

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Конспект лекций

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	2
Лекция 1. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАШИН.....	4
Лекция 2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН.....	7
Лекция 3. Себестоимость машины и методы ее определения.....	11
Лекция 4. Долговечность (ресурс) машин.....	13
Лекция 5. ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН.	21
Лекция 6. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ.....	33
Лекция 7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Широко используемые в народном хозяйстве машины предназначены для подъема производительности труда, увеличения количества производимой продукции и ее удешевления.

Процесс проектирования машины, предшествующей ее изготовлению, включает следующие стадии: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект. Роль инженера-экономиста в процессе проектирования машины наглядно иллюстрирует схема, показанная на рис. 1 [1].

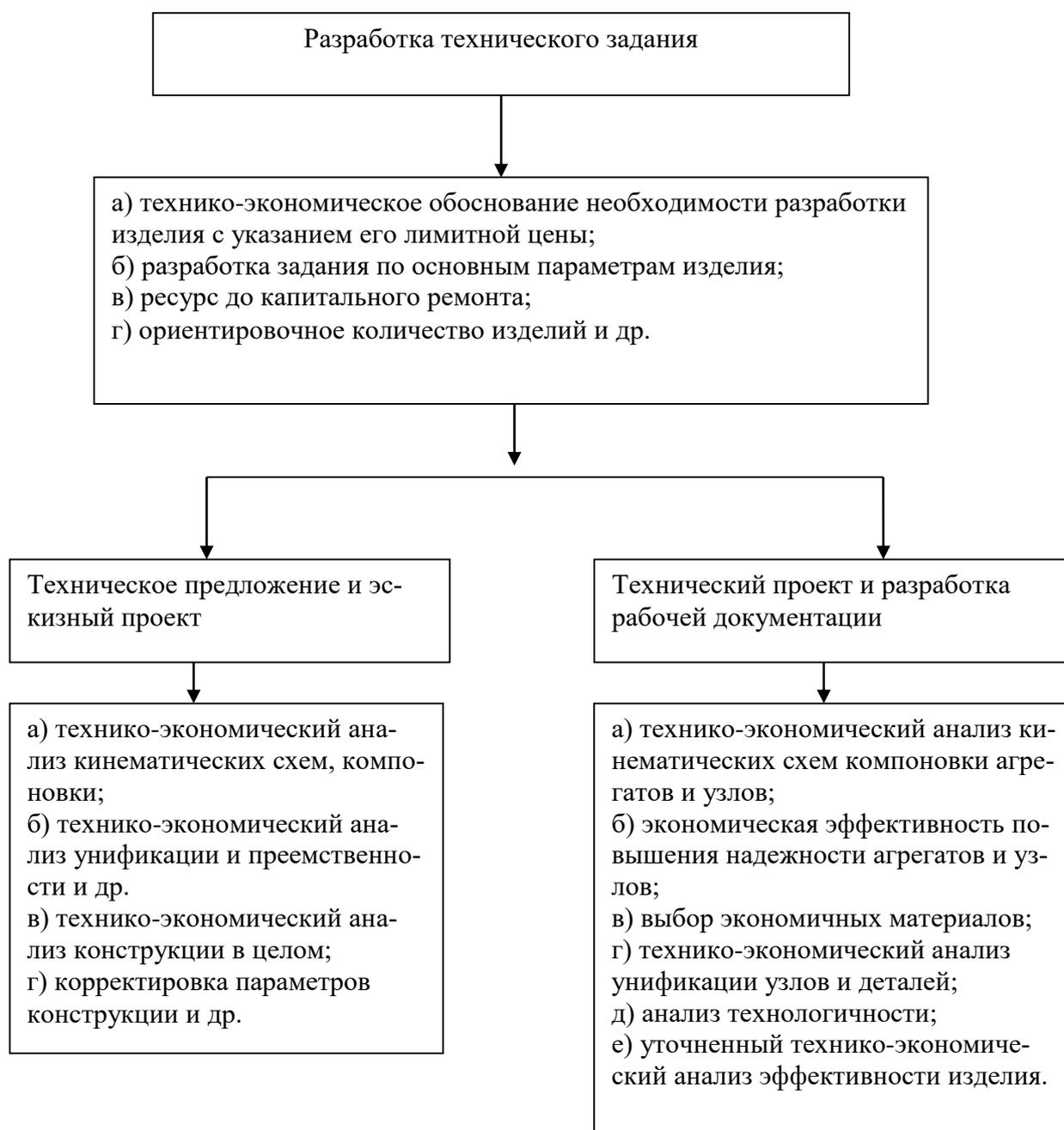


Рис. 1. Технико-экономические вопросы, решаемые на различных стадиях проектирования

Технико-экономический анализ новой машины начинается, как правило, на стадии технического задания. К концу формирования принципиальной схемы машины и ее основных параметров предreshается 75 % затрат на ее изготовления и эксплуатацию [2]. Известны случаи, когда из-за позднего проведения и низкого качества экономического анализа в производство принимались экономически неэффективные машины. При переходе от стадий технического задания и технического предложения к следующим стадиям накапливается все больше информации о машине. Это позволяет в последующем уточнить расчеты технико-экономических показателей.

В настоящем пособии рассмотрены технико-экономические показатели машин и их взаимосвязь, изложены основные экономические методы, применяемые на различных этапах проектирования: технико-экономический анализ, функционально-стоимостный анализ, морфологический анализ и др.

Приводятся методики выбора оптимального варианта конструкции, пути ее модернизации и совершенствования, способы преодоления технико-экономических противоречий, возникающих в процессе проектирования машин.

Цель курса - формирование комплексных знаний, умений и навыков для разработки технико-экономического обоснования технического проекта

Лекция 1. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАШИН

1.1. Техничко-экономические показатели

Техничко-экономические свойства машин могут быть охарактеризованы следующими количественными показателями (рис.2).



Рис. 1.1. Техничко-экономические показатели машин

Главными показателями эффективности машины являются мощность (например, электрические машины, двигатели внутреннего сгорания и др.) и производительность (экскаватор, мельница).

Безотказность машины характеризуется: ресурсом до первого отказа, интенсивностью отказов, вероятностью безотказной работы. Последствия отказа для различных машин могут сильно различаться: например, в авиации и военной технике, а также для химических аппаратов последствия отказов это авария, катастрофа, а для технологических машин – это простой в ремонте и экономический ущерб [1].

Ремонтопригодность характеризуется трудоемкостью и средним временем ремонта машины, стоимостью технического обслуживания.

На манипуляционные свойства оказывают влияние габариты и вес изделия, его форма, наличие выступающих и хрупких частей. Эти свойства машин проявляются при складировании и транспортировке.

Интересно сопоставить различные точки зрения на машину инженера-механика (конструктора, технолога, эксплуатационника) и инженера-экономиста. Механик интересуется в первую очередь, какова мощность, скорость, производительность, прочность, надежность. Для экономиста же важнее себестоимость, эксплуатационные расходы, ресурс. Однако эти показатели машин взаимосвязаны, так что изменение конструкторско-технологических или эксплуатационных свойств влияет на экономические свойства и наоборот. Например, долговечность машины связана с ее полезной

отдачей и экономической эффективностью. От ресурса зависят ремонтные расходы, коэффициент полезного действия влияет на энергоемкость эксплуатации, а материалоемкость машины – на ее себестоимость. Компактность технологических машин (например, станков) влияет на размеры производственных площадей и стоимость основных фондов, а также связаны с расходами на складирование и транспортировку.

1.2. Критерии качества машин

Критериям качества машин относят [1] :

1. Критерий габаритных размеров:

$$K_r = \frac{V}{Q},$$

где V – габаритный объем машины, м^3 ;

Q – главный параметр (показатель) эффективности, например, мощность или производительность.

2. Критерий расхода материалов:

$$K_m = \frac{G}{Q},$$

где G – материалоемкость (масса) машины, кг.

3. Критерий расхода энергии:

$$K_e = \frac{E_{\text{эк}} + E_{\text{изг}}}{Q * T}$$

где $E_{\text{эк}}$ – расход энергии при эксплуатации;

$E_{\text{изг}}$ – расход энергии при изготовлении;

T – период эксплуатации машины.

4. Коэффициент полезного действия (КПД):

$$\eta = \frac{P_{\text{полз}}}{P_{\text{полн}}},$$

где $P_{\text{полз}}$ – полезно использованная мощность;

$P_{\text{полн}}$ - подведенная мощность.

Увеличение КПД машины достигается рациональным выбором ее кинематической схемы, назначением наиболее совершенных видов передач, рациональным выбором материалов, формы и смазки трущихся поверхностей.

5. Критерий трудоемкости изготовления:

$$K_{\text{тр}} = \frac{t_{\Sigma}}{Q},$$

где t_{Σ} – суммарная трудоемкость проектирования, изготовления и подготовки машины к эксплуатации.

В некоторых случаях применяются комплексные критерии, например, критерий качества:

$$K_k = \frac{\Gamma_0 * G_0 * C_0}{\eta},$$

где Γ_0 , G_0 , C_0 , - относительные значения габарита, массы и стоимости изделия.

Лекция 2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН

Технико-экономический анализ (ТЭА) новой машины должен проводиться уже на стадии технического задания и постепенно уточняться на следующих стадиях. При проведении ТЭА сопоставляют варианты конструкции машины по основному экономическому критерию: максимуму экономической эффективности или минимуму затрат за весь срок службы машины, т.е. $E \rightarrow \max$ или $Z \rightarrow \min$. Это целевая функция технико-экономического анализа. Основные составляющие этой функции: себестоимость, эксплуатационные расходы, производительность и др. Схема алгоритма проведения ТЭА машин показана на рис. 2.1.

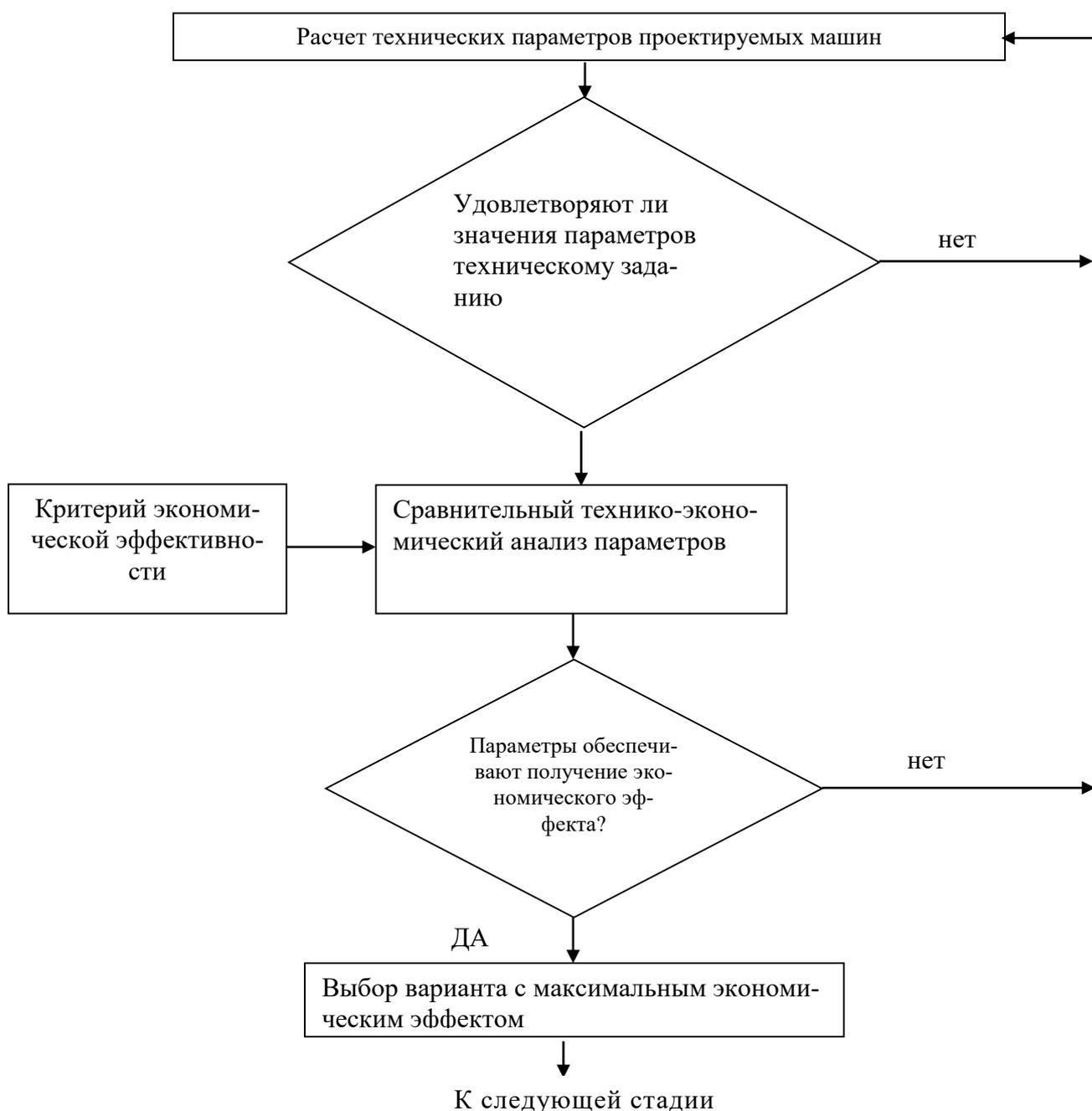


Рис.2.1. Схема алгоритма технико-экономического анализа на стадии проектирования

Для выполнения ТЭА строят технико-экономическую модель машины, в которой отражены связи ее конструкторских и эксплуатационных показателей с экономическими. Адекватную данной машине технико-экономическую модель взаимосвязей технических и экономических показателей строят по иерархическому принципу – от машины в целом, до отдельных ее деталей [2].

Наилучшим будет вариант машины, при котором сумма минимальна:

$$K_{п} + C + Z + K_{э} \rightarrow \min,$$

где $K_{п}$ – капиталовложение в производство;

$K_{э}$ – вложения в эксплуатацию (в расчете на одну машину).

Используют также критерии $C_{п} \rightarrow \min$ и $C_{э} \rightarrow \min$,

где $C_{э}$ – себестоимость эксплуатации (эксплуатационные затраты в расчете на годовой объем продукции);

$C_{п}$ – себестоимость изготовления машины, руб/шт.

Если сравниваемые варианты машины имеют различную производительность или мощность, то сопоставление вариантов ведут в удельном измерении, т.е. на единицу производительности или мощности.

Для сравнительной оценки экономической эффективности двух вариантов используют такую формулу [2] :

$$\mathcal{E} = \left[C_{n1} * \frac{W_2}{W_1} * \frac{(P_1 + E_H)}{(P_2 + E_H)} + \frac{(C_{э1} * \frac{W_2}{W_1} - C_{э2}) - E_H * (K_{э2} - K_{э1} * \frac{W_2}{W_1})}{P_2 + E_H} - C_{n2} \right] * N_k,$$

В этой формуле индексы «1» и «2» относятся к сравнительным вариантам машины;

W_1 и W_2 – объем годовой продукции, произведенной каждой машиной;

E_H - нормативный коэффициент экономической эффективности капиталовложений, принимают $E_H = 0,15$;

$P = \frac{1}{T}$ - годовых амортизационных отчислений,

N – годовой выпуск машин.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНИКО=ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

3.1. Экономическая эффективность машин и эксплуатационные расходы

Годовой экономический эффект от работы машины определяется по формуле

$$\mathcal{E} = W - Z,$$

где W – полезная отдача машины, руб/год;

Z – суммарные эксплуатационные расходы, руб/год

$$Z = \mathcal{E}_H + M_T + I_H + T_P + O_B + P_M + H_K + A_M,$$

Здесь \mathcal{E}_H – расход энергии;

M_T – расход материала;

I_H – расход инструмента;

T_P – расходы на оплату труда;

O_B – расходы на тех. обслуживание;

P_M – расходы на ремонт;

H_K – накладные расходы;

A_M – амортизационные отчисления.

Суммарный экономический эффект за весь период службы машины T составляет:

$$\Sigma \mathcal{E} = T * [W - (\mathcal{E}_H + M_T + I_H + T_P + O_B + H_K)] - A_M - \Sigma P_M, \quad (1)$$

где амортизационные расходы за период эксплуатации принимают равными стоимости машины C , а суммарные ремонтные расходы не должны превышать стоимости C . Рентабельность машины $q = \frac{W}{Z}$ должна превышать 1, иначе машина будет работать убыточно.

Срок окупаемости машины $t_{ок}$ – это время эксплуатации, при котором суммарный экономический эффект достигнет величины C :

$$\Sigma \mathcal{E} = C = t_{ок} * \eta_{исп} * (W - Z') - A_M,$$

где $\eta_{исп} = \frac{D}{T}$ – коэффициент использования машины, равный отношению долговечности D к периоду эксплуатации машины;

$$Z' = \mathcal{E}_H + M_T + I_H + T_P + O_B + H_K.$$

При этом ремонтные расходы игнорируют, т.к. в первые годы эксплуатации они малы.

Амортизационные отчисления за срок окупаемости $t_{ок}$ равны

$$A_M = C \frac{t_{ок}}{T} = C \frac{t_{ок} * \eta_{исп}}{D},$$

После подстановки в уравнение (2) получим

$$t_{ок} = \frac{C}{\eta_{исп} * (W - Z' - \frac{C}{D})}.$$

Коэффициент эксплуатационных расходов

$$K = \frac{\Sigma Z}{C} = \frac{D * Z' + P_M + C}{C},$$

тогда (1) можно представить в виде

$$\Sigma \mathcal{E} = T * W - K * C.$$

Коэффициент K возрастает с увеличением долговечности машины D и при больших значениях D может достигать значений 50...100, соответственно снижается доля стоимости машины.

При определении эксплуатационных расходов следует иметь в виду, что для машин, которые не могут функционировать без оператора (автомобили, строительные и дорожные машины, станки) затраты на оплату труда значительны. Если же машины эксплуатируются без оператора (автоматы, полуавтоматы, насосы, компрессоры), то затраты на оплату труда минимальны. У тепловых машин среди эксплуатационных расходов преобладают затраты на энергию.

Типичная ошибка начинающего конструктора – стремление к удешевлению машины, например, за счет использования более дешевых материалов. Такая частная экономия без учета всех факторов нередко ведет к снижению экономической эффективности. Однако экономическая эффективность определяется полезной отдачей и суммарными эксплуатационными расходами за весь период работы машины; стоимость же машины составляет очень незначительную часть всех расходов.

Стоимость машины существенно влияет на экономическую эффективность только при малой ее долговечности. Например, увеличение стоимости в 1.5 раза при долговечности машины 10 лет снижает ее экономическую эффективность на 2.5% [3]. Таким образом, повышение стоимости машины, направленное на увеличение ее долговечности вполне целесообразно, т.к. выигрыш от увеличения эффективности из-за удорожания машины.

Лекция 3. Себестоимость машины и методы ее определения

На себестоимость машины влияют многие факторы. В расчетную схему себестоимости входят следующие статьи: производственные расходы (затраты на материалы, оплату труда, затраты на изготовление), расходы на проектирование, административные и накладные расходы. На рис. 3.1. показано, как изменяются составляющие себестоимости при увеличении размеров зубчатых колес. У больших зубчатых колес затраты на материал составляют 50...60% себестоимости.

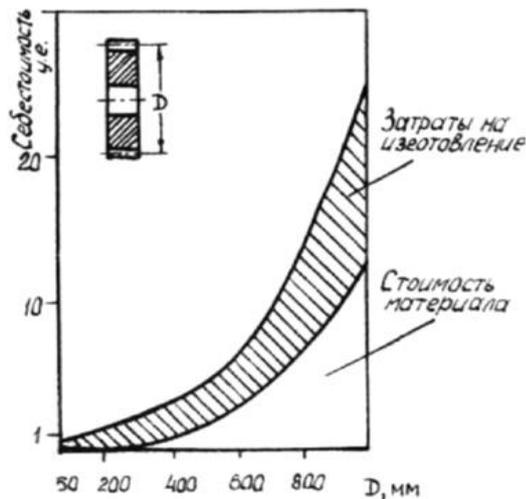


Рис. 3.1. Рост себестоимости и ее составляющих с увеличением размеров зубчатых колес.

Затраты на материалы особенно велики для крупногабаритных, массивных изделий (железнодорожные вагоны, автомобили, строительные конструкции, станки) и малы в случае высокотехнологичных и точных устройств (например, компьютеры, часы, приборы).

Себестоимость машины является функцией серийности выпуска, при увеличении выпуска себестоимость, уменьшается, т.к. снижается доля постоянных затрат, приходящихся на единицу продукции; поэтому при массовом выпуске изделий себестоимость невелика. Эффективный способ снижения себестоимости – сокращение номенклатуры изделий (т.е. уменьшение числа типоразмеров машин) путем выбора рационального типажа машин (подробнее об этом см. раздел 5.4).

Прогнозирование себестоимости осуществляется на ранних стадиях конструирования. Для предварительной оценки себестоимости используются следующие методы [4];

1. Агрегатный метод. Полная себестоимость машины устанавливается здесь путем суммирования себестоимости C_1 входящих в нее агрегатов, узлов и деталей:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

1. Метод удельных показателей

$$C = C_G^{уд} * G \text{ или } C = C_P^{уд} * P,$$

где $C_G^{уд}$ и $C_P^{уд}$ – удельная себестоимость единицы массы или мощности;

G – масса;

P – мощность машины.

Разновидность этого метода является способ определения себестоимости по общей и дифференцированной массе машины:

а) по общей массе G

$$C = C_{уд} * K_m * G + C_{пок},$$

где – $C_{уд}$ – удельная себестоимость машины;

$C_{пок}$ – стоимость покупных комплектующих деталей;

K_m – коэффициент масштаба производства.

б) по дифференцированной массе

$$C = K_m * (1 + \frac{Z}{100}) * \sum_i^n q_i * C_{уд i} + C_{пок},$$

где – q_i – масса i – й детали;

$C_{уд i}$ – ее удельная себестоимость;

$\frac{Z}{100}$ – затраты на сборку и упаковку в процентах к себестоимости деталей.

3.Метод регрессионного анализа. Определяют форму функциональной зависимости себестоимости от эксплуатационных параметров машины – мощности, производительности и др. При этом функция может иметь форму парных зависимостей от одного параметра P, например:

$$C = a_0 + a_1 * P; C = a_0 * P^{a1} \quad \text{или} \quad C = a_0 + \frac{a_1}{P}.$$

Если же учитывать два или несколько параметров P_1, P_2, \dots, P_n , то применяют многопрофильные модели типа:

$$C = a_0 + a_1 * P_1 + a_2 * P_2 + \dots + a_n * P_n,$$

$$C = a_0 * P^{a1} * P^{a2} \dots P^{an},$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – корреляционные коэффициенты.

Пример: Для оценки себестоимости кран-балки грузоподъемностью 2 т применяют линейную парную зависимость $C=20.81 + 115l$, где l – длина пролета (м). При грузоподъемности 5т зависимость имеет форму $C= 20.81 + 680$.

4.Балльный метод

Каждому эксплуатационному параметру $1, 2, \dots, n$ присваивается путем экспертной оценки определенной число баллов, например, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$: полученные для каждого параметра данной машины баллы суммируют. В результате себестоимость C оказывается оцененной в баллах. Затем делят C на соответствующую сумму баллов и получают стоимостную оценку одного балла C_0 – нормативный удельный показатель (НУП). Его вычисляют на основе себестоимости ранее изготовленных машин и используют для оценки себестоимости при проектировании новых машин: $C= C_0*(a_1+ a_2 + \dots + a_n)$.

Пример: Сравним 3 варианта машин по 5 параметрам (мощность, скорость, энергоёмкость, КПД, безопасность). Экспертная оценка дает следующие суммы баллов [2]:

$$\Sigma a_1 = 1.5 + 1.5 + 1.5 + 1.5 + 1.0 = 7;$$

$$\Sigma a_2 = 1.8 + 1.7 + 1.5 + 2.0 + 1.0 = 8;$$

$$\Sigma a_3 = 3.0 + 3.0 + 2.5 + 1.0 + 1.5 = 11.$$

Себестоимость рассматриваемых вариантов машин:

$$C_1 = 10000 \text{ у.е.}, C_2 = 15000 \text{ у.е.}, C_3 = 25000 \text{ у.е.}$$

$$C_0 = \frac{\frac{10000}{7} + \frac{15000}{8} + \frac{25000}{11}}{3} = 1860 \text{ у.е.}$$

5. Дифференцированный расчет себестоимости на основе аналога выполняют, если для машины аналога известны затраты на материалы S'_m , на зарплату $S'_{зар}$ и т.д. В этом случае соответствующие статьи расходов проектируемой машины рассчитывают по формулам:

$$S_m = S'_m * \frac{G}{G'},$$

$$S_{зар} = S'_{зар} * \frac{t}{t'},$$

где G и t – масса и трудоемкость изготовления проектируемой машины;
 G' и t' – масса и трудоемкость машины аналога.

6. Определение себестоимости по соотношениям между отдельными видами затрат применяют, если известны устойчивые соотношения между отдельными видами производственных затрат:

$$C = S_m \frac{1 + \alpha + \beta}{\alpha} \quad \text{или} \quad C = S_{зар} (1 + \alpha + \beta),$$

где S_m – стоимость материалов;

$S_{зар}$ – сумма заработной платы,

α – коэффициент, $\alpha = \frac{S_m}{S_{зар}}$;

β – соотношение между суммой внепроизводственных расходов и стоимостью материала.

Лекция 4. Долговечность (ресурс) машин

Долговечность (ресурс) машины – это время ее работы (час) до первого капитального ремонта. Долговечность автомобилей и железнодорожного состава измеряют пробегом в км, долговечность приборов – максимальным числом включений, долговечность сельскохозяйственных машин – числом га отработанной пашни.

Периодом эксплуатации или сроком службы называют эксплуатации машины до исчерпания ее ресурса.

Долговечность D и период эксплуатации T связаны зависимостью

$$T = \frac{D}{\eta_{исп}},$$

где $\eta_{исп}$ - коэффициент использования машины, который зависит от сезонности, сменности работы, ремонтных простоев и других факторов. Обычно принимают $\eta_{исп} = 0.56\eta_{см}$ и $D = 0.56\eta_{см} * T$, где коэффициент сменности $\eta_{см} = 0.33$ при работе в 1 смену; 0.66 – при работе в 2 смены или 1 при работе в 3 смены. Например, при $D=10$ лет, $T=18$ лет (работа в 3 смены), $T=27$ лет (2 наиболее распространенного периода службы $T=10...15$ лет расчетная долговечность равна 30000...50000 часов [3]. У транспортных машин $D=10000...20000$ часов, а срок службы 5..8 лет, у стационарных машин – орудий $D=50000...100000$ часов, что при 2-сменной работе составляет срок службы 15-..25 лет. При таких сроках актуально техническое устаревание.

Повышение долговечности машин, мало загруженных в эксплуатации, сопровождается увеличением срока службы, который практически нельзя использовать из-за наступления технического устранения.

Признаки устранения: пониженные показатели качества продукции, точности, производительности, расхода энергии, стоимости труда, обслуживания и ремонтов – по сравнению с современной техникой и в результате понижения рентабельность машины. Однако в большинстве случаев физический износ машины наступает задолго до технического устаревания.

Например, ресурс грузового автомобиля при интенсивной работе исчерпывается за 5..6 лет.

Способы предупреждения устаревания машин:

1. Повышение степени использования машины в эксплуатации (интенсификация использования). Чем в более короткий срок машина отработает заложенный в нее ресурс, тем вернее она застрахована от устаревания. Высокую долговечность целесообразно придавать машинам интенсивного использования.

2. Создание машин с резервами мощности, производительности, что позволит в будущем форсировать, модернизировать машину.

Экономическая оценка долговечности

Повысить ресурс машины можно всегда за счет применения более качественных материалов, изменения конструкции, системы технического обслуживания и т.д. Повышение долговечности с одной стороны связано с дополнительными расходами, а с другой – с повышением экономической эффективности, уменьшением ремонтных затрат, с устранением потерь от простоя машин.

На графике рис. 4.1. учтены три основных статьи суммарного экономического эффекта затраты на изготовление C , эксплуатационные расходы S и полезная отдача машины W .

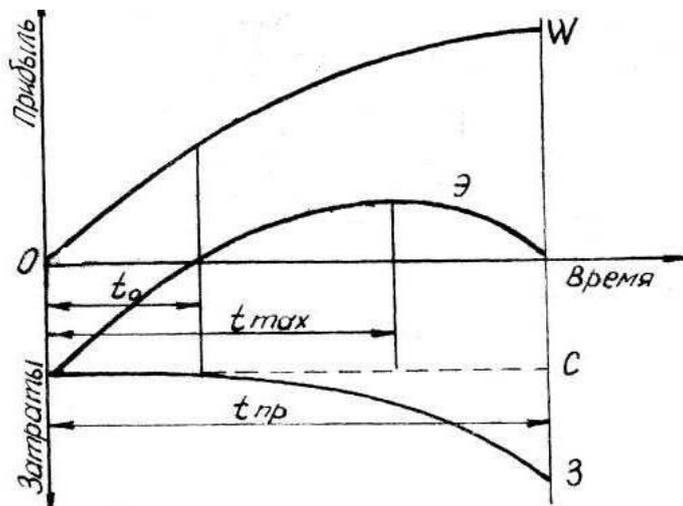


Рис.4.1. Экономическая оценка долговечности машины:

Z – эксплуатационные затраты, C – себестоимость машины, Э- экономический эффект,

W – полезная отдача

Величина C постоянна, расходы S возрастают со временем, так как происходит старение деталей машины. С течением времени уменьшается рост отдачи W, поскольку наблюдаются более частые простои в ремонте.

Кривая суммарная эффективности машины $\Delta = C + Z + W$ имеет максимум и два раза пересекает ось абсцисс. Начиная с момента времени t_0 машина начинает приносить прибыль. Прирост экономической эффективности Δ постепенно снижается до момента $t_{пр}$, а затем затраты на эксплуатацию начинают превышать полезную отдачу машины.

Длительность экономически целесообразной эксплуатации находится между t_{max} и предельным сроком $t_{пр}$.

Имеется еще один метод оценки оптимальной долговечности машины.

Себестоимость продукции, изготовленной машиной, равна сумме постоянных расходов (энергия, материалы) и переменных, изменяющихся со временем (амортизация, ремонтные расходы). Суммирование этих расходов дает зависимость себестоимости продукции от времени (рис. 4.2). Кривая эта имеет минимум и соответствующую этому минимуму долговечность предлагается считать оптимальной [3].

При прочих равных условиях, чем дешевле машина, тем больше затрат при ее эксплуатации. Более высокая надежность машины достигается за счет дополнительных эксплуатационных расходов. При более высоких требованиях к безотказности необходимы повышенные затраты на изготовление машины, но зато эксплуатационные расходы снижаются.

Стремясь, как правило, к удешевлению машины не надо жалеть затрат на изготовление деталей, определяющих ее долговечность и надежность. Стоимость изготовления деталей, определяющих долговечность машины, незначительна по сравнению со стоимостью всей машины, а последняя, как правило, невелика по сравнению с общей суммой эксплуатационных расходов.

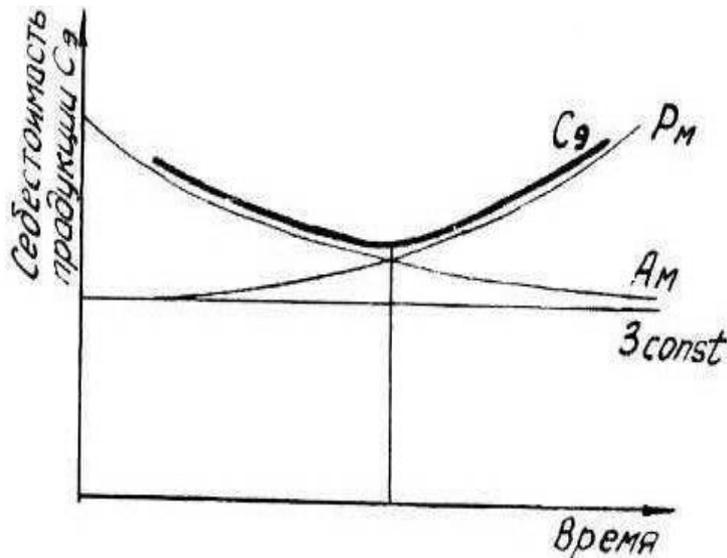


Рис. 4.2. Зависимость себестоимости продукции, изготовленной машиной, от времени эксплуатации

Влияние долговечности на численность машинного парка

Долговечность машин существенно влияет на численность машинного парка на объем выпускаемой продукции. Проиллюстрируем это примером (рис. 4.3.)

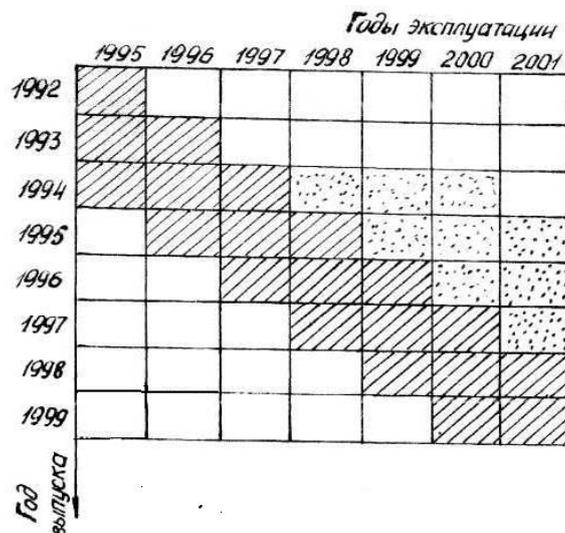


Рис. 4.3. Влияние долговечности на численность машинного парка

Станкозавод выпускает металлорежущие станки со сроком службы 3 года, годовой выпуск 100 шт. Число заштрихованных клеток на графике по горизонтали — изображает продолжительность пребывания машин в эксплуатации (3 года). Сумма заштрихованных клеток по вертикали — это число групп машин, одновременно находящихся в эксплуатации ($i=3$). Общая численность машинного парка в каждом году составляет:

$$N = D * n = 3 * 100 = 300.$$

Начиная с 1994 года, долговечность машин увеличена вдвое. Продолжительность пребывания машин в эксплуатации станет равной 6 годам. Благодаря этому численность машинного парка в 1998 года возрастет и в 2000 году станет равной 600, т.к. $N' = D' * n = 6 * 100 = 600$.

Таким образом, фактическая численность машинного парка определяется только долговечностью машин и размером их годового выпуска.

При этом же размер годового выпуска машин (100 штук) с увеличением долговечности вдвое во столько же возрастет численность машинного парка N и, следовательно, объем выпускаемой продукции. Повышение долговечности является эффективным и экономным способом увеличения численности машин, находящихся одновременно в эксплуатации.

Суммарный объем полезной отдачи машины за период ее службы и годовой объем отдачи группы одновременно работающих машин пропорциональны произведению годовой отдачи долговечности машин [3].

Из этого можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение долговечности позволяет пропорционально сократить годовой выпуск машин без снижения объема продукции, при уменьшении общей стоимости изготовления машин и значительном снижении расходов на эксплуатацию.

2. Увеличение долговечности, как способ повышения численности машин и объема полезной отдачи, несравненно выгоднее, чем простое увеличение выпуска машин. При увеличении выпуска машин или увеличении объема продукции за счет интенсификации действующих машин возрастают расходы на изготовление машин, а также растут эксплуатационные расходы из-за увеличения числа действующих машин.

Полезная отдача машин и пути ее увеличения

Полезная отдача – стоимость выпускаемой продукции или совершаемой машиной работы в единицу времени. Полезная отдача зависит от производительности машины.

Существуют следующие способы повышения производительности машин:

1. Концентрация технологических движений в пространстве, т.е. увеличение числа одновременно обрабатываемых изделий или одновременно выполняемых операций. Этот способ реализуется при применении многооперационных машин – автоматов, при одновременной многоинструментальной обработке изделий и связывании машин в единой автоматической линии.

Полуавтоматы и автоматы являются машинами непрерывного действия, их механизмы действуют непрерывно. Каждый рабочий цикл автомата состоит из совокупности последовательно повторяющихся операций загрузки, обработки и разгрузки. В многооперационных автоматах шпинделей. В станках с параллельно работающими шпинделями можно получить столько потоков изделий, сколько имеется шпинделей. В многошпиндельных станках производительность достигается за счет количества шпинделей. Чем больше шпинделей занято обработкой и чем меньше – загрузкой, разгрузкой и транспортировкой, тем выше их производительность.

2. Интенсификация операций, сокращение длительности рабочего цикла (увеличение скорости), уменьшение интервалов времени между выпуском изделий. Этот способ повышения производительности машины может осуществляться двумя путями.

а) путем применения непрерывных процессов получения продукции (например, получение труб из непрерывной ленты, экструзия изделий, т.е. непрерывное выдавливание через фасонные отверстия, непрерывная разливка металла);

б) при использовании роторных и ротор – конвейерных автоматических линий, где все транспортные операции совмещены по времени с основными операциями, т.е. все органы транспортировки и изготовления находятся в непрерывном совместном движении.

В роторных машинах карусельного типа одновременно обрабатывается большое число изделий. Изделия устанавливаются на карусель и обрабатываются в процессе вращения ротора. Высокая производительность здесь достигается благодаря непрерывности работы и одновременной обработке нескольких изделий. При числе блоков, равном 50, роторная машина имеет производительность в 35 раз больше, чем машины последовательной обработки.

Роторные машины хорошо komponуются в автоматические линии, экономичные благодаря сокращению расходов на транспортирование изделий. При работе роторной линии загрузка и передача изделий от одного ротора к другому осуществляется посредством транспортных роторов.

Ремонтные расходы

Ремонтные расходы могут достигать очень большой величины, прерывающей стоимости машины в несколько раз [3]. Иногда расходы на восстановительный ремонт поглощают большую часть полезной отдачи, что делает эксплуатацию машины нерентабельной.

Вначале ремонтные расходы невелики. Затем они возрастают и достигают значительной величины, соизмеримой со стоимостью машины, когда машина подвергается капитальному ремонту. Перед сдачей в капитальный ремонт должен быть решен вопрос о целесообразности – это момент, когда предстоящие расходы на капитальный ремонт приближаются к стоимости новой машины. Выгоднее приобрести новую машину, чем реставрировать старую.

При решении вопроса о прекращении эксплуатации машины должна быть учтена сумма затрат всех ранее проведенных ремонтов. Следует руководствоваться правилом: суммарные затраты на ремонт за весь срок службы машины не должны превышать ее стоимости.

Значительное сокращение ремонтных расходов можно получить при переходе на безремонтную эксплуатацию, которая предусматривает:

- устранение капитальных ремонтов;
- замену восстановительного ремонта комплектационным (т.е. замена изношенных деталей машин, узлов, агрегатов).
- систематическое проведение планово-предупредительных ремонтов и устранение вынужденных ремонтов.

Для этого необходимо построение машины по агрегатному принципу и увеличение сроков службы изнашиваемых деталей.

Трудоемкость ремонта и пути ее уменьшения

Время простоя машины из-за “i” – й детали:

$$T_{pmi} = \frac{D}{T_i} \tau_i,$$

где τ_i - продолжительность (трудоемкость) ремонта i-й детали, включая ее сборку и разработку;

T_i – срок службы машины до отказа i-й детали.

Отношение $\frac{D}{T_i}$ показывает, сколько раз в течение ресурса D ремонтировалась i-я деталь. Сумма $\frac{\tau_1}{T_1} + \frac{\tau_2}{T_2} + \dots + \frac{\tau_n}{T_n} = \sum_1^n \frac{\tau_i}{T_i}$, составленная для ремонтируемых деталей машины, называется относительными ремонтными потерями [3].

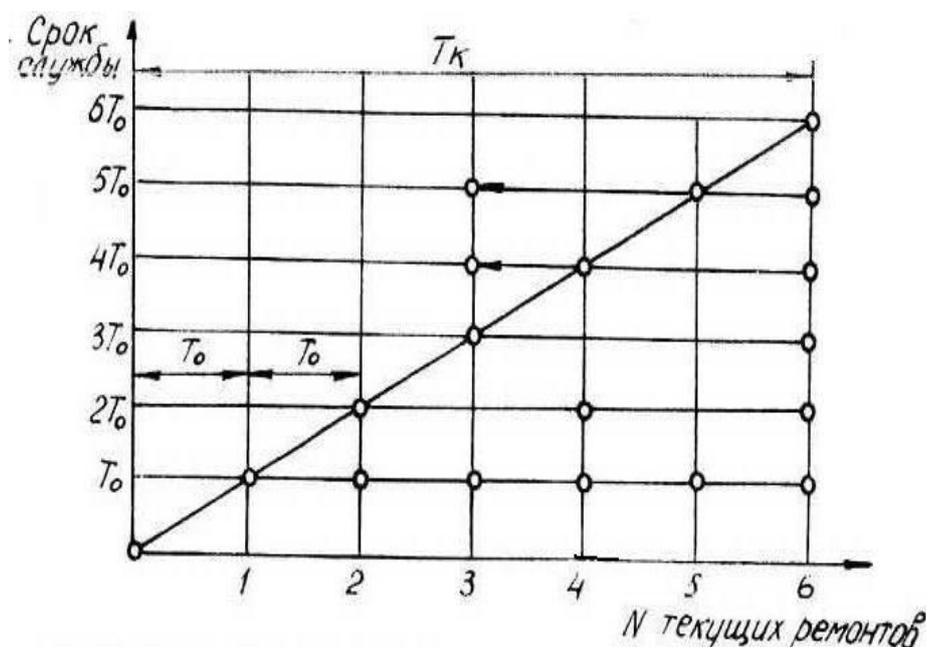


Рис. 4.4. Схема ремонтного цикла машины

Отсутствие информации о надежности деталей (вероятность безотказной работы, интенсивность отказов) ведет к недоиспользованию сроков службы (для гарантии узлы ремонтируют значительно чаще, чем это необходимо) или к повышению вероятности отказов в межремонтный период. И то и другое ведет к повышению вероятности к дополнительным затратам. Поэтому для каждой детали и узла машины устанавливается, при каком текущем ремонте она должна ремонтироваться.

Для построения ремонтного цикла разбивают все детали и узлы машины на группы в зависимости от их сроков службы так, что детали 1-й группы ремонтируются через T_0 часов, детали 2-й группы – через $2T_0$ - часов и так далее.

Обозначим T_K – длительность ремонтного цикла – время до капитального ремонта машины, T_0 – межремонтный период – время между двумя после-

довательно проведенными периодическими ремонтами, когда одновременно ремонтируется группа деталей. Тогда число периодических ремонтов в цикле будет равно $K = \frac{T_k}{T_0}$.

В промежутке между периодическими ремонтами проводится межремонтное техническое обслуживание машины, включающее осмотры, диагностику, смазку, регулировку. Если отказ детали наступил раньше периодического ремонта, то деталь заменяют или ремонтируют при межремонтном техобслуживании.

Число периодических ремонтов в цикле и их чередование для разных машин различно. На рис. 4.4 кружками отмечено, в какой ремонт включена данная группа деталей. Все виды периодических ремонтов будут неодинаковы, так как включают ремонт разных групп деталей.

Для каждого конкретного случая имеется значение межремонтного периода T_0 , обеспечивающее минимум трудоемкости ремонта. Для оптимизации ремонтного цикла необходимо провести расчет различных вариантов структуры цикла и установить, какой из них обеспечивает наименьшие трудоемкость и ремонтные расходы.

Оптимальный период T_0 тот, который обеспечивает минимум ремонтных потерь $\sum_1^n \frac{\tau_i}{T_i}$ за счет рационального соотношения между трудоемкостями

ремонта и межремонтного обслуживания. Величина $\sum_1^n \frac{\tau_i}{T_i}$ при межремонтном обслуживании возрастает с увеличением T_0 , а при периодических ремонтах с ростом T_0 она уменьшается. Таким образом, математическая задача оптимизации межрегионального периода T_0 сводится к определению минимума функции $\left(\sum_1^n \frac{\tau_i}{T_i} \right)_{\text{меж}} + \left(\sum_1^n \frac{\tau_i}{T_i} \right)_{\text{рм}}$ в зависимости от T_0 .

Лекция 5. ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН.

При проектировании машин возможны два подхода к снижению стоимости изделий: предметный (он является традиционным), когда ищут ответа на вопрос «Как снизить затраты на изделие?» и функциональный, при котором абстрагируются от реальной конструкции и сосредотачивают внимание на ее функциях.

Выделение функций устройства и поиск физических принципов для их осуществления присутствуют не сама по себе машина, а те действия, которые она производит, ее функции (т.е. не электродвигатель, холодильник, электролампа, а выполняемые ими функции – вращение вала, охлаждение продуктов, освещение и т.д.). Функциональный подход предполагает четкое определение функций изделия и выяснение того, необходимы ли эти функции, и каким наиболее экономичным путем можно их реализовать (рис. 5.1.).



Рис.5.1. Функциональный подход в методике проектирования

Начиная с 60-х годов в нашей стране и за рубежом быстро распространяется новый метод снижения затрат и повышения качества промышленных изделий – метод функционально – стоимостного анализа (ФСА).

При проведении ФСА абстрагируется от реальной конструкции и сосредотачивают внимание на ее функциях. Согласно теории ФСА в стоимости любой промышленной продукции кроме минимальных затрат, необходимых для выполнения заданных функций изделия, всегда имеются излишние затраты, вызванные несовершенством конструкции.

Сущность ФСА состоит в нахождении наиболее экономичных способов осуществления всех функций изделия. Для этого при проведении ФСА выявляют и определяют функции (назначение) элементов изделия, оценивают стоимость выполнения каждой функции, выявляют все «излишние» затраты, т.е. выделяют «лишние», ненужные функции и функции с чрезмерными затратами, проводят поиск новых решений с пониженными затратами: при этом исключают элементы с ненужными функциями и выбирают более рациональные конструкции элементов с чрезмерными затратами[4].

Рассмотрим последовательно основные этапы ФСА.

Построение структурно-элементной модели изделия

Каждый технический объект можно разделить на несколько элементов, каждый из которых имеет вполне определенную функцию по обеспечению работы изделия или его частей. В зависимости от вида изделия его элементами могут быть часть детали, деталь, узел, блок, агрегат и т.д. Выделяют главные элементы и неделимые элементы. Функция (назначение) главных элементов обычно совпадает с функцией технического объекта. Например, главный элемент экскаватора – ковш (его функция – зачерпывает и выгружает грунт), у двигателя внутреннего сгорания – это поршень и цилиндры (функция- вращают вал).

Неделимые элементы – это деталь или часть детали с минимальным числом функций по обеспечению работы других элементов изделия; при дальнейшем их делении появляются элементы, не имеющие функций. Пример неделимых элементов: шарики в шарикоподшипнике, труба в трубопроводе и другое. У правильно спроектированного изделия нет «лишних» деталей.

Выявление и формулировка функций

При проведении ФСА необходимо четко определить функции изделия. Различают основные функции и вспомогательные. Основная функция (ОФ) – это функция, для выполнения которой и создано изделие; это свойство, связанное с основным назначением изделия. Например, для тормоза ОФ – останавливать движение; поршень насоса имеет две основные функции: преобразует механическую энергию движения в энергию сжатого воздуха и изолирует рабочий объем насоса от атмосферы.

Выполнение ОФ обеспечивается совокупностью вспомогательных функций ВФ, осуществляемых отдельными конструктивными элементами, входящими в изделие. Каждая функция обладает определенным числом независимых конструктивных исполнений. Например, корпус коробки передач может быть изготовлен из различных материалов несколькими способами.

В качестве примера определим функции элементов шарикоподшипника. Его ОФ – уменьшить трение между осью и ступицей колеса. Сформулируем и запишем вспомогательные функции элементов шарикоподшипника (табл.1).

Таблица 1 Функции элементов шарикоподшипника [5]

Элемент	Функция
Шарики	Снижает трение втулки вокруг оси
Наружное кольцо	Обеспечивает качение втулки на шариках
Внутреннее кольцо	Обеспечивает качение шариков по оси колеса
Сепаратор	Предотвращает соприкосновение шариков друг с другом

Наряду с основными и вспомогательными функциями при ФСА отдельных изделий встречаются ненужные функции, при исключении которых качество технического объекта не ухудшается. Для их выявления следует задаться вопросом: «Необходимы ли эти функции?». Часть элементов изделия с ненужными функциями выявляется уже при анализе функций, когда возникает затруднение в формулировке функции какого-либо элемента. Другая часть элементов с ненужными функциями обнаруживается среди тех элементов, которые несут вспомогательные функции. Для этого проводят мысленно моделирование, задавая вопрос: «Какие появятся отрицательные последствия при исключении этого элемента?».

4.3. Функциональная структура (модель) изделия

Элементы, из которых состоит изделие, имеют определенные функциональные связи друг с другом. Эти связи образуют функциональную структуру, представляемую в виде ориентированного графа, вершинами которого являются наименования элементов, а ребрами – функции этих элементов (рис. 4.2)

Функциональная структура позволяет получить более наглядное представление о техническом объеме с функциональной точки зрения. В качестве примера рассмотрим функциональную структуру вентиля, основная функция которого – перекрывать течение жидкости (табл.2). Эта основная функция осуществляется совокупностью деталей: корпусом, вентилем, втулкой, гайкой с прокладкой и рукояткой, т.е. вспомогательными функциями.

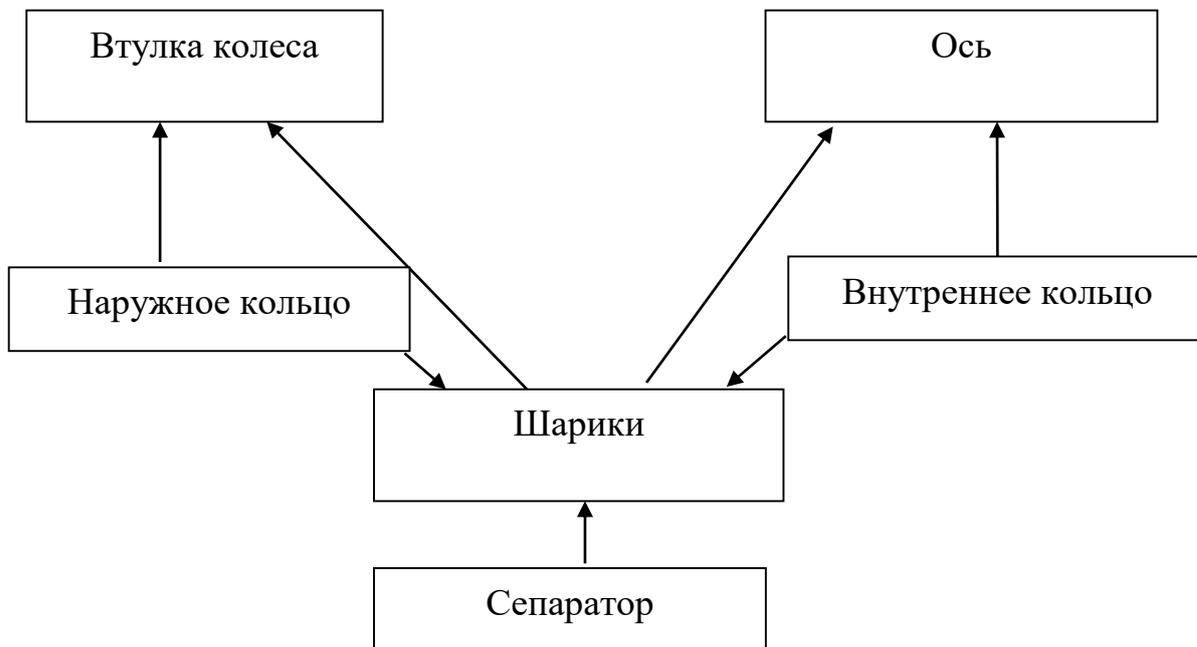


Рис. 5.2. Функциональная структура шарикоподшипника

Таблица 2 Вспомогательные функции, выполняемые деталями вентиля [5]

Деталь	Обозначение	Выполняемая функция
Корпус	ВФ 1	Объединяет все детали в единую конструкцию
	ВФ 2	Направляет движение вентиля
	ВФ 3	Удерживает гайку крепления вентиля
	ВФ 4	Обеспечивает присоединение к патрубкам
Вентиль	ВФ 5	Открывает и закрывает, регулирует расход жидкости
	ВФ 6	Обеспечивает движение на конической поверхности
Втулка	ВФ 7	Поджимает уплотнение
	ВФ 8	Удерживает вентиль в корпусе
Прокладка	ВФ 9	Уплотняет корпус
Гайка	ВФ 10	Закрепляет втулку
Рукоятка	ВФ 11	Передает усилие включения вентилю

Определение и сравнение стоимости функций

Применяют два способа оценки стоимости функций:

1. Прямой расчет затрат по стоимости материалов, трудоемкости изготовления и т.д. Затраты на каждую из вспомогательных функций изделия определяют по формуле:

$$S_j = \sum_{l=1}^n (S_m + S_{зар}) + S_{эк},$$

где S_m – стоимость материалов;

S – расходы на зарплату;

$S_{эк}$ – затраты на содержание и эксплуатацию оборудования;

n – число операций технологического процесса.

Затраты на основную “i”-ю функцию S_i есть сумма расходов на вспомогательные функции, обеспечивающие основную (в соответствии с функциональной структурной изделия):

$$S_i = \sum_{j=1}^m S_{ij},$$

Функционально – необходимые затраты, т.е. величину минимальных затрат на изготовление изделия с заданными функциями определяют по формуле

$$S_{ф.н.} = \sum_{i=1}^k S_i,$$

где k – число основных функций.

В качестве примера в табл. 3 приведено распределение затрат по вспомогательным функциям вентиля [5]:

Таблица 3 Распределение затрат по вспомогательным функциям

Деталь	Функция	Расходы на ее реализацию	Суммарные затраты
Корпус	ВФ 1	2	3,68
	ВФ 2	0.60	
	ВФ 3	0.48	
	ВФ 4	0.60	
Вентиль	ВФ 5	1.2	2,04
	ВФ 6	0.84	
Втулка	ВФ 7	0.60	1.32
	ВФ 8	0.72	
Прокладка	ВФ 9	0.48	0.49
Гайка	ВФ 10	0.60	0.60
Рукоятка	ВФ 11	0.72	0.72

2. Метод экспертных сравнений стоимости функций для данного и аналогичного изделия. По этому методу для каждой функции изделия заполняют таблицу, в которой для каждого варианта реализации функции присваивают балл (лучшему варианту – 1, худшему – 5). В табл. 4 вариант 4 изделия имеет наименьшие затраты.

Таблица 4 Сравнение затрат на реализацию функций

Варианты	Затраты				
	Материал	Изготовление	Эксплуатация	Энергозатраты	Сумма
1	3	2	4	2	11
2	1	3	5	5	14
3	5	4	3	1	13
4	4	1	2	3	10
5	2	5	1	4	12

Помимо стоимости экспертным путем устанавливается значимость функции, т.е. выявляется, насколько эта функция важна для работоспособности изделия. При этом сумма значимостей всех функций изделия принимается равной 100 %. Максимальная значимость присваивается тем функциям, без которых работа изделия в принципе невозможна.

Выявление зон наибольших затрат

С целью выявления зон наибольших затрат используют следующие методы.

1. ABC – анализ. Разбивают детали и узлы технического объекта на три группы.

Группа А – дорогостоящие (5% деталей), на которые приходится 75% затрат на изготовление.

Группа В – средние (20% деталей), на их долю приходится 20% затрат.

Группа С – элементы низкой стоимости (75%), на которые расходуется 5% затрат.

Для проведения ФСА в первую очередь выбирают детали из группы А. В зону наибольших затрат войдут детали, которые входят в группу А и имеют наибольшую стоимость функций.

2. Сопоставление затрат на выполнение функций и их значимость.

Значимость функции оценивают экспертным путем (от 0 до 1). Сумма коэффициентов значимости функций должна быть равна 1. Например, для выполнения основной функции изделия необходимо выполнить 5 вспомогательных функций: ВФ 1, ВФ 2, ВФ 3, ВФ 4, ВФ 5, затраты на выполнение которых известны. Эксперименты оценили значимость этих функций так, как показано в табл. 5.

Таблица 5 Затраты на выполнение и значимость функций

Функция	ВФ 1	ВФ 2	ВФ 3	ВФ 4	ВФ 5
Затраты на выполнение, у.е.	2	8	7	3	0.5
Значимость	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1

Строится диаграмма сопоставления затрат и значимости функции (рис. 5.3)

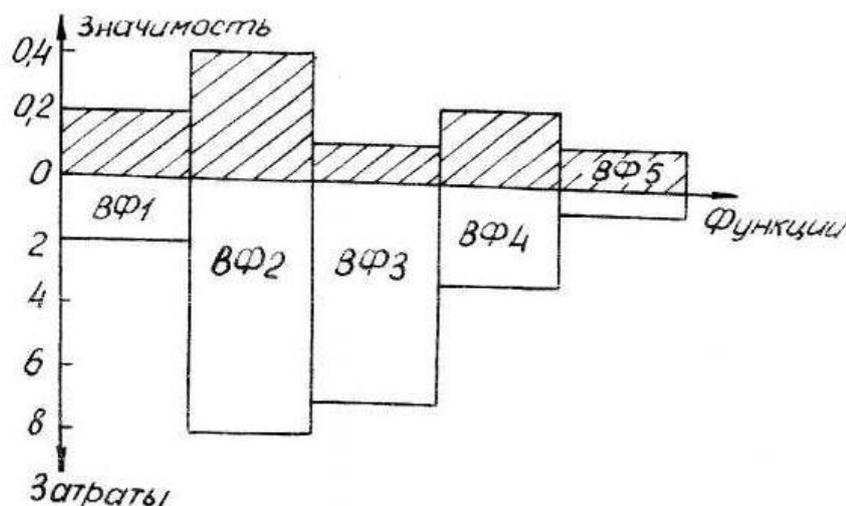


Рис. 4.3. Диаграмма сопоставления затрат и значимости функций.

При этом выявляется явное несоответствие между значимостью функции ВФ 3 и затратами на ее выполнение. Следует вести поиск путей снижения затрат на выполнение функции ВФ 3.

3. Сравнение по доле излишних или недостающих затрат (по отношению к стоимости изделия). Определяют ресурс P_i функции i -го элемента изделия по сравнению со сроком службы изделия T :

$$P_i = \frac{T_i - T}{T} * 100\%,$$

где T_i - срок службы i -го элемента.

Далее определяют долю R_i излишних (повышенных) или недостающих (пониженных) затрат по отношению к стоимости изделия:

$$R_i = \frac{P_i * S_i}{100},$$

где S_i – относительные затраты на выполнение функции i -го элемента. Наибольшие значения R_i соответствуют зонам наибольшего сосредоточения затрат.

Творческий этап ФСА. Морфологический анализ конструкции

Творческий этап ФСА предусматривает разработку возможных вариантов решения проблемы и их предварительную оценку. Для этого применяют методы мозговой атаки (интуитивный метод поиска решения), итеративного поиска, морфологического анализа, аналогии и др.

Машине, как технической системе, присуща многовариантность (полиморфизм) как основное системное свойство. В качестве примеров многовариантности конструкций машины можно привести типы кузовов легковых автомобилей (лимузин, седан, фаэтон, пикап, хэтчбек, родстер и др.) и их компоновочные схемы (классическая, переднеприводная и заднеприводная).

Широкое применение в практике разработки новых конструкций получил морфологический метод, который называют методом «морфологического ящика». Цель проведения морфологического анализа заключается в нахождении всех возможных вариантов проектируемой конструкции. Необходимо выявить максимально возможное число решений проблемы (вариантов конструктивно-технологического исполнения) для того, чтобы выбрать оптимальное.

Для получения совокупности всех решений выделяют важнейшие функции или параметры технического объекта, а затем по каждой функции или параметру устанавливают возможные способы их выполнения. Каждая функция обладает определенным числом “n” независимых исполнений, которые сводятся в n – мерную морфологическую матрицу. Составляется морфологическая схема или матрица из всех возможных и известных для данной проблемы решений. При этом по вертикали в крайнем левом ряду помещают перечень функций, которые должны выполнять узлы проектируемой машины. А клетки морфологической таблицы заполняют известными техническими решениями, например, вариантами конструкции узлов. Если для каждой функции имеется m_1, m_2, m_3, m_n конструктивных решений, то в целом для проектируемого изделия - комбинация из $m_1 * m_2 * m_3 * \dots * m_n$ возможных решений. Цепочка, составленная из сочетаний элементов, принадлежащих каждому ряду таблицы, моделирует определенный вариант конструкции. Пример морфологического анализа типового привода приведен в таблице 6 [6].

Таблица 6 Морфологический анализ конструкции привода

Характеристики	Возможные варианты		
	Ручной привод	Электродвигатель	Гидропривод
Источник энергии	30	1500	1000
Частота вращения ведущего вала, 1/мин			
Конструктивное исполнение передач	Ременная передача	Фрикционная передача	Зубчатая передача
Блочность	Одноблочный	Многоблочный параллельного действия	Многоблочный привод последовательного действия
Число потоков передаваемой мощности	Один	Два	Несколько
Передаваемая мощность, кВт	0.2...1	1...10	10...100

Выбор оптимального вариантов конструкции

Самое трудное в проектировании – поиск среди множества различных комбинаций и вариантов изделия. Так, если конструктор создает изделие из десяти деталей, а каждую деталь можно выполнить десятью способами, то общее число вариантов равно 10^{10} , из которых проектировщик должен выбрать один. Используемый раньше метод «проб и ошибок» подчинен субъективному фактору. У каждого проектировщика могут существовать свои представления о достоинствах и недостатках отдельных вариантов конструкции, которые получаются в результате различной оценки факторов, влияющих на решение.

При использовании традиционных способов проектирования обычно выделяют главную характеристику объема (критерий для сравнения вариантов) и рассматривают возможные конструктивные решения. Затем по каждому варианту устанавливают недостатки, пытаются устранить или уменьшить их и в итоге принимают тот вариант, который имеет меньше недостатков.

Обоснованный выбор конструкции, оптимальной для заданных условий изготовления и эксплуатации, должен осуществляться с учетом многообразия конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Для того, чтобы оценить все реально возможные варианты исполнения проектируемого устройства, его сборочных единиц и деталей, рекомендуется составлять положительно – отрицательные таблицы (матрицы). После этого осуществляют выбор конструктивного исполнения элементов конструкции на основании анализа матриц, составленных для каждого возможного варианта [6]. Рассмотрим примеры составления положительно – отрицательных матриц вариантов реализации функции изделия (табл.7 и 8).

Таблица 7 Положительно – отрицательная матрица соединения проводов

Преимущества	Недостатки
Разъемное штыревое соединение	
Удобство в эксплуатации	Необходим фиксатор
Уменьшение общих габаритов	Ограничено размещение разъемов в пространстве
Разъемное резьбовое соединение	
Удобство расположения разъемов	Большие габариты из-за необходимости доступа к гайкам
Возможность применения стандартных элементов	Увеличение числа деталей

Общее число возможных решений здесь составляет 288. На первом уровне сопоставляют, давая сравнительную оценку в баллах, четыре варианта кинематической схемы привода. На втором уровне оценивают три возможных конструкции дробилки (литую, сварную, разъемную), на третьем - сравнивают четыре варианта конструкции опор валков (с подшипниками качения и подшипниками скольжения); на четвертом и пятом уровнях оценивают по пятибалльной системе конструкцию крепления бандажей и способы регулировки зазора между валками. Решения, набравшие высшую оценку в баллах, соединяют ветвями дерева решений; факторы решения, входящие в этот граф, образуют оптимальный вариант конструкции.

Жирные линии на рис. 4.4 соответствуют двум оптимальным вариантам конструкции дробилки, которые подлежат дальнейшей проработке.

Для сравнительной оценки альтернативных технических решений применяют также метод построения круговой диаграммы, являющийся частью алгоритмической методики систематической эвристики. В соответствии с этим методом строят круговую диаграмму оценки качества изделия, по периметру которой расположены несколько радиальных шкал, служащих для оценки различных параметров технической системы (рис. 4.5). При этом значения параметров, расположенных на шкале ближе к центру круга, считаются лучше значений, близких к наружному контуру. Оптимальным вариантом конструкторского решения будет тот вариант, для которого площадь фигуры, ограниченной отрезками прямых, соединяющих значения параметров на смежных шкалах диаграммы, будет наименьшей. Круговая диаграмма на рис. 4.5 иллюстрирует сравнительную оценку автоматической и ручной сварки деталей машин [6].



Рис.5.5. Круговая диаграмма оценки качества изделия

Окончательный выбор варианта осуществляется с помощью показателя, учитывающего как качественные, так и стоимостные характеристики спроектированной машины.

Для этого выделяют показатели качества (параметры) изделия, например, габариты, металлоемкость, стоимость, надежность и др. Проводят экспертную оценку вариантов конструкции в баллах и вычисляют критерий минимума затрат условную единицу качества.

$$K_{\text{эк}} = \frac{S_{\text{ф.н.}}}{\sum_{i=1}^n \beta_i * k_i},$$

где $i=1 \dots n$ – параметры отбора варианта (габариты, стоимость, надежность и т.д.);

$S_{\text{ф.н.}}$ – функционально-необходимые затраты на изделие;

K_i - экспертная оценка вариантов по параметру “ i ” в баллах;

β_i - коэффициент значимости параметра “ i ”, определяемый методом экспертизы в баллах.

Оптимальным считаю вариант с минимальным значением критерия $K_{\text{эф}}$.

Лекция 6. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

Совершенствование и модернизация конструкции машины осуществляется по трем направлениям: исключение носителей бесполезной функции, удешевление носителей функций с низкой отдачей затрат, оптимизация ресурсов функций. На практике это реализуется путем разработки новой конструкции с использованием другого физического принципа действия, изменения компоновки, локальных изменений, оптимизации размеров или замены материалов. Рассмотрим наиболее распространенные пути совершенствования конструкций машин.

Компактность машин – уменьшение материалоемкости и габаритов

Одним из признаков рациональной конструкции машины является компактность, которая достигается при использовании принципа плотной упаковки. При конструировании следует максимально использовать габариты для размещения наибольшего числа рабочих элементов. Этот принцип, который называют принципом плотной упаковки, позволяет добиваться значительного выигрыша в габаритных размерах и массе конструкции [3].

Очень важно детали сборочной единицы заключить в корпус минимального объема так как при этом расходуется меньше металла и снижается стоимость его изготовления. Чем меньше объем узла, приходящийся на единицу передаваемой мощности, тем совершеннее его конструкция. Поэтому при компоновке узла ищут такое относительное расположение его деталей, при котором незаполненный объем в корпусе минимален. Например, соосные цилиндрические зубчатые передачи компактнее передач, выполненных по развернутой схеме. Особенно компактны двух- и трех-поточные соосные передачи [3].

Объем пустого пространства в зубчатом редукторе можно уменьшить, расположив валы передач на разных уровнях. Наклон плоскости разъема к основанию также способствует уменьшению незаполненного пространства.

Примером рационального размещения деталей с целью уменьшения габаритных размеров может служить двухступенчатый редуктор. Исходную конструкцию, выполненную по трехвальной схеме, можно сделать более компактной и легкой, если ведомое зубчатое колесо установить соосно с ведущим валом. Дальнейшее снижение размеров и массы можно осуществить уменьшением диаметра зубчатых колес, при увеличении длины зуба, переходом на не прямые зубья, изготовлением колес из более твердых материалов и т.д. [6].

Для размещения конструктивных элементов с целью повышения компактности можно использовать свободные плоскости. В этой форме принцип компактности более известен среди конструкторов и изобретателей как метод «матрешки», основной смысл которого – вложить один объект внутрь другого.

Размеры и массу конструкции в некоторых случаях можно уменьшить совмещением нескольких функций в одной детали. Например, в колодочных тормозах грузоподъемных машин тормозными шкивами служат половины упругих дисковых муфт, соединяющих валы электродвигателей с валами исполнительных механизмов.

Принцип компактности (плотно упаковки) используется в автоматизированном проектировании технических объектов. Для этой цели создан алгоритм размещения компонуемых деталей способами «свертывания» и «складывания» [6]. Под компактностью здесь понимается достижение при заданных условиях минимально возможной площади фигуры, образованной внешним обтягиванием гибкой связью системы компонуемых деталей машин.

В процессе проектирования технического объекта обязательно производится компоновка – рациональное размещение компонуемых частей в пространстве. Процесс компоновки при автоматизированном проектировании производится в два этапа: первоначально разрабатывается чертеж разведки, на котором осевые линии составных геометрических объектов – валов, зубчатых колес – лежат в плоскости чертежа, а затем чертеж свертываемой компоновки представляющий собой вид в направлении этих осевых линий (рис. 6.1).

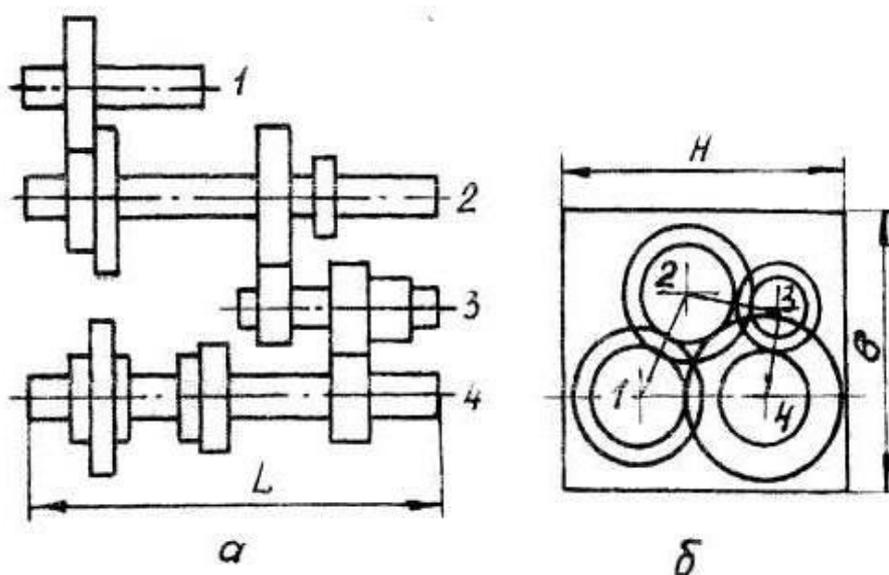


Рис.

6.1. Развертка (а) и свертка (б) компоновки зубчатой передачи

Под сверкой понимают укладку в пространстве непересекающихся круговых цилиндров (валов, муфт, зубчатых колес и др.) с взаимно параллельными осями и заданными межцентровыми расстояниями. Для получения компактной конструкции стремятся минимизировать площадь геометрической фигуры, описывающей выпуклую оболочку компонуемой системы. Такой фигурой при разработке технических объектов чаще всего является прямоугольник или окружность (корпуса редуктора или коробок передач). Улучшение условий свертывания достигается путем применения схемы осового совмещения валов или варианта «вал в вале».

Выполняя чертеж развертки, в качестве критерия компактности принимают длину привода, а при построении чертежа сверки – два других габаритных размера. Компактность сверки оценивают величинами периметра и площади геометрической фигуры центров, вершинами которого служат центры компокуемых кругов, а ребрами – прямые, соединяющие эти центры. Оптимальность решения задачи зависит от взаимного расположения компокуемых деталей и степени их взаимного пересечения.

Повышение технологичности конструкции

Связь между конструкцией машины и технологией ее изготовления является общепризнанной, поэтому при проектировании машины следует обеспечивать одновременно высокие эксплуатационные показатели и высокую технологичность. Форма детали должна соответствовать компоновочным решениям сборочной единицы и расчета на прочность.

Кроме того, форма детали должна быть приемлемой для обработки. Для деталей типовой формы следует использовать типовой технологический процесс. Более предпочтительным вариантом при изготовлении полых валов является технологический процесс, предусматривающий изготовление их из труб при минимальном объеме механической обработки.

Для уменьшения затрат на механическую обработку при конструировании деталей следует соблюдать следующие основные правила. Конструкция детали должна обязательно предусматривать возможность ее закрепления на станке для обработки. В случае наличия на детали уступов следует предусматривать канавки или проточки для выхода инструмента. Обрабатываемая деталь должна быть достаточно жесткой и удобной для закрепления на станке. Обработанные поверхности должны выделяться от необработанных с помощью платиков или бобышек. Плоские обрабатываемые поверхности желательно располагать на одном уровне так, чтобы их можно было обрабатывать «за один проход». Отверстия большого диаметра (гнезда подшипников) в двух или более стенках корпусной детали также рекомендуется обрабатывать «на проход». При обработке «на проход» легче обеспечивается точность взаимного расположения поверхностей. Площадь обрабатываемых поверхностей должна быть по возможности минимальной. При этом все отверстия (гладкие и резьбовые) рекомендуется выполнять сквозными.

Конструируя литые детали, следует создать условия для равномерного остывания залитого в форму металла. Этому способствует равномерная толщина стенок отливок, плавные переходы от одного сечения к другому, отсутствие местных скоплений металла.

Разрабатывая форму геометрически сложной литой детали (например, корпусная деталь редуктора), следует избегать вычурности в очертаниях; это упрощает изготовление и установку стержней для образования пустот. Для обеспечения технологически литых деталей с точки зрения удобства формовки и изготовления модельной оснастки следует стремиться, чтобы очертания литых деталей были ограничены плоскостями или поверхностями вращения. Конструктор, разрабатывая чертеж литой детали должен

стараться обеспечить возможность формовки с минимальным числом разъемов. Максимальная простота конструкции элементов сварных деталей и возможность их изготовления из литого материала или проката являются основными условиями технологичности конструкции. Особое внимание при конструировании сварных деталей следует уделять доступности мест сварки. В качестве примера высокотехнологичного и экономичного способа изготовления сварных резервуаров назовем способ рулонирования. Листовые конструкции резервуаров – оболочки вращения цилиндрической, сферической или конической формы имеет наивыгоднейшую конфигурацию при воздействии на них нагрузок от жидкости и газа. Особенность листовых конструкций, выполняемых почти исключительно сварными – большая протяженность сварных швов. При изготовлении резервуаров способом рулонирования стенки и днища сваривают на заводе в большие полотна и затем сворачивают их в рулоны диаметром 2,5...3 м, которые можно перевозить железнодорожным транспортом. На месте эти рулоны устанавливают в вертикальное положение, разворачивают и сваривают. Способ рулонирования можно применять при толщине стенки резервуаров и газгольдеров 4..12 мм.

Конструктор должен учитывать основные требования технологии сборки и разработки: удобство сборки и регулировки, ускорение сборки, уменьшение ручных оборочных операций. Для удобства сборки и регулировки должен быть обеспечен свободный доступ ко всем собираемым деталям, в том числе крепежным. Наименьший цикл сборки достигается в том случае, когда может быть организована независимая параллельная сборка отдельных сборочных единиц. Для удобства сборки узлов избегают, если возможно, соединений с натягом, а тяжелые детали сопрягают с валами посадкой на конус.

Значительные производственные затруднения при погрузке и разгрузке тяжелых и неудобных для захвата стропами изделий возникают, если в конструкции не предусмотрены грузовые винты, крюки или проушины. Разработка сопряженных деталей, площадь соприкосновения которых значительна (например, корпусные детали), трудно осуществима без отжимных винтов. При разделении таких деталей без применения отжимных винтов (например, с помощью зубила или отвертки) они легко повреждаются. Поэтому в подобных случаях необходимо предусмотреть резьбовые отверстия для отжимных винтов.

Следует заранее предусмотреть целый ряд факторов, связанных с удобствами сборки и разработки: возможность подобраться ключом к гайке и повернуть его; вставить и вынуть болт из отверстия и т.п. Если при конструировании подшипниковых узлов не учтена необходимость применения съемника для демонтажа подшипника качения, то при разработке применяются подручные средства в результате детали могут быть повреждены. Поэтому рекомендуется заранее предусмотреть в узле место для захода губок съемника или же использовать для демонтажа подшипника смежные детали.

Показателем технологической рациональности конструкции изделия может служить коэффициент сборности частей изделия. Коэффициент сборности $K_{сб}$ определяется как отношение числа сборочных единиц E в изделии к общему числу его составных частей (сборочных единиц и деталей) $E+D$ [6]:

$$K_{сб} = \frac{E}{E + D}.$$

С целью обеспечения технологичности изделия на различных стадиях его проектирования рассматривается возможность рационального членения конструкции на части, возможность независимой параллельной сборки составных частей и др.

Стандартизация и унификация

Нет никакой необходимости конструировать вновь, все элементы изделия вплоть до последнего винта. Чем больше готовых деталей и сборочных единиц использует конструктор при проектировании новых машин, тем лучше, поскольку в этом случае легче освоить производство новой машины и обеспечить ее запасными частями.

Использование во вновь проектируемой конструкции отдельных частей, ранее созданных деталей, освоенных в производстве и проверенных в эксплуатации, существенно снижает трудоемкость изделия и сокращает сроки его освоения на производстве.

Метод взаимозаменяемости предполагает придание составным частям изделия способности взаимной замены в данном изделии или группе изделий. Этот метод наиболее эффективен для деталей и сборочных единиц, часто заменяемых в процессе эксплуатации и ремонта изделия [6].

Огромное значение в машиностроении имеет стандартизация, которая обеспечивает единообразие и качество продукции. Стандартизация охватывает основные параметры конструкции, присоединительные и габаритные размеры, материалы, показатели качества, технические требования. Широкое использование стандартных узлов и деталей обеспечивает возможность массового или крупносерийного производства стандартных деталей; легкость замены при ремонте вышедших из строя деталей; повышение качества конструкции; экономию труда при конструировании. Изготовление специальной детали обходится в несколько раз дороже стандартной, поэтому всюду, где возможно, следует применять стандартные муфты, подшипники, тормоза, крепежные детали и др. [6].

Значительно ускоряет и удешевляет перевозку грузов применение стандартных контейнеров – ящиков стандартных размеров. Они по сути являются корпусами крытых грузовых автомобилей. Такие контейнеры перевозят с помощью автотягачей и легко перегружают на железнодорожную платформу или в трюм корабля. Это позволяет транспорту обмениваться контейнерами, не дожидаясь их загрузки – разгрузки, организовать эстафету, осуществить комбинированные перевозки на автомобильном, железнодорожном и водном транспорте.

Стандарты разрабатываются на основе глубоких исследований и обобщения большого опыта, поэтому стандартные детали и стандартные элементы деталей являются наиболее совершенными.

Стандартизация – важнейший технико-экономический фактор, который обеспечивает уменьшение объема конструкторских работ благодаря сокращению количества вновь конструируемых узлов и деталей и выполняемых рабочих чертежей; снижение сроков изготовления и общей стоимости изделия за счет применения стандартной технологии, готовых (покупных) относительно дешевых стандартных деталей [3]. Элементы выявляющиеся в процессе компоновки, следует многократно использовать для всей конструкции, добиваясь максимального сокращения номенклатуры.

Унификация или сокращение количества типоразмеров деталей и отдельных их элементов во всем изделии направлена на повышение технико-экономических показателей конструкции. Принцип унификации распространяют и на материалы для изготовления деталей. Конструктор должен стремиться соблюдать принцип унификации во всех стадиях проектирования [3]. Окончательный анализ конструкции с целью унификации проводят после разработки всех сборочных чертежей. При этом учитывают, например, типы и размеры подшипников качения, модули зубчатых колес зубчатых колес, крепежные детали, посадочные размеры и пр.

Унификация элементов конструкции снижает стоимость производства, упрощает обслуживание и эксплуатацию. Например, унификация модулей зубьев уменьшает номенклатуру зуборезного инструмента. Унификация посадочных размеров снижает номенклатуру контрольных калибров; унификация крепежных деталей уменьшает количество резбонарезного инструмента и сокращает комплект гаечных ключей [6].

Унификации подлежат размеры посадочных поверхностей, резьбы, шлицевые и шпоночные соединения, крепежные детали и др.

Степень унификации изделия оценивают с помощью коэффициента применяемости. Коэффициент применяемости унифицированных составных частей в изделии определяется по формуле

$$K_y = \frac{E_y + D_y}{E + D},$$

где E_y – число унифицированных сборочных единиц в изделии;

D_y – число унифицированных деталей изделия, не вошедших в E_y ;

E – число сборочных единиц в изделии;

D – число деталей, являющихся составными частями изделия и не вошедших в E [6].

Коэффициент применяемости стандартных составных частей изделия определяют по формуле

$$K_c = \frac{E_{ct} + D_{ct}}{E + D},$$

где E_{ct} – число стандартных сборочных единиц;

$D_{ст}$ – число стандартных деталей изделия, не вошедших в $E_{ст}$.

Экономический эффект от стандартизации складывается из двух составляющих:

1. Снижение себестоимости от увеличения коэффициентов применяемости стандартных и унифицированных составных частей машины:

$$\mathcal{E}_1 = C_6 + (K_c + K_y) * K_m,$$

где C_6 – себестоимость базовой модели.

2. Сокращение затрат на проектирование:

$$\mathcal{E}_2 = N_4 * S_4,$$

где N_4 – число аннулированных чертежей;

S_4 – затраты на один чертеж.

Уменьшение номенклатуры объектов производства.

Параметрические ряды

Одним из путей совершенствования конструкций машин является уменьшение номенклатуры изделий, в результате чего повышается серийности выпуска, увеличивается производительность, уменьшается стоимость продукции, облегчается эксплуатация, ремонт и снабжение запчастями.

Уменьшение номенклатуры выпускаемых изделий осуществляется путем создания параметрических рядов машин с рациональными выбранными интервалами между ними. Параметрический ряд – это ряд машин одинакового назначения (единый тип машин) с изменением ее размеров при сохранении геометрического подобия.

Рассмотрим график применяемости трехфазных электродвигателей переменного тока и соответствующий ему параметрический ряд (рис. 5.2).

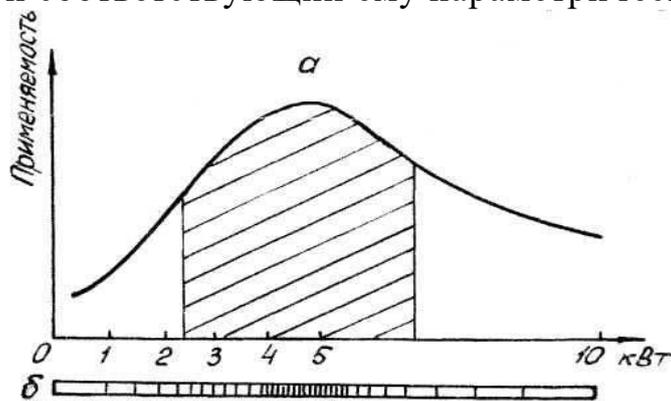


Рис. 6.2. График применяемости (а) и параметрический ряд электродвигателей (б)

Параметрический ряд разрежен в области наименьшей и сгущен в области наибольшей применяемости, что позволяет полностью удовлетворить потребности в электродвигателях. Дробность мощностей электродвигателей в указанной области обеспечивает повышение степени их использования.

Экономический эффект параметрических рядов обусловлен сокращением числа моделей, увеличением масштаба выпуска каждой модели. Метод параметрических рядов дает максимальный эффект в случае машин

массового применения с большим диапазоном изменения показателей. Важен при этом правильный выбор типа машин, числа ряда и интервалов между ними.

Для этого следует учитывать степень применяемости различных членов ряда. В диапазоне наиболее часто применяемых параметров целесообразно увеличить число членов ряда, в диапазоне редко применяемых – расширить интервалы [3].

Оптимизация конструкции машин

Оптимизацию конструкции рассмотрим на примерах оптимизаций геометрической формы и состава материала деталей машин и оборудования.

Оптимизацию геометрической формы изделия выполняют для минимизации стоимости его материала. С этой целью, например, применяют детали, имеющие кольцевое или тонкостенное сечение. Если кольцевое сечение трубы равно по площади сечению сплошного стержня, изогнуть стержень легче, чем трубу.

Полые валы с отношением диаметра внутреннего отверстия к наружному диаметру, равным 0.95, имеют массу в 5 раз меньшую, чем масса сплошного вала [3].

Наивыгоднейшее сечение балок в форме полого прямоугольника по прочности лишь немного уступает кольцевому сечению, эта форма имеет и конструктивные преимущества.

В качестве примера оптимизации геометрической формы рассмотрим газгольдеры – сосуды для хранения газа, которые могут быть шаровыми или цилиндрическими. Расход металла на изготовление шарового газгольдера на 20 % меньше, чем для цилиндрического. Однако они менее распространены из-за трудности изготовления скорлуп – листов двойкой кривизны. Стоимость эксплуатации газгольдерной станции уменьшается при увеличении объема газгольдера и уменьшении их числа. Однако «габаритные» газгольдеры, которые можно перевозить по железной дороге, имеют диаметр до 3.25 м, поэтому рациональны негабаритные цилиндрические газгольдеры большого диаметра и объема, изготавливаемые на месте.

Горизонтальные цилиндрические резервуары для жидкостей объемом до 400 м³ для удобства транспортировки целесообразно изготавливать с диаметром не более 3.25 м. Вследствие полной заводской готовности эти резервуары наиболее экономичны.

Для хранения больших объемов жидкости применяют «каплевидные» резервуары (имеют форму лежащей капли жидкости), которые представляют собой оболочки равного сопротивления растяжению и изгибу. Такой резервуар является равнопрочной и весьма экономичной по затратам на конструкцию.

С целью экономии материала при конструировании цилиндрических вертикальных резервуаров выбирают наивыгоднейшие соотношения высоты H и диаметра D при заданном объеме резервуара (правило Шухова) следующим образом [3].

При переменной толщине стенки резервуар имеет минимальную массу при условии, что объем металла днища и крыши равен объему металла

стенки. Оптимальная форма резервуаров объемом до 10000 м³ достигается при соотношении $\frac{D}{H} = 2 \dots 5$. Подсчитано, что расход стали на резервуар низкого давления, уменьшается с увеличением объема резервуара (табл. 9)

Таблица 9 Расход стали от объема цилиндрического резервуара

Объем, м ³	200	400	1000	2000	5000
Расход стали, кг/м ³	38	33	24	21	20

Значительный выигрыш при проектировании машин можно получить за счет оптимизации выбора материалов.

Во многих случаях сказывается экономически целесообразным принимать для изготовления деталей конструкционную углеродистую или легированную сталь с последующей цементацией и закалкой. В результате изделие окажется неоднородным по своему строению. Здесь качества сердцевины и поверхностного слоя дополняют друг друга.

При выборе материала для тяжело нагруженных зубчатых колес исходят из того, что поверхность зубьев должна обладать высокой контактной выносливостью, а зубья шестерни – достаточной изгибной прочностью. Для выполнения первого требования рабочая поверхность зуба должна иметь высокую твердость, а для выполнения второго – материал зубьев должен обладать пластичностью. Таким образом, к одной и той же части детали предъявляются различные требования. Решить эту задачу можно путем выбора соответствующей марки стали и введения поверхностного упрочнения материала. Способы реализации целевой макроскопической неоднородности материала изделия следующие:

Термохимическая обработка; облицовка поверхностей; применении накладок и вставок, биметаллизация; тонкослойные неметаллические покрытия [6] и др.

В качестве примера облицовки поверхностей деталей можно привести футеровку (облицовку полимерным материалом) канатных блоков и шкивов. Этот способ оптимизации используется также для получения комбинированных (композитных) материалов, составленных из нескольких компонентов, сохраняющих свои особенности в отдельности, но в совокупности образующих новые материалы, отличные по свойствам от исходных. Наиболее массовый и сравнительно дешевый композит – стеклопласт, где армирующим элементом служат стеклянные волокна, а связующим элементом – смола. В новых композитах в качестве упрочняющих элементов используют углеродистые и органические волокна; первые композиты в 4.5, а вторые в 5.5 раз легче стали и существенно прочнее.

В промышленно развитых странах доля прогрессивных материалов – композиционных, полимерных, керамических среди других материалов в конструкциях машин достигает 20...30%. Помимо экономии дорогостоящих металлов рост применения композитов приводит к общему снижению массы машины, к сокращению энергозатрат и горючесмазочных материалов.

Лекция 7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

Совершенствование конструкции любой машины идет главным образом по линии устранения недостатков и противоречия между совершенной и несовершенной частями конструкции. Противоречий в любой технической системе много, все они взаимосвязаны и разнообразны. Противоречия возникают между параметрами и элементами технической системы, между частями и свойствами ее составных элементов. При этом зарождение и разрешение противоречий диалектически взаимообусловлено – устранение одного противоречия сопряжено с возникновением другого. Техничко-экономические противоречия возникают между конструкторско-технологическими, экономическими и эксплуатационными показателями машины в процессе ее проектирования и модернизации. При этом, если некоторым способом улучшать один параметр, то может ухудшаться другой. Например, при уменьшении размеров изделия с целью достижения компактности может снизиться его надежность и возрастут ремонтные расходы. Результатом разрешения технико-экономического противоречия становится создание конструкции, которая представляет собой синтез элементов нового и прежнего технического решения.

Методика Альтшуллера

Одной из научно обоснованных и хорошо зарекомендовавших себя в практике преодоления технических и технико-экономических противоречий методик является методика Г.С.Альтшуллера, называемая алгоритмом решения изобретательных задач (АРИЗ), которая содержит последовательность операций по выявлению, уточнению и преодолению противоречия [7].

Эта методика может с успехом применяться при конструировании машин, поскольку труд конструктора, как и изобретателя, имеет творческий характер, а в некоторых случаях конструктор является «изобретателем по должности». Конструктор и изобретатель идут к решению творческой задачи путем поиска, однако поиск конструктора ведется методически целенаправленно, в более строгой последовательности.

В соответствии с этой методикой критерием совершенства любой машины служит соответствующая уровню всех современных требований «идеальная машина», которая используется как эталон для сравнения. Анализ недостатков прототипа с целью их устранения начинается при этом с попыток максимально приблизиться к эталону. Используя предложенную методику, конструктор легче найдет противоречие в проектируемой машине и получит результат поэтапно, более эффективным и коротким путем, чем в случае беспорядочного поиска. Определение идеального конечного результата (эталона конструкции) помогает сразу выйти в область эффективных решений. Дальнейший поиск конструктора облегчается выявлением технического противоречия и применением типовых приемов его устранения (рис. 7.1).



Рис.7.1. Алгоритм Г.С.Альтшуллера

В соответствии с этой методикой решение технической задачи связано с тремя этапами творческого процесса. На первом – аналитическом этапе выявляют техническое или технико-экономическое противоречие в системе. При этом конструктор идет от сформулированной в общем виде задачи к отысканию содержащегося в ней противоречия, определяет причину противоречия и находит условия, при которых противоречие снимается. Согласно АРИЗ аналитический этап делится на 5 операций: постановка задачи; определение идеального конечного результата (эталона); нахождение противоречия, мешающего достижению этого результата; отыскание причины этого противоречия, выявление условий, при которых противоречие снимается.

На оперативном этапе ведется поиск лучшего конструкторского решения в следующей последовательности: проверяют возможные изменения в самом техническом объекте, возможность расчленения объекта на независимые части, а также изменения во внешней среде, окружающей объект, возможные изменения в соседних объектах, работающих совместно с данными. Результат этого этапа – устранение причины противоречия и при необходимости внесение изменений в одну из частей машины.

На синтетическом этапе другие части совершенствуемой машины приводятся в соответствие с измененной частью. Предложенный порядок и последовательность действий организует мышление и деятельность конструктора в процессе решения технических задач.

На рис. 7.1 приведена сжатая схема методики решения технических задач Г.С. Альтшуллера. При пользовании схемой следует иметь в виду, что процесс творческой работы конструктора, получившего техническое задание на проект, обычно начинается со второго этапа.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий применение программной методики решения технических задач к проектированию зубчатой передачи.

1. Аналитический этап решения:

Эталоном проектируемой конструкции (идеальным результатом) является весьма компактная и легкая конструкция редуктора с большой нагрузочной способностью. Зубчатые колеса изготовлены из легированной стали, подвергнуты цементации и имеют высокую твердость. Форма зубьев – шевронная. С целью снижения габаритов редуктора уменьшено межосевое расстояние за счет увеличения ширины зубьев.

Что мешает максимально приблизиться к этому эталону? Техничко-экономическое противоречие между требованием компактности и стоимости продукции. Применяя для изготовления легированную сталь и термообработку, достигает уменьшения габаритов изделия, но при этом возрастает трудоемкость и стоимость его изготовления. Кроме этого из-за малого межосевого расстояния появляются трудности с размещением подшипников качения. Причина противоречия – значительное уменьшение межосевого расстояния.

2. Оперативный этап:

Устраняют причину противоречия путем внесения изменений в одну из частей конструкции. В зависимости от используемого приема здесь возможны несколько путей решения:

а) прием увеличения числа элементов технической системы. В каждой из опор ведущего и ведомого валов редуктора устанавливают сдвоенные (с целью получения необходимой динамической грузоподъемности) подшипники качения более легкой серии, имеющие меньшую стоимость. При этом общее число подшипников в опорах редуктора увеличивается.

б) компромиссное решение (прием увеличения – уменьшения). Межосевое расстояние несколько увеличивают до величины, при которой в опорах валов могут разместиться первоначально выбранные подшипники. Однако при этом несколько увеличатся габаритные размеры редуктора, т.е. уменьшится его компактность

в) прием изменения элементов технической системы. Перейти в опорах валов редуктора от подшипников качения к более дешевым подшипникам скольжения. При этом значительно уменьшаются диаметральные размеры подшипниковых гнезд, и небольшое межосевое расстояние не будет служить препятствием для размещения подшипников скольжения; таким образом противоречие будет устранено.

3. Синтетический этап решения:

Для последнего решения оперативного этапа (пункт 2, в) введем изменения в другие части технической системы. Требуется организовать систему смазки подшипников скольжения или применить для изготовления вкладышей антифрикционный самосмазывающийся материал [6].

Типовые эвристические приемы для преодоления технико-экономических противоречий

Выявление условий, при которых технико-экономическое противоречие устраняется и его преодолению помогает применение типовых эвристических приемов. Эвристические приемы или приемы организации творчества

содержат указание преобразований, которые следует провести в изделии для достижения цели. Прием обычно содержит несколько эвристических правил. Метод представления собой совокупность приемов и является способом достижения определенной цели. Он содержит обычно один или несколько приемов, изложенных с соблюдением упорядоченности предписываемых действий. При проектировании могут использоваться логические и эвристические методы и приемы. От умения использовать эвристические методы зависят творческие возможности конструктора.

Эвристические методы повышают возможности поиска и нахождения решения в тех случаях, когда оказываются недостаточными логические (алгоритмические) методы. Алгоритмом называют совокупность правил, которая если ей последовательно руководствоваться, автоматически порождает верное решение. Эвристические приемы больше напоминают эмпирические правила. В отличие от алгоритмов эвристические приемы не гарантируют успеха. Эвристический метод или прием позволяет сокращать количество возможных вариантов решения задачи или число проб, а в ряде случаев прийти к решению с меньшими затратами времен и средств.

Эвристические приемы направлены на то, чтобы ограничить поле выбора или перейти в другое поле выбора или поиска. Функция эвристических приемов – направлять и регулировать поиск. Эвристические приемы – это приемы самонаведения на решение.

Метод контрольных вопросов Осборна

В ряде методик практикуется последовательное применение эвристических приемов к проектируемой конструкции или технической задаче. С целью активизации творческого процесса при конструировании используется «метод контрольных вопросов», цель которого – привести к решению конструкторской задачи с помощью наводящих вопросов. В списке контрольных вопросов Осборна, который используется за рубежом, предлагается последовательный перебор различных эвристических приемов применительно к решаемой задаче. Приведем этот перечень в сокращенном виде [6].

1. Какое новое применение (или способ применения) можно предложить техническому объекту?

2. Можно ли решить техническую задачу путем приспособления, упрощения или сокращения? Что напоминает данный технический объект, вызывает ли аналогия новую идею? Имеют ли аналогичные решения, которые можно использовать? Что можно заимствовать?

3. Какие возможны модификации технического объекта? Возможна ли модификация путем вращения, изгиба, кручения? Какие возможны изменения функций, движения, формы и др.?

4. Что можно увеличить в техническом объекте или присоединить к нему? Возможна ли мультипликация рабочих элементов или всего объекта? Можно ли увеличить срок службы, частоту, размеры, прочность, повысить качество?

5. Что можно в техническом объекте уменьшить или заменить, уплотнить, сжать, укоротить, сузить, отделить, раздробить?

6. Что можно в техническом объекте заменить, например, материал, расположение и т.п.?

7. Что можно преобразовать в данном техническом объекте? Какие компоненты можно взаимно заменить, изменить последовательность операций, скорость? Взаимно заменить причину и следствие?

8. Что можно в техническом объекте перевернуть наоборот? Нельзя ли поменять местами, противоположно размещенные элементы, повернуть их задом наперед, перевернуть дном, поменять ролями?

9. Какие новые комбинации элементов технического объекта возможны? Можно ли создать новый ассортимент, комбинировать секции, узлы, блоки, агрегаты?

Для нахождения области возможных решений рекомендуются также наводящие операции следующего типа: использовать принцип действия природных систем; использовать известные конструкции; приспособить их к новым условиям; модифицировать действие (функцию); изменить схему нагружения; увеличить или уменьшить область взаимодействия; использовать обратное действие; изменить компоновку элементов конструкции, меняя их форму; изменить компоновку элементов конструкции, меняя их форму; изменить очередность взаимодействия элементов конструкции; сгруппировать элементы в узлы; исключить некоторые элементы путем объединения различных функций в одном элементе; разместить один элемент внутри другого; использовать симметрию или асимметрию, заменить ответственные элементы известными простыми элементами; использовать компенсирующие элементы; увеличить несущую способность элемента путем сочленения его с другими деталями; изменить размеры, увеличить число составных частей; исключить части, составляющие причины трудностей; заменить одни детали другими [6].

Применение основных эвристических приемов и их комбинаций для изменения проектируемой конструкции представлено на рис. 6.2.

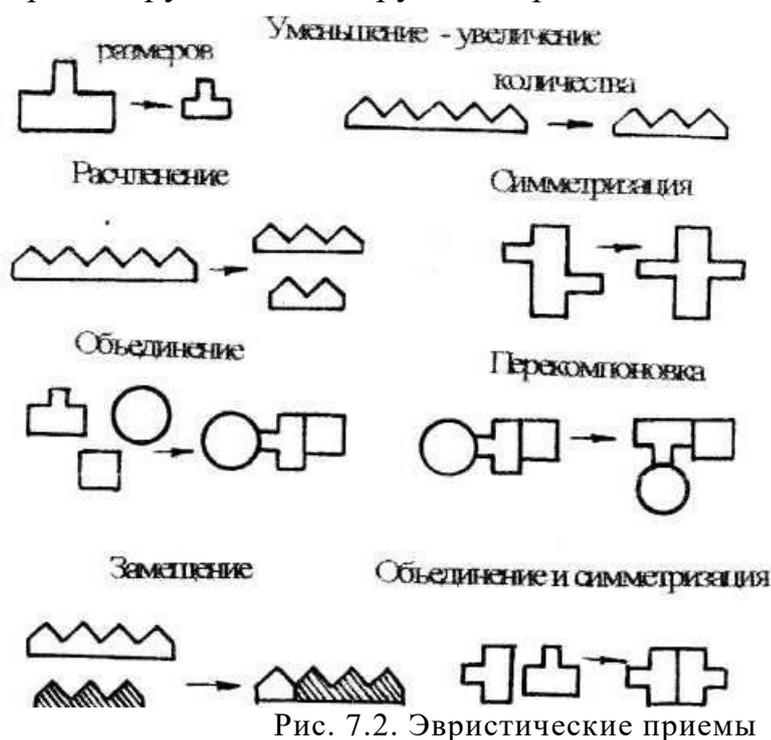


Рис. 7.2. Эвристические приемы

Некоторые из этих приемов смыкаются друг с другом, провести строгую границу между ними затруднительно, поэтому возможно сочетание и параллельное применение двух или нескольких приемов.

Рассмотрим последовательно основные эвристические приемы, наиболее часто используемые в процессе проектирования для преодоления технических и технико-экономических противоречий.

Аналогия и конструктивная преемственность

Основу аналогии составляют приемы сравнения и переноса элементов и сборочных единиц из одной конструкции в другую. Аналогия, используемая при проектировании, позволяет сделать вывод от сходства конструкции и прототипа в одном к сходству в другом, заключение по аналогии представляет собой перенос информации от прототипа к разрабатываемой конструкции. Однако не всякая аналогия правомерна. При использовании аналогии рекомендуется руководствоваться следующими правилами:

1. Вероятность правильного решения тем выше, чем больше общих свойств у прототипов и проектируемого устройства.
2. Основные признаки прототипа и устройства должны отличаться друг от друга, быть более разнородными.
3. Переносимые по аналогии свойства должны быть такого же типа, как и сходные [6].

Применение при проектировании машин и механизмов теории подобия делает выводы по аналогии вполне достоверными. Успешное нахождение нового технического решения не всегда связано лишь с применением строго определенного прототипа. Иногда полезно использовать несколько аналогичных объектов, выражающих одну и ту же идею решения. При аналогировании в техническом творчестве большое значения имеют знание смежных областей науки и техники, умение пользоваться других наук.

При проектировании аналогия выступает в форме конструктивной преемственности, т.е. использования при проектировании предшествующего опыта, введения в конструкцию всего полезного, что есть в существующих машинах. Каждую модель машины постепенно совершенствуют, снабжают новыми узлами и агрегатами, обогащают новыми конструктивными решениями, являющимися плодом творческих усилий и изобретательности нескольких поколений конструкторов.

Некоторые конструктивные решения с появлением более рациональных решений, новых технологических приемов, с повышением эксплуатационных требований отмирают, а некоторые отказываются исключительно живучими и сохраняются длительное время в таком или почти таком виде, какой им придали создатели. В соревнованиях побеждают наиболее прогрессивные и живучие конструкции [3].

Поэтому конструктивная преемственность предусматривает критический подход проектировщика как к техническому заданию, которое обычно ориентирует его на определенный отечественный или зарубежный прототип с высокими техническими показателями, так и к машинам – аналогам.

Конструктивную преемственность изделия можно количественно оценить с помощью показателей преемственности конструкции, которые характеризуют новизну изделия, изменяемость и повторяемость его составных частей, конструктивных элементов и материалов. К ним относятся коэффициенты новизны конструкции, применяемости унифицированных или стандартных деталей, сборочных единиц и конструктивных элементов, повторяемости составных частей изделия, его конструктивных элементов и материалов, типизация конструктивного исполнения [6].

Коэффициент новизны конструкции определяют по формуле

$$K_n = \frac{N_n}{N},$$

где N_n – число новых составных частей (деталей и сборочных единиц) в разработанной конструкции;

N – общее число составных частей спроектированной конструкции.

Коэффициент новизны K_n может изменяться от нуля до единицы.

Новизна конструкции изделия существенно влияет на длительность технической подготовки производства при создании и освоении изделия, снижение расхода материалов на запасные части и т.п. На новизну конструкции изделия можно воздействовать путем унификации его составных частей, а также типизации компоновочной схемы [6].

Инверсия или обращение

Различают аналогии (ассоциации) по смежности, по сходству и по контрасту. Ассоциации по контрасту и противоположности выполняют особо важную роль, в творческой умственной деятельности человека. Ассоциации по противоположности легли в основу инверсионного мышления, которое само по себе значительно сложнее, нежели аналоговое мышление. Хотя инверсионное мышление и антиподно аналоговому, оно невозможно без последнего.

Вот как описывает метод инверсии Диксон: «Если некоторый объект обычно рассматривается снаружи, то применение метода инверсии означает, что теперь он будет исследован изнутри. Если в устройстве некоторая деталь расположена вертикально, то инверсия означает, что ее переворачивают вверх дном, ставят в горизонтальное положение или помещают под некоторым углом. Если одна часть системы движется, а другая неподвижна, то инверсия означает, что эти части меняются местами» [5].

Методом инверсии или обращения широко пользуются конструкторы, изобретатели и ученые. На базе метода обращения функций, форм и расположения деталей сделано огромное число изобретений, поражающих своей оригинальностью и необычной логикой рассуждения. В узлах машин бывает выгодным поменять детали ролями, например, ведущую деталь можно сделать ведомой, охватывающую – охватываемой, неподвижную – подвижной.

Целесообразно иногда инвертировать формы деталей, например, выпуклую поверхность сделать вогнутой, переместить конструктивные элементы с одной детали на другую, например, шпонку – с вала на ступицу. Каждый раз конструкция при этом приобретает новые свойства [3]. Иногда удается

добиться значительного успеха в организации решения технической задачи и без добавления нового элемента за счет одного лишь изменения расположения имеющихся конструктивных элементов, путем изменения соотношения между ними, перестановки или перегруппировки их, т.е. изменения структуры.

Перегруппировка может повлечь за собой изменение акцента в понимании конструкторской задачи; при этом элементы и соотношения, стоявшие до перегруппировки на переднем плане, могут отодвинуться назад и т.п.

Долговечность некоторых деталей удается повысить вдвое, предусматривая возможность их перевертывания после половины срока службы. Это относится к деталям, работающим одной стороной профиля.

Приемы увеличения – уменьшения. Простота и сложность конструкции

Распространенными эвристическими приемами являются увеличение и уменьшение конструкторско-технологических показателей машин, например, увеличение числа рабочих органов, рабочих позиций, количества одновременно обрабатываемых изделий и др. Увеличение и уменьшение при этом следует понимать в самом широком плане, как увеличение и уменьшение скорости движения, надежности, геометрических размеров, действующих усилий.

Методом увеличения часто пользуются для улучшения экономических показателей машин. Например, выгоднее перевозить грузы и пассажиров в одном большом автомобиле, самолете, поезде, чем в нескольких маленьких.

Полагают [2], что любая техническая система в процессе развития от специализации по функциональному назначению к унификации элементов принимает форму изолированных друг от друга унифицированных элементов, число и характер которых могут варьироваться; при этом общий рост технических систем происходит за счет увеличения числа унифицированных элементов (поезд, лихтеровоз, контейнеры и т.д.).

В случаях, когда целесообразно уменьшение числа принятых конструктивных решений и материалов, используется прием симплификации - ограничения или сокращения числа типоразмеров выпускаемых изделий и их составных частей, номенклатуры конструктивных элементов, а также сортамента и марок применяемых материалов.

При применении рациональных конструктивных схем с наименьшим числом деталей достигаются наибольшие возможности уменьшения массы изделий. Уменьшение числа звеньев механизма и устранение излишних деталей упрощает конструкцию и способствует значительному снижению массы агрегата.

Методы уменьшения и исключения избыточных элементов (или связей между ними) играют важную роль при совершенствовании существующих конструкций. На рис 7.3 показана схематически конструкция колодочного тормоза, обеспечивающего постоянный тормозной момент. Поиск опти-

мальной конструкции колодочного тормоза осуществляют путем исключения избыточных элементов с использованием графов отношений связей между элементами конструкции (рис. 6.3)

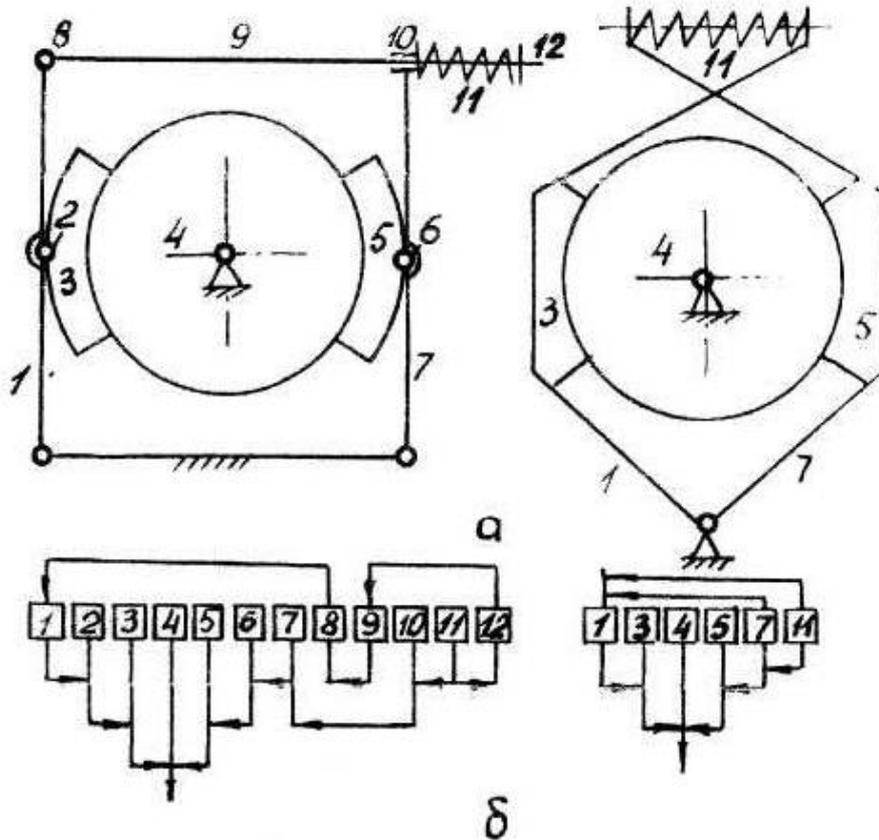


Рис. 7.3. Исключение избыточных элементов в конструкции колодочного тормоза

Результат уменьшения числа элементов колодочного тормоза представлен в виде графа отношений связей; новым здесь, является элемент, полученный объединением элементов 1 и 9 [6]. Полученная таким образом новая схема дает новую концепцию конструкции тормоза.

Оперируя приемами уменьшения и увеличения, конструктор может существенно повлиять на сложность конструкции изделия.

Сложность конструкции изделия определяется числом образующих составных частей или конструктивных элементов изделия. Коэффициент конструктивной сложности изделия определяется по формуле

$$K_{cn} = \frac{N}{N_a},$$

где N и N_a - соответственно число составных частей разрабатываемой конструкции и аналога [6].

Сложность конструкции существенно влияет на трудоемкость проектируемого изделия и сроки его освоения в производстве и эксплуатации. Конструктивную сложность можно уменьшить, применяя агрегатирование составных частей путем блочно-модульного построения структуры изделия, применяя приемы мультипликации – симплификации и др. При этом упрощается проектирование изделия, облегчаются процессы его монтажа, техобслуживания и ремонта.

Приемы дробления-объединения. Секционирование и агрегатирование машин

Среди приемов, облегчающих нахождение технических решений при конструировании, видное место занимают методы дробления объекта, называемые еще методами секционирования, блочности, агрегатности, многопоточности; примерами применения этого приема являются шевронные колеса, раздвоенные ступени зубчатых передач, ременные передачи с большим числом параллельно работающих клиновых ремней и др.

Значительный выигрыш по массе можно получить применением в передачах многопоточных схем, т.е. разделением силового потока на несколько параллельных ветвей. Передача крутящего момента через несколько параллельно работающих зубчатых колес в многосателлитных планетарных передачах уменьшает нагрузки на зубья пропорционально числу потоков. Несущая способность шлицевых соединений в 3-6 раз больше, чем у призматических шпонок [3].

Метод секционирования состоит в разделении машины на одинаковые секции. Секционированию хорошо поддаются многие виды подъемно-транспортных устройств (ленточные, скребковые, цепные конвейеры). Секционирование в данном случае сводится к построению каркаса машины из секций и составлению машин различной длины [3].

Машины представляют собой сложные технические системы, состоящие из большого числа взаимодействующих элементов. Техническая система характеризуется связностью ее элементов, изменяемостью и иерархичностью, т.е. возможностью расчленения на уровни и отдельные блоки. Это позволяет применять при проектировании машин блочно-иерархический подход, разделяя сложную проблему создания новой техники на ряд последовательно решаемых задач меньшей сложности.

Интересно отметить, что метод расчленения как эвристический прием в решении различных задач был предложен Р.Декартом в следующем виде: «Расчлените каждую изучаемую вами задачу на столько частей, на сколько сможете и на сколько потребуется вам, чтобы их было легко решить» [6].

Агрегатирование заключается в создании машин путем сочетания унифицированных агрегатов, представляющих собой автономные узлы, устанавливаемые в различном числе и комбинациях на общей станице; этот метод весьма перспективен [3]. Целесообразно конструировать узлы в виде независимых агрегатов, отдельно собираемых, регулируемых и устанавливаемых в законченном виде на машинах. Агрегатирование позволяет осуществить параллельную и независимую сборку узлов машин, упрощает монтаж, облегчает использование на новых машинах проверенных в эксплуатации конструкций и упрощает ремонт, позволяя комплексно заменить износившиеся узлы. Агрегатирование дает большой выигрыш в общей стоимости изготовления машин, надежности и удобства эксплуатации.

Методы дробления – объединения находят применение в составных конструкциях. В ряде случаев с целью удешевления конструкции, облегчения механической обработки или упрощения формы заготовок целесообразно

ее расчленив, соединив составные части запрессовкой, сваркой или с помощью крепежных болтов.

Расчленение позволяет в некоторых случаях значительно уменьшить трудоемкость изготовления литых корпусных деталей. Применение составных конструкций облегчает создание деталей сложной формы. Составные конструкции часто применяют как заменители поковок для валов с фланцами большого диаметра.

Составные конструкции широко применяют как средство экономии дефицитных и дорогостоящих материалов. Для уменьшения расхода бронзы, например, в червячных передачах, применяют бандажирование. Из бронзы выполняют только венец, который напрессовывают на центр колеса, изготовленный из дешевого материала (сталь, чугун). Расход бронзы может быть уменьшен в несколько раз по сравнению с исходной конструкцией. В зубчатых колесах целесообразно выполнять из дорогостоящих и дефицитных материалов только венец.

Для расширения функций машин часто пользуются методом объединения; при объединении нескольких функций объект приобретает свойство универсальности. Универсализация преследует цели расширения функций машин, увеличения диапазона выполняемых ими операций, увеличивает приспособляемость машин к требованиям производства. Универсальная машина заменяет несколько специализированных, выполняющих отдельные операции. Расширить функции машины можно внедрением дополнительных рабочих органов, сменного оборудования, внедрением регулирования главных параметров (частоты вращения, мощности, производительности и др.) [3]. Например, при объединении жатки, молотилки, веялки и зернопогрузчика в одно устройство получили зерноуборочный комбайн. Метод компаундирования (параллельного соединения машин или агрегатов) применяют с целью увеличения общей мощности или производительности установки. Спариваемые машины могут быть или установлены рядом как независимые агрегаты или конструктивно объединены в один агрегат. Примером объединения такого типа является параллельная установка машин – орудий. Ее применяют в автоматических линиях. Такая установка требует разделения потока на два или больше потоков с последующим соединением их в один [3].

Однако объединение элементов в единое целое обязательно должно выполняться по определенному закону, не каждый результат объединения приносит полезный эффект.

По мнению Д.Пойа [6], изоляция (дробление, выделение) и комбинация (объединение), дополняя друг друга, могут продвинуть процесс решения. Изоляция элементов приводит к распаду целого на части, а последующая комбинация их снова объединяет части в целое, отличающееся от исходной конструкции. Разлагая целое на составные части, а затем соединяя их по – другому, мы заставляем эволюционировать наше понимание задачи и переходим к более перспективной ситуации.

Метод разделения и объединения используется часто для совершенствования существующих конструкций. Применяются следующие действия, имеющие целью разделение и объединение:

1. Разделение конструкции на основные части и новое упорядочение этих частей с целью получения модернизированной конструкции.
2. Разделение конструкции на элементы, их модификация и составление в прежнем порядке.
3. Разделение конструкции на элементы, их модификация и объединение с целью получения новой конструкции.

Эти действия можно формализовать в виде следующего алгоритма конструкции K_i с основными параметрами и свойствами n_i разделяется на составные элементы со свойствами m_i . Затем либо осуществляется модификация элементов при возможном изменении их числа с целью получения конструкции K_2 со свойствами n_1 ; либо производятся изменения для получения конструкции K_3 с новыми основными параметрами и свойствами n_2 [6].

Комплексные методы совершенствования конструкции

К методам преобразования основных показателей конструкции с помощью эвристических приемов относится метод десятичных матриц поиска. В соответствии с этим методом поиск новых технических решений ведут путем систематического применения ряда приемов конструирования (преемственности, аналогии, адаптации, мультипликации, дифференциации, интеграции, инверсии и др. к каждому из основных показателей технической системы.

В качестве основных показателей проектируемой конструкции выбирают геометрические размеры, массу и прочность свойства, энергетические показатели (КПД и др.), конструктивно-технологические (технологичность, сложность), надежность и долговечность, эксплуатационные (производительность, точность), экономические, степень унификации и стандартизации, удобство эксплуатации и др. Этот метод позволяет построить таблицу (матрицу) поиска в строках записаны основные изменяемые показатели технического объекта, а в столбцах – основные эвристические приемы. Каждая ячейка матрицы соответствует определенному изменению одного из основных показателей изделия (табл. 10).

Таблица 10 Матрица поиска новых технологических решений.

Изменяемые показатели технической системы	Эвристические приемы				
	Преемственность, заимствование	Мультипликация	Дифференциация	Интеграция	Инверсия
Геометр. форма					*
Масса, прочность			*		
КПД		*			
Сложность, технологичность	*				
Эксплуатационные свойства			*		

Экономические показатели				*	
Степень, унификации	*				

Метод десятичных матриц поиска используется в интенсивной технологии инженерного творчества. Этот метод находит применение при разработке новых высокоэффективных технических систем и комплексов.

Комплексные методы совершенствования конструкций позволяет алгоритмизировать процесс проектирования, т.е. привести его к форме, допускающей широкое применение компьютеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мымрин Ю.Н., Грачева К.А., Скворцова Ю.В. Техничко-экономический анализ машин и приборов. М: Машиностроение, 1985. 248 с.

2. Конструирование машин: Справочно-методическое пособие. В 2 т./ К.Ф. Фролов, Крайнов А.Ф., Крейнин Г.В. и др. –М: Машиностроение, 1994. 528с.

3. Орлов П.И. Основы конструирования. М: Машиностроение, 1988 Т.1. 559с.

4. Колбачев Е.Б. Создание и освоение новой техники / НПИ Новочеркасск, 1991. 137с.

5. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. М: Машиностроение, 1988, 368с.

6. Авдеев Д.Т., Щеголев В.А., Бабец Н.В., Основы творческого конструирования машин: Учеб. Пособие/ НПИ Новочеркасск, 1992, 100с.

7. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука М: Советское радио. 1979.176с.