

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ



Кафедра энергообеспечения предприятий и электротехнологии

ПИРКИН А.Г.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

для обучающихся по направлению подготовки
35.04.06 Агроинженерия

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 620.9.001.5

Пиркин А.Г. Теоретические основы системного анализа энергообеспечения предприятий. Учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки 35.04.06 Агроинженерия. – 2-е издание, дополненное и переработанное. – СПб.: СПбГАУ. – 2021. – 92 с.

Рецензенты:

доктор технических наук, заведующий лабораторией энергоэффективных технологий в АПК ИЭАП **Ракутько С.А.**;

кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электрооборудования СПбГАУ **Васильев Л.И.**

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по направлению «Агроинженерия», направление магистерской программы 35.04.06 «Электротехнология и электрооборудование».

В учебном пособии изложена сущность системного подхода к анализу процессов энергообеспечения предприятий. Рассмотрены режимы функционирования систем энергообеспечения и их математические модели. Сформулированы задачи и предложены примеры оптимизации вышеназванных систем.

В основу учебного пособия положен авторский курс «Теоретические основы системного анализа энергообеспечения предприятий», преподаваемый на кафедре энергообеспечения предприятий и электротехнологии, построенный на общей концепции формирования компетентности энергоменеджеров в аграрном секторе экономики.

Рекомендовано к изданию и публикации на электронном носителе для последующего размещения в электронной сети ФГБОУ ВО СПбГАУ, согласно соответствующему договору с Учебно-методическим советом СПбГАУ протокол № 3 от 21 января 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СУЩНОСТЬ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ	6
1.1. <i>Предприятие как сложная организационная система</i>	6
1.2. <i>Сущность, цели и задачи системного анализа в энергетической сфере</i>	11
1.3. <i>Структура системы энергообеспечения и ее виды</i>	16
1.4. <i>Особенности и основные свойства энергетических систем</i>	19
<i>Контрольные вопросы</i>	23
2. СОСТОЯНИЕ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ	25
2.1. <i>Состояние системы</i>	25
2.2. <i>Функционирование и развитие систем энергообеспечения</i>	28
2.3. <i>Режимы функционирования систем энергообеспечения</i>	32
<i>Контрольные вопросы</i>	38
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ	39
3.1. <i>Общие сведения о моделях и моделировании</i>	39
3.2. <i>Моделирование динамического режима работы электронагревательной системы</i>	45
3.3. <i>Вероятностное моделирование энерготехнологических поточных линий</i>	49
3.4. <i>Моделирование сервисных центров в энергетической сфере</i>	57
<i>Контрольные вопросы</i>	65
4. ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	66
4.1. <i>Технико-экономические требования к энергетическим системам и уровни их оптимизации</i>	66
4.2. <i>Методы оптимизации энергетических систем</i>	69
4.3. <i>Решение оптимизационных задач энергообеспечения предприятий</i>	79
<i>Контрольные вопросы</i>	84
ГЛОССАРИЙ.....	85
ЛИТЕРАТУРА	91

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях магистры различных профилей и направлений деятельности, в том числе и работающие в сфере энергетики и энерготехнологий, должны обладать системным мышлением. Без него невозможно грамотно осуществлять оценку эффективности функционирования сложных энергетических и энерготехнологических систем, разрабатывать модели и формировать оптимальные алгоритмы управления этими системами.

В настоящем учебном пособии представлены основные понятия и определения теории сложных систем, дан общий подход к изучению процессов функционирования систем. Проведена классификация систем по различным признакам. Рассмотрены особенности и основные свойства энергетических систем. Даны определения функционированию и развитию систем энергообеспечения, рассмотрены режимы их функционирования. Рассмотрены задачи моделирования, как важнейшего метода анализа энергетических и энерготехнологических систем. Особое внимание уделено моделированию энерготехнологических поточных линий и систем массового обслуживания, поскольку они нашли достаточно широкое применение в энергетической отрасли. В пособии сформулированы технико-экономические требования к системам энергообеспечения предприятий, рассмотрены основные методы оптимизации этих систем, в том числе и вероятностные, с использованием конкретных примеров.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения материалов данного учебного пособия:

- готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения (ОК-2);
- готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этические, конфессиональные и культурные различия (ОПК-2);
- способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения (ОПК-3);
- способность и готовность организовывать на предприятиях АПК высокопроизводительное использование и надежную работу сложных технических систем для производства, хранения,

- транспортировки и первичной переработки продукции растениеводства и животноводства (ПК-1);
- способность и готовность применять знания о современных методах исследований (ПК-4).

Автор поставил перед собой задачу – изложить в данном пособии основы современных знаний по системному анализу в энергетике, позволяющие будущим магистрам приобрести навыки детального изучения и корректной оценки эффективности процессов функционирования сложных систем энергообеспечения. Эти навыки позволят обучающимся осуществлять реконструкцию существующих и проектирование новых, более совершенных систем.

1. СУЩНОСТЬ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1. Предприятие как сложная организационная система

Начнем с определения системы, как основного понятия системного анализа. Система представляет собой определенное множество взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, предназначенное для достижения определенных целей и решения поставленных задач.

Под *элементом* понимается неделимая составная часть сложного целого, в нашем случае системы. Неделимость элемента понятие относительное, оно зависит от глубины исследования самой системы.

Примером системы может быть электропривод вентиляционной установки, а элементом (неделимой его частью) – электродвигатель. В свою очередь электродвигатель сам представляет собой сложную электромеханическую систему, состоящую из множества элементов (статора, ротора, вала и т.д.).

Общий вид любой системы, в том числе и организационной, каковой является предприятие, графически можно представить следующим образом (рисунок 1.1).

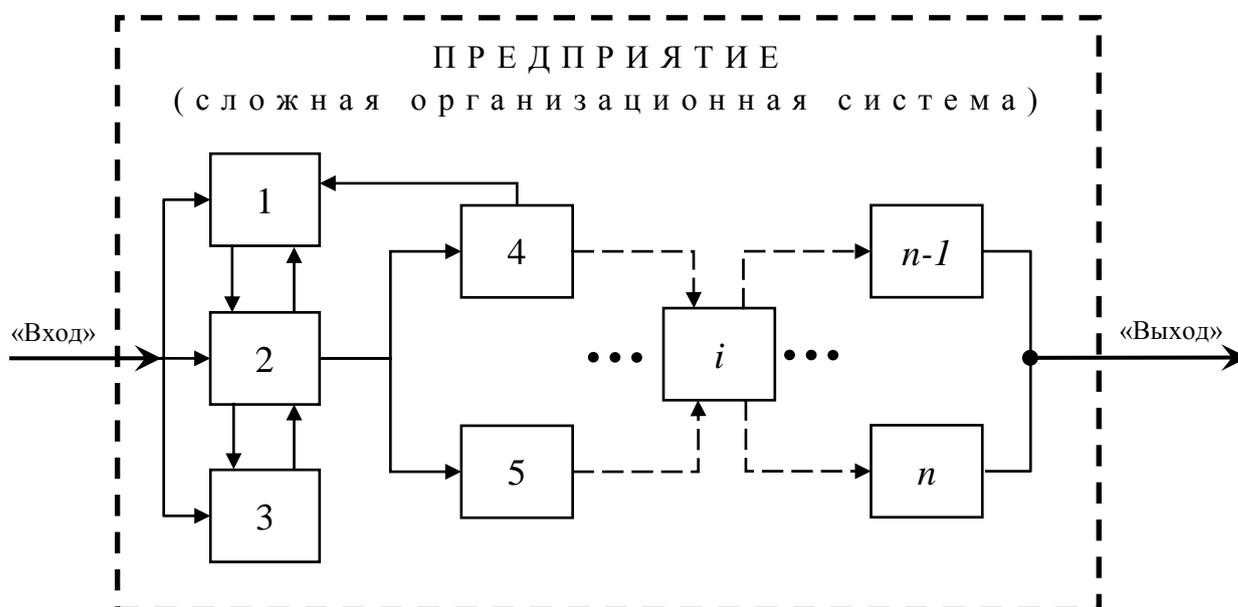


Рисунок 1.1 – Общий вид предприятия как системы

Представленная система состоит из n элементов, стрелками показаны связи между элементами. Элементами промышленного предприятия могут быть, например, цеха различного производственного назначения.

Межэлементные связи могут быть *прямыми* и *обратными*, *односторонними* и *двусторонними (взаимными)*. Прямые связи имеют направление от «входа» к «выходу» системы, обратные от «выхода» к «входу».

i – порядковый номер элемента системы: $i = 1, 2, \dots, n$.

В общем случае связи в системе представляют собой некоторые информационные, энергетические и документальные потоки, предназначенные для принятия и координации управленческих решений.

В системе, представленной на рис. 1.1 между элементами 1 и 2, 2 и 3 – двусторонние связи, между элементами 2 и 4, 2 и 5 – односторонние.

Основными функциями обратных связей являются:

- противодействие тому, что делает сама система, когда ее параметры выходят за установленные пределы (например, реагирование на снижение надежности энергообеспечения);
- компенсация возмущений и поддержание состояния устойчивого равновесия системы (например, неполадки в работе энергетического оборудования);
- формирование управляющих воздействий на объект управления при резком изменении характера прямой связи (например, внесение изменений в производственный процесс вследствие установления более высокой цены на энергоносители).

Любая система имеет «вход» и «выход», *внутреннюю* и *внешнюю* среду.

Внутренняя среда системы – это все то, что находится внутри самой системы. Она обеспечивает взаимодействие между отдельными элементами и формирует *структуру* системы.

В общем случае, внутренние элементы системы взаимодействуя между собой дают или не дают системе возможность эффективно работать.

Структура системы представляет собой совокупность необходимых и достаточных для достижения цели связей между элементами.

«*Вход*» системы представляет собой совокупность входных ресурсов, обеспечивающих *процесс функционирования* системы. Ресурсы могут быть *материальными, финансовыми, трудовыми, интеллектуальными, энергетическими и информационными*.

«*Выход*» системы представляет результат ее функционирования (объем выпуска продукции, энергообеспеченность технологических

процессов, экономическая эффективность предприятия, повышение квалификации энергетического персонала и т.д.).

Обобщая вышесказанное, любое *предприятие* можно представить как сложную организационную систему, преобразующую входные ресурсы в полезную продукцию или услуги.

Внешняя среда системы – это все, что находится за ее пределами и представляет собой совокупность других систем, оказывающих влияние на процесс функционирования рассматриваемой системы. По степени влияния на данную систему различают внешнюю среду прямого и косвенного воздействия (микросреду и макросреду). Любая система, взаимодействующая с внешней средой, носит название *открытой системы*.

Например, страна Россия – это система, внешней средой для которой являются все остальные страны мира. Развитие внешней среды подталкивает саму систему к развитию.

В соответствии с имеющейся классификацией [7], *предприятие также можно отнести к открытой производственной системе*, характеризующейся взаимодействием с внешней средой и удовлетворением потребностей с помощью производимых товаров и услуг.

Внешняя микросреда любого предприятия, независимо от его функциональной направленности, включает в себя поставщиков, потребителей, конкурентов, внешняя макросреда – экономическое состояние страны или региона, научно-технический уровень отрасли, уровень безработицы и т.д.

Предприятие удовлетворяет свои потребности, черпая различные ресурсы из внешней среды (материальные, финансовые, людские, энергетические, информационные и др.).

Общий вид системы, показанный на рисунке 1.1, представляет по сути дела ее *структурную схему*.

Кроме элементов можно выделить некоторые части системы, состоящих более чем из одного элемента, т.е. из некоторой совокупности элементов. Эти части системы называются *подсистемами*. Например, элементы системы 1, 2, 3, 4 и 5 (рисунок 1.1) можно объединить в две подсистемы (рисунок 1.2).

По своему функциональному назначению системы подразделяются на: экономические, социально-экономические, политические, технологические, энергетические, информационные, биологические и др.

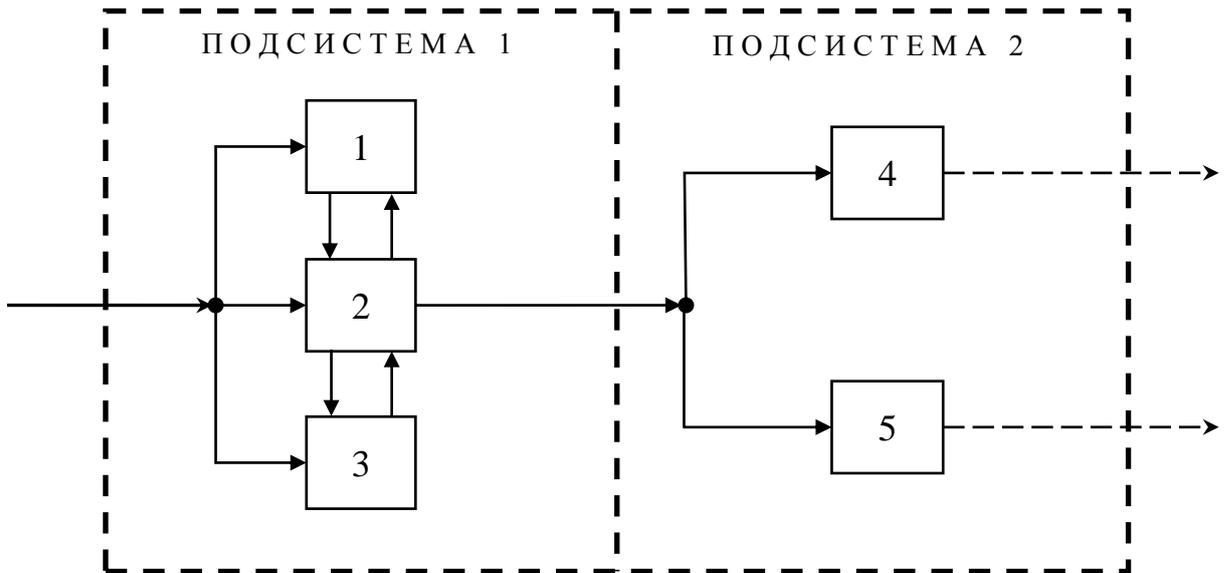


Рисунок 1.2 – Часть системы, состоящая из двух подсистем

Если в качестве системы рассмотреть энергосистему Ленинградской области и предположить, что неделимыми частями (элементами), в ней являются трансформаторные подстанции и соединяющие их линии электропередачи (ЛЭП), то подсистемами 1 и 2 на рисунке 1.2 могут быть энергосистемы двух районов Ленинградской области.

Если цеха предприятия представить в виде его подсистем, то элементами этих подсистем могут быть энерготехнологические поточные линии (ЭТЛ), расположенные на территориях этих цехов. Вместе с тем, ЭТЛ сами по себе являются достаточно сложными энерготехнологическими системами, включающими в себя различные типы оборудования.

Приняв за систему энергетическое хозяйство любого предприятия, ее подсистемами могут быть:

1. совокупность энергетического и энерготехнологического оборудования;
2. персонал энергетической службы.

Вышеназванные подсистемы находятся между собой в тесном взаимодействии, причем вторая является обслуживающей, а первая – обслуживаемой.



Рисунок 1.3 – Структура энергетического хозяйства

Элементами первой подсистемы являются отдельные энергетические установки, обеспечивающие технологические процессы на предприятии, элементами второй подсистемы – отдельные специалисты энергетического профиля.

Системы, представленные в первом и во втором примере можно отнести к классу потребительских энергосистем (ПЭС).

Строго говоря, энергосистема страны или региона по функциональным признакам может быть разделена на три подсистемы: генерирующую, передающую и распределительную, потребительскую.

В приведенных примерах энергетические установки и трансформаторные подстанции, обозначенные как элементы системы, в свою очередь являются достаточно сложными системами. Например, система автоматизированного электропривода, как разновидность энергетических установок, является сложной технической системой состоящей из датчиков, усилителей, преобразователей, электрических машин и т.д. Как уже было сказано ранее, электрическую машину также можно рассматривать и как элемент системы электропривода (ее неделимую часть), так и как сложную техническую систему, состоящую из статора, ротора, вала и т.д.

Подводя итог вышесказанному, необходимо ввести понятие «уровень декомпозиции». Под декомпозицией следует понимать разделение системы на составные части (подсистемы и элементы), и последующее изучение этих частей с целью выявления их влияния на эффективность функционирования системы в целом [1, 4].

Уровень декомпозиции определяет тот предел, ниже которого дальнейшее разделение системы на элементарные части нецелесообразно в рамках решения поставленной задачи. Например, для обеспечения

предприятия необходимой электрической мощностью совсем не обязательно знать конструктивные особенности питающего трансформатора, а при решении задач надежности энергообеспечения эти знания важны.

Процесс декомпозиции является неотъемлемой частью системного анализа.

1.2. Сущность, цели и задачи системного анализа в энергетической сфере

Под *системным анализом* принято понимать целенаправленное комплексное исследование сложных систем с целью определения направлений, путей совершенствования и реализации процессов, протекающих в системе, выработку новых принципов повышения качества решаемых задач [8]. Это определение в полном объеме справедливо и для процессов энергообеспечения предприятий.

Для исчерпывающего представления системы энергообеспечения необходимо совместное использование *макро- и микроподходов*, описывающее внешние и внутренние взаимодействия в системе.

При *макроподходе* анализируется поведение системы как единого целого по отношению к внешней среде. В этом случае при анализе главными факторами являются целевое назначение, задачи и условия ее функционирования, критерии эффективности, накладываемые ограничения на ее показатели качества. Этот подход сводится к описанию связи «вход – выход» системы и не содержит никаких сведений о внутреннем механизме преобразования переменных управления в переменные состояния. Применительно к системе энергообеспечения здесь речь идет о надежности энергообеспечения, качестве поставляемой энергии, удобстве обслуживания и ремонта оборудования и т.д.

Микроподход основан на внутреннем комплексном описании системы, определяющим внутреннее состояние системы. При этом предметом детального исследования становятся внутренние характеристики системы – взаимодействие подсистем и элементов между собой и условий их функционирования. Микроподход предполагает исследование и построение выбранной структуры, и ее реализацию в виде технических средств, придающих системе требуемые качества. К микроподходу в энергетической сфере можно отнести согласованность параметров питающей сети мощностям энергетических установок, а их мощностей – требованиям технологического процесса.

Обобщая вышесказанное можно сделать вывод о том, что системный анализ направлен на оценку эффективности функционирования системы по различным показателям (критериям). В энергетической сфере такими показателями могут быть: *степень обеспеченности необходимыми мощностями производственных процессов, надежность энергообеспечения, энергоемкость продукции и т.д.*

Формирование основ знаний и методологии проведения системных исследований применительно к энергетическим и энерготехнологическим системам и процессам достигается решением следующих задач:

- изучение сущности системного подхода, основных положений системологии и основных этапов проведения системного исследования (анализа и синтеза) в энергетике;
- привитие умений и навыков методологии проведения системного анализа и синтеза;
- ознакомление с формально-логическим аппаратом и методами моделирования при проведении системного анализа;
- изучение основ научно-технического прогнозирования развития энергетических и энерготехнологических объектов как систем.

Системный анализ в энергетической сфере органически связан с рядом общенаучных дисциплин и базируется на общей теории систем, теории электротехники, теплотехники, управления, экономики, вычислительной техники и специальных энерготехнических дисциплин (электро-, тепло- и газоснабжении, энерготехнологии, энергооборудовании и др.). Кроме этого, *характерной чертой системного анализа является то, что он базируется на методологии математического и экспериментального моделирования с использованием компьютерных информационных технологий.* Для получения достоверных результатов анализа моделирование должно быть вероятностным, т.е. должно учитывать многочисленные случайные факторы.

Системный анализ в энергетике – технология системного подхода к исследованию энергетических и энерготехнологических объектов как систем.

В настоящее время в арсенале системного анализа находят применение следующие *группы методов*:

1. Аналитические методы (теория множеств, графов, матриц, принятия решений, исследования операций, информации и т.д.).
2. Эвристическое программирование, основанное на принципах экспертной деятельности человека.

3. Имитационное моделирование (замена реальной системы на ее искусственную модель и проведение экспериментов с ней).
4. Методы идентификации объекта (планирование экспериментов на реальном объекте).

Особенностью использования аналитических методов при моделировании систем состоит в том, что они применимы только в случае неизменных функциональных соотношений основных параметров системы в течение рассматриваемого периода моделирования.

Другими словами, аналитические методы применимы при наличии явных зависимостей между условиями решения задачи и ее результатами в виде формул, графиков, логических соотношений и др. Эти зависимости являются типовыми, объективно существующими и выработанными теорией и практикой в течение многих лет. Общий вид аналитической зависимости, описывающей процесс функционирования системы.

$$R(t) = F[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_m(t)], \quad (1.1)$$

где $R(t)$ – результат функционирования системы;

$x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ – входные воздействия на систему;

$\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_m(t)$ – параметры системы.

К имитационному моделированию обращаются при исследовании сложных слабоструктурированных систем, в которых присутствуют причинно-следственные связи, различного рода нелинейности, стохастические (случайные) переменные.

Эвристическое программирование базируется на использовании интуитивного метода – метода, решения в котором могут вытекать из практики прошлых действий, которая себя оправдала в большинстве случаев.

Методы идентификации предполагают формирование специальных воздействий (тестовых сигналов), как на входе исследуемого объекта, так и на его выходе. Это, в свою очередь, позволяет определить оптимальную в некотором смысле модель, построенную по результатам наблюдения за входными и выходными переменными объекта. Использование методов идентификации позволяет существенно сократить время и стоимость проведения экспериментов.

Эвристические методы и методы идентификации с успехом могут быть использованы только специалистами, имеющими большой опыт работы по исследованию тех или иных систем.

Обобщенный алгоритм системного анализа состоит из шести взаимосвязанных этапов (рисунок 1.4). [10]

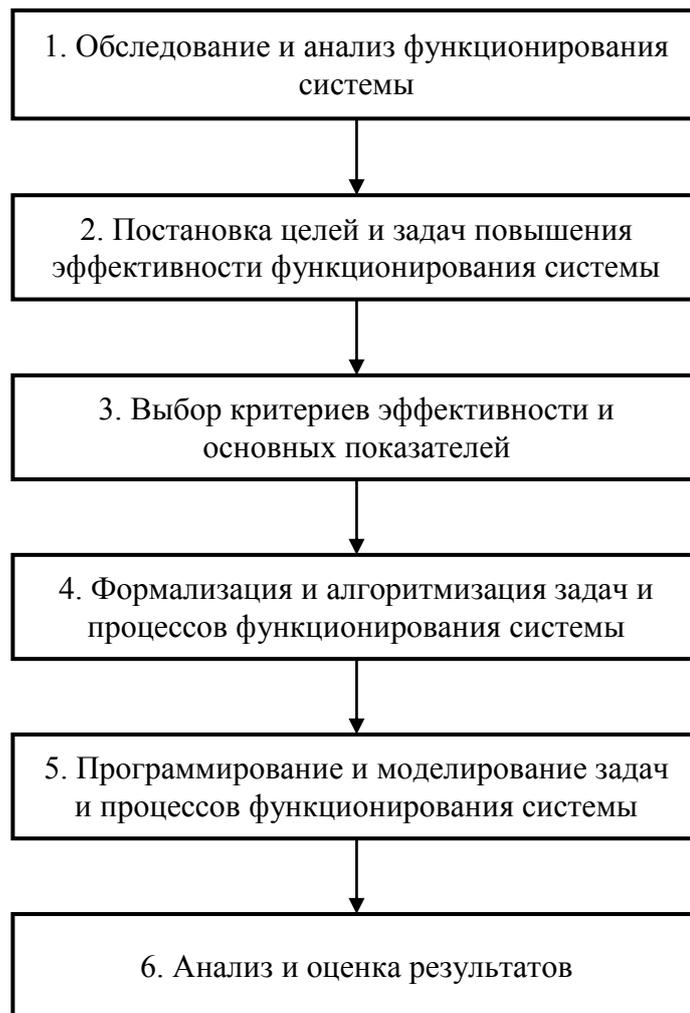


Рисунок 1.4 – Обобщенный алгоритм системного анализа

Прокомментируем некоторые этапы представленного алгоритма.

На 3^{ем} этапе алгоритма производится выбор общих и частных критериев эффективности систем энергосбережения предприятий к частным критериям в данном случае следует отнести надежность функционирования энергетического и энерготехнологического оборудования и энергоемкость выпускаемой продукции. Общими критериями эффективности являются такие экономические критерии, как чистая прибыль от реализации продукции и рентабельность производства.

Под формализацией и алгоритмизацией задач, осуществляемые на 4^{ом} этапе понимается представление их в виде некоторых формальных символов (постоянных, переменных, формул, правил преобразования и т.д.) и формирование порядка работы с этими символами.

На 5^{ом} этапе осуществляется представление разработанного на 4^{ом} этапе алгоритма с помощью какого-либо языка программирования и проведение расчетов для конкретных исходных данных.

Результаты системного анализа позволяют перейти к *системному синтезу*, т.е. разработке сложных оптимальных систем энергообеспечения, состоящих из множества альтернативных конкурирующих элементов, связей и структур при наличии определенной информационной неопределенности. Понятие «системный синтез» иногда заменяют понятием «*системное проектирование*». Основным целевым назначением системного подхода к проектированию является сокращение периода между моментом возникновения потребности в создании системы и моментом ввода ее в эксплуатацию.

Как правило, системный анализ включает в себя *изучение сложных систем, для которых цели и задачи уже поставлены*. В этом смысле он представляет собой методологию решения проблем, основанную на структуризации систем (формирование структур) и количественном сравнении альтернатив (возможных вариантов).

С точки зрения системного анализа *энергетические системы* по целям и задачам подразделяются на *три основные группы (подсистемы)* [10]:

- *энергоисточники (преобразователи энергии)*, к которым можно отнести ГЭС, ТЭС, АЭС и т.д.;
- *энерготранспорт (энергосети)*, например электрические и тепловые сети, горячее водоснабжение и т.д.;
- *потребительские энергопреобразователи*, которые входят в состав технологического оборудования, тем самым обеспечивая процессы производства и/или переработки продукции.

Потребительские энергопреобразователи в дальнейшем будем называть энерготехнологическими системами. Окончательно классификацию энергетических систем представим в виде (рисунок 1.5).

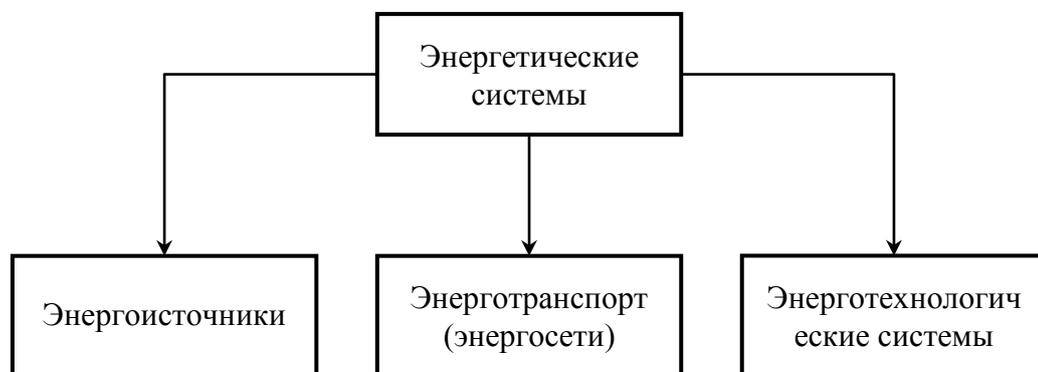


Рисунок 1.5 – Классификация энергетических систем

Энерготехнологической базой в сфере энергетики являются теплоэнергетические установки и электрооборудование.

К теплоэнергетическим установкам относятся: котлоагрегаты для производства горячей воды и пара, теплогенераторы для нагрева воздуха, работающие на мазуте, природном газе, угле и других видах топлива.

Различают следующие виды электрооборудования: электродвигатели, электронагреватели, осветительные и облучательные установки, трансформаторы, аппаратура управления и защиты и т.д.

Оценка результатов анализа энергетических систем носит комплексный характер, т.е. включает в себя оценку влияния на эффективность их функционирования системы как факторов внутренней, так и внешней среды. Например, абсолютно надежно работающие потребительские энергопреобразователи (энерготехнологические системы) не смогут обеспечить эффективное энергообеспечение технологических процессов, если поставщики энергоресурсов (энергоисточники и энергетические сети) будут работать с перебоями.

1.3. Структура системы энергообеспечения и ее виды

Структура системы – это совокупность элементов системы и связей между ними.

Структуры системы подразделяются на два основных вида [18]:

1. Сетевая структура.
2. Иерархическая структура.

Сетевая структура или *сеть* представляет собой декомпозицию (разделение) системы во времени. Такие структуры могут отображать порядок действия технической системы (телефонная сеть, электрическая сеть, тепловая сеть, компьютерная сеть и т.п.), этапы деятельности человека (при производстве продукции – это сетевой график, при проектировании – сетевая модель, при планировании – сетевой (целевой) план и т.д.).

Сетевую структуру графически можно представить следующим образом (рисунок 1.6).

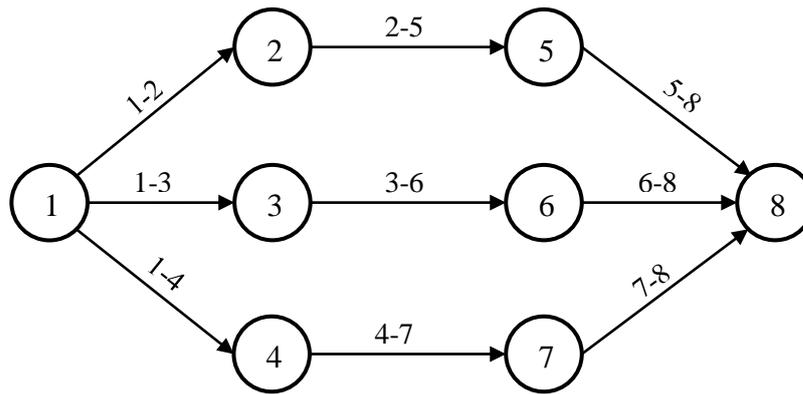


Рисунок 1.6 – Сетевая структура системы

Порядок действий в структуре обозначим кружками с номерами (от 1 до 8). Структура включает в себя 8 состояний (этапов деятельности). Элемент, обозначающий состояние системы в сетевой структуре называется *узлом*. Стрелками 1-2, 1-3, ..., 7-8 обозначим переходы системы из одного состояния в другое.

Сетевые структуры используются в тех случаях, когда систему удастся отобразить через описание материальных и информационных процессов, происходящих в ней, т.е. представить последовательностью изготовления деталей, сборки изделий, перемещения энергетических потоков, прохождения документов в электронном виде и т.д.

Узлом 1 на рисунке 1.6 может быть обозначено начало производства какого-либо изделия, узлами 2, ..., 7 – изготовление отдельных элементов изделия, узлом 8 – окончательная сборка изделия.

В энергетике примером сетевой структуры, представленной на рисунке 1.6, может послужить трехканальная система энергообеспечения предприятия, при этом узлами 2, 3, ..., 7 могут быть трансформаторные подстанции (ТП).

Иерархическая (многоуровневая) структура представляет собой декомпозицию системы в пространстве. Все элементы и связи между ними существуют в этих структурах одновременно (не разнесены во времени).

В энергетике к иерархической структуре можно отнести структуру управления энергообеспечением любого предприятия (рисунок 1.7).

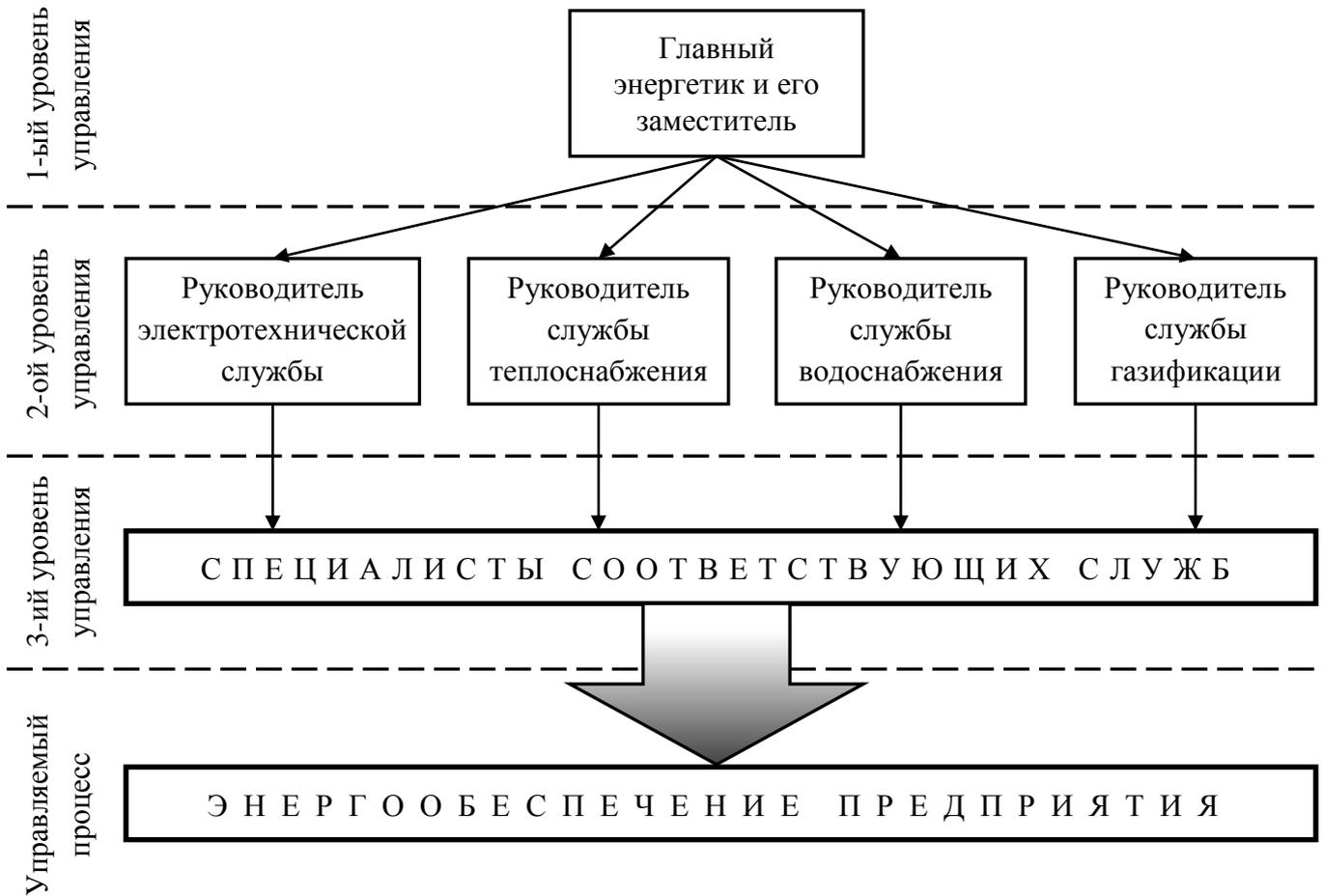


Рисунок 1.7 – Пример иерархической структуры управления энергообеспечением предприятия

Если сетевая структура описывает динамику системы, т.е. процесс ее движения во времени, то иерархическая структура описывает статику системы, т.е. ситуацию, когда ее параметры и структура неизменны в течение некоторого периода времени.

Что касается иерархической структуры, то в определенные моменты времени в ней может происходить *реструктуризация*, т.е. целенаправленное изменение структуры предприятия и входящих в него элементов в связи с воздействиями, оказываемыми факторами внешней и внутренней среды.

В процессе реструктуризации может происходить совершенствование системы управления предприятием, изменение финансово-экономической политики, систем маркетинга, сбыта и управления персоналом. В зависимости от целевых установок и стратегии развития предприятия, *реструктуризация системы управления энергообеспечением может быть оперативной или стратегической.*

Оперативная реструктуризация преследует такие цели, как возможность финансового оздоровления и улучшения платежеспособности предприятия, стратегическая – направлена на улучшение привлекательности предприятия для инвесторов и расширения его внешнего финансирования.

1.4. Особенности и основные свойства энергетических систем

Энергетическая система (ЭС), как сложная техническая система, имеет ряд особенностей, которые следует учитывать при рассмотрении вопросов ее перспективного развития, организации эксплуатации и управления. Далее приводится краткий анализ наиболее характерных особенностей этих систем. [16]

Уникальность. Каждая ЭС может содержать в своей структуре определенное число энерготехнологических поточных линий (ЭТЛ) с различными типами энергетического оборудования, способами и схемами управления и защиты. В результате каждую ЭС можно представить как уникальный объект рассмотрения, что накладывает ограничения на использование методов исследования, ориентированных на однотипные серийные объекты. Возникают определенные трудности в сопоставлении разных ЭС по показателям качества функционирования.

Неоднородность элементов. В составе ЭС содержится большое число оборудования разного типа и вида (теплотехническое, электротехническое, электромеханическое, и др.), конструкций и сооружений с отличающимися производственными характеристиками и сроками эксплуатации.

Возможность декомпозиции (разделения ЭС на подсистемы и элементы). Число уровней декомпозиции определяется поставленной задачей исследования системы, а именно глубиной исследования. В качестве примера приведем результаты первого уровня декомпозиции энергетической системы некоторого региона (рисунок 1.8).

Не вызывает сомнения тот факт, что представленные на рисунке подсистемы могут также быть предметом исследования. Необходимым условием такого исследования является проведение второго уровня декомпозиции.

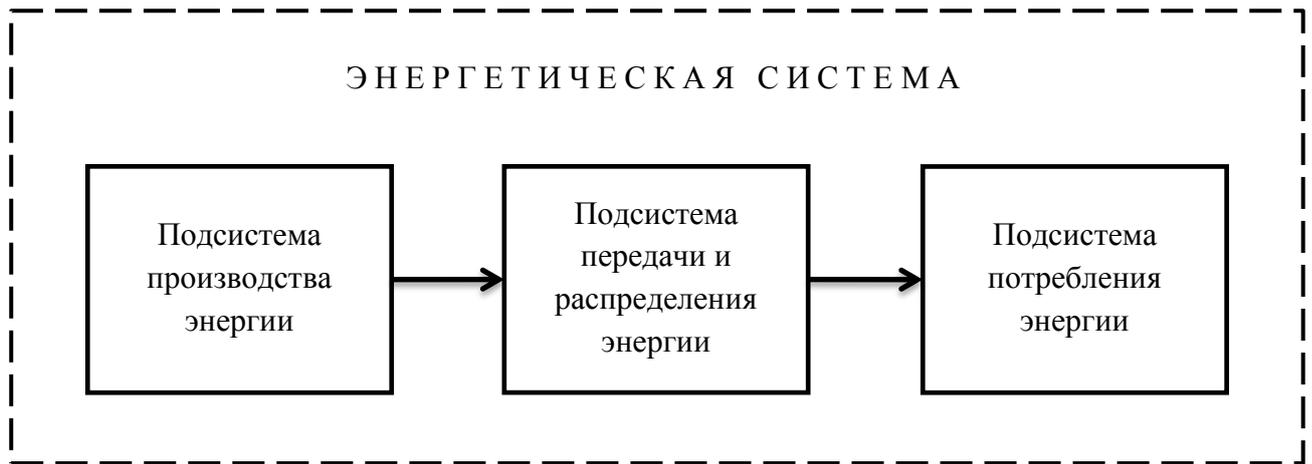


Рисунок 1.8 – Основные подсистемы энергетической системы

Выделение подсистем является важным методологическим подходом к исследованию сложных систем, в том числе и энергетических, при решении задач целенаправленного управления их функционированием и развитием.

Как уже было отмечено ранее, подсистема потребления энергии представляет собой энерготехнологическую систему (ЭТС), обеспечивающую выпуск продукции на любом предприятии. Именно этим системам уделяется основное внимание в данном учебном пособии.

Эффективность функционирования ЭТС, являющейся конечной подсистемой ЭС (рисунок 1.8), в общем виде определяется следующим образом

$$\mathcal{E}_{\text{ЭТС}}(t) = F[\mathcal{E}_{\text{ППЭ}}(t), \mathcal{E}_{\text{ППР}}(t)], \quad (1.2)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ППЭ}}(t)$ – эффективность подсистемы производства энергии;

$\mathcal{E}_{\text{ППР}}(t)$ – эффективность подсистемы передачи и распределения энергии.

С математической точки зрения выражение (1.2) представляет собой сложную функцию времени.

Иерархичность структуры и управления. ЭС по своей структуре, организации эксплуатации и принципам управления относятся к иерархической (многоуровневой) системе [14]. При оценке функционирования таких систем обычно выделяют следующие иерархические уровни: энергетическое оборудование (электропривода, теплогенераторы, энергосети и др.), энергообъект (например, энерготехнологическая поточная линия) и энергосистема как единый технический комплекс. Применительно к производственному

предприятию энергосистема, как правило, подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Для каждого уровня существует ряд характерных переменных, законов и принципов. Нередко уровни рассмотрения ЭС совмещают с уровнями управления и в зависимости от этого определяют объем и состав необходимой информации для принятия решений на данном уровне.

Следует иметь в виду, что процесс управления на данном уровне обеспечивается с помощью энерготехнологического оборудования низшего уровня, например управление поточной линией осуществляется электроприводами отдельных ее механизмов.

Вероятностная природа поведения ЭС. При изучении поведения ЭС приходится сталкиваться с различного рода неопределенностями. Так, например, все решения (как проектные, так и эксплуатационные) учитывают неопределенность нагрузки и генерации в системе. Широкий спектр неопределенностей вносят воздействия внешней среды на элементы ЭС (например, изменение параметров производственного процесса), поэтому предсказание поведения работы энергетического оборудования и системы в целом имеет смысл только в рамках вероятностных категорий. Любому теоретическому анализу, связанному с исследованием сложной системы, в том числе и в сфере энергетики, как правило, предшествует накопление статистического материала, характеризующего поведение системы в реальных условиях. Требуются такие адекватные природе поведения системы методы исследования и математический аппарат как: методы математической статистики, теория случайных процессов, теория неопределенности и другие.

Наиболее простой вариант вероятностной модели функционирования ЭС можно представить в виде

$$MO[R(t)] = F\{MO[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)], MO[\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_m(t)]\}, \quad (1.3)$$

где $MO[R(t)]$ – математическое ожидание результата функционирования системы;

$MO[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)], MO[\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_m(t)]$ – математические ожидания параметров системы и входных воздействий на нее соответственно.

Более углубленные вероятностные модели функционирования системы строятся на уровне среднеквадратических отклонений и законов распределения используемых величин (воздействий, параметров и результатов).

Адаптивность к воздействиям. В процессе работы ЭС подвергаются внутренним и внешним воздействиям, приводящим к структурным и режимным изменениям состояния системы. Это вынуждает предусматривать различные виды резервирования (топлива, генерирующей мощности, преобразующих и передающих энергию элементов и др.) в результате чего система становится приспособленной (устойчивой) ко многим воздействиям. Поэтому при отказе одного или даже нескольких элементов сохраняется работоспособное состояние системы, однако на какое-то время возможны изменения некоторых рабочих характеристик и параметров в отдельной ее части или у отдельных элементов системы.

Непрерывность развития, обновления и совершенствования. Отмеченная особенность обеспечивается выполнением ремонтных работ, связанных с состоянием элементов системы, выводом из эксплуатации выработавших свой ресурс и вводом новых элементов, внедрением прогрессивных технических и технологических решений, совершенствованием методов управления процессами энергообеспечения. При этом ЭС не прерывает выполнение своих функций по удовлетворению потребностей в энергии многочисленных потребителей.

Важнейшим аспектом системных исследований является изучение основных свойств сложных систем. Такое изучение энергосистем позволяет найти характерные обобщающие свойства функционирования и соответствующие структуры систем данного вида. Знание этих свойств позволяет отчетливо сформулировать задачу комплексного энергоэкономичного и энергобезопасного обеспечения потребителей различными видами энергии, а также создать рациональные методики для научно-обоснованных решений.

Перечислим основные свойства энергетических и энерготехнологических систем:

1. Свойство *целостности* определяется наличием у системы таких свойств, которые не присущи ее отдельным элементам (что придает системе новые качества за счет синергетического эффекта). Сущность синергетического эффекта заключается в повышении эффективности функционирования системы в результате соединения, интеграции, слияния отдельных ее частей. У энергосистемы новым качеством может быть объединение графиков энергетических нагрузок отдельных потребителей.
2. Свойство *целевой согласованности* отражает совпадение целей (интересов) производителей энергии, энергосберегающих

организаций и энергопотребителей. Конечной целью комплексных исследований энергосистем является достижение оптимальных пропорций в распределении ресурсов между отдельными подсистемами энергосистемы.

3. Свойство *экономической устойчивости* – это свойство системы, при котором достаточно существенные изменения в ее структуре, составе элементов и значениях их параметров характеризуются меньшими изменениями суммарных экономических затрат. Это свойство важно для изучения силы проявления свойств неопределенности оптимальных решений, структуры и параметров системы. Экономическая устойчивость системы энергообеспечения предприятия обеспечивает стабильную прибыльность этого предприятия и нормальные условия для его устойчивого экономического роста на длительную перспективу с учетом важнейших внутренних и внешних факторов.
4. Свойство *энергоэкономичности* – это свойство системы осуществлять свои функции с минимальными затратами ресурсов при заданных ограничениях. На повышение энергоэффективности энергосистем всегда направлены основные усилия, как разработчиков этих систем, так и энергопотребителей.
5. Свойство *энергобезопасности* – это свойство системы энергообеспечения выполнять заданные функции, как в нормальных, так и в аварийных условиях эксплуатации. Энергобезопасность обеспечивается гибкостью системы, необходимыми резервами, запасами, организации планово-предупредительных ремонтов и эксплуатации оборудования.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение системы и прокомментируйте его.
2. Что такое «вход» и «выход» системы?
3. Дайте определения и характеристики внутренней и внешней среды системы.
4. Что такое декомпозиция системы? Приведите примеры декомпозиции систем.
5. Охарактеризуйте макро- и микро- подходы при описании сложной энергетической системы.
6. Представьте и прокомментируйте обобщенный алгоритм системного анализа.

7. Дайте определение структуры системы. Рассмотрите на примере сетевую структуру системы.

8. Дайте определение структуры системы. Рассмотрите на примере иерархическую (многоуровневую) структуру системы.

9. Назовите и прокомментируйте характерные особенности энергетических систем.

10. Перечислите основные свойства систем энергообеспечения.

2. СОСТОЯНИЕ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

2.1. Состояние системы

Состояние системы характеризует мгновенное ее положение (фотографию) или «срез» системы, остановку в ее развитии. Другими словами, под состоянием системы следует понимать совокупность существенных свойств и параметров, которыми система обладает в каждый момент времени. Предположим, что система – это материальное тело в виде шарика (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – К определению состояния системы

В исходном положении шарiku соответствует состояние покоя (состояние S_1 , соответствующее времени t_1). После толчка шарик последовательно занимает некоторые положения, соответствующие состояниям $S_2(t_2)$, $S_3(t_3)$, ..., $S_j(t_j)$, $S_{j+1}(t_{j+1})$, ..., $S_m(t_m)$. Интервал времени $[t_1, \dots, t_m]$ является интервалом рассмотрения процесса движения системы.

Например, состояние двигателя, как электромеханической системы определяется мгновенными значениями его мощности, тока и частоты вращения ротора P_j , I_j , n_j . Состояние системы жестко привязано к конкретному моменту времени и характеризует ее *статику*.

Состояние сложной системы, включающей большое число взаимодействующих между собой элементов, зависит от состояния каждого из этих элементов.

Состояние системы, состоящей из n элементов в j -ый момент времени, в общем виде можно представить следующим образом:

$$S_j = S_j (S_{1j}, S_{2j}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{nj}), \quad (2.1)$$

где i – номер элемента системы ($i= 1, 2, \dots, n$);

j – номер момента времени, в котором фиксируется состояние системы;

$S_{i,j}$ – состояние i -ого элемента системы в j -ый момент времени.

Величины S_j являются параметрами состояния системы в целом, величины S_{ij} – параметрами состояния элементов системы. Примером состояния системы из энергетической сферы деятельности может быть мощность энергетической установки некоторого производственного объекта в j -ый момент времени P_j :

$$P_j = P_j(P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{nj}), \quad (2.2)$$

где $P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{nj}$ – мощность отдельных единиц энергетического оборудования.

Пример: Представить общее математическое выражение для определения мощности энергетической установки, состоящей из пяти элементов (единиц энергетического оборудования) в третий момент времени (рисунок 2.2).

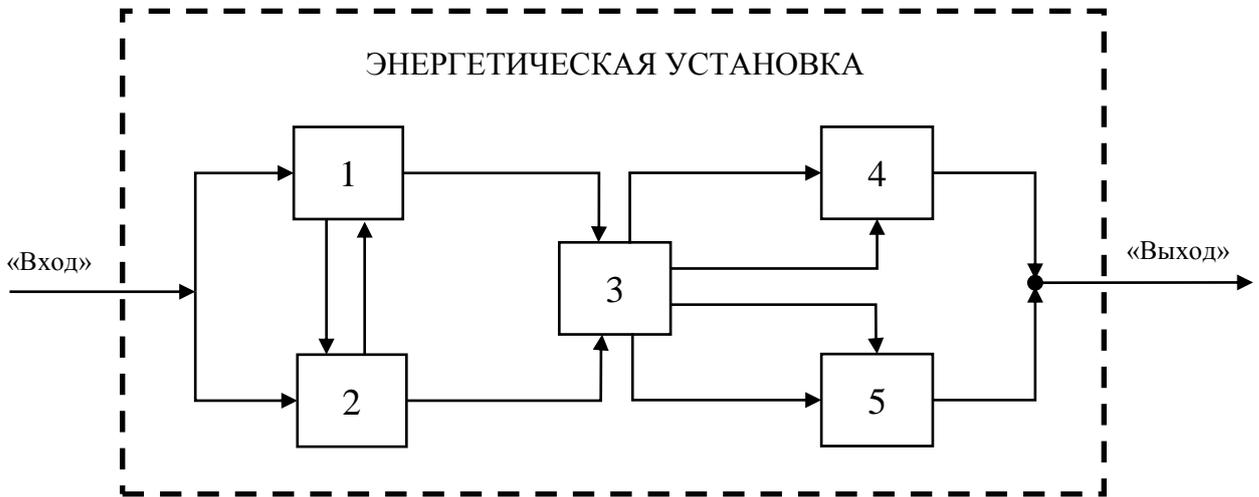


Рисунок 2.2 – Пример системы, состоящей из пяти элементов

Для наглядности представим шкалу времени с номерами точек, в которых оценивается состояние системы (рисунок 2.3).

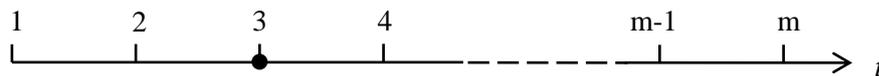


Рисунок 2.3 – Шкала моментов времени для анализа состояния системы

Как видно из рисунка 2.3, существует m возможных моментов времени для осуществления анализа состояния системы. Нас будет интересовать *третий* момент времени. Воспользовавшись выражением (2.2) получим:

$$P_3 = P_3 (P_{1,3}, P_{2,3}, P_{3,3}, P_{4,3}, P_{5,3}), \quad (2.3)$$

где P_3 – мощность энергетической установки (системы) в третий момент времени;

$P_{1,3}, P_{2,3}, \dots, P_{5,3}$ – мощности каждого из пяти элементов (единиц энергетического оборудования) в третий момент времени.

Аналогичное выражение можно записать для системы, состоящей из любого числа элементов.

Различают *устойчивое и неустойчивое состояние системы*. Устойчивым является такое состояние системы, при котором происходит ее возврат к прежнему равновесному состоянию после устранения возмущающего воздействия выведшего ее из этого состояния. При неустойчивом состоянии такого возврата не происходит.

Проиллюстрируем вышеназванные состояния системы на двух примерах (рисунок 2.4):

- 1) Состояние «А»: «Шарик в яме» - устойчивое состояние (после устранения возмущающего воздействия шарик вернется на прежнее место – в равновесное состояние);
- 2) Состояние «Б»: «Шарик на бугре» - неустойчивое состояние (после устранения воздействия шарик скатиться с бугра – не вернется в равновесное состояние).

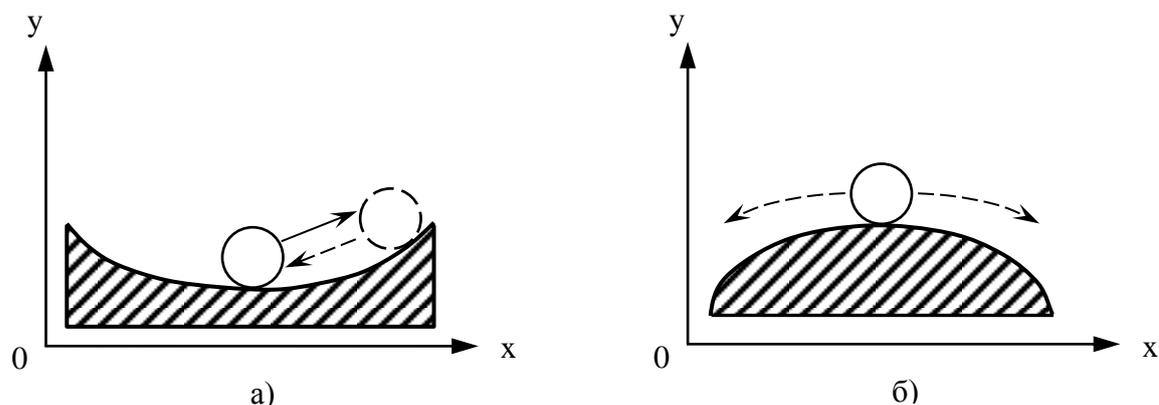


Рисунок 2.4 – Иллюстрация к устойчивому и неустойчивому состоянию системы:
 а) устойчивое состояние «А», б) неустойчивое состояние «Б»

2.2. Функционирование и развитие систем энергообеспечения

Функционирование (поведение) системы – это процесс перехода системы из одного состояния в другое. Функционирование системы характеризует ее динамику (движение) и представляет собой процесс, протекающий как в пространстве, так и во времени.

Возвращаясь к шкале моментов времени, представленной на рисунке 2.3, функционирование системы можно рассматривать как последовательный переход из одной точки шкалы в другую, т.е.:

$$\begin{aligned}
 S_1 &\rightarrow S_2, \\
 S_2 &\rightarrow S_3, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 S_{m-1} &\rightarrow S_m.
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

При анализе функционирования любой системы необходимо задать начальные условия, т.е. состояния всех ее элементов в начальный момент времени (в точке отсчета).

Первичным толчком для функционирования системы может быть как воздействие на нее внешней среды, так и стремление самой системы достичь некоторого предпочтительного состояния, что заставляет ее воздействовать на внешнюю среду.

Взаимодействие системы с внешней средой создает проблемную ситуацию для системы, когда ей надо либо подчиниться среде (приспособиться к ней), либо активно ее преобразовать.

Поскольку процесс функционирования системы предполагает расходование ее ресурсов, выведение ее из равновесия действиями внешней среды может привести к существенной потере ресурсов, разрушению структуры, потере функций.

Возможной проблемной ситуацией может быть уменьшение границ системы, что в свою очередь повлечет за собой потерю или сокращение ее функциональных возможностей. Например, выход из строя кабельной линии осветительной сети может привести к уменьшению площади освещаемой территории производственного предприятия.

Процесс функционирования системы, состоящей из трех элементов, описывается в виде некоторой сложной функции времени.

$$S(t) = S[S_1(t), S_2(t), S_3(t)], \quad (2.5)$$

где $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$ – процесс функционирования 1-го, 2-го и 3-го элементов системы соответственно (индексы этих функций не следует путать с индексами в выражении (2.4), которые обозначают номер точки на числовой оси).

Этот процесс можно наглядно проиллюстрировать в виде фазовой траектории (рисунок 2.5).

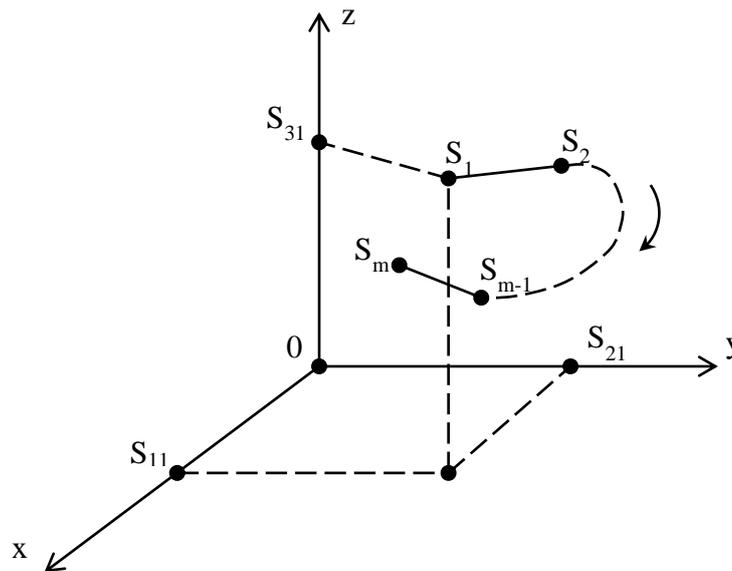


Рисунок 2.5 – Фазовая траектория движения системы

По осям координат x , y , z откладываются значения состояний соответственно 1-го, 2-го и 3-го элемента системы.

Начальным условиям функционирования (движения) системы соответствует точка S_1 . Стрелка показывает направление движения системы. Точка S_m соответствует окончанию анализа процесса функционирования системы. Точки на осях координат S_{11} , S_{21} , S_{31} соответствуют начальным условиям функционирования соответственно 1-го, 2-го и 3-го элементов системы.

Рассмотрим в качестве примера систему электроснабжения сельхозпредприятия, включающую в себя три трансформаторных подстанции (т.е. три элемента). Поскольку процесс функционирования системы протекает во времени, можно записать следующее выражение:

$$S_{\text{ЭС}}(t) = S_{\text{ЭС}}[S_{\text{ТП1}}(t), S_{\text{ТП2}}(t), S_{\text{ТП3}}(t)], \quad (2.6)$$

где $S_{\text{ЭС}}(t)$ – зависимость состояний системы электроснабжения от времени;

$S_{\text{ТП1}}(t)$, $S_{\text{ТП2}}(t)$, $S_{\text{ТП3}}(t)$ – зависимость состояний отдельных трансформаторных подстанций от времени.

Выражение (2.6) по сути дела описывает процесс функционирования системы электроснабжения во времени.

Для данного примера можно представить фазовую траекторию движения системы, аналогичную, представленной на рисунке 2.5.

В качестве другого примера рассмотрим процесс функционирования системы энергообеспечения технологической поточной линии (ЭОТЛ), состоящей из пяти электроприводов (электромеханических подсистем) ЭП₁, ЭП₂, ..., ЭП₅ (рисунок 2.6).

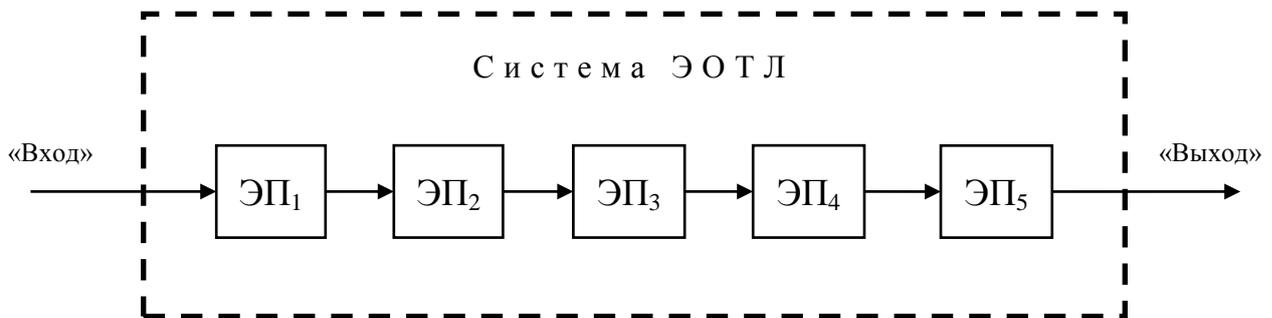


Рисунок 2.6 – Структурно-функциональная схема системы ЭОТЛ

В этом случае математическое выражение, описывающее процесс функционирования системы, имеет вид:

$$S_{\text{ЭОТЛ}}(t) = S_{\text{ЭОТЛ}}[S_{\text{ЭП1}}(t), S_{\text{ЭП2}}(t), \dots, S_{\text{ЭП5}}(t)], \quad (2.7)$$

где $S_{\text{ЭП1}}(t)$, $S_{\text{ЭП2}}(t)$, ..., $S_{\text{ЭП5}}(t)$ – зависимость состояний отдельных электроприводов от времени.

Строго говоря, в обоих примерах функциональное назначение подсистем и элементов (неделимых частей) системы совпадает.

Под *развитием (эволюцией) системы* следует понимать то, что происходит с системой при изменении ее целей. Характерной чертой развития является тот факт, что существующая структура перестает соответствовать новой цели. Разница между развитием и функционированием заключается в том, что при развитии качественно меняется структура системы и объем циркулирующей в ней информации, а при функционировании – нет. Новая (усовершенствованная) структура

системы обязательно должна приводить к повышению эффективности, как энергетической, так и экономической.

Рассмотрим процесс развития системы на двух конкретных примерах.

Пример 1: Предположим, что в нашей поточной линии (рисунок 2.6) электропривода ЭП₂ и ЭП₄ работают в особых условиях (во взрывоопасных газовых средах или пыльных помещениях). Новой целью системы ЭОТЛ в этом случае является повышение надежности поточной линии. Эта цель может быть достигнута путем параллельного включения дополнительных электроприводов ЭП₆ и ЭП₇ (рисунок 2.7).

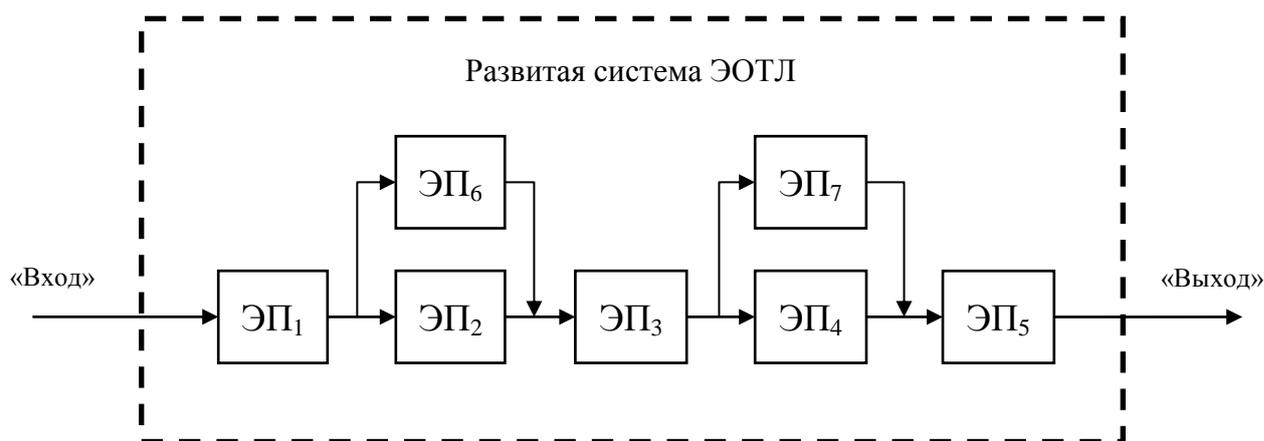


Рисунок 2.7 – Структурно-функциональная схема развитой системы ЭОТЛ

Сравнение схем, представленных на рисунках 2.6 и 2.7, позволяет подтвердить вывод о том, что развитие системы связано с изменением ее структуры, а, следовательно, и процесса функционирования.

Пример 2: Рассмотрим систему энергоснабжения, осуществляющую питание трех энергопотребителей третьей категории П₁, П₂, П₃ (допускается перерыв в электропитании до 1 суток). Такая система может быть разомкнутой, т.е. иметь один источник питания ИП (рисунок 2.8).

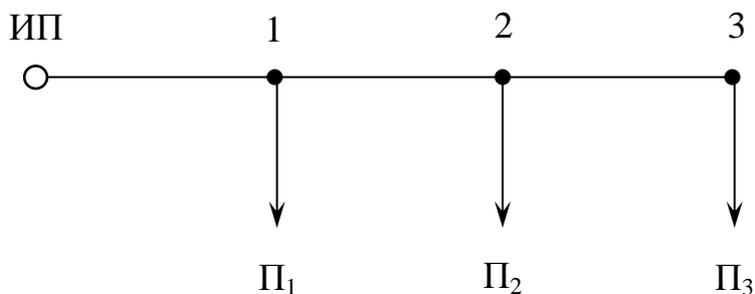


Рисунок 2.8 – Разомкнутая система электроснабжения

При дополнительном подключении к этой системе потребителя Π_4 первый или второй категории (по отношению к которому отводится минимальное время перерыва в электропитании), разомкнутая система электроснабжения должна быть преобразована в замкнутую, т.е. развита (рисунок 2.9).

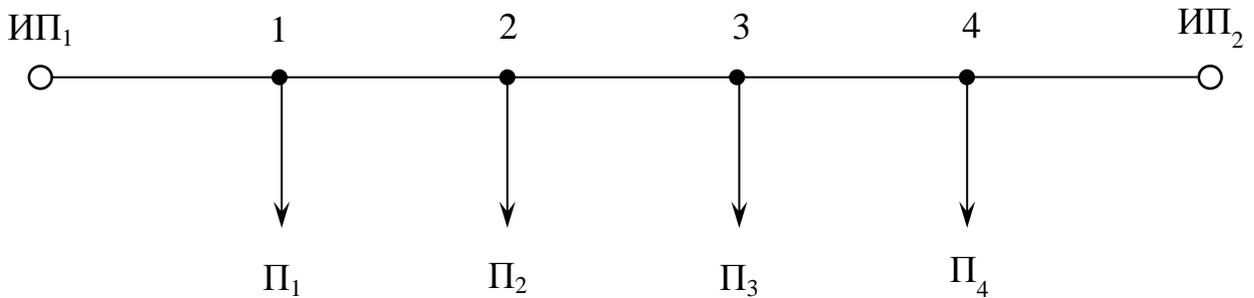


Рисунок 2.9 – Замкнутая (развитая) система электроснабжения с двусторонним питанием

Развитие системы независимо от ее назначения, как правило, приводит к повышению ее эффективности. По истечении некоторого времени развития, система, как правило, перестает соответствовать новым целям, и процесс развития должен быть продолжен.

2.3. Режимы функционирования систем энергообеспечения

Как было отмечено в п.2.2 под функционированием системы понимается процесс ее перехода из одного состояния в другое. Строго говоря, процесс функционирования подразумевает как переход системы из состояния в состояние, так и нахождение ее в определенном состоянии.

В связи с вышесказанным различают *установившиеся* и *переходные режимы* работы систем энергообеспечения.

Под установившимся режимом работы подразумевается режим, при котором параметры и характеристики системы, а, следовательно, и ее состояние не меняются во времени. Например, вращение электродвигателей в системе электропривода (электромеханической системе) какого-либо производственного механизма с постоянной угловой скоростью ($\omega = const$) предполагает постоянную мощность и производительность этого механизма.

Графически установившийся режим работы электропривода вентиляторной установки (ВУ) можно представить в виде точки пересечения механической характеристики асинхронного электродвигателя (МХД) и механической характеристики вентилятора (МХВ) (точка 1, рисунок 2.10).

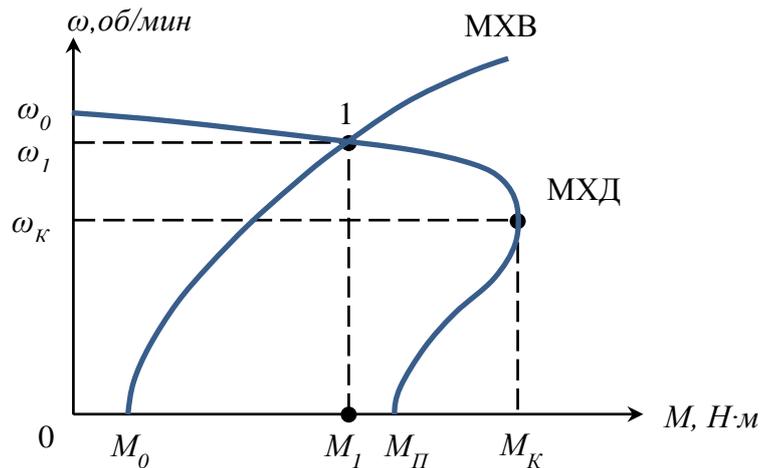


Рисунок 2.10 – К определению установившегося режима работы.

Обозначения на рисунке 2.10: ω_0 – синхронная скорость вращения электродвигателя (скорость соответствующая режиму холостого хода); ω_1, M_1 – скорость вращения и момент ВУ в установившемся режиме; M_{II}, M_0 – пусковой момент электродвигателя и момент трения ВУ; M_K, ω_K – критический (максимальный) момент электродвигателя и соответствующая ему угловая скорость.

Примером переходного режима работы (режима при котором параметры и характеристики системы меняются во времени) является пуск, остановка или изменение скорости вращения электропривода ($\omega \neq const$). При изменении скорости вращения электропривода меняется также мощность и производительность приводимого в движение механизма, а, следовательно, и состояние электромеханической системы.

Это можно проиллюстрировать на основе анализа основного уравнения движения электропривода:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_c, \quad (2.8)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции двигателя и производственного механизма, $\text{кг} \times \text{м}^2$;

ω – угловая скорость вращения электропривода, рад/с ;

$M_{дв}$ – момент, создаваемый электродвигателем, Нм ;

M_c – момент сопротивления производственного механизма, Нм .

В качестве другого примера переходного режима работы можно предложить нагрев электротермической системой некоторой среды (воды, воздуха, почвы и т.п.).

Математически процесс нагрева среды (вещества) до некоторого установившегося значения можно представить линейным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T_{\text{н}} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}}, \quad (2.9)$$

где $T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева – время, в течение которого температура нагреваемой среды от $\tau = 0$ достигла бы установившегося значения $\tau_{\text{уст}}$ при постоянном количестве теплоты, создаваемой электротермической системой ($Q = \text{const}$) и отсутствии теплоотдачи A в окружающую среду, с;

$\tau, \frac{d\tau}{dt}$ – мгновенное значение температуры нагреваемой среды и его производная по времени t , °С, °С /с;

$\tau_{\text{уст}}$ – установившееся значение температуры среды, °С.

$$T_{\text{н}} = \frac{C}{A}, \quad (2.10)$$

где C – теплоемкость среды (вещества), т.е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры среды (вещества) на 1°С, Дж/°С;

A – теплоотдача среды (вещества) – количество теплоты, отдаваемое нагреваемой средой (веществом) в окружающую среду в единицу времени при разности температур в 1°С, Дж/(с×°С).

С математической точки зрения разница режимов функционирования систем заключается в том, что установившиеся режимы описываются алгебраическими, а переходные – дифференциальными и интегро-дифференциальными уравнениями.

Проанализируем уравнение (2.8):

1) При пуске электродвигателя или изменении скорости вращения с меньшей на большую – $\frac{d\omega}{dt} > 0$, происходит увеличение скорости вращения электродвигателя ω , а следовательно и его мощности ($P_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} \times \omega$) до некоторых установившихся значений $\omega_{\text{уст}}$ и $P_{\text{уст}}$ (рисунок 2.11 а и б).

2) При остановке электродвигателя или изменении скорости вращения с большей на меньшую – происходит уменьшение скорости вращения до нуля (рисунок 2.12.а) или до некоторого меньшего значения (рисунок 2.12.б).

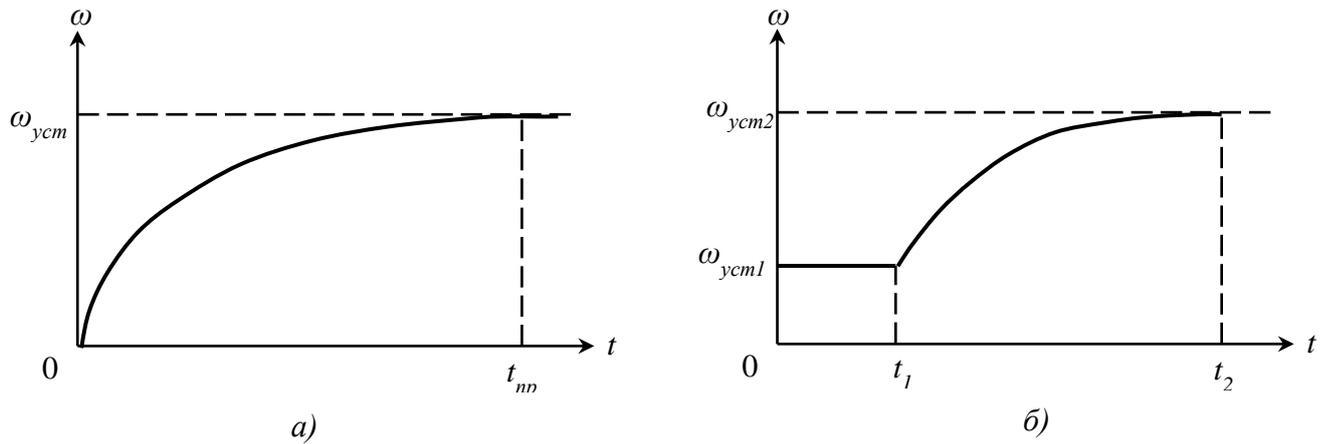


Рисунок 2.11 – Изменение скорости вращения электродвигателя: а) – при пуске электропривода, б) – при увеличении с меньшей $\omega_{уст1}$ на большую $\omega_{уст2}$.

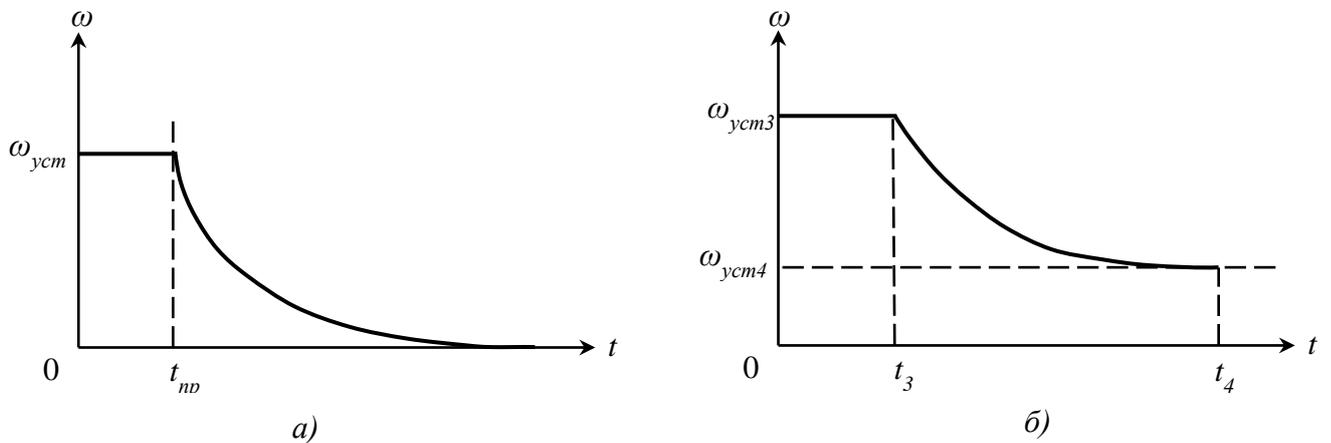


Рисунок 2.12 – Изменение скорости вращения электродвигателя: а) – при остановке (торможении), б) – при уменьшении с большей $\omega_{уст3}$ на меньшую $\omega_{уст4}$.

Анализ переходного режима электротермической (электронагревательной) системы, описываемого уравнением (2.9) приведен далее в п. 3.2 настоящего пособия.

Классификация режимов работы систем энергообеспечения достаточно обширная. В данном учебном пособии ограничимся делением режимов функционирования вышеуказанных систем в зависимости от требований технологического процесса (способа управления системой). По этому признаку, режимы работы электроприводов вентиляторов, насосов, большей части кормоприготовительных машин можно отнести к *продолжительным (длительным)*.

По определению, продолжительный режим работы при низкой нагрузке P_H , длится столько времени, что температура всех частей электродвигателя достигает некоторой установившейся температуры τ_y (рисунок 2.13).

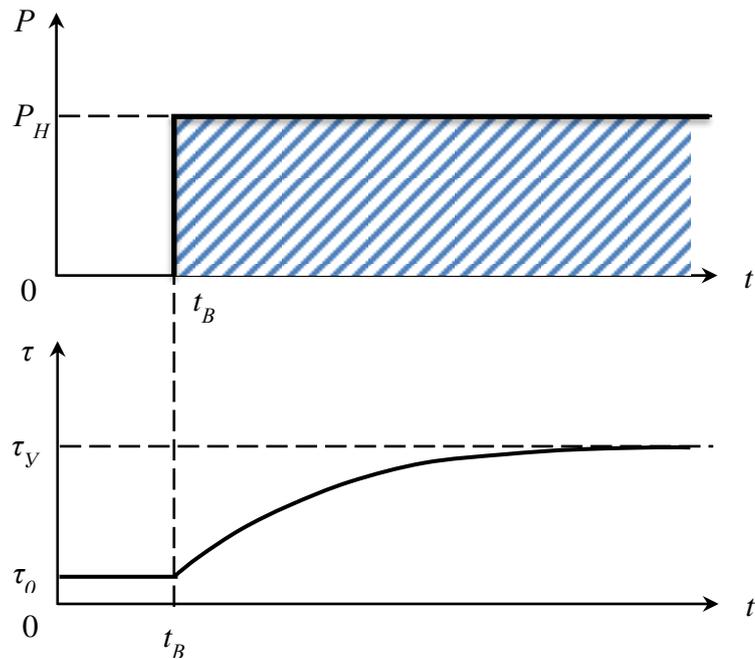


Рисунок 2.13 – Зависимость мощности на валу электродвигателя P и температуры τ от времени в продолжительном режиме работы

Если технологический процесс не является непрерывным, т.е. рабочие циклы в нем чередуются с паузами (открытие и закрытие различных задвижек, ворот и затворов, подъем и перемещение грузов и т.д.), в зависимости от времени рабочего цикла $t_{Ц}$ и паузы $t_{П}$, режимы функционирования энерготехнологических систем могут быть *кратковременными* или *повторно-кратковременными*. Графически эти режимы можно представить следующим образом (рисунки 2.14 и 2.15).

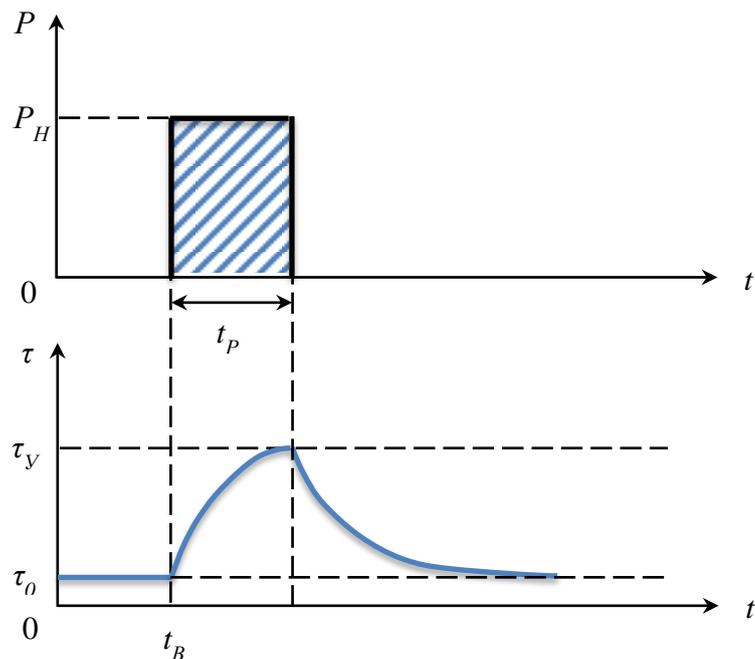


Рисунок 2.14 – Зависимость мощности на валу электродвигателя P и температуры τ от времени в кратковременном режиме работы

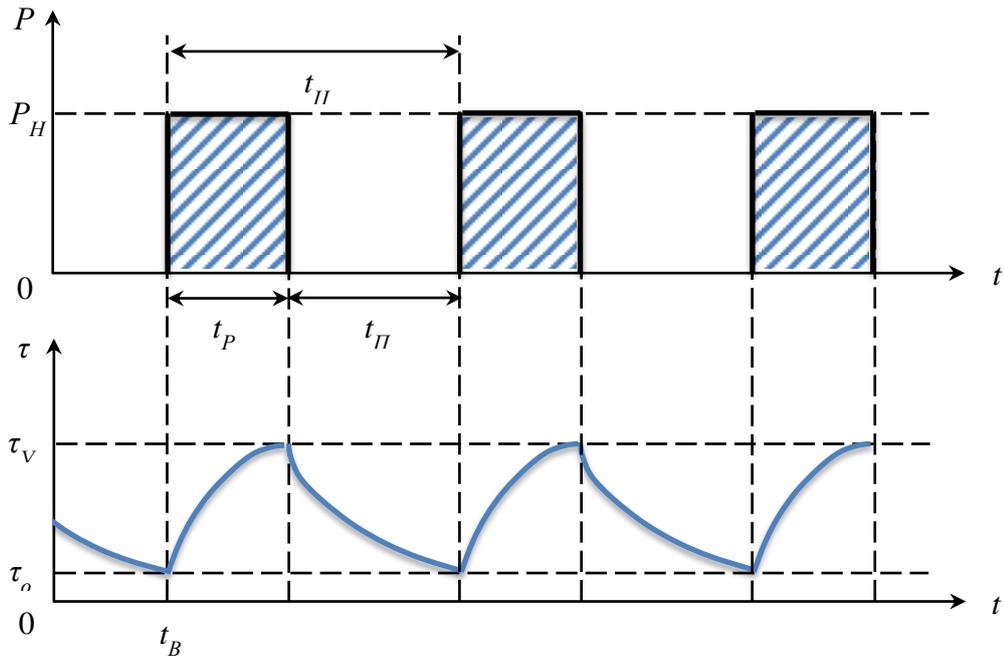


Рисунок 2.15 – Зависимость мощности на валу электродвигателя P и температуры τ от времени в повторно-кратковременном режиме работы

Пояснения к рисункам: t_P – время работы; t_{II} – время паузы; $t_{Ц}$ – время цикла; τ_y – установившаяся температура; τ_0 – температура окружающей среды.

Двигатели, предназначенные для кратковременного режима работы, выпускаются с нормированной длительностью работы 10, 30, 60 и 90 минут.

Из представленных рисунков видно, что разница между рассматриваемыми режимами в том, что в повторно-кратковременном режиме за время паузы t_{II} температура частей электродвигателя не успевает достичь температуры окружающей среды.

Этот режим характеризуется относительной величиной продолжительности включения.

$$ПВ = \frac{t_P}{t_P + t_{II}} \cdot 100\%. \quad (2.11)$$

Основными значениями $ПВ$, на которые рассчитываются выпускаемые электродвигатели, являются 25% и 40%.

В повторно-кратковременном режиме работают практически все электропривода подъемно-транспортных (крановых) механизмов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «состояние системы». Напишите и прокомментируйте общее математическое выражение состояния системы.
2. Представьте систему, состоящую из конкретного числа элементов, и напишите математическое выражение состояния этой системы.
3. Дайте определение понятию «функционирование системы», изобразите и прокомментируйте фазовую траекторию ее движения.
4. Приведите пример функционирования энергетической системы, состоящей не менее чем из трех подсистем или элементов.
5. Дайте определение понятию «развитие системы». В чем заключается существенная разница между простым функционированием системы и ее развитием.
6. Назовите и дайте характеристику режимам функционирования энергетических систем. Прокомментируйте режимы функционирования электромеханической системы.
7. Проанализируйте переходные режимы функционирования электромеханической системы (системы электропривода).
8. Проанализируйте переходной режим работы электронагревательной системы.
9. Проведите сравнение кратковременного и повторно-кратковременного режима работы системы электропривода.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

3.1. Общие сведения о моделях и моделировании

Проектирование и создание реальных систем различного назначения, в том числе и систем энергообеспечения, как правило, начинается с разработки их моделей (моделирования). Это позволяет существенно сократить временные, материальные и финансовые затраты на создание этих систем.

Модель системы – это специальный объект, в некоторых отношениях заменяющий оригинал (саму систему). Принципиально не существует модели, которая могла бы быть полным эквивалентом оригинала, она лишь с определенной степенью точности отражает некоторые (основные) его стороны (параметры, характеристики, режимы работы и т.д.).

Модели подразделяются на два больших класса: *физические* и *информационные (абстрактные)* [18].

Физические модели формируются из совокупности материальных объектов, как правило, меньших размеров.

Например, при проектировании самолета создают его физическую модель (в десятки раз меньшего размера, чем оригинал), и обдувают его потоком воздуха в аэродинамической трубе. Таким образом, создавая условия близкие к реальным при полете самолета. При проектировании гидроэлектростанций (ГЭС) также создаются физические модели всех ее элементов, и в специальных бассейнах формируются потоки воды близкие реальным.

Информационная (абстрактная) модель – это описание реальной системы на каком-либо языке. Абстрактность модели проявляется в том, что ее компонентами являются понятия, а не физические элементы (например, словесное описание, чертежи, графики, таблицы, алгоритмы или программы, математические описания).

Среди абстрактных моделей выделяют очень важную разновидность – *математические модели*, представляющие собой совокупность формул, уравнений и логических условий, позволяющие описывать процессы в реальных системах.

В зависимости от характера изучаемых процессов в системе все виды моделирования могут быть разделены на детерминированные и стохастические (вероятностные), статические и динамические, дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные [17, 7].

Классификация математических моделей достаточно наглядно представлена на рисунке 3.1.

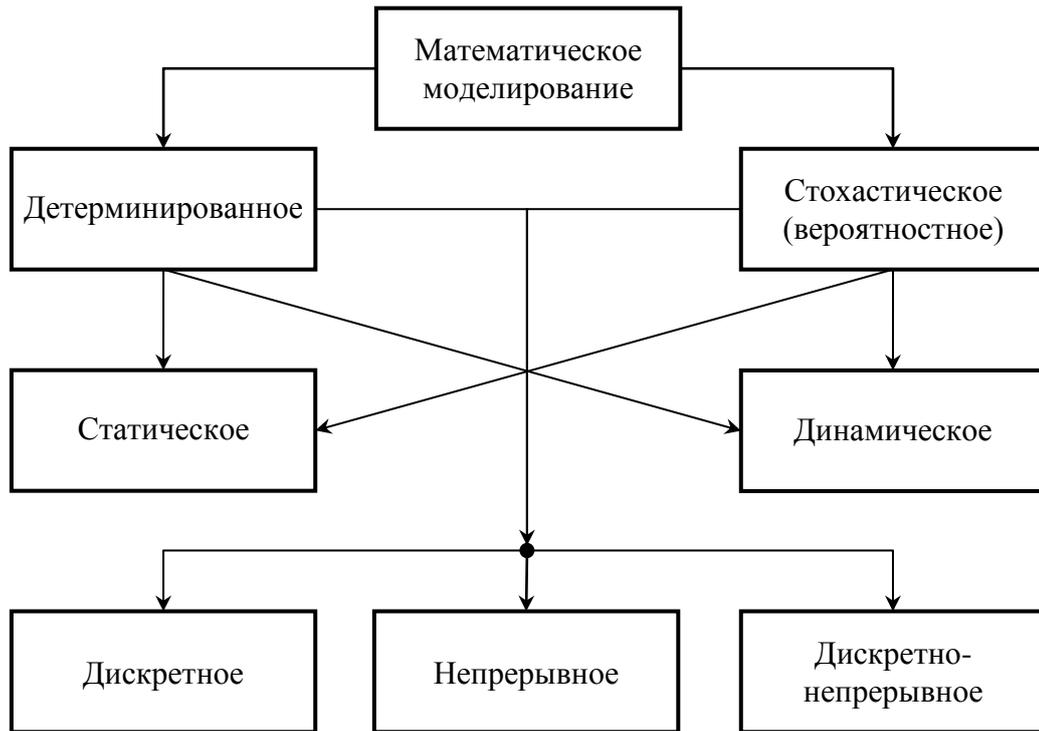


Рисунок 3.1 – Классификация математических моделей

Детерминированное моделирование отображает процессы, в которых предполагается отсутствие каких-либо случайных воздействий. Детерминированные модели характеризуются тем, что знание их параметров в некотором интервале времени позволяет полностью определить динамику этих моделей вне этого интервала. Если модели этого типа достаточно просты, их можно исследовать аналитическими методами.

Стохастическое (вероятностное) моделирование отображает вероятностные процессы и события. В этом случае анализируется ряд реализаций случайного процесса, и оцениваются его вероятностные характеристики (математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, корреляционная функция и др.). Этот тип моделирования позволяет более точно воспроизвести процессы, происходящие в реальных объектах.

Статическое моделирование служит для описания состояния объекта в установившемся режиме, а *динамическое* моделирование отражает поведение объекта во времени, т.е. описывает переходы из одного установившегося режима в другой.

Дискретное моделирование служит для описания прерывающихся процессов, а *непрерывное* моделирование, соответственно, применяется для описания непрерывных процессов. В дискретном моделировании

функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий. Момент времени, в который происходит событие, знаменует собой изменение состояния системы. Комбинацию дискретных и непрерывных процессов отражает *дискретно-непрерывное* моделирование.

В качестве примера разработаем математическую модель электрической цепи постоянного тока с активным сопротивлением. При этом рассмотрим два варианта: вариант «А» (рисунок 3.2.а) и вариант «Б» (рисунок 3.2.б).

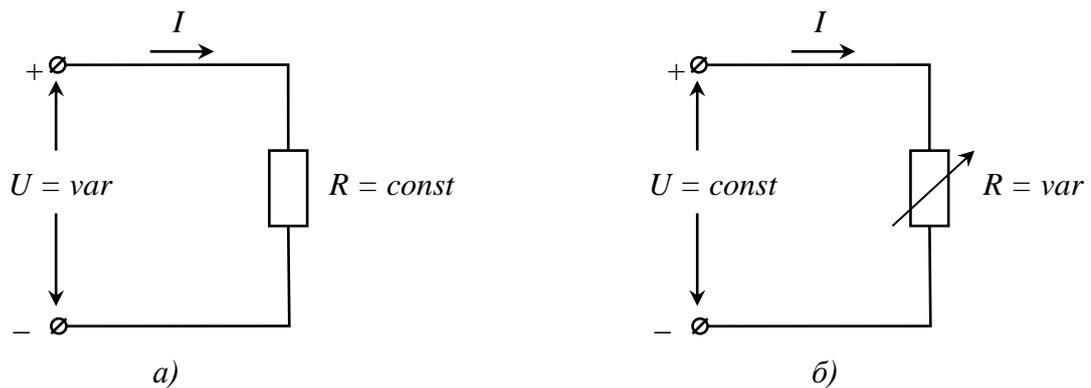


Рисунок 3.2 – К разработке математической модели электрической цепи постоянного тока:
а) вариант «А»; б) вариант «Б».

Вариант «А» предполагает изменение питающего напряжения U при постоянном значении активного сопротивления R .

Вариант «Б» предполагает дискретное или непрерывное изменение значения активного сопротивления R при постоянном (неизменном) значении питающего цепь напряжения.

Основой математических моделей в обоих вариантах являются формулы:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3.1)$$

$$P = U \times I, \quad (3.2)$$

где I – искомый ток, протекающий в цепи, А;

U , R – величины питающего напряжения и сопротивление цепи соответственно, В, Ом;

P – величина мощности, выделяемая на активном сопротивлении, Вт.

Представим математические модели цепи в виде формул и моделирующих алгоритмов.

Расчетные формулы для варианта «А»:

$$I_i = \frac{U_i}{R}, \quad (3.3)$$

$$P_i = U_i \times I_i, \quad (3.4)$$

Расчетные формулы для варианта «Б»:

$$I_i = \frac{U}{R_i}, \quad (3.5)$$

$$P_i = U \times I_i, \quad (3.6)$$

где i – порядковые номера исходных и расчетных значений величин напряжения, сопротивления, тока и мощности.

Под *моделирующим алгоритмом* следует понимать последовательность действий, производимых для вычисления по тем или иным математическим выражениям и приводящих к решению поставленной задачи в виде получения конечных результатов. Разработка алгоритмов является достаточно сложной и кропотливой работой, требующей определенных навыков.

В моделирующих алгоритмах для решения задач анализа (проведения исследований) часто используются *массивы одноименных исходных данных*, позволяющие производить многократные вычисления в циклах. В зависимости от организации вычислительного процесса алгоритмы моделирования могут быть линейной, ветвящейся (разветвляющейся) и циклической структуры. Как правило, алгоритмы изображаются в виде блок-схем.

Моделирующие алгоритмы для решения задачи по вариантам «А» и «Б» представлены на рисунке 3.3.

Некоторые пояснения к алгоритмам:

1. Оба алгоритма имеют циклическую структуру, позволяющую производить многократные вычисления по одним и тем же формулам. В нашем случае вычисления производятся пять раз (параметр цикла i меняется от одного до пяти).

2. В блоках «2» алгоритмов вводятся различные массивы исходных данных (в варианте «А» – массив U , в варианте «Б» – массив R).

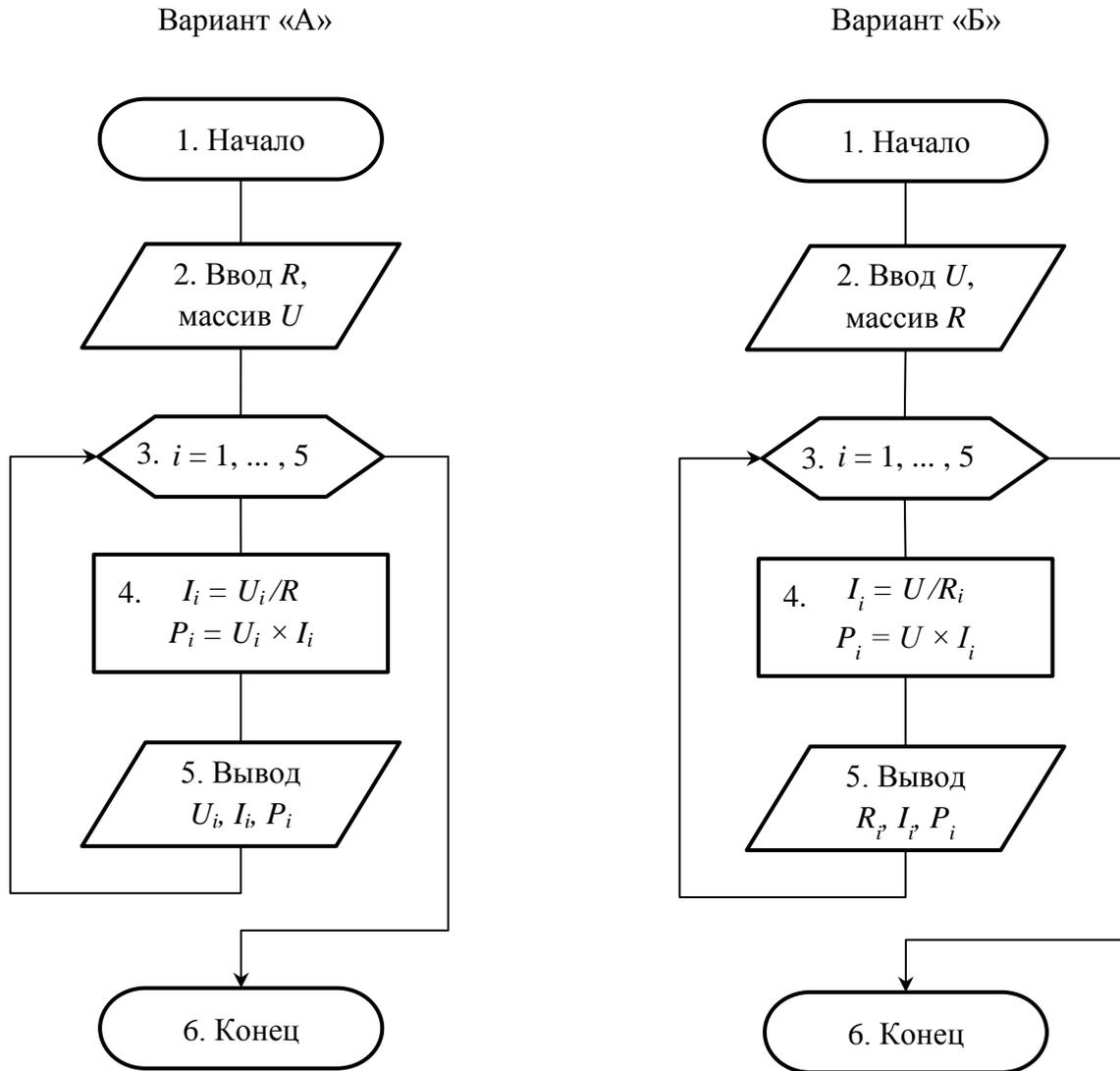


Рисунок 3.3 – Моделирующие алгоритмы решения задачи по вариантам «А» и «Б»

По разработанным моделирующим алгоритмам составляются программы на каком-либо алгоритмическом языке (БЭЙСИК, ФОРТРАН, PL-1, ПАСКАЛЬ и др.) или используются пакеты прикладных программ (подпрограмм), если они существуют. Далее программы реализуются на компьютере. Наиболее удобной формой представления результатов моделирования являются таблицы, графики и диаграммы.

Представим результаты расчета для варианта «А» при условии $R = const = 10 \text{ Ом}$ в табличной (таблица 3.1) и графической (рисунок 3.4) формах.

Таблица 3.1 – Зависимость тока и мощности в электрической цепи от питающего напряжения.

i	1	2	3	4	5
$U_i, \text{В}$	220	190	160	130	100
$I_i, \text{А}$	22	19	16	13	10
$P_i, \text{Вт}$	4840	3610	2560	1690	1000

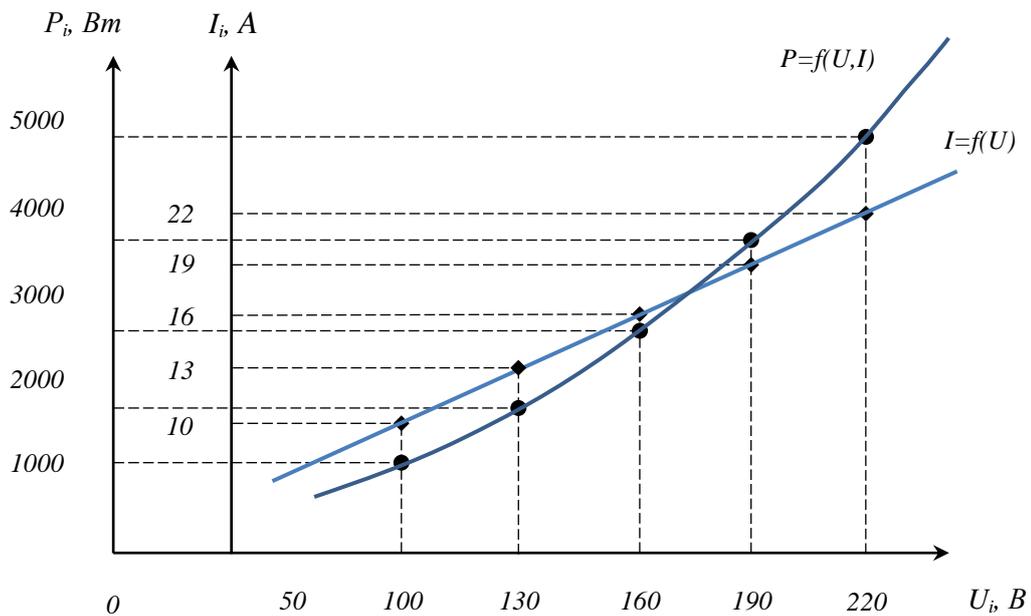


Рисунок 3.4 – Графическая интерпретация $I=f(U)$ и $P=f(U, I)$

Аналогичным образом можно представить результаты для варианта «Б». Как наглядно видно из рисунка 3.4 зависимость $I = f(U)$ носит линейный характер, а зависимость $P = f(U, I)$ – нелинейный.

В соответствии в предложенной выше классификацией математическая модель электрической цепи является детерминированной и статической.

В качестве другого примера представим математическую модель установившегося режима работы электропривода ВУ (графическая интерпретация режима представлена на рисунке 2.6 настоящего пособия). Модель представляет собой систему алгебраических уравнений (3.7).

$$\begin{cases} M_{\text{д}} = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S}} \\ M_{\text{в}} = M_0 + K_{\text{м}} \cdot \omega_{\text{в}}^2 \\ M_{\text{д}} = M_{\text{в}} \end{cases} \quad (3.7)$$

где $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – скольжение асинхронного электродвигателя;

$S_{\text{к}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{к}}}{\omega_0}$ – величина критического скольжения.

Решение системы уравнений позволит получить точки пересечения механических характеристик электродвигателя и ВУ, характеризующих установившиеся режимы работы электропривода.

Представленные примеры могут служить основой для приобретения навыков разработки и реализации математических моделей установившихся режимов работы различных видов энерготехнологических систем, таких как электропривода поточных линий, электронагревательные установки, системы освещения производственных помещений и т.д.

3.2. Моделирование динамического режима работы электронагревательной системы

Как уже было показано в п.2.3 процесс нагрева (динамический режим работы электронагревательной системы) описывается дифференциальным уравнением вида (3.8), представляющее собой линейное уравнение первого порядка. Такое уравнение имеет аналитическое решение следующего вида:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_0 \cdot e^{-t/T_H}, \quad (3.8)$$

где τ_0 – начальная температура нагреваемой среды, °С;

$\tau_{\text{уст}}$ – установившаяся температура нагреваемой среды, т.е. температура до которой необходимо нагреть среду, °С;

t – текущее время нагрева.

Предположим, что выражение (3.8) представляет собой расчетную математическую модель процесса нагрева воздуха в некотором помещении.

Постоянная времени нагрева T_H в данном случае является некоторым обобщающим параметром, характеризующим как саму электронагревательную систему (ЭНС), в частности ее мощность, так и объем нагреваемого воздуха.

Взаимосвязь между установившейся температурой окружающей среды и постоянной времени нагрева можно представить следующим образом

$$T_H \approx \frac{\tau_{уст}}{4 \div 5}. \quad (3.9)$$

Моделирующий алгоритм для анализа динамического режима рассматриваемой системы представим на рисунке 3.5.

Пояснения к алгоритму:

1. Данный алгоритм представляет собой *алгоритм с вложенными циклами*, причем цикл по параметру j вложен в цикл по параметру i .
2. Цикл по параметру i является *внешним*, цикл по параметру j – *внутренним*.
3. Внутри внутреннего цикла есть *ветвление*, создаваемое логическим блоком «8», которое формирует цикл, позволяющий полностью смоделировать кривую нагрева.
4. Интервал времени Δt является *шагом моделирования* и выбирается следующим образом [8]:

$$\Delta t \approx \frac{T_H}{3 \div 5}. \quad (3.10)$$

Для получения достоверных результатов при моделировании систем, описываемых сложными математическими выражениями, выбор величины Δt определяется опытным путем (на основании сравнения результатов при различных величинах Δt).

В нашем конкретном случае примем следующие исходные данные для моделирования: τ_0 , массив $\tau_{уст}$, массив T_H (под *массивом данных* понимается некоторая совокупность одноименных величин).

Предположим, что имеются зависимости $T_H = f(P)$ для трех значений установившейся температуры $\tau_{уст,j}$, где T_H – постоянная времени и P – мощность ЭНС соответственно. Каждая зависимость представлена пятью точками в виде таблицы 3.2.

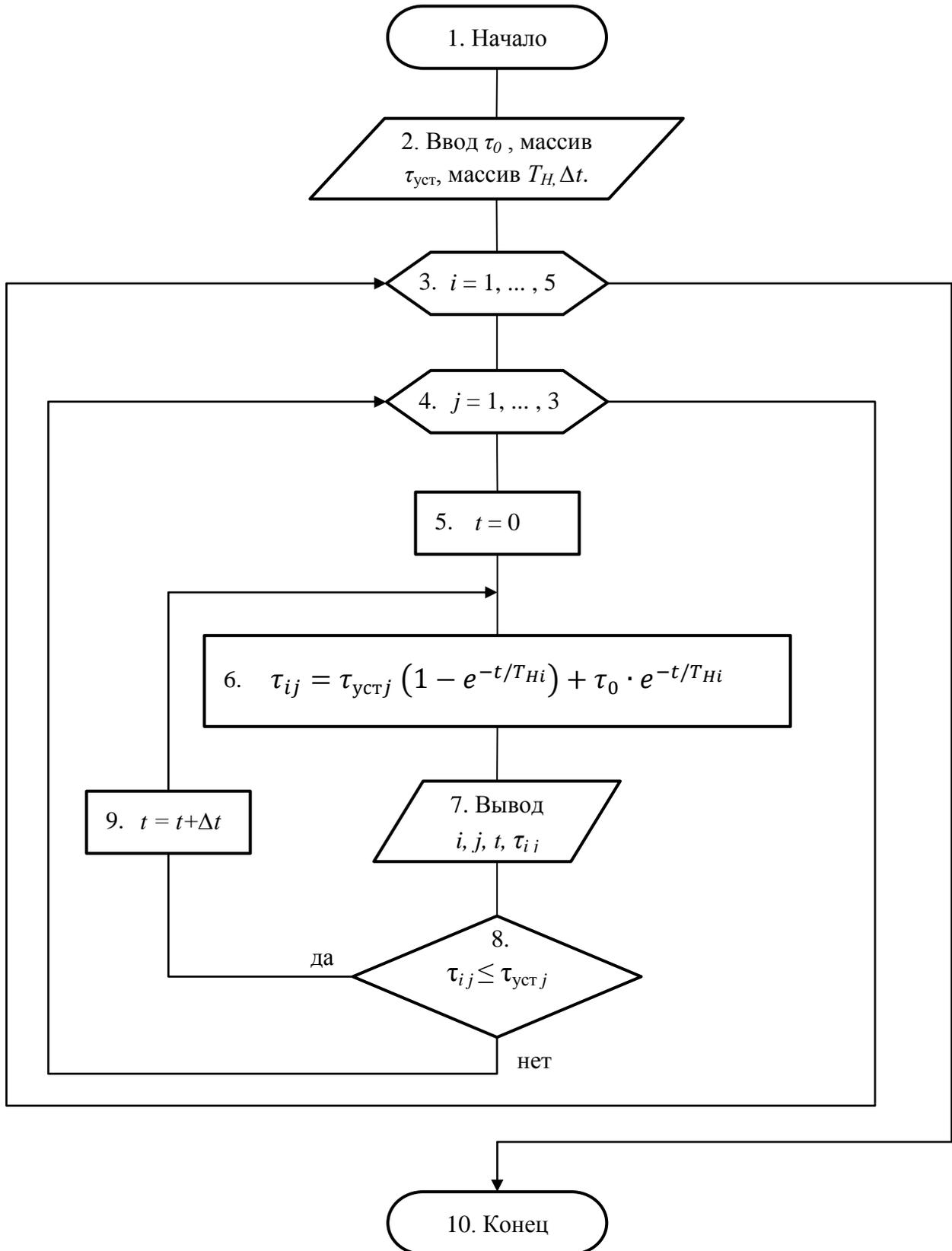


Рисунок 3.5 – Моделирующий алгоритм анализа динамического режима ЭНС

Таблица 3.2 – Исходные данные для моделирования ЭНС.

i	1	2	3	4	5
P_i , кВт	5	4	3	2	1
T_{Hi} , мин	4	5,2	6,5	8	10
j	1	2	3	–	–
$\tau_{уст,j}$, °С	20	25	30	–	–

В результате моделирования получаем кривые нагрева для данного помещения, т.е. зависимость температуры от времени нагрева $\tau = f(t)$ (рисунок 3.6).

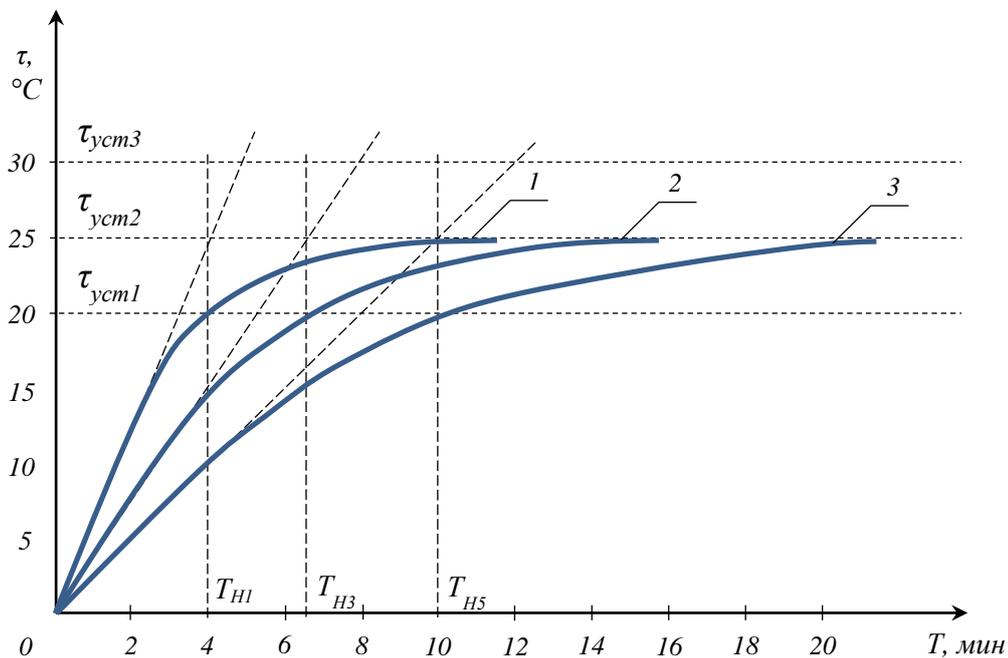


Рисунок 3.6 – Результаты моделирования ЭНС

Кривые нагрева 1, 2 и 3 соответствуют нагреву воздуха в помещении от $\tau_0 = 0^\circ\text{C}$ до $\tau_{уст} = 25^\circ\text{C}$ электронагревательными системами мощностью $P = 5, 3$ и 1 кВт (см. табл. 3.2). Как следует из теории автоматического управления время динамического режима (переходного процесса) системы $t_{nn} \approx (3 \div 4)T$, где T – постоянная времени системы, в нашем случае это постоянная времени нагрева воздуха ($T = T_H$). Графически постоянные времени нагрева T_{H1} , T_{H3} и T_{H5} определяются как касательные к кривым нагрева 1, 2 и 3.

Всего в процессе моделирования получается семейство из 15 кривых нагрева (по 5 кривых на каждую из 3-х установившихся температур $\tau_{уст}$). Результаты моделирования позволят выбрать оптимальное управленческое решение по созданию или реконструкции

электронагревательной системы. В нашем случае это может быть выбор оптимального соотношения между динамическими характеристиками системы и ее энергосберегающими показателями.

3.3. Вероятностное моделирование энерготехнологических поточных линий

Энерготехнологические поточные линии (ЭТЛ), предназначенные для массового выпуска какого-либо вида продукции, являются важнейшими разновидностями сложных технологических систем, работающих в условиях воздействия многочисленных случайных факторов. Отличительной особенностью этих систем является большое разнообразие используемого в них технологического оборудования и достаточно сложные связи между этим оборудованием [2].

Исходя из вышесказанного, следует, что наиболее эффективным методом, позволяющим детально исследовать ЭТЛ, является *метод вероятностного моделирования*, который иногда называют методом статистических испытаний или методом Монте-Карло. Этот метод позволяет исследовать любую систему энергообеспечения в самом общем виде для произвольных законов распределения случайных величин, как на входе-выходе, так и внутри системы.

В общем случае для моделирования случайных воздействий на ту или иную систему используют случайные события, дискретные и непрерывные случайные величины, векторы и процессы. Для этой цели в средствах вычислительной техники существуют специальные датчики (генераторы) случайных чисел. Основным недостатком метода вероятностного моделирования является частный характер получаемых результатов, не раскрывающий общей зависимости между отдельными характеристиками и параметрами системы.

Объектом нашего рассмотрения будет некоторый производственный цех, включающий в себя две параллельно работающие ЭТЛ и выпускающие одинаковую продукцию.

Предположим, что каждая ЭТЛ включает в себя n последовательно осуществляемых энерготехнологических процессов – $ЭТП_{11}, \dots, ЭТП_{1n}, ЭТП_{21}, \dots, ЭТП_{2n}$.

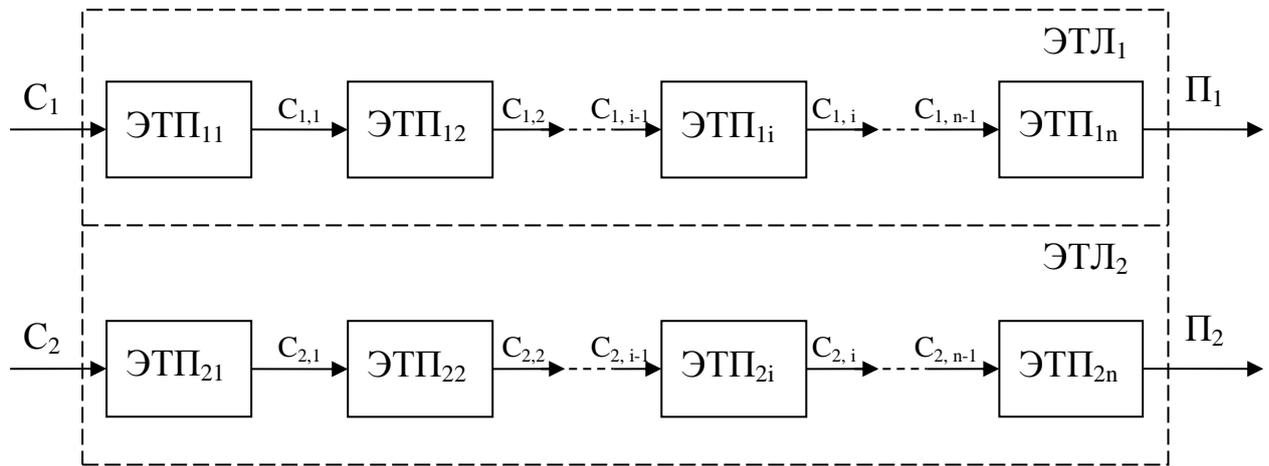


Рисунок 3.7 – Структурная схема производственного цеха

где C_1, C_2, P_1, P_2 – объемы сырья и готовой продукции для первой и второй ЭТЛ соответственно; $C_{1,i}, C_{2,i}$ – некоторое промежуточное состояние сырья, находящегося в стадии переработки (полуфабриката) для первой и второй ЭТЛ.

Параллельно работающие линии существенно повышают надежность, а, следовательно, и производительность цеха [12].

Целью исследования будет оценка повышения эффективности функционирования цеха вследствие замены одной поточной линии двумя, работающими параллельно. При этом суммарная производительность линий в обоих вариантах одинаковая.

Учитывая вероятностный характер производственных процессов, протекающих в поточных линиях, в качестве основного экономического критерия эффективности функционирования ЭТЛ следует принять *математическое ожидание относительной величины компенсации недополученного дохода от реализации дополнительно произведенной продукции*.

$$MO \left[\frac{\Delta D_{ЭТЛ}}{D_{ЭТЛ}} \right] \cdot 100\% = MO \left[\frac{\Delta P_{ЭТЛ}}{P_{ЭТЛ}} \right] \cdot 100\%, \quad (3.11)$$

где $D_{ЭТЛ}$ – доход, полученный от реализации реального объема производимой продукции одной энерготехнологической линией (ЭТЛ);

$\Delta D_{ЭТЛ}$ – величина компенсации недополученного дохода, за счет реализации дополнительно произведенной продукции при функционировании двух линий;

$P_{ЭТЛ}$ – объем продукции, выпускаемый одной ЭТЛ;

$\Delta P_{\text{ЭТЛ}}$ – компенсация объема невыпущенной продукции при функционировании двух линий.

Компенсация объема невыпущенной продукции обеспечивается, наряду с параллельным включением ЭТЛ, повышением эффективности функционирования отдельных энергетических установок (ЭУ) обеих поточных линий. Важнейшими показателями технической эффективности отдельных ЭУ и ЭТЛ в целом являются их надежность и ремонтпригодность.

Формула (3.11) справедлива для любого числа параллельно работающих поточных линий и в общем случае приобретает следующий вид:

$$MO \left[\frac{\Delta D}{D} \right] \cdot 100\% = MO \left[\frac{\Delta P}{P} \right] \cdot 100\% , \quad (3.12)$$

где $D, \Delta D$ – доход, полученный от реализации продукции, и величина компенсации недополученного дохода производственным цехом;
 $P, \Delta P$ – общий объем выпускаемой продукции и его компенсация соответственно.

С математической точки зрения оценку надежности и ремонтпригодности ЭТЛ можно отнести к задачам массового обслуживания. В теории массового обслуживания [5] показано, что пропускная способность (в нашем случае – производительность ЭТЛ) и другие характеристики системы массового обслуживания сравнительно мало зависят от вида закона распределения времени обслуживания, а зависят, главным образом, от его среднего значения, т.е. математического ожидания времени обслуживания $MO_{t.об}$. Поэтому чаще всего пользуются допущением, что *время обслуживания распределено по показательному закону*.

Сделав допущение о пуассоновском характере потока событий, происходящих в поточных линиях, и соответственно о показательном (экспоненциальном) законе распределения времени их обслуживания и ремонта, для решения вышеуказанных задач можно применить математический аппарат *марковских случайных процессов*.

Случайный процесс является марковским, если для любого момента времени t_i вероятностные характеристики процесса в будущем (т.е. для моментов времени $t_{i+1}, t_{i+2}, \dots, t_{i+n}$) зависят от его состояния только в момент времени t_i и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние [5]. Иными словами, это процесс, не учитывающий «предысторию».

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать марковские случайные процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем. Исходными предпосылками при решении задачи оценки надежности ЭТЛ являются следующие состояния системы:

1. Каждая поточная линия в любой случайный момент времени может выйти из строя.
2. После выхода линии из строя мгновенно начинается ее ремонт, продолжающийся случайное, заранее неизвестное, время.

Обозначим четыре возможных состояния системы, состоящей из двух параллельно работающих ЭТЛ:

- S_0 – обе ЭТЛ исправны;
- S_1 – первая линия ремонтируется, вторая исправна;
- S_2 – вторая линия ремонтируется, первая исправна;
- S_3 – обе линии ремонтируются.

Переходы системы из состояния в состояние происходит практически мгновенно, в случайные моменты времени выхода из строя той или иной линии или окончания процесса их ремонта.

При анализе случайных процессов с дискретными состояниями удобно пользоваться некоторой геометрической схемой, называемой *графом состояний*. Для нашего случая граф состояний будет иметь следующий вид (рисунок 3.8).

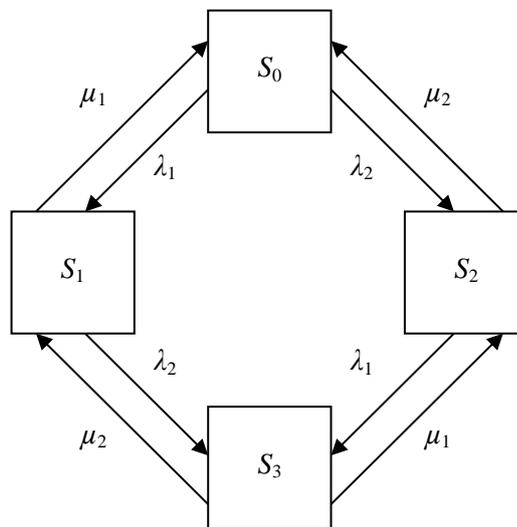


Рисунок 3.8 – Граф состояний процесса функционирования системы, состоящей из двух параллельно работающих ЭТЛ

Стрелка на схеме, направленная из состояния S_0 в S_1 , означает переход в момент отказа какого-либо узла в первой поточной линии.

Стрелка, направленная обратно, из состояния S_1 в S_0 – переход в момент окончания ремонта этого узла. Направления остальных стрелок объясняются аналогично.

Интенсивность потоков событий, переводящих систему из одного состояния в другое, будем вычислять, предполагая, что среднее время ремонта ЭТЛ не зависит от того, ремонтируется одна линия или обе одновременно. Это справедливо для случая, если ремонтом каждой линии заняты отдельные бригады специалистов.

Найдем все интенсивности потоков событий, переводящих систему из одного состояния в другое ($\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$). Интенсивность потоков событий λ_1 и λ_2 , представляющих собой безотказную работу соответствующей линии, можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{1}{t_{cp.б.p.1}}, \\ \lambda_2 &= \frac{1}{t_{cp.б.p.2}},\end{aligned}\tag{3.13}$$

где $t_{cp.б.p.1}$ – среднее время безотказной работы первой линии;
 $t_{cp.б.p.2}$ – среднее время безотказной работы второй линии.

Аналогичным образом определяем интенсивности потоков событий μ_1 и μ_2 , характеризующих процессы ремонта соответствующей линии:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \frac{1}{t_{cp.p.1}}, \\ \mu_2 &= \frac{1}{t_{cp.p.2}},\end{aligned}\tag{3.14}$$

где $t_{cp.p.1}, t_{cp.p.2}$ – среднее время ремонта первой и второй линии соответственно.

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что переход системы из состояния S_0 в состояние S_1 определяется интенсивностью потока событий λ_1 , из состояния S_0 в состояние S_2 – интенсивностью потока событий λ_2 . Обратные переходы определяются интенсивностями потоков событий μ_1 и μ_2 соответственно.

Имея в своем распоряжении размеченный граф состояний системы, в нашем случае производственного цеха, можно построить математическую модель процесса ее функционирования.

Построение математической модели в нашем конкретном случае представляет собой получение математических зависимостей,

позволяющих определить все *вероятности состояний системы* $P_i(t)$ как *функции времени*.

Вероятностью i -го состояния $P_i(t)$ называют вероятность того, что в момент времени t система будет находиться в состоянии S_i . При этом очевидно, что для любого момента времени сумма всех вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1, \quad (3.15)$$

где i – номер состояния системы;
 n – число возможных состояний.

Для нахождения всех вероятностей состояния $P_i(t)$, как функций времени, составляются и решаются особого вида дифференциальные уравнения (уравнения Колмогорова), в которых неизвестными функциями являются эти вероятности.

Общие правила составления этих уравнений представлены в [5, 6]. В левой части каждого уравнения записываются производные вероятностей всех возможных состояний системы $\left(\frac{\partial P_i}{\partial t}\right)$. Правые части уравнений представляют собой суммы произведений вероятностей всех состояний, из которых идут стрелки в данное состояние, на интенсивности соответствующих потоков событий, за вычетом суммарной интенсивности всех потоков, выводящих систему из данного состояния, умноженной на вероятность данного i -го состояния.

Пользуясь этим правилом, составим систему дифференциальных уравнений (3.15) для нашего конкретного случая (рисунок 3.8):

$$\begin{cases} \frac{\partial P_0}{\partial t} = \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 - (\lambda_1 + \lambda_2) P_0 \\ \frac{\partial P_1}{\partial t} = \lambda_1 P_0 + \mu_2 P_3 - (\lambda_2 + \mu_1) P_1 \\ \frac{\partial P_2}{\partial t} = \lambda_2 P_0 + \mu_1 P_3 - (\lambda_1 + \mu_2) P_2 \\ \frac{\partial P_3}{\partial t} = \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 - (\mu_1 + \mu_2) P_3 \end{cases} \quad (3.16)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (3.16) и нахождения вероятностей состояний рассматриваемой системы необходимо задать начальные условия. Удобнее всего решать их при начальных условиях $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0, P_2(0) = 0, P_3(0) = 0,$

соответствующей ситуации, когда в начальный момент обе линии исправны.

Системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами имеют аналитическое решение, когда их число не превосходит трех. Если уравнений больше, их обычно решают численными методами с использованием ЭВМ. В настоящее время имеется много стандартных программ, реализующих различные численные методы. Одним из наиболее точных и часто используемых численных методов является метод Рунге-Кутты.

Таким образом, решая систему уравнений (3.16), найдем все вероятности состояний рассматриваемой системы как функции времени. Так как эта система, представляющая собой совокупность двух параллельно работающих технологических поточных линий, работает достаточно длительное время, возникает необходимость ответить на следующий вопрос: что будет происходить с вероятностями состояний нашей системы, если время работы устремить к бесконечности ($t \rightarrow \infty$)?

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t), \quad (3.17)$$

где $i = 0, 1, 2, 3$ – номер состояний системы.

Если предел в выражении (3.16) существует и не зависит от начального состояния системы, вероятности P_0, P_1, P_2, P_3 будут являться *финальными вероятностями состояний* (финальная вероятность – это вероятность, характеризующая установившийся режим работы системы). Очевидно, что сумма этих вероятностей также будет равна единице:

$$\sum_{i=1}^4 P_i = 1. \quad (3.18)$$

Из теории случайных процессов следует, что если число состояний системы конечно и в общем случае равно величине n , и из каждого из них за конечное число шагов можно перейти в любое другое состояние, то финальные вероятности состояний существуют.

Дадим объяснения финальным вероятностям состояний. При $t \rightarrow \infty$ в системе S устанавливается предельный стационарный режим, в ходе которого система случайным образом меняет свои состояния, но их вероятность уже не зависит от времени. Таким образом, финальную вероятность i -того состояния системы можно определить как среднее относительное время пребывания системы в этом состоянии. Например, система S имеет четыре состояния S_0, S_1, S_2, S_3 и их финальные вероятности соответственно равны $P_0 = 0,5, P_1 = 0,2, P_2 = 0,2, P_3 = 0,1$.

Это означает, что в предельном стационарном режиме система в среднем половину времени находится в состоянии S_0 , две десятых – в состоянии S_1 , две десятых – в состоянии S_2 и одну десятую времени – в состоянии S_3 .

Так как вероятности состояний при $t \rightarrow \infty$ постоянны, то их производные равны нулю. Это означает, что для определения финальных вероятностей нужно все левые части в уравнениях (3.16) приравнять к нулю и решить полученную систему уже не дифференциальных, а линейных алгебраических уравнений.

После несложных преобразований системы уравнений (3.16) система линейных алгебраических уравнений для финальных вероятностей состояний нашей системы примет следующий вид:

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2)P_0 = \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 \\ (\lambda_2 + \mu_1)P_1 = \lambda_1 P_0 + \mu_2 P_3 \\ (\lambda_1 + \mu_2)P_2 = \lambda_2 P_0 + \mu_1 P_3 \\ (\mu_1 + \mu_2)P_3 = \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 \end{cases} \quad (3.19)$$

Как видно, все уравнения системы (3.19) являются однозначными, т.е. не имеют свободного члена и значит, неизвестные определяются только с точностью до произвольного множителя. Поэтому следует воспользоваться так называемым нормировочным условием (3.20) и с его помощью решить систему уравнений.

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (3.20)$$

При этом одно любое из уравнений системы можно отбросить (оно вытекает как следствие из остальных).

Предположим, что система, состоящая из двух параллельно работающих ЭТЛ имеет следующие конкретные значения интенсивностей потоков событий $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 2$, $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 3$. Решим систему уравнений (3.19), отбросив четвертое уравнение системы, заменив его на нормировочное условие (3.20). Система уравнений приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} 3P_0 = 2P_1 + 3P_2 \\ 4P_1 = P_0 + 3P_3 \\ 4P_2 = 2P_0 + 2P_3 \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1 \end{cases} \quad (3.21)$$

Решив систему уравнений, получим следующие значения финальных вероятностей состояний: $P_0 = 0,4$; $P_1 = 0,2$; $P_2 = 0,27$; $P_3 = 0,13$.

Прокомментируем полученные результаты. В предельном стационарном режиме наша система в среднем 40% времени будет находиться в состоянии S_0 (обе линии исправны), 20% – в состоянии S_1 (первая линия ремонтируется, вторая работает), 27% – в состоянии S_2 (вторая линия ремонтируется, первая работает) и 13% – в состоянии S_3 (обе линии не исправны и находятся на ремонте). На основании полученных результатов можно подойти к оценке средней экономической эффективности функционирования предприятия, а именно определить некоторый средний доход (D) от реализации продукции, произведенной обоими ЭТЛ предприятия.

Воспользовавшись предложенной выше методикой, средний доход (математическое ожидание дохода) от реализации продукции можно определить следующим образом:

$$MO[D] = P_0 \cdot MO[D_0] + P_1 \cdot MO[D_1] + P_2 \cdot MO[D_2], \quad (3.22)$$

где $MO[D_0]$, $MO[D_1]$, $MO[D_2]$ – математические ожидания доходов производственного цеха при нахождении поточных линий в состояниях S_0 , S_1 и S_2 соответственно.

В качестве примера предположим, что цех в состоянии S_0 (обе линии исправны) приносит в течение некоторого рассматриваемого промежутка времени доход $MO[D_0] = 10$ условных единиц (у.е.), в состоянии S_1 – доход $MO[D_1] = 6$ у.е., в состоянии S_2 – доход $MO[D_2] = 4$ у.е., в состоянии S_3 – не приносит никакого дохода. Используя формулу (3.22) окончательно получим:

$$MO[D] = 0,4 \cdot 10 + 0,2 \cdot 6 + 0,27 \cdot 4 = 6,28 \text{ у.е.}$$

Исходя из вышеизложенного видно, что предлагаемая методика позволяет решать задачи повышения экономической эффективности различных предприятий, имеющих ЭТЛ.

Поскольку процессы, протекающие в ЭТЛ необходимо рассматривать как в пространстве, так и во времени, методик вероятностного моделирования проектируемых поточных линий базируется на использовании системно-процессного подхода [11].

3.4. Моделирование сервисных центров в энергетической сфере

В современных условиях на многих предприятиях эксплуатируются сложные энергетические и энерготехнологические системы. Обслуживание и ремонт таких систем силами энергетического персонала предприятий не всегда возможен. В связи с этим, достаточно

перспективным направлением является создание сервисных центров по обслуживанию и ремонту сложного оборудования систем энергообеспечения.

В соответствии с классификацией систем, приведенной в [4], вышеназванные сервисные центры можно отнести к системам массового обслуживания (СМО). Под массовым обслуживанием [8] понимают все виды обслуживания: производственного, транспортного, финансового и бытового. В нашем случае сервисные центры осуществляют обслуживание производственного энергетического оборудования предприятий.

При моделировании СМО необходимо различать следующие моменты:

- 1) Кого (что) обслуживают?
- 2) Кто (что) обслуживает?
- 3) По каким правилам происходит обслуживание?

Введем основные определения теории массового обслуживания [8]:

- 1) *Требование* – это запрос на удовлетворение некоторой потребности (в нашем случае потребностью может быть ремонт энергетического оборудования). Вместо термина «требование» иногда используют термины «клиент», «заявка», «вызов»;
- 2) *Обслуживание* – это удовлетворение этой потребности. В общем случае моменты поступления требований случайны, т.е. *факт появления требования – случайное событие*;
- 3) Последовательность этих событий будем называть *поток требований*. Поступившие требования нуждаются в обслуживании каким-либо устройством или человеком.
- 4) *Приборы* – это технические средства, осуществляющие обслуживание требований. Вместо термина «прибор» иногда используется термин «линия» или «канал»;
- 5) Поток требований, поступающих в обслуживающую систему, называется *входящим (входным) потоком*;
- 6) Поток обслуженных требований, покидающих систему, называется *выходящим (выходным) потоком*. Входные и выходные потоки в СМО представляют собой потоки случайных событий и обозначаются стрелками;
- 7) Первопричину возникновения требований, независимо от их физической природы будем называть *источником*.

Эффективность функционирования СМО описывается следующими показателями:

- *пропускная способность* системы (среднее количество заявок, обслуживаемых в единицу времени);
- *коэффициент использования* СМО (среднее число занятых каналов);
- *качество обслуживания* заявок (вероятность простоя системы, вероятность отказа в обслуживании, среднее число заявок в очереди и др.).

Наиболее простым вариантом при исследовании СМО является допущение о том, что случайный поток событий является *простейшим* (или *стационарным пуассоновским*) потоком. Название «пуассоновский» связано с тем, что число событий, попадающих на любой фиксированный интервал времени τ будет распределено по закону Пуассона [5].

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}, \quad (3.23)$$

где $P_m(\tau)$ – вероятность того, что за время τ произойдет ровно m событий;

λ – плотность потока событий (среднее число событий, приходящееся на единицу времени).

Следует отметить, что для стационарного потока характерна постоянная плотность на рассматриваемом интервале времени.

Графически стационарный пуассоновский поток событий можно представить в виде точек на числовой оси (рисунок 3.9).

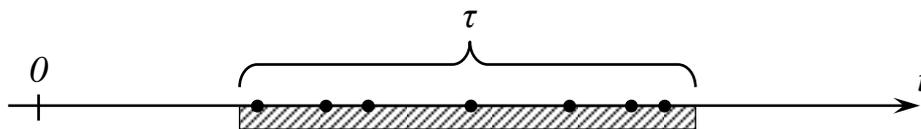


Рисунок 3.9 – Графическая интерпретация стационарного пуассоновского потока

Математическое ожидание числа событий на интервале τ можно определить следующим образом

$$MO[m] = \lambda \cdot \tau. \quad (3.24)$$

Каждая СМО объединяет в себе некоторое количество параллельно работающих технических устройств называемых *каналами обслуживания*.

Обобщенная структура модели функционирования СМО представлена на рисунке 3.10.

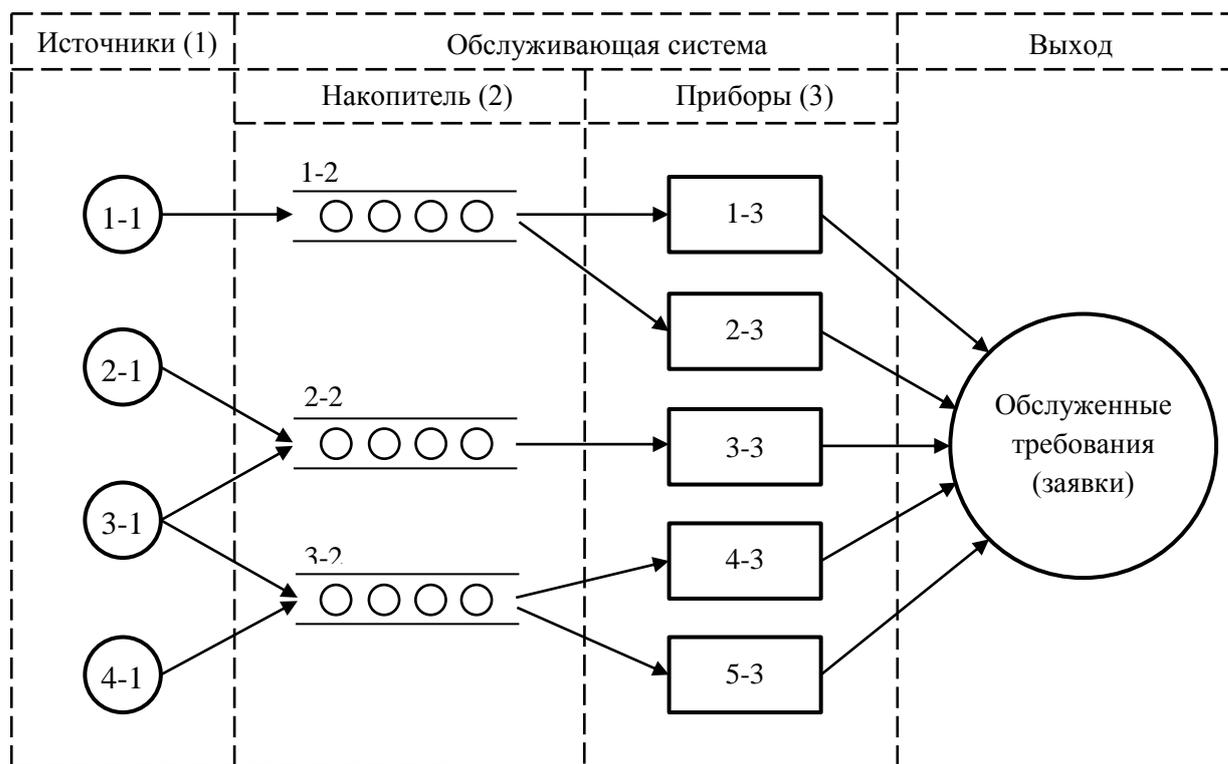


Рисунок 3.10 – Обобщенная структура модели СМО

Представленная модель СМО является пятиканальной. Источниками требований в сфере энергетики может быть вышедшее из строя электрооборудование на том или ином предприятии.

Поскольку обслуживающие приборы имеют ограниченную пропускную способность, в *обслуживающей системе* могут возникать *очереди* из требований.

Поскольку время обслуживания конкретным прибором $t_{\text{обсл.}}$ является случайной величиной – требованиям приходится ожидать пока не освободится обслуживающий прибор. В этом случае требования находятся в *накопителе*, образуя одну или несколько очередей (1-2, 2-2, 3-2, рисунок 3.10).

Введем понятие – *время нахождения требования (заявки) в системе* ($t_{\text{сист.}}$).

$$t_{\text{сист.}} = t_{\text{оч.}} + t_{\text{обсл.}}, \quad (3.25)$$

где $t_{\text{оч.}}$ – время нахождения заявки в очереди, час;

$t_{\text{обсл.}}$ – время обслуживания заявки, час.

Алгоритм постановки требований в очередь будем называть *правилом формирования очереди*, алгоритм взаимодействия обслуживающих приборов с очередью – *правилом обслуживания* или *дисциплиной обслуживания*.

Воспользовавшись изложенными выше основами теории массового обслуживания, построим абстрактную модель сервисного центра по обслуживанию и ремонту силового электрооборудования (СЭО) (электроприводов различных производственных механизмов) трех предприятий. Абстрактную модель будем формировать в виде функциональной схемы (рисунок 3.11). Предположим, что обслуживающая система состоит из шести обслуживающих приборов.

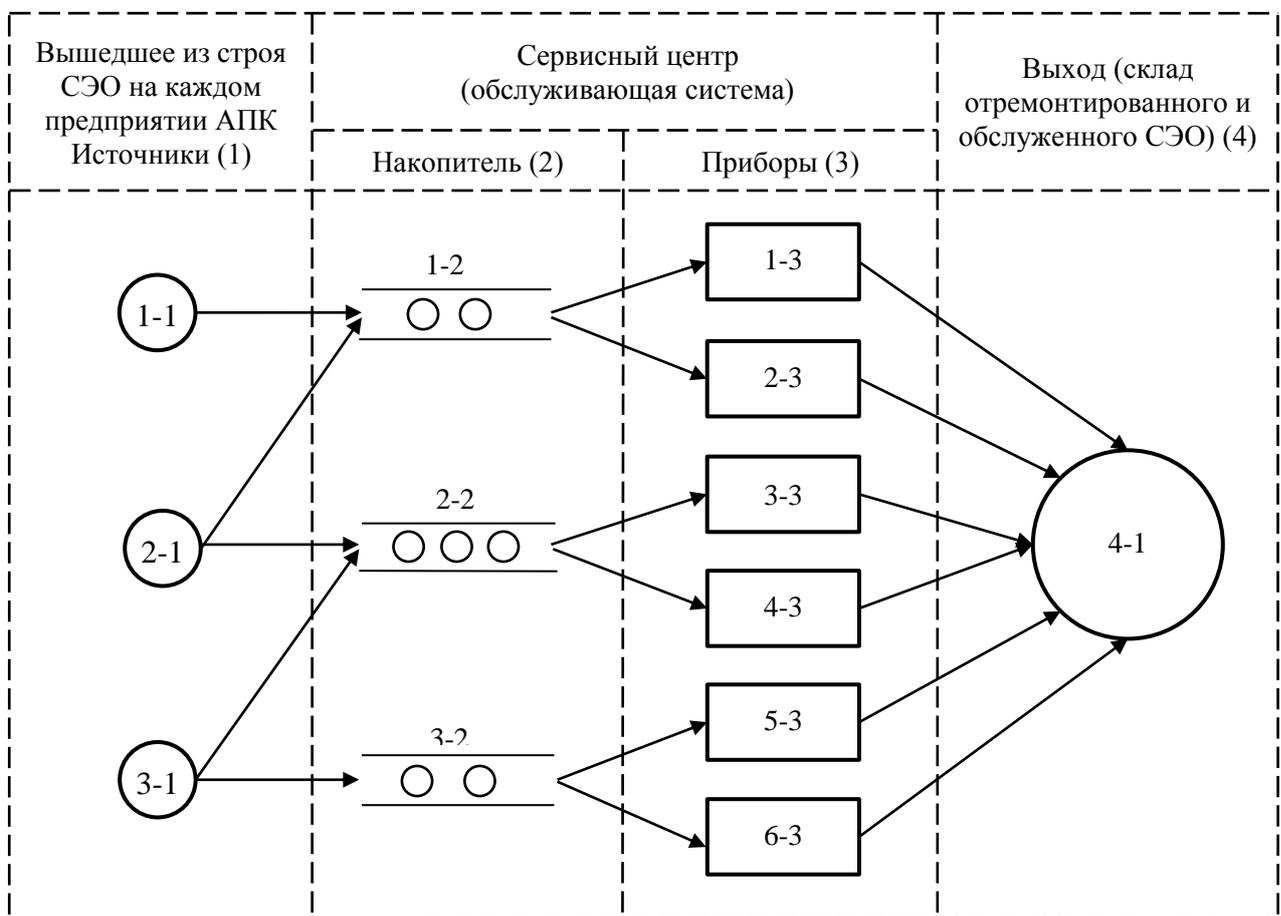


Рисунок 3.11 – Модель сервисного центра по обслуживанию СЭО

Поскольку сервисный центр обслуживает конечное число клиентов (в нашем случае трех – 1-1, 2-1, 3-1) его можно отнести к СМО с *конечным числом требований* [1, 8]. Такие системы являются *замкнутыми*, поскольку требования после завершения обслуживания возвращаются в источник, где они пребывают в течение некоторого времени $t_{\text{раб.}}$, затем

снова возвращаются в СМО. Назовем $t_{\text{раб.}}$ *временем безотказной работы оборудования до следующего обслуживания.*

Рассмотрим две возможных ситуации в работе сервисного центра.

1) Требование возникает в результате планового обслуживания СЭО. В этой ситуации $t_{\text{раб.}} = \text{const}$, $t_{\text{сист.}} = \text{var}$. Это объясняется тем, что плановое обслуживание производится через определенный период работы оборудования ($t_{\text{раб.}} = \text{const}$), а время обслуживания зависит от квалификации персонала ($t_{\text{обсл.}} = \text{var}$) и длины очереди в накопителе ($t_{\text{оч.}} = \text{var}$).

2) Требование возникает в результате выхода из строя того или иного оборудования. В этой ситуации, как время безотказной работы, так и время обслуживания (ремонта) и ожидания в очереди являются переменными величинами ($t_{\text{раб.}} = \text{var}$, $t_{\text{обсл.}} = \text{var}$, $t_{\text{оч.}} = \text{var}$).

Представим графически модель процесса обслуживания единицы СЭО в сервисном центре (рисунок 3.12).

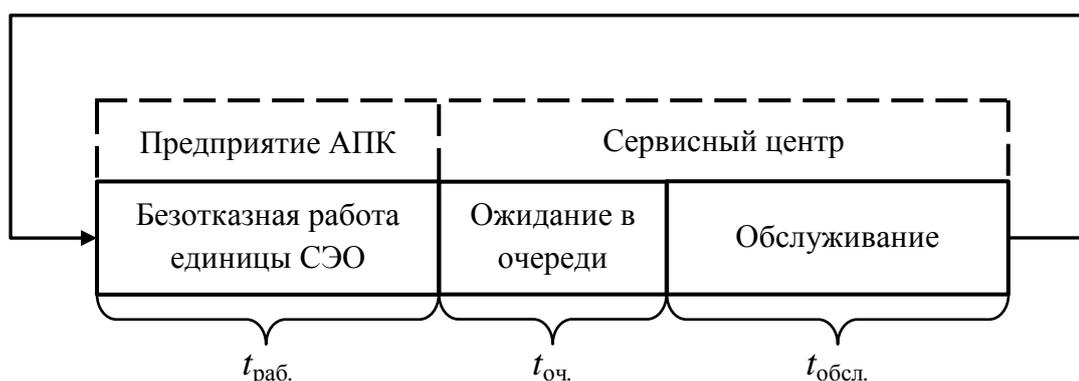


Рисунок 3.12 – Модель обслуживания единицы СЭО в сервисном центре

Стрелкой на рисунке 3.12 обозначен возврат обслуженной (отремонтированной) единицы оборудования обратно на предприятие.

Поскольку модель, представленная на рисунке 3.12 реализует замкнутый процесс обслуживания, т.е. обслуживание происходит непрерывно цикл за циклом, интервалы времени $t_{\text{раб.}}$, $t_{\text{оч.}}$ и $t_{\text{обсл.}}$ в каждом цикле будут различными (случайными).

В связи с этим необходимо говорить о математических ожиданиях (MO) интервалов времени $t_{\text{раб.}}$, $t_{\text{оч.}}$ и $t_{\text{обсл.}}$ за определенный период рассмотрения T .

$$MO[t_{\text{раб.}}] = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{раб.}i}}{n}, \quad (3.26)$$

$$MO[t_{\text{оч.}}] = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{оч.}i}}{n}, \quad (3.27)$$

$$MO[t_{\text{обсл.}}] = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{обсл.}i}}{n}, \quad (3.28)$$

где n – количество интервалов безотказных работ, находений в очереди и обслуживания за рассматриваемый период T ;

i – номера соответствующих интервалов;

$t_{\text{раб.}i}, t_{\text{оч.}i}, t_{\text{обсл.}i}$ – длительности соответствующих интервалов.

Поскольку времена обслуживания и нахождения в очереди являются параметрами внутренней среды сервисного центра, основной задачей моделирования является сведение их математических ожиданий к минимуму.

$$MO[t_{\text{обсл}}] \rightarrow \min\{MO[t_{\text{обсл}}]\}, \quad (3.29)$$

$$MO[t_{\text{оч}}] \rightarrow \min\{MO[t_{\text{оч}}]\}. \quad (3.30)$$

В конечном счете, это приведет к увеличению пропускной способности и возможному повышению прибыли сервисного центра.

Представим два конкретных примера по расчету математических ожиданий времени нахождения заявок в очередях.

Пример 1. Среднее число заявок, поступающих на одноканальный сервисный центр в течение рабочего дня ($\tau = 8$ ч) равно 12. Центр может обслужить за время τ только 10 заявок. Предположим, что сервисный центр относится к СМО с ожиданием, т.е. если канал занят, поступившая заявка не покидает систему, а становится в очередь и ожидает, пока он освободится. Определить математическое ожидание времени нахождения заявки в очереди $MO[t_{\text{оч.}}]$ к концу рабочего дня.

Введем понятия требуемой (желаемой) и действительной пропускной способности канала обслуживания $q_{\text{тр}}$ и $q_{\text{д}}$.

$$q_{\text{тр}} = \frac{MO[m_1]}{\tau}; \quad q_{\text{д}} = \frac{MO[m_2]}{\tau}, \quad (3.31)$$

где $MO[m_1], MO[m_2]$ – математические ожидания требуемых и действительно обслуживаемых заявок в течение рабочего дня.

$$q_{\text{тр}} = \frac{12}{8} = 1,5 \text{ 1/ч}; \quad q_{\text{д}} = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ 1/ч}.$$

Это говорит о том, что по истечении 1 часа, время ожидания в очереди увеличивается в среднем на 0,25ч (15мин) следовательно, к концу рабочего дня среднее время ожидания в очереди составит

$$MO[t_{\text{оч.}}] = 0,25 \cdot 8 = 2 \text{ ч}.$$

Пример 2. Рассмотрим двухканальный сервисный центр. Первый канал занимается обслуживанием электродвигателей, второй – обслуживанием электронагревательных установок. Среднее число заявок, поступающих на первый канал в течение рабочего дня ($\tau = 8$ ч) равно 15, канал может обслужить за время только 12. Как и в примере 1 – сервисный центр относится к СМО с ожиданием. Среднее число заявок, поступающее на второй канал в течение времени $\tau = 8$ ч, равно 8, канал может обслужить за это время только 6 заявок. Определить математические ожидания времени нахождения заявок в соответствующих очередях $MO[t_{оч1}]$, $MO[t_{оч2}]$ к концу рабочего дня.

Аналогично примеру 1, определим требуемую и действительную пропускную способность обоих каналов

$$q_{тр1} = \frac{MO[m_{11}]}{\tau}, q_{д1} = \frac{MO[m_{21}]}{\tau}, q_{тр2} = \frac{MO[m_{12}]}{\tau}, q_{д2} = \frac{MO[m_{22}]}{\tau}, \quad (3.32)$$

где $MO[m_{11}]$, $MO[m_{21}]$, $MO[m_{12}]$, $MO[m_{22}]$ – математические ожидания требуемых и действительно обслуживаемых заявок первого и второго канала соответственно.

$$q_{тр1} = \frac{15}{8} = 1,88 \text{ 1/ч}; q_{д1} = \frac{12}{8} = 1,5 \text{ 1/ч},$$

$$q_{тр2} = \frac{8}{8} = 1 \text{ 1/ч}; q_{д2} = \frac{6}{8} = 0,7 \text{ 1/ч}.$$

Для первого канала обслуживания по истечении одного часа время ожидания в очереди увеличиться в среднем на 0,38 часа (22 мин), следовательно, к концу рабочего дня время ожидания в очереди составит

$$MO[t_{оч1}] = 0,38 \cdot 8 = 3,04 \text{ ч}.$$

Для второго канала обслуживания, проводя аналогичные расчеты получим

$$MO[t_{оч2}] = 0,3 \cdot 8 = 2,4 \text{ ч}.$$

Проведение аналогичных расчетов позволяет принимать взвешенные решения по оптимизации процесса обслуживания и ремонта электрооборудования.

В соответствии с предложенной в п. 3.1. классификацией модель сервисного центра является вероятностной, динамической и дискретно-непрерывной.

Вместе с тем для обеспечения эффективной работы по обслуживанию энергетического оборудования, заявки необходимо выполнять не только

быстро, но и качественно. В противном случае количество клиентов будет снижаться, а конкурентоспособность сервисного центра – падать.

Контрольные вопросы

1. Дайте общее определение модели. Охарактеризуйте физические и абстрактные модели систем.
2. Дайте определение математической модели и классифицируйте их.
3. Приведите пример математического моделирования электрической цепи.
4. Дайте определение моделирующему алгоритму и приведите примеры таких алгоритмов.
5. Представьте и прокомментируйте математическую модель и моделирующий алгоритм анализа динамического режима электронагревательной системы.
6. Проанализируйте результаты моделирования электронагревательной системы.
7. Назовите критерии оценки эффективности энерготехнологической поточной линии (ЭТЛ).
8. В чем сущность вероятностного моделирования ЭТЛ?
9. Дайте характеристику сервисному центру по обслуживанию энергетического оборудования, как системы массового обслуживания (СМО).
10. Прокомментируйте основные определения теории массового обслуживания.
11. Дайте характеристику простейшему (пуассоновскому) потоку случайных событий.
12. Представьте обобщенную структуру модели СМО и прокомментируйте ее.
13. Проанализируйте модель функционирования сервисного центра по обслуживанию силового электрооборудования (СЭО).
14. Проанализируйте модель обслуживания единицы СЭО в сервисном центре.
15. Чем завершается процесс моделирования сервисного центра по обслуживанию СЭО?

4. ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Техничко-экономические требования к энергетическим системам и уровни их оптимизации

Энергетическим системам в процессе их функционирования принято давать следующие *оценки*: экономическую, энергетическую, экологическую и другие, определяемые соответствующими критериями эффективности. Чаще всего мы имеем дело с многокритериальностью. Всегда следует помнить о том, что дело не в количестве критериев, а в том, чтобы они достаточно полно отражали основную цель системы. В условиях рыночной экономики обобщающими критериями оценки эффективности энергетических систем выступают, как правило, такие экономические критерии как *прибыль* и *рентабельность*.

Сформулируем наиболее важные *техничко-экономические требования*, предъявляемые к энергетическим системам (ЭС):

- оптимальные решения и определение экономических границ эффективности использования ЭС;
- целесообразная специализация и унификация ЭС, связанная с перспективами развития производства;
- установление новых путей совершенствования технологий и конструктивных решений при разработке и эксплуатации ЭС;
- оптимальное импортозамещение и освоение отечественного энергомашиностроения и др.

Для современного периода развития энергомашиностроения характерна тенденция развития технико-экономических исследований, связанных с *оптимизацией значений технических параметров, рационального вида технологической схемы и типов оборудования* на стадии их предпроектной разработки.

При этом выделяют *три иерархических уровня оптимизации ЭС* [10]:

- выбор оптимального принципа действия ЭС, ее элементов и подсистем;
- поиск наилучшей структуры ЭС в рамках выбранного принципа действия (задача структурной оптимизации);
- определение оптимальных значений параметров в рамках выбранной структуры (задача параметрической оптимизации).

Последовательное решение вышеназванных задач называют *комплексной оптимизацией структуры, состава и параметров ЭС*.

Представим блок-схему обобщенного алгоритма оптимизации ЭС по уровням (рисунок 4.1).

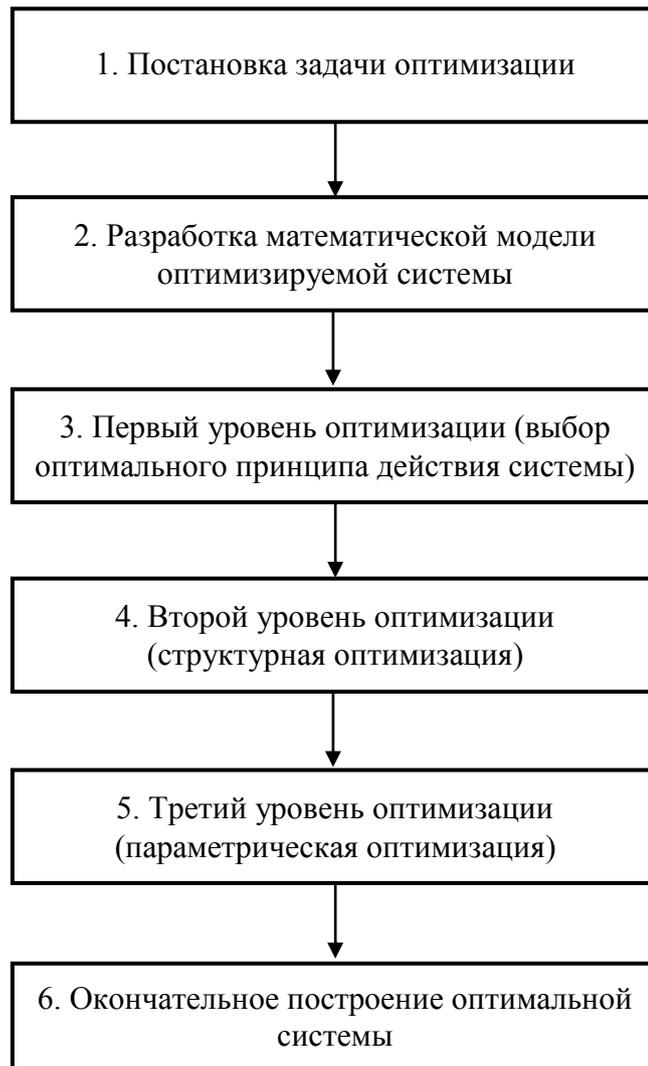


Рисунок 4.1 – Обобщенный алгоритм оптимизации ЭС по уровням

Пояснения к алгоритму.

Представленный алгоритм предполагает шесть этапов решения задачи оптимизации.

На втором этапе представленного алгоритма осуществляется построение математической модели уже существующей системы, которая по каким-либо критериям не удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям.

Процесс оптимизации на каждом уровне (третий, четвертый и пятый этапы) описывается некоторыми циклическими алгоритмами, параметрами цикла в которых являются:

- на первом уровне – вариант принципа действия;
- на втором уровне – вариант структуры системы в рамках выбранного принципа действия;

– на третьем уровне – перебираемые значения параметров системы в рамках выбранной структуры.

Завершающий шестой этап оптимизации предполагает окончательную проверку системы на оптимальность по всем трем уровням.

Наибольший эффект дает первый уровень, связанный с поиском новых, более рациональных принципов работы и технических идей. В меньшей мере дают эффект методы структурной оптимизации, еще в меньшей – методы параметрической оптимизации.

Рассмотрим процесс многоуровневой оптимизации на примере системы электропривода для конкретного производственного механизма. На первом уровне необходимо оптимизировать принцип действия электродвигателя. Проведенные исследования показали, что для данного механизма оптимальным является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Второй уровень (уровень структурной оптимизации) направлен на выбор оптимальной структуры системы управления электродвигателем. В частности, для минимизации потерь энергии и повышения устойчивости электропривода целесообразно использовать систему управления с обратной связью по скорости. На третьем уровне осуществляется выбор оптимальных параметров отдельных элементов в рамках выбранной структуры системы управления.

Достаточно полно и правильно любая энергетическая (энерготехнологическая) система характеризуется тогда, когда удается выяснить, от каких частных показателей качества (критериев эффективности) системы и в какой степени зависит основной результирующий (обобщающий) показатель эффективности. Как уже было сказано выше обобщающим показателем эффективности систем энергообеспечения является экономический показатель.

4.2. Методы оптимизации энергетических систем

Задача оптимизации по заданному результирующему экономическому критерию эффективности \mathcal{E}_p , называемому целевой функцией, формируется в виде [10]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_p &= \mathcal{E}_p(\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_n) \rightarrow \max[\mathcal{E}_p], \\ &\text{или} \\ \mathcal{E}_p &= \mathcal{E}_p(\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_n) \rightarrow \min[\mathcal{E}_p], \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_n$ – частные критерии эффективности, зависящие от структуры и параметров системы;
 i – порядковый номер частного критерия эффективности.

К частным критериям эффективности энергетических и энерготехнологических систем можно отнести *надежность, управляемость, ремонтпригодность, энергосбережение* и т.д.

Поскольку любой частный критерий эффективности \mathcal{E}_i является функцией параметров системы и времени его можно представить в общем виде следующим образом:

$$\mathcal{E}_i(t) = F(\alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m, t), \quad (4.2)$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m$ – параметры системы;
 m – число параметров системы;
 j – номер параметра системы.

Если в качестве результирующего критерия эффективности функционирования ЭС принять энергоемкость продукции \mathcal{E}_Π , то задача оптимизации будет определяться, как $\mathcal{E}_\Pi \rightarrow \min[\mathcal{E}_\Pi]$, если в качестве результирующего критерия принять рентабельность R , то задача оптимизации будет определяться как $R \rightarrow \max[R]$.

В энергетике задачи оптимизации сложных систем или процессов, сформулированные математически, в общем случае могут быть объединены под общим названием *нелинейного программирования* [10]. Задачи нелинейного программирования при оптимизации энергетических (энерготехнологических) систем (ЭС) предполагают использование двух основных групп методов:

- градиентные методы;
- методы направленного поиска.

Градиентные методы предполагают определение частных производных от различных показателей качества системы в

аналитическом виде, что в отдельных случаях связано с большими математическими трудностями. Это приводит к значительному времени подготовки задач к решению. Подготовительная работа при оптимизации по частному критерию, представленному выражением (4.2), состоит в определении частных производных от функции $F = F(\alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m, t)$ и приравнянии их к нулю, что является условием экстремума (максимума или минимума) дифференцируемой функции F [3].

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_1} = 0, \dots, \frac{\partial F}{\partial \alpha_j} = 0, \dots, \frac{\partial F}{\partial \alpha_m} = 0. \quad (4.3)$$

Градиентом функции F является векторная величина:

$$\text{grad } F = \overline{K_1} \frac{\partial F}{\partial \alpha_1} + \dots + \overline{K_j} \frac{\partial F}{\partial \alpha_j} + \dots + \overline{K_m} \frac{\partial F}{\partial \alpha_m}, \quad (4.4)$$

где $\overline{K_1}, \dots, \overline{K_j}, \dots, \overline{K_m}$ – единичные векторы, по которым отсчитываются величины $\alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m$.

В точке экстремума градиент равен нулю:

$$\text{grad } F = 0. \quad (4.5)$$

Задача поиска экстремума градиентными методами разбивается на две задачи:

- определение градиента;
- организация движения в точке экстремума.

Пример: Сформулируем задачу оптимизации электронагревательной системы по такому частному критерию, как энергосбережение (обеспечение минимума расхода электрической энергии W_{\min}). Математически расход электроэнергии можно представить как функцию двух переменных:

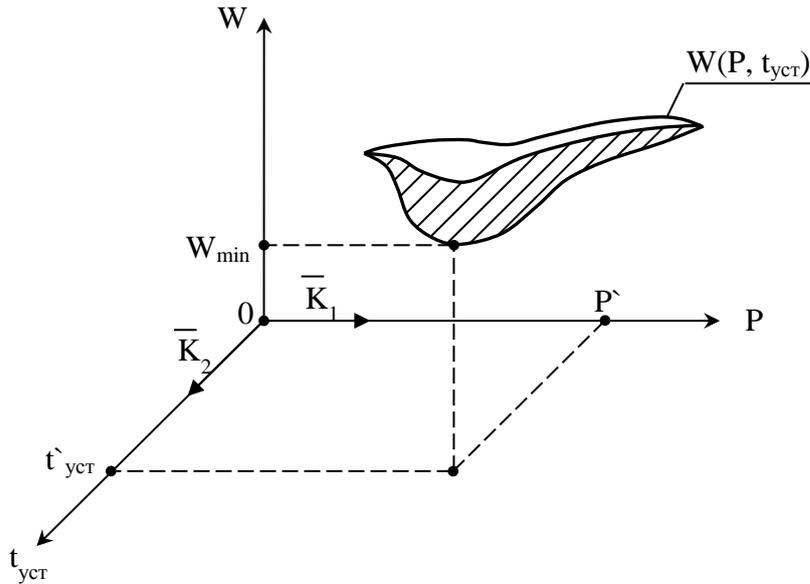
$$W = W(P, t_{\text{уст}}), \quad (4.6)$$

где P – мощность электронагревательной системы, кВт;

$t_{\text{уст}}$ – время нагрева до установившейся температуры $\tau_{\text{уст}}$, мин.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются кривые нагрева (зависимости температуры от времени), которые наглядно представлены в п.3.2 настоящего пособия (рисунок 3.5).

Функцию $W(P, t_{\text{уст}})$ графически можно представить в виде некоторой поверхности в трехмерной системе координат (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 – Графическое представление функции $W(P, t_{уст})$

Минимум функции W соответствует точке на поверхности с координатами $W(P', t'_{уст})$

Необходимым условием минимума функции $W(P, t_{уст})$ является равенство нулю двух частных производных и градиента.

$$\frac{\partial W}{\partial P} = 0; \frac{\partial W}{\partial t_{уст}} = 0; \text{grad } W = \bar{K}_1 \frac{\partial W}{\partial P} + \bar{K}_2 \frac{\partial W}{\partial t_{уст}} = 0. \quad (4.7)$$

Достаточным условием минимума функции $W(P, t_{уст})$ является:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial P^2} > 0; \frac{\partial^2 W}{\partial t_{уст}^2} > 0. \quad (4.8)$$

Как уже было сказано ранее такая формулировка задачи оптимизации возможна в случае дифференцируемости функции $W(P, t_{уст})$, т.е. возможности определения частных производных в аналитическом виде.

Методы направленного поиска не требуют регулярности или непрерывности функций и существования их производных, позволяют проще учитывать ограничения. Существенным недостатком этой группы методов является неопределенность решения при наличии локальных экстремумов функции.

Среди методов направленного поиска следует выделить *метод покоординатного поиска (метод Гаусса-Зейделя)* [3]. Метод заключается в поочередном изменении параметров системы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m$. Сначала фиксируются все параметры $\alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m$, а параметр α_1 изменяется так, чтобы обратилась в нуль соответствующая составляющая

градиента ($\partial F/\partial \alpha_1 = 0$). Затем изменяется параметр α_2 при фиксированных остальных параметрах до обращения в нуль $\partial F/\partial \alpha_2$ и т.д. После изменения параметра α_m обращаются опять к α_1 и далее повторяют весь цикл снова. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута точка экстремума F_{Σ} .

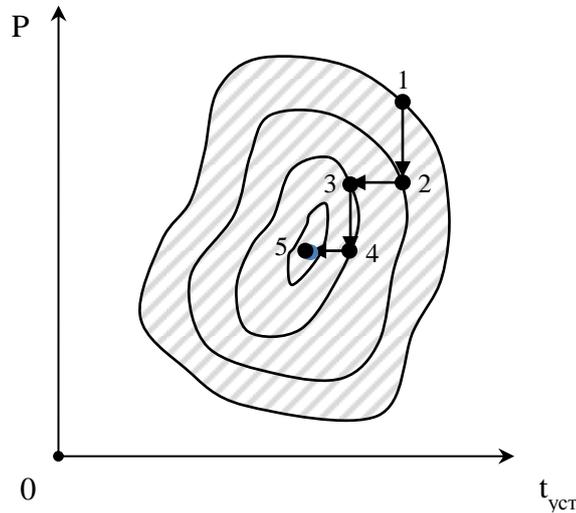


Рисунок 4.3 – Графическая интерпретация метода покоординатного поиска экстремума (метод Гаусса-Зейделя)

Заштрихованная область представляет собой проекцию поверхности, описываемой функцией $W(P, t_{уст})$ на плоскость двух управляющих параметров P и $t_{уст}$ (рисунок 4.2).

Поиск экстремума начинается в точке «1», движение из точки «1» в точку «2» есть ничто иное как определение частной производной $\frac{\partial W}{\partial P}$ при $t_{уст} = \text{const}$. В точке «2» выполняется условие $\frac{\partial W}{\partial P} = 0$, фиксируется координата P ($P = \text{const}$) и организуется вычисление $\frac{\partial W}{\partial t_{уст}}$, т.е. движение из точки «2» в точку «3». В точке «3» выполняется условие $\frac{\partial W}{\partial t_{уст}} = 0$ и аналогичным образом организуется движение в точки «4» и «5». Точка «5» является точкой экстремума, в нашем случае точкой минимального значения $W(P, t_{уст})$. Точки 2, 3, 4, 5 являются точками пересечения линии направленного поиска, с линиями постоянного значения оптимизируемой функции (линиями уровня).

Большими потенциальными возможностями для оптимизации сложных энергетических объектов и систем обладают *методы теории планирования экспериментов* [8, 10].

Планирование экспериментов – широко используемая процедура в научных исследованиях, в частности в процессе наладки и обследования (аудите) энергетических систем. При использовании этих методов применяют *пассивные и активные* эксперименты. При проведении *пассивного эксперимента* никаких целенаправленных действий по приданию входным воздействиям (факторам) нужных значений не совершают. Примером пассивного эксперимента может быть составление графика нагрузок. Решение этой задачи, как правило, предшествует процессу оптимизации энергетической системы по критерию минимума оплаты за потребленную энергию. *Активное* планирование экспериментов позволяет минимизировать количество экспериментов, оптимально использовать всю совокупность факторов воздействия на систему.

Наиболее простым вариантом вероятностной оптимизации энергетических систем является оптимизация с использованием наиболее простых вероятностных характеристик параметров системы – их математических ожиданий (средних значений). Поэтому прежде, чем решать задачу оптимизации необходимо получить эти характеристики с помощью обычного вероятностного моделирования системы, основным недостатком которого являются большие затраты времени для получения результата с приемлемой точностью.

Применительно к рассмотренному выше примеру, с помощью вероятностного моделирования электронагревательной системы получим математические ожидания мощности \tilde{P} и времени нагрева до установившейся температуры $\tilde{t}_{уст}$.

$$\tilde{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4.9)$$

$$\tilde{t}_{уст} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{устi},$$

где n – количество обработанных случайных значений мощности P_i и времени нагрева $t_{устi}$ (величина выборки);
 i – (порядковый) номер случайной величины.

Приняв величину выборки $n = 10$, представим полученные случайные значения P_i и $t_{устi}$ в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Выборка случайных величин P_i и $t_{уст.i}$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_i , кВт	1,83	1,94	2,12	2,07	2,19	1,89	2,02	2,24	2,12	1,91
$t_{уст.i}$, мин	3,5	3,2	2,9	3,0	2,8	3,3	3,1	2,9	2,7	3,3

Воспользовавшись формулами (4.9) получим результаты расчета математических ожиданий

$$\tilde{P} = 2,03 \text{ кВт}; \tilde{t}_{уст} = 3,07 \text{ мин.}$$

Полученные величины следует рассматривать, как координаты точки на поверхности (рисунок 4.2).

Оптимизируемый критерий эффективности (расход электрической энергии) также будет представлен в виде математического ожидания \tilde{W} . Выражение (4.6) в этом случае приобретает следующий вид:

$$\tilde{W} = \tilde{W}(\tilde{P}, \tilde{t}_{уст}). \quad (4.10)$$

Далее можно применять перечисленные выше методы оптимизации, как и в случае с детерминированными величинами и процессами.

В целом проблема решения оптимизационных задач в сложных ЭС требует соответствующих навыков использования ЭВМ, а подготовительная работа по формализации процессов требует достаточно высокой квалификации. Многие зависят от глубины знания реальных энергетических и энерготехнологических процессов и разработки программного продукта.

В связи с тем, что строго говоря, практически все процессы и параметры в сложных ЭС носят случайный характер, для получения достаточно достоверных результатов следует применять *статистические (вероятностные) методы исследования*. При использовании этих методов результаты представляются в виде математических ожиданий, дисперсий, среднеквадратичных отклонений и других вероятностных характеристик.

Статистическая (вероятностная) оптимизация энергетических систем, предполагающая установление статистической связи между исследуемыми переменными и параметрами системы, основана на использовании трех основных методов:

- корреляционный анализ;
- регрессионный анализ;
- дисперсионный анализ.

Корреляционный анализ позволяет устанавливать линейную причинно-следственную связь между статистическими параметрами и, как правило, используется при наличии связи между структурой и выходными параметрами системы (например, влияние терморегулятора автоматизированного объекта на расход энергии). Корреляционный анализ может быть с успехом использован для исследования взаимозависимых процессов поставки и потребления энергетических ресурсов.

Применим элементы корреляционного анализа к вероятностной модели электронагревательной системы. Для этого сформируем из выборки случайных величин P_i кусочно-линейную аппроксимацию случайной функции времени $P(t)$ (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Кусочно-линейная аппроксимация функции $P(t)$.

Для стационарного случайного процесса $P(t)$ корреляционная функция представляет собой среднее значение по времени от произведения $P(t_i)$ и $P(t_i+\tau)$ [10]

$$R(\tau) = \overline{P(t_i) + P(t_i + \tau)}, \quad (4.11)$$

где $\tau = t_{i+1} - t_i$ – приращение времени на всем интервале рассмотрения случайного процесса $P(t)$.

Корреляционная функция определяет зависимость случайной величины в последующий момент времени $P(t_i+\tau)$ от ее значения в предшествующий момент времени $P(t_i)$. Это есть мера связи между ними.

Рассчитаем и построим корреляционную функцию для случайного процесса, представленного на рисунке 4.3. Данные расчета сведем в таблицу 4.2.

Следует отметить, что корреляционная функция $R_p(\tau)$ для неслучайных (регулярных) функций времени тождественно равно нулю.

Таблица 4.2 – Расчет корреляционной функции.

τ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_p(\tau)$	3,35	1,78	1,94	1,9	2,0	1,73	1,84	2,05	1,94	1,74
$\rho_p(\tau)$	1	0,53	0,58	0,57	0,6	0,52	0,55	0,61	0,58	0,52

При $\tau = 0$ корреляционная функция дает средний квадрат случайной величины

$$R_p(0) = \overline{P(t_i) \cdot P(t_i)} = P_i^2. \quad (4.12)$$

Корреляционную связь в случайных процессах удобнее оценивать нормированной корреляционной функцией $\rho_p(\tau)$. В нашем случае она будет равна

$$\rho_p(\tau) = \frac{R_p(\tau)}{P_i^2}. \quad (4.13)$$

Удобство заключается в том, что всегда $\rho(0) = 1$.

Графическую зависимость $\rho_p(\tau)$ построим по расчетным точкам таблицы 4.2 (рисунок 4.5).

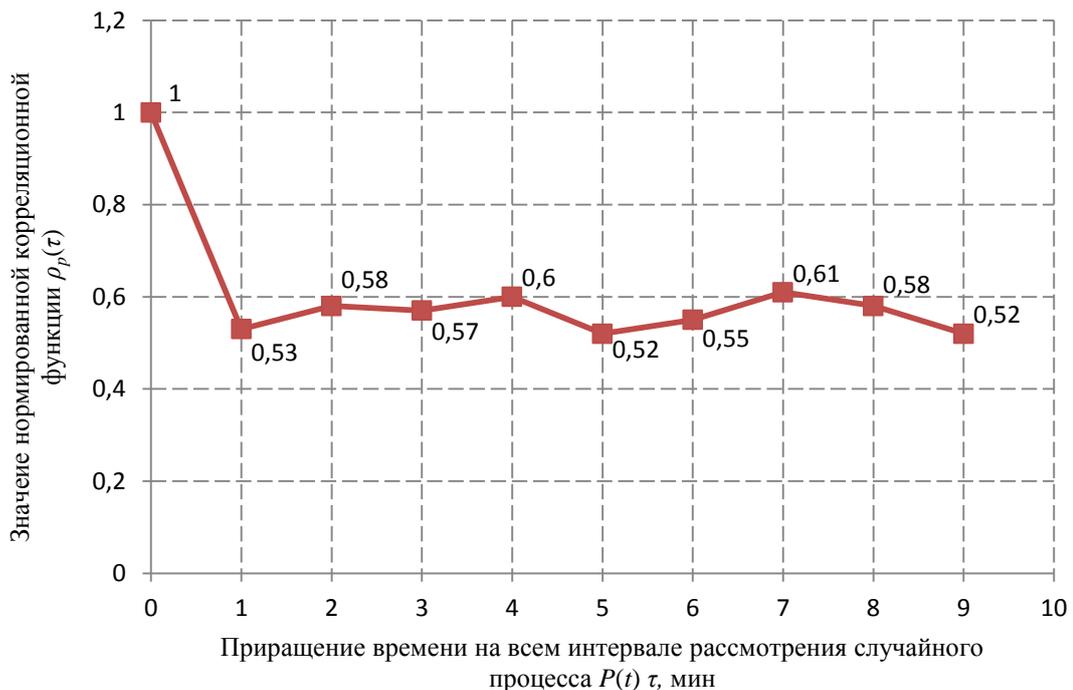


Рисунок 4.5 – Нормированная корреляционная функция $\rho_p(\tau)$ случайного процесса $P(t)$.

На рисунке 4.4 представлена по сути дела кусочно-линейная аппроксимация $\rho_p(\tau)$, полученная в результате обработки экспериментальных данных.

Регрессионный анализ применяют при отсутствии априорной причинно-следственной связи между параметрами (например, связи срока службы энергетического объекта от исследуемых параметров воздействия на него и др.). Регрессионной моделью называют функциональную зависимость, отражающую наиболее существенные свойства оригинала (энергетической или энерготехнологической системы) и исключающей все прочие факторы. Например, для построения приемлемой регрессионной модели потерь энергии в электрической сети достаточно учесть один наиболее важный фактор – величину суммарного отпуска энергии.

Остановимся на базовых понятиях, на которых строится регрессионный анализ. При решении задач теории вероятности и математической статистики возникают ситуации, когда одному значению аргумента может отвечать несколько значений функции, при этом эти значения являются случайными. В этом случае можно установить вероятностную (статистическую) зависимость среднего значения (математического ожидания) этих функций от значения аргумента. Такая зависимость носит название *регрессии* [19].

Сформируем задачу регрессионного анализа на примере уже рассматриваемой ранее электронагревательной системы (ЭНС). Предположим, что для конкретного значения мощности электрической системы нагрева воды $P_1 = 2$ кВт в зависимости от температуры окружающей среды экспериментальным путем получено 10 значений времени нагрева воды до установившейся температуры $t_{уст1}, \dots, t_{уст10}$. Регрессией в данном случае будет выражение

$$\tilde{t}_{уст} = \varphi(P_1), \quad (4.14)$$

где $\tilde{t}_{уст} = \frac{t_{уст1}, \dots, t_{уст10}}{10}$ – математическое ожидание случайных переменных $t_{устi}, i = 1, \dots, 10$.

Наиболее простой моделью в регрессном анализе является линейная модель первого порядка

$$\tilde{t}_{уст} = \beta_0 + \beta_1 P + \varepsilon. \quad (4.15)$$

Будем считать, что величина P (значение мощности ЭНС) определяется без ошибки, β_0 и β_1 – параметры модели, ε – ошибка, распределение которой подчиняется нормальному закону с нулевым

средним значением и постоянной дисперсией σ^2 (где σ – среднеквадратическое отклонение). Значения параметров β_0 и β_1 заранее неизвестны и их нужно определить из набора экспериментальных значений $(P_i, t_{уст\ i}), i = 1, \dots, n$.

Дисперсионный анализ применяют обычно, когда независимая переменная не измеряется, хотя может принимать различные значения (например, влияние человека-оператора на точность поддержания режима работы и расхода энергии на неавтоматизированном объекте). В зависимости от количества факторов, влияние которых исследуется в той или иной системе различают однофакторный и многофакторный дисперсионный анализ.

Под дисперсией в теории вероятностей понимается квадрат отклонения случайной величины от ее математического ожидания. Используя выборку P_i (таблица 4.1) получим выражение для дисперсии величины мощности ЭНС

$$D_P = \sum_{i=1}^{10} (P_i - \tilde{P})^2. \quad (4.16)$$

Величина $\sigma_p = \sqrt{D_P}$ называется среднеквадратическим отклонением случайной величины от математического ожидания. Величины D_P и σ_p характеризуют степень рассеивания случайной величины. Аналогичные выражения можно записать для выборки $t_{уст\ i}$ (таблица 4.1)

$$D_{t_{уст}} = \sum_{i=1}^{10} (t_{уст\ i} - \tilde{t}_{уст})^2, \quad (4.17)$$

$$\sigma_{t_{уст}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (t_{уст\ i} - \tilde{t}_{уст})^2}. \quad (4.18)$$

Суть дисперсионного анализа сводится к изучению влияния одной или нескольких независимых случайных переменных, обычно именуемых факторами, на зависимую переменную. В нашем примере P_i и $t_{уст\ i}$ являются независимыми, W_i – зависимой переменной, а сам дисперсионный анализ – двухфакторным.

Вышеназванные методы могут быть с успехом использованы при обосновании системы мероприятий по энергосбережению, повышению энергоэффективности, надежности, ремонтпригодности и безопасности

в процессе проектирования и эксплуатации энергетических и энерготехнологических систем.

4.3. Решение оптимизационных задач энергообеспечения предприятий

Энергоменеджеры различных предприятий, в том числе и в агропромышленном комплексе (АПК), постоянно принимают управленческие решения по энергообеспечению производственных процессов и объектов. Для принятия этих решений необходима следующая информация [11]:

- о состоянии рынков сырья, энергетического оборудования, энергетических и трудовых ресурсов (маркетинговая информация);
- об энергопотреблении различных видов энерготехнологического оборудования (ЭТО);
- об уровне эксплуатационной надежности и ремонтпригодности ЭТО;
- о квалификационных возможностях персонала энергетической службы.

Вышеперечисленные виды информации сигнализируют энергоменеджерам о проблемах, возникающих в процессе эксплуатации ЭТО.

Как показано в работе [10], исходная информация о параметрах и режимах работы ЭТО позволяет решить две основные проблемы:

- производственную (технологическую), связанную с оптимизацией режимов работы ЭТО;
- коммерческую, связанную с совершенствованием экономической деятельности предприятия.

Обобщенный алгоритм принятия и реализации управленческих решений, в том числе и в сфере энергообеспечения предприятий, может быть представлен в следующем виде (рисунок 4.6).

Как уже было указано выше, в процессе эксплуатации ЭТО могут возникнуть как производственные, так и экономические (коммерческие) проблемы, причем вторые, как правило, зависят от первых.

Все проблемные ситуации, возникающие при эксплуатации ЭТО, можно разделить на три группы:

- проблемы, связанные с недостаточным финансированием;

- проблемы, связанные с качеством работы имеющегося оборудования (энергопотребление, эксплуатационная надежность и ремонтпригодность, качество мониторинга);
- проблемы, связанные с уровнем квалификации персонала энергетической службы.

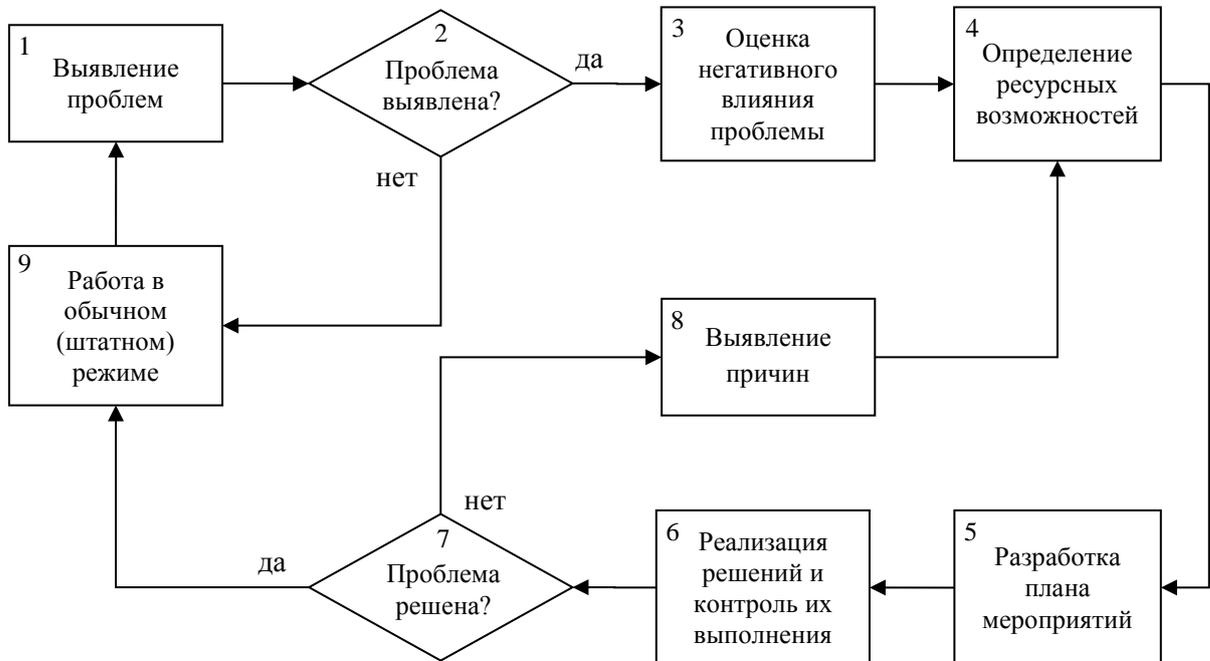


Рисунок 4.6 – Алгоритм принятия и реализации управленческих решений

Как следует из рисунка 4.6, энергоменеджеры, оценив негативные влияния возникших проблем, определяют ресурсные возможности предприятия. Эти возможности определяются на основании анализа ресурсного потенциала предприятия $РП(t)$, являющегося некоторой сложной функцией времени

$$РП(t) = F[ПХД(t), ИК(t), ФС(t)], \quad (4.19)$$

где $ПХД(t)$ – состояние производственно-хозяйственной деятельности.

$ПХД(t)$ напрямую зависит как от конкурентоспособности имеющегося ЭТО, так и от качества менеджмента и квалификации обслуживающего персонала.

Основной задачей, решаемой энергоменеджерами предприятия АПК, является поддержание на должном уровне энергетической составляющей ресурсного потенциала предприятия $РП(t)$, называемой энергетическим потенциалом $ЭП(t)$. Поддержание $ЭП(t)$ на должном уровне означает выполнение следующего неравенства:

$$\text{ЭП}(t) > \text{ЭП}_K, \quad (4.20)$$

где ЭП_K – некоторое критическое (допустимое) значение энергетического потенциала, обеспечивающего нормальный ход производственного процесса.

Ход производственного процесса считается нормальным, если он обеспечивает необходимую прибыль от реализации произведенной продукции.

Далее формируется рабочая группа для решения той или иной проблемы, составляется план мероприятий, уточняется состав исполнителей.

Результат реализации управленческих решений может иметь два варианта:

- проблема решена, т.е. можно продолжать работу в обычном (штатном) режиме;
- проблема не решена, т.е. работа не может быть продолжена в обычном (штатном) режиме.

Во втором случае необходимо провести тщательный анализ результатов реализации управленческих решений и внести соответствующие корректировки.

Конечно, при выборе управленческого решения энергоменеджеры могут действовать интуитивно, опираясь на опыт и здравый смысл. Но гораздо убедительнее будут решения, если они подкреплены математическими расчетами, что позволит избежать длительного и дорогостоящего поиска нужного решения «на ощупь».

Пример. Рассмотрим производственную деятельность некоторого перерабатывающего предприятия АПК. Потребности предприятия в энергоресурсах каждого вида соответственно равны a_1, a_2, a_3 условных единиц (у.е.). Существует пять источников энергоресурсов, расположенных от предприятия на определенных расстояниях и отпускаемых по разным тарифам. Единица вида энергоресурсов, получаемая предприятием от источника I_j , обходится предприятию в C_{ij} рублей (индекс i – вид энергоресурса, индекс j – номер источника, (таблица 4.3)).

Таблица 4.3 – Стоимость энергоресурсов

Вид энергоресурса	Источники энергоресурсов				
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
\mathcal{E}_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
\mathcal{E}_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}
\mathcal{E}_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}

Возможности обеспечения энергоресурсами с каждого источника ограничены его производственной мощностью: источники энергоресурсов I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 могут дать не более b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 количества видов энергоресурсов. Требуется составить такой план обеспечения предприятия энергоресурсами (от какого источника и какое количество видов энергоресурсов получить), чтобы потребности предприятия в них были обеспечены при минимальных расходах энергоресурсов.

Поставленную задачу оптимизации процесса энергообеспечения предприятия будем решать методом линейного программирования. Обозначим x_{ij} – количество энергоресурса i -го вида, полученного от j -го источника снабжения. Таким образом, получим 15 элементов решения:

$$\begin{cases} x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} \\ x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25} \\ x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, x_{35} \end{cases} \quad (4.21)$$

Элементы решения представляют собой матрицу, состоящую из трех строк и пяти столбцов.

Введем ограничения по потребностям в энергоресурсах a_1, a_2, a_3 , т.е. примем условие, что предприятие получит нужное ему количество энергоресурсов каждого вида, т.е. ровно столько, сколько ему требуется. Получим систему линейных алгебраических уравнений, которые нужно решить.

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} = a_1 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} = a_2 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} = a_3 \end{cases} \quad (4.22)$$

Далее запишем систему неравенств-ограничений, вытекающих из производственных мощностей источников энергоресурсов:

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + x_{31} \leq b_1 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} \leq b_2 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} \leq b_3 \\ x_{14} + x_{24} + x_{34} \leq b_4 \\ x_{15} + x_{25} + x_{35} \leq b_5 \end{cases} \quad (4.23)$$

И наконец, запишем суммарные расходы на энергоресурсы, которые мы хотим минимизировать. Учитывая данные таблицы 4.3, получим:

$$W = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 C_{ij} x_{ij} \Rightarrow \min, \quad (4.24)$$

где W – показатель эффективности энергообеспечения предприятия АПК.

Перед нами поставлена задача линейного программирования: найти такие неотрицательные значения переменных x_{ij} , которые удовлетворяли бы математическим выражениям (4.22) и (4.23) и обращали бы в минимум их линейную функцию (4.24).

Нами рассмотрена задача для детерминированного случая, когда показатель эффективности W зависит только от двух групп факторов: заданных, заранее известных a_1, a_2, a_3 и элементов решения x_{ij} . В реальных условиях деятельность предприятий АПК подвержена воздействию ряда случайных факторов, что переводит задачу выбора решений в другое качество: она превращается в задачу выбора управленческих решений в условиях неопределенности.

Минимизировать случайную величину невозможно. При любом решении она считается случайной.

В этом случае формулировка нашей задачи будет следующей: найти такие неотрицательные значения переменных \bar{x}_{ij} (математических ожиданий x_{ij}), чтобы они удовлетворяли ограничениям-неравенствам (4.22), (4.23) и вместе с тем, по возможности, обращали в минимум линейную функцию этих переменных.

В литературе по исследованию операций рекомендуют заменять случайные факторы их средними значениями, если они мало отклоняются от своих математических ожиданий. Тогда задача становится детерминированной и может быть решена обычными методами.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте технико-экономические требования к энергетическим системам.
2. Назовите и прокомментируйте иерархию уровней оптимизации систем энергообеспечения.
3. Какой уровень оптимизации дает наибольший эффект и почему?
4. Назовите и охарактеризуйте методы оптимизации энергетических систем.
5. Прокомментируйте обобщенный алгоритм оптимизации энергетических систем.
6. Опишите процесс оптимизации электронагревательной системы методом направленного поиска.
7. Дайте характеристику градиентным методам оптимизации.
8. В чем сущность статистической (вероятностной) оптимизации систем энергообеспечения?
9. На чем базируется метод корреляционного анализа?
10. Охарактеризуйте методы регрессионного и дисперсионного анализа.
11. Представьте и прокомментируйте алгоритм принятия и реализации управленческих решений в энергетической сфере.
12. Приведите и прокомментируйте пример решения оптимизационной задачи энергообеспечения перерабатывающего предприятия АПК.

ГЛОССАРИЙ

Адаптивность системы – это свойство, характеризующее способность системы нормально (в соответствии с заданными параметрами) функционировать при изменении параметров внешней среды, приспособляемость системы к изменениям.

Анализ – деятельность, предпринимаемая для того, чтобы определить (выяснить) пригодность, адекватность и результативность рассматриваемой системы в достижении поставленных целей путем ее деления на отдельные подсистемы и элементы.

Вероятностное (стохастическое) моделирование – метод позволяющий исследовать систему в самом общем виде для произвольных законов распределения случайных величин, характеризующих внутреннюю среду системы, ее вход и выход.

Внешняя среда системы – все то, что находится за пределами системы, но оказывает на нее то или иное влияние (уровень развития технологий, другие системы, информация, энергетические ресурсы и т.п.).

Внутренняя среда системы – структура системы, обеспечивающая эффективное управление всеми функциональными подсистемами и элементами (технологическая оснащенность, энергообеспеченность, интеллектуальный потенциал персонала, качество функционирования подсистем и элементов и т.п.).

Вход системы – компоненты, поступающие в систему: сырье, материалы, комплектующие изделия, различные виды энергии, новое оборудование, кадры, документы, информация и т.д.

Выход системы – выпускаемая продукция, услуги, новшества и нововведения, выходные координаты, прибыль и т.п.

Граф состояний системы показывает возможные состояния системы и направления возможных переходов системы из одного состояния в другое.

Декомпозиция – разделение системы на части (подсистемы и элементы) и последующее изучение этих частей с целью выявления их влияния на эффективность функционирования системы в целом.

Детерминированный процесс – это процесс, который можно описать математическими формулами (т.е. можно точно определить положение системы в любой момент времени).

Динамическая система – система, параметры, структура и характеристики которой меняются во времени как непрерывно, так и дискретно.

Дисперсионный анализ – метод в математической статистике, направленный на поиск зависимостей в экспериментальных данных путем исследования значимости различий в средних значениях (математических ожиданиях).

Дисперсия – это квадрат отклонения случайной величины от ее математического ожидания.

Иерархическая (многоуровневая) структура системы – структура, получаемая в результате декомпозиции системы в пространстве. Все элементы и связи между ними существуют в этих структурах одновременно (не разнесены во времени).

Корреляционный анализ – вероятностный метод исследования систем, построенный на выявлении взаимосвязи между случайными величинами (факторами), которые образуют некоторый реальный процесс в системе.

Корреляция – статистическая взаимозависимость двух и более случайных величин. Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции.

Математическая модель системы – приближенное описание какой-либо системы, выраженное с помощью математической символики, т.е. в виде формул, уравнений, неравенств, логических условий и т.п.

Модель системы – специальный объект, в некоторых отношениях заменяющий оригинал (саму систему).

Моделируемый алгоритм – последовательность действий, производимых для вычисления по тем или иным математическим выражениям и приводящих к решению поставленной задачи.

Надежность энергетической системы характеризуется ее безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохранностью свойств качества системы в течение заданного периода времени.

Ограничения системы – все то, что определяет условия ее функционирования (реализацию процесса). Ограничения бывают внутренними и внешними. Одним из внешних ограничений является цель функционирования системы. Примером внутренних ограничений могут быть ресурсы, обеспечивающие реализацию того или иного процесса.

Оптимизация системы – придание системе тем или иным способом наилучших качеств в каком-нибудь определенном смысле, например в точности, быстродействии, расходе энергии и т.п.

Параметрическая оптимизация – это определение ряда параметров системы в рамках выбранной структуры, обеспечивающих максимальную эффективность ее функционирования.

Подпроцесс – это группа операций в составе процесса, объединенная технологически или организационно.

Подсистема – часть системы, состоящая более чем из одного элемента, решающая вполне определенные частные задачи, обеспечивающие достижения поставленных перед системой целей.

Потенциальная эффективность системы – способность системы получить требуемый результат при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствии воздействия внешней среды.

Поток случайных событий – это последовательность однотипных случайных событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени.

Правило (дисциплина) обслуживания в СМО – алгоритм взаимодействия обслуживающих приборов (обслуживающего персонала) с очередью из требований (заявок).

Процесс – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих между собой операций (технологических, трудовых, финансовых и т.п., преобразующих входы рассматриваемой системы в ее выходы).

Равновесие системы – это способность системы в отсутствие возмущающих воздействий (или при постоянных воздействиях) сохранять свое состояние сколь угодно долго.

Развитие системы – процесс совершенствования системы на основе изучения механизма конкуренции, законов воспроизводства, развития потребностей, экономии времени и др., обеспечивающий выживание системы.

Регрессионный анализ – вероятностный (статистический) метод исследования влияния одной или нескольких независимых переменных на зависимую. Независимые переменные называют регрессорами, зависимые переменные – критериальными.

Регрессия – односторонняя вероятностная связь, устанавливающая соответствие между случайными переменными. При регрессионной связи (в отличие от чисто функциональной зависимости), одному и тому же значению аргумента в зависимости от случая, могут соответствовать различные значения функции.

Реструктуризация системы – изменение структуры системы в целях совершенствования системы ее управления, приводящее к повышению эффективности ее функционирования.

Самоорганизующаяся система – это система способная менять свои параметры, структуру и алгоритм функционирования. Свойствами самоорганизации являются адаптивность, самообучаемость, способность к распознаванию ситуации.

Связи (в системе и с внешней средой) – информационные, энергетические и документальные потоки в системе между ее компонентами для принятия и координации выполнения управленческих решений. Информация должна быть необходимого объема и качества, в нужном месте и в нужное время.

Сетевая структура системы (сеть) – структура, получаемая в результате декомпозиции системы во времени. Такие структуры могут отображать порядок действий технической системы или этапы деятельности человека.

Синергетический эффект – повышение эффективности деятельности в результате соединения, интеграции, слияния отдельных частей в единую систему за счет т.н. системного эффекта (эмерджентности).

Синтез (проектирование) системы – это определение конфигураций системы, требований, которым она должна удовлетворять, и задание основных параметров, удовлетворяющих предъявляемым к системе требованиям.

Система – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, предназначенная для достижения поставленных целей путем решения конкретных задач.

Система массового обслуживания (СМО) – некоторая система, обеспечивающая все виды обслуживания: производственного, транспортного, финансового, бытового и т.д.

Системный синтез (системное проектирование) – разработка сложных оптимальных систем из множества альтернативных конкурирующих элементов, связей и структур.

Случайный процесс (вероятностный процесс, случайная функция, стохастический процесс) – это семейство случайных величин, индексированных некоторым параметром, чаще всего играющим роль времени или координат.

Стационарный случайный процесс – это случайный процесс, у которого вероятностные характеристики (математическое ожидание, дисперсия и др.) не зависят от времени.

Статическая система – система, параметры, структура и характеристики которой не меняются во времени.

Структура системы – упорядоченная совокупность элементов системы и связей между ними. Количество элементов системы и их связей должно быть минимальным, но достаточным для выполнения главной цели системы.

Структурная оптимизация – это метод построения такой структуры как способа соединения элементов в систему, которая будет максимально эффективной с точки зрения заранее поставленной практической задачи и при заданных и всегда ограниченных ресурсах.

Состояние системы – это мгновенная ее фотография или «срез», остановка в ее развитии. Состояние системы жестко привязано к конкретному моменту времени, в котором она рассматривается.

Установившийся режим работы – режим, при котором параметры и характеристики системы, а, следовательно, и ее состояние не меняются во времени.

Устойчивость системы – это способность системы возвращаться в состояние равновесия после того, как она была из этого состояния выведена под влиянием внутренних или внешних возмущающих воздействий.

Финальная вероятность состояния системы – вероятность, характеризующая состояние системы в установившемся (стационарном) режиме.

Функционирование (поведение) системы – это процесс перехода системы из одного состояния в другое. Функционирование системы характеризует ее движение, как в пространстве, так и во времени.

Целевая функция – математическое выражение критерия эффективности функционирования системы.

Экономическая эффективность системы – показатель, определяемый соотношением экономического эффекта (результата) достигнутого системой, и затрат, приведших к этому эффекту (результату).

Элемент системы – неделимая составная часть системы.

Эмерджентность (системный эффект) – наличие у какой-либо системы особых свойств не присущих ее подсистемам и элементам.

Энергетическая система – это сложная техническая система, состоящая в общем случае из трех подсистем: генерирующей, передающей (распределительной) и потребительской.

Энергетическая эффективность системы – возможность использования системой меньшего количества энергии для достижения

того же уровня энергообеспечения различных объектов или технологических процессов.

Энерготехнологическая система – это система, органически связывающая энергетическую и технологическую подсистемы с целью обеспечения наиболее высокой экономической эффективности процесса производства продукции или услуг.

Энерготехнологическая поточная линия – комплекс взаимосвязанного энергетического и технологического оборудования, работающего согласованно с заданным ритмом по единому технологическому процессу.

Эффективность системы – способность системы решать поставленные перед ней задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анфилатов В.С. Системный анализ в управлении: учебное пособие. – М.: Фин. и статистика. 2002. – 368с.
2. Беззубцева М.М., Пиркин А.Г., Фокин С.А. Методика оценки производственной энергетической безопасности энерготехнологических линий на предприятиях АПК // Известия СПбГАУ, №20. – 2010, С.285-290.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: изд-во «Наука», 1972. – 768с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: изд-во «Наука», 1968. – 356с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. – 6 изд. – М.: Высшая школа. 1999. – 576с.
6. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Знание, 1976. – 210с.
7. Вдовин В.Н., Сурков Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ. Учебник для бакалавров. изд-во Дашков и К, 2013. – 644с.
8. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. – СПб.: изд-во СПбГТУ, 2004. – 520с.
9. Воропай Н.И., Савина Н.В. Теория систем и системного анализа в электроэнергетике. Учебное пособие. – Благовещенск: изд-во АмГУ, 2013. – 143 с.
10. Герасимович Л.С. Системный анализ агроэнергетики: авторский курс лекций. – Минск, 2004. – 138с.
11. Гулин С.В., Пиркин А.Г. Системно-процессный подход к проектированию энерготехнологических поточных линий для агропромышленного комплекса // Известия СПбГАУ, №42. – 2016, С.354-359.
12. Исаенко Д.А., Пиркин А.Г. Вероятностный подход к оценке энергетической эффективности функционирования технологических поточных линий на предприятиях АПК // Известия СПбГАУ, №23. – 2011, С.434-441.
13. Качала В.В. Теория систем и системный анализ: учебник для вузов / В.В. Качала. – М.: изд. Центр «Академия», 2013. – 272 с.
14. Месарович М., Мако Д., Такамара Н. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
15. Пиркин А.Г. Основы системного анализа в энергетике. Учебно-методическое пособие. – СПб.: СПбГАУ, 2015. – 52 с.

16. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 332с.
17. Системный анализ: краткий курс лекций – под ред. В.П. Прохорова. – М.: Комкнига, 2006. – 216с.
18. Чернышев В.Н. Теория систем и системный анализ: учебное пособие. – Тамбов: изд-во Тамб. техн. ун-та, 2008. – 96с.
19. Шашков В.Б. Прикладной регрессивный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363с.