных машин и т. п.

Такие универсальные программы не должны отражать структурные или функциональные особенности данного конкретного объекта, поскольку в них варьируются только исходные данные.

Существенное значение при имитационном моделировании имеет выбор *языка программирования*, который должен быть удобен для описания имитационных моделей. При этом нужно учитывать характер или класс поставленной задачи (научно-техническая, экономическая и др.), тип математической модели, условия проводимого вычислительного эксперимента. Для имитационного моделирования обычно применяют универсальные языки программирования, пригодные для алгоритмов решения широкого класса задач и не учитывающие особенностей ПК. Для учета этих особенностей вводится транслятор – программа, переводящая алгоритмы с одного языка на другой. На рисунке 8.3 приведена схема организации процесса имитационного моделирования.

Наиболее масштабное развитие САПР получили в CALS-технологиях, о которых уже упоминалось.

CALS-технологии представляют собой технологии комплексной компьютеризации различных сфер производства промышленной продукции на основе принципов унификации и стандартизации на всех этапах ее жизненного цикла. Основные виды продукции представлены в виде проектной, технологической, производственной, маркетинговой и эксплуатационной документации (рисунок 8.4).

В CALS предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте с возможностью их правильной интерпретации.

Применение CALS-технологий обеспечивает единообразное описание и интерпретацию данных, независимо от места и времени их получения. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и использующих различные CAD-системы. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства.

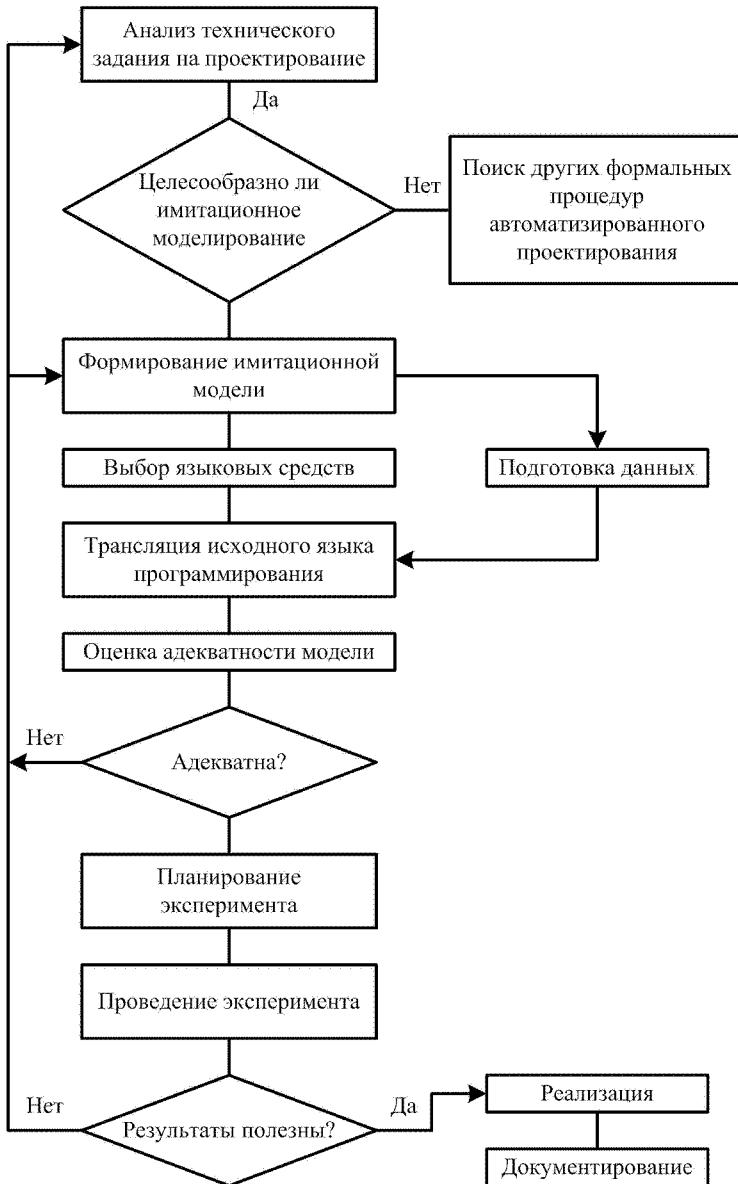


Рисунок 8.3 – Организация процесса имитационного моделирования в САПР

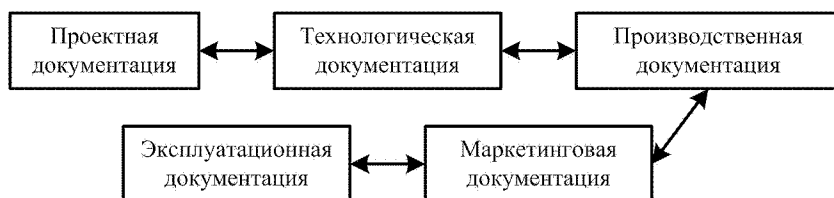


Рисунок 8.4 – Область применения CALS-систем

CALS-технологии являются средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы в единую многофункциональную систему, обеспечивающую повышение эффективности создания и использования сложной техники.

При использовании CALS-технологий повышается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений. Так, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если имеется оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем, что позволяет оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п. При этом под оперативным доступом следует понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной языковой интерпретации. Это относится и к другим системам, например, технологические подсистемы должны при необходимости воспринимать и правильно интерпретировать данные, поступающие от подсистем автоматизированного конструирования.

При использовании CALS-технологий сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление. Применение CALS позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания удачных разработок (устройств, оборудования, машин) и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю. Доступность обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы. Кроме того, появляются более широкие возможности для специализации пред-

приятый, вплоть до создания виртуальных предприятий, под которыми понимаются объединения юридически независимых предприятий, осуществляющих общие проекты и производства на основе информационного взаимодействия.

Существенно снижаются затраты на эксплуатацию, благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки; облегчается решение проблем интеграции продукции в различного рода системы и среды, а также адаптации к меняющимся условиям эксплуатации.

Промышленные автоматизированные системы могут работать автономно. Однако их эффективность будет заметно выше, если данные, генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными. Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание единого информационного пространства. Оно обеспечивается унификацией формы и содержания информации об изделиях на различных этапах их жизненного цикла.

Унификация формы достигается использованием стандартных форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при создании документов.

Унификация содержания, понимаемая как однозначная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла, обеспечивается разработкой *онтологий (метаописаний)* приложений, закрепляемых в прикладных протоколах CALS.

Унификация перечней и наименований сущностей, атрибутов и отношений в определенных предметных областях является основой для единого электронного описания изделия в CALS-пространстве.

Проблематика CALS имеет ряд *аспектов*, т. е. описаний системы или ее части, определяемой функциональными, физическими или другими отношениями между свойствами и элементами системы. По аналогии с аспектами автоматизированного проектирования их целесообразно считать *видами обеспечения CALS* и выделить лингвистическое, информационное, программное, математическое, методическое, техническое и организационное обеспечения CALS.

К *лингвистическому* обеспечению относятся языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для

представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий.

Информационное обеспечение составляют базы данных, включающие сведения о промышленных изделиях, используемые разными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции. В состав информационного обеспечения входят также международные и национальные CALS стандарты.

Программное обеспечение CALS представлено программными комплексами, предназначенными для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий. Это прежде всего системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными (PDM), взаимодействия предприятий в совместном электронном бизнесе (CPC), подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

Математическое обеспечение CALS включает методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия различных систем в CALS-технологиях. Среди этих методов, в первую очередь, следует назвать методы имитационного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов.

Методическое обеспечение CALS представлено методиками выполнения таких процессов, как параллельное (совмещенное) проектирование и производство, структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, объектно-ориентированное проектирование, создание онтологий приложений.

К *техническому* обеспечению CALS относят аппаратные средства получения, хранения, обработки, визуализации данных при информационном сопровождении изделий. Взаимодействие частей виртуальных предприятий, систем, поддерживающих разные этапы жизненного цикла изделий, происходит через линии передачи данных и сетевое коммутирующее оборудование.

Организационное обеспечение CALS представлено различного рода документами, совокупностью соглашений и инструкций, регламентирующих роли и обязанности участников жизненного цикла промышленных изделий.

Таким образом, CALS-технологии в машиностроении решают следующие основные задачи:

1) Создание единой структуры технической (проектной, технологической, производственной, маркетинговой и эксплуатационной) документации продукции машиностроения;

2) Создание единого информационного пространства на всех этапах жизненного цикла продукции и обеспечение эффективного управления и обмена данными;

3) Разработка принципов моделирования и создание адекватных функциональных и структурных моделей сложных технических объектов (агрегатов, механизмов, машин, технологических процессов и др.).

В условиях рыночной экономики предъявляются высокие требования к продукции машиностроения, в том числе к строительным, дорожным и другим машинам, выпускаемым в Беларуси. Особую актуальность приобретают стандартизация и сертификация продукции как составляющие конкурентоспособности и экономической безопасности страны. Кроме того, стандартизация и техническое нормирование решают вопросы удешевления продукции машиностроения за счет создания эффективных серийных производств стандартных деталей и узлов машин, имеющих улучшенные качественные показатели. Использование в эксплуатации стандартных и унифицированных деталей уменьшает их номенклатуру, что дает значительный экономический эффект. Стандартизация позволяет улучшить качество изготавливаемой продукции, что может способствовать росту объема продаж, привлечению новых потребителей, уменьшить вероятность ошибок и финансовых затрат при изготовлении.

Как отмечалось, *стандартизацией* является деятельность по установлению технических требований (норм, правил) к объектам для их многократного применения в отношении постоянно повторяющихся задач. Она направлена на достижение оптимальной степени упорядочения в области разработки, производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции (СТБ 1500-2004). Фактически она является формой накопления и применения знаний, полученных на основе многолетнего практического опыта.

Техническое нормирование – это деятельность по установлению *обязательных* для соблюдения технических требований, связанных с *безопасностью* продукции и процессов ее разработки, а также производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

К основным целям технического нормирования и стандартизации относятся обеспечение безопасности человека и окружающей среды,

технической и информационной совместимости, взаимозаменяемости и унификации продукции, единства измерений, гармонизации (приведения в соответствие) методов стандартизации с принятыми в мировом сообществе, повышения качества продукции и экономии материальных ресурсов.

Объектом стандартизации может быть продукция или процесс, для которых разрабатываются соответствующие требования. Например, в машиностроении объектами стандартизации могут быть методы расчета, материалы и заготовки, технологические процессы изготовления деталей и сборки узлов, агрегаты и машины, их безопасность и экология. В качестве примера широты охвата рассматриваемых задач можно привести только некоторые стандарты на «Машины землеройные»: ГОСТ 27247-87 «Метод определения тяговой характеристики»; ГОСТ 27248-87 «Метод определения центра тяжести»; ГОСТ 30678-2000 «Правила испытания двигателей. Полезная мощность»; ГОСТ 30697-2000 «Органы управления оператора»; ГОСТ ИСО 3449-2005 «Устройство защиты от падающих предметов» и др.

Стандартизация и техническое нормирование формируют систему нормативно-правовых актов, определяющих требования к продукции (к ее разработке, производству и применению), а также контроль за правильностью использования этой документации. Эта система является постоянно обновляющейся структурой, которая должна учитывать современные достижения науки и технический прогресс в области машиностроения, глобализацию рынка, а также перспективные требования потребителей с учетом роли охраны окружающей среды.

Развитие стандартизации предполагает систематическое обновление стандартов для повышения качества продукции машиностроения. Поэтому к числу основных задач, не теряющих своей актуальности при обновлении стандартов в области машиностроения, следует отнести:

- обеспечение согласования характеристик машин, их деталей и узлов, комплектующих изделий, сырья и материалов;
- расширение унификации (выбора оптимального числа видов и размеров продукции) на основе применения параметрических и типоразмерных рядов;
- обеспечение метрологических норм и требований;

- обеспечение контроля, сертификации и оценки качества изделий машиностроения;
- разработка перспективных требований к технологическим процессам;
- совершенствование систем классификации и кодирования технико-экономической информации, создание каталогов о номенклатуре и основных показателях машиностроительной продукции.

Основными принципами технического нормирования и стандартизации с учетом развития системы стандартизации в республике являются:

- использование современных достижений науки и техники;
- гармонизация требований отечественных стандартов с международными и межгосударственными стандартами;
- обязательность применения технических регламентов (ТР);
- доступность технических регламентов, технических кодексов (ТК) и государственных стандартов, информации о порядке их разработки, утверждения и опубликования для пользователей и иных заинтересованных лиц;
- обеспечение права участия юридических и физических лиц, в том числе иностранных технических комитетов по стандартизации к разработке отечественных технических кодексов и государственных стандартов;
- добровольность применения государственных стандартов.

Гармонизация требований государственных стандартов заключается в приведении их в соответствие с международными, европейскими и национальными стандартами других стран.

9.1 Нормативные документы в области технического нормирования и стандартизации

Государственная система стандартизации Беларуси начала формироваться в 1992 году с учетом опыта государственной стандартизации бывшего Союза ССР. В условиях перехода к рыночным отношениям и повышения самостоятельности предприятий, свободы выбора организационных форм и методов хозяйствования возникла необходимость интеграции экономики республики в мировую эконо-

мическую систему при сохранении и развитии в рамках стран СНГ экономического сотрудничества и кооперации предприятий.

Представителями государств СНГ было подписано в 1992 году соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации. Одновременно были заложены основы межгосударственной стандартизации. Согласно этому соглашению были признаны действующие ГОСТы в качестве международных стандартов, база стандартизации бывшего СССР как совместное достояние, а также необходимость двухсторонних соглашений для взаимного признания систем стандартизации, сертификации и метрологии.

Следует отметить, что в зависимости от географического, политического или экономического признака существуют различные формы стандартизации:

- международная (участие в ней открыто для всех стран);
- региональная (в ней могут участвовать стороны только одного политического или экономического района);
- межгосударственная (например, для стран СНГ);
- национальная;
- на уровне организации (юридического лица или индивидуального предпринимателя).

Расширение масштабов внешней торговли и целесообразность более широкой интеграции в мировое экономическое сообщество, необходимость гармонизации отечественных и международных правил и норм потребовали реорганизации существующей и создания современной системы стандартизации, опирающейся на техническое нормирование и оценку соответствия. В настоящее время техническое нормирование и стандартизация развиваются с учетом интересов национальной экономики, необходимости участия в интеграционных процессах на региональном и мировом уровнях. Правовые и организационные основы технического нормирования, стандартизации и оценки соответствия были определены во введенных в 2004 году Законах Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» и «Об оценке соответствия требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации». Государственные функции по техническому нормированию закреплены за Госстандартом, Минстройархитектуры и другими государственными органами.

В соответствии с этими законами государственная система технического нормирования и стандартизации представляет собой совокупность технических регламентов и кодексов, стандартов и технических условий, а также субъектов технического нормирования и стандартизации, взаимодействующих по установленным правилам. Создание системы технического нормирования предусматривает упорядочение технических нормативных правовых актов (ТНПА). К ним относятся нормативные документы следующих категорий:

- технические регламенты (ТР);
- технические кодексы (ТК);
- технические условия (ТУ);
- государственные стандарты Республики Беларусь (СТБ);
- государственные строительные нормы и правила Республики Беларусь (СНБ);
- общегосударственные классификаторы технико-экономической и социальной информации Республики Беларусь (ОКРБ);
- руководящие документы отраслей Республики Беларусь (РД РБ);
- технические условия Республики Беларусь (ТУ РБ);
- технические описания республики Беларусь (ТО РБ);
- стандарты предприятий (СТП).

Кроме того, к нормативным документам по стандартизации относятся *предстандарты*, разрабатываемые для ускоренного внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Общая структура и возможные взаимосвязи ТНПА в области технического нормирования и стандартизации представлены на рисунке 9.1 (отсутствие стрелок означает взаимовлияние структурных единиц).

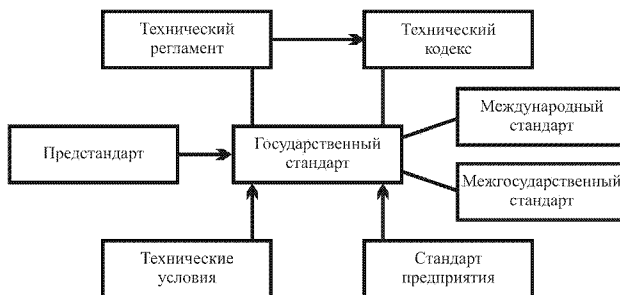


Рисунок 9.1 – Структура ТНПА в области технического нормирования и стандартизации

В странах СНГ действующими категориями нормативных документов являются межгосударственные (ГОСТ) и государственные стандарты (ГОСТ), отраслевые (ОСТ) и стандарты научно-технических и инженерных обществ (СТО), стандарты организаций (СТП) и технические условия (ТУ).

Каждая из республик СНГ в настоящее время разрабатывает и утверждает свои государственные стандарты.

Главным инструментом технического нормирования является технический регламент (документ, содержащий обязательные правовые нормы). Его принимает орган власти, а не орган стандартизации (как другие нормативные документы).

Технический регламент (ТР) – это технический нормативный правовой акт, разработанный в процессе технического нормирования, который устанавливает *обязательные* для соблюдения технические требования, связанные с *безопасностью* продукции, а также процессов ее разработки, производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

В ТР могут содержаться правила соответствия этим требованиям в отношении объекта технического нормирования, включая методики контроля и измерений, правила маркировки объектов технического нормирования, а также требования к порядку осуществления государственного надзора за соблюдением ТР.

ТР носят директивный характер и являются обязательными к исполнению, поскольку связаны с безопасностью объектов на всех этапах их жизненного цикла.

Технический регламент обозначается следующим образом. Например, ТР/2004/001/ВУ, где ТР – технический регламент, 2004 – год утверждения, 001 – порядковый номер, ВУ – принадлежность к стране.

Технические кодексы (ТК) разрабатываются с целью реализации требований технического регламента, а также повышения качества процессов разработки (проектирования), производства, эксплуатации (использования), хранения, перевозки, реализации и утилизации (или оказания услуг). Их требования, как правило, базируются на результатах установившейся практики.

Разработка и утверждение ТК осуществляются республиканскими органами государственного управления. Техническому кодексу в процессе государственной регистрации присваивается обозначение,

состоящее из индекса ТКП, порядкового регистрационного номера, присваиваемого Госстандартом, года его утверждения и (в скобках) кода республиканского органа госуправления, утвердившего ТК. Например, ТКП 43-2004(09170).

Технические условия (ТУ) разрабатываются и утверждаются юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями на продукцию (услугу), предназначенную для реализации. ТУ по сравнению со стандартами чаще пересматриваются и обновляются по мере развития соответствующих направлений науки и технологии, а также совершенствования технических возможностей производства. Как правило, они разрабатываются на новые товары и на продукцию, которая выпускается небольшими партиями.

Техническим условиям обозначение присваивает разработчик. Оно состоит из индекса (ТУ), кода Беларуси (БУ), кода держателя подлинника ТУ (по Единому государственному регистру юридических лиц и индивидуальных предпринимателей – ЕГР) и года утверждения (например, ТУ БУ 100195.015-2004).

Требования, которые не связаны с безопасностью, но необходимы для обеспечения заданного уровня качества продукции, составляют основу стандартов. *Стандарт* – это технический нормативный правовой акт, разработанный на основе согласия заинтересованных сторон и содержащий технические требования к процессам разработки, производства, перевозки, эксплуатации, хранения, реализации, утилизации продукции или оказанию услуг.

Различают государственные и отраслевые стандарты, а также стандарты предприятий.

Государственные стандарты Беларуси основаны на современных достижениях науки и техники. Они содержат:

- требования к продукции и процессам ее разработки, производства, хранения, перевозки, реализации и утилизации;
- требования к правилам приемки и методике контроля продукции;
- требования к технической и информационной совместимости;
- правила оформления технической документации;
- общие правила обеспечения качества продукции, сохранения и рационального использования ресурсов;
- требования к энергоэффективности и снижению энерго- и материалоемкости продукции;

– термины и определения, условные обозначения, метрологические, технические и организационно-методические правила и нормы.

Государственные стандарты являются добровольными для применения. Их можно использовать на стадиях разработки, производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции. Они могут быть основой для разработки ТР и ТК.

Взаимосвязанные с ТР государственные стандарты реализуют их технические требования. Если в техническом регламенте дана ссылка на госстандарт, то требования этого стандарта становятся обязательными для соблюдения.

Если производитель в добровольном порядке применил госстандарт и заявил о соответствии ему своей продукции, то соблюдение требований этого стандарта становится для него обязательным.

При разработке отечественных стандартов учитываются, как правило, международные (в том числе стандарты ИСО и МЭК), региональные, межгосударственные и национальные стандарты. Основными международными стандартами являются стандарты Международной организации по стандартизации МС ИСО (ИСО) и Международной электротехнической комиссии МС ИЕК (МЭК). Международная организация по стандартизации ISO (International Association of Standartion) была образована в 1946 году, в ее состав входило 25 национальных организаций по стандартизации, в том числе СССР. В настоящее время в состав ИСО входят 120 стран, в том числе Беларусь (с 1993 года).

Сотрудничество с международными организациями по стандартизации включает участие в разработке международных и региональных стандартов, правил и регламентов, а также применение в народном хозяйстве на основе договорно-правовых отношений с партнерами. Двухстороннее и многостороннее сотрудничество по стандартизации предполагает работы по гармонизации государственных стандартов с национальными стандартами стран-партнеров, совместную разработку стандартов, проведение совместных научных исследований, обмен опытом и информацией в области стандартизации.

Аббревиатура организации ISO произошла от греческого слова «*isos*» – равный. В начале эта организация занималась только унификацией – анализировала и унифицировала национальные стандарты на продукцию. Затем в процессе подготовки к открытому общеевро-

пейскому рынку были разработаны единые стандарты и подходы к техническим регламентам, гармонизированы национальные стандарты, а также переработана серия стандартов ISO 9000.

Стандарты ИСО серии 9000, регламентирующие основные требования в области обеспечения качества машиностроительной продукции, занимают особое место в системе международной стандартизации. Международный опыт показывает, что создание на предприятиях эффективной системы обеспечения качества продукции и услуг повышает вероятность того, что продукция в наибольшей мере будет соответствовать требованиям потребителей и условиям ее конкурентоспособности на мировом рынке. Эти стандарты позволяют переориентировать ресурсы в направлении более перспективного планирования деятельности предприятия по обеспечению качества продукции. Для этого необходимо непрерывно улучшать продукцию и ее сервисное обслуживание, а также снижать ее стоимость. Наряду с этим необходимо постоянно модернизировать производство, производственные процессы и оборудование, предусматривая максимальное использование производственных площадей, синхронизацию потоков материалов и их минимальные перемещения и обработку.

В зависимости от объекта стандартизации различают следующие **виды стандартов**:

- основополагающий;
- терминологический;
- стандарт на продукцию;
- стандарт на процесс;
- стандарт на услугу;
- стандарт на методы контроля;
- стандарт с открытыми значениями;
- система стандартов, группа стандартов.

Основополагающий стандарт имеет широкую область распространения и содержит общие требования. Он может применяться в качестве стандарта или служить основой для других стандартов и ТНПА. Основополагающие стандарты устанавливают общие организационно-методические или общетехнические требования при разработке, производстве, эксплуатации, хранении, перевозке, реализации и утилизации продукции. Общетехнические стандарты устанавливают допуски и посадки; требования к шероховатости поверхности; классы точности

оборудования; правила выполнения чертежей и схем; требования к различным видам технической совместимости и т. п.

Терминологический стандарт – это основополагающий стандарт, распространяющийся на термины, к которым приводятся определения (а также примечания, иллюстрации, примеры и др.).

Стандарт на продукцию устанавливает требования, которым должна удовлетворять продукция (или группа однородной продукции) в соответствии со своим назначением. В зависимости от продукции и технологических процессов различают стандарты:

- параметров и размеров;
- типов;
- сортамента;
- марок;
- конструкций;
- методов испытаний (контроля, анализа, измерений);
- приемки;
- маркировки;
- упаковки;
- транспортирования;
- хранения;
- эксплуатации и ремонта;
- общих технических требований;
- общих технических условий;
- типовых технологических процессов.

Стандарты параметров и размеров устанавливают параметрические и размерные ряды продукции по основным потребительским (эксплуатационным) характеристикам, на основе которых должна разрабатываться продукция конкретных моделей, марок и типов. Они регламентируют форму и размеры готовых изделий или их деталей, рациональные параметрические и размерные ряды, на основе которых должна производиться продукция.

Стандарты типов устанавливают типы стандартизируемой продукции в зависимости от ее основных свойств, а также основные параметры типов изделий, классифицированных по основным потребительским (эксплуатационным) характеристикам, чертежи с указанием основных размеров, условные обозначения типов. Они должны учитывать перспективы развития данного вида продукции.

Стандарт сортамента устанавливает номенклатуру продукции (полуфабрикатов), классифицированной по геометрической форме и размерам. Стандарт содержит чертежи, определяющие форму изделия, таблицы с размерами, условные обозначения продукции, методы измерения размеров и проверки геометрической формы.

Стандарт марок устанавливает номенклатуру марок и сырья, их химический состав, основные потребительские (эксплуатационные) свойства. В стандарте могут приводиться рекомендации по применению материалов, режимам их обработки.

Стандарт конструкции устанавливает конструктивное исполнение и основные размеры для групп однородных деталей, узлов и сборочных единиц в целях их унификации и взаимозаменяемости при разработке конкретных типов продукции. Стандарт содержит чертежи изделия в целом и отдельных его узлов, размеры с предельными отклонениями и дополнительные требования, необходимые для взаимозаменяемых способов соединения, сопряжения и т. п.

Упомянутые стандарты сортамента, конструкций и размеров определяют особенности конструктивного исполнения и основные размеры определенной группы изделий массового применения (например, проката) для обеспечения унификации изделий и их взаимозаменяемости.

Стандарт методов испытаний (контроля, анализа, измерений) устанавливает порядок отбора образцов для испытаний, методы контроля потребительских (эксплуатационных) характеристик продукции для обеспечения единства оценки ее показателей качества.

Стандарт приемки содержит требования к приемке продукции по количеству и качеству, виды и планы статистического контроля, а также программы испытаний. Устанавливается порядок предъявления продукции к приемке, ее проведение, размер партий, порядок документального оформления результатов приемки.

Стандарт маркировки устанавливает требования к маркировке, необходимые для информации потребителей об основных характеристиках товара, указывается место маркировки, способы ее исполнения и содержание.

Стандарт упаковки определяет общие требования к упаковке с целью обеспечения сохранности товаров и с учетом требований технической эстетики. В стандарте приводятся правила подготовки из-

делий к упаковке, виды потребительской и транспортной тары; способы упаковки продукции, порядок и ее размещение, способы укладки; перечень документов, вложенных в тару. Кроме того, могут быть приведены требования по применению транспортных средств, контейнеров и поддонов.

Стандарт транспортирования определяет требования к обеспечению сохранности свойств продукции при транспортировании. В нем указываются виды транспортных средств (вагоны, автомобили, трюмы и палубы судов и пр.); способы крепления грузов, а также требования по перевозке продукции в универсальных и специализированных транспортных средствах, допускаемые механические воздействия; климатические условия транспортирования; специальные требования, касающиеся защиты продукции от внешних воздействий, включая механические.

Стандарт хранения устанавливает требования к сохранности свойств продукции при ее хранении. В нем приводятся условия хранения конкретных товаров, требования к месту хранения, способы защиты продукции от влияния влаги и вредных испарений, а также способы складирования товаров при хранении.

Стандарт эксплуатации и ремонта определяет требования, обеспечивающие работоспособность продукции в процессе ее эксплуатации и ремонта, а также гарантирующие ее эксплуатационные характеристики. В нем предусматриваются методы и порядок монтажа изделий по месту эксплуатации, виды и порядок ремонтных работ и технического обслуживания, гарантийные сроки отремонтированных изделий.

Стандарт общих технических требований устанавливает требования к продукции, соблюдение которых обеспечивает оптимальный технический уровень, качество и экономичность продукции при проектировании и производстве. Стандарт может включать требования надежности, экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов, стойкости к внешним воздействиям и живучести, эргономики и технической эстетики, технического обслуживания и ремонта, транспортабельности, безопасности, стандартизации и унификации, охраны природы, технологичности, конструктивности и др.

Стандарт общих технических условий содержит требования, соблюдение которых обеспечивает высокий технический уровень и качество продукции в течение всего планового периода ее производства. Он также содержит основные параметры и размеры продукции, технические требования, правила приемки, методы контроля, правила транспортирования и хранения, указания по эксплуатации.

Стандарт типовых технологических процессов устанавливает требования к методам, последовательности и техническим средствам выполнения и контроля технологических операций изготовления продукции с целью внедрения наиболее эффективных технологий ее производства и обеспечения единого уровня качества. К таким процессам относятся обработка металлов резанием и давлением, сварка металлов и полимеров, напыление и наплавка и т. п.

Стандарт на услугу устанавливает требования, которым должна удовлетворять услуга, чтобы обеспечить соответствие ее назначению. Стандарты могут быть разработаны на материальные услуги, например, на научно-техническое и рекламное обслуживание.

Стандарт с открытыми значениями представляет собой стандарт, содержащий перечень характеристик для конкретной продукции, процесса или услуги. Это могут быть данные, указанные в одних стандартах поставщиками, в других – покупателями. К данным стандартам относятся стандарты системы показателей качества продукции.

Государственному стандарту Госстандарт присваивает обозначение, состоящее из индекса СТБ, регистрационного номера и (через тире) года утверждения госстандарта (например, СТБ 1248-2000). Для Государственного стандарта, входящего в систему госстандартов, регистрационный номер показывает систему (группу) госстандартов и номер стандарта в данной системе (группе) (например, СТБ 4.227-2003, СТБ 50.13-2003). Государственный стандарт, разделенный на отдельные части, для каждой части имеет один и тот же присвоенный регистрационный номер, состоящий из номера госстандарта и отделенного от него (знаком тире) номера части стандарта (например, СТБ 9000-1-2002, СТБ 9000-2-2003).

Обозначение межгосударственного стандарта в государствах СНГ состоит из индекса ГОСТ (государственный общесоюзный стандарт), регистрационного номера и (через тире) двух последних цифр года утверждения (например, ГОСТ 28905–91).

Право официального издания государственных стандартов принадлежит Комитету по стандартизации, метрологии и сертификации при Совете Министров Республики Беларусь, а в области архитектуры и строительства – Министерству архитектуры и строительства.

Государственные стандарты являются *добровольными* для применения на стадиях разработки, производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции, а также при оказании услуг. Они могут использоваться в качестве основы для разработки ТР и ТК. Если в техническом регламенте дана ссылка на государственный стандарт, то требования этого государственного стандарта становятся *обязательными* для соблюдения. Кроме того, если производитель или поставщик продукции в добровольном порядке применили государственный стандарт и заявили о соответствии ему своей продукции, а также если продукция производителя или поставщика сертифицирована, соблюдение требований государственного стандарта для них становится *обязательным*.

Предварительный стандарт (СТБП) – документ, временно принятый органом, занимающимся стандартизацией, и доведенный до широкого круга потребителей с целью накопления опыта, на котором должен базироваться стандарт.

Разработка предварительного стандарта позволяет:

- ускорить применение международных, региональных и национальных стандартов других стран и их проектов;
- оперативно использовать результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- сократить сроки разработки государственных стандартов путем их предварительной апробации;
- привлечь всех заинтересованных пользователей к участию в обсуждении через предварительный стандарт проектов государственных стандартов.

Государственная система технического нормирования и стандартизации продолжает совершенствоваться и развиваться. В частности, научно-производственным республиканским унитарным предприятием «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации» («БелГИСС») разработан технический кодекс, устанавливающий правила планирования работ по техническому нормированию и стандартизации ТКП 1.6-2006(03220) «Система технического

нормирования и стандартизации». Он устанавливает новую (с 2007 года) структуру плана государственной стандартизации, которая включает:

- 1) научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по техническому нормированию и стандартизации;
- 2) разработку технических регламентов;
- 3) разработку государственных стандартов:
 - взаимосвязанных с техническими регламентами;
 - в области экономики;
 - в рамках межгосударственных программ по стандартизации;
- 4) разработку организационно-методических документов.

Примером комплексного подхода к проблемам упорядочения и технического нормирования может служить задача обеспечения единообразия норм, правил и требований на всех этапах создания технических объектов, в том числе машин различного назначения. Это проявляется в двух направлениях:

- а) в нормативном обеспечении всех стадий жизненного цикла машин – проектно-конструкторской разработки, производства, эксплуатации и ремонта;
- б) в совокупной стандартизации сырья, материалов, комплектующих и готовых изделий.

На стадии проектно-конструкторской разработки стандарты устанавливают единую систему конструкторской документации, систему допусков и посадок, резьб и других конструктивных элементов, систему обозначений и кодирования. О значимости стандартизации на этой стадии свидетельствуют следующие цифры: 60–70 % брака изделий связано с просчетами при проектировании и конструировании, отклонениями от требований и норм конструкторской и нормативной документации.

На стадии производства установлена единая система технологической подготовки производства, регламентированы методы испытаний опытных образцов. Выпуск продукции осуществляется в соответствии с требованиями стандартов на типовые технологические процессы и технологические режимы, влияющие на качество изделий. При производстве используют стандартные оборудование, средства автоматизации процессов, технологическую оснастку и инструмент. Стандартизованы методы контроля и испытаний, требования к средствам измерений.

На стадии эксплуатации регламентируют требования и нормы по основным потребительским (эксплуатационным) свойствам технических средств, устанавливают правила их производственной и технической эксплуатации (стандарты на техническое обслуживание и ремонт). Определяют единую систему информации о качестве эксплуатируемой продукции.

Важным аспектом комплексной стандартизации является регламентация стандартизируемого объекта от сырья и материалов до готовой продукции. Структура такой стандартизации показана на примере тракторов (рисунок 9.2).

Расширение масштабов внешней торговли, необходимость широкой интеграции Беларуси в мировое экономическое сообщество обуславливают необходимость гармонизации действующих норм и правил, в том числе гармонизации стандартов.

Гармонизация стандарта – это приведение его содержания в соответствие с другим стандартом для обеспечения взаимозаменяемости продукции (услуг), взаимного понимания результатов испытаний и информации, содержащейся в стандартах. Она в такой же степени относится и к техническим регламентам.

Гармонизированные стандарты – это стандарты, относящиеся к одному и тому же объекту и утвержденные различными органами, которые обеспечивают взаимозаменяемость продукции, процессов и услуг. Наиболее важными являются стандарты, гармонизированные на международном уровне.

Европейская экономическая комиссия ООН в своих рекомендациях по гармонизации стандартов отмечает необходимость четкой увязки деятельности по гармонизации с международным экономическим и научно-техническим сотрудничеством. Для выбора нормативного документа для гармонизации комиссия определила следующие критерии:

- степень обеспечения уровня взаимозаменяемости и технической совместимости объекта стандартизации и ее влияние на экономическую и техническую эффективность сотрудничества;
- значение стандарта для взаимного признания результатов и контроля качества продукции;
- степень влияния стандарта на другие нормативные документы;
- способность стандарта реально или потенциально создать технический барьер в торговле.

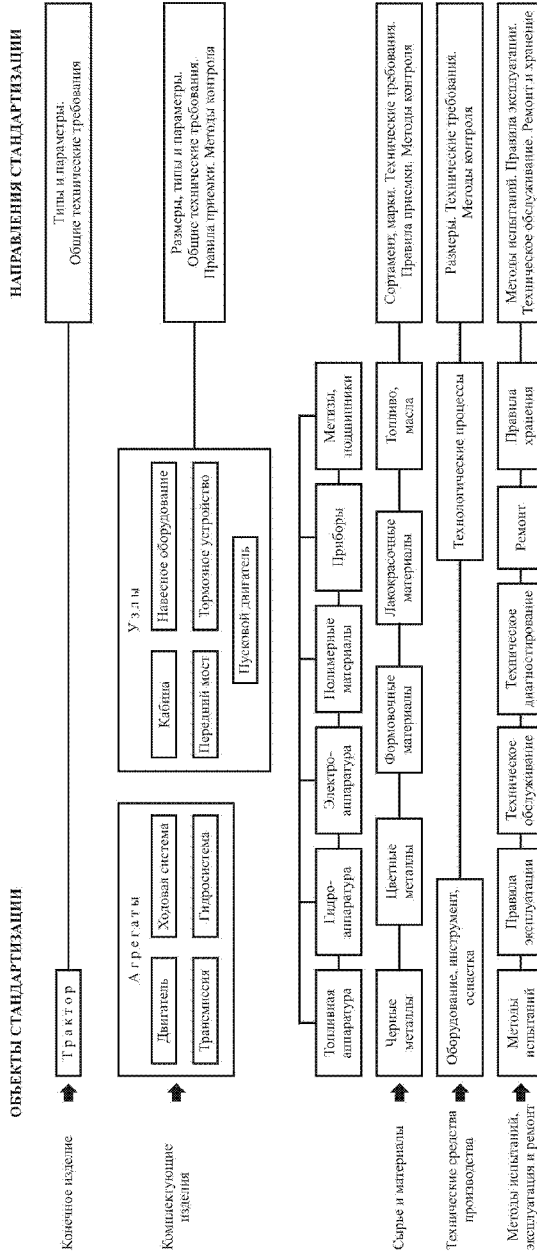


Рисунок 9.2 – Структура комплексной стандартизации тракторов

9.2 Основные методы стандартизации

Как отмечалось, стандартизация должна обеспечивать создание оптимальной номенклатуры продукции машиностроения, которая в наибольшей степени отвечает интересам потребителей. Для решения этой сложной и многоплановой задачи используют системный подход, основой которого являются:

- параметрическая стандартизация;
- унификация;
- агрегатирование;
- комплексная стандартизация;
- опережающая стандартизация.

Параметрическая стандартизация – это процесс стандартизации *параметрических рядов*, который заключается в выборе и обосновании целесообразной номенклатуры и численного значения параметров. Она предусматривает количественную характеристику свойств продукции. Наиболее важными параметрами продукции являются показатели, которые определяют ее назначение и условия использования: размерные (например, габарит, длина, база, колея и т. п.), массовые (грузоподъемность, масса машины и т. п.), энергетические (мощность двигателя), а также параметры, характеризующие производительность машин (скорость движения, вместимость ковша и т. п.).

Рациональное сокращение номенклатуры изделий предполагает разработку стандартов на параметрические ряды, которые представляют собой наборы установленных значений параметров. При выборе параметрических рядов опираются на следующие принципы:

- минимум количества основных параметров, чтобы не ограничивать процесс совершенствования конструкций и технологии изготовления изделий;
- стабильность (неизменность) параметров при конструктивных модификациях и технических усовершенствованиях;
- независимость от технологии изготовления, применяемых материалов, методик расчета.

Стандарты на параметрические ряды способствуют сокращению до целесообразного минимума конкретных типов моделей и, как правило, являются перспективными. Требования стандартов на параметрические ряды направлены на внедрение в производство прогрессив-

ных, технически более совершенных и производительных машин, оборудования и других видов машиностроительной продукции.

Одним из важных принципов параметрической стандартизации является принцип предпочтительности. Он состоит в систематизации, например, рядов, допусков, посадок, диаметров и шагов метрической резьбы, поэтому такие стандарты охватывают широкий диапазон величин параметров. Согласно этому принципу, размеры конструкций должны совпадать с членами одного из рядов предпочтительных чисел. Наиболее удобными являются геометрические прогрессии. Основным стандартом в этой области является ГОСТ 8032 «Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел», который в свою очередь является базовым для ГОСТ 6636 «Нормальные линейные размеры», устанавливающего ряды чисел для выбора линейных размеров. Достоинствами применения системы предпочтительных чисел являются сокращение параметров однотипной продукции, а также увязка по параметрам продукции различных видов (детали машин, технологическое и техническое оборудование).

Разновидностью параметрического ряда является *типоразмерный ряд*, главные параметры которого – размеры изделия. На основе типоразмерных рядов создаются конструктивные ряды моделей машин или узлов одинаковой конструкции. При этом параметрический ряд должен содержать самое выгодное число типоразмеров изделий при минимальных затратах на производство и эксплуатацию.

Многообразие условий эксплуатации и режимов работы строительных, дорожных и других машин создают потребность в увеличении количества типоразмеров и конструктивных исполнений машин. Тенденция расширения спектра главных параметров и роста числа моделей вызвана тем, что потребителю выгодно использовать на каждом конкретном объекте оптимальный типоразмер машины с необходимым видом рабочего оборудования. Рост числа моделей и типоразмеров машин приводит к необходимости организовать этот процесс, получая целесообразное разнообразие машин при минимальных затратах на их производство, к унификации и специализации.

Унификация, как уже отмечалось, это рациональное сокращение числа объектов одинакового функционального назначения. Она является наиболее распространенной и эффективной формой стандартизации, если ее результаты не оформлены стандартом. При этом стан-

дартизация изделий и их составных частей обязательно предполагает их унификацию.

Целью унификации является устранение неоправданного многообразия изделий, узлов, технологических процессов путем их преобразования в однотипные. Унификация базируется на таких методах стандартизации как систематизация, селекция, симплификация, типизация и оптимизация.

Систематизация объектов предусматривает их расположение в заданном порядке или последовательности, образующей четкую и удобную систему для пользователя. Разновидностью систематизации является классификация.

Селекция объектов стандартизации заключается в отборе конкретных объектов, признанных целесообразными для дальнейшего производства и применения в общественном производстве.

Симплификация – это выявление объектов, которые нецелесообразно в дальнейшем использовать.

Типизация объектов стандартизации направлена на создание типовых (образцовых) конструкций, технологических процессов, форм документации.

Оптимизация объектов стандартизации предполагает определение оптимальных значений главных параметров, а также показателей качества и экономичности. Целью оптимизации является достижение оптимальной степени упорядочения и максимально возможной эффективности по выбранному критерию.

В результате таких работ по упорядочению объектов стандартизации разрабатывают, например, перечни комплектующих изделий для готовой продукции, альбомы типовых конструкций, стандарты и ТУ, типовые формы конструкторских, технологических, эксплуатационных, управленческих и прочих документов.

Унификация рядов, деталей, узлов, агрегатов и машин предполагает их конструктивное подобие, которое определяется общностью рабочего процесса и условий работы изделий. Унификация может распространяться на параметрические и типоразмерные ряды машин, их типы, составные части и детали. Различают следующие **виды унификации**:

- внутриразмерную;
- межразмерную;

- межтиповую;
- заводскую;
- отраслевую.

Внутриразмерная унификация представляет собой унификацию базовой модели и ее модификаций внутри одного типоразмера. Например, для автомобилей МАЗ степень внутриразмерной унификации составляет 82–93 %.

Межразмерная унификация – это унификация между различными размерами параметрического ряда базовых моделей или их модификаций, но внутри одного типа.

Межтиповая унификация является унификацией изделий различных типов и параметрических рядов. В качестве примера можно привести Минский станкостроительный завод, на котором унифицированы в один межтиповой ряд продольно-фрезерные, продольно-строгальные и продольно-шлифовальные станки на основе стандартной ширины обрабатываемых заготовок, устанавливаемых по ряду 10 (800, 1000, 1250 и 1600 мм). В результате в указанных станках использовано 45 % унифицированных узлов.

Заводская (в рамках завода) и *отраслевая* (для ряда заводов отрасли) унификации охватывают номенклатуру изделий, их составные части и детали, которые производят и применяют в различных отраслях народного хозяйства (*межотраслевая* унификация).

Унифицированными могут быть любые изделия машиностроения: детали, сборочные единицы, узлы, материалы, крепеж, подшипники и т. д. К унифицированным элементам относятся посадки и качества, резьбовые, шпоночные и шлицевые соединения. Унификации подлежат марки материалов, инструмент, технологическая оснастка, методы испытания и контроля, документация, нормы, требования, обозначения.

Характерным примером использования методов стандартизации являются одноковшовые гидравлические экскаваторы. Как известно, их блочная конструкция в несколько раз сокращает сроки и трудоемкость монтажа экскаваторов и существенно повышает их ремонтно-пригодность.

По ряду узлов (двигатели внутреннего сгорания, электрические и гидравлические двигатели, гидроаппаратура и др.) унификация охватывает несколько соседних типоразмеров. По некоторым узлам (узлы

и элементы управления, колеса, пневмодвигатели и др.) унификация охватывает большую часть различных групп. При этом экскаваторы обладают универсальностью, которая достигается большим числом различных сменных элементов рабочих органов, ковшей, рукоятей, наголовников стрел и др. Благодаря этому заводы изготавливают унифицированные ряды гидравлических экскаваторов, которые при наличии 10–12 базовых моделей имеют более 80 модификаций машин различного назначения. При этом количество деталей, необходимых для их выпуска, в 6–7 раз меньше числа деталей при индивидуальном производстве.

Пример уменьшения номенклатуры составных частей подвески ковша фронтального погрузчика путем преобразования геометрически и функционально подобных шарнирных узлов в однотипные приведен на рисунке 9.3. Каждая из двух рычажных частей подвески имеет пять схожих по конструкции шарнирных узлов, но различных по условиям нагружения (рисунок 9.3, а). Проектирование конструкции из условий оптимальной прочности предполагает выпуск пяти различных партий деталей по два комплекта шарниров. Если же унифицировать подвеску, тогда все шарнирные узлы принимаются равными наиболее нагруженному узлу (рисунок 9.3, б). При этом увеличенная металлоемкость конструкции подвески будет компенсирована существенным уменьшением расходов на производство с увеличенным объемом выпуска однотипной продукции (требуется изготовить только одну партию одинаковых деталей на десять комплектов).

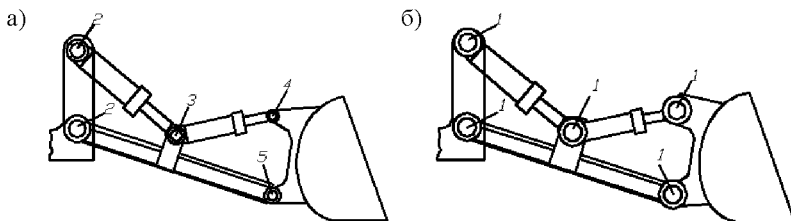


Рисунок 9.3 – Подвеска ковша фронтального погрузчика:
а – до унификации шарнирных узлов; б – после унификации

В ряде случаев межразмерную унификацию называют горизонтальной, а межтиповую – вертикальной. *Горизонтальная* унификация распространяется на машины одинакового назначения и предполага-

ет использование однотипных узлов и деталей в рамках их модельного ряда. Например, в СНГ налажен серийный выпуск строительных одноковшовых экскаваторов различных размерных групп (с вместимостью ковша 0,25–4 м³) на базе единых конструктивных схем с широкой унификацией сборочных единиц и гидроаппаратуры. *Вертикальная* унификация не ограничивается одинаковыми машинами и охватывает однотипные детали, узлы и агрегаты машин различного назначения, например, погрузчиков и одноковшовых экскаваторов из подгруппы землеройных машин, бульдозеров и скреперов из подгруппы землеройно-транспортных машин.

Примером унификации может служить фронтальное погрузочное оборудование погрузчика-экскаватора Амкодор 702А, которое унифицировано с погрузочным оборудованием бульдозера-погрузчика Амкодор 133. Эта машина оснащается быстросменным двухчелюстным ковшом, который совмещает в себе возможности четырех рабочих органов: ковша, бульдозерного отвала, грейфера и челюстного захвата.

Для удовлетворения потребностей рынка строительных, дорожных и коммунальных машин на Минском тракторном заводе освоен выпуск универсальных транспортных шасси Ш-406, на базе которых создаются машины различного назначения для летнего и зимнего содержания дорог, очистки и мойки тоннелей и защитных дорожных экранов, машин с комбинированным пневмоколесно-рельсовым ходом.

Агрегатирование машин представляет собой метод конструирования машин, оборудования и приборов из унифицированных стандартных агрегатов (автономных узлов, устанавливаемых в изделия в различном числе и комбинациях). Многие машины и оборудование могут быть разделены на несколько автономных агрегатов (узлов), которые выполняют в различных машинах одинаковые функции. Принцип агрегатирования имеет технологические (уменьшение времени на окончательную сборку машины) и эксплуатационные (ремонт машины заключается в замене неисправного агрегата) преимущества, несмотря на необходимость дополнительного объединяющего элемента, который усложняет конструкцию. На рисунке 9.4 представлена конструкция малогабаритного погрузчика с дополнительными элементами, которые позволяют реализовать агрегатирование (эти элементы выделены темным).

Для унификации систем машин и создания типоразмерных рядов и унифицированных семейств машин применяют модуль конструирования. Под модулем понимают унифицированную или стандартную сборочную единицу. Применение модульного принципа позволяет получить значительную экономию при создании новых машин за счет уменьшения объема работ и снижения их трудоемкости благодаря применению типовых технологических процессов, а при ремонте – за счет замены унифицированных элементов другими предварительно изготовленными. Каждый из модулей можно использовать на любой машине унифицированного семейства машин.

Одним из примеров агрегатирования является метод агрегатно-модульной компоновки машин. Машины выполняют в виде специализированных комплектов универсальных модулей, выпускающихся

Рамные конструкции агрегатов

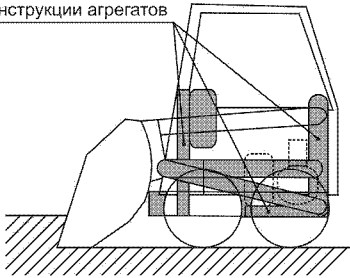


Рисунок 9.4 – Агрегатированная конструкция универсального малогабаритного погрузчика

крупной серией и потому относительно дешевых. Агрегатно-модульная компоновка получила широкое распространение в машиностроении. Например, агрегатно-модульные станки и промышленные роботы, являющиеся основой технологических линий, могут быть перенастроены на выпуск новой продукции за очень короткое время.

Принцип унификации и агрегатирования позволяет на основе базовой модели создавать производные машины одинакового назначения, но с различными эксплуатационными показателями или машины различного назначения, выполняющие качественно другие операции.

Взаимозаменяемость – это метод стандартизации, обеспечивающий сборку и эксплуатацию готовой продукции из независимо изготовленных деталей, узлов, модулей и агрегатов без нарушения требований к изделию в целом. Элементы изделий могут быть взаимозаменяемыми, если их параметры находятся в заданных пределах. Метод функциональной взаимозаменяемости определяет точность геометрических, физических и других параметров деталей и узлов на основе строго установленных связей между этими параметрами и потреби-

тельскими показателями. При этом предусматривается сборка изделий без предварительной подгонки смежных узлов и блоков с учетом системы допусков и посадок.

Взаимозаменяемость может быть *полной, неполной, внешней и внутренней*.

Полная взаимозаменяемость характеризуется соблюдением параметров такой точности, которая допускает сборку и замену любых сопрягаемых деталей, узлов, агрегатов без каких-либо дополнительных мероприятий (обработки, подбора или регулировки).

Неполная (ограниченная) взаимозаменяемость обеспечивается при проведении дополнительных мероприятий при сборке, таких как групповой набор деталей (селективная сборка), применение компенсаторов, регулировка положения, пригонка.

Внешняя – это взаимозаменяемость по эксплуатационным показателям, размерам и форме присоединения поверхностей покупных изделий и узлов между собой, а также с другими покупными изделиями.

Внутренняя – это взаимозаменяемость деталей, составляющих отдельные узлы, составные части и механизмы, входящие в изделие.

Уровень взаимозаменяемости является показателем технического уровня производства и характеризуется коэффициентом, определяющим отношение трудоемкости изготовления взаимозаменяемых деталей и частей к общей трудоемкости изготовления изделий.

Агрегаты, изготовленные независимо друг от друга, должны обладать полной взаимозаменяемостью по всем эксплуатационным показателям и присоединительным размерам, просто и надежно собираться с помощью резьбовых, шлицевых и других соединений. Собранные по агрегатному принципу машины и оборудование должны быть прочными, надежными, долговечными, виброустойчивыми.

Комплексная стандартизация – это стандартизация, которая осуществляет и применяет систему взаимосвязанных требований к качеству готовых изделий и необходимых для их изготовления сырья, материалов, комплектующих узлов, а также к технологии производства и методам контроля. Она позволяет разрабатывать и реализовывать комплексы согласованных между собой нормативно-технических документов о стандартизации, регламентирующих нормы и требования к взаимосвязанным объектам стандартизации.

Для осуществления программы комплексной стандартизации помимо разработки стандарта на конечный продукт необходимо пересмотреть и разработать взаимосвязанные стандарты на сырье, материалы, полуфабрикаты, узлы, комплектующие изделия, запасные части, вспомогательные материалы, а также на технологические процессы, технологическую оснастку, орудия производства; методы и средства измерений, испытания и контроля; упаковку, транспортировку, хранение и эксплуатацию.

Опережающая стандартизация (ОС) – это стандартизация, устанавливающая повышенные по отношению к уже достигнутому на практике уровню норм и требований к объектам стандартизации, которые согласно прогнозам будут оптимальными в последующее планируемое время. Объектами ОС являются, как правило, наиболее важные виды продукции и процессы (нормы, правила, характеристики, требования), параметры которых могут изменяться в течение срока действия стандартов.

Обязательным признаком ОС является опережение по времени производства, которое может относиться как к изделию в целом, так и к наиболее важным показателям его качества, методам и средствам производства, испытания и контроля. Показатели качества должны быть оптимальными в планируемом промежутке времени, при которых заданная цель достигается с минимальными затратами и обеспечивается наибольший технико-экономический эффект при проектировании, производстве и эксплуатации изделий.

Научно-технической базой ОС являются результаты научных исследований и новые технические решения (изобретения), которые приняты к реализации, а также методы оптимизации параметров продукции с учетом прогноза потребностей в ней.

Опережающие стандарты выполняют в виде ступенчатых стандартов, которые устанавливают нормы и требования к продукции с поэтапными сроками их введения и возрастающими требованиями к показателям качества.

На некоторые группы однородной продукции могут разрабатываться стандарты с перспективными требованиями, которые относятся к стандартам общих технических требований. В них устанавливают три ступени уровня качества продукции, дифференцированные по времени в зависимости от степени подготовленности производства.

На первой ступени устанавливают требования к ранее освоенной продукции, на второй – ко вновь разрабатываемой, на третьей ступени устанавливается мировой уровень перспективных требований, которым должна соответствовать продукция.

Перспективная стандартизация предусматривает выбор приоритетных направлений стандартизации на современном этапе, таких как экология и безопасность, информационные технологии и ресурсосбережение.

Межотраслевые комплексные системы стандартизации (ЕСКД, ЕСТД, СПКП – система показателей качества продукции и т. д.) являются специфической формой комплексной стандартизации. ЕСКД действует с 1971 года и устанавливает единые для всех предприятий порядок организации проектирования, правила выполнения и оформления чертежей, что способствует упрощению проектно-конструкторских работ, повышению качества и уровня взаимозаменяемости изделий, облегчению чтения и понимания чертежей в разных организациях. Стандарты ЕСКД способствуют взаимному обмену конструкторской документацией между организациями и предприятиями без ее переоформления, расширению унификации при конструкторской разработке проектов изделий, упрощению конструкторских документов и графических изображений. Основным направлением перспективного развития ЕСКД является создание автоматизированных систем управления (АСУ) и систем автоматизированного проектирования (САПР).

Так, на Минском тракторном заводе была создана автоматизированная система управления производством (АСУП), которая позволила предприятию выйти на более высокий уровень управления. На заводе эффективно работают более 2000 персональных компьютеров, большая часть которых включена в локальную вычислительную сеть. Корпоративно-информационная система позволяет решать задачу формирования директивных планов производства по основной и сопутствующей продукции, запчастям и кооперативным поставкам. Выполняется расчет подетальных и цеховых планов, составляются уточненные задания, проводится баланс движения деталей.

Экономическая эффективность стандартизации может быть определена в масштабе всего народного хозяйства, отрасли или предприятия.

На первом этапе производится предварительная оценка эффективности стандартов, подлежащих разработке. Она характеризуется коэффициентом эффективности и определяется по формуле

$$K_{\text{эс}} = \frac{\Delta \mathcal{E}_0}{\Delta \mathcal{Z}_0},$$

где $\Delta \mathcal{E}_0$ – ожидаемая экономическая эффективность от внедрения стандарта;

$\Delta \mathcal{Z}_0$ – ожидаемая сумма затрат на реализацию мероприятий по стандарту.

Составляющая $\Delta \mathcal{E}_0$ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E}_0 = \Delta \mathcal{E}_0^{\text{пр}} + \Delta \mathcal{E}_0^{\text{изг}} + \Delta \mathcal{E}_0^{\text{экс}},$$

где $\Delta \mathcal{E}_0^{\text{пр}}$, $\Delta \mathcal{E}_0^{\text{изг}}$, $\Delta \mathcal{E}_0^{\text{экс}}$ – ожидаемая экономия соответственно при проектировании, изготовлении и эксплуатации продукции.

Составляющую $\Delta \mathcal{Z}_0$ можно рассчитать по формуле:

$$\Delta \mathcal{Z}_0 = \Delta \mathcal{Z}_0^{\text{под}} + \Delta \mathcal{Z}_0^{\text{пр}} + \Delta \mathcal{Z}_0^{\text{изг}} + \Delta \mathcal{Z}_0^{\text{экс}},$$

где $\Delta \mathcal{Z}_0^{\text{под}}$ – ожидаемая сумма затрат на подготовку стандарта;

$\Delta \mathcal{Z}_0^{\text{пр}}$ – ожидаемая сумма затрат при проектировании (обучение персонала, переработка документации, приобретение нового оборудования);

$\Delta \mathcal{Z}_0^{\text{изг}}$ – ожидаемая сумма затрат при внедрении стандарта в сфере изготовления (изготовление оснастки, приобретение оборудования, перепланировка, обучение производственного персонала);

$\Delta \mathcal{Z}_0^{\text{экс}}$ – ожидаемая сумма затрат при эксплуатации (обучение обслуживающего персонала, приобретение новой техники).

Ожидаемый коэффициент эффективности стандартизации следует сравнить с коэффициентом внедрения новой техники $K_{\text{нт}}$. Если выполняется условие $K_{\text{нт}} \geq K_{\text{нт}}$, то намеченные мероприятия экономически оправданы.

На втором этапе при представлении проектов стандартов к утверждению составляются информационные карты технико-

экономической эффективности, где обосновываются преимущества стандартизируемой продукции и приводятся выводы о технико-экономической эффективности стандартов.

На третьем этапе после внедрения стандартов определяется их фактическая экономическая эффективность:

$$\mathcal{E}_{\text{ст}} = \mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_2,$$

где $\mathcal{Z}_1, \mathcal{Z}_2$ – затраты соответственно до и после стандартизации.

Экономическая эффективность стандартизации может быть достигнута при сокращении продукции до рационального уровня (повышается серийность и массовость производства) и при повышении качества продукции за счет сокращения необоснованного многообразия продукции, технологического оборудования и оснастки. Для первого случая эффективность стандартизации:

$$\mathcal{E}_{\text{ст}} = [(C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2)] B_2,$$

где C_1, C_2 – себестоимость изделия до и после стандартизации;

E_n – нормативный коэффициент эффективности затрат;

K_1, K_2 – удельные капитальные затраты на производство изделия до и после стандартизации;

B_2 – число изделий, выпускаемых после стандартизации.

9.3 Качество продукции и его менеджмент

Одной из основных целей технического контроля и стандартизации является повышение качества продукции машиностроения. Качество является комплексной характеристикой, охватывающей технико-экономические, конструктивные, эксплуатационные и технологические показатели продукции. Их (эти показатели) можно условно разделить на две группы. К первой следует отнести свойства, которые зависят от назначения машины, ее конструкции и условий эксплуатации. Вторую группу составляют характеристики, которые являются общими для любой машины. В их числе надежность, включающая безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость; технологичность конструкции, основным показателем которой по существу является себестоимость изделия; уровень стандартизации и унификации; безопасность в эксплуатации и экологич-

ность, определяющая совместимость машины с окружающей средой; эргономичность, характеризующая взаимодействие машины с оператором, эстетичность и, наконец, уровень патентной защиты, который определяется наличием (и количеством) новых технических решений, заложенных в конструкции. Это далеко не полный перечень свойств и характеристик, которые определяют качество машины. В качестве примера можно привести подход к проблеме качества профессора В. И. Баловнева, который для комплексной оценки уровня конкурентоспособности дорожных машин выделил более 30 показателей.

При серийном производстве машин требуемый уровень качества каждой отдельной машины достигается только при использовании основных принципов и методов стандартизации и технического нормирования.

Вполне очевидно, что для решения столь сложной проблемы – проблемы обеспечения заданного уровня качества машин – необходим системный комплексный подход, который способен обеспечить менеджмент качества. Менеджмент (от английского *management* – управление) качества продукции – это совокупность действий при проектировании, изготовлении и эксплуатации продукции, которые направлены на обеспечение и поддержание заданного уровня ее качества. Менеджмент качества представляет собой контроль и управление качеством на всех этапах жизненного цикла продукции, в том числе машин различного назначения. Использование англоязычного варианта термина «управление», по-видимому, способствует более эффективному и активному вхождению в мировое экономическое сообщество.

Международная организация стандартизации в стандарте ISO 8402 «Управление качеством и обеспечение качества – словарь» дает следующее определение «Качество – совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности».

Мировой опыт управления качеством представлен в пакете международных стандартов ИСО 9000. Эти стандарты являются основой более 350 тысяч сертифицированных систем управления качеством на предприятиях государственного и частного сектора в 150 странах. Эта система постоянно совершенствуется. В проекте стандартов ИСО 9000 версии 2008 года основными принципами являются стратегическое

планирование, менеджмент знаний и инновации. Их применение будет способствовать развитию предприятий за счет их способности учитывать изменения на рынке и проведения необходимых инноваций.

В Беларуси в качестве государственного стандарта действует СТБ ИСО 9001-2001, который является нормативным документом и устанавливает требования к системе управления качеством. Этот стандарт служит базой для оценки соответствия действующих на предприятиях систем качества его требованиям при проверках, а также при сертификации системы менеджмента качества.

Для комплексного учета различных аспектов деятельности отечественных предприятий, в том числе побочного действия производства на окружающую среду, используют, как правило, интегрированную систему менеджмента (ИСМ) безопасности, труда и окружающей среды (рисунок 9.5).

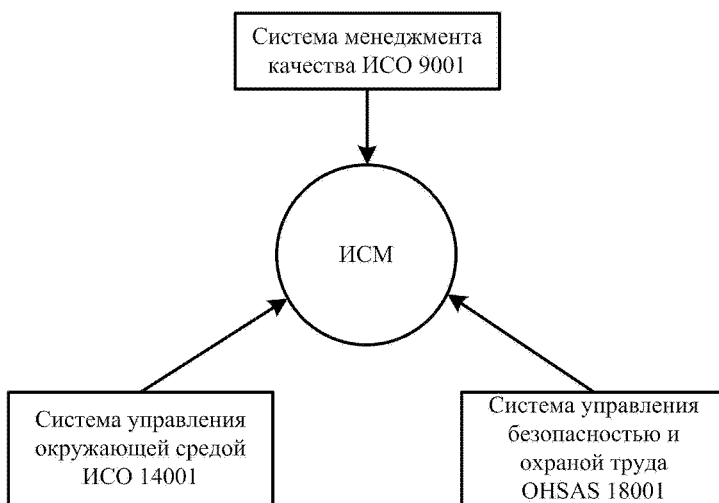


Рисунок 9.5 – Модель интегрированной системы менеджмента (ИСМ)

Эта система включает помимо упомянутого стандарта стандарт СТБ ИСО 14001-2005 «Системы управления окружающей средой. Требования и руководства по применению», применение которого дает возможность определить экологическую политику предприятия и установить четкие экологические показатели. Кроме того, учитываются требования стандарта OHSAS 18001, направленные на созда-

ние систем менеджмента безопасности и охраны труда, а также менеджмента социальной ответственности, которые снижают или исключают отрицательное воздействие производственных факторов на здоровье персонала и имущество предприятия.

Важным направлением системы менеджмента качества продукции является снижение или ликвидация неизбежных рисков, а также управление приемлемыми рисками. Риск сопутствует практически любому виду деятельности. *Риском* можно считать ожидание повреждений в объектах, системах и процессах. Их основной причиной являются неопределенности, существующие в каждом виде деятельности. Реальное осознание рисков, их устранение или снижение до допустимого уровня должен обеспечить менеджмент рисков.

Проблема и значимость риска привели к созданию международных и национальных стандартов, направленных на анализ рисков технологических систем и опасных производств (технических рисков). В СТБ ИСО/МЭК Руководство 51-2006 «Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты» *риск* определен как сочетание вероятности наступления вреда и степени тяжести последствий вреда. В СТБ ИСО/МЭК Руководство 73-2005 «Менеджмент риска. Термины и определения» риск рассматривается в более широком смысле как источник и негативных, и благоприятных последствий. *Менеджмент рисков* – это комплексный процесс, который связан с идентификацией, анализом рисков и принятием решений, направленных на усиление положительных и ослабление отрицательных последствий наступления неблагоприятных событий.

Менеджмент риска включает следующие основные этапы:

- определение стратегии управления рисками;
- идентификация их источников;
- анализ, планирование и управление рисками.

К числу основных причин (опасностей), вызывающих риски в машинах, можно отнести:

- использование машины не по назначению;
- нарушение правил и норм безопасной эксплуатации;
- использование или выделение вредных веществ при эксплуатации машины;
- несоблюдение эргономических принципов при разработке машины;

- отказ источника энергии, механические поломки деталей и другие функциональные неполадки;
- отсутствие или неправильное расположение средств безопасности.

Критериями для оценки рисков являются вероятность возникновения и последствия (тяжесть воздействия), а также их приемлемый уровень. Снизить риск для машин, если опасность неустранима, можно с применением технических мер защиты, например, предохранительных устройств, защитных ограждений и других специальных мер защиты.

Для продукции машиностроения в связи с рисками важным является выбор метода оценки несущей способности конструкции. С учетом вероятностного характера риска наиболее подходящим методом для его оценки можно считать метод предельных состояний, в котором нагрузки и напряжения, развиваемые в металлоконструкциях, рассматриваются как случайные величины или процессы. В настоящее время безопасность машин оценивается мерой риска, т. е. вероятностью отказа с учетом тяжести вреда. Так, методы предельных состояний, подтверждающие несущую способность металлоконструкций, содержащиеся в международных стандартах по кранам (ИСО 8686) обеспечивают создание кранов с расчетными рисками 10^{-6} – 10^{-8} и могут быть приняты в качестве национальных стандартов, гармонизированных с техническим регламентом по безопасности машин и оборудования.

Задача оценки риска является одной из наиболее важных в обеспечении безопасности людей и окружающей среды. БелГИССом (в дополнение к требованиям СТБ ГОСТ Р 50631-2002) разработан ряд государственных стандартов, обеспечивающих решение этой задачи для дорожных машин. В частности, разработаны госстандарты СТБ ЕН 13021-2006 «Машины для зимнего содержания дорог. Требования безопасности», СТБ ЕН 13019-2006 «Машины для очистки дорожных покрытий. Требования безопасности», СТБ ЕН 13524-2007 «Машины для содержания автомобильных дорог. Требования безопасности», устанавливающие гармонизированные с европейскими требованиями безопасности к машинам для содержания автомобильных дорог.

В этих стандартах рассмотрены все существенные опасности, возникающие при применении машин для содержания автомобильных дорог (кроме опасностей, связанных с шумом и электромагнит-

ной совместимостью). Приведены технические мероприятия по устранению или уменьшению рисков, исходящих от опасностей при работе машин, их наладке, регулировке, разгрузке и периодическом техническом обслуживании.

Стандарт СТБ ЕН 13019-2006 распространяется на съемное и постоянно установленное на шасси оборудование для удаления смета с проезжей части автомобильной дороги, к которым относятся машины с пневматической и механической подачей мусора в бункер, оборудование для очистки, полива и мойки, транспортирующее оборудование, системы погрузки и бункеры для сбора мусора и наносов. Стандарт устанавливает требования безопасности к машинам, их составным частям, к органам управления и защитным устройствам, а также методы проверки этих требований.

СТБ ЕН 13021-2006 охватывает машины, предназначенные для поддержания проезжей части дорог от льда и снега в зимних условиях. Требования безопасности этого стандарта распространяются на плужные снегоочистители, снегоочистительные машины с роторными, плужно-роторными и шнекороторными рабочими органами, разбрасывателями антигололедных составов со шнековым и ленточным конвейером. В стандарте изложены требования к конструкции машин и их составных частей, к органам управления, гидравлическим и пневматическим системам, а также приведены методы проверки этих требований.

СТБ ЕН 13524-2007 распространяется на машины, которые, находясь на проезжей части, обрабатывают ее и прилегающие к ней территории. Это механические подметально- и мусороуборочные, мульчирующие, бурильные машины, машины для обслуживания обочин и скашивания растений, для очистки оборудования автомобильных дорог и др. Стандарт устанавливает требования безопасности к конструкции машин и их составных частей, органам управления, гидравлическим и пневматическим системам, системам безопасности и специальным системам защиты и защитным ограждениям движущихся частей. В этих стандартах приведены перечни опасностей и опасных ситуаций, которые посредством оценки риска могут быть идентифицированы, и предприняты меры к исключению или уменьшению риска.

Примером менеджмента может служить управление качеством процесса изготовления зубчатых передач трансмиссий на МТЗ, где

осуществляется системный подход к реализации производственного цикла. Требуемая надежность зубчатого колеса зависит от значительного количества параметров. Поэтому при проведении технологического процесса осуществляется мониторинг измерений параметров детали после каждой операции и их сравнение с требованиями ТНПА. К критериям, позволяющим на предприятии количественно и качественно характеризовать технический уровень и надежность деталей и узлов трансмиссий автотракторной техники относятся:

- качество упрочненного путем цементации слоя и сердцевины зубчатых колес;

- изменение прочностных свойств металла в процессе технологического передела (заготовительные операции, предварительная термическая обработка, механическая обработка);

- надежность, характеризующая наступление предельных состояний деталей трансмиссий в зависимости от качества исходного материала, уровня технологии и контроля показателей качества.

Для обеспечения качества зубчатых передач на МТЗ разработана информационная система ТНПА, которая позволяет решать задачи по прогнозированию надежности изделий, формировать системы управления качеством и т. д. Такой системный подход является основой для решения задач по изготовлению конкурентоспособной техники новых поколений.

9.4 Сертификация продукции машиностроения

Сертификация (от средневекового лат. *certifico* – удостоверяю) является одной из наиболее эффективных форм подтверждения качества продукции машиностроения. В ее основе лежат оценка и возможное подтверждение соответствия продукции установленным нормам и требованиям, которые гарантируют необходимый уровень качества этой продукции. При производстве машин или другой достаточно сложной продукции машиностроения наличие сертификата у покупных изделий (деталей, узлов, агрегатов) позволяет отказаться от проведения дополнительных испытаний или специального выходного контроля.

Сертификацией называют комплекс действий, проводимых с целью подтверждения соответствия изделия (или процесса) требовани-

ям международных или национальных стандартов, а также других документов, взаимно согласованных изготовителем и потребителем продукции.

К основным целям сертификации следует отнести:

- контроль безопасности продукции для окружающей среды, жизни людей, их здоровья и имущества;
- подтверждение показателей качества продукции, заявленных изготовителем;
- содействие потребителю в компетентном выборе продукции и его защиту от недобросовестности изготовителя;
- содействие экспорту и повышению конкурентоспособности продукции отечественных производителей на международном рынке.

Расширение международных технико-экономических и производственных связей, торговых отношений привело к необходимости разработки национальной системы сертификации (системы подтверждения соответствия), общие принципы которой учитывают международный опыт и рекомендации ИСО.

В Советском Союзе сертификацию осуществляли только для отдельных видов экспортируемой продукции с учетом требований к ее качеству стран, потребляющих эту продукцию. Кроме того, в СССР существовала своеобразная оценка соответствия продукции установленным требованиям в виде ее аттестации по категориям качества, а также в виде государственных испытаний и государственной приемки продукции.

Наша национальная система подтверждения соответствия (сертификации) включает субъекты (уполномоченные госорганы, аккредитованные центры, испытательные лаборатории и др.), а также нормативные правовые акты и ТНПА в области технического нормирования и стандартизации, которые определяют правила и порядок подтверждения соответствия. Ее структура приведена на рисунке 9.6.

В рамках упомянутой системы предусмотрены различные виды деятельности, в их числе:

- сертификация и декларирование соответствия продукции;
- сертификация систем управления качеством, включая системы экологического менеджмента;
- сертификация персонала;
- инспекционный контроль за сертифицированной продукцией;
- подготовка и сертификация экспертов-аудиторов по качеству.

публики Беларусь. Основные положения» (ТКП 5.1.01-2004), «Порядок сертификации продукции. Основные положения» (ТКП 5.1.02-2004), «Порядок сертификации систем менеджмента качества» (ТКП 5.1.05-2004), «Порядок декларирования соответствия продукции. Основные положения» (ТКП 5.1.03-2004).



Рисунок 9.7 – Составные элементы сертификации

БелГИСС выполняет функции национального института по стандартизации и сертификации. На его базе имеется национальный фонд стандартов, насчитывающий около 200 тысяч международных, межгосударственных и национальных стандартов. БелГИСС аккредитован (с 1994 года) в национальной системе сертификации как орган по сертификации продукции машиностроения, в том числе строительных и дорожных машин, а также машин для земляных работ.

Для проведения сертификации отечественная система подтверждения соответствия располагает собственными правилами процедуры управления. Международное сотрудничество в области оценки соответствия осуществляется с соблюдением общепринятых принципов и норм международного права на основе законодательства нашей страны.

По степени ответственности сертификацию разделяют на *обязательную* и *добровольную*. Характер и обязательность сертификации

продукции, услуг или персонала определяются нашим законодательством подтверждения соответствия, в том числе требованиям ТНПА в области технического нормирования и стандартизации.

Продукция машиностроительного комплекса подлежит *обязательной сертификации*. Любая другая продукция, на которую установлены требования безопасности для жизни, здоровья, имущества граждан и охраны окружающей среды, также подлежит обязательной сертификации.

Добровольная сертификация не регулируется государственными органами и осуществляется по инициативе заявителя с целью обеспечения конкурентоспособности своей продукции. В частности, большинство зарубежных передовых предприятий, выпускающих строительные, дорожные и подъемно-транспортные машины, не ограничиваются получением обязательных сертификатов соответствия на свою продукцию. Они широко используют добровольную сертификацию систем управления качеством (в рамках стандартов ИСО 9000), что является гарантом стабильности качества их продукции и позволяет успешно конкурировать на международном рынке.

В случае положительного результата по сертификации сертифицированная продукция должна маркироваться «Национальным знаком соответствия Республики Беларусь». Кроме того, она обязана быть зарегистрирована в Реестре Национальной системы сертификации, в котором регистрируются все системы сертификации и знаки соответствия, которые этой системой признаны.

Виды и схемы сертификации машиностроительной продукции, принятые в нашей стране, опираются на международные нормы и правила и во многом определяются уровнем сложности конструкции и потенциальной опасностью этой продукции. Чем сложнее изделие и выше потенциальная опасность его применения для здоровья людей и окружающей среды, тем детальнее оценка его характеристик и обширнее испытания, обеспечивающие необходимый уровень доказательности.

Методы оценки соответствия аналогичны схемам сертификации, применяемым в странах ЕС. Право постановки продукции на европейский рынок определяется соответствием этой продукции требованиям европейских стандартов.

Основными методами оценки и доказательства соответствия являются *контроль, измерения и испытания*. Выбор метода осуществляется в зависимости от задач, поставленных испытательной лабораторией

сертификации. Доказательной базой оценки соответствия являются протоколы испытаний и оформленные на их основе сертификаты соответствия. Кроме протоколов испытаний предприятие должно сформировать файл технической документации, который включает:

- чертеж общего вида;
- конструкторскую документацию;
- протоколы испытаний;
- сертификаты соответствия;
- результаты анализа и оценки риска;
- схемы управления (электрическую, гидравлическую, пневматическую);
- перечень европейских стандартов, применяемых при разработке, изготовлении и контроле продукции.

На рисунке 9.8 показана классификация видов контроля, применяемых при сертификации.

Классификация основных видов испытаний представлена на рисунке 9.9.

Нормативно-методической базой испытаний являются:

- комплексы стандартов, предназначенных для определения организационно-методических и нормативно-технических основ испытаний, системы разработки и постановки продукции на производство, госсистемы обеспечения единства измерений;
- нормативно-технические документы, которые регламентируют требования к продукции, методам и средствам ее испытаний.

Процесс испытаний включает в себя следующие основные составляющие:

1) объект – продукция (например, колеса, кабина, дорожно-строительные машины и т. д.), подвергаемая испытанию;

2) условия испытания – совокупность воздействующих факторов и режимов функционирования объекта при проведении реальных испытаний или на монтажах (например, испытание снегоочистителя при температуре -40°C);

3) средства испытаний – технические устройства, которые необходимы для проведения испытаний (например, испытательное оборудование, средства измерений и т. д.);

4) исполнители – высококвалифицированный персонал, участвующий в процессе испытаний.

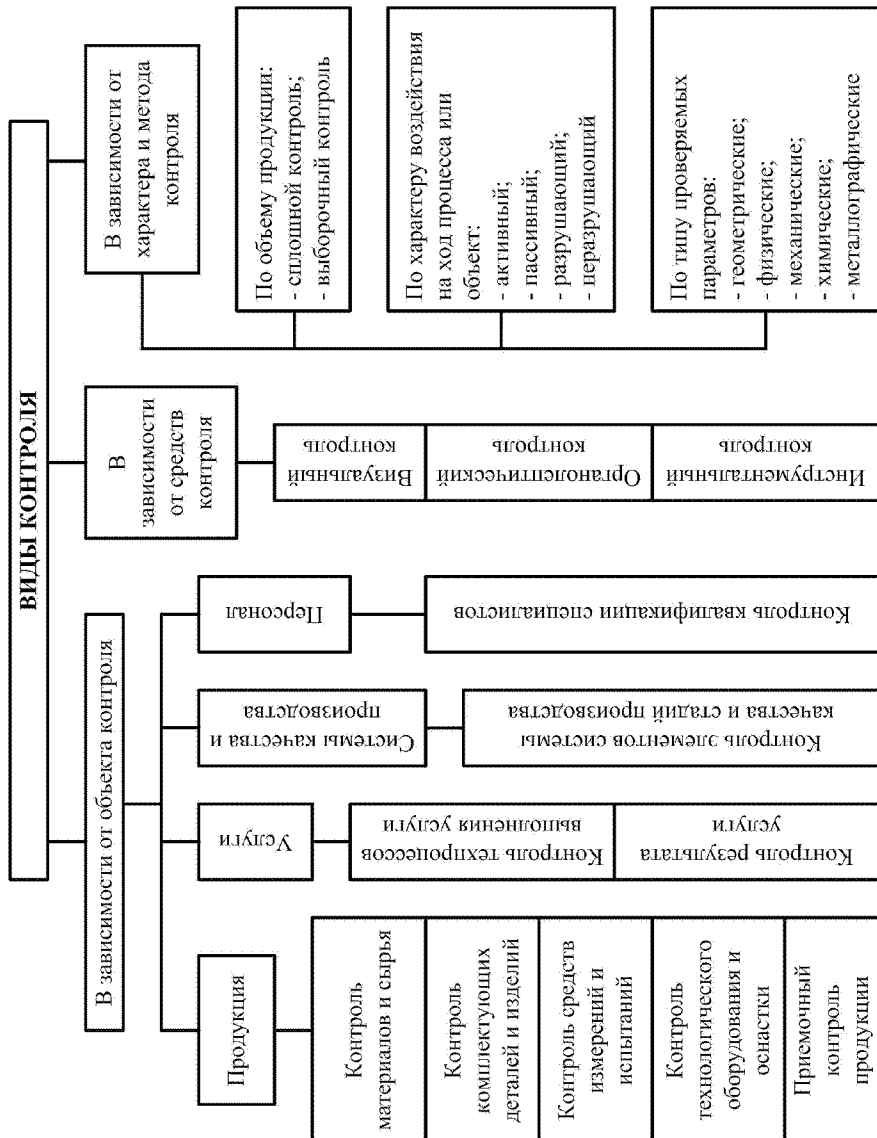


Рисунок 9.8 — Виды контроля, применяемые при сертификации

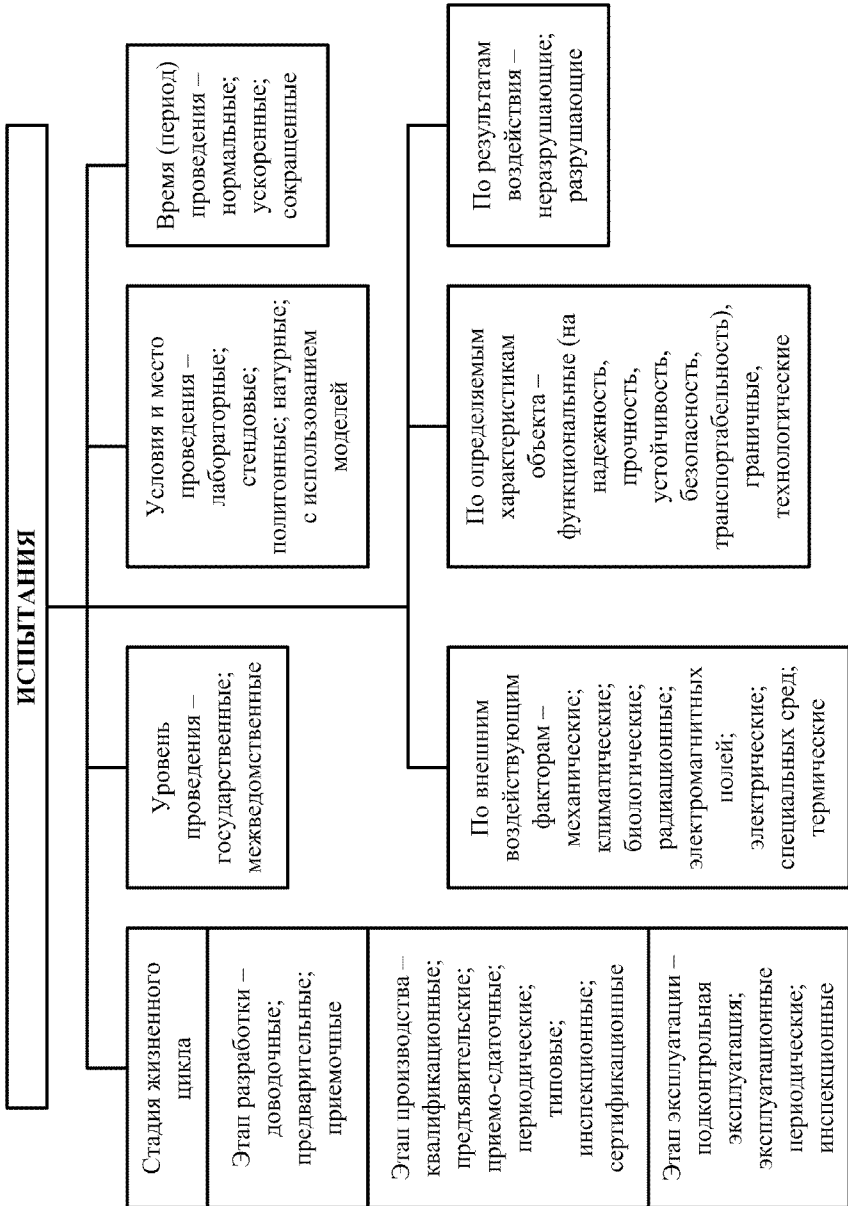


Рисунок 9.9 – Классификация основных видов испытаний

В качестве примера можно привести испытания надежности машин. Для оценки соответствия показателей надежности дорожно-строительных и землеройных машин в испытательной лаборатории проводят сертификационные испытания на надежность. (О ее показателях – безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости подробно изложено в разделе 5).

В техническом задании изложены требования, предъявляемые к продукции по надежности, в зависимости от характера которых применяют различные методы проведения испытаний:

- определительные испытания, целью которых является определение числовых значений показателей надежности (например, средняя наработка на отказ);

- контрольные испытания, устанавливающие, что значения показателей надежности испытываемой продукции не выше и не ниже некоторого значения с определенной (в ряде случаев заданной в техническом задании) вероятностью; достоинством таких испытаний являются значительно меньшие затраты времени и средств на проведение испытаний, недостатком – недостаточная информативность по сравнению с оценкой при определительных испытаниях.

Сертификационные испытания предполагают измерения выходных параметров продукции. На рисунке 9.10 представлена классификация различных видов измерений.

Упомянутые ранее стандарты ИСО 9000 предусматривают применение статистических методов как самостоятельного элемента системы качества предприятий в процессе сертификации. Все методы статистического анализа, применяемые для сертификации продукции, делятся на две группы:

- методы, которые применяют для оценки соответствия продукции требованиям нормативно-технических документов;

- методы, используемые для регулирования качества технологических процессов органами по сертификации и испытательными лабораториями для управления внутренними рабочими процедурами, а также на предприятиях при подготовке к сертификации систем качества.

Развитию современного производства транспортных средств соответствует устойчивая тенденция к увеличению видов и числа электроуправляемых узлов и компонентов, которые способствуют повышению их комфортности и надежности. Вся продукция должна соот-

ветствовать современным международным требованиям, в том числе и по параметрам электромагнитной совместимости. БелГИСС провел ряд организационно-технических мероприятий, которые направлены на расширение области аккредитации органа по сертификации, а также на создание технической базы по измерениям и испытаниям (в том числе в области электромагнитной совместимости транспортных средств) согласно требованиям Правил ЕЭК ООН № 10 и СТБ ГОСТ Р 51318.12.



Рисунок 9.10 – Классификация видов измерений

Например, на Борисовском заводе «Автогидроусилитель» имеются центральная заводская лаборатория и испытательный центр, аккредитованные на техническую компетентность в соответствии с требованиями СТБ ИСО МЭК 17025-2001. Они гарантируют проведение необходимых испытаний, результаты которых используются

при проведении сертификации продукции и обеспечивают ее конкурентоспособность на внешнем рынке. Получено 30 сертификатов Республики Беларусь на 251 изделие. Эти сертификаты соответствуют требованиям российских ТНПА, например, ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки», ГОСТ 17411-91 «Гидроприводы объемные. Общие технические требования» и др. В 1999 году предприятием получен сертификат соответствия требованиям СТБ ИСО 9001-1996 системы менеджмента качества, которая в 2003 году была сертифицирована Национальным органом по оценке соответствия Республики Беларусь на соответствие требованиям СТБ ИСО 9001-2001.

Доля сертифицированной продукции ОАО «Амкодор» более 80 моделей и модификаций машин превышает 93 %, при том, что удельный вес новой продукции составляет около 46 %.

Сертификация продукции машиностроения является необходимым и обязательным условием ее реализации за пределы нашей страны. По существу сертификат является базовым документом, на основании которого производится первичная оценка продукции, ее технико-экономических, эксплуатационных, экологических и других характеристик.

10.1 Себестоимость, окупаемость и экономичность техники

При создании новой машины важно правильно оценить целесообразность ее внедрения в народное хозяйство путем анализа степени соответствия машины предъявляемым требованиям конкурентоспособности с существующими зарубежными и отечественными аналогами и определения экономического эффекта от ее использования на строительных, дорожных и земляных работах. При условии выполнения указанных требований важным критерием оценки машины является ее *экономичность*. Экономичность машины должна оцениваться с двух позиций: экономичность изготовления (себестоимость) и экономичность эксплуатации.

Новая машина может быть признана эффективной, если ее применение экономит больше общественно необходимого труда, чем израсходовано на ее создание.

В себестоимость включаются все производственные издержки предприятия-изготовителя, за исключением расходов на непромышленные подразделения. В общем случае себестоимость продукции включает следующие **виды затрат**:

- основные материалы с учетом возврата отходов;
- заработную плату со всеми необходимыми начислениями;
- стоимость всех видов используемой энергии;
- закупку и эксплуатацию инструмента;
- амортизацию оборудования и здания (сооружения), их текущий ремонт.

Дополнительно в себестоимость продукции входят:

- отчисления на социальное страхование;
- проценты за банковский кредит;
- отчисления в государственный фонд содействия занятости;

– взносы по обязательному медицинскому страхованию работающих.

Издержки подразделяются на постоянные и переменные. К *постоянным* издержкам относятся расходы, которые остаются неизменными для любого количества производимой продукции, – плата за аренду помещения, затраты на оборудование, оплата управленческого и административного персонала и т. п.

Переменные (прямые) издержки меняются в прямой зависимости от объема производства. Из рисунка 10.1 видно, что динамика переменных издержек неравномерна. По мере роста производства, они первоначально растут очень быстро, а затем при дальнейшем увеличении объема продукции начинает сказываться фактор экономии за счет массового производства: рост переменных издержек становится более медленным, чем увеличение продукции.

Общие (валовые) издержки C_{Σ} представляют собой сумму постоянных $C_{\text{пос}}$ и переменных $C_{\text{пер}}$ издержек при каждом конкретном уровне производства. На рисунке 10.1 показана зависимость общих издержек C_{Σ} от объема производимой продукции Q .

Неравномерное изменение валовых издержек производства всего объема продукции приводит к тому, что по мере роста объема производства меняются издержки на единицу продукции (средние издержки), которые равны отношению валовых издержек к производственному количеству товара

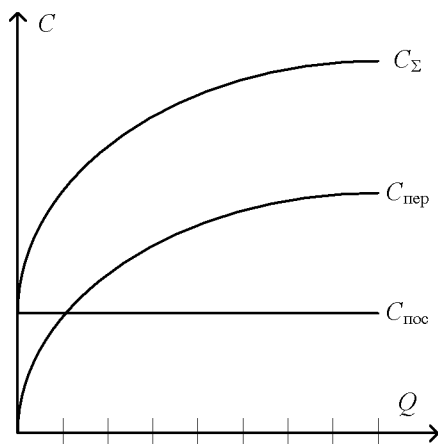


Рисунок 10.1 – Зависимость общих издержек от объема производимой продукции

$$\bar{C} = \frac{C_{\Sigma}}{Q}.$$

Величину средних издержек необходимо минимизировать, т. е. выбирать оптимальный объем производства продукции, при котором средние издержки будут наименьшими (рисунок 10.2).

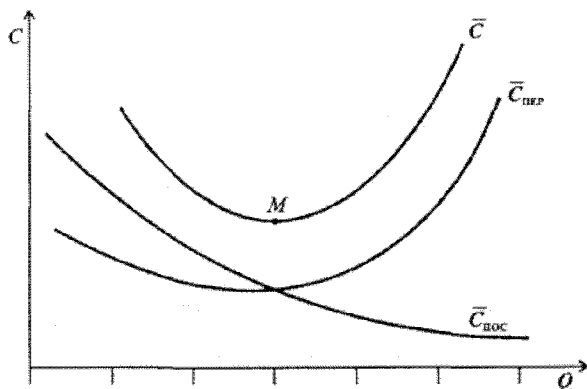


Рисунок 10.2 – Зависимость средних издержек, средних и постоянных переменных от объема продукции

Высокие средние издержки в начале производства объясняются тем, что большие постоянные издержки приходятся на большее число единиц продукции и средние издержки быстро падают, доходя минимума в точке M . По мере роста объема производства на величину средних издержек начинают оказывать влияние не постоянные, а переменные издержки, связанные с ростом затрат на сырье и рабочую силу. Поэтому кривая C начинает идти вверх. При этом величина средних издержек непосредственно зависит от среднего значения постоянных издержек $C_{\text{пос}}$ и среднего значения переменных издержек $C_{\text{пер}}$. Кроме того, при увеличении объема производства на единицу продукции, общие издержки возрастают на величину предельных издержек.

Связь доходов и издержек с объемом производимого товара описывается путем оценки валового дохода D_{Σ} – общей стоимости производимого товара:

$$D_{\Sigma} = P Q,$$

где P – стоимость единицы продукции;
 Q – количество реализуемого товара.

Кроме того, при анализе этой связи следует учитывать средний и предельный доходы.

Средний доход \bar{D} – это валовой доход, отнесенный к объему продукции:

$$\bar{D} = D_{\Sigma} / Q .$$

Предельный доход $D_{\text{пред}}$ – это приращение ΔD_{Σ} валового дохода, при увеличении объема производства на единицу продукции ΔQ

$$D_{\text{пред}} = \Delta D_{\Sigma(n+1)} - \Delta D_{\Sigma(n)} = \Delta D_{\Sigma} / \Delta Q ,$$

где $\Delta D_{\Sigma(n)}$ – валовой доход при реализации n единиц продукции;

$\Delta D_{\Sigma(n+1)}$ – валовой доход при реализации $(n + 1)$ единиц продукции.

В настоящее время существует два принципиально различных подхода к оценке экономической эффективности – затратный и доходный. От выбора одного или другого подхода зависит выбор методики и показателей оценки экономического эффекта.

При *затратном* подходе экономический эффект определяется как разность между стоимостью новой техники и величиной совокупных затрат.

При *доходном* подходе экономический эффект определяется доходом, полученным от внедрения новой техники, или приростом прибыли от производства или использования новой техники.

Вполне очевидно, что затраты на производство новой продукции и получение прибыли от ее внедрения в народное хозяйство разнесены друг от друга на довольно значительный промежуток времени. Затраты при создании новой техники начинаются уже на стадии предпроектного исследования и растягиваются вплоть до окончания выпуска новой техники. Также во времени растягивается и получение доходов. Поэтому при оценке экономической эффективности возникает необходимость в приведении затрат и доходов к единому расчетному периоду времени, т. е. операции **дисконтирования** (от англ. *discount* – учет).

Операции дисконтирования выполняются с помощью коэффициента приведения $\alpha_t > 1$, называемого также дисконтирующим коэффициентом или дисконтирующим множителем. Если затраты были произведены до расчетного года, то их величину нужно умножить на

α_t , а величину затрат, произведенных после расчетного года, нужно разделить на α_t .

После оценки себестоимости производства новой техники необходимо определить эффективность ее эксплуатации.

В этом случае, оценивая экономическую эффективность создаваемой (создания) техники, различают такие понятия, как годовой экономический эффект, суммарный экономический эффект, срок окупаемости новой техники, внутренняя норма доходности, топливная и транспортная экономичность.

Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_{\text{год}}$, руб./год, определяется по разности приведенных затрат по эталонной и новой технике:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = (R_{\text{э}} - R_{\text{н}})Q_{\text{г.н}},$$

или

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = [(C_{\text{ед.э}} + E_{\text{н}}K_{\text{уд.э}}) - (C_{\text{ед.н}} + E_{\text{н}}K_{\text{уд.н}})]Q_{\text{г.н}},$$

где $R_{\text{э}}, R_{\text{н}}$ – приведенные затраты по эталонной и новой технике;

$Q_{\text{г.н}}$ – годовой объем выпуска новой техники, ед.пр/год;

$E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент эффективности, 1/год.

При определении годового экономического эффекта в сфере эксплуатации новой техники, а не в сфере ее производства, в приведенном выражении экономического эффекта величину $Q_{\text{г.н}}$ следует заменить годовой производительностью новой техники $W_{\text{г.н}}$, а под величинами $C_{\text{ед}}$ и $K_{\text{уд}}$ подразумевать соответственно текущие затраты на эксплуатацию техники (эталонной и новой) и удельные капитальные вложения, связанные с сооружениями и оборудованием для хранения и обслуживания эксплуатируемой техники. Последние могут определяться по расчетному значению оптовой цены $P_{\text{опт}}$, отнесенной к годовой производительности единицы продукции $W_{\text{г}}$:

$$K_{\text{уд}} = P_{\text{опт}} / W_{\text{г}}.$$

Суммарный экономический эффект \mathcal{E} обычно определяется за все годы выпуска новой техники или за полный срок ее службы T_0 :

$$\mathcal{E} = \sum_{t=1}^{T_0} (R_{\text{э}i} - R_{\text{н}i}) \cdot Q_{\text{г.н}i} \frac{1}{\alpha_t},$$

где $R_{\text{э}i}, R_{\text{н}i}$ – приведенные затраты по эталонной и новой технике, соответствующие i -му году выпуска;

$Q_{г.н}$ – годовой объем выпуска новой техники в i -м году;
 α_t – дисконтирующий коэффициент.

Срок окупаемости новой техники при затратном подходе к оценке эффективности новой техники срок ее окупаемости $T_{ок}$ определяется по формуле

$$T_{ок} = \frac{K_{уд.н} - K_{уд.э}}{C_{ед.э} - C_{ед.н}}.$$

При этом величина $T_{ок}$ не должна быть больше установленного нормативного срока окупаемости.

При доходном подходе к оценке эффективности новой техники срок окупаемости определяется отношением

$$T_{ок} = \Sigma S_t / D_t,$$

где ΣS_t – общая сумма дисконтированных затрат по новой технике;

D_t – годовой дисконтированный доход от новой техники.

Внутренняя норма доходности определяет ту норму ставки дисконта α_t , при которой наступает равенство между дисконтированными доходами и дисконтированными затратами.

Новая техника считается эффективной, если внутренняя норма доходности равна или больше дохода на вложенный капитал.

Оценка **топливной экономичности** при определении себестоимости эксплуатации машин затраты на топливо занимают высокое место. Доля расходов на топливо составляет до 60 % от величины общих затрат по использованию машин. В этой связи необходимо обращать особое внимание на реализацию мероприятий, улучшающих топливную экономичность машины. Топливная экономичность зависит от степени совершенства рабочего процесса двигателя. Известно, что замена карбюраторных двигателей дизельными позволяет снизить расход топлива машинами на 30–40 %. Об этом свидетельствует рисунок 10.3, иллюстрирующий характер изменения удельного расхода топлива в зависимости от типа двигателя и степени его загрузки.

Как следует из этого графика, у дизельного двигателя повышение удельного расхода топлива при неполном использовании мощности двигателя (характерно для транспортных режимов работы) не столь значительно, как у карбюраторного. Следовательно, с экономической

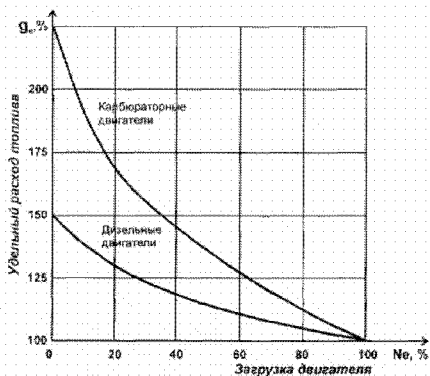


Рисунок 10.3 – Характер изменения удельного расхода топлива в зависимости от типа двигателя и степени его загрузки

Потери мощности в трансмиссии значительно ухудшают топливную экономичность, поэтому необходимо обращать особое внимание на конструкторское исполнение машин и вязкость масла, обеспечивающего снижение трения в контактах.

Показатели, отражающие влияние топливной экономичности на экономическую эффективность машины, зависят от их типа и функционального назначения. Например, этим показателем для автомобилей является отношение часовой производительности (ткм/ч) к расходу топлива (л) на 100 км пути; для машинно-тракторных агрегатов в качестве такого показателя принят расход топлива, приходящийся в среднем на единицу продукции.

К факторам, определяющим транспортную экономичность машины, относятся:

- транспортные факторы, включающие сферы производства, эксплуатации и ремонта подвижного состава, типаж и структуру машинотракторного парка;

- погрузочно-разгрузочные факторы, включающие способы и средства механизации погрузочно-разгрузочных операций и организацию их работы, типы погрузочно-разгрузочных машин и устройств, пропускную способность погрузочно-разгрузочных пунктов;

точки зрения более выгодно использовать машины с карбюраторными двигателями на низких скоростях и на тех работах, на которых мощность двигателя может быть использована полностью, а машины с дизельными двигателями – на транспортных работах с высокими скоростями движения.

Существенное влияние на повышение экономичности оказывают также снижение сопротивления качению (зависящее от характеристики шин и полной массы машины) и улучшение аэродинамических свойств машины (зависящее от лобового сопротивления, обусловленного лобовой площадью и скоростью движения).

– дорожные факторы, характеризующиеся состоянием дорог (их пропускной способностью) в разные периоды года, структурой дорожной сети, назначением и месторасположением дорог (внутрихозяйственные или «технологические» дороги, внехозяйственные дороги).

В качестве примера на рисунке 10.4 приведена классификация основных факторов, оказывающих значительное влияние на экономическую эффективность использования грузового автомобильного транспорта. Очевидно, что подобная классификация справедлива также для других видов наземных транспортных средств, но в этом случае может иметь место определенное различие в значимости воздействия отмеченных факторов на экономическую эффективность того или иного вида транспорта.

Помимо оценки экономического эффекта создания и эксплуатации новой техники, необходимо оценить затраты на ее техническое обслуживание и ремонт

Под техническим обслуживанием машины в данном случае понимается осуществление всего комплекса инженерно-технических работ, начиная от продажи и заканчивая поддержанием техники в работоспособном состоянии в течение всего срока службы.

Затраты на техническое обслуживание и ремонт возрастают с увеличением срока службы машин. Это явление называют *амортизацией*. Амортизация машин является высоким видом затрат при их использовании и достигает 70 % в структуре общих затрат на содержание техники. Исчисления амортизации производят как с учетом стоимости металлолома, на который может быть пущена машина после выработки своего ресурса, так и суммированием годовых затрат за период эксплуатации.

В первом случае среднегодовая амортизация (A) определяется по формуле

$$A = \frac{C_{\text{нм}} - C_{\text{мл}}}{L},$$

где $C_{\text{нм}}$ – стоимость новой машины;

$C_{\text{мл}}$ – стоимость металлолома;

L – срок службы машины.

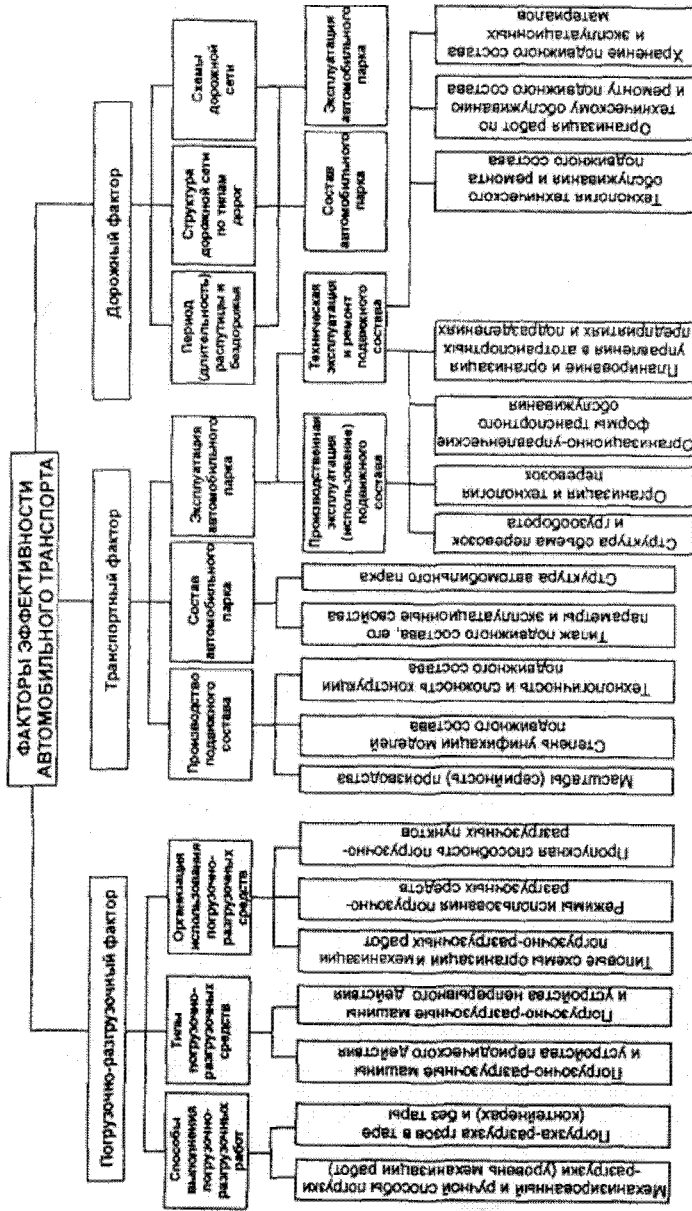


Рисунок 10.4 – Классификация факторов, влияющих на экономическую эффективность использования подвижного состава автомобильного транспорта

Во втором случае осуществляется более точная оценка остаточной стоимости машины в любом ее возрасте, с учетом того, что годовая норма амортизации уменьшается с возрастом машины. При этом величина амортизации определяется срок службы машины в годах, а затем стоимость новой машины делится на эту величину.

Затраты на ремонт машин являются второй наиболее значимой частью эксплуатационных расходов. Простои в ремонте могут оказаться гораздо выше, чем прямые затраты на ремонт.

При правильной организации ТО и ремонта производительность машин составляет 75–80 % от производительности новых в течение длительного времени их эксплуатации. При этом затраты на капитальный ремонт могут быть сокращены на 25 % от средних значений.

10.2 Пути повышения эффективности создания машин

Как уже отмечалось ранее, экономическую эффективность можно оценивать как разность между прибылью от использования вновь созданной единицы техники и себестоимостью ее создания. Кроме того, в современных условиях на повышение экономической эффективности машин большое влияние оказывает снижение экономического ущерба от загрязнения окружающей среды в результате применения данной машины.

Снижение стоимости машиностроительной продукции представляет комплексную задачу – производственную и конструкторскую. Основную роль играет рационализация производства (механизация и автоматизация производственных процессов, концентрация технологических операций, специализация заводов, производственное кооперирование и др.). Эти меры осуществимы и дают наибольший эффект при больших масштабах производства и стабильной продукции.

Экономическую эффективность можно повысить путем снижения себестоимости при реализации одного варианта технического решения создаваемой машины по сравнению с другими. То есть, очевидно, что необходимо правильно обосновывать разработку заданий на выпуск новой техники. Как правило, определенный типаж машин разрабатывается на достаточно длительный период, на который устанавливаются исходные данные для разработки технических заданий, поэтому основными требованиями к процессу создания новых машин являются обеспечение качества и повышение технического уровня машины, экономия производственных и эксплуатационных ресурсов,

безопасность для жизни и здоровья человека и охрана окружающей среды. Кроме того, применение принципов стандартизации и унификации конструкций с учетом требований и норм международных стандартов позволяет повысить технологические возможности и конкурентоспособность создаваемой машины. Разработка перспективных технических решений создаваемых новых моделей машин способствует повышению обеспечения народного хозяйства минимально необходимым количеством моделей современных технических средств, а также расширить внутренний рынок и экспортные поставки. Поэтому технические решения должны разрабатываться на основе и с учетом новейших результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Суммарные текущие затраты и капиталовложения для всех машин, входящих в параметрический ряд, также зависят от масштаба производства. При этом, чем меньше серийность производства, тем больше капиталовложения. Для выбора оптимальной структуры выпуска машин соответствующих типоразмеров необходимо, прежде всего, определить годовой объем работ, подлежащий выполнению этими машинами, с учетом того, что для выполнения плановых объемов работ используется определенное количество выпущенных ранее машин, поэтому при расчете объема работ, который должна выполнять новая техника, следует учитывать лишь годовой прирост объема работ, соответствующих началу серийного выпуска новой техники. Кроме того, должен быть учтен износ и выход из строя старой техники, которая должна быть заменена новой техникой. Естественно, что новая техника должна быть более производительной по сравнению с прежней. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо учесть и относительные показатели производительности сравниваемых моделей машин. При прочих равных условиях потребное количество новой техники уменьшится во столько раз, во сколько раз увеличится производительность машины. При этом соответственно во столько же раз возрастает полезный годовой фонд одной машины нового поколения. Определив таким образом общий объем работ и ориентируясь на потребности народного хозяйства, устанавливают структуру типажа машин. Соответствие выпуска машин фактической потребности в них позволяет снизить затраты на приобретение новой техники.

Прежде чем вводить в эксплуатацию ту или иную новую модель, необходимо оценить ее **технический уровень** с учетом различных

характеристик – от режимных, размерных и весовых до эксплуатационных и конструктивно-производственных. К эксплуатационным, в частности, относятся производительность и *экономичность*.

К способам повышения технического уровня машины относятся снижение удельной массы машины, а также повышение ее энергоемкости и производительности. Правильное обоснование способов повышения технического уровня машин играет важную роль при определении предельных затрат, связанных с улучшением качественных показателей машин. Однако следует иметь в виду, что улучшение отмеченных показателей не должно приводить к снижению надежности.

Значительный экономический эффект дают стандартизация и унификация деталей, узлов и агрегатов. Стандартизация является существенным фактором снижения себестоимости машин и ускорения проектирования.

Унификация способствует сокращению номенклатуры деталей и уменьшению стоимости их изготовления, упрощению эксплуатации и ремонта машин, а также сокращению номенклатуры обрабатывающего, мерительного и монтажного инструмента.

Повышение качества и конкурентоспособности продукции, кроме того, должно соответствовать требованиям международных стандартов, в том числе и **экологической безопасности**.

В настоящее время машиностроение и транспортные системы, являясь основными потребителями природных ресурсов и энергии, играют определяющую роль в загрязнении окружающей среды. Поэтому экологическая безопасность машины должна оцениваться по следующим показателям:

- потребление природных ресурсов;
- расход энергии;
- загрязнение окружающей среды (атмосферы, гидросферы и литосферы).

На основании оценки экологического ущерба, наносимого окружающей среде работой машины, делается вывод о целесообразности методов улучшения экологических показателей машины. Так, например, уменьшение расхода топлива и выброса вредных веществ машиной в условиях эксплуатации может быть достигнуто уменьшением массы машины, снижением сопротивления движению, повышением КПД двигателя.

Таким образом, повышение экономичности машины с учетом экологических аспектов ее создания осуществляется за счет снижения потребления материалов и топлива, расширения функциональности, обеспечения наилучших характеристик, выбора экологически приемлемых материалов, минимизации затрат энергии на перемещение за счет снижения веса, проектирования технологических процессов, способствующих меньшей энергоемкости и меньшим выбросам вредных веществ и отходов, повышения надежности и долговечности.

Не менее важным аспектом повышения экономической эффективности машин является расширение **функциональности** машины.

Функциональная целесообразность – принцип, означающий соответствие выбранного решения поставленной задаче, которая должна быть выполнена без превышения необходимых затрат.

Функциональная целесообразность предусматривает обеспечение минимально допустимых показателей прочности и жесткости без увеличения массы и удорожания изготовления и эксплуатации устройства.

Важно обеспечить технологичность конструкции за счет применения прогрессивных методов обработки при одновременном повышении качества, точности и взаимозаменяемости частей, т. е. за счет технологичности сборки и ремонта.

Задача конструктора состоит в создании машин, отвечающих потребностям экономики, дающих наибольший экономический эффект и обладающих наиболее высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями.

При конструировании машин следует предусматривать резервы их развития, что позволяет систематически совершенствовать машины и поддерживать их показатели на уровне возрастающих требований техники, избавляет от необходимости периодической замены устаревших моделей, обеспечивает на долгие годы стабильный выпуск одной конструкции, дает большой экономический эффект и является одним из главных способов снижения стоимости машиностроительной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в Беларуси заложены основы формирования развернутой инновационной системы и созданы условия, при которых результаты научно-технической деятельности успешно реализуются в производстве в виде технических и технологических инноваций. Современная стратегия отечественной научно-технической политики направлена на повышение конкурентоспособности национальной экономики, наращивание экспортного потенциала, энерго- и ресурсосбережение. Поэтому современное состояние строительного, дорожного и подъемно-транспортного машиностроения характеризуется необходимостью существенного роста качества и потребительских свойств машиностроительной продукции.

Между тем глобализация современного мира, активное международное научно-техническое сотрудничество, наличие надгосударственной инфраструктуры предприятий машиностроительного комплекса, широкие возможности размещения производств в регионах с дешевой рабочей силой ставят перед отечественным машиностроением непростые задачи по обеспечению конкурентоспособности своей продукции. Косвенным подтверждением больших резервов нашего производственного комплекса является небольшая доля отечественных передовых технологий в промышленности. По данным Национального статистического комитета, опубликованным к 1-му съезду ученых Беларуси, $\frac{3}{4}$ прироста использования передовых технологий в 2006 году формировалось за счет их импорта, т.е. производственный комплекс страны в основном потребляет импортные технологии. Поэтому в числе задач, требующих скорейшего решения, модернизация материально-технической базы, включая оснащение автоматизированными линиями специализированных производств, замену устаревших технологий более современными, обеспечивающими качественный рост потребительских свойств продукции, сокращение потребления импортных комплектующих и организация производства высококачественных отечественных аналогов. Решение этих задач, а также использование современных достижений в области материало-

ведения и технологии материалов, автоматизации и компьютеризации проектирования, изготовления и эксплуатации машин могут обеспечить конкурентные преимущества отечественной продукции на внешнем и внутреннем рынках, а также расширить гамму отечественных машин, обладающих низкими удельными показателями материало- и энергоемкости и отвечающих жестким требованиям международных стандартов по энергосбережению, экологии, эргономике.

Современные темпы развития научно-технического обеспечения машиностроения настолько высоки, что специалист, считающий себя профессионалом, обязан постоянно заниматься самообразованием и следить за новыми научно-техническими разработками в своей и смежных областях, не останавливаясь на том объеме знаний, который дала высшая школа. Будущие (и состоявшиеся) специалисты по проектированию, модернизации и эксплуатации машин для строительных, дорожных, путевых, коммунальных работ должны постоянно учиться, повышая свой научный и технический потенциал, уровень общих и специальных знаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Армированные пластики / В. А. Бунаков [и др.]. – М. : Изд-во МАИ, 1997. – 404 с.
- 2 **Бирюков, М. П.** Детали машин. Расчеты на надежность / М. П. Бирюков, П. М. Бирюков. – Минск : ВУЗ-юнити, 1999. – 272 с.
- 3 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах : учеб. для вузов / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Выш. шк., 1999. – 374 с.
- 4 **Бочаров, В. С.** Основы качества и надежности строительных машин / В. С. Бочаров, Д. П. Волков. – М. : Машиностроение, 2003. – 255 с.
- 5 **Добронравов, С. С.** Строительные машины и основы автоматизации : учеб. для строит. вузов / С. С. Добронравов, В. Г. Дронов. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2006. – 575 с.
- 6 **Довгяло, В. А.** Двигатели внутреннего сгорания путевых и дорожно-строительных машин : учеб. пособие / В. А. Довгяло, Д. И. Бочкарев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2006. – 229 с.
- 7 **Довгяло, В. А.** Композиционные материалы и покрытия на основе полимеров / В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 256 с.
- 8 Дорожно-строительные машины и комплексы : учеб. пособие / В. И. Баловнев [и др.]. – Москва-Омск : Изд-во СибАДИ, 2001. – 528 с.
- 9 **Доценко, А. И.** Строительные машины : учеб. для вузов / А. И. Доценко. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
- 10 **Зорин, В. А.** Основы работоспособности технических систем / В. А. Зорин. – М. : Магистр-Пресс, 2005. – 536 с.
- 11 **Ивашков, И. И.** Монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин : учеб. для вузов / И. И. Ивашков. – М. : Машиностроение, 1991. – 400 с.
- 12 **Капе, М. М.** Основы научных исследований в технологии машиностроения / М. М. Капе. – Минск : Выш. шк., 1987. – 232 с.
- 13 **Карпенко, Е. М.** Менеджмент качества : учеб. пособие / Е. М. Карпенко, С. Ю. Колеков. – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – 208 с.
- 14 **Кириллов, Ф. Ф.** Технические основы создания машин : учеб. пособие / Ф. Ф. Кириллов, Д. П. Добжинский. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1991. – 184 с.
- 15 **Крайнев, А. Ф.** Идеология конструирования / А. Ф. Крайнев. – М. : Машиностроение, 2003. – 384 с.
- 16 **Красов, А. С.** Основы художественного конструирования промышленных изделий / А. С. Красов. – М. : МВХП, 1989. – 286 с.
- 17 **Кряжков, В. М.** Основы надежности сельскохозяйственной техники / В. М. Кряжков, Л. С. Ермолов. – М. : Колос, 1982. – 246 с.
- 18 **Ксенович, И. П.** Наземные тягово-транспортные системы : энциклопедия / И. П. Ксенович, В. А. Гоберман, Л. А. Гоберман. – М. : Машиностроение. – 2003 – Т.1. – 744 с., Т.2. – 880 с., Т.3. – 788 с.

- 19 **Новицкий, Н. И.** Управление качеством продукции / Н. И. Новицкий. – М. : Новое время, 2002. – 368 с.
- 20 Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения : учеб. для техникумов / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 295 с.
- 21 Основы стандартизации и сертификации товарной продукции : учеб. пособие / В. Е. Сыцко [и др.] ; под общ. ред. В. Е. Сыцко. – 2-е изд., испр. – Минск : Высш. шк., 2008. – 208 с.
- 22 **Орлов, П. И.** Основы конструирования / П. И. Орлов. – М. : Машиностроение, 1977. – Т.1. – 623 с., Т.2. – 574 с., Т.3. – 360 с.
- 23 **Половинкин, А. И.** Основы инженерного творчества / А. И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 294 с.
- 24 Ремонт строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин : учеб. для вузов / А. В. Каракулев [и др.]. – М. : Транспорт, 1988. – 303 с.
- 25 **Решетов, Д. Н.** Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.
- 26 **Самбук, Г. П.** Основы стандартизации, метрологии, сертификации : учеб.-метод. пособие / Г. П. Самбук, Р. Н. Вострова, Л. П. Богданович ; М-во образования Респ. Беларусь. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 334 с.
- 27 **Сомов, Ю. С.** Композиция в технике / Ю. С. Сомов. – М. : Машиностроение, 1972. – 280 с.
- 28 **Сомов, Ю. С.** Художественное конструирование промышленных изделий / Ю. С. Сомов. – М. : Высш. шк., 1967. – 175 с.
- 29 **Сосновский, Л. А.** Элементы теории вероятности, математической статистики и теории надежности : учеб. пособие / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 1994. – 146 с.
- 30 **Суровегин, Ю. В.** Технические основы создания машин : учеб.-метод. пособие / Ю. В. Суровегин. – Могилев : ММИ, 1993. – 101 с.
- 31 Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 583 с.
- 32 Технические основы создания машин : учеб. для вузов / под ред. С. Г. Шгарева. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2007. – 148 с.
- 33 Технология машиностроения / Л. В. Лебедев [и др.]. – М. : Издат. центр «Академия», 2006. – 528 с.
- 34 **Труханов, В. М.** Надежность изделий машиностроения. Теория и практика / В. М. Труханов. – М. : Машиностроение, 1996. – 336 с.
- 35 **Хазов, Б. Ф.** Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
- 36 **Холодов, А. М.** Технические основы создания машин : учеб. для вузов / А. М. Холодов, В. К. Руднев, В. Н. Гарнец. – К. : УМК ВО, 1992. – 300 с.
- 37 Эксплуатация дорожных машин / А. М. Шейнин [и др.]. – М. : Транспорт, 1992. – 328 с.

Учебное издание

ДОВГЯЛО Владимир Александрович
ЩЕМЕЛЕВ Анатолий Мефодьевич
ВАВИЛОВ Антон Владимирович
ЛЕОНОВИЧ Иван Иосифович

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ МАШИН

Учебное пособие

Редактор *И.И. Эвентов*
Технический редактор *В.Н. Кучерова*
Корректор *М. П. Дежко*
Компьютерный набор и верстка *Ю.А. Шебзухова*

Подписано в печать 17. 12. 2009 г. Формат 60х84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 19,18. Уч.-изд. л. 17,72. Тираж 350 экз.
Зак. № 3336. Изд. № 104.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛПИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛПИ № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.