

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

Ю.Л. МУРОМЦЕВ, Д.Ю. МУРОМЦЕВ, В.Н. МИТРОФАНОВА

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию  
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и  
автоматизации в качестве учебного пособия



---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
2011

УДК 621.38.002.2(075.8)  
ББК У386.6я73  
М915

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор кафедры  
«Управление качеством и сертификация» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*М.М. Мордасов*

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Компьютерное и математическое моделирование»  
ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г.Р. Державина»  
*А.А. Арзамасцев*

**Муромцев, Ю.Л.**

М915 Энергетическая эффективность проектирования радиоэлектронных средств : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.Н. Митрофанова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1057-5.

Изложены основные положения энергетической эффективности изделий, рассмотрены задачи проектирования, повышения энергетической эффективности технологии производства радиоэлектронных средств, а также представлена методология оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в проекте радиоэлектронных средств.

Предназначено для бакалавров и магистрантов направлений 211000, 210700, 210200, а также студентов специальности 210201 при изучении дисциплин, выполнении курсовых и дипломных проектов, магистерских диссертаций, в которых рассматриваются аспекты повышения эффективности использования энергоресурсов.

УДК 621.38.002.2(075.8)  
ББК У386.6я73

**ISBN 978-5-8265-1057-5**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2011

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ (АББРЕВИАТУРЫ)

---

АРМО	– автоматизированное рабочее место оператора;
АСТПП	– автоматизированная система технологической подготовки производства;
АСУТП	– автоматизированная система управления технологическим процессом;
АС	– антенная система;
ЗОУ	– задача оптимального управления;
ЗПС	– задача параметрического синтеза;
ЗСС	– задача структурного синтеза;
ИД	– индекс доходности;
МСФ	– множество состояний функционирования;
ОФПС	– обобщённые функциональные подсистемы;
ПО	– программное обеспечение;
ППМ	– приёмно-передающий модуль;
ПЭнЭ	– показатель энергетической эффективности;
РЭС	– радиоэлектронные средства;
САР	– система автоматического распознавания;
САПР	– системы автоматизированного проектирования;
СБИС	– сверхбольшие интегральные схемы;
СОИ	– системы обработки информации;
ТП	– технологический процесс;
ТПП	– технологическая подготовка производства;
ТЭР	– топливно-энергетические ресурсы;
ЧДД	– чистый дисконтированный доход;
ЧП	– чистая прибыль;
ЭнЭ	– энергетическая эффективность;
ЭС	– экспертная система;
ЭСМ	– энергосберегающие мероприятия;
ЭСР	– энергосберегающий регулятор;
ЭЭ	– экономичность энергопотребления.

## ВВЕДЕНИЕ

---

Важнейшим условием конкурентоспособности энергопотребляющей продукции производственно-технического назначения и бытового потребления в настоящее время становится её энергетическая эффективность. Под эффективным использованием топливно-энергетических ресурсов (энергонасителей) понимается экономически оправданное их использование при существующем уровне развития техники и технологий, соблюдение требований к охране окружающей природной среды.

В качестве показателей энергетической эффективности продукции или технического процесса могут использоваться абсолютная, удельная и относительная величины потребления или потерь энергоресурсов. Наряду с ними применяются также показатели экономичности энергопотребления продукции, т.е. количественные характеристики эксплуатационных свойств изделий, отражающие их техническое достоинство, которое определяется совершенством конструкции, качеством изготовления, уровнем (степенью) потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при использовании изделий по прямому функциональному назначению [1].

В общем случае энергосбережение достигается реализацией научных, технических, экономических, производственных, а также организационных и правовых мер, направленных на эффективное использование ТЭР. В качестве ТЭР рассматривается совокупность природных и производственных энергонасителей, запасённая энергия которых доступна для использования в хозяйственной и других видах деятельности при существующем уровне развития техники и технологии. Энергонасителями могут быть вещества в различных агрегатных состояниях (газообразном, жидком, твёрдом) или другие формы материи (поле, плазма и т.д.), запасённая энергия которых может использоваться в целях энергосбережения.

Учитывая данные обстоятельства, курсовые и дипломные проекты должны содержать раздел, в котором рассматриваются аспекты повышения эффективности использования энергоресурсов радиоэлектронных средств (РЭС) в технологических процессах при производстве.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

---

Проблема энергосбережения имеет исключительно важное значение для экономики страны. Применительно к проектированию и технологии производства радиоэлектронных средств в её решении важную роль играют два аспекта. Первый аспект заключается в снижении энергозатрат системами радиосвязи без ухудшения их функциональных характеристик. Второй аспект связан с энергосберегающими мероприятиями в технологических процессах и при проектировании РЭС.

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Все изделия, которые потребляют топливно-энергетические ресурсы при использовании их по прямому функциональному назначению, называются энергопотребляющими. В данном случае к ТЭР относятся природные и произведённые энергоносители, запасённая энергия которых доступна для использования при производстве и функционировании РЭС. В качестве энергоносителей могут рассматриваться вещества в различных агрегатных состояниях и иные формы материи, запасённая энергия которых может использоваться для целей энергоснабжения [1].

Энергетическую эффективность (ЭнЭ) обычно рассматривают как экономически оправданную эффективность использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий, при этом должны соблюдаться требования к охране окружающей природной среды. Количественно ЭнЭ технологических процессов и экономичность энергопотребления (ЭЭ) изделий оцениваются системой показателей.

Согласно Закону Российской Федерации «Об энергосбережении», понятие «энергосбережение» следует рассматривать как реализацию правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование и экономное расходование ТЭР, а также вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии. Заметим, что наряду с термином «эффективное» использование часто будет применяться «рациональное» использование.

Выполняемые мероприятия носят энергосберегающий характер лишь в том случае, если достигаемый за их счёт экономический эффект будет превышать затраты на их реализацию.

Вместе с тем в ряде случаев для повышения качества функционирования РЭС, улучшения тактико-технических характеристик (дальности действия, надёжности, увеличения срока службы, обеспечения безопасно-

сти) предпринимаются меры, связанные с дополнительным расходом энергоресурсов. Такие меры считаются оправданными, если достигаемый за их счёт экономический эффект превышает дополнительные энергозатраты.

Таким образом, энергосбережение – это комплексная проблема, связанная с рациональным использованием энергоресурсов. Потенциал энергосбережения рассматривается как количество энергетических ресурсов, которое может быть сокращено при выпуске одного и того же количества изделий за счёт проведения самокупаемых энергосберегающих мероприятий при заданном уровне развития науки и техники, а также цен на энергоносители. По приближённым оценкам доля энергии, которую можно сэкономить (потенциал энергосбережения оценивается в результате сопоставления показателей ЭнЭ в России и стран Запада), составляет 30...40% ТЭР.

В соответствии с требованиями существующих стандартов [1 – 3] и других нормативных документов все спроектированные и изготовленные энергопотребляющие изделия подлежат процедуре подтверждения соответствия показателей ЭнЭ (или экономичности энергопотребления) установленным нормативным значениям (требованиям) показателей для продукции данного класса.

Перечень продукции, которая потребляет ТЭР при её использовании по прямому функциональному назначению, исключительно широк. Сертификации по показателям энергетической эффективности подлежат следующие виды продукции:

- машины электрические (двигатели, энергонагреватели, водонагреватели, компрессоры и т.д.);
- продукция тяжёлого, энергетического и транспортного машиностроения (котлы, дизели и т.п.);
- продукция общемашиностроительного применения (насосы, гидромоторы и т.п.);
- продукция нефтяного и химического машиностроения (аппараты теплообменные, сушилки, холодильные установки и т.п.);
- изделия автомобильной промышленности, тракторы и сельскохозяйственные машины;
- продукция строительного дорожного и коммунального машиностроения (экскаваторы, лифты, радиаторы и т.п.);
- бытовое оборудование (холодильники, стиральные машины и т.п.) и др.

Для каждого класса ЭнЭ продукции нормативным документом устанавливается уровень энергоэффективности в виде интервала значений показателей экономичности энергопотребления для группы однородных изделий.

Если при выполнении курсового или дипломного проекта студенту не удаётся получить информацию об уровне энергоэффективности разрабатываемого объекта (блока, модуля), то для сопоставления используются наиболее энергоэффективные аналоги либо корректируются значения показателей ЭнЭ прототипа с учётом развития технологий и элементной базы.

## **1.2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Количественно эффективность разрабатываемых изделий определяется с помощью системы показателей ЭнЭ. Наиболее часто в качестве показателей ЭнЭ при проектировании РЭС используются абсолютная, удельная и относительная величины потребления или потерь энергоресурсов. Наряду с ними широко применяются также показатели экономичности энергопотребления, характеризующие эксплуатационные технические свойства изделий, их конструкторское совершенство и качество изготовления. Используемые показатели ЭнЭ должны позволять оценить уровень (степень) потребления ТЭР при использовании изделий по прямому функциональному назначению.

В настоящее время выделяют три основные группы показателей энергетической эффективности (ПЭнЭ):

- 1) нормируемые ПЭнЭ продукции, вносимые в паспорта и другую нормативную документацию;
- 2) ПЭнЭ производственных процессов, вносимые в энергопаспорта предприятий;
- 3) показатели реализации энергосбережения.

ПЭнЭ характеризуют энергетическую эффективность соответствующих объектов на всех стадиях их жизненного цикла (ЖЦ) и используются при планировании и оценке эффективности работ, связанных с энергосбережением; проведении энергетического аудита потребителей ТЭР; составлении статистической отчётности по использованию энергоресурсов.

Для характеристики технической, научной, экономической деятельности по энергоэффективности рекомендуется использовать следующие ПЭнЭ:

- физическая экономия ТЭР, в том числе за счёт нормирования энергопотребления и экономического стимулирования;
- снижение потерь ТЭР за счёт оптимизации режимных параметров, внедрения автоматических систем энергосберегающего управления, приборов учёта ТЭР и подготовки кадров;
- снижение энергоёмкости производства продукции за счёт структурной перестройки энергопотребления, использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, вторичных энергоресурсов, высокотехнологичного оборудования, отвечающего мировому уровню, и т.п.

В производственной деятельности широкое применение находят сравнительные показатели в виде сопоставления энергопотребления в текущем году с потреблением ТЭР в некотором базовом году.

Применительно к изделиям, оборудованию и технологическим процессам используются ПЭнЭ: экономичность потребления ТЭР, энергетическая эффективность передачи ТЭР и энергоёмкость производства продукции.

Важную роль в решении задач энергосбережения играют уменьшение энергопотребления электронной техникой и микропроцессорными устройствами и использование энергосберегающего управления.

Электроника и вычислительные сети интенсивно внедряются во все области человеческой деятельности. При существующих показателях энергетической эффективности электронной аппаратуры для обеспечения энергоснабжения компьютерных сетей необходимы источники питания большой мощности. Поэтому энергетическая эффективность электронной и микропроцессорной техники представляет собой одну из важнейших проблем. Особенно критичными к уровню потребления являются системы и устройства с автономным питанием. Основными путями снижения энергопотребления радиоэлектронной и компьютерной техники являются следующие [4].

1. Оптимизация архитектуры вычислительных устройств, в частности уменьшение обращений к общей памяти, управление шинной структурой процессора и организация параллельных вычислений. Программная реализация сложных алгоритмов вычислений требует затрат энергии в сотни раз больше по сравнению со специализированными цифровыми устройствами с локальными регистрами памяти. Имеется возможность автоматически изменять тактовую частоту (в зависимости от производительности вычислений) и отключать неиспользуемые блоки.

2. Использование программного обеспечения (ПО) для снижения энергозатрат за счёт экономии на пересылке информации между удалёнными блоками, т.е. ПО должно учитывать взаимное расположение блоков. Для этого ПО необходимо разрабатывать одновременно с проектированием микросхем.

3. Снижение энергозатрат схемотехническими средствами, в том числе за счёт уменьшения утечек через подложки в МОП-транзисторах (подачей смещения на подложку, использованием транзисторов с большим пороговым напряжением); снижение напряжения питания и синхросигнала при обработке звуковой информации и т.д.

4. Использование технологических средств для уменьшения утечек через подложку и снижение разброса электрических параметров элементной базы. Для этого можно использовать трёхзатворные транзисторы,



трёхмерные транзисторы, в которых канал изолирован диэлектриком от подложки, применение структур кремния на диэлектрике и микросхем с наноразмерными элементами.

5. Уменьшение энергозатрат конструктивными средствами, в том числе за счёт использования высокоплотного монтажа кристаллов (при этом повышается энергетическая эффективность вследствие уменьшения энергоёмкости сигнальных связей), трёхмерной сборки кристаллов в компактном корпусе, применения высокоскоростных интерфейсов и радиоинтерфейсов. Сокращение расстояний позволяет передавать информацию с высокой скоростью при малых энергозатратах.

Таким образом, энергетическая эффективность РЭС обеспечивается комплексной оптимизацией системы на всех этапах проектирования (создание архитектуры, программного обеспечения; схемотехническая разработка и техническая подготовка производства).

В методиках оценки эффективности энергосберегающих проектов могут использоваться следующие показатели:

- показатели коммерческой эффективности, учитывающие последствия реализации проекта для предприятия или непосредственных участников;

- показатели национальной (общественной) эффективности, учитывающие связанные с проектом затраты и результаты, выходящие за пределы экономических интересов предприятия, реализующего проект, и его участников. Для крупномасштабных (существенно затрагивающих интересы города, региона или всей России) проектов рекомендуется обязательно оценивать общественную эффективность.

В зависимости от базы сравнения различают оценку абсолютной эффективности проекта энергосберегающего мероприятия (ЭСМ), оценку эффективности замены техники, оценку эффективности при сравнении проектов, оценку эффективности дополнительных затрат. Проект оценивается или методом сопоставления капиталовложений с получаемым доходом, или методом сопоставления затрат по проекту с затратами базы сравнения.

Абсолютный эффект показывает результаты проекта при отсутствии замены техники аналогичного назначения, а также при нецелесообразности дальнейшего использования заменяемой техники. Использование старой техники будет прекращено независимо от осуществления проекта.

Эффект замены аналогичной по назначению техники показывает результаты проекта при условии, что меняемый (базовый) вариант конкурентоспособен. Он будет реализован при отказе от проекта. Оценка проекта выполняется в чистом виде.

Сравнительный эффект позволяет определить лучший вариант из проектов аналогичного назначения. Проекты сравниваются в чистом виде.

Эффект дополнительных затрат показывает целесообразность увеличения затрат для достижения большего полезного результата.

Оценка предстоящих затрат и результатов при определении эффективности инвестиционного проекта осуществляется в пределах расчётного периода, длительность которого (горизонт расчёта) принимается с учётом:

- продолжительности создания, эксплуатации и (при необходимости) ликвидации объекта;
- средневзвешенного нормативного срока службы основного технологического оборудования;
- требований инвестора.

Горизонт расчёта измеряется количеством шагов расчёта. На практике за шаг расчёта в большинстве случаев принимается год (иногда квартал или месяц).

Оценка эффекта ЭСМ при проектировании РЭС в зависимости от конкретной ситуации производится по следующим формулам [5 – 7].

Абсолютный эффект  $\mathcal{E}_a$  применения новых компонентов, которые ранее в проектируемом устройстве отсутствовали, рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_a = D_n - K_n, \text{ р.}, \quad (1.1)$$

где  $D_n$ ,  $K_n$  – соответственно соизмеримый доход за расчётный период и капиталовложения по проекту при введении нового компонента.

Если определяется эффект в результате замены используемых в прототипе (базовом варианте) компонентов на более совершенные, то эффект замены  $\mathcal{E}_3$  равен

$$\mathcal{E}_3 = D_n - D_6 - K_n, \text{ р.}, \quad (1.2)$$

где  $D_6$  – соизмеримый доход за расчётный период по базовому варианту. Здесь предполагается, что базовый вариант, как и новый, является конкурентоспособным.

Если базовый и новый варианты отличаются только затратами, то для расчёта  $\mathcal{E}_3$  можно использовать формулу

$$\mathcal{E}_3 = C_6 - C_n - K_n, \text{ р.}, \quad (1.3)$$

где  $C_6$ ,  $C_n$  – соизмеримые операционные расходы за вычетом амортизационных отчислений за расчётный период по базовому и новому вариантам соответственно.

В случае сравнения двух вариантов (А и В) инновационных проектов сравнительный эффект  $\mathcal{E}_{cp}$  определяется как разность абсолютных эффектов  $\mathcal{E}_a$  и  $\mathcal{E}_6$ , т.е.

$$\mathcal{E}_{cp} = \mathcal{E}_a - \mathcal{E}_6 = D_6 - K_6 - D_a + K_a, \text{ р.} \quad (1.4)$$

Здесь вариант А принят за базовый, для него капиталовложения меньше ( $K_a < K_6$ ).

Если проекты отличаются только затратами, то для расчёта  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  используется формула

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = K_a + C_a - K_b - C_b, p. \quad (1.5)$$

Следует заметить, что для оценки проектов с учётом инфляции при расчёте доходов и затрат обычно используется ставка доходности 12% ( $E = 0,12$ ).

Для расчёта показателей эффективности ЭСМ используются исходные стоимостные показатели, основными из них являются: инвестиционные затраты (капиталовложения)  $K$ ; годовой потенциал  $\Delta\mathcal{E}$  при реализации проекта; прирост прибыли (экономия текущих издержек)  $\Pi$  и доход от инвестиций (чистый инвестиционный доход)  $D$ .

В общем случае капиталовложения  $K$  включают три вида затрат: в оборудование  $K_{\text{об}}$ ; сопутствующие  $K_{\text{соп}}$  (исследования, приобретение лицензий, патентов и т.д.) и в строительство  $K_{\text{стр}}$ , т.е.

$$K = K_{\text{об}} + K_{\text{соп}} + K_{\text{стр}}. \quad (1.6)$$

Годовой потенциал энергосбережения представляет собой суммарную экономию (стоимость) всех видов энергоресурсов при реализации проекта, в том числе топлива  $\Delta\mathcal{E}_t$ , тепла  $\Delta\mathcal{E}_Q$ , электрической энергии  $\Delta\mathcal{E}_w$  и воды  $\Delta\mathcal{E}_b$ .

Таким образом,

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_t + \Delta\mathcal{E}_Q + \Delta\mathcal{E}_w + \Delta\mathcal{E}_b = C_t\Delta T + C_Q\Delta Q + C_w\Delta W + C_b\Delta B, \quad (1.7)$$

где  $\Delta T$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta W$  – соответственно готовая экономия топлива, воды, тепловой и электрической энергии в натуральном исчислении;  $C_t$ ,  $C_b$ ,  $C_Q$ ,  $C_w$  – цены (стоимость) за единицу топлива, воды, теплоты и тариф на электроэнергию.

Если проект связан с приобретением новых энергосберегающих средств, которые ранее в РЭС не применялись, то прибыль определяется по формуле

$$\Pi = \Delta\mathcal{E} - C_3, \quad (1.8)$$

где  $C_3$  – текущие затраты, связанные с эксплуатацией новых средств.

Затраты  $C_3$  учитывают издержки на амортизацию  $A$  и ремонт  $P$  (включая техобслуживание), т.е.

$$C_3 = A + P. \quad (1.9)$$

Если энергосберегающее средство базового варианта (с  $A_6$  и  $P_6$ ) заменяется на новое (с  $A_n$ ,  $P_n$ ), то

$$\Pi = \Delta\mathcal{E} - C_3 = \Delta\mathcal{E} - (A_n + P_n) + (A_6 + P_6). \quad (1.10)$$

Прирост чистой прибыли (ЧП) рассчитывается с учётом ставки налога на прибыль  $C_{н.п}$  (в %) и налога на имущество, т.е.

$$\text{ЧП} = (\text{П} - \text{НИ}) \left( 1 - \frac{C_{н.п}}{100} \right). \quad (1.11)$$

Доход от инвестиций  $D$  в случае приобретения дополнительных энергосберегающих средств определяется по формуле

$$D = \text{ЧП} + A_n. \quad (1.12)$$

В случае замены действующих средств (при издержках  $A_6$ ) формула (1.12) принимает вид

$$D = \text{ЧП} + A_n - A_6. \quad (1.13)$$

Наиболее важными показателями эффективности инвестиционных проектов, по которым принимается решение, являются:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- индекс доходности (ИД) инвестиций;
- срок окупаемости капиталовложений  $T_o$ .

Чистый дисконтированный доход (интегральный эффект, чистая текущая стоимость) при постоянном годовом доходе проекта  $D_T$  можно определять по формуле

$$\text{ЧДД} = D_T \alpha_T - K_n, \quad (1.14)$$

где  $\alpha_T$  – дисконтирующий множитель (для приведения постоянных по величине денежных сумм к началу расчётного периода), равный

$$\alpha_T = \frac{(1+E)^T - 1}{E(1+E)^T} = \frac{1}{E} \left( 1 - (1+E)^{-T} \right), \quad (1.15)$$

где  $T$  – расчётный период в годах.

Индекс доходности инвестиций (коэффициент эффективности проекта) показывает, во сколько раз увеличиваются вложенные собственные средства за расчётный период  $T$  в сравнении с нормативным увеличением на уровне базовой ставки. Значение ИД рассчитывается по формуле

$$\text{ИД} = \frac{\text{ЧДД}}{K_n} + 1. \quad (1.16)$$

Различают статический  $T_o$  и динамический  $T_{o,д}$  сроки окупаемости капиталовложений.

Значение  $T_0$  показывает, за какой срок инвестору возвращаются первоначальные капиталовложения. При постоянном годовом доходе  $D_T$  статический срок окупаемости рассчитывается по формуле

$$T_0 = \frac{K}{D_T}. \quad (1.17)$$

Динамический срок окупаемости  $T_{0,д}$  показывает время, за которое инвестор вернёт израсходованные средства и получит нормативный доход на уровне принятой ставки. Значение  $T_{0,д}$  определяется решением уравнения

$$\sum_{n=1}^{T_{0,д}} \frac{D_T}{(1+E)^n} = K. \quad (1.18)$$

В случае постоянства годового дохода  $D_T$  и отсутствия временного лага  $T_{0,д}$  равен

$$T_{0,д} = \frac{\lg(1+E/P_B)}{\lg(1+E)}, \quad (1.19)$$

где  $P_B$  – коэффициент возврата капитала, т.е.

$$P_B = \frac{D_T}{K} - E.$$

Немаловажное значение для принятия решения при выборе предпочтительного варианта ЭСМ имеет оценка рисков. В соответствии с действующими стандартами риск (risk) определяется как сочетание вероятности некоторого события и его последствий; другими словами, сочетание вероятности нанесения ущерба и тяжести этого ущерба [8, 9]. Исключительно важно выполнить оценку риска на начальном этапе запуска проекта, когда требуется принять решение, какой вариант проекта из числа альтернативных наиболее предпочтителен. Оценка риска включает процессы анализа риска (систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска) и оценивания риска (сравнение оценённого риска с данными критериями риска с целью определения значимости риска).

Следует различать два рода рисков. Риски первого рода относятся непосредственно к рискам проектируемого объекта, они связаны с функционированием объекта при реальной эксплуатации. Эти риски обусловлены принципом действия СЗ, его конструкцией, технологией изготовления, правилами эксплуатации, воздействиями внешней среды и обученностью персонала.

К рискам второго рода будем относить риски, связанные с опасностью невыполнения проекта или значительными отклонениями результатов проекта от требуемых, которые приводят к негативным последствиям.

Риски второго рода во многом определяются методологией проектирования, обеспеченностью организации необходимыми ресурсами (финансовыми, техническими, кадровыми, временными), имеющимся заделом и опытом выполнения инновационных разработок, а также состоянием конкурентной среды.

Оценка вероятностей событий для рисков первого и второго рода производится на основе различных исходных данных. Для рисков первого рода вероятности негативных событий определяются методами, используемыми в теории надёжности и безаварийности.

При оценке первого компонента риска, т.е. вероятности  $q$  негативного события, необходимо учитывать вероятности  $p(h)$ ,  $h \in \mathcal{H}$ , состояний функционирования. Поясним это на следующем примере. В качестве негативного события  $A$  рассматривается уменьшение времени защитного действия изделия ниже нормативного на 10% и более. Множество состояний функционирования  $\mathcal{H}$  включает два подмножества состояний:  $H_0$  – подмножество штатных состояний (работа при оговорённых параметрах нагрузки и внешней среды) и  $H_{кр}$  – подмножество критических (нештатных) состояний, которые могут иметь место при реальной эксплуатации системы. Этим подмножествам соответствуют вероятности  $p(H_0)$  и  $p(H_{кр})$ , причём  $p(H_0) + p(H_{кр}) = 1$ .

Событие  $A$  может произойти при  $H_0$  и  $H_{кр}$  с вероятностями  $q(A/H_0)$  и  $q(A/H_{кр})$ . В этом случае вероятность негативного события  $q(A)$  определяется по формуле полной вероятности, т.е.

$$q(A) = p(H_0) q(A/H_0) + p(H_{кр}) q(A/H_{кр}).$$

В общем случае для СЗ могут иметь место различные негативные события и состояния функционирования. Множество негативных событий обозначим  $A = \{A_j, j = \overline{1, n}\}$ . Тогда на множестве состояний функционирования  $\mathcal{H} = \{h_i, i = \overline{0, m}\}$  значения вероятностей  $q(A_j)$ ,  $j = \overline{1, n}$ , при известных  $q(A_j/h_i)$  рассчитываются по формуле

$$q(A_j) = \sum_{i=0}^m p(h_i) q(A_j/h_i), \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.20)$$

Второй компонент риска – следствие (ущерб) негативного события  $A_j$ , обозначим его  $z(A_j)$ , может принимать разные значения в зависимости от состояний функционирования. Усреднённое значение ущерба  $\bar{z}(A_j)$  на множестве  $\mathcal{H}$  определяется по формуле, аналогичной (1.20), т.е.

$$\bar{z}(A_j) = \sum_{i=0}^m z(A_j/h_i) p(h_i), \quad (1.21)$$

где  $z(A_j/h_i)$  – количественная оценка последствия события  $A_j$  в состоянии функционирования  $h_i$ .

Расчёт рисков по формулам (1.20), (1.21) встречает значительные трудности, которые обусловлены следующими обстоятельствами. Во-первых, множества  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{H}$  являются мощными, при этом формирование этих множеств представляет сложную задачу. Во-вторых, практически невозможно аналитически определить с достаточной достоверностью вероятности  $q(A_j/h_i)$ ,  $p(h_i)$  и значения  $z(A_j/h_i)$ ,  $j = \overline{1, n}$ ;  $i = \overline{0, m}$ . В-третьих, традиционные методы оценки  $q(A_j/h_i)$ ,  $p(h_i)$ ,  $z(A_j/h_i)$  по результатам испытаний в данном случае оказываются неприемлемыми в связи с большими материальными и временными затратами.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЭС

Решение задач повышения ЭнЭ и энергосбережения, как уже отмечалось, достигается комплексной реализацией мероприятий научного, технического, экономического и производственного характера. При разработке, производстве и эксплуатации РЭС к таким мероприятиям относятся следующие.

На всех стадиях выполнения проекта, связанного с модернизацией существующего или разработкой нового варианта РЭС, показатели ЭнЭ включаются в число компонентов векторного критерия оптимизации или используются как одно из важнейших ограничений. При этом в качестве факторов повышения ЭнЭ рассматриваются:

- новые идеи, связанные с принципом действия проектируемого объекта, при которых исключается часть операций с потреблением энергозатрат;
- совершенствование схемных решений;
- переход на более совершенную элементную базу;
- снижение тепловых нагрузок;

- использование энергоэффективных двигателей;
- внедрение энергосберегающей автоматики;
- рассмотрение альтернативных вариантов ЭСМ и др.

При производстве РЭС важными факторами снижения энергозатрат также являются:

- экономичное использование энергоёмкого технологического оборудования;
- оптимизация режимов работы технологических установок с использованием минимизируемых функционалов типа затрат энергии и расхода топлива.

Одним из резервов повышения энергоэффективности РЭС являются мероприятия, выполняемые в процессе эксплуатации. К этим мероприятиям следует отнести диагностику состояний, при которых энергозатраты превышают значения, требуемые для данных режимов работы.



## **2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ (КОНСТРУИРОВАНИЕ)**

---

Разработка современных РЭС в настоящее время рассматривается как выполнение сложных инновационных проектов. Важными особенностями этих проектов являются: высокая степень неопределённости и риска, большие затраты материальных и временных ресурсов, необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов. Основным направлением повышения эффективности разработок является решение задач анализа и синтеза проектируемых РЭС в автоматизированном режиме.

Конструирование – процесс отражения в чертежах структуры, размеров, формы, материалов, обработки и связей (внутренних и внешних) разрабатываемого РЭС. Под конструкцией РЭС понимается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определённой пространственной, механической, тепловой, электромагнитной и энергетической взаимосвязи, которая определяется электрическими схемами и конструкторской документацией.

### **2.1. ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Проектирование РЭС в большинстве случаев заключается в разработке в течение заданного времени и с минимальными затратами конструкции и технологических процессов производства новых конкурентоспособных электронных средств, которые с требуемой эффективностью выполняют предписанные им функции в допустимых условиях. В процессе проектирования осуществляется комплекс исследовательских и расчётно-конструкторских работ, в результате выполнения которых создаётся документация на разрабатываемое изделие, необходимая для его производства. По степени новизны создаваемых объектов выделяют следующие задачи проектирования [10].

1. Частичная модернизация существующего объекта (объекта прототипа), обеспечивающая незначительное улучшение или расширение функциональных характеристик и других показателей качества. Например, повышение надёжности, точности работы, дальности действия; уменьшение габаритов, энергопотребления и т.д. В зависимости от вида показателя качества под незначительным улучшением понимается изменение характеристик от нескольких процентов (точность работы) до нескольких десятков процентов.

2. Существенная модернизация прототипа, в результате которой происходит значительное улучшение показателей качества РЭС (от не-

скольких десятков до сотен процентов, т.е. в несколько раз). Это может достигаться серьёзными изменениями конструкции и принципа действия.

3. Создание новых РЭС, использующих новые принципы действия, решающих новые задачи и изготавливаемых по новым технологиям. При сопоставлении с прототипами и аналогами отдельные показатели качества новых РЭС могут увеличиваться на несколько порядков.

Основными путями достижения новизны проектируемых РЭС являются:

- использование новых физических явлений и принципов действия;
- применение новых материалов, в том числе наноматериалов, более совершенной элементной базы и структуры;
- применение в РЭС современных информационных технологий, методов искусственного интеллекта, отказоустойчивости и т.п.;
- улучшение производственных процессов на основе использования прогрессивных и энергосберегающих технологий, автоматизации процессов, внедрения методов контроля качества и др.

В общем случае проектирование следует рассматривать как один из этапов жизненного цикла РЭС. Укрупнённо это можно представить в виде замкнутого «цикла обновления», показанного на рис. 2.1 [11].

Данный цикл содержит пять последовательно повторяющихся этапов:

1) формирование целей. Здесь на основе накопленного опыта эксплуатации и проектирования РЭС, требований заказчика, характеристик продукции конкурентов, последних достижений науки и техники формулируются основные цели модернизации или создания новых РЭС;

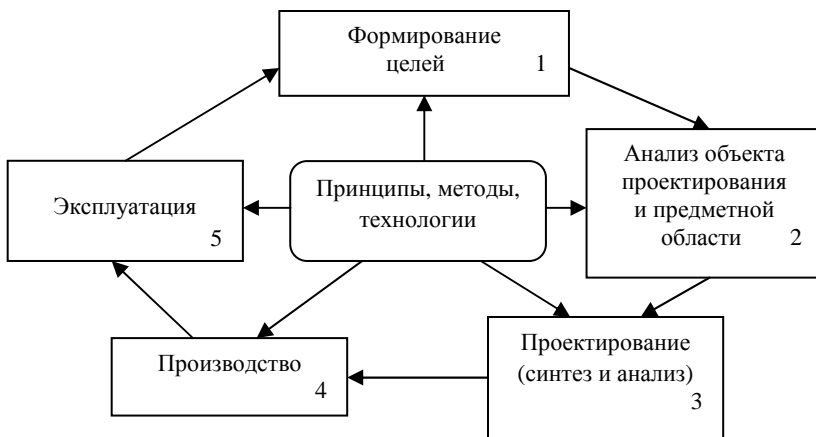


Рис. 2.1. Цикл обновления

2) анализ объектов проектирования и предметной области – предусматривает определение (изыскание) общих идей и концепций, которые могут быть использованы для достижения поставленных целей;

3) проектирование, т.е. непосредственное выполнение всех этапов проектных работ (на основе решения задач синтеза и анализа);

4) производство на основе разработанной технологии;

5) эксплуатация в различных условиях, сопровождающаяся сбором сведений о том, насколько достигнуты сформулированные цели, какие имеются пожелания пользователей для дальнейшего совершенствования изделий.

Наиболее часто в качестве основной цели процесса проектирования рассматривается создание малогабаритных, надёжных и высокоэффективных РЭС, которые при производстве и эксплуатации требуют минимального расхода энергетических, трудовых и материальных ресурсов. Эта цель достигается решением широкого комплекса задач, наиболее важными из которых являются: комплексная миниатюризация, энергетическая эффективность и высокая технологичность.

При проектировании обычно выделяют два широких класса задач – задачи синтеза и задачи анализа.

*Задачи синтеза* заключаются в разработке проектных решений по заданным требованиям, свойствам и ограничениям к функционированию системы (блока, узла). Например, разработка электрической схемы узла по заданным характеристикам. Различают задачи синтеза структурного и параметрического. При структурном синтезе создаётся структура схемы, т.е. определяется состав элементов и способы их соединения. В случае параметрического синтеза находятся числовые значения параметров элементов, от которых зависят общие характеристики схемы. Обычно задачи синтеза решаются как оптимизационные.

*Задачи анализа* связаны с определением свойств проектируемого объекта, например расчётом динамических характеристик (частотных, временных) электрических схем. По результатам анализа оценивается степень соответствия проектных решений задаваемым требованиям.

При проектировании РЭС задачи синтеза и анализа взаимосвязаны, каждое синтезируемое проектное решение сопровождается этапом анализа его характеристик.

Проектирование называют автоматизированным, если отдельные преобразования описаний осуществляются при взаимодействии человека и ЭВМ, и автоматическим, если все необходимые преобразования выполняются на ЭВМ без участия человека.

Радиоэлектронное средство, рассматриваемое как объект проектирования, обычно представляет собой сложную техническую открытую сис-

тому, в основе функционирования которой лежат процессы передачи, извлечения и обработки информации, связанные с преобразованием и передачей электромагнитной энергии. Современные РЭС включают большое число составных частей с различными связями между ними и обладают следующими свойствами, характерными для сложных систем [12]:

- ярко выраженным целевым назначением;
- наличием большого числа разнообразных объектов, взаимодействующих с РЭС;
- значительными масштабами зоны действия и возможностью размещения в различных средах (земная и водная поверхность, воздушное пространство, космос);
- сложностью процессов обработки информации, поступающей от различных объектов, использованием средств автоматизации, вычислительной техники и сетевых структур.

Наряду с этими достаточно общими свойствами РЭС обладают рядом особенностей, которые выделяют их в отдельный класс проектируемых объектов. К этим отличительным особенностям относятся следующие.

1. Целевое назначение РЭС предполагает обеспечение информационного взаимодействия между пространственно-разнесёнными объектами с использованием радиосигналов. Поэтому основными частями большинства РЭС являются подсистемы генерирования и приёма электромагнитных колебаний.

2. Информационное взаимодействие между пространственно-разнесёнными радиотехническими средствами осуществляется на основе модуляции параметров радиосигнала (амплитуды, частоты, фазы) полезными сообщениями. Следовательно, важную роль в РЭС играют системы модуляции и демодуляции высокочастотных сигналов.

3. Информационный обмен между радиотехническими системами и объектами с использованием электромагнитных колебаний требует больших энергетических затрат на генерацию и излучение радиосигналов, а также обеспечение концентрации излучаемой мощности в направлении на объект (цель) или группу объектов. При распространении электромагнитных волн в среде происходит сильное ослабление передаваемых сигналов. Поэтому в приёмном тракте требуется значительное усиление принимаемых сигналов без внесения дополнительных искажений.

4. Во всех РЭС приходится решать проблемы, связанные с воздействием естественных и искусственных помех, которые приводят к искажению, а иногда и полному подавлению полезного сигнала. Для повышения помехозащищённости используются различные методы, реализуемые специальными устройствами, которые значительно усложняют структуру РЭС.

При проектировании РЭС используют функциональное, конструкторское, технологическое и информационное описание.

Функциональное описание характеризует эксплуатационные функции системы, обеспечивающие выполнение целевых заданий. Оно раскрывает принцип действия, свойства, протекающие в РЭС физические и информационные процессы. На основе функционального описания производится декомпозиция системы на составные части, выполняющие различные функции. При разукрупнении системы используется иерархический принцип, сначала указываются обобщённые функции, затем в них выделяются обеспечивающие. В результате такой декомпозиции происходит структурирование системы по уровням иерархии в виде совокупности подсистем, которые состоят из устройств, а последние – из функциональных узлов.

Функциональный узел обычно представляет собой функционально законченную сборочную единицу, не имеющую самостоятельного применения (например, дискриминатор, усилитель и т.п.) и в большинстве случаев выполненную на несущей конструкции. В свою очередь, в функциональном узле также можно выделить отдельные компоненты – печатные платы, микросхемы, резисторы и т.д.

Функциональное описание компонента РЭС должно содержать следующие сведения:

- основные эксплуатационные функции, называемые выходными характеристиками;
- зависимости выходных характеристик от влияющих на них значений параметров системы и воздействий окружающей среды;
- показатели качества работы компонента и их соответствие целям проектирования;
- разного рода ограничения на функционирование компонента.

Математически функциональное описание компонента может быть записано в виде соотношения

$$y(t, s) = f(x, u, v, t, s),$$

где  $y$  – выходная характеристика;  $x$  – вектор режимных параметров и воздействий других компонентов;  $u$  – вектор проектных и управляющих параметров компонента;  $v$  – воздействия окружающей среды;  $t$  – время;  $s$  – пространственная координата [13].

Конструкторское описание даёт представление о материальной реализации РЭС, оно отображает взаимное расположение частей проектируемого объекта, их формы, используемые материалы и т.п. При конструкторском описании РЭС обычно выделяют следующие уровни: шкафы (стойки), блоки, модули, узлы печатные, микросборки, элементная ба-

за [14]. На отдельных уровнях может быть дополнительное разукрупнение. Объекты всех уровней обладают свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости. Выделяемые уровни конструкторского описания имеют свою несущую конструкцию, обеспечивающую устойчивость и надёжность при эксплуатации.

Технологическое описание отображает методы и средства изготовления РЭС.

Особую роль при автоматизированном проектировании играет информационное описание, которое содержит все виды информации (документы, сведения, сообщения, сигналы) и отношения между ними.

Все описания разделяются на иерархические уровни, которые отличаются степенью детализации отображаемых целей, свойств, функций и структур проектируемых объектов. Наряду с рассмотренными описаниями при проектировании РЭС используется ряд других, в частности [15]:

- первичное (исходное) описание РЭС, которое представляет собой техническое задание на проектирование, т.е. цели и задачи, решаемые системой, тактико-технические требования, условия эксплуатации и т.п.;

- промежуточные описания РЭС и его составных частей, основное место в этих описаниях занимают математические и натурные (макеты) модели;

- окончательное описание разработанного объекта в виде полного комплекта технической документации (текстовый материал, схемы, чертежи и т.п.), представляемого на машинных носителях.

В ряде случаев используется термин «морфологическое» описание, которое характеризует устройство объекта, его структуру, геометрию и другие сведения и формально записывается кортежем  $\langle S, R, C \rangle$ , где  $S, R, C$  – множества соответственно элементов (частей), связей между ними и структур системы, расположенных по ступеням иерархии [16].

В общем случае объекты автоматизированного проектирования следует рассматривать в рамках последовательности (потока) проектов. Последовательность  $\Pi_j$  модернизаций РЭС  $j$ -го типа (модель  $M_j$  изделия) можно записать в виде

$$\Pi_j = (\text{Пр}M_j(t_0 + \Delta t_0), \text{Пр}M_j(t_1 + \Delta t_1), \dots, \text{Пр}M_j(t_i + \Delta t_i), \dots), \\ t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots,$$

где  $\text{Пр}M_j$  – проектные работы по модернизации (усовершенствованию) РЭС  $j$ -го типа;  $t_i$  – момент времени запуска проекта  $\text{Пр}M_{ji}$ ;  $\Delta t_i, i = 0, 1, 2, \dots$  – продолжительность  $i$ -го проекта.

Основу базовой модели  $M_j$  РЭС  $j$ -го типа составляют описания принципа действия (ПД), конструкции (К), тактико-технических характеристик (ТТХ) и информационных возможностей (ИВ), т.е.

$$M_j = (\text{ПД}_j, \text{К}_j, \text{ТТХ}_j, \text{ИВ}_j).$$

Описание РЭС как объекта проектирования непосредственно связано с целями и процессами проектирования, оно развивается по мере выполнения этапа процесса проектирования, при этом последовательно обеспечивается соответствие всех целевых установок техническому заданию. Таким образом, имеет место триада в виде единства цели, объекта и процесса проектирования, рассматриваемых в их развитии от возникновения проблемы (инициации) до окончания проектных работ.

Наиболее сложными и ответственными задачами проектирования являются задачи структурного и параметрического синтеза, которые решаются как задачи оптимизации. Сначала решается задача структурной оптимизации, а затем для выбранной структуры – задача параметрической оптимизации.

## 2.2. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

В общем случае под структурой проектируемой РЭС понимают состав основных компонентов с описанием их важнейших характеристик и связей между ними. Задача структурного синтеза (ЗСС) заключается в определении оптимальной структуры системы для реализации содержащихся в техническом задании (ТЗ) функций в соответствии с выбранным на этапе системотехнического проектирования принципом действия. В результате решения ЗСС находят: перечень составных частей системы, схемы расположения компонентов с указанием их типов, таблицы соединений компонентов, алгоритмы функционирования и т.д.

Большинство задач структурного синтеза трудно формализуемы, обычно они сводятся к формированию множества альтернативных вариантов структурных решений и выбору наиболее предпочтительного варианта.

Сложность формализации ЗСС вызывается большим числом факторов, которые влияют на различные виды структур, их свойства и параметры. Следует заметить, что состав вектора независимых переменных  $X$  для каждой структуры может сильно различаться. Это ведёт к сильному увеличению числа варьируемых переменных и размерности задачи.

Для преодоления этих трудностей может использоваться блочно-иерархический подход, в основе которого лежит разбиение процесса проектирования на взаимосвязанные иерархические уровни. В соответствии с

этим принципом структура всей системы декомпозируется на определённые функциональные части, блоки, устройства и т.д. [11]. Иерархический подход уменьшает число рассматриваемых вариантов на каждом уровне. В зависимости от особенностей синтезируемых структур различают задачи одномерного, схемного и геометрического синтеза.

По вычислительным возможностям выделяют ЗСС с полным перебором альтернативных вариантов (число вариантов невелико) и задачи, в которых рассмотреть все варианты за приемлемое время невозможно (например, множество вариантов структур является счётным). Во втором случае получение точных решений ЗСС обычно не представляется возможным, и здесь широкое применение находят различные эвристические приближённые методы, позволяющие при небольших вычислительных затратах получать решения, близкие к оптимальным. Такие методы, в частности, используются при решении задач компоновки, размещения и трассировки.

При разработке оптимальной структуры важная роль отводится задачам анализа качества структуры системы, в том числе проверке существования решения задачи, устойчивости используемых алгоритмов и т.п.

С точки зрения информационных технологий структурный синтез рассматривается как преобразование исходной информации, содержащей описание требований к системе; функциональные характеристики; условия её эксплуатации; ограничения, накладываемые на элементную базу, и т.п., в информацию о составе элементов, значениях их параметров, способах соединения и т.д. Для такого описания используются специализированные языки, в частности VHDL для электроники, который обеспечивает функциональное, поведенческое и структурное описание системы, EXPRESS – универсальный язык спецификаций для представления и обмена информацией в CALS-технологиях [17].

Для решения ЗСС в настоящее время используется большое число различных методов, в том числе: метод дискретного математического программирования, метод ветвей и границ, методы локальной оптимизации и поиска с запретами, методы распространения ограничений, эволюционные методы, генетические алгоритмы и др.

В ряде случаев при решении ЗСС целесообразно использовать функциональный подход, при котором назначение проектируемой системы задаётся выполняемыми функциями  $F = (f_1, \dots, f_m)$ . Вариант структуры системы с функциями  $F$  задаётся номенклатурой элементов, реализующих функции  $\Phi = (\varphi_1, \dots, \varphi_{m_1})$ . При этом набор функций  $\Phi$  должен обеспечивать выполнение функций  $F$  системы и позволять решать задачи её дальнейшей модернизации.



Для представления альтернатив в информационно-поисковых системах при решении ЗСС используются разные виды описаний, в том числе [17]:

- представление множества альтернатив  $A$  кортежем (двойкой)

$$A = \langle P, \mathcal{E} \rangle,$$

где  $P$  – способ (алгоритм);  $\mathcal{E}$  – набор элементов;

- морфологические таблицы  $M$  вида

$$M = \langle Y, R \rangle,$$

где  $Y$  – множество функций (свойств, характеристик) проектируемого объекта;  $R$  – множество способов реализации соответствующих функций;

- альтернативные (И–ИЛИ) графы (деревья) иерархического типа, у которых вершины – логические операции, а рёбра – значения функций, и др.

Для решения ЗСС широкое применение находят морфологические методы синтеза систем. Морфологический синтез новых структурных решений включает следующие этапы:

- декомпозиция проектируемой системы на обобщённые функциональные подсистемы;
- выделение подмножеств альтернативных вариантов  $A_{ij}$  каждой из подсистем;
- синтез всей системы на основе комбинированных альтернативных вариантов её подсистем;
- выбор из полученных вариантов наиболее предпочтительной или оптимальной по некоторому критерию комбинации;
- реализация полученной комбинации в виде действующего макета и экспериментальная проверка [18].

Для альтернативных вариантов подсистем  $A_{ij}$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ , формулируются существенные функциональные  $f_{iv}$  и конструктивные  $k_{iu}$  (а в случае необходимости и технологические) признаки. Полученная информация систематизируется в виде морфологической таблицы.

Например, в качестве обобщённых функциональных подсистем (ОФПС) для радиолокационной станции (РЛС) могут рассматриваться: антенная система (АС), приёмно-передающий модуль (ППМ), система обработки информации (СОИ), система автоматического распознавания (САР) и автоматизированное рабочее место оператора (АРМО). В этом случае морфологическая таблица, содержащая информацию об альтернативах  $A_{ij}$  с функциональными  $f_{iv}$  и конструктивными  $k_{iu}$  признаками,

может быть представлена в виде табл. 2.1. Вариант структуры проектируемой системы представляет собой кортеж  $S_j$ , содержащий по одной альтернативе из каждой строки морфологической таблицы, т.е.

$$S_j = \langle A_{1i}, A_{2v}, \dots, A_{L\mu} \rangle, \quad i = \overline{1, k_1}; \quad v = \overline{1, k_2}; \quad \mu = \overline{1, k_L},$$

где  $L$  – число обобщённых функциональных подсистем.

Возможные варианты структур образуют морфологическое множество  $\Phi$ , равное

$$\Phi = \Phi_1 \times \Phi_2 \times \dots \times \Phi_L,$$

где  $\Phi_i, i = \overline{1, L}$  – множество альтернатив  $i$ -й строки морфологической таблицы.

Число возможных вариантов  $N$ , т.е. мощность множества  $\Phi$ , равно

$$N = \prod_{i=1}^L k_i.$$

## 2.1. Морфологическая таблица

Обобщённые функциональные подсистемы	Функциональные $f_{iv}$ и конструктивные $k_{i\mu}$ значения признаков альтернативы $A_{ij}$			
ОФПС <sub>1</sub> – АС	$A_{11}$ $f_{11}, f_{12}, \dots$ $k_{11}, k_{12}, \dots$	$A_{12}$ $f_{11}, f_{12}, \dots$ $k_{11}, k_{13}, \dots$	...	$A_{1k_1}$ $f_{11}, f_{12}, \dots$ $k_{11}, k_{14}, \dots$
ОФПС <sub>2</sub> – ППМ	$A_{21}$ $f_{21}, f_{22}, \dots$ $k_{21}, k_{22}, \dots$	$A_{22}$ $f_{21}, f_{22}, \dots$ $k_{21}, k_{24}, \dots$	...	$A_{2k_2}$ $f_{22}, f_{24}, \dots$ $k_{23}, k_{24}, \dots$
ОФПС <sub>3</sub> – СОИ	...	...	...	...
ОФПС <sub>4</sub> – САР	...	...	...	...
ОФПС <sub>5</sub> – АРМО	$A_{51}$ $f_{51}, f_{52}, \dots$ $k_{51}, k_{52}, \dots$	$A_{52}$ $f_{52}, f_{54}, \dots$ $k_{53}, k_{54}, \dots$	...	$A_{5k_5}$ $f_{53}, f_{56}, \dots$ $k_{53}, k_{57}, \dots$

Для последующего решения ЗСС на основе полученного морфологического множества  $\Phi$  используются в основном два подхода. Первый подход предполагает наличие одного или нескольких прототипов проектируемого объекта и сформулированные требования к улучшаемым характеристикам прототипов. Второй подход используется при синтезе новой системы в отсутствии прототипа.

При реализации первого подхода используются следующие методы: непосредственного оценивания критериев качества альтернатив; морфологического синтеза, использующий попарное сравнение альтернатив; исключения наихудших вариантов (например, трудно реализуемых и т.п.); расстановки приоритетов; оценки мер сходства и различия альтернативного варианта с прототипом и др.

Решение ЗСС с использованием второго подхода производится методами принятия проектных решений в условиях нечёткой и неполной исходной информации. Для получения наиболее рациональной структуры системы здесь используется понятие полезности и формируется система показателей, конкретизирующих цель выбора. Эти показатели характеризуют качество проектируемого объекта, функциональное назначение, экологичность, соответствие нормативным международным нормам, защищённость патентами и т.д.

### 2.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

Задача параметрического синтеза (ЗПС) заключается в выборе или расчёте наилучших значений параметров системы, имеющей определённую структуру. При этом должны учитываться все требования ТЗ на проектируемое РЭС, т.е. выходные показатели системы должны соответствовать требуемым. ЗПС, в отличие от задач структурного синтеза, хорошо формализуются, часто их называют задачами параметрической оптимизации.

Для математической постановки ЗПС вводятся векторы варьируемых переменных (параметров)  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  и выходных переменных  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ . Переменные  $X$  и  $Y$  связаны определёнными соотношениями, входящими в состав модели системы. Значения вектора выходных параметров, соответствующие требованиям ТЗ, обозначим  $Y^0$ .

Обычно ЗПС формулируется как задача математического программирования, т.е. требуется определить такое значение вектора  $X^*$ , при котором выбранная целевая функция  $Q(X)$  достигает экстремального значения и выполняются все накладываемые на  $X$  ограничения. Для определённости будем считать, что критерий  $Q(X)$  минимизируется, тогда математически ЗПС записывается в виде

$$X^* = \arg \min_{X \in \mathcal{X}_{\text{доп}}} Q(X, Y^0);$$

$$g(X, Y) = 0;$$

$$h(X, Y) \leq 0,$$

где  $\mathcal{X}_{\text{доп}}$  – область допустимых значений изменения  $X$ ;  $g(X, Y)$ ,  $h(X, Y)$  – векторные функции, описывающие условия и ограничения на  $X, Y$ .

В качестве целевой функции часто используют следующие критерии:

– максимальное значение модуля отклонения выходных характеристик  $\tilde{y}_j(X)$  от заданных  $y_j^{(0)}$ ,  $j = \overline{1, k}$ , с учётом весовых коэффициентов  $c_j$ , т.е.

$$Q(X) = \max \left\{ c_j \left| y_j^{(0)} - \tilde{y}_j(X) \right|; j = \overline{1, k} \right\};$$

– среднеквадратичное отклонение между  $\tilde{y}_j$  и  $y_j^{(0)}$

$$Q(X) = \sqrt{\sum_{j=1}^k c_j \left( y_j^{(0)} - \tilde{y}_j(X) \right)^2}$$

и др.

Заметим, что выбор  $Q(X)$  носит субъективный характер, поэтому в результате решения ЗПС мы получаем оптимальное решение в смысле используемого критерия. При задании значений  $y_j^{(0)}$ ,  $j = \overline{1, k}$ , следует ориентироваться на лучшие (эталонные) образцы с учётом последних научно-технических достижений.

Определяющее значение в задачах параметрического синтеза имеет выполнение условий работоспособности проектируемого РЭС. Эти условия определяются требуемыми соотношениями между расчётными значениями выходных переменных (параметров)  $\tilde{y}_j$ ,  $j = \overline{1, k}$ , и задаваемыми (техническими требованиями)  $y_j^{(0)}$ ,  $j = \overline{1, k}$ , которые в общем случае имеют вид

$$\tilde{y}_j < y_j^{(0)}, j = \overline{1, k_1}; \quad \tilde{y}_j > y_j^{(0)}, j = \overline{k_1 + 1, k_2}; \quad \tilde{y}_j = y_j^{(0)} \pm \Delta y_j, j = \overline{k_2 + 1, k_3},$$

где  $\Delta y_j$  – допустимое отклонение  $\tilde{y}_j$  от указанного значения в ТЗ.

Обычно постановка ЗПС включает следующие основные этапы:

- выбор целевой функции  $F$  ;
- выделение управляемых (варьируемых)  $X$  и выходных  $Y$  переменных (параметров);
- назначение ограничений на  $X$  и  $Y$  ;
- нормирование компонентов  $X$  и  $Y$  .

Отдельные составляющие выходных переменных могут представлять собой качественные характеристики, которые при численном решении ЗПС оцениваются баллами.

В большинстве случаев критерий оптимальности имеет векторный характер, при этом направление изменения какого-либо компонента  $x_i \in X$  может приводить к улучшению одних выходных параметров РЭС и ухудшению других. Такие задачи относятся к классу многокритериальных, для их сведения к задачам математического программирования применяются различные способы свёртки векторного критерия в скалярную целевую функцию.

Наиболее часто в качестве скалярной целевой функции используются следующие:

1) частный критерий, когда среди составляющих вектора  $Y$  можно выделить один основной показатель, например для передатчика это может быть мощность, для приёмника – чувствительность и т.д.;

2) взвешенный аддитивный критерий, например

$$Q(X) = \sum_{j=1}^k c_j y_j^{(-)}(X) - \sum_{j=k_1+1}^k c_j y_j^{(+)}(X),$$

где  $y_j^{(-)}(X)$ ,  $y_j^{(+)}(X)$  – выходные параметры, которые соответственно следует уменьшать (энергопотребление, габариты и т.п.) и увеличивать (помехоустойчивость, надёжность и т.п.);

3) мультипликативный критерий вида

$$Q(X) = \prod_{j=1}^{k_1} y_j^{(-)}(X) / \prod_{j=k_1+1}^{k_1} y_j^{(+)}(X),$$

здесь предполагается, что значения  $y_j^{(-)}$ ,  $y_j^{(+)}$  не могут принимать нулевые значения.

В ряде случаев для радиосистем в результате решения ЗПС необходимо обеспечить наилучшее совпадение функции изменения выходного параметра  $\tilde{y}(X, \gamma)$ , зависящей от аргумента  $\gamma$ , с заданной функцией  $y^{(0)}(X, \gamma)$ . В зависимости от характера функции в качестве аргумента ис-

пользуются частота (для частотных характеристик), время (для временных характеристик) и т.п. В этих случаях в интервале изменения аргумента выделяются узловые точки  $\gamma_i, i = \overline{1, l}$ , и в качестве целевой функции могут использоваться

$$Q(X) = \sum_{i=1}^l c_i |\tilde{y}(X, \gamma_i) - y^{(0)}(X, \gamma_i)|;$$

$$Q(X) = \sum_{i=1}^l c_i (\tilde{y}(X, \gamma_i) - y^{(0)}(X, \gamma_i))^2;$$

$$Q(X) = \max \{c_i |\tilde{y}(X, \gamma_i) - y^{(0)}(X, \gamma_i)|; i = \overline{1, l}\},$$

где  $c_i$  – весовой коэффициент, соответствующий важности точки  $\gamma_i$ .

При назначении ограничений выделяют:

- прямые ограничения на варьируемые переменные

$$x_i \in [x_i^H, x_i^B], i = \overline{1, n},$$

где  $x_i^H, x_i^B$  – соответственно нижняя и верхняя границы интервала изменения переменной  $x_i, i = \overline{1, n}$ ;

- функциональные ограничения типа равенств

$$g(x, y) = 0;$$

- функциональные ограничения типа неравенств

$$h(x, y) > 0.$$

Векторные функции  $g(x, y), h(x, y)$  обычно представляют собой условия работоспособности по выходным параметрам, которые не вошли в целевую функцию. Прямые и функциональные ограничения задают область изменения  $X$  при решении ЗПС, т.е. допустимую область поиска  $D_X$ . Любое значение  $X \in D_X$  является допустимым решением ЗПС. Заметим, что если функциональные ограничения совпадают с условиями работоспособности, то  $D_X$  ещё называют областью работоспособности.

Нормирование компонентов переменных  $X$  и  $Y$  вводится для приведения их к безразмерному виду или одинаковой размерности с целью облегчения процедур поиска решений в многомерном пространстве. Широкое распространение находит способ логарифмического нормирования,

когда переменная  $x_i$  преобразуется к безразмерному виду  $x_i$  по формуле

$$x_i = \ln(x_i / \Delta x_i),$$

где  $\Delta x_i$  – единичное значение  $x_i$ .

В качестве примера постановки задачи параметрического синтеза рассмотрим задачу синтеза параметров антенны в виде линейки из  $n$  необходимых элементарных излучателей [19]. Диаграмма направленности такой антенны может быть записана в виде

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^n k_i \frac{\sin(b_i \sin \theta)}{\sin d \sin \theta} \cos(x_i \sin \theta + \varphi_i),$$

где  $\theta$  – угол в азимутальной плоскости;  $k_i, \varphi_i, x_i, b_i$  – соответственно коэффициент усиления, фаза возбуждающего напряжения, относительная координата и характеристический параметр  $i$ -го излучателя;  $d$  – константа.

На взаимное расположение излучателей задаются габаритные ограничения

$$G: \Delta x_i = |x_{i+1} - x_i| \geq \Delta x_{\text{доп}}, \quad \sum_{i=1}^n \Delta x_i = L.$$

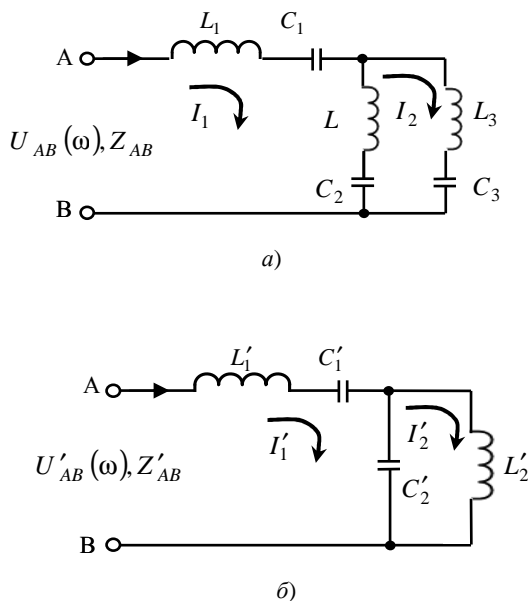
Требуется определить такие значения варьируемых переменных  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $K = (k_1, k_2, \dots, k_n)$ ,  $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ , которые при заданных ограничениях обеспечивают минимальный относительный уровень максимального по величине бокового лепестка  $\Phi(\theta) = \frac{F(\theta)}{F(0)}$  общей диаграммы направленности

$$\min \Phi(\theta) = \min_{X, K, \Phi} \max_{\theta} \left| \frac{F(\theta); X, K, \Phi}{F(0)} \right|.$$

Для решения данной задачи может использоваться один из градиентных методов поиска.

## 2.4. ПРИМЕР

Рассмотрим сокращение числа элементов электрической схемы на примере замены двухполюсника более простым эквивалентным двухполюсником, т.е. таким, который при всех частотах  $\omega$  приложенного ко входу напряжения  $U(\omega)$  имеет то же сопротивление  $Z$ , что и исходный. Такая замена позволяет повысить надёжность за счёт сокращения числа



**Рис. 2.2.** Схемы исходного (а) и эквивалентного (б) двухполюсников

элементов (и паек), уменьшить затраты на изготовление, а следовательно, снизить энергозатраты [20].

Схемы исходного (прототипа) и эквивалентного двухполюсников приведены на рис. 2.2. Как видно из схемы, исходный двухполюсник содержит шесть элементов ( $L_i, C_i, i = 1, 2, 3$ ), а эквивалентный – четыре ( $L'_i, C'_i, L'_2, C'_2$ ). Требуется проверить возможность такой замены и, если это возможно, рассчитать значения элементов  $L'_1, C'_1, L'_2, C'_2$ , при которых одинаковым напряжениям ( $U_{AB}(\omega) = U'_{AB}(\omega)$ ) соответствуют одинаковые токи ( $I_1 = I'_1$ ) (для этого должно выполняться условие  $Z_{AB} = Z'_{AB}$ ).

Для расчётов будут использованы следующие соотношения из тензорного анализа применительно к электрическим цепям:

$$[U] = [Z][I]; \quad (2.1)$$

$$[Z] = [R] + j\omega [I] + \frac{1}{j\omega} [S], \quad S = \frac{1}{C}; \quad (2.2)$$

$$[I] = [M][I']; \quad (2.3)$$



$$[Z'] = [M^T] [Z][M]; \quad (2.4)$$

$$[R'] = [M^T] [R][M]; \quad (2.5)$$

$$[L'] = [M^T] [L][M]; \quad (2.6)$$

$$[S'] = [M^T] [S][M], \quad (2.7)$$

где  $[S]$  – тензор эластанцев (величин, обратных ёмкостям), квадратными скобками обозначены тензоры соответствующих величин;  $[M]$  – матрица связи или преобразования;  $T$  – знак транспонирования.

Элемент  $M_1$  матрицы  $[M]$  всегда равен 1, остальные элементы первой строки нулевые, т.е. первая строка имеет вид

$$100 \dots 0.$$

Заметим, что при этом обеспечивается  $I_1 = I'_1$ . В нашем примере

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad [M^T] = \begin{bmatrix} 1 & M_{21} \\ 0 & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Используя формулу (2.3) и вид матрицы (2.8) для обозначенных на схемах рис. 2.2 токов, можно записать систему уравнений

$$I_1 = I'_1;$$

$$I_2 = M_{21}I'_1 + M_{22}I'_2.$$

Элементы (коэффициенты)  $M_{21}, M_{22}$  требуется определить по известным значениям элементов исходной схемы.

Из рассмотрения схемы рис. 2.2, а тензоры индуктивностей и эластанцев записываются в виде

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + L_2 & L_2 \\ L_2 & L_2 + L_3 \end{bmatrix}; \quad (2.9)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + S_2 & S_2 \\ S_2 & S_2 + S_3 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Для определения значений коэффициентов  $M_{21}, M_{22}$  составляются уравнения на основе равенств (2.6), (2.7), в которые подставляются матрицы (2.9) – (2.12).

Для эквивалентной схемы (рис. 2.2, б) соответствующие тензоры равны

$$[L'] = \begin{bmatrix} L'_{11} & L'_{12} \\ L'_{21} & L'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L'_1 & 0 \\ 0 & L'_2 \end{bmatrix}; \quad (2.11)$$

$$[S'] = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} \\ S'_{21} & S'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S'_1 + S'_2 & S'_2 \\ S'_2 & S'_2 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Для определения значения коэффициентов составляются уравнения на основе  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  равенств (2.6), (2.7), в которые подставляются матрицы (2.9) – (2.12).

Используя равенство (2.6) и значения индуктивностей (2.9), (2.11), получаем

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L'_1 & 0 \\ 0 & L'_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & M_{21} \\ 0 & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 + L_2 & L_2 \\ L_2 & L_2 + L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} L_1 + L_2 + 2M_{21}L_2 + M_{21}^2(L_2 + L_3) & M_{22}L_2 + M_{21}M_{22}(L_2 + L_3) \\ M_{22}L_2 + M_{21}M_{22}(L_2 + L_3) & M_{22}^2(L_2 + L_3) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Из сопоставления элементов матриц записывается первое уравнение:

$$M_{22}L_2 + M_{21}M_{22}(L_2 + L_3) = 0$$

или

$$L_2 + M_{21}(L_2 + L_3) = 0. \quad (2.14)$$

Второе уравнение получаем аналогично на основе формул (2.7), (2.10), (2.12) для эластанцев, т.е.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S'_1 + S'_2 & S'_2 \\ S'_2 & S'_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & M_{21} \\ 0 & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 + S_2 & S_2 \\ S_2 & S_2 + S_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} S_1 + S_2 + 2M_{21}S_2 + M_{21}^2(S_2 + S_3) & M_{22}S_2 + M_{21}M_{22}(S_2 + S_3) \\ M_{22}S_2 + M_{21}M_{22}(S_2 + S_3) & M_{22}^2(S_2 + S_3) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Учитывая расположение значения  $S'_2$  в матрице  $[S']$ , записывается второе уравнение (приравниваются элементы второго столбца последней матрицы), т.е.

$$M_{22}S_2 + M_{21}M_{22}(S_2 + S_3) = M_{22}^2(S_2 + S_3)$$

или

$$M_{21}(S_2 + S_3) - M_{22}(S_2 + S_3) = -S_2. \quad (2.16)$$

Система из двух уравнений (2.14), (2.16) с двумя неизвестными  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  имеет решение; следовательно, замена исходной схемы на эквивалентную (см. рис. 2.2) возможна. В результате решения уравнений (2.14), (2.16) получаем

$$M_{21} = -\frac{L_2}{L_2 + L_3}; \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} M_{22} &= \frac{S_2(L_2 + L_3) - L_2(S_2 + S_3)}{(S_2 + S_3)(L_2 + L_3)} = \frac{\frac{1}{C_2}(L_2 + L_3) - L_2\left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)}{\left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)(L_2 + L_3)} = \\ &= \frac{C_3(L_2 + L_3) - L_2(C_2 + C_3)}{(C_2 + C_3)(L_2 + L_3)} = \frac{C_3L_3 - C_2L_2}{(C_2 + C_3)(L_2 + L_3)}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Используя формулы (2.17), (2.18), компоненты эквивалентной схемы рассчитываются с помощью покомпонентного сопоставления матриц в (2.13) и (2.15), т.е.

$$L'_1 = L_1 + L_2 + 2M_{21}L_2 + M_{21}^2(L_2 + L_3); \quad (2.19)$$

$$L'_2 = M_{22}^2(L_2 + L_3); \quad (2.20)$$

$$S'_1 = S_1 + S_2 + 2M_{21}S_2 + (M_{21}^2 - M_{22}^2)(S_2 + S_3),$$

$$\begin{aligned} C'_1 &= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{2M_{21}}{C_2} + \frac{(M_{21}^2 - M_{22}^2)(C_2 + C_3)}{C_2C_3}} = \\ &= \frac{C_2}{\frac{C_1 + C_2}{C_1C_2} + \frac{2M_{21}}{C_2} + \frac{(M_{21}^2 - M_{22}^2)(C_2 + C_3)}{C_2C_3}} = \\ &= \frac{C_2}{1 + 2M_{21} + \frac{C_2}{C_1} + (M_{21}^2 - M_{22}^2)\left(1 + \frac{C_2}{C_3}\right)}; \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$S'_2 = M_{22}^2(S_2 + S_3), \quad C'_2 = \frac{C_2 C_3}{M_{22}^2(C_2 + C_3)}. \quad (2.22)$$

Для численного расчёта пусть

$$L_1 = 3, L_2 = 1, L_3 = 2 \text{ (мкГн)}; \quad C_1 = 0,5, C_2 = 1, C_3 = 2 \text{ (мкФ)}.$$

В этом случае по формулам (2.17), (2.18) определяем  $M_{21}$ ,  $M_{22}$

$$M_{21} = -\frac{L_2}{L_2 + L_3} = -\frac{1}{3}; \quad M_{22} = \frac{C_3 L_3 - C_2 L_2}{(C_2 + C_3)(L_2 + L_3)} = \frac{4 - 1}{3 \cdot 3} = \frac{1}{3}.$$

В соответствии с формулами (2.19), (2.20)

$$L'_1 = L_1 + L_2 + 2M_{21}L_2 + M_{21}^2(L_1 + L_2) = \frac{11}{3}; \quad L'_2 = M_{22}^2(L_2 + L_3) = \frac{1}{3}$$

и формулами (2.21), (2.22)

$$C'_1 = \frac{C_2}{1 + 2M_{21} + \frac{C_2}{C_1} + (M_{21}^2 - M_{22}^2)\left(1 + \frac{C_2}{C_3}\right)} = \frac{3}{7};$$

$$C'_2 = \frac{C_2 C_3}{M_{22}^2(C_2 + C_3)} = 6.$$

Нетрудно проверить, что в этом случае выполняется равенство  $Z_{AB} = Z'_{AB}$ . В частности,

$$Z'_{AB} = Z'_1 + \frac{Z'_2 - Z'_3}{Z'_2 + Z'_3},$$

при этом

$$Z'_1 = j\omega L'_1 + \frac{1}{j\omega C'_1} = j\frac{11\omega^2 - 7}{3\omega}; \quad Z'_2 = \frac{1}{j\omega C'_2} = -j\frac{1}{6\omega}; \quad Z'_3 = j\omega L'_2 = j\omega\frac{1}{3}$$

и

$$Z'_{AB} = j\frac{22\omega^4 - 26\omega^2 + 7}{3\omega(2\omega^2 - 1)}.$$

Следует заметить, что эквивалентная схема полностью заменяет исходную в стационарных режимах. В нестационарных режимах необходимо проводить дополнительные исследования динамических характеристик схем и после этого делать вывод о возможности замены.

### **3. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РЭС**

---

Технология производства, или технологический процесс – основная часть производственного процесса, заключающаяся в выполнении определённых действий, направленных на изменение исходных свойств предметов труда для достижения определённых свойств РЭС на основании конструкторской документации. Конструирование и технология производства являются, с одной стороны, отдельными частями сложного процесса разработки РЭС, а с другой – не могут выполняться в отдельности, без учёта взаимосвязей между собой.

#### **3.1. ЗАДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА РЭС**

Технологическая подготовка производства (ТПП) обычно рассматривается как совокупность современных методов организации, управления и решения технологических задач на основе комплексной стандартизации, автоматизации, экономико-математических моделей и средств технологического оснащения. Стандарты Единой системы ТПП устанавливают общие правила организации и управления производством, предусматривают широкое применение прогрессивных технологических процессов (ТП), стандартной технологической оснастки, средств автоматизации производственных процессов и управленческих работ [21].

Основными задачами автоматизации ТПП РЭС являются: выбор технологий и технических маршрутов для компонентов изделия, разработка принципиальной схемы ТП в виде последовательности этапов укрупнённых операций, выбор технологического оборудования, оснастки и инструментов, оптимизация технологических маршрутов и операций, проектирование систем автоматического контроля и управления технологическим процессом, разработка системы менеджмента качества, оценка экономической эффективности ТП.

Большое внимание при решении этих задач уделяется непосредственному назначению РЭС, условиям эксплуатации изделий и вопросам энергосбережения. Для решения задач автоматизации ТПП широко используются методы математического моделирования, оптимизации и планирования эксперимента.

Построение математических моделей предполагает определение целей моделирования, декомпозицию ТП на отдельные операции, построе-

ние математических моделей для каждой операции, верификацию полученных моделей и композицию их в обобщённую модель всего технологического процесса. Разработанные модели используются в САПР ТП и SCADA-системах.

В качестве моделей ТП наиболее часто используются описательные (вербальные), аналитические (математические) и графовые (графические).

Описательные модели обычно представляют собой таблицы с информацией о режимах работы, технологических операциях, переходах и т.п. Эти таблицы содержатся в базах данных САПР ТП.

Математические модели ТП характеризуют функциональные связи между входными и выходными переменными ТП, отражают физико-химические процессы в технологических установках. Различные виды этих моделей необходимы для решения задач оптимизации режимных параметров ТП, анализа чувствительности выходных показателей ТП в случае различного рода отклонений от требуемого регламента, проектирования АСУТП и др.

Графовые модели в виде неориентированных и ориентированных графов, а также различного рода графических зависимостей между переменными ТП применяются для решения задач надёжности, планирования загрузки технологического оборудования, управления запасами и т.п. В последнее время начинают применяться модели в виде когнитивной графики, которые за счёт образного представления условий решаемых задач облегчают принятие интеллектуальных решений.

Следует заметить, что моделирование ТП во многих случаях тесно связано с моделированием проектируемых и изготавливаемых объектов. Например, при моделировании этапов технологии изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) необходимо учитывать характеристики (статические, динамические) и компоненты (активные, паразитные), которые описываются моделями самих СБИС.

Особенностями задач оптимизации применительно к ТПП являются: широкое разнообразие постановок задач; сложность их формализации; высокая размерность массивов переменных, участвующих в задаче, и различного рода ограничений; наличие неопределённостей в исходных данных; большое число возможных вариантов построения ТП; отсутствие единого подхода к решению задач.

Если проект связан с незначительной модернизацией РЭС, то большая часть технологических операций считается отработанной, а для отдельных операций требуется уточнение технологических режимов и используемых материалов. В случае серьёзной модернизации изделия при формировании вариантов ТП могут использоваться процессы-аналоги с добавлением отдельных операций.

Наиболее распространённые методы решения задач оптимизации, принятия проектных и управленческих решений в различных ситуациях рассматриваются в [22, 23]. При использовании этих методов необходимо руководствоваться соответствующими положениями и принципами проектирования ТП. При автоматизации ТПП РЭС наиболее важными принципами являются следующие [24].

*Принцип иерархичности* (многоуровневости), в соответствии с которым работы по проектированию ТП делятся по уровням таким образом, что решения задач, получаемых на одних уровнях, служат исходными данными для задач следующих уровней.

*Принцип неокончателности* (альтернативности) решений на этапах ТПП предполагает, что после выполнения каждого этапа для последующего проектирования остаётся не один, а несколько альтернативных вариантов проектных решений. Это повышает обоснованность получения наиболее предпочтительной схемы ТП.

*Принцип итерационности* (обратной связи) заключается в возможности возврата от каждого этапа проектирования к любым предыдущим. Это позволяет использовать новую информацию, полученную в ходе выполнения работ по ТПП и анализа результатов экспериментальной проверки качества технологического процесса.

Вопросы планирования эксперимента тесно связаны с методом робастного проектирования [25]. Применение этого метода позволяет разработать ТП, при котором характеристики производимой продукции будут в наименьшей степени подвержены разбросу, вызываемому несовершенством технологического оборудования, неопределённостью сырья и влиянием различного рода внешних воздействий.

Решение задач ТПП для производства нового (инновационного) изделия целесообразно выполнять в соответствии с методологией реинжиниринга бизнес-процессов на предприятии [26].

### **3.2. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ**

Важным резервом снижения потребления ресурсов промышленными предприятиями является использование энергосберегающего планирования загрузки технологического оборудования. Прежде всего это относится к предприятиям, имеющим цеха термообработки различных материалов и деталей. Большинство предприятий машиностроительной, химической, электронной промышленности, промышленности строительных материалов и других отраслей используют электрические печи, сушильные установки, гальванические ванны и другое энергоёмкое оборудование, на которое приходится значительная доля платежей за электроэнергию.

В связи с ростом цен на энергоносители и обострением проблемы ресурсопотребления существующие методы планирования загрузки оборудования не обеспечивают выполнение требований энергетической эффективности [27]. Например, широко используемый метод Джонсона не учитывает при составлении плана выпуска продукции важные ограничения использования энергоресурсов [28].

В разделе рассматривается задача планирования загрузки технологического оборудования, которая отличается от традиционных задач теории расписаний наличием двух видов ограничений на потребляемые энергоресурсы. Ограничения первого вида предусматривают допустимое использование ресурсов в каждый момент времени, а второго вида – интегральные, т.е. требуется не превышать выделенный на определённый период времени лимит ресурсов.

Выполнение указанных ограничений необходимо для решения проблем устойчивого развития предприятий и обеспечения их энергетической эффективности.

Математически задача энергосберегающего планирования загрузки оборудования формулируется следующим образом. Задаются:

– модель парка технологического оборудования, включающего  $m$  видов аппаратов (машин):

$$\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}, \quad A_i = (m_i, V_i, E_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (3.1)$$

где  $m_i$  – число аппаратов  $i$ -го вида;  $V_i, E_i$  – функциональные и энергетические характеристики аппарата  $A_i$ ;

– множество моделей обрабатываемых деталей:

$$\mathcal{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}, \quad D_j = (R_j, VD_j, ED_j), \quad j = \overline{1, N}, \quad (3.2)$$

где  $R_j$  – множество «работ», которые надо выполнить с деталью  $D_j$  в аппаратах  $A_i \in \mathcal{A}$ ;  $VD_j$  – габаритные и другие функциональные характеристики детали, позволяющие определить соответствующий аппарат;  $ED_j$  – энергетические характеристики детали (температура и длительность термообработки);

– плановое задание на очередной период времени  $T$ :

$$\Pi = (VPI D_k), \quad k = \overline{1, n}, \quad (3.3)$$

где  $VPI D_k$  – планируемый объём выпуска деталей  $k$ -го вида;



– оператор  $S_r$ , определяющий возможность выполнения работ  $r \in R_j$  для детали  $D_k$  в аппарате  $A_j$ :

$$S_r = \begin{cases} V_{kj}, & \text{если работа } r \text{ для } D_k \text{ в } A_j \text{ выполняется;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $V_{kj} \in [0; \text{ВПД}_k]$  – объём загрузки детали  $D_k$  в аппарат  $A_j$ ;

– оператор  $S_E$ , определяющий энергозатраты при выполнении работ с объёмом загрузки  $V_{kj}$ :

$$S_E : \mathcal{A} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{E}_\Pi, \quad (3.5)$$

где  $\mathcal{E}_\Pi$  – множество значений энергозатрат аппаратами при выполнении планового задания  $\Pi$ ;

– ограничения на энергозатраты в каждый момент времени  $t$ :

$$\forall t \in \mathcal{I} : Q_E(t) = \sum_{A \in \mathcal{A}} E_t(A) \leq P_{\text{доп}}^t, \quad (3.6)$$

где  $\mathcal{I}$  – множество моментов времени функционирования аппаратов;  $E_t(A)$  – энергозатраты аппарата  $A$  в момент времени  $t$ ;  $P_{\text{доп}}^t$  – допустимая потребляемая мощность всеми функционирующими аппаратами в момент времени  $t$ ;

– интегральные ограничения за период  $T$  (на выделенный лимит энергопотребления):

$$Q_{ET} = \int_0^T Q_E(t) dt \leq E_{\text{доп}}^t, \quad (3.7)$$

где  $E_{\text{доп}}^t$  – выделенный лимит энергии на время  $T$ ;

– минимизируемый функционал:

$$F = c_1 \tilde{T}_\Pi(G) + c_2 Q_{ET}(G) \rightarrow \min_G, \quad (3.8)$$

где  $\tilde{T}_\Pi$  – время выполнения плана;  $c_1, c_2$  – весовые коэффициенты;  $G$  – график выполнения планового задания.

Требуется спланировать выполнение планового задания (3.3) за время  $T$  в виде графика  $G$  загрузки оборудования, определяющего закрепление деталей за аппаратами и технологические цепочки работ, при кото-

ром выполняются необходимые ограничения (3.6), (3.7) и функционал (3.8) достигает минимального значения.

Если число видов аппаратов  $m$  значительно (более 4–5) и  $N$  велико (десятки – сотни), то точных методов для оперативного решения задачи (3.1) – (3.8) не существует [28, 29]. Требование оперативности объясняется высокой вероятностью изменения планового задания (3.3) за время  $T$  и необходимостью многократного решения задачи.

В основу предлагаемого метода энергосберегающего планирования загрузки оборудования положены следующие принципы.

*Принцип наследования.* В новом плановом задании (3.3) выделяется часть  $\Pi_n$ , для которой имелось приемлемое решение в виде графика  $G_n$  на предыдущих временных интервалах планирования. Выделенная часть исключается из плана (3.3), и в последующем задача решается для скорректированного плана:

$$\Pi_k = \Pi - \Pi_n. \quad (3.9)$$

*Принцип максимальной совместимости.* С помощью операторов (3.4), (3.5) для каждого компонента плана  $\Pi_k$  составляются списки наиболее предпочтительных аппаратов. При этом учитываются факторы функциональности (полноты заполнения рабочего объёма) и энергетической эффективности (см. (3.1), (3.2)). Результаты определения показателей совместимости хранятся в базе данных информационной системы.

*Принцип «монотонности в энергетике».* В соответствии с данным принципом очерёдность термообработки разных типов деталей в аппарате  $A_j$  должна соответствовать либо повышению температурных режимов, либо понижению.

*Принцип виртуализации (объединения).* Разнотипные детали с одинаковыми режимами термообработки и близкие по размерам объединяются в один тип. Аналогично объединяются аппараты, модели которых по функциональным и энергетическим характеристикам существенно не различаются.

Алгоритм решения задачи (3.1) – (3.8), использующий данные принципы, содержит следующие основные этапы.

1. В соответствии с принципом наследования производится коррекция планового задания (3.3) и переход к плану  $\Pi_k$ .
2. Для скорректированного плана (3.9) производится объединение деталей в соответствии с принципом виртуализации.
3. Объединённые детали «закрепляются» за аппаратами с учётом показателей совместимости.

4. Определяется очерёдность термообработки деталей в соответствии с принципом «монотонности в энергетике». При этом для выполнения ограничения (3.6) детали разбиваются на две группы. Обработка деталей первой группы соответствует повышению температуры в аппаратах, а второй – понижению.

5. Проверяется выполнение ограничений (3.6), (3.7) и на время  $T$  выполнения планового задания. Если все ограничения выполняются, то полученный график  $G$  считается допустимым. Если при этом удельное значение функционала  $F/ВП$  незначительно отклоняется от  $F_n/ВП_n$ , то график  $G$  является квазиоптимальным, и на этом решение задачи заканчивается. Здесь  $ВП, ВП_n$  – общий объём планового задания и объём планового задания, выделенного в соответствии с принципом наследования;  $F_n$  – значение функционала (3.8) для  $ВП_n$ .

6. Если не выполняется ограничение (3.6), то перераспределяются группы деталей, выделенные на этапе 4. В случае невыполнения ограничения (3.7) выбирается другой вариант плана  $ВП_n$  (см. этап 1), с меньшим значением составляющей  $Q_E$  функционала  $F$ , и затем этапы 2 – 5 повторяются. Число таких итераций заранее ограничивается.

Рассмотренный алгоритм может быть использован в информационной системе планирования работы цеха термообработки на предприятиях электронного профиля. Введение ограничений на энергопотребление позволит сократить энергозатраты на 5% и исключить случаи перерасхода выделяемого лимита. Алгоритм может найти применение при решении задач оптимального распределения энергоресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве и других сферах.

### 3.3. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ АВТОМАТИКА

Важным резервом в решении проблемы энерго- и ресурсосбережения является оптимальное по минимуму затрат энергии или топлива управление динамическими объектами, проектирование машин и аппаратов, которые при своём функционировании требуют меньших энергозатрат по сравнению с существующими аналогами.

Теоретические исследования и практические результаты показывают, что при оптимальном управлении уменьшение затрат энергии (расхода топлива) может достигать от 10 до 40% по сравнению с традиционно используемыми управляющими воздействиями. Кроме того, в динамических режимах, характеризуемых меньшими энергетическими затратами, снижаются механические и тепловые нагрузки, что ведёт к повышению долговечности и безопасности эксплуатации объектов.

Серьёзным сдерживающим фактором в реализации оптимального энергосберегающего управления динамическими процессами является отсутствие алгоритмов синтеза управляющих воздействий в реальном времени, которые могут быть использованы простыми и дешёвыми микропроцессорными устройствами. В каталогах алгоритмического и программного обеспечения отечественных и зарубежных фирм, поставляющих программные и технические средства для промышленной автоматизации (Круг, Техноконт, Трейс Моуд, Matlab, Siemens, Schneider Elektrik, Omron, Motorola и др.), отсутствуют сведения об алгоритмах, минимизирующих затраты энергии или расход топлива.

В существующих SCADA-системах и других программных средствах, используемых для проектирования систем автоматического управления и регулирования, предполагается стандартный набор алгоритмов: ПИ- и ПИД-регулирование, линейный квадратичный оптимальный регулятор, оптимальное быстродействие, нечёткий регулятор и некоторые другие, в которых не учитываются характерные для энергосберегающего управления ограничения, например на лимит энергии или запас топлива. Ряд фирм в проспектах о своей продукции упоминают об энергосбережении и «мягком» пуске электродвигателей, однако используемые для этого алгоритмы не раскрываются и считаются ноу-хау фирмы.

Необходимо отметить, что разработка нового алгоритмического обеспечения для систем управления является наиболее интеллектуальным этапом проектирования. Для выполнения этого этапа привлекаются специалисты высокого класса. Только крупные фирмы могут позволить себе иметь подразделение по разработке и исследованию систем оптимального управления. Для получения алгоритмов энергосберегающего управления требуется проведение трудоёмких исследований применительно к каждому новому объекту или новым режимам работы.

К наиболее энергоёмким объектам относятся тепловые аппараты, машины с электроприводами, т.е. большинство видов технологических установок в машиностроительной, химической, металлургической, строительной и других отраслях промышленности, а также перемещающиеся объекты и транспортные средства. Затраты на электроэнергию и различные виды топлива при эксплуатации этих объектов для большинства промышленных и сельскохозяйственных предприятий относятся к числу основных и становятся сопоставимыми с затратами на сырьё. Миллионы разнообразных энергоёмких объектов значительную долю времени работают в динамических режимах, это позволяет снижать их энергопотребление за счёт оптимального управления в различных состояниях функционирования.

Создание и внедрение систем энергосберегающего управления (СЭУ) связано с решением ряда сложных задач. Во-первых, формализация и ре-

шение задачи оптимального управления (ЗОУ), а также идентификация модели динамики объекта представляют собой трудоёмкие научные исследования, требующие привлечения специалистов высокого класса. Во-вторых, в процессе реальной эксплуатации объектов происходят изменения производственных и других ситуаций, что ведёт к изменениям исходных данных ЗОУ, а следовательно, к необходимости получения нового решения сложной задачи. В-третьих, управляющее устройство, которое рассчитывает оптимальное управление, должно, с одной стороны, быть достаточно дешёвым (чтобы его использование было экономически оправданно), с другой стороны, обладать большими вычислительными возможностями, позволяющими оперативно рассчитывать оптимальное управление при изменении исходных данных [30].

Следует заметить, что энергосберегающее управление играет большую роль при использовании альтернативных источников энергии, его идеи начинают применяться при управлении проектами, организациями и предприятиями, экономикой регионов.

Необходимые понятия и определения введём на примере математической постановки одной из традиционных ЗОУ – задачи с ограничением на управление  $u$ , фиксированным временным интервалом  $[t_0, t_k]$  и закреплёнными концами траектории изменения вектора фазовых координат  $z = (z_1, \dots, z_n)^T$ , которая записывается в виде

$$\dot{z} = f(z, u, w; A, B, C, Q, t); \quad (3.10)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: u(t) \in [u_n, u_b]; \quad (3.11)$$

$$z(t_0) = z^0, \quad z(t_k) = z^k; \quad (3.12)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f_0(z, u; t) dt \rightarrow \min, \quad (3.13)$$

где  $f: R^n \times R \times R \rightarrow R^n$ ;  $f_0: R^n \times R \rightarrow R$ ;  $w$  – возмущающее воздействие;  $A, B, C$  – массивы параметров модели объекта (при  $z, u, w$ );  $Q$  – массив времени запаздывания по каналам  $u$  и  $w$ ;  $u_n, u_b$  – нижняя и верхняя границы изменения управления  $u$  (в данном случае скалярного);  $z^0, z^k$  – начальное и конечное значение вектора  $z$ ;  $J$  – минимизируемый функционал.

В результате решения задачи (3.10) – (3.13) требуется определить оптимальную программу

$$u^*(\cdot) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]) \quad (3.14)$$

или синтезирующую функцию

$$u^*(t) = s(z(t), t_k - t), \quad (3.15)$$

которые обеспечивают перевод объекта с моделью динамики (3.10) при ограничении на управление (3.11) из начального состояния  $z^0$  в конечное  $z^k$  за время  $t_k - t_0$  при минимуме функционала (3.13), а также оптимальную траекторию  $z^*(\cdot) = (z^*(t), t \in [t_0, t_k])$  и значение функционала  $J^*$ .

Сокращённо данную ЗОУ будем обозначать четвёркой [31, 32]

$$\langle M, F, S, O \rangle = \overset{\Delta}{J}, \quad (3.16)$$

где  $M$  – модель объекта;  $F$  – вид минимизируемого функционала;  $S$  – стратегия реализации оптимального управления (программная или позиционная);  $O$  – характерные ограничения и связи.

Четвёрка (3.16), по существу, является моделью ЗОУ.

Для численного решения ЗОУ (3.10) – (3.13), т.е. определения конкретного вида функции оптимального управления (ОУ)  $u^*(t)$  (или синтезирующей функции (3.15)) и её параметров, а также значений  $z^*(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , и  $J^* = J(u^*)$ , задаётся массив исходных данных (реквизитов):

$$R = (A, B, C, Q, u_n, u_b, z^0, z^k, t_0, t_k). \quad (3.17)$$

*Определение 1.* Если на временном интервале управления  $[t_0, t_k]$  четвёрка  $J$  и значения массива  $R$  остаются неизменными, то будем говорить, что ЗОУ (3.16) с массивом (3.17) соответствует одному состоянию функционирования  $h$ . Данное обстоятельство может отражаться индексом у соответствующих обозначений:  $J_h, R_h, A_h$  и т.д.

В процессе эксплуатации конкретного объекта управления вследствие отказов технических средств, смены производственных ситуаций могут изменяться как отдельные компоненты модели ЗОУ, например вид минимизируемого функционала, стратегия реализации ОУ и т.д., так и значения составляющих массива  $R$ . Эти изменения в  $J$  и  $R$  соответствуют смене значений переменной  $h$  [33].

*Определение 2.* Возможные значения переменной  $h$ , которым соответствуют различные модели ЗОУ и значения массива  $R$  применительно к конкретному объекту управления в процессе его эксплуатации, образуют множество состояний функционирования (МСФ)  $H_0$ .

В общем случае множество  $\mathcal{H}_0$  можно ввести как декартово произведение:

$$\mathcal{H}_0 = M \times \mathcal{F} \times \mathcal{S} \times \mathcal{O} \times \mathcal{R},$$

где  $M, \mathcal{F}, \mathcal{S}, \mathcal{O}, \mathcal{R}$  – множества соответственно различных моделей динамики объекта, видов функционала, стратегий управления, ограничений и значений массива  $R$ .

Таким образом, в отличие от переменной состояния (вектора фазовых координат)  $z$  объекта, которая обычно является гладкой функцией времени, переменная  $h$  скачкообразно изменяет своё значение при изменении модели  $M$ , вида функционала  $f$  и т.д. Изменения  $h$  могут происходить как в случайные, так и заранее планируемые моменты времени. Траекторию изменения  $h$  будем рассматривать как ступенчатую кусочно-постоянную функцию, т.е.

$$h(\cdot) = (h(t) = h_0, \forall t \in [t_0, t_1]; h(t) = h_1, \forall t \in [t_1, t_2]; \dots), \quad (3.18)$$

где  $t_1, t_2, \dots$  – моменты времени изменения значения переменной  $h$ .

Такое введение множества  $\mathcal{H}_0$  соответствует постулатам дополненности (системы, находясь в различных ситуациях, могут проявлять различные системные свойства, в том числе альтернативные) и многообразия моделей (определение характеристик системы производится с помощью множества моделей, которые различаются математическими зависимостями и физическими закономерностями, выбор модели зависит от цели анализа и синтеза и особенностей системы) принципа моделируемости, в соответствии с которым сложная система может быть представлена конечным множеством моделей, каждая модель отражает определённую грань сущности системы [34].

В зависимости от того, изменяется или нет значение  $h$  на временном интервале  $[t_0, t_k]$  и известно ли значение  $h$  в каждый момент времени, возможны четыре класса СЭУ на МСФ [33].

Основными этапами разработки СЭУ для конкретного объекта являются:

- предпроектные исследования и формализация ЗОУ;
- идентификация модели динамики объекта для различных состояний функционирования;
- полный анализ ЗОУ;
- синтез алгоритмического обеспечения СЭУ;
- внедрение и сопровождение СЭУ в процессе эксплуатации.

Этап полного анализа ЗОУ (если он не выполнен заранее) является наиболее сложным и трудоёмким.

Полный анализ ЗОУ предполагает определение условий существования решения задачи в зависимости от значений компонентов массива  $R$ , возможных видов функций ОУ (или синтезирующих функций), соотношений для расчёта параметров ОУ и границ областей различных видов ОУ, а также соотношений для решения обратных задач оптимального управления.

Основными принципами и положениями методологии полного анализа ЗОУ на МСФ являются следующие.

1. Анализ оптимального управления производится для конкретной четвёрки  $\langle M, F, S, O \rangle$  в предположении, что компоненты соответствующего массива исходных данных  $R$  могут принимать любые возможные (физически реализуемые) значения (здесь  $M$  – модель динамики объекта;  $F$  – вид функционала;  $S$  – стратегия управления;  $O$  – ограничения и связи).

2. Для задаваемых вида модели  $M$  и функционала затраты энергии ( $F = \mathcal{E}$ ) с использованием принципа максимума определяются все возможные виды функции ОУ применительно к программной стратегии.

3. Методом синтезирующих переменных определяются соотношения для границ области существования решения ЗОУ, границ областей с разными видами функций ОУ и формулы для расчёта параметров соответствующих функций.

4. На основе результатов, полученных в п. 3, аналогичные соотношения и формулы определяются для других видов функционалов (расход топлива, быстроедействие) и стратегий (позиционная).

5. В пространстве  $\mathcal{L}$  вектора синтезирующих переменных  $L$  строятся границы, в пределах которых выполняются дополнительно накладываемые ограничения к задаче оптимального управления (на значения фазовых координат, скорость изменения управления и т.п.).

6. Определяются расчётные соотношения для решения обратных задач оптимального управления.

7. Определяются формулы для расчёта траекторий изменения фазовых координат и значений функционала для всех возможных видов функций ОУ.

Для выполнения полного анализа ЗОУ обычно используются принцип максимума и метод синтезирующих переменных [35, 36]. Его применение позволяет визуализировать процесс решения ЗОУ и в компактной форме хранить результаты в виде когнитивной графики. На рисунке 3.1 представлен пример результатов полного анализа ЗОУ  $\langle \text{РДИ}, \mathcal{E}, \text{Пр}, O \rangle$ .



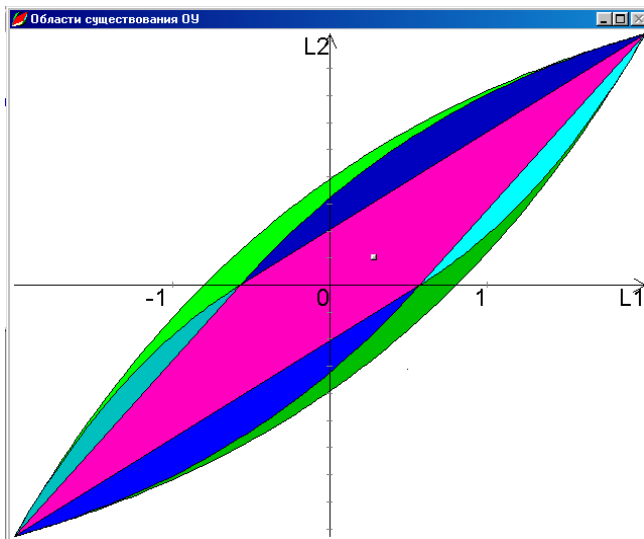


Рис. 3.1. Область существования решения ЗОУ <РДИ, Э, Пр, О>

Здесь модель динамики – реальный двойной интегратор (РДИ), функционал – затраты энергии (Э), программная стратегия (Пр), концы фазовой траектории закреплены, временной интервал фиксирован, управление (скалярное) ограничено (О), т.е.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2(t), \quad \dot{z}_2 = a_2 z_2(t) + bu(t), \quad t \in [t_0, t_k]; \\ \forall t \in [t_0, t_k]: \quad u(t) &\in [u_H, u_B]; \\ z_i(t_0) &= z_i^0, \quad z_i(t_k) = z_i^k, \quad i = 1, 2; \\ J_\varepsilon &= \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \rightarrow \min; \\ u^*(\cdot) &= (u^*(t), \quad t \in [t_0, t_k]). \end{aligned} \tag{3.19}$$

Результаты выполненного полного анализа каждой ЗОУ оформляются в виде фреймов базы знаний экспертной системы, предназначенной для автоматизированного проектирования алгоритмического обеспечения СЭУ.

Важным направлением повышения эффективности энергосберегающей автоматики является создание новой компонентной базы в виде специализированных микросхем (СпМСх), основанных на когнитивной гра-

фике. Это позволит существенно сократить вычислительные операции, в результате повысить быстродействие управляющих устройств, а также снизить энергопотребление используемых электронно-вычислительных средств.

Компоненты структурной схемы СпМСх должны обрабатывать составляющие массива исходных данных  $R$  решаемой ЗОУ и рассчитывать значение вектора синтезирующих переменных  $L$  (входной компонент СпМСх).

По значениям вектора  $L$  с помощью когнитивной модели (см. рис. 3.1) проверяется существование решения ЗОУ. Если решение существует, то формируется сигнал, характеризующий вид функции ОУ, в противном случае вырабатывается сигнал об отсутствии решения задачи для исходных данных  $R$  (компонент, реализующий когнитивную модель).

Рассчитываются параметры ОУ для соответствующего вида функции. Согласовываются взаимодействия составных частей СпМСх (супервизор).

Основной частью СпМСх является компонент, реализующий когнитивную модель. Этот компонент содержит результаты полного анализа ЗОУ, он может быть выполнен по технологии памяти или многослойной графики. Его использование позволяет исключить громоздкие вычислительные операции, связанные с определением вида функции ОУ.

Рассмотренный подход к построению алгоритмического обеспечения энергосберегающих автоматических устройств позволяет повысить энергетическую эффективность энергопотребляющих объектов за счёт следующих факторов:

- реализации оптимальных траекторий изменения фазовых координат на всём временном интервале управления; например, для тепловых объектов оптимальная траектория изменения температуры обеспечивает сокращение временного участка с наибольшими потерями тепла в окружающую среду;

- оптимального ведения динамических режимов при всех состояниях функционирования, т.е. в случае изменения модели динамики объекта или условий (исходных данных) задачи управления оперативно (в реальном времени) находится новое решение и реализуются энергосберегающие управляющие воздействия для существующей ситуации;

- достижения задаваемого конечного значения вектора фазовых координат точно в требуемый момент времени, которое, в свою очередь, выбирается оптимальным;

- использования оптимальной стратегии реализации энергосберегающего управления (программной, позиционной или другой) для каждого состояния функционирования;

- замены обычных автоматических регуляторов энергосберегающими, которые устраняют значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения с минимумом затрат энергии (расхода топлива);
- создания локальных и бортовых систем энергосберегающего управления на базе простых и дешёвых микропроцессорных устройств.

### 3.4. ПРИМЕР

Рассматриваются два варианта проекта с системой автоматического регулирования. В одном варианте (вариант *A*) используется обычный автоматический регулятор (АР), который применялся в прототипе. В другом варианте (вариант *B*) предлагается поставить энергосберегающий регулятор (ЭСР). Этот регулятор с большими возможностями, он устраняет значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения с минимумом расхода топлива, цена его выше, и он требует больших затрат на обслуживание. Исходные данные для расчёта показателей проектов приведены в табл. 3.1. Предполагается, что имеется освобождение от налога на прибыль и на имущество; кроме того, можно не учитывать ликвидационную стоимость.

Расчёт показателей выполняется в следующей последовательности.

1. Определяется стоимость сэкономленного топлива  $\Theta^T$  при вариантах *A* и *B*:

$$\Theta_A^T = \Delta Q_A \cdot Ц_A = 50 \cdot 30 = 1500, \text{ р.};$$

$$\Theta_B^T = \Delta Q_B \cdot Ц_B = 90 \cdot 30 = 2700, \text{ р.}$$

#### 3.1. Исходные данные для расчёта показателей проектов

Наименование показателей	Условное обозначение	Варианты проекта	
		<i>A</i>	<i>B</i>
Экономия топлива, ед. т.	$\Delta Q$	50	90
Капиталовложения, р.	$K$	2000	3000
Затраты на обслуживание и ремонт (год), р.	$P$	100	150
Цена топлива, р. / ед. т.	$Ц$	30	30
Срок службы, г.	$T$	5	5
Норма дисконта	$E$	0,1	0,1

2. Рассчитывается ежегодный доход  $D$  (с учётом, что имеется освобождение от налога на прибыль):

$$D_A = \Xi_A^T - P_A = 1500 - 100 = 1400, \text{ р.};$$

$$D_B = \Xi_B^T - P_B = 2700 - 150 = 2550, \text{ р.}$$

3. Определяется по формуле (1.15) значение дисконтирующего множителя  $\alpha_T$  при  $T = 5$  лет и  $E = 0,1$ :

$$\alpha_T = \frac{(1+E)^T - 1}{E(1+E)^T} = \frac{1,1^5 - 1}{0,1 \cdot 1,1^5} = \frac{0,6105}{0,16105} = 3,79.$$

4. По формуле (1.14) рассчитываются значения чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД}_A = D_A \alpha_T - K_A = 1400 \cdot 3,79 - 2000 = 3306, \text{ р.};$$

$$\text{ЧДД}_B = D_B \alpha_T - K_B = 2550 \cdot 3,79 - 3000 = 6664,5, \text{ р.}$$

5. По формуле (1.16) определяется индекс доходности инвестиций:

$$\text{ИД}_A = \frac{\text{ЧДД}_A}{K_A} + 1 = 2,653;$$

$$\text{ИД}_B = \frac{\text{ЧДД}_B}{K_B} + 1 = 3,222.$$

6. Определяются предельные значения динамического множителя:

$$\alpha_{T,A}^{\text{пр}} = \frac{K_A}{D_A} = \frac{2000}{1400} = 1,4286, \text{ г.};$$

$$\alpha_{T,B}^{\text{пр}} = \frac{K_B}{D_B} = \frac{3000}{2550} = 1,1765, \text{ г.}$$

7. Определяются уточнённые значения срока окупаемости по формуле

$$T_o^A = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \frac{\alpha_{T,A}^{\text{пр}} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} = 1 + (2 - 1) \cdot 0,43 = 2,43;$$

$$T_o^B = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \frac{\alpha_{T,B}^{\text{пр}} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} = 1 + (2 - 1) \cdot 0,18 = 2,18.$$

### 3.2. Показатели эффективности ЭСМ в проекте

Наименование показателей	Варианты проекта		Предпочтительный вариант по соответствующему показателю
	<i>A</i>	<i>B</i>	
Капиталовложения, р.	2000	3000	<i>A</i>
Стоимость сэкономленного топлива, р.	1500	2700	<i>B</i>
Годовой доход, р.	1400	2550	<i>B</i>
Чистый дисконтированный доход, р.	3306	6664	<i>B</i>
Индекс доходности инвестиции	2,653	3,222	<i>B</i>
Срок окупаемости, г.	1,43	1,18	<i>B</i>

Результаты полученных показателей эффективности ЭСМ в проекте приведены в табл. 3.2.

На основании данных табл. 3.2 можно сделать вывод, что по значениям большинства показателей (за исключением капиталовложения) вариант *B* является предпочтительным и его следует принять для реализации.

## 4. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ В ПРОЕКТЕ РЭС

---

В разделе проекта, посвящённом энергосберегающим мероприятиям, рассматриваются предложения по снижению энергозатрат. Эти предложения подкрепляются расчётом показателей, отражающих эффект использования новаций и затрат на реализацию. Эффект может оцениваться с позиции заказчика (технического задания), с позиции предприятия, с позиции отдельных технических характеристик, а в исключительных случаях с позиций национальных интересов (например, при создании национальных интересов, при создании новых энергоэффективных принципов действия или новых источников энергии).

### 4.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Методология оценки энергосберегающих мероприятий (ЭСМ) в проекте основана на ряде принципов, наиболее важными из них являются следующие.

1. Принцип оценки показателей проектных решений с учётом возможных состояний функционирования разрабатываемого объекта в процессе реальной эксплуатации. В соответствии с этим принципом учитываются неопределённости и риски, связанные с реализацией проекта.
2. Принцип вариантности, согласно которому разрабатываются и анализируются несколько альтернативных вариантов ЭСМ.
3. Принцип использования показателей энергоэффективности альтернативных вариантов в стоимостной форме, а также в форме энергетических и мощностных затрат.
4. Принцип учёта всех ресурсных ограничений (финансовых, технологических, временных и др.).
5. Принцип оценки интегральных результатов и затрат, в соответствии с которым оценивается интегральный энергосберегающий эффект за весь срок эксплуатации объекта. За тот же срок определяются и полные затраты.
6. Принцип соизмеримости результатов, получаемых в различные моменты времени (годы), с использованием приёма дисконтирования.

Заметим, что под дисконтированием понимается приведение всех будущих доходов и расходов к началу реализации проекта. Для этого используется процентная ставка (норма дисконта)  $E_d$ , которая определяется

исходя из приемлемой и реально достижимой для инвестиций нормы дохода на капитал. Значение  $E_d$  выступает в качестве базового уровня, при сравнении с которым оценивается эффективность ЭСМ [5]. При расчётах значение  $E_d$  может использоваться безразмерной относительной величиной или в процентах, например 0,1 и 10% соответственно.

При формировании множества альтернативных вариантов  $V$  следует рассматривать варианты трёх классов:

- 1) варианты с новыми источниками ресурсов (мощности), которые более эффективны, чем ранее используемые;
- 2) варианты с новыми установками (оборудованием) и технологией, имеющими более высокий КПД;
- 3) варианты с более качественным управлением расходом ресурсов (новыми управляющими устройствами, новыми методами).

Наличие таких вариантов является необходимым, но не достаточным условием обеспечения устойчивого развития. Следует учитывать ещё время на реализацию варианта. Чем меньше требуется времени, тем быстрее достигается эффект ресурсосбережения [37].

Для оценки эффективности ресурсосберегающего управления используются понятия полной мощности  $N$  и полезной мощности  $P$  [38]. Полная мощность характеризует потенциальную возможность СЭУ. Она включает в себя все виды топлива для машин, производственных процессов и других потребностей, в том числе газ, электроэнергию, уголь, нефть, солнечную энергию и т.д. Полная мощность  $N(t)$  за определённое время  $t$  рассчитывается как сумма всех составляющих  $N_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  потребляемых энергоресурсов, т.е.

$$N(t) = \sum_{i=1}^n N_i(t).$$

Полезная мощность  $P(t)$  является частью полной мощности, она представляет собой реальную возможность СЭУ оказывать влияние на окружающую среду и оценивается по формуле

$$P(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} N_{ij}(t) \gamma_{ij}(t),$$

где  $n$  – число видов энергоресурсов;  $k_i$  – число видов технологий использования  $i$ -го вида энергоресурсов;  $N_{ij}$  – потребляемые энергоресурсы  $i$ -го вида при  $j$ -й используемой технологии;  $\gamma_{ij}$  – эффективность использования мощности  $N_{ij}$ .

Показатель эффективности  $\gamma_{ij}(t)$  равен

$$\gamma_{ij}(t) = \eta_{ij}(t) \cdot \varepsilon_{ij}(t) \cdot \xi_{ij}(t),$$

где  $\eta_{ij}(t), \xi_{ij}(t)$  – коэффициенты совершенства технологий и ресурсоотдачи соответственно;  $\varepsilon_{ij}(t)$  – показатель качества организации труда (управления), т.е.

$$\varepsilon_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{есть потребитель;} \\ 0, & \text{нет потребителя.} \end{cases}$$

В этом случае мощность потерь  $G(t)$  (потерянные возможности СЭО) равна

$$G(t) = N(t) - P(t).$$

Связь между потенциальными и реальными возможностями определяется соотношениями:

$$\eta P(t) = P(t + \tau_0), \quad \eta \in [0; 1];$$

$$N(t + \tau_n) = \xi_n P(t), \quad \xi_n > 1,$$

где  $\eta$  – показатель эффективности использования объектом полной мощности (коэффициент совершенства технологий);  $\tau_0$  – время использования объектом полной мощности;  $\tau_n$  – время, через которое, затрачивая мощность  $P$ , общество получает в своё распоряжение (от природы) поток ресурсов  $N$ ;  $\xi_n$  – коэффициент ресурсоотдачи (отношение полной мощности  $N$  к затраченной на её получение  $P$ , или показатель потенциальной способности системы к расширенному воспроизводству).

Важным фактором устойчивого экономического развития является творчество по созданию более эффективных машин и механизмов, систем управления или новых источников мощности, а также исключение выпуска продукции, не пользующейся потребительским спросом [39]. Творчество необходимо для обеспечения роста производительности, сокращения времени, необходимого для изготовления изделий.

Сокращение времени  $t$  на изготовление некоторого изделия, когда выполняется тот же объём работ  $A$  (измеряемый затраченной энергией), возможно только при увеличении мощности  $N$ :

$$t = \frac{A}{N}.$$



Таким образом, каждую машину следует рассматривать с точки зрения предельной производственной мощности (производственной возможности выпуска конкретной продукции в единицу времени) и с точки зрения развиваемой мощности привода машины.

Исходя из этого, существует некоторый теоретически необходимый минимум затрат энергии на изготовление любого изделия (продукта).

Отношение теоретического минимума затрат энергии на единицу  $j$ -й продукции  $g_j(t)$  к фактическому расходу  $b_j(t)$  называют коэффициентом совершенства технологии, обозначим его  $\eta_j(t)$ . Если известно значение  $g_j(t)$ , то нетрудно оценить, насколько энергетически эффективна технология выпуска  $j$ -й продукции:

$$N_j(t) = K_j(t) b_j(t), \text{ кВт},$$

где  $K_j(t)$  – число выпускаемых за 1 ч единиц  $j$ -й продукции.

Полезная мощность, соответствующая часовому объёму производства общественного продукта в СЭО (валовому продукту за 1 ч), составит

$$P(t) = \sum_{j=1}^n K_j(t) g_j(t) = \sum_{j=1}^n N_j(t) \eta_j(t),$$

где  $n$  – число видов продукции.

Из последнего выражения видно, что при одном и том же значении  $P(t)$  выпуск продукции в единицу времени можно увеличить за счёт совершенствования технологии (роста  $\eta_j(t)$ ).

## 4.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время для решения задач энергосбережения широко используются компьютерные технологии. Так, информационно-расчётная система «ИРС–ТПС» предназначена для автоматизированного выполнения расчётов при выборе, разработке и внедрении ЭСМ на промышленных предприятиях и ЖКХ, обосновании экономической эффективности принимаемых решений [40]. «ИРС–ТПС» включает справочную систему «Энергосбережение: технические решения, оборудование и материалы», «Информационное приложение» и программное обеспечение «Автоматизированный расчёт энергосберегающих проектов» (ПО «АРЭП»). ПО «АРЭП» позволяет:

– выполнять предварительный анализ и формировать приоритетный ряд ЭСМ;

– формировать бизнес-планы и выполнять автоматизированный расчёт энергосберегающих проектов (ЭСП) по исходным данным пользователя;

– проводить анализ рассчитанных ЭСП и выполнять сравнения по критериям финансовых затрат и срокам окупаемости, оценивать эффективность реализации ЭСП.

Автоматизация технологической подготовки производства является важным звеном в решении задач интеграции проектирования и производства, обеспечении тесного взаимодействия инженеров-проектировщиков и инженеров-технологов, при освоении новых образцов РЭС, повышении их технического уровня и качества.

Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) представляет собой информационную систему, включающую математическое и программное обеспечение, средства вычислительной и организационной техники, а также другие виды обеспечений, присущие всем ИС. АСТПП имеет иерархическую структуру, позволяющую последовательно переходить от решения общих задач ТПП к частным. Следует учитывать, что подсистемы АСТПП используются на предприятии различными подразделениями, поэтому автоматизированная система обычно имеет сетевую архитектуру, в её состав входят устройства, обеспечивающие связь с обрабатываемыми центрами и другими технологическими устройствами.

Основными целями АС являются разработка документации для организации и ведения технологических процессов, системы контроля качества, создание необходимых приспособлений и специальной оснастки. Для этого в автоматизированном режиме решаются следующие задачи: выбор технологии, синтез технологического маршрута и его оптимизация, выбор оборудования, анализ статических и динамических режимов ТП, анализ чувствительности и точности, математическое моделирование процессов, планирование и обработка экспериментов. Математическое обеспечение АСТПП в основном базируется на методах математического программирования и принятия решений. Дополнительно к этим методам при ТПП находят применение методы теории расписаний и решения задач энергетической эффективности, в частности синтеза энергосберегающего управления. При решении задач оптимизации в качестве критериев оптимальности обычно используют приведённые затраты, технологическую себестоимость, производительность, точностные показатели и др.

В результате важно определить рабочий технологический режим, который в наименьшей степени нуждается в адаптации при изменении условий окружающей среды, неоднородности сырья и других возмущающих воздействий, неизбежных при производстве. Во многих случаях выполнение задач ТПП связано с реинжинирингом бизнес-процессов.

В настоящее время задачи ТПП решаются в рамках целевых комплексных (интегрированных) систем, ориентированных на конкретный вид РЭС, т.е. САПР/АСТПП/ГАП. Комплексные системы обеспечивают оптимальное проектирование конструкций и технологических процессов, получение необходимой электронной технической документации на изделие программ для станков с ЧПУ и роботов, решение задач организации производства и управления им.

Многие важные и трудоёмкие задачи ТПП в автоматизированном режиме решаются с применением SCADA-систем и CASE-технологий. В основном эти задачи связаны с проектированием автоматизированных систем управления технологическими процессами и автоматизацией разработки программного обеспечения для контроллеров и других систем.

#### 4.2.1. SCADA-системы

При разработке АСУТП широко используются возможности SCADA-систем (Supervisor Control and Data Acquisition), при этом часто возникает вопрос выбора наиболее приемлемой SCADA-системы. Некоторые из популярных на западном и российском рынках SCADA-систем, имеющих поддержку в России, приведены в табл. 4.1.

Общий анализ подобных пакетов позволяет сформулировать некоторые основные возможности и характерные особенности SCADA-систем. В силу тех требований, которые предъявляются к системам SCADA, спектр их функциональных возможностей определён и реализован практически во всех пакетах. Перечислим основные возможности и средства,

#### 4.1. SCADA-системы

SCADA	Фирма-изготовитель	Страна
Factory Link	United States DATA Co.	США
InTouch	Wonderware	США
Genesis	Iconics	США
WinCC	Siemens	Германия
RealFlex	BJ Software System	США
Sitex	Jade Software	Англия
FIX	Intellution	США
Trace Mode	AdAstra	Россия
Simplicity	GE Fanuc Automation	Россия
RSView	Rockwell Software Inc.	США

присущие всем системам и различающиеся только техническими особенностями реализации:

- автоматизированная разработка, дающая возможность создания ПО системы автоматизации без реального программирования;
- средства сбора первичной информации от устройств нижнего уровня;
- средства управления и регистрации сигналов об аварийных ситуациях;
- средства хранения информации с возможностью её постобработки (как правило, реализуется через интерфейсы к наиболее популярным базам данных);
- средства обработки первичной информации;
- средства визуализации информации в виде графиков, гистограмм и т.п.;
- возможность работы прикладной системы с наборами параметров, рассматриваемых как «единое целое» («gesire» или «установки»).

В качестве примера приведём краткое описание отечественной SCADA-системы ТРЕЙС МОУД. Это система представляет собой программный комплекс фирмы Adfstra, предназначенный для разработки, настройки и запуска в реальном времени автоматизированных систем управления технологическими процессами [41]. Все программы, входящие в ТРЕЙС МОУД, делятся на две группы: инструментальная система разработки АСУ и исполнительные модули (runtime).

Инструментальная система включает в себя два редактора: редактор базы каналов и редактор представления данных. В этих редакторах осуществляется разработка математической основы АСУТП, графических экранных фрагментов для визуализации состояния технологического процесса и управления им. В зависимости от лицензии инструментальная система позволяет создавать проекты на разное количество каналов. Существуют следующие градации инструментальных систем по количеству точек ввода/вывода в одном узле проекта: 128, 1024, 32 000×16, 64 000×16.

В редакторе базы каналов создаётся математическая основа системы управления: описываются конфигурации всех рабочих станций, контроллеров и устройств сопряжения с объектом (УСО), используемых в системе управления, настраиваются информационные потоки между ними. Здесь же описываются входные и выходные сигналы и их связь с устройствами сбора данных и управления. В этом редакторе задаются периоды опроса или формирования сигналов, настраиваются законы первичной обработки и управления, технологические границы, структура математической обработки данных; здесь устанавливается, какие данные и при каких условиях сохранять в различных архивах ТРЕЙС МОУД, и настраивается сетевой обмен, а также решаются некоторые другие задачи. Результатом работы в этом редакторе является математическая и информационная структуры

проекта АСУТП. Эти структуры включают в себя набор баз каналов и файлов конфигурации для всех контроллеров и операторских станций (узлов) проекта, а также файл конфигурации всего проекта.

Файл конфигурации проекта имеет расширение `smt` и сохраняется в рабочей директории системы разработки. Для хранения всех остальных файлов проекта в рабочей директории создаётся каталог, имя которого совпадает с именем файла конфигурации. При этом базы каналов сохраняются в файлы с расширениями `dbb`.

В редакторе представления данных разрабатывается графическая часть проекта системы управления. При этом создаётся статичный рисунок технологического объекта, а затем поверх него размещаются динамические формы отображения и управления. Среди них такие, как поля вывода численных значений, графики, гистограммы, кнопки, области ввода значений и перехода к другим графическим фрагментам и т.д. Кроме стандартных форм отображения (ФО) ТРЕЙС МОУД позволяет вставлять в проекты графические формы представления данных или управления, разработанные пользователями. Для этого можно использовать стандартный механизм Active-X. Все формы отображения информации, управления и анимационные эффекты связываются с информационной структурой, разработанной в редакторе базы каналов. Графические базы узлов проекта, созданные в редакторе представления данных, сохраняются в файлах с расширением `dbg`. Их сохранение осуществляется в соответствующие директории проектов.

Исполнительные модули – это программы, под управлением которых запускается АСУ, созданная в инструментальной системе. В группу исполнительных модулей входят следующие программы:

- мониторы реального времени (MPB) – NetLink MPB, NetLink Light;
- монитор создания АРМ администратора – SUPERVISOR;
- монитор глобального архива – Глобальный регистратор;
- микромонитор реального времени – МикроMPB и МикроMPB с поддержкой обмена по коммутируемым линиям – МикроMPB Модем плюс.

Первые пять мониторов предназначены для организации работы верхнего и административного уровней АСУ. МикроMPB и МикроMPB Модем плюс предназначены для работы в контроллерах нижнего уровня систем управления – естественно, при условии наличия в них операционной системы MS DOS.

Монитор реального времени предназначен для запуска на АРМ операторов, осуществляющих с его помощью супервизорный контроль и управление технологическими процессами. Под управлением MPB выполняются следующие задачи:

- запрос данных о состоянии технологического процесса с контроллеров нижнего уровня по любому из встроенных протоколов или через драйвер;

- передача на нижний уровень команд управления по любому из встроенных протоколов или через драйвер;
- обмен данными с платами УСО;
- сохранение данных в архивах;
- обмен по сети с удалёнными МРВ;
- обмен по коммутируемым линиям с удалёнными МРВ;
- передача данных по сети на следующий уровень АСУ;
- представление оператору графической информации о состоянии технологического процесса;
- автоматическое и супервизорное управление технологическим процессом;
- обмен данными с другими приложениями WINDOWS через DDE/NetDDE/OPC;
- обмен с базами данных через ODBC и другие функции.

Монитор реального времени NetLink МРВ может применяться только в составе систем управления, где обмен данными между узлами системы осуществляется по локальной сети. Под управлением NetLink МРВ выполняются такие задачи системы управления:

- запрос данных о состоянии технологического процесса у удалённых мониторов ТРЕЙС МОУД по сети;
- передача команд управления по сети на нижний уровень;
- сохранение данных в архивах;
- передача данных по сети на следующий уровень АСУ;
- представление оператору графической информации о состоянии технологического процесса;
- автоматическое и супервизорное управление технологическим процессом;
- обмен с базами данных через ODBC.

Монитор реального времени NetLink Light позволяет создавать дополнительные рабочие места операторов. Он не поддерживает функции обработки данных и автоматического управления. Данный монитор является дополнительной графической консолью, которая может быть подключена с удалённого компьютера к запущенному МРВ. Таким образом, имея в сети один монитор реального времени, можно, используя NetLink Light, создать в сети требуемое количество рабочих мест, совершенно равноправных с МРВ по функциям отображения и супервизорного управления.

Монитор SUPERVISOR предназначен для создания АРМ администратора, он может получать данные только из архивов. Это могут быть либо локальные архивы МРВ или NetLink МРВ, либо глобальные архивы, которые создаёт Глобальный регистратор. С помощью SUPERVISOR невозможно осуществлять оперативное управление процессом. Он реализует следующие функции:

- чтение по сети и отображение в реальном времени значений параметров технологического процесса, заносимых в архивы мониторами реального времени;
- просмотр данных из архивов в режиме playback с заданной скоростью.

По функциям организации представления данных SUPERVISOR похож на NetLink Light. Для него требуется только создание графической базы (dbg-файлы). Существенное отличие SUPERVISOR заключается в том, что он получает от МРВ или Глобального регистратора архивные значения каналов, а NetLink Light – текущие данные.

Глобальный регистратор (ГР) предназначен для ведения глобального архива по всему проекту. Он архивирует данные, посылаемые ему по сети мониторами реального времени. После сохранения данных в архив Глобальный регистратор может передавать их для просмотра мониторам SUPERVISOR. Архив Глобального регистратора реализует технологию хранилища данных. Он фиксирует значения технологических параметров при их изменении. В рамках одного проекта может поддерживаться только один такой архив. Для организации дублирования глобального архива следует запустить в сети ещё один монитор Глобальный регистратор. При этом оба ГР будут принимать данные, посылаемые для архивирования, и сохранять в свои архивы. Дублированный Глобальный регистратор поддерживает функции синхронизации архивов при работе в реальном времени и при запуске.

Данный монитор позволяет решать следующие задачи:

- приём по сети данных, посылаемых для архивирования от мониторов реального времени;
- сохранение полученных данных в общий архив проекта;
- поддержка восстановления архивных данных с резервного Глобального регистратора;
- чтение из архива и отображение в реальном времени значений параметров технологического процесса;
- анализ и обработка данных, сохранённых в архив;
- обмен данными с другими приложениями WINDOWS через DDE/NetDDE;
- обмен с базами данных через ODBC.

МикроМРВ предназначен для управления задачами сбора данных и управления в контроллерах нижнего уровня АСУТП. Он может быть использован в любых IBM-совместимых контроллерах. По возможностям математической обработки, управления, обмена данными с другими мониторами ТРЕЙС МОУД МикроМРВ идентичен монитору реального времени. Однако для него не реализованы функции графического вывода информации. Задачи для МикроМРВ разрабатываются в редакторе базы каналов. Поэтому при использовании IBM-совместимых контроллеров в

рамках ТРЕЙС МОУД реализуется единая линия программирования задач верхнего и нижнего уровней систем управления. В контроллерах до сих пор ещё используются типы процессоров, которые давно считаются устаревшими для применения в персональных компьютерах. Поэтому существуют следующие три модификации исполнительных модулей МикроМРВ: для процессоров типа I8088; для процессоров типа I80286 и старше без сопроцессора; для процессоров типа I80286 и старше с сопроцессором.

Функции монитора МикроМРВ Модем плюс совпадают с МикроМРВ. Единственным его отличием является встроенная поддержка обмена данными с помощью модема по коммутируемым каналам, что позволяет использовать МикроМРВ для создания удалённых пунктов сбора информации, обменивающихся данными через телефонную сеть.

В системе ТРЕЙС МОУД предусмотрены драйверы. Драйвер требуется, если протокол обмена данными с используемым устройством не встроен в систему. Основной функцией драйвера является обеспечение связи ТРЕЙС МОУД с внешними устройствами. Это могут быть устройства сбора, хранения, обработки, передачи данных (контроллеры, УСО, другой компьютер и т.д.) или какие-либо другие устройства. Драйвер осуществляет согласование форматов данных ТРЕЙС МОУД и аппаратуры, для связи с которой он разработан.

#### 4.2.2. CASE-технологии

CASE-технология в широком смысле представляет собой совокупность методологий анализа, автоматического проектирования, разработки и сопровождения сложных систем программного обеспечения [42]. Аббревиатура CASE используется для двух направлений проектирования систем. Первое – Computer Aided System Engineering – направлено на решение задач концептуального проектирования сложных слабоструктурированных систем. CASE-технологии этого направления называют *системами CASE для концептуального проектирования*. Второе направление – Computer Aided Software Engineering – решает задачи автоматизированного проектирования программного обеспечения. Эти CASE-системы называют *инструментальными CASE* или инструментальными средами разработки ПО.

Среди систем CASE первого направления выделяют системы функционального и информационного (поведенческого) проектирования. Наиболее распространённой методикой *функционального проектирования* сложных систем является методика SADT (Structured Analysis and Design Technique). Эта методика стала основой стандарта IDEF0 (Integrated Definition 0). Программные средства информационного проектирования реализуют методики инфологического проектирования баз данных. Широкое распространение получила методика создания информационных моделей IDEF1X. Применение инструментальных CASE-систем позволяет сократить затраты на разработку ПО за счёт уменьшения числа итераций и чис-



ла ошибок, а также улучшить качество ПО вследствие лучшего взаимопонимания разработчика и заказчика. При этом облегчается сопровождение готового программного продукта [43].

Под CASE-средствами обычно понимаются программные продукты, используемые как для автоматизированной разработки определённых видов моделей, например функциональных, информационных, так и для автоматизированного создания программного обеспечения информационных и других систем. В последнем случае CASE-средства поддерживают все этапы проектирования прикладного программного обеспечения и баз данных – от формулировки требований до генерации кода, тестирования документирования и сопровождения в процессе эксплуатации [44].

С позиции решения задач моделирования CASE-технологии широко применяются для моделирования систем большинства предметных областей. Исключительно большое значение CASE-технологии имеют для разработки моделей деятельности предприятий, в частности функциональных и информационных, которые необходимы для решения задач системного анализа, проектирования, реинжиниринга и др.

Большинство CASE-средств основано на парадигме методология–метод–нотация–средство.

Методология определяет руководящие указания для оценки и выбора проекта разрабатываемого ПО, шаги работы и их последовательность, а также правила распределения и назначения методов.

Метод – это систематическая процедура или техника генерации описаний компонент ПО, например проектирование потоков и структур данных [42].

Нотации предназначены для описания структуры системы, элементов данных, этапов обработки; они включают графы, диаграммы, таблицы, блок-схемы, формальные и естественные языки.

Средства – инструментарий для поддержки и усиления методов, они поддерживают работу пользователей при создании и редактировании графического проекта в интерактивном режиме, способствуют организации проекта в виде иерархии уровней абстракции, выполняют проверки соответствия компонентов.

Основными достоинствами CASE-технологий для моделирования процессов и систем являются следующие:

- значительно сокращается время на разработку моделей;
- исследователь (разработчик, проектировщик) освобождается от рутинной работы, связанной с оформлением, представлением и хранением результатов моделирования, за счёт автоматизации соответствующих процессов, это позволяет ему основное внимание уделять творческой части разработки;
- разрабатываемые модели соответствуют действующим нормативным документам, их описание пригодно для широкого использования без дополнительных пояснений;

- улучшается качество создаваемых моделей за счёт средств автоматического контроля;
- автоматизирован процесс развития и сопровождения результатов моделирования.

Для современных CASE-средств характерны следующие особенности [40].

1. Единство графического языка. Описание проекта. Все участники проекта, использующие CASE-технологии, обеспечиваются единым наглядным и понятным графическим языком, в соответствии с которым документация представляется двухмерными схемами. Это позволяет заказчику и разработчикам, в том числе экспертам предметной области, системным аналитикам, программистам, быстро вносить необходимые изменения и облегчает сопровождение систем при эксплуатации.

2. Единство базы данных проекта, составляющей основу CASE-технологии. База данных (репозиторий) включает информационные объекты различных типов, отношения между их компонентами, правила использования и обработки этих компонентов. В репозитории хранятся объекты самых различных типов, в том числе структурные диаграммы, определения экранов и меню, проекты отчётов, описания и модели данных, их организация и обработка, исходные коды и т.п.

3. Интеграция всех используемых средств и разделение системной информации между разработчиками. CASE-средства предусматривают несколько уровней интеграции, охватывающих общий пользовательский интерфейс по всем средствам, передачу данных между средствами, интеграцию этапов разработки через единую систему представления стадий ЖЦ, передачу данных и средств между различными платформами компьютерных систем.

4. Поддержка коллективной работы над проектом и управления проектом. CASE-средства обеспечивают возможность работы в режиме удалённого доступа, экспорт–импорт фрагментов проекта по сети для их развития или модификации, планирование, контроль и взаимодействие всех участников проекта как в процессе разработки, так и при сопровождении проектов. Использование репозитория позволяет осуществлять контроль и обеспечение безопасности проводимых работ за счёт системы ограничений и привилегии доступа.

5. Автоматическая генерация документации по проекту. Документация генерируется в соответствии с требованиями действующих стандартов и всегда отвечает текущему состоянию дел, так как любые изменения в проекте автоматически без запаздывания отражаются в репозитории.

6. Возможность макетирования разрабатываемой системы. Это позволяет заказчику на ранних стадиях ЖЦ проекта оценить эффективность системы при реальной эксплуатации.

7. Автоматическая генерация программного кода, что позволяет построить до 85...90% текстов на языках высокого уровня, в автоматическом режиме.

8. Автоматическая верификация и контроль проекта на полноту и состоятельность на ранних этапах разработки, благодаря чему снижается риск неудачного завершения работ.

9. Сопровождение проекта и реинжиниринг модели системы. Это позволяет интегрировать получаемые модели в проект, автоматически обновлять документацию при изменении кодов и изменять спецификации при редактировании кодов [40].

Необходимым инструментом совершенствования производственных систем и технологических процессов является функциональное моделирование бизнес-процессов.

Под бизнес-процессом понимается совокупность взаимосвязанных ресурсов и деятельности, которые преобразуют вход процесса (материалы, информация) в соответствующий выход. Основная цель процесса – добавление ценности продукта при минимальных затратах [44, 45].

Следует заметить, что общепринятого определения термина «бизнес-процесс» пока нет. Предполагается, что бизнес-процессы одного подразделения объединены общей задачей, заключающейся в оказании услуг, например в виде изготовления и поставки продукта. При этом оказание услуг осуществляется согласно единой процедуре [46].

Функциональная модель бизнес-процессов представляет собой многоуровневую систему взаимосвязанных диаграмм, содержащую полное описание процессов жизненного цикла продукта, с выделением узлов действий (блоков), входов, выходов, управлений (условий) и требуемых механизмов (ресурсов).

Каждый узел характеризует действие (процесс, работу, функцию, операцию) по переработке информационных или материальных ресурсов и обозначается прямоугольником (рис. 4.1). Вход представляет собой то, что перерабатывается процессом (стрелка слева прямоугольника), а

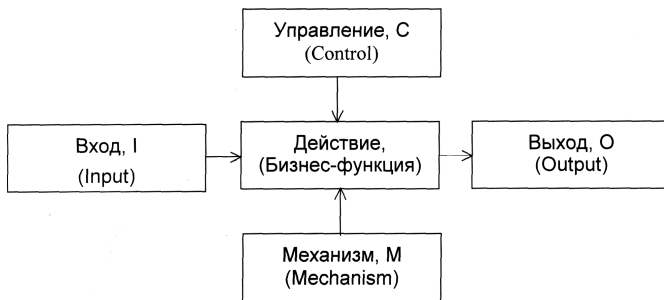


Рис. 4.1. Схема узла функциональной модели

выход – результат переработки (стрелка справа). Управлением служит информация, необходимая для выполнения процесса (стрелка сверху). Механизмы обеспечивают выполнение (реализацию) процесса, т.е. оборудование, персонал и т.д. (стрелка снизу).

Построение и вид функциональной модели бизнес-процессов регламентируются на международном уровне федеральными рекомендациями США FIPS PUB 183 и стандартом IDEF0 – Integrated Definition for Process Modeling, первоначально разработанным ВВС США. В них описывается метод (язык), правила и методика структурированного графического описания бизнес-процессов.

При построении функциональной модели используется метод декомпозиции, т.е. сначала описывается общее действие получения продукта (нулевой уровень), затем общее действие раскладывается на несколько основных крупных действий (первый уровень), далее каждое крупное действие описывается с помощью более мелких операций (второй уровень) и т.д. Соответственно раскладываются управления и механизмы при переходе от крупных структур к более мелким.

Важной особенностью функционального моделирования бизнес-процессов является то, что описание строится вокруг действий, а не вокруг организационной структуры. Функциональная модель показывает непосредственных участников бизнес-процессов, какие элементы организационной структуры фирмы задействованы в получении продукции, наглядно представляет работы, выполняемые различными подразделениями и оборудованием.

Построение функциональной модели рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- идентификация основных видов деятельности, представление их в форме иерархической структуры;
- описание входных элементов (I1, I2, ...) каждого процесса;
- описание преобразования входов под воздействием процесса в выходные элементы (O1, O2, ...);
- описание элементов управления (C1, C2, ...), в качестве которых могут быть инструкции, руководства, расписания, графики, стандарты и т.п.;
- указывание механизмов или ресурсов (M1, M2, ...), используемых для реализации бизнес-процессов.

Представление информационных структур и данных, используемых в функциональной модели, описывается и графически изображается с помощью информационной модели.

Информационная модель отражает структуру баз данных и информационные потоки с позиций семантики, т.е. описания данных в контексте их взаимосвязи с другими данными. Конструктивными элементами этой модели являются сущности, изображаемые блоками; отношения ме-

жду сущностями, которые обозначаются линиями, соединяющими блоки, и атрибуты (имена внутри блоков).

Построение информационной модели регламентируется стандартом IDEF1X (FIPS 184) – Integrated Definition for Information Modeling.

### 4.2.3. CALS-технологии

В настоящее время CALS-технологии рассматриваются как бизнес в высоком темпе и ключ к обеспечению успеха предприятий на внутреннем и внешнем рынках, использование CALS-систем и логистики означает переход к новому образу и стилю ведения бизнеса в условиях рыночных отношений [44].

CALS-технологии стали интенсивно развиваться в последнем десятилетии, в основе этого лежали следующие направления научно-технического прогресса:

- 1) TQM (Total Quality Management) – всеобщее управление качеством;
- 2) системный подход и системный анализ;
- 3) «островковая», или «лоскутная», автоматизация бизнес-процессов;
- 4) информационные (компьютерные) технологии, удовлетворяющие мировым стандартам и требованиям открытых систем;
- 5) системы углублённых знаний в конкретных областях.

Сама аббревиатура CALS используется около 20 лет, но смысловое содержание термина претерпело значительную эволюцию, в частности:

1985 г. Computer Aided of Logestes Support – компьютерная поддержка логических систем;

1988 г. Computer Aided Acquisition and Lifecycle – компьютерные поставки и поддержка жизненного цикла;

1993 г. Continual Aided Acquisition and Lifecycle – поддержка непрерывных поставок и жизненного цикла;

1995 г. Commerce at Light Speed – бизнес в высоком темпе;

1997 г. Continuous Acquisition and Lifecycle Support – непрерывная поддержка жизненного цикла продукта.

Процесс построения чётких определений в области CALS-технологий пока не завершён, терминологический словарь только готовится к выпуску, поэтому приводимые в настоящем пособии формулировки нельзя считать стандартными.

*Определение 1.* CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support – непрерывная поддержка жизненного цикла продукта) следует рассматривать как стратегию систематического повышения эффективности, производительности и рентабельности процессов хозяйственной деятельности

предприятия за счёт внедрения современных методов информационного взаимодействия участников ЖЦ продукта.

В «Проекте руководства по применению CALS в НАТО», выпущенном 1 марта 2000 г., термин CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) определяется как «...совместная стратегия промышленности и правительства (государства), направленная на "реинжиниринг" (изменение, преобразование) существующих бизнес-процессов в единый высокоавтоматизированный и интегрированный процесс управления жизненным циклом систем военного назначения». В данном контексте жизненный цикл включает в себя разработку, производство, применение и утилизацию военной системы.

В дословном переводе аббревиатура CALS означает «непрерывность поставок продукции и поддержки её жизненного цикла». «Непрерывность поставок» требует и подразумевает оптимизацию процессов взаимодействия «заказчика и поставщика» в ходе разработки, проектирования и производства сложной продукции, срок жизни которой с учётом различных модернизаций составляет десятки лет. Для обеспечения эффективности, а также сокращения затрат средств и времени процесс взаимодействия заказчика и поставщика должен быть действительно непрерывным.

Вторая часть определения CALS – «поддержка жизненного цикла» – заключается в оптимизации процессов обслуживания, ремонта, снабжения запасными частями и модернизации. Поскольку затраты на поддержку сложного наукоёмкого изделия в работоспособном состоянии часто равны или превышают затраты на его приобретение, принципиальное сокращение «стоимости владения» обеспечивается инвестициями в создание системы поддержки жизненного цикла.

Целью применения CALS-технологий как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания, производства и пользования продуктом является повышение эффективности их деятельности за счёт ускорения процессов исследования и разработки продукции, придания изделию новых свойств, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации продукции, повышения уровня сервиса в процессах её эксплуатации и технического обслуживания.

Стратегия CALS включает в себя:

- применение современных информационных технологий;
- реинжиниринг бизнес-процессов;
- применение методов «параллельной» разработки;
- стандартизацию в области совместного использования данных и электронного обмена данными.

*Определение 2.* CALS-система представляет собой программно-технический комплекс в виде интегрированных информационных технологий поддержки всех этапов ЖЦ продукции, соответствующих требованиям CALS-стандартов.

Наиболее важными аспектами при рассмотрении научно-методической, программно-технической и нормативно-правовой сторон CALS-технологий являются: функциональное моделирование бизнес-процессов, технологии анализа и реинжиниринга, виртуальные предприятия и многопрофильные коллективы, информационная инфраструктура, нормативная документация.

В большинстве предприятий существуют «островки» автоматизации в виде разобщенных автоматизированных систем САПР, АРМ, АСУТП и др. Дальнейший количественный рост «островковой» автоматизации без интеграции информационных технологий малоперспективен. Вместе с тем замена всех используемых систем потребует огромных материальных затрат и обычно нецелесообразна. Разумнее создавать информационную инфраструктуру, в рамках которой существующие автоматизированные системы объединяются и интегрируются, а там, где необходимо, дополняются новыми технологиями.

Построение такой информационной инфраструктуры начинается с инвентаризации и анализа всех существующих автоматизированных систем. При этом определяется, на каком этапе развития в данный момент находятся автоматизированные системы, какие системы надо сохранить, какие заменить и какие заново разработать.

В ходе анализа надо выяснить текущее состояние информационных технологий, используемых участниками предполагаемого виртуального предприятия, учесть планы партнёров, их подходы к стандартизации.

Обычно выявляется большой объём данных, сохраняемых на бумажных носителях, которые следует перенести в электронную среду. Надо рассмотреть целесообразность такого преобразования и определить, какая информация, в каком объёме, в какой форме и каким способом будет передаваться в рамках единого информационного пространства.

На основе анализа решаются задачи проектирования архитектуры CALS-системы. Проектирование архитектуры предполагает определение аппаратных средств, сетевой инфраструктуры, ПО, необходимого для поддержки усовершенствованных процессов и нового стиля работы.

При этом большое внимание следует уделить:

- 1) созданию корпоративных хранилищ данных с однократным вводом и многократным коллективным использованием данных;
- 2) стандартизации форматов данных и способов доступа к ним;
- 3) эффективности управления информацией.

Разрабатываемая архитектура должна учитывать быстрое развитие ИТ и технологий коммуникаций, которые меняются в высоком темпе. Примерно за четыре года меняются три поколения ПК и соответствующее ПО. Поэтому надо обеспечить максимальную гибкость архитектуры, например путём применения открытых систем и стандартных промышленных решений за счёт отказа от сильно индивидуализированных специальных решений. Надо постоянно отслеживать и пересматривать архитектуру, чтобы учесть новые разработки с максимальной эффективностью. При создании единого информационного пространства и использовании CALS-технологий большое значение приобретают вопросы защиты информации.

Большинство предприятий совместно используют информацию в электронном виде, обмениваются информацией с заказчиками, поставщиками, партнёрами, которые могут быть географически рассеяны. Обмен информацией происходит на всех этапах ЖЦ продукта, в том числе при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Тесные связи с внешними участниками увеличивают риски информационных потоков, а также гарантии целостности и надёжности используемой информации. Особенно это актуально для виртуальных предприятий.

Часть информации представляет коммерческую, а иногда и государственную тайну и попадает под действие нормативных актов Российской Федерации о защите информации. Для многих организаций информация является важным ресурсом, при запросах требуется получать достоверные данные.

Политика информационной безопасности должна учитывать возможность случайных или преднамеренных угроз, которые могут исходить как из внутренних, так и из внешних источников. Затраты для обеспечения информационной безопасности и меры защиты должны быть соразмерны уровню существующих рисков.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Одной из важнейших проблем человечества является экономия энергоресурсов. В связи с ростом цен на электроэнергию и топливо, усилением конкурентной борьбы между фирмами, производящими энергопотребляемые изделия, а также учитывая сложность социально-экономической обстановки, актуальность задач экономии и рационального использования энергоресурсов с каждым годом возрастает.

Для выпуска отечественной промышленностью конкурентоспособных товаров необходимы комплексные исследования существующих технологических процессов, по результатам которых принимаются меры по реинжинирингу производства. Особое внимание при анализе промышленных ситуаций следует уделять в случае производства продукции, эффективно функционирующей в критических и опасных ситуациях.

Одним из основных показателей конкурентоспособности машиностроительных и других предприятий является энергетическая эффективность их продукции. Важным резервом в решении проблемы энерго- и ресурсосбережения является оптимальное по минимуму затрат энергии или топлива управление динамическими объектами, проектирование машин и аппаратов, которые при своём функционировании требуют меньших энергозатрат по сравнению с существующими аналогами.

В учебном пособии приведены основные положения энергетической эффективности, а также направления по её повышению. Рассмотрены задачи анализа, связанные с определением свойств проектируемого объекта, а также задачи синтеза, заключающиеся в разработке проектных решений по заданным требованиям, свойствам и ограничениям к функционированию системы. Рассмотрены задачи технологической подготовки производства РЭС, энергосберегающего планирования загрузки, приведены примеры.

Представлены основные принципы оценки энергосберегающих мероприятий: оценки показателей проектных решений, вариантности, использования показателей энергоэффективности альтернативных вариантов в стоимостной форме, учёта всех ресурсных ограничений, оценки интегральных результатов и затрат, соизмеримости результатов.

Приведены примеры информационных технологий, используемых для решения задач энергоэффективности производства РЭС.

## ГЛОССАРИЙ

---

*Внутренняя норма доходности* – норма дисконта, при которой величина эффектов равна приведённым капиталовложениям.

*Дисконт* (скидка) – разница между ценами на один и тот же товар с различными сроками поставки.

*Дисконтирование* – приведение друг к другу потоков (выгод и затрат) год за годом на основе ставки дисконта с целью получения текущей (сегодняшней) стоимости будущих доходов (выгод и затрат).

*Доход* – приток денежных средств на получение материальных ценностей, обладающих денежной стоимостью.

*Индекс доходности* (прибыльность) – отношение суммы приведения эффектов к величине капиталовложения.

*Конструирование* – процесс отражения в чертежах структуры, размеров, формы, материалов, обработки и связей (внутренних и внешних) разрабатываемого РЭС.

*Коэффициент полезного использования энергии* – отношение всей полезно используемой в хозяйстве (на установленном участке, энергоустановке и т.п.) энергии к суммарному количеству израсходованной энергии в пересчёте её на первичную.

*Норма дисконта* (стадия дисконта) – показатель, используемый для приведения разновременных величин (затрат, эффектов и результатов) к начальному периоду расчёта (базовому году).

*Показатель энергетической эффективности* – абсолютная, удельная или относительная величина потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса.

*Ставка доходности  $E$*  – показатель эффективности инвестиций, определяемый как отношение текущей стоимости будущих доходов к текущей стоимости капиталовложений (зависит от цены денег на рынке капитала, риска вложений и инфляции).

*Структура проектируемой РЭС* – состав основных компонентов с описанием их важнейших характеристик и связей между ними.

*Чистый дисконтированный доход* – сумма годовых текущих эффектов капиталовложений в проект, приведённая к начальному шагу по каждому шагу расчётов. Чем больше чистый дисконтированный доход, тем эффективнее проект.

*Энергоёмкость производства продукции* – величина потребления энергии и(или) топлива на основные и вспомогательные технологические процессы изготовления продукции, выполнение работ, оказание услуг на базе заданной технологической системы.

*Энергоноситель* – вещество в различных агрегатных состояниях (твёрдое, жидкое, газообразное) либо иные формы материи (плазма, поле, излучение и т.д.), запасённая энергия которых может быть использована для целей энергоснабжения.

*Энергосбережение* – реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. ГОСТ Р 51380–99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Введ. 01.09.2000. – М. : Стандартинформ, 2000. – ОКС 01.110 – Группа E01.
2. ГОСТ Р 51387–99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. – Введ. 01.07.2000. – М. : ИПК «Издательство стандартов», 2000.
3. ГОСТ Р 51541–99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. – Введ. 01.07.2000. – М. : ИПК «Издательство стандартов», 2000.
4. Адамов, Д.Ю. Проблема энергетической эффективности в информационных сетях будущего // Электросвязь. – 2007. – № 6. – С. 29 – 31.
5. Самсонов, В.С. Экономика предприятий энергетического комплекса : учебник / В.С. Самсонов, М.А. Вяткин. – М. : Высшая школа, 2003. – 374 с.
6. Анчарова, Т.В. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства : практическое пособие. В 5-ти кн. Кн. 5. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях / Т.В. Анчарова, С.И. Гамазин, В.В. Шевченко. – М. : Высшая школа, 1990. – 143 с.
7. Виленский, П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика : учебное пособие / П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дело, 2002. – 888 с.
8. ГОСТ Р 51897–2002. Менеджмент риска. Термины и определения. – Введ. Постановлением Госстандарта России от 30 мая 2002 г. № 223-ст. – М., 2002.
9. ГОСТ Р 51898–2002. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты. – Введ. 01.01.2003. – М. : ИПК «Издательство стандартов», 2002.
10. Гуткин, Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств : учебное пособие для вузов / Л.С. Гуткин. – М. : Радио и связь, 1986. – 288 с.
11. Корячко, В.П. Теоретические основы САПР : учебник для вузов / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
12. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / под ред. В.Е. Дулевича. – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с.
13. Основы систем автоматизированного проектирования : учебное пособие / под ред. Ю.В. Кожевникова. – Казань : Изд-во Казанского университета, 1988. – 353 с.
14. Гелль, П.П. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергия, 1972. – 232 с.
15. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств : учебное пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др. ; под ред. О.В. Алексеева. – М. : Высшая школа, 2000. – 479 с.
16. Информационные технологии управления : учебное пособие для вузов / под ред. Г.А. Титоренко. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 280 с.

17. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И.П. Норенков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
18. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества : учебное пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
19. Вермишев, Ю.Х. Основы автоматизированного проектирования / Ю.Х. Вермишев. – М. : Радио и связь, 1988.
20. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М. : Наука, 1966. – 780 с.
21. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры : учебник для вузов / И.П. Бушминский, О.Ш. Даутов, А.П. Достанко и др. ; под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. – М. : Радио и связь, 1989. – 624 с.
22. Балыбин, В.М. Принятие проектных решений : учебное пособие / В.М. Балыбин, В.С. Лунев, Д.Ю. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Ч. 1. – 80 с.
23. Муромцев, Ю.Л. Принятие проектных решений : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – Ч. 2. – 80 с.
24. Курейчик, В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР : учебник для вузов / В.М. Курейчик. – М. : Радио и связь, 1990. – 352 с.
25. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути / пер. с англ. и науч. ред. А.М. Талалая. – М. : «Сейфи», 2002. – 384 с.
26. Хаммер, М. Рейнжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе / Майкл Хаммер, Джеймс Чампи ; пер. с англ. Ю.Е. Корнилович. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2006. – 304 с.
27. ГОСТ Р 51379–99. Энергосбережение. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. Типовые формы. – Введ. в действие 01.09.2000. – М. : Госстандарт России, 2004.
28. Чейз, Р.Б. Производственный и операционный менеджмент / Р.Б. Чейз, Н.Дж. Эквилайн, Р.Ф. Якобе ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2001. – 704 с.
29. Танаев, В.С. Теория расписаний. Групповые технологии / В.С. Танаев, М.Я. Ковалев, Я.М. Шафранский. – Минск : ИТК НАН Беларуси, 1998. – 410 с.
30. Муромцев, Ю.Л. Микропроцессорные системы энергосберегающего управления : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – 80 с.
31. Орлова, Л.П. Концепция моделирования и вычислительная среда для оперативного проектирования энергосберегающих систем управления / Л.П. Орлова, Д.Ю. Муромцев // Новые информационные технологии : материалы второго науч.-практ. семинара. – М. : МГИЭМ, 1999. – С. 111 – 113.
32. Муромцев, Ю.Л. Информационные технологии в проектировании энергосберегающих систем управления динамическими режимами : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 84 с.
33. Муромцев, Ю.Л. Моделирование и оптимизация систем при изменении состояний функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, О.В. Попова. – Воронеж : ВГУ, 1992. – 164 с.

34. Малин, А.С. Исследование систем управления : учебник для вузов / А.С. Малин, В.И. Мухин. – М. : ГУ ВШЭ, 2002. – 400 с.
35. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М. : Наука, 1969. – 384 с.
36. Муромцев, Ю.Л. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, Е.В. Сатина // Известия вузов. – 1993. – № 11, 12. – С. 19 – 25.
37. Муромцев, Д.Ю. Аспекты устойчивого развития региона / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.3 (32). – С. 364 – 369.
38. Колтынок, Б.А. Инвестиционные проекты : учебник / Б.А. Колтынок. – СПб. : Изд-во В.А. Михайлова, 2002. – 622 с.
39. Кузнецов, О.Л. Устойчивое развитие: научные основы проектирования в системе природа–общество–человек : учебник / О.Л. Кузнецов, Б.Е. Большаков. – СПб.–М.–Дубна. – 616 с.
40. Петров, В.Н. Информационные системы / В.Н. Петров. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.
41. Руководство пользователя ТРЕЙС МОУД. – М. : Adastra Research Group.LTD. – 771 с. ([www.adastra@adastra.msk.ru](http://www.adastra@adastra.msk.ru)).
42. Калянов, Г.Н. CASE-технологии. Консалтинг в автоматизации бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. – 3-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 320 с.
43. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И.П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
44. CALS (Поддержка жизненного цикла продукции): Руководство по применению / Сост. : А.Н. Давыдов, В.В. Баранов, Е.В. Судов, С.С. Шульга. – М. : Мин-во экономики РФ, НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», ГУП «ВИМИ», 2000. – 44 с.
45. Елиферов, В.Г. Бизнес-процессы: Регламентация и управление : учебник / В.Г. Елиферов, В.В. Репин. – М. : ИНФРА-М, 2004. – 319 с. – (Учебники для программы МВА).
46. Рубцов, С. Опыт использования стандарта IDEF0 / С. Рубцов // Открытие системы. – 2003, янв. – С. 51 – 55.

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ</b> .....	5
1.1. Основные понятия и определения .....	5
1.2. Показатели энергетической эффективности .....	7
1.3. Основные направления повышения энергетической эффективности РЭС .....	15
<b>2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ (КОНСТРУИРОВАНИЕ)</b> .....	17
2.1. Задачи проектирования .....	17
2.2. Структурный синтез .....	23
2.3. Параметрический синтез .....	27
2.4. Пример .....	31
<b>3. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РЭС</b> .....	37
3.1. Задачи технологической подготовки производства РЭС .....	37
3.2. Энергосберегающее планирование загрузки оборудования .....	39
3.3. Энергосберегающая автоматика .....	43
3.4. Пример .....	51
<b>4. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ В ПРОЕКТЕ РЭС</b> .....	54
4.1. Основные принципы оценки энергосберегающих мероприятий .....	54
4.2. Использование информационных технологий .....	57
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	73
<b>ГЛОССАРИЙ</b> .....	74
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	76

Учебное издание

**МУРОМЦЕВ Юрий Леонидович**,  
МУРОМЦЕВ Дмитрий Юрьевич,  
МИТРОФАНОВА Валентина Николаевна

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие

Редактор Е.С. Кузнецова  
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 15.11.2011.  
Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 506

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14