

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

БОНДАРЕНКО Виктор Владимирович

УДК 004.942:004.021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В САПР  
СИСТЕМ «ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР – ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ»

05.13.12 – Системы автоматизации проектных работ

Диссертация  
на соискание научной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
ШВЕЦ Павел Степанович  
кандидат технических наук, доцент

Одесса – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
<b>РАЗДЕЛ 1. ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>14</b>
1.1 Расчет основных потребительских характеристик асинхронных электродвигателей в САПР .....	17
1.2 Проблемы и методы оптимизации в САПР асинхронных электродвигателей .....	27
1.2.1 Проблемы и существующие методы оптимизации конструктивных параметров АЭД .....	27
1.2.2 Проблемы и существующие методы оптимизации информации в экспериментальной поддержке САПР АЭД .....	30
1.3 Многоцелевая оптимизация связанных подсистем .....	33
1.3.1 Многоцелевая оптимизация при ограничениях.....	34
1.3.2 Многоцелевая оптимизация при ограничениях в виде связей между параметрами подсистем .....	36
1.4. Выводы и постановка задач исследования.....	40
<b>РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР СИСТЕМЫ «ТОПЛИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР – АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ» .....</b>	<b>42</b>
2.1 Решение прямой и обратной задач оптимизации .....	42

2.2 Многоцелевая оптимизация объектов со связанными параметрами с помощью метода подвижного окна .....	49
2.2.1 Показатель эффективности многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами .....	49
2.2.2 Многоцелевая оптимизация систем со слабосвязанными аргументами с помощью метода подвижного окна .....	54
2.3 Оптимизация с ограничениями в качестве целевой функции .....	60
2.3.1 Классификация ограничений и связности аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем .....	60
2.3.2 Оптимизация сложной системы по связности на примере объекта «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель» ...	63
2.4 Выводы .....	
РАЗДЕЛ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ .....	71
3.1 Экспериментальная поддержка проектирования процессов обмена .....	71
3.1.1 Расчет тепломассообмена в асинхронном электродвигателе .....	76
3.2 Информационное обеспечение экспериментальной поддержки проектирования .....	80
3.3 Информационная поддержка измерений параметров асинхронных электродвигателей в САПР .....	94
3.4 Выводы.....	99

## РАЗДЕЛ 4 САПР АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

«OPTIGLOC» И ЕЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ .....	102
4.1. Структура САПР «OPTIGLOC» .....	102
4.1.1 Структурная основа САПР «OPTIGLOC» .. .....	102
4.1.2 Пример оптимизации системы «генератор – двигатель» с помощью САПР «OPTIGLOC» .....	105
4.1.3 Структура и основные подсистемы САПР «OPTIGLOC» .....	114
4.1.4 Производственные испытания САПР «OPTIGLOC» .....	116
4.2 Работа САПР «OPTIGLOC» при проектировании объектов ответственного назначения .....	117
4.3 САПР асинхронных электродвигателей с элементами искусственного интеллекта .....	122
4.4 Выводы.....	126
ВЫВОДЫ .....	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	132
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	151

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- OPTIGLOC – *Optimization by the global connectivity*;
- АКГА – адаптивный комплексный генетический алгоритм;
- АРС – автоматический регулятор скорости»;
- АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения турбин;
- АСУ – автоматизированная система управления;
- АД – асинхронный электродвигатель;
- БКМ – беспроводные компьютерные сети;
- ВРЧ – вторичное регулирование частоты;
- ГС – глобальная связность;
- ДДП-1 – дискретное дифференциальное преобразование изображения по Лапласу;
- ДДП-2 – дискретное дифференциальное преобразование видеопотока по Фурье;
- КГА – комплексный генетический алгоритм;
- ЛЭП – линия электропередач;
- МПО – метод программирования в ограничениях;
- НПРЧ – нормированное первичное регулирование частоты;
- ОВР – ограничения второго рода;
- ОПР – ограничения первого рода;
- ОПРЧ – общее первичное регулирование частоты;
- РП – рисковый параметр;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- СО – скользящее окно;
- ТРЧ – третичное регулирование частоты.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Проблема автоматизированного проектирования асинхронных электродвигателей (АД) существует на фоне противоречия, вытекающего, с одной стороны, из чрезвычайной сложности соответствующих электрических, магнитных, термических и механических расчетов, входящих в типовый процесс «проектирование АД», а с другой, – из существования широкого спектра уже централизованно спроектированных и изготовленных двигателей подобного типа, что во многих случаях исключает необходимость в проектировании АД вообще и приводит к тривиальному выбору электродвигателя из линейки типовых покупных.

В то же время существует много применений электрической движущей силы, где по разным причинам покупные АД не удовлетворяют заданию на проектирование объекта в целом, или с точки зрения электромеханических характеристик (например, транспортные двигатели, двигатели эскалаторов, приборов, и т.п.), или с точки зрения оптимальности энергетических затрат (например, системы «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель»), что усложняет существующие или создает новые, «нетипичные» ограничения при оптимизации таких систем в САПР.

Примером существующего ограничения при проектировании АД является скольжение, расчет которого выходит за пределы параметров двигателя (поскольку одновременно скольжение является функцией параметра генератора), и которое, в то же время, существенно влияет почти на все его потребительские характеристики.

Благодаря этим особенностям, скольжение стоит особняком среди проектируемых параметров, ведь один из его аргументов, – частота электрического тока питания, – не всегда доступна для проектировщика в качестве аргумента.

Вообще, под термином «скольжение» понимают два, существенно различных с точки зрения проектировщика параметра: реальное, мгновенное

скольжение, как функция нагрузки двигателя, а следовательно, времени, и номинальное скольжение, как число, которое принимается во внимание при проектных расчетах. Именно поэтому, номинальное скольжение при типовых расчетах отдельных электродвигателей или «выбирается из таблиц», или просто проверяется на «приемлемое значение», что, в конечном итоге, способствует созданию далеких от оптимальности конструкций.

С другой стороны, дуализм скольжения создает широкие возможности для САПР в том случае, когда объектом проектирования является не отдельный электродвигатель, а система «генератор – электродвигатель». Как правило, мощности элементов таких систем соизмеримы, а значит, переменные, входящие в скольжение, тесно взаимодействуют. В этих условиях скольжение, благодаря также широкой, – глобальной связности со многими другими параметрами данной системы, может быть рассмотрено уже не как некоторое ограничение, а как важная промежуточная целевая функция проектирования.

К сожалению, расчет оптимальных «по скольжению» АД ограничивается сегодня отсутствием соответствующих методов в САПР и математических моделей, необходимых для практической реализации этих методов. Отсутствуют также оперативные методы экспериментальной оценки скольжения в АД, необходимые для получения эмпирических зависимостей, а также подтверждения адекватности оптимизационных моделей и качества автоматизированного проектирования в целом.

Поэтому совершенствование существующих и создание новых методов и моделей, предназначенных для повышения эффективности автоматизированного проектирования систем типа «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель», энергетические показатели которых не могут быть рассмотрены независимо, **является весьма актуальной задачей.**

**Связь работы с научными программами, планами, темами.**  
Диссертация выполнялась в соответствии с техническими заданиями научно-исследовательских работ Одесского национального политехнического

университета № 676-24 «Автоматизация проектирования объединенных технологических процессов в машиностроении» (№ государственной регистрации 0111U010451) и № 78-53 «Энергетический анализ и улучшение энергетической результативности функционирования предприятий, учреждений, зданий, оборудования, систем и процессов» (№ государственной регистрации 0113U001466).

**Целью работы** является уменьшение сроков подготовки производства и повышения качества продукции машиностроительных предприятий на этапе автоматизированного проектирования сложного электротехнического оборудования путем разработки и внедрения методов и моделей для оптимизации глобальных связей в САПР.

Для достижения этой цели в работе были решены **следующие задачи**:

- проанализированы существующие проблемы и методы автоматизированного проектирования сложных электротехнических систем, в частности, систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель» (ПГ-АД);
- теоретически усовершенствовано и практически создано математическое обеспечение САПР АД: математические модели и методы оптимизации параметров сложных электротехнических систем по глобальной связности;
- разработано, изготовлено и внедрено экспериментальное обеспечение САПР АД: методы и стенды для измерения тепловых и механических характеристик АД; а также для оценки точности и адекватности принятых методов и моделей;
- разработано программное обеспечение САПР АД, которое внедрено в виде подсистемы САПР «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), базирующейся на предложенных методах и моделях;
- осуществлено лабораторное компьютерное испытание результатов исследования и производственное испытание подсистемы САПР «OPTIGLOC» с положительным техническим эффектом.



**Объектом исследования** является процесс автоматизированного проектирования сложного электротехнического оборудования по глобальной связности между параметрами его элементов.

**Предметом исследования** являются методы и модели автоматизированного проектирования параметров системы «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель» с использованием глобальной связности между параметрами ее элементов в качестве вспомогательной целевой функции.

**Методы исследования.** В работе предложен метод подвижного окна, ширина которого на текущей итерации оптимизации равна ширине зоны связности между параметрами элементов объекта проектирования. Метод использовали для оптимизации ширины зоны связности в случае двух или более целевых функций одного аргумента. Двигаясь вдоль оси этого аргумента, окно позволяет вычислить оптимальную ширину по предложенным критериям такой оптимизации. При построении моделей объектов электротехнического оборудования, использованных для проектирования с помощью метода подвижного окна, применяли зависимости «параметры – качество», полученные из теории электротехники, а также собственных исследований. Для получения сравнительных характеристик метода движущегося окна дополнительно использовали оптимизацию однотипных объектов методами полного перебора и скорейшего спуска на тестовых функциях.

Для создания методов экспериментальной оценки электромеханических и термических характеристик АД, необходимой для подтверждения адекватности оптимизационных моделей, использовали преобразования многомерной измерительной информации к числу с помощью эллиптических и параболических преобразований.

Для верификации созданных моделей и методов и обоснования возможностей САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC» использовали лабораторные и производственные мощности Одесского ЧП «Специализированное энергетическое предприятие Энерго-КОМ».

**Научная новизна** результатов диссертационной работы состоит в совершенствовании методов и моделей, предназначенных для повышения эффективности САПР систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель», энергетические показатели которых не могут быть в процессе автоматизированного проектирования рассмотрены независимо:

– впервые предложена расчетная модель системы «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель» с сопоставимыми энергетическими параметрами источника и потребителя, которая учитывает процессы, происходящие не только в электродвигателе, но и в генераторе, что позволило выделить решающее связи между этими подсистемами при решении задач в САПР асинхронных двигателей;

– впервые предложено понятие «глобальная связь» между аргументами проектируемого объекта в качестве характеристики соотношения между параметрами подсистем, когда такая связь доминирует над другими в том смысле, что он присутствует в наибольшем количестве расчетных моделей, в связи с чем, его вычисление оказывает решающее влияние на объект проектирования в целом, что позволило предложить метод расчета в САПР систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель» по глобальной связности – по номинальному расчетному скольжению в электродвигателе;

– впервые предложен метод расчета в САПР систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель», в котором промежуточной целевой функцией является не одно из потребительских качеств объекта, а номинальная глобальная связность между элементами системы, что позволило построить алгоритм проектирования по новой схеме: анализ текущего реального скольжения под нагрузкой – оптимизация номинального расчетного скольжения – расчет параметров асинхронного электродвигателя;

– получил дальнейшее развитие метод подвижного окна при проектировании сложных систем с глобальной связностью между элементами, в котором на каждой итерации ширина окна соответствует текущей величине

глобальной связности, при котором выполняется поиск приемлемых решений на каждой позиции окна, что позволило свести многокритериальную задачу к однокритериальной и повысить качество автоматизированного проектирования;

– получил дальнейшее развитие метод экспериментальной оценки текущего значения скольжения асинхронного электродвигателя, работающего под нагрузкой, отличающийся тем, что вместо стробоскопического диска в нем используется изображение геометрического фрактала с последующим фотографированием его в двух временных моментах и применением к получаемым отображениям параболического преобразования, что позволило оперативно использовать полученные результаты в процессе автоматизированного проектирования.

**Практическое значение полученных результатов.** Теоретически доказана и практически, с помощью компьютерного эксперимента и производственных испытаний, подтверждена возможность повышения эффективности проектирования и качества продукции электротехнического производства за счет использования САПР, которая обеспечивает эффективную оптимизацию параметров сложного электротехнического оборудования по глобальной связности.

В Одесском ЧП «Специализированное энергетическое предприятие «Энерго-КОМ» было проведено испытание САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC», которая базируется на предложенных моделях и методах. В качестве объекта автоматизированного проектирования использовали систему «Дизельный генератор – асинхронный двигатель переменного тока». В результате испытаний установлено, что использование САПР «OPTIGLOC» позволило уменьшить удельный расход топлива в генераторе на 5,3 %, сохранив срок службы системы и стабильность выполнения ею технических задач, и снизить сроки проектирования в среднем на 13,7 %.

Предложенные методы и модели, а также алгоритмы и программы, разработанные для их реализации, внедрены в учебный процесс в ОНПУ и

используются в дисциплинах, которые изучают методы автоматизированного проектирования, а также в курсовом и дипломном проектировании.

**Личный вклад соискателя** заключается в создании: методов экспериментальной оценки эффективности автоматизированного проектирования сложных электротехнических систем [1, 2, 3, 9, 17], метода оптимизации связности элементов в задачах автоматизированного проектирования систем [4, 7, 8, 12, 14, 18, 20], подсистем САПР, которые проектируют связанные разнородные элементы единой системы [5, 13, 15, 16, 19, 21], метода движущегося окна оптимизации глубины зоны глобальной связности [6], методов проектирования элементов систем управления сложным электротехническим оборудованием [10, 11]. Соискатель принимал участие в производственных испытаниях разработанной подсистемы САПР «OPTIGLOC» и в оценке технико-экономических результатов ее использования.

**Апробация результатов работы.** Материалы работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Молодежь в мире современных технологий» (Херсон, 2015), XX – XXIV семинарах «Моделирование в прикладных научных исследованиях» (Одесса, 2013 – 2016); 2-й Всеукраинской конференции «Информационные технологии в образовании, технике и промышленности 2015» (Ивано-Франковск, 2015); II Международной научно-технической *internet*-конференции «Современные методы, информационное, программное и техническое обеспечение систем управления организационно-техническими и технологическими комплексами» (Киев, 2015); V международной межвузовской школе-семинаре «Методы и средства диагностики в технике и социуме (MiЗДТС-2015)» (Ивано-Франковск, 2015); XVII международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2016), VII Всеукраинской научно-практической конференции «Информатика и системные науки» (Полтава, 2016), IX Annual Scientific Conference “Information Technology and Automation – 2016” (Одесса, 2016), а также на расширенном заседании научного семинара

кафедры «Информационные технологии проектирования в машиностроении» ОНПУ (Одесса, 2016).

**Публикации.** Результаты диссертации изложены в 21 публикации, в том числе: в 7 статьях в журналах из перечня специальных изданий Украины (из них 5 входят в международные наукометрические базы *Scopus*, *BASE*, *ULRICHSWEB*, *DRIVER*, *Index Copernicus*, *Worldcat*, *DOAJ*, *EBSCO*, *Freefullpdf*, *elibrary*), а также в 14 материалах конференций и семинаров.

## РАЗДЕЛ 1

### ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проектирование объектов, оснащенных электродвигателями, может осуществляться в двух различных направлениях. Во-первых, при проектировании с последующим изготовлением нового, ранее не существовавшего электродвигателя.

Работу в этом направлении можно считать весьма редкой, так как существующая богатая линейка готовых изделий подобного вида (рис. 1.1) позволяет просто подобрать необходимый вариант для самых разнообразных потребительских нужд [22].



Рисунок 1.1 – Потребительская (покупная) линейка асинхронных двигателей, предлагаемых производителями

Исключение могут составить такие уникальные, привязанные своей конструкцией к необычному объекту двигателя, как линейный, с внешним ротором [23], для уникальных приложений, например, космических аппаратов, где основным и единственным критерием качества двигателя является его масса [24], и другие, которые тоже можно отнести к категории редких. Во-вторых, при проектировании машин и аппаратов с готовыми покупными электродвигателями, выбор которых является лишь частью работы над проектом в целом [25, 26]. Поэтому, понятие «проектирование» по отношению к объектам, содержащим электродвигатели, предусматривает разделение таких объектов на три класса (табл. 1.1), в каждом из которых содержание САПР принципиально отличается.

Для объектов *первого класса* система проектирования должна принять решение (или поддержать решение проектировщика) о выборе конкретного асинхронного электродвигателя из линейки существующих стандартных покупных [27].

Объекты *второго класса* содержат оригинальные электродвигатели, проектирование которых в САПР осуществляется по принятым методикам [28], в которых параметры электрической сети (напряжение, частота и пр.) считаются неизменными, входящими в перечень исходных данных для проектирования.

Наконец, объекты *третьего класса* содержат свои встроенные в проектируемую систему относительно маломощные генераторы электрического тока, питающие электродвигатели. В таких системах, как правило, режимы работы электродвигателя, прежде всего, преодолеваемая или механическая нагрузка (момент на валу) существенно влияет на параметры тока от генератора (напряжение, частота), и все связанные с проектированием расчеты не могут быть осуществлены для них отдельно [29].

Все это весьма значительно усложняет расчеты и требует от САПР объектов, относящихся к третьему классу, новых методов и моделей для оптимизационных расчетов.

Таблица 1.1 – Классификация объектов проектирования,  
содержащих электродвигатели

№ п/п	Класс	Примеры	Функции САПР
1	2	3	4
1	Объекты со встроенными покупными электродвигателями	Металлорежущий станок; лебедка, трамвай	Выбор (поддержка выбора) электродвигателя из линейки покупных
2	Объекты с оригинальными электродвигателями, работающими от неограниченной по мощности сети (параметры работы двигателя не влияют на параметры питающего источника)	Ручной инструмент	Проектирование электродвигателя, в котором параметры сети неизменны и являются исходными данными
3	Объекты с оригинальными электродвигателями, работающими от ограниченной по мощности сети (параметры источника сильно зависят от параметров работы электродвигателя)	Система «топливный генератор – электродвигатель» для маломощных (например, бытовых) нужд в условиях отсутствия общей сети.	Проектирование системы «топливный генератор – электродвигатель» с переменными параметрами и сети, и двигателя



Наиболее распространенными двигателями, используемыми в объектах третьего класса, являются асинхронные (рис. 1.2), поэтому анализ литературы начнем с методов расчета их потребительских характеристик.

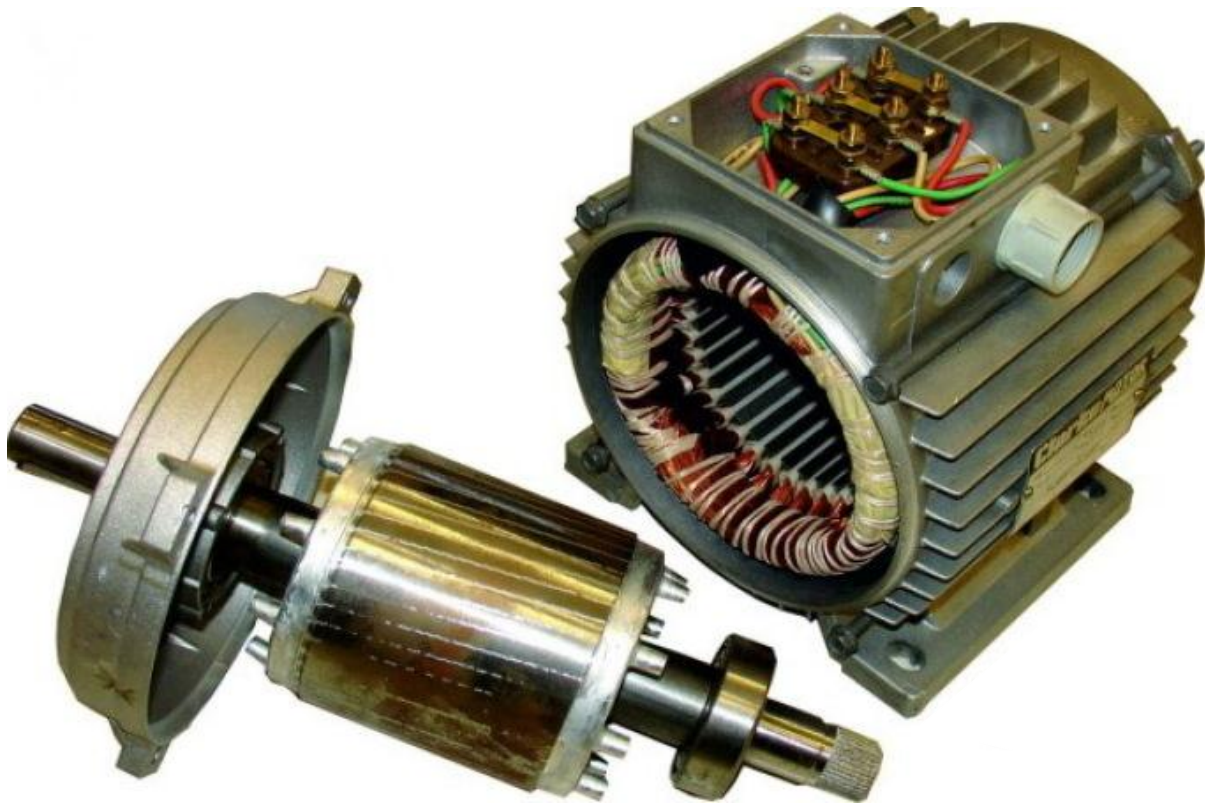


Рисунок 1.2 – Асинхронный электродвигатель

### 1.1 Расчет основных потребительских характеристик асинхронных электродвигателей в САПР

За последние годы асинхронные электродвигатели (АЭД) нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов [25]. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надёжность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота обслуживания [26, 30] и пр.

Основной потребительской характеристикой АД является его электромагнитный момент.

**Электромагнитный момент асинхронной машины.** Электромагнитный момент  $M$  возникает при наличии магнитного поля  $\Phi$ , создаваемого обмоткой статора, и тока в обмотке ротора. Показано, что электромагнитный момент определяется соотношением [28, 31, 32]:

$$M = C \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (1.1)$$

где:  $C$  – конструктивный коэффициент;  $\psi_2$  – сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора;  $I_2 \cos \psi_2$  – активная составляющая тока ротора.

Таким образом, величина электромагнитного момента зависит от результирующего магнитного поля  $\Phi$ , активной составляющей тока ротора и величины  $\cos \psi_2$ .

**В режиме двигателя** при изменении нагрузки на валу изменяется частота вращения ротора, что приводит к изменению отношения разности между скоростями вращения магнитного поля в статоре двигателя (или, что то же самое, частоты питающего тока) и скоростью вращения ротора к скорости вращения магнитного поля), так называемого скольжения [33, 34], частоты тока ротора, индуктивного сопротивления ротора и  $\cos \psi_2$ . В результате изменяется вращающий момент.

Электромагнитный момент также сильно зависит от подведенного напряжения ( $M \sim U_1^2$ ). Это является одним из недостатков асинхронных двигателей, так как приводит, например, на производстве к снижению производительности труда и увеличению брака.

**Зависимость электромагнитного момента от скольжения.** Выражение для электромагнитного момента (1.1) справедливо для любого режима работы и может быть использовано для построения зависимости момента от скольжения при изменении последнего от  $+\infty$  до  $-\infty$  (рис. 1.3).

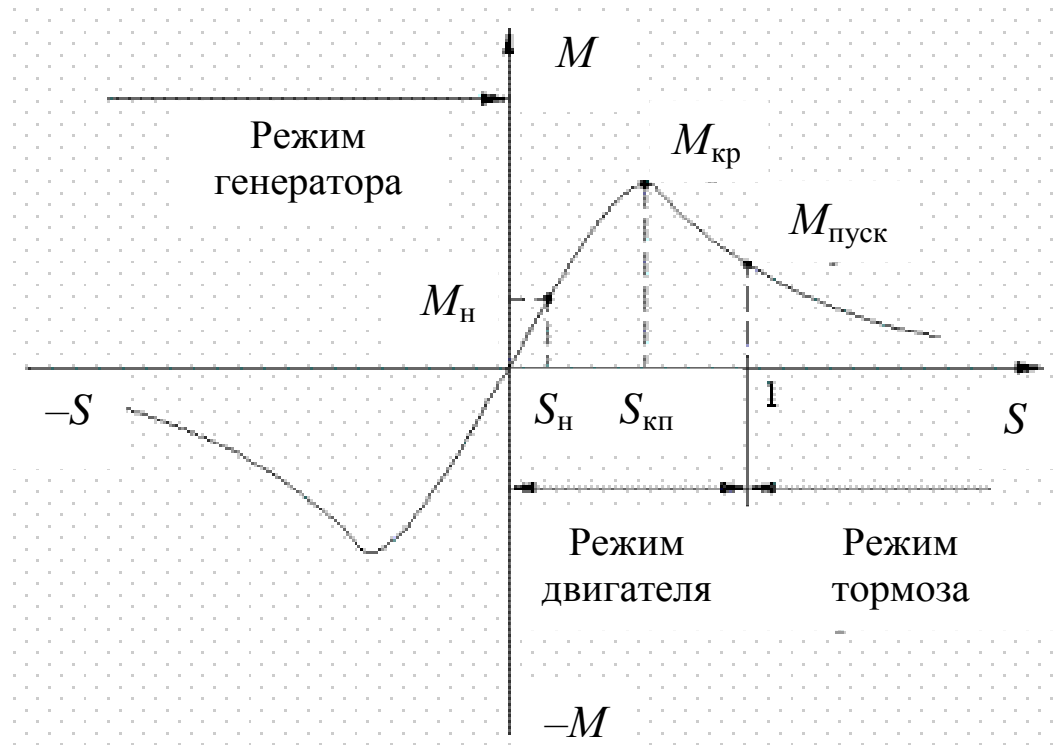


Рисунок 1.3 – Зависимость механического момента на валу асинхронного электродвигателя от скольжения

Рассмотрим часть этой характеристики, соответствующую режиму двигателя, т.е. при скольжении, изменяющемся от 1 до 0. Обозначим момент, развиваемый двигателем при пуске в ход ( $S=1$ ) как  $M_{пуск}$ . Скольжение, при котором момент достигает наибольшего значения, называют критическим скольжением  $S_{кр}$ , а наибольшее значение момента – критическим моментом  $M_{кр}$ . Отношение критического момента к номинальному называют перегрузочной способностью двигателя:

$$M_{кр}/M_H = \lambda = 2 \div 3. \quad (1.2)$$

Из анализа формулы (1.2) на максимум можно получить соотношения для  $M_{кр}$  и  $S_{кр}$ :

$$M_{кр} = C_M \frac{U_1^2}{2X_2}; \quad S_{кр} \approx \frac{R_2}{X_2}. \quad (1.3)$$

Критический момент не зависит от активного сопротивления ротора, но зависит от подведенного напряжения. При уменьшении  $U_1$  снижается перегрузочная способность асинхронного двигателя.

Из выражения (1.2), разделив  $M$  на  $M_{кр}$ , можно получить формулу, известную под названием «формула Клосса», удобную для построения  $M=f(S)$ .

$$\frac{M}{M_{кр}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}} \quad (1.4)$$

Если в эту формулу подставить вместо  $M$  и  $S$  номинальные значения момента и скольжения ( $M_n$  и  $S_n$ ), то можно получить соотношение для расчета критического скольжения.

$$S_{кр} = S_n \left( \lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (1.5)$$

Участок характеристики (рис. 1.3), на котором скольжение изменяется от 0 до  $S_{кр}$ , соответствует устойчивой работе двигателя. На этом участке располагается точка номинального режима ( $M_n$ ,  $S_n$ ). В пределах изменения скольжения от 0 до  $S_{кр}$  изменение нагрузки на валу двигателя будет приводить к изменению частоты вращения ротора, изменению скольжения и вращающего момента.

С увеличением момента нагрузки на валу частота вращения ротора станет меньше, что приведет к увеличению скольжения и электромагнитного (вращающего) момента. Если момент нагрузки превысит критический момент, то двигатель остановится.

Участок характеристики, на котором скольжение изменяется от  $S_{кр}$  до 1, соответствует неустойчивой работе двигателя. Этот участок характеристики двигатель проходит при пуске в ход и при торможении.

**Механическая характеристика асинхронного электродвигателя.** Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента  $n=f(M)$ . Эту характеристику (рис. 1.4) можно получить, используя зависимость  $M=f(S)$  и пересчитав частоту вращения ротора при разных значениях скольжения [35].

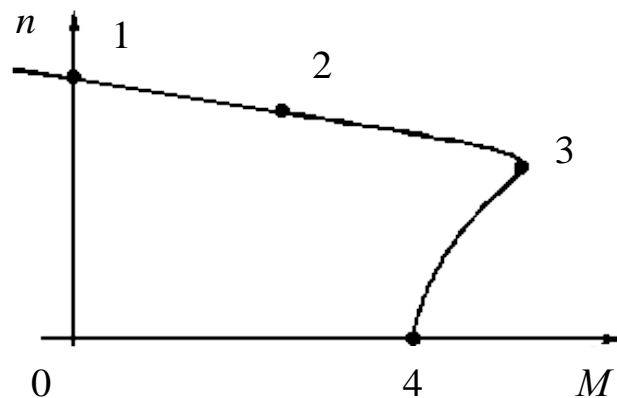


Рисунок 1.4 – Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

Так как  $S = (n_0 - n) / n_0$ , отсюда  $n = n_0(1 - S)$ . Здесь  $n_0 = (60f) / p$  – частота вращения магнитного поля.

Участок 1-3 соответствует устойчивой работе, участок 3-4 – неустойчивой работе. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда  $n = n_0$ . Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты  $M_n$  и  $n_n$ . Точка 3 соответствует критическому

моменту  $M_{кр}$  и критической частоте вращения  $n_{кр}$ . Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя  $M_{пуск}$ .

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, т.к. частота вращения ротора (участок 1-3) мало зависит от нагрузки на валу. Это одно из достоинств этих двигателей.

**Совместная работа асинхронного двигателя с нагрузкой на валу.** На рис. 1.5 рассматривается совместная работа асинхронного двигателя с нагрузкой на валу. Нагрузочный механизм (рис. 1.5 а) соединяется с валом двигателя и при вращении создает момент сопротивления (момент нагрузки). При изменении нагрузки на валу автоматически изменяется частота вращения ротора, токи в обмотках ротора и статора и потребляемый из сети ток. Пусть двигатель работал с нагрузкой  $M_{нагр1}$  в точке 1 (рис. 1.5 б).

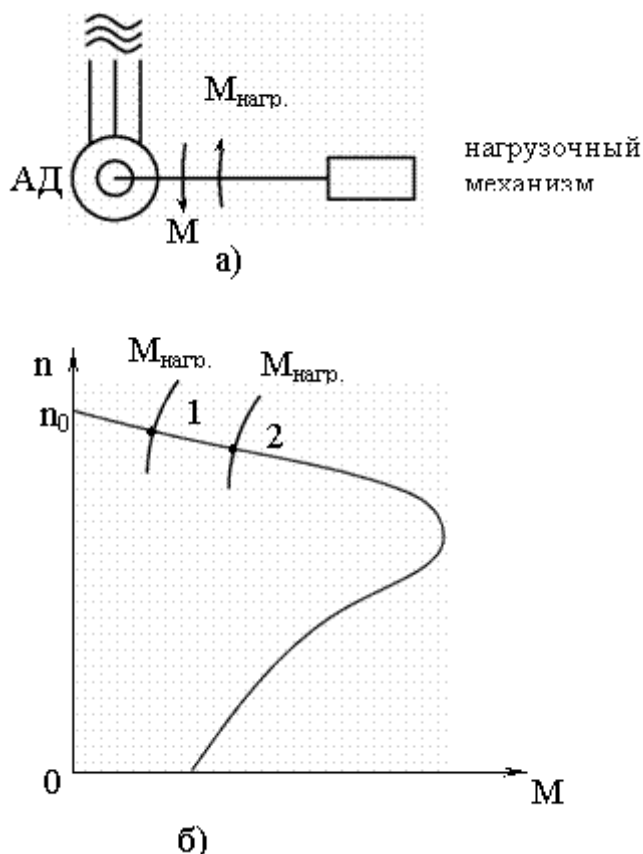


Рисунок 1.5 – Схема совместной работы асинхронного двигателя с нагрузкой на валу

Если нагрузка на валу увеличится до значения  $M_{\text{нагр}2}$ , рабочая точка переместится в точку 2. При этом частота вращения ротора снизится ( $n_2 < n_1$ ), а возрастет вращающий момент ( $M_2 > M_1$ ). Снижение частоты вращения ротора приводит к увеличению скольжения, увеличению токов в обмотках ротора и статора, т.е. к увеличению потребляемого из сети тока.

**Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением скольжения.** Этот способ используют в приводе тех механизмов, где установлены асинхронные двигатели с фазным ротором, например, в приводе подъемно-транспортных машин. В цепь фазного ротора вводится регулировочный реостат. Увеличение активного сопротивления ротора не влияет на величину критического момента, но увеличивает критическое скольжение (рис. 1.6).

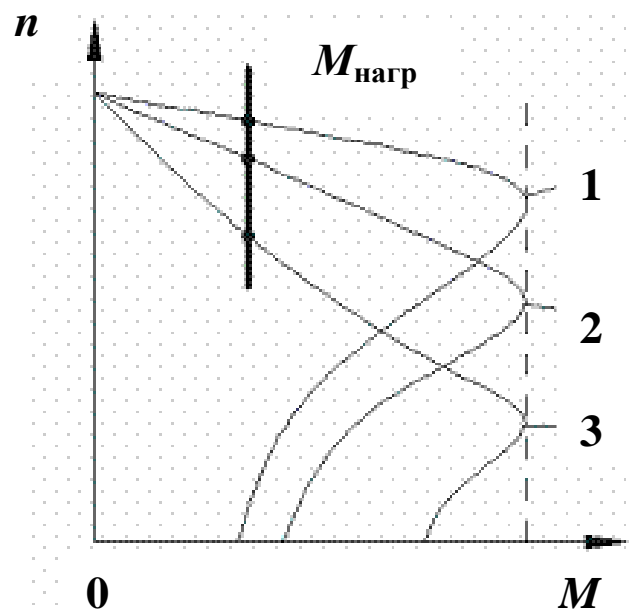


Рисунок 1.6 – Механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях регулировочного реостата  $R_{p3} > R_{p2} > 0, R_{p1} = 0$

Как следует из рис. 1.6, при этом способе можно получить большой диапазон регулирования частоты вращения в сторону понижения. Основные недостатки этого способа:

1. Из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается коэффициент полезного действия, т.е. способ неэкономичный.

2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче, т.е. снижается устойчивость работы двигателя.

3. Невозможно плавно регулировать частоту вращения.

Из-за перечисленных недостатков этот способ применяют для кратковременного снижения частоты вращения.

**Регулирование частоты в энергосистеме.** Частота является одним из важнейших показателей качества электрической энергии и важнейшим параметром режима энергосистемы. Частота в энергосистеме определяется балансом вырабатываемой и потребляемой активной мощности. При нарушении баланса мощности частота изменяется. Если частота в энергосистеме снижается, то необходимо увеличить вырабатываемую на электростанциях активную мощность для восстановления нормального значения частоты.

В соответствии с [36] частота должна находиться в пределах  $50,0 \pm 0,2$  Гц не менее 95 % времени суток, не выходя за предельно допустимые  $50,0 \pm 0,4$  Гц.

«Правила и рекомендации по регулированию частоты и перетоков» [37] устанавливают более жесткие нормы и более высокие требования к качеству регулирования частоты и перетоков активной мощности энергосистемами. В частности, должно обеспечиваться удержание текущей частоты в пределах  $50 \pm 0,05$  Гц (нормальный уровень) и в пределах  $50 \pm 0,2$  Гц (допустимый уровень) с восстановлением нормального уровня частоты и заданных суммарных внешних перетоков мощности областей регулирования за время не более 15 минут для согласования отклонений частоты с планируемыми запасами пропускной способности транзитных сетей ЕЭС в нормальных условиях.



Выделяют три взаимосвязанных вида регулирования частоты:

- первичное регулирование частоты (которое, в свою очередь, подразделяется на общее первичное регулирование частоты (ОПРЧ) и нормированное первичное регулирование частоты (НПРЧ);
- вторичное регулирование частоты (ВРЧ);
- третичное регулирование частоты (ТРЧ).

Системный оператор допускает участие энергоблоков и электростанций одновременно во всех видах регулирования при условии выполнения требований по каждому виду регулирования независимо от одновременности участия в других видах регулирования.

Мощность различных электроприёмников по-разному зависит от частоты. Если мощность, потребляемая активной нагрузкой (лампы накаливания и т.д.), от частоты практически не зависит, то мощность реактивной нагрузки существенно зависит от частоты. В целом мощность комплексной нагрузки в энергосистеме уменьшается при снижении частоты, что облегчает задачу регулирования.

Нормированное первичное регулирование частоты и автоматическое вторичное регулирование частоты и перетоков мощности являются разновидностями услуг по обеспечению системной надежности на рынке системных услуг в электроэнергетике.

*Первичное* регулирование частоты осуществляется автоматическими регуляторами частоты вращения (АРЧВ) турбин (в некоторых источниках используется термин «автоматический регулятор скорости» (АРС)). При изменении частоты вращения турбины такие регуляторы осуществляют воздействие на регулирующие органы турбины (регулирующие клапаны у паровой турбины или направляющий аппарат у гидротурбины), изменяя подачу энергоносителя.

При повышении частоты вращения регулятор уменьшает впуск энергоносителя в турбину, а при снижении частоты – увеличивает.

Назначение первичного регулирования заключается в удержании частоты в допустимых пределах при нарушении баланса активной мощности. При этом частота до номинального значения не восстанавливается, что обусловлено статизмом регуляторов.

**Общее первичное регулирование частоты.** Общее первичное регулирование частоты должно осуществляться всеми электростанциями в меру имеющихся возможностей.

**Нормированное первичное регулирование частоты.** Нормированное первичное регулирование частоты – организованная часть первичного регулирования, осуществляемая выделенными для этих целей электростанциями, на которых размещены первичные резервы и обеспечено их эффективное использование.

*Вторичное* регулирование частоты – процесс восстановления планового баланса мощности путём использования вторичной регулирующей мощности для компенсации возникшего небаланса, ликвидации перегрузки транзитных связей, восстановления частоты и использованных при первичном регулировании резервов первичной регулирующей мощности. Вторичное регулирование может осуществляться автоматически или по командам диспетчера.

Вторичное регулирование начинается после действия первичного и предназначено для восстановления номинальной частоты и плановых перетоков мощности между энергосистемами в энергообъединении.

*Третичное* регулирование используется для восстановления резервов первичного и вторичного регулирования и для оказания взаимопомощи энергосистемам при неспособности отдельных энергосистем в составе ОЭС самостоятельно обеспечить вторичное регулирование.

## 1.2 Проблемы и методы оптимизации в САПР асинхронных электродвигателей

### 1.2.1 Проблемы и существующие методы оптимизации конструктивных параметров АЭД

Для эффективного решения многих задач оптимизации сложных систем в САПР важное значение имеет результат выбора соответствующей целевой функции. При таком выборе внимание необходимо обращать не только на функциональные параметры проектируемой системы, но и на некоторые исходные, данные извне, ограничения, которые столь важны для характеристик будущей системы, что их лучше было бы получать именно в результате оптимизации.

Очевидными примерами таких ограничений могут служить некоторые стандартные размеры машин и механизмов, предельные скорости вращения и прямолинейного движения отдельных деталей и узлов в механике, «паспортные» напряжения и токи в электрооборудовании и много других.

Но существуют и менее очевидные параметры систем, которые сами являются «вторичными» при решении некоторых задач оптимизации и которые возникают лишь в результате глубокого анализа процессов, протекающих в объекте проектирования во время его жизненного цикла. К таким параметрам можно отнести показатели связности элементов сложных систем, в самой возможности реально или виртуально влиять на эту связность и находить за счет такого воздействия дополнительные возможности создания современной продукции с «заоптимальными» свойствами. С учетом постоянно растущих требований к качеству продукции, технологий и оборудования современного производства, можно утверждать, что поиск и создание методов такой оптимизации является чрезвычайно актуальным.

Взаимодействующие в электродвигателе подсистемы различной физической природы: магнитной, электрической, механической, тепловой и т.п.

позволяет рассмотреть их как сложные системы [38 – 40], которые относятся к композиционным [41, 42]. Физически системы такого типа представляют собой анизотропную среду, распространение сигнала в которой зависит от параметров приложения внешних воздействий [43]. Оптимизация таких систем в САПР является непростой задачей, поскольку необходимо учитывать существенно различные свойства подсистем.

Исходя из этого, в САПР таких изделий ставится и решается задача оптимизации конструкции асинхронных электродвигателей, что обеспечивает, например, их лучшие механические характеристики [44].

Как известно, оптимизация — это поиск вектора аргументов  $\mathbf{x}$ , доставляющих экстремум некоторой целевой функции  $f(\mathbf{x})$  [45]. Многокритериальная оптимизация — это процесс одновременной оптимизации двух или более конфликтующих целевых функций в заданной области определения [46].

Как известно, задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом [47]:

$$\min_{\mathbf{x}} \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})\}, \quad \mathbf{x} \in S, \quad (1.6)$$

где  $f_i : R^n \rightarrow R$  это  $k$  ( $k \geq 2$ ) целевых функций, а все возможные для этой задачи векторы решений  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  относятся к области определения  $S$ .

Задача многокритериальной оптимизации состоит в поиске вектора решения (множества оптимизирующих аргументов), который удовлетворяет наложенным ограничениям и оптимизирует некоторую общую векторную функцию, элементы которой соответствуют отдельным целевым функциям (1.6). Последние образуют математическое описание критерия удовлетворительности и, как правило, взаимно конфликтуют.

Отсюда, оптимизировать — значит найти такое решение, при котором значения отдельных целевых функций были бы приемлемыми для

постановщика задачи [48].

При автоматизированном проектировании систем часто возникает проблема, вызванная тем, что отдельные параметры той или иной системы принадлежат одновременно двум или более ее элементам [49]. Например, проектируя редуктор, невозможно оптимизировать скорость вращения зубчатого колеса без учета «интересов» другой шестерни, находящейся с первой на одном валу [50]; нельзя проектировать график отключения одной части электронного устройства, не согласовывая результат проектирования с другой частью, если у них общий выключатель [51] и т. п.

Подобные связи между параметрами элементов является жестким ограничением на систему в целом и, например, при последовательном проектировании элементов являются проектируемыми параметрами только для первого из них, – для последующих они автоматически переводятся в множество начальных данных.

Такой подход может как упрощать проектирование (как минимум, одним расчетным параметром меньше), так и существенно затруднять его, заставляя неоднократно возвращаться к уже спроектированным элементам или проектировать систему в целом одновременно. Для решения задачи оптимизации в этом случае используется, например, комплексный генетический алгоритм, дополненный блоком учета новых ограничений [52].

В последнее время появились работы, в которых упомянутые выше связи между элементами систем, не являются жесткими [53]. Наличие таких связей позволяет решать задачи оптимизации систем более эффективно, например, глубже, чем по Парето [54]. И в этом случае используются комплексные генетические алгоритмы, дополненные блоками адаптации расчетных моделей под «гибкую» связь между аргументами целевых функций многокритериальной оптимизации [55].

При этом не учитываются совершенно новые математические возможности «обратной» оптимизации, т.е. поиска оптимального проектного решения, когда упомянутые ограничения, обусловленные нежесткими связями

«переводятся» в множество целевых функций, так как параметры этих связей находятся в зависимости от параметров конструкции объекта и технологии его изготовления.

### 1.2.2 Проблемы и существующие методы оптимизации информации в экспериментальной поддержке САПР АЭД

Экспериментальная поддержка САПР не предусмотрена соответствующими стандартами [33]. Поэтому в работе считали этот вид поддержки частью предусмотренной аппаратной поддержки, имея при этом ввиду, что экспериментальная поддержка, как правило, состоит из трех основных компонент:

- лабораторное оборудование и измерительные приборы;
- компьютеры и программное обеспечение для виртуального эксперимента;
- компьютеры и программное обеспечение для обработки результатов первичных измерений.

Эксперимент в САПР достаточно важный этап проектирования. Прежде всего, к нему приходится прибегать для определения реальных свойств (электрических, теплофизических и пр.) закладываемых при проектировании в объект материалов.

Во-вторых, эксперимент необходим для верификации принимаемых в САПР решений и подтверждения оптимальности результатов оптимизационных расчетов.

В случае проектирования асинхронных (как впрочем, и других) электродвигателей важной экспериментальной поддержкой является оценка термического состояния воплощенных «в железо» реальных вариантов структур и параметров разрабатываемых машин. В этом случае важным элементом такой поддержки является обработка и информации, поступающей от инфракрасных источников первичной измерительной информации:

соответствующих фотоаппаратов или тепловизоров [34, 35].

Во многих явлениях, относящихся к понятию «информационное обеспечение», первичная информация от объекта проектирования поступает в виде изображения, например, цифровой фотографии, или даже видеопотока. Такая информация из-за своего огромного объема (до сотен мегабайт) не может быть встроена в автоматизированные системы управления или проектирования, а используемые при этом экспертные оценки по принципу «посмотрел – решил» отличаются низкой точностью.

Единственным приемлемым здесь методом является преобразование первичной информации к одному числу – результату измерения с помощью дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, которые широко используются в теоретических и прикладных задачах современной науки и техники.

Благодаря появившимся в последнее время компьютерным методам численной интерпретации таких уравнений, область их эффективного использования значительно расширилась.

Поэтому актуальными могут быть новые методы преобразования многомерной измерительной информации к единому числу с помощью дифференциальных уравнений в частных производных.

Цифровое изображение как информационный объект при весьма скромном разрешении каждого из трех цифровых каналов – 150 *dpi* – и 256 стандартных градаций яркости содержит  $150 \times 150 \times 256 \times 3 = 17\,280\,000$  чисел на каждый квадратный дюйм. При более высоком разрешении и нормальной площади изображения счет чисел пойдет уже на миллиарды! Еще более впечатляющий результат получается, если подсчитать таким образом объем информации, содержащейся в видеопотоках [56].

Такие многомерные «результаты измерений» можно использовать в САПР и АСУ единственным образом – методом экспертных оценок. Фактически это выглядит так: эксперт (чаще всего, один человек) смотрит на объект или на его отображение в микроскопе, тепловизоре и т. п. и относит свое

впечатление от увиденного к некоторому классу из конечного списка классов, идентификаторы которого используются для последующих расчетов. Например, измерение параметров металлографического шлифа выполняется одним из следующих методов:

- визуальное сравнение видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал;
- подсчет количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерен;
- подсчет количества пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра (равновесные зерна) или количества зерен в  $1 \text{ мм}^3$  (неравновесные зерна);
- измерение длин хорд под микроскопом или с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера [57].

При использовании перечисленных методов погрешность определения величины зерна весьма высока, т. к., в основном, они применимы для однородных структур с равновесными зернами и весьма трудоемки. При применении данных методов к разнотернистым и неравновесным структурам ошибка в определении размеров зерна значительно увеличивается.

Наиболее автоматизированным на сегодняшний день является метод, используемый в анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS 700, который реализует современные технологии автоматизированного анализа цифровых изображений микроструктуры металлов и сплавов [58].

Недостатки применения анализатора SIAMS 700 заключаются в том, что они не предназначены для оценки изображений с использованием теории пространств с дробной размерностью [59].

Сведение многомерных результатов измерений *к одному числу* также возможно различными путями, например, с помощью расчета фрактальной размерности массива чисел [59], методов нечеткой математики [60], интеллектуального мониторинга процессов [61, 62], а также методов



фрактального сжатия неподвижных и подвижных изображений [63 – 65]. Недостаток этих методов – большая временная сложность сжатия.

Первые попытки использовать численные представления дифференциальных уравнений в частных производных для снижения размерности результата измерения появились сравнительно недавно [66]. Этот метод нашел успешное применение для поиска видеопотоков в хранилищах данных [67, 68], а также измерения параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [69, 70]. Известно также применение такого подхода к оценке состояния режущего инструмента с помощью компьютерной обработки видеопотока со сходящей стружки [71 – 73].

Также метод применяется при управлении процессами нагрева твердеющего железобетона внутренними источниками тепла [74, 75] и в качестве экспресс-метода оценки изменений температуры элементов радиоэлектронной аппаратуры [76].

К сожалению, серьезной проблемой таких подходов является отсутствие математического обобщения дифференциальных уравнений в частных производных на конечно-разностные уравнения того же класса, а также методов решения таких уравнений, обращенных не на распределение фазовых переменных при заданных свойствах среды, а, наоборот, – на распределение свойств среды. Например, яркости пикселей изображения при заданных пространственных и временных распределениях фазовых переменных.

### 1.3 Многоцелевая оптимизация связанных подсистем

Задачи многоцелевой оптимизации возникают практически во всех областях человеческой деятельности. Чаще всего они связаны с ограниченностью ресурсов и невозможностью максимально (оптимально) удовлетворить потребности отдельных составляющих оптимизируемых систем.

Многочисленные внешние и внутренние ограничения лишь усугубляют создающиеся при этом трудности, снижая эффективность принимаемых решений [77].

### 1.3.1 Многоцелевая оптимизация при ограничениях

Ограничения могут быть трех типов [78]. Ограничения *первого типа* задают область определения переменных оптимизации. Эти ограничения легко выполнить, потребовав, чтобы в процессе поиска переменные не выходили за установленные рамки.

Ограничения *второго типа* – равенства – сокращают размерность пространства решений. Лучшим методом обработки этих ограничений является исключение переменных алгебраическим путем. Однако метод исключения переменных применим только до тех пор, пока уравнения ограничений допускают решение относительно независимых переменных. При наличии нескольких ограничений процесс исключения может стать достаточно громоздким. В некоторых случаях явное решение уравнений может оказаться невозможным.

К *третьему типу* относятся ограничения-неравенства. Стандартный подход к задачам оптимизации с такими ограничениями состоит в том, чтобы изменить целевую функцию для учета влияния этих ограничений.

В существующих системах решения оптимизационных задач *в ограничениях* [79, 80] определены следующие типы решаемых задач:

- доопределение неизвестных значений по имеющимся значениям параметров;
- доопределение неопределенной модели;
- отслеживание влияния одних параметров на другие на основании недоопределенной модели;
- проверка коллизий, поиск их источников и вариантов устранения;

– экспертное преобразование доопределенной модели в модель с точными значениями.

Программирование в ограничениях основано на описании модели вычислительной задачи. Такая модель представляется в виде совокупности отношений, связывающих параметры задачи. Значения параметров задает пользователь, причем они могут принимать либо точные, т.е. известные значения, либо неизвестные, либо интервальные значения, заданные в виде ограничений.

Используя описание модели задачи и информацию о значениях параметров, методы программирования в ограничениях (МПО) обеспечивают автоматическое нахождение решения [81].

Постановка задачи в общем виде, сформулированная в [81], выглядит следующим образом. Пусть на параметры  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , областями значений которых являются множества  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , заданы ограничения  $C_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $i = 1 \dots k$ .

Требуется найти наборы значений  $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$  ( $a_i \in X_i$ ), которые бы удовлетворяли всем ограничениям одновременно. Такая постановка задачи называется проблемой удовлетворения ограничений и решается при помощи различных методов и алгоритмов.

Одним из наиболее развитых подходов в программировании в ограничениях, являются недоопределенные модели, на базе которых уже реализованы различные универсальные или узкоспециализированные системы, такие как UniCalc, Немо-Тек, Time-Ex.

Из других систем, реализующих парадигму программирования в ограничениях, можно выделить такие как Prolog III, ILOG Solver, CHIP и другие. В современных САПР имеется ряд задач, где может быть применен МПО.

Однако, перечисленные выше системы не обеспечивают эффективного решения для полного класса задач, подпадающих под возможности методов программирования в ограничениях, характерных для САПР.

### 1.3.2 Многоцелевая оптимизация при ограничениях в виде связей между параметрами подсистем

Само понятие «эффективности» многоцелевой оптимизации связано с существованием связей между ее аргументами, – действительно, если аргументы не связаны, то ничто не мешает рассмотреть многоцелевую оптимизацию как множество одноцелевых, решение которых тривиально. В то же время, неоднозначность понятия «эффективность» заставляет прикладных математиков предварительно договариваться, какие методы расчета этой эффективности применять. Ведь существуют приложения, где даже такие традиционные и общепризнанные методы, как оптимизация по Парето, могут оказаться недостаточно эффективными.

Примером такого приложения являются задачи оптимизации систем со слабосвязанными аргументами, в которых именно эта слабая связь является не просто дополнительным ограничением, а целью, непосредственно связанной с предметной областью, например, с технологией.

В технических приложениях проблема связности аргументов возникает практически при любой попытке оптимизировать сложную систему. Чаще всего она возникает в процессе проектирования при решении обратных задач поиска наилучших параметров системы, удовлетворяющих, тем не менее, предъявляемым к ней требованиям [4]. Примерами такой связности могут служить соотношение скоростей вращения шлифовальных кругов, сидящих на одном валу (жесткая связь) [82], или магнитного поля статора и ротора асинхронного двигателя (слабая связь) [83]. Перечень существующих нежестких (слабых) связей в различных объектах может быть существенно расширен: это температуры внутри камеры одной металлургической печи [84], скорости движения ступеней и перил в эскалаторах [85, 86], параметры конструкции и технологии изготовления резинометаллических амортизаторов [87, 88], параметры взаимодействия элементов в измерительных системах [89, 90] и многое другое.

Такие условия чаще всего накладывают дополнительные, зачастую, нежесткие связи между оптимизирующими аргументами – параметрами объекта и среды, приводящие к существенным изменениям математических методов оптимизации в проектировании, особенно, автоматизированном, так как эти методы требуют большого объема компьютерных вычислений [91].

Как сказано выше, эти связи могут быть представлены как дополнительные ограничения, учитываемые в процессе оптимизации конструкции [92, 54], так и в качестве основных целевых функций оптимизации, позволяющих выполнить этот процесс глубже за счет выявления новых видов целевых функций и новых взаимодействий между аргументами, что, в конечном итоге, должно привлечь в процесс проектирования новые, ранее скрытые, связи и современные математические методы их учета.

Среди существующих математических методов оптимизации слабосвязанных систем наибольшее применение нашли методы дискретного программирования [93], методы адаптивных алгоритмов [94], и, наконец, эволюционные методы генетических алгоритмов, которые непрерывно совершенствуются [95]. В результате, комплексные генетические алгоритмы оказались наиболее приспособленными для решения оптимизационных задач со слабыми связями между аргументами, так как подобная связность привела не только к изменению вычислительного алгоритма, но и к структурному и параметрическому совершенствованию символьных моделей оптимизируемых систем – их хромосом [50, 44].

К сожалению, даже такие методы и модели не пригодны для оптимизации сложных систем, в которых в качестве целевой функции выступает непосредственно глубина связности, т.е. вытекающий из свойств предметной области допуск на одномоментное различие аргументов, учитываемых в разных подсистемах.

Факторов, влияющих на режим работы сложных технических систем, настолько много, что их выбор в качестве комплектующих для современных

устройств, а, тем более, создание конструкций новых машин является одной из сложнейших задач проектирования [31, 96].

Решая эту задачу, приходится не только оптимизировать параметры машин с помощью моделей механических (напряжение, деформация в подвижных элементах), электромагнитных и тепловых полей, но и учитывать внешние стохастические, прогнозные воздействия на машину и технико-экономические аспекты ее проектирования, изготовления и эксплуатации. Перечисленные факторы порождают многомерные, многоэкстремальные и многокритериальные задачи оптимизации, решение которых, с одной стороны, позволяет применять более эффективные современные математические методы, а с другой, – требует разработки и постоянного усовершенствования этих методов.

В работах А. А. Перпери, П. С. Швеца, Е. Ю. Лебедевой [53, 97] и других сделан акцент на связях между аргументами, выполнена классификация связности, показано, как многоцелевые связные задачи решаются методами эволюционной оптимизации. К сожалению, такие «интенсивные» методы (просто взаимное изменение границ ограничений) хороши для связей типа «две шестерни на одном валу», когда эти попарные (или больше) связи не взаимодействуют между собой и никак не ограничивают возможности варьирования других аргументов.

Примером такой связности параметров является скольжение в асинхронных электродвигателях [23, 25]. Скольжение – это типичное ограничение глобального типа, так как оно связывает параметры различных материальных субстанций (поле и физический объект), принадлежащих к различным подсистемам объекта и оказывает существеннейшее значение практически на все его эксплуатационные характеристики [32, 28]. Обычно при расчетах оно «выбирается из таблиц» или просто проверяется на «приемлемое значение», что, в итоге, порождает далекие от оптимума конструкции. Расчет же оптимальных значений «по скольжению» ограничивается сегодня отсутствием соответствующих методов в действующих САПР и моделей,

необходимых для реализации этих методов. Отсутствуют также оперативные методы экспериментальной оценки скольжения в АЭД, необходимые для подтверждения адекватности оптимизационных моделей.

Любой из диапазонов мягкой связности параметров электрооборудования имеет свои пределы, иначе параметры становятся несвязанными. Действительно, скольжение асинхронных двигателей ограничивается несколькими процентами, скорость движения поручней эскалатора не должна отличаться от скорости движения ступеней более чем на 2 % [86] и т.п. Однако и в этих пределах изменение отклонения параметров могут оказать существенное влияние на результаты оптимизации.

При всем концептуальном различии направлений у них можно выделить одно общее свойство: создание по-настоящему оптимальных по каким-либо критериям устройств невозможно без учета тех конкретных условий, в каких предстоит работать электродвигателю. Такие условия чаще всего накладывают дополнительные, зачастую, нежесткие связи между параметрами двигателя и среды, приводящие к существенным изменениям математических методов оптимизации в проектировании, особенно, автоматизированном, так как эти методы требуют большого объема компьютерных вычислений.

Эти связи могут быть представлены как дополнительные ограничения, учитываемые в процессе оптимизации конструкции [53], так и в качестве основных целевых функций оптимизации, позволяющих выполнить этот процесс глубже за счет выявления новых видов целевых функций и новых взаимодействий между аргументами, что, в конечном итоге, должно привлечь в процесс проектирования новые, ранее скрытые, связи и современные математические методы.

Примерами такой связности может служить соотношение скорости вращения магнитного поля статора и ротора асинхронного двигателя [30], скорости движения ступеней и перил в эскалаторах [86], параметров конструкции и технологии изготовления резинометаллических амортизаторов [5] и многое другое.

#### 1.4 Выводы и постановка задач исследования

За последние годы асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики. Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надёжность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота обслуживания и пр.

Анализом проблем и существующих методов автоматизированного проектирования сложных электротехнических систем, в частности, электродвигателей установлено, что важнейшими характеристиками потребительского качества асинхронных электродвигателей являются связанные между собой параметры тока питающей сети и двигателя, накладывающие ограничение на возможности проектировщика независимо варьировать эти величины.

Установлено, что важнейшая характеристика, связывающая и ограничивающая проектируемые параметры, – скольжение – при существующих методах проектирования задается как исходное данное, в то же время, от скольжения зависят многие потребительские характеристики электропривода.

Предложено не задаваться величиной скольжения, а получать ее путем оптимизационных расчетов. К сожалению, существующие модели и методы для таких расчетов на сегодняшний день разработаны недостаточно.

Поэтому целью работы является уменьшение сроков подготовки производства и повышения качества продукции машиностроительных предприятий на этапе автоматизированного проектирования сложного электротехнического оборудования путем разработки и внедрения методов и моделей для оптимизации глобальных связей в САПР.



Для достижения этой цели в работе были решены следующие задачи:

– проанализированы существующие проблемы и методы автоматизированного проектирования сложных электротехнических систем, в частности, систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель» (ПГ-АД);

– теоретически усовершенствовано и практически создано математическое обеспечение САПР АД: математические модели и методы оптимизации параметров сложных электротехнических систем по глобальной связности;

– разработано, изготовлено и внедрено экспериментальное обеспечение САПР АД: методы и стенды для измерения тепловых и механических характеристик АД; а также для оценки точности и адекватности принятых методов и моделей;

– разработано программное обеспечение САПР АД, которое внедрено в виде подсистемы САПР «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), базирующейся на предложенных методах и моделях;

– осуществлено лабораторное компьютерное испытание результатов исследования и производственное испытание подсистемы САПР «OPTIGLOC» с положительным техническим эффектом.

РАЗДЕЛ 2  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР СИСТЕМЫ  
«ТОПЛИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР – АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ»

2.1 Решение прямой и обратной задач оптимизации

**Решение «прямой» задачи оптимизации связанных систем.** Рассмотрим для простоты изложения двокритериальную задачу оптимизации (максимизации) двух целевых функций  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  одного одномерного аргумента  $x$  [98, 99]. В зависимости от связности аргументов  $x$  для каждой из функций получаем три задачи и три разных решения, а также, что существенно, три различных значения оптимизирующих аргументов и три степени (глубины) решение задачи оптимизации [4, 8].

1. Если аргументы для каждой из целевых функций независимые (в том смысле, что они могут принимать независимые значения из области своего существования  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ ), то имеем две независимые задачи оптимизации [100] и два ее решения:  $x^*$ , которое обеспечивает  $f_{1\max}(x^*)$ ,  $x^{**}$ , которое обеспечивает  $f_{2\max}(x^{**})$  (рис. 2.1 а).

Это дает независимые оптимумы для обеих функций и, одновременно, верхнюю (при максимизации) оценку возможных решений при оптимизации.

2. Если аргументы сильносвязаны, или полностью зависимые (могут принимать только единственное для каждой из целевых функций значения из области своего существования  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ ), то имеем одну задачу, например, Парето-оптимизации [91] и ее единственное решение  $x^*$ , которое обеспечивает  $f_{1\text{opt}}(x^*) = f_{2\text{opt}}(x^*)$  (рис. 2.1 б). Ситуация, когда достигнута эффективность по Парето – это ситуация, когда все выгоды от изменения аргументов исчерпаны [101, 102]. Диапазон значений оптимальных по Парето решений в области допустимых значений дает полезную информацию о исследуемую задачу, если целевые функции ограничены областью определения.

Одновременно это дает нижнюю оценку возможных оптимумов при сильносвязанных аргументах.

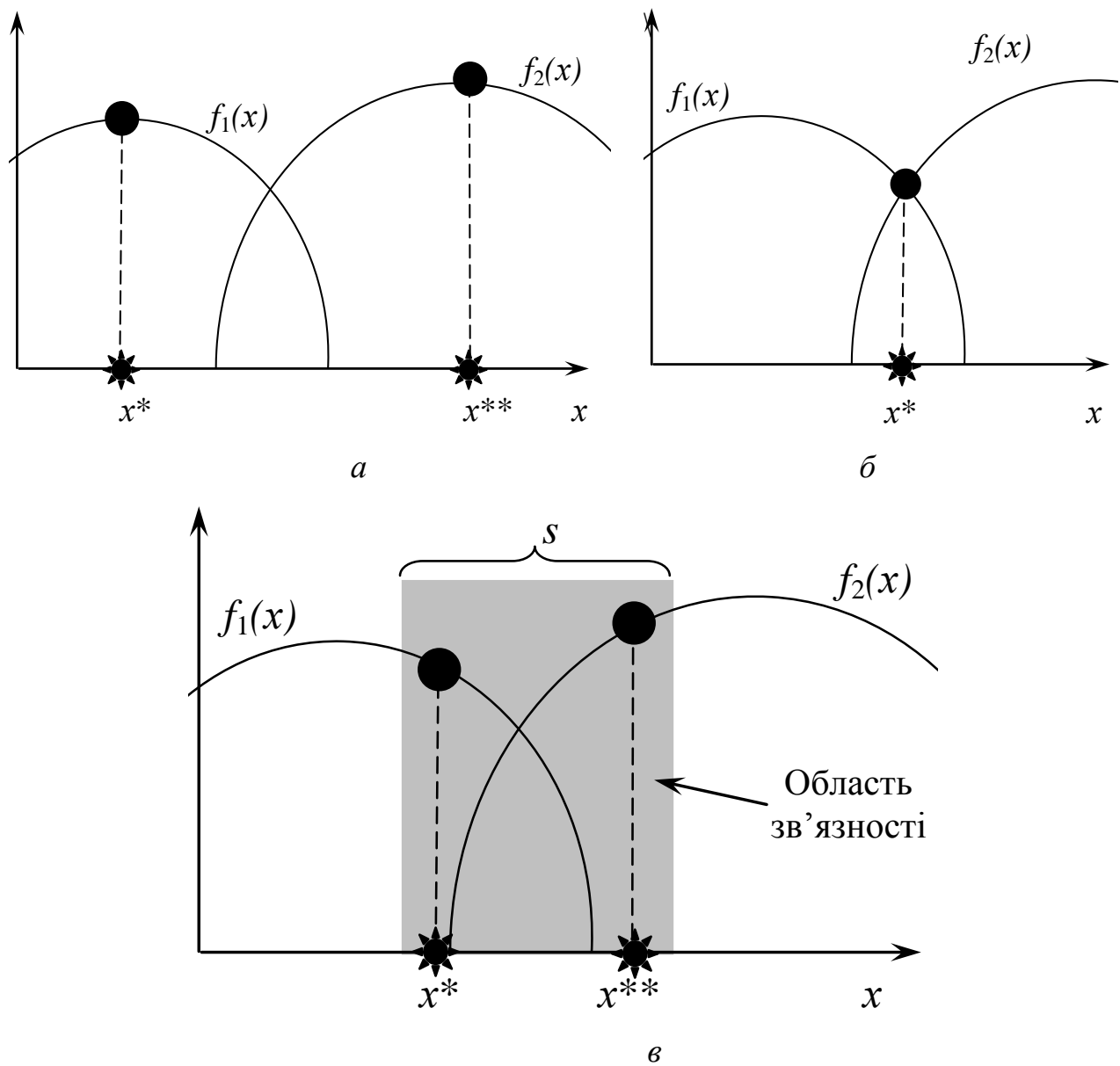


Рисунок 2.1 – Схема двухкритериальной оптимизации при одномерном аргументе:

*a* – аргумент допускает независимые решения;

*б* – аргумент допускает лишь единственное решение:

*в* – аргумент допускает связанное решение

Для решения задач многомерной оптимизации по несколькомерным слабосвязанным аргументам в САПР используют эволюционные методы, в частности, комплексный генетический алгоритм (КГА), схема которого предназначена для постоянного мониторинга во время эволюции решение с целью недопущения нарушения условий связности. В ней применяются разветвленные комплексные символьные модели генотипа объекта проектирования, который содержит по-разному связанные параметры элементов [92].

3. Дополнительная парадоксальная возможность выполнить виртуальную многокритериальная расширенной Парето-оптимизации «глубже, чем по Парето» [91] иллюстрирует рис. 2.1.

Здесь приведен случай, когда аргументы слабосвязаны, или полностью зависимы (могут принимать разные для каждой из целевых функций значения из области своего существования  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ , но только такие, которые принадлежат еще и некоторой «области связности»  $S = x_{\text{свmax}} - x_{\text{свmin}}$  ( $x_{\text{свmin}} \leq x \leq x_{\text{свmax}}$ ), которая целиком лежит в области существования и меньше по последнюю), то имеем одну задачу оптимизации и, в общем случае, два ее решения  $x^*$  и  $x^{**}$ , которые обеспечивают  $f_{1\text{opt}}(x^*) \neq f_{2\text{opt}}(x^*)$  (рис. 2.1). Расширенный оптимум Парето располагается ниже верхней и выше нижней оценок для приведенных выше двух крайних случаев оптимизации.

Для решения задач многомерной оптимизации по несколькомерным слабосвязанным аргументам в САПР используют, в основном, адаптивные эволюционные методы, в частности, адаптивный комплексный генетический алгоритм (АКГА) [55].

В нем комплексные символьные модели генотипа объекта, содержащего по-разному связанные параметры элементов, а также методы «заселения» множества аргументов первичными особями, операторы работы с такими моделями и критерии управления проектными процедурами основаны на адаптивной комплексной эволюционной оптимизации.

Схема двухкритериальной задачи оптимизации целевых функций  $f_1(\mathbf{x})$  и  $f_2(\mathbf{x})$  векторного аргумента  $\mathbf{x}(x_1, x_2)$ , который состоит из двух независимых переменных, приведена на рис. 2.2.

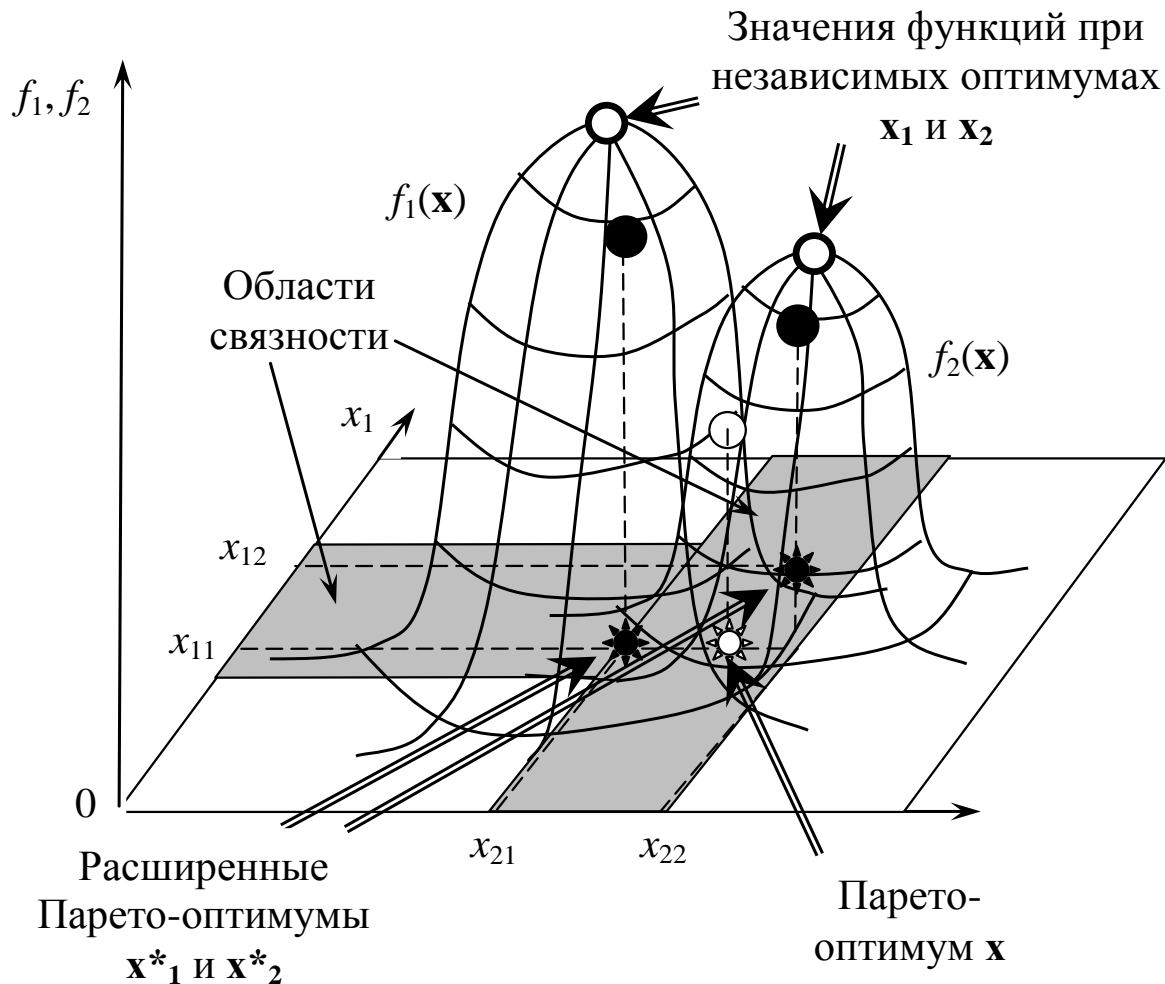


Рисунок 2.2 – Схема двухкритериальной расширенной оптимизации целевых функций  $f_1(\mathbf{x})$  и  $f_2(\mathbf{x})$  при общем для обеих функций двухмерном аргументе  $\mathbf{x}(x_1, x_2)$

Как видно на рис. 2.2, «жесткий» двухкритериальный Парето-оптимум для целевых функций  $f_1(\mathbf{x})$  и  $f_2(\mathbf{x})$  для сильносвязанных аргументов может быть улучшена при слабосвязанных, конечно, в переносном смысле, поскольку оба компонента  $x_1$  и  $x_2$  оптимизирующего аргумента  $\mathbf{x}$  фактически «раздваиваются» на неравные друг другу  $x_{11}$  и  $x_{12}$ , а также на  $x_{21}$  и  $x_{22}$ .

### Решение «обратной» задачи оптимизации связанных систем.

Вернемся к выражению (1.6) на стр. 28 и представим его в качестве прямой двухкритериальной задачи оптимизации функций двух аргументов, в которых их компоненты совпадают лишь частично, в виде:

$$\min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2} \{f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2), f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\}, \quad \mathbf{x}_1 \in S_1, \mathbf{x}_2 \in S_2 \quad (2.1)$$

где  $f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2), f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  – целевые функции,  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  – оптимизирующие векторы.

Если между оптимизирующими векторами есть слабая связь, можно записать:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_2 + \mathbf{b}, \quad (2.2)$$

где  $\mathbf{b}$  – векторный размер области связности. Отметим, что размерность этой области равно количеству связанных компонентов оптимизирующих векторов. Если в результате анализа конкретного объекта проектирования оказывается, что размерность области связности равна нулю, то оптимизация может выполняться отдельно:  $f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  по  $\mathbf{x}_1$ , а  $f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  – по  $\mathbf{x}_2$ .

Величина области связности  $\mathbf{b}$  при решении прямых оптимизационных задач входит в множества ограничений и задается на основании анализа будущего объекта. При стохастическом характере области связности вероятность отклонений  $x_1$  и  $x_2$  в ее пределах зависит от свойств объекта и условий его эксплуатации. В процессе оптимального проектирования область связности может перемещаться и изменять свой размер  $\mathbf{b}$ , которая также является случайной величиной, но параметры слабо связанных элементов будут всегда оставаться в ней.

В рамках решения обратной оптимизационной задачи в качестве целевых функций выбираются уже не свойства объекта, а именно ширину области связности  $\mathbf{b}$ :

$$\min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2} \{\mathbf{b}\}, \quad \mathbf{x}_1 \in S_1, \mathbf{x}_2 \in S_2. \quad (2.3)$$

Это, как сказано выше, предоставляет дополнительные возможности САПР, поскольку параметры целевых функций  $f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  та  $f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  отражают одни свойства объекта проектирования, а параметры области связности  $\mathbf{b}$ , как правило, совсем другие, такие, что при «обычной» оптимизации остаются вне поля зрения последней.

Рассмотрим конкретный пример из области проектирования электротехнического оборудования. В этом случае задания прямой двухкритериальной оптимизации может выглядеть следующим образом: спроектировать такой асинхронный электродвигатель, который, оставаясь в рамках теоретических и технологических ограничений, при минимальных затратах материалов ( $f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ ) обеспечит отсутствие перегрева обмоток ( $f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ ) во всех штатных режимах его работы [54, 92]. В такой постановке каждая свертка целевых функций имеет явно выраженный экстремум, поскольку увеличение габаритов электродвигателя приводит к перерасходу материалов, а уменьшение – к перегреву.

Для этого примера прямая задача оптимизации (2.1) выглядит следующим образом [91]:

$$\min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2} \{\theta(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2), m_{\text{тр}}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\}, \quad \mathbf{x}_1 \in S_1, \mathbf{x}_2 \in S_2, \quad (2.4)$$

а обратное по (2.3) таким:

$$\min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2} \{\mathbf{b}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\}, \quad \mathbf{x}_1 \in S_1, \mathbf{x}_2 \in S_2 \quad (2.5)$$

где  $\Theta(\mathbf{x}_1)$  – превышение температуры обмоток и сердечника электродвигателя над температурой окружающей среды  $\Theta$ , которое можно рассчитать по известным

соотношениям:

$$f_1(\mathbf{x}_1) = \theta(\mathbf{x}_1) = \frac{P_{\text{обм}} + P_{\text{серд}}}{\alpha_0 (S_{\text{обм}} + S_{\text{серд}})} + \Delta\theta \text{ К}; \quad (2.6)$$

$$\mathbf{x}_1 = \{P_{\text{обм}}, P_{\text{серд}}, \alpha_0, S_{\text{обм}}, S_{\text{серд}}, \Delta\theta\}, \quad (2.7)$$

где  $P_{\text{обм}}$  – суммарные потери в обмотке, Вт;  $P_{\text{серд}}$  – суммарные потери в сердечнике, Вт;  $\alpha_0$  – средний коэффициент теплоотдачи открытых поверхностей асинхронного электродвигателя, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $S_{\text{обм}}$  – площадь открытой поверхности медной обмотки, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{серд}}$  – площадь открытой поверхности стального сердечника, м<sup>2</sup>;  $\Delta\theta$  – перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, К, а  $m_{\text{тр}}(\mathbf{x}_2)$  – масса асинхронного двигателя, которая рассчитывается по известной формуле:

$$f_2(\mathbf{x}_2) = m_{\text{тр}}(\mathbf{x}_2) = m_{\text{обм}} + m_{\text{серд}} + m_{\text{доп}}; \quad (2.8)$$

$$\mathbf{x}_2 = \{m_{\text{обм}}, m_{\text{серд}}, m_{\text{доп}}\}, \quad (2.9)$$

де  $m_{\text{обм}}$  – масса обмотки;  $m_{\text{серд}}$  – масса сердечника;  $m_{\text{всп}}$  – масса вспомогательных элементов асинхронного электродвигателя (крепление, клеммы, прокладки, пропитка и т.п.).

Каждый из аргументов  $\mathbf{x}_1$  и  $\mathbf{x}_2$ , входящие в (2.6) и (2.8), в свою очередь, является функцией множества конструктивных параметров асинхронного электродвигателя.

Поскольку в этом примере два аргумента  $\mathbf{x}_1$  и  $\mathbf{x}_2$  представляют собой частично пересекающиеся множества (компоненты  $\mathbf{x}_2 = \{m_{\text{обм}}, m_{\text{серд}}\}$  однозначно зависят от некоторых компонентов  $\mathbf{x}_1 = \{S_{\text{обм}}, S_{\text{серд}}\}$ , в наличии две целевые функции  $f_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  и  $f_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ , конкурирующие «за ресурсы» – конструктивные параметры электродвигателя.

Благодаря этому «заоптимальные» значения (глубже, чем по Парето) могут быть получены не только на пути исполнения не совсем совместимых требований



к размеру и температурного режима трансформатора, но и пути конструктивных требований, которые влияют на **b**.

Аналогичные оптимизационные задачи решали при автоматизированном проектировании механических конструкций, а именно, двухступенчатого цилиндрического редуктора [103], в котором в качестве параметров целевой функции **b** выступают разницы между мощностями, которые передаются отдельными ступенями редуктора, и их КПД, а в качестве оптимизирующих параметров – размеры деталей редуктора и условия трения в его подшипниках.

2.2 Многоцелевая оптимизация объектов со связанными параметрами с помощью метода подвижного окна

Целью этой части работы являлось повышение эффективности оптимизации объектов со слабосвязанными параметрами путем использования в качестве целевой функции ширины области связности и метода подвижного (скользящего, не путать со скольжением АД!) окна для поиска оптимального решения.

Для достижения этой цели в работе были решены следующие задачи:

- предложен показатель эффективности многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами;
- разработан метод многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами по критерию величины зоны связности с помощью метода подвижного окна.

2.2.1 Показатель эффективности многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами

Влияние связей, о которых речь шла выше, рассмотрим на примере процесса оптимизации двух целевых функций  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  одного аргумента  $x$ , имеющих, как минимум, один экстремум (рис. 2.3).

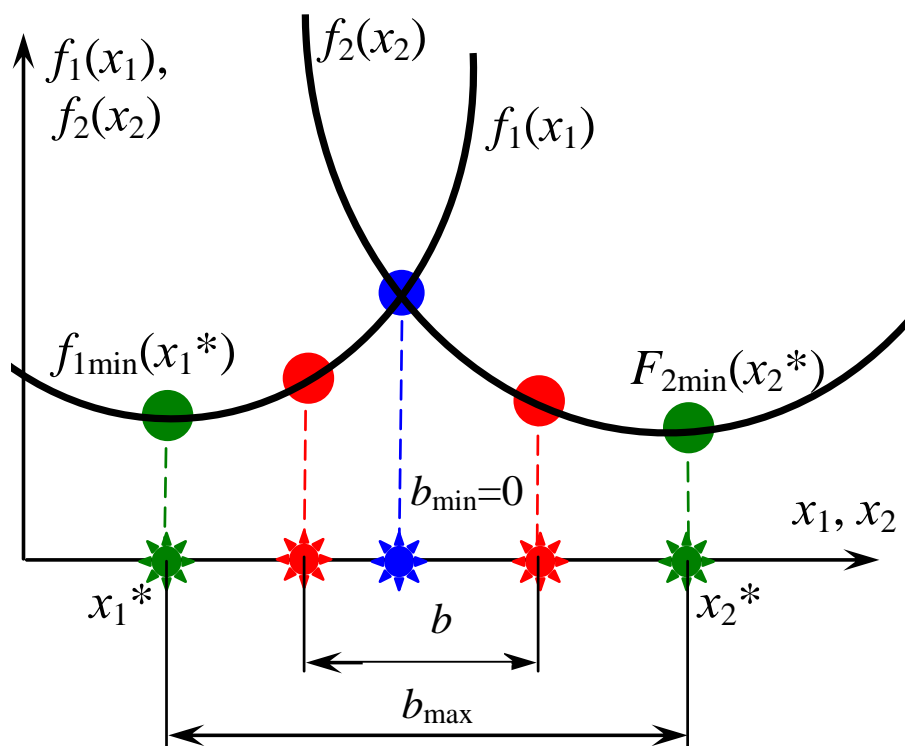


Рисунок 2.3 – Схема к расчету влияния глубины связности  $b$  на эффективность двухкритериальной оптимизации по единому оптимизирующему аргументу

Введем понятие «зона связности шириной  $b$ ». Пусть при отдельном рассмотрении (аргументы  $x_1$  и  $x_2$  не связаны никаким соотношением) функция  $f_1(x)$  достигает минимума при  $x_1^*$ , а функция  $f_2(x)$  – при  $x_2^*$  (зеленые точки на рис. 2.3). При этом расстояние между оптимальными аргументами  $x_1^*$  и  $x_2^*$  равно  $b_{\max}$ . Это связано с тем, что при  $b > b_{\max} = |x_1^* - x_2^*|$  оптимизируемый объект фактически является системой с несвязанными параметрами и не нуждается в совместной оптимизации.

Отметим, что величина  $b_{\max}$  может быть рассчитана в результате решения промежуточной оптимизационной задачи, если функции  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  известны. Величина  $b = b_{\min}$  всегда равна 0, она достигается, когда оба аргумента жестко связаны, когда они не могут одновременно отличаться, и мы имеем обычную двухцелевую оптимизацию жесткосвязанного объекта по единому

оптимизирующему аргументу  $x$ , а наилучшее значение  $x^*$ , например, по Парето, соответствует синим точкам на рис. 2.3.

Если  $b_{\min} < b < b_{\max}$  (красные точки), имеем двухцелевую оптимизацию со слабосвязанными аргументами, оптимальные значения которых могут одномоментно отличаться в пределах  $b$ :

$$|x_2^* - x_1^*| \leq b. \quad (2.10)$$

Эффективность такой оптимизации можно оценивать по-разному. **Введем показатель  $E_{ж}(x)$  эффективности многоцелевой оптимизации жестко связанных аргументов** в виде [6, 12, 14]:

$$E_{ж}(x) = \sum_{i=1}^N \frac{f_i(x)}{f_i(x_i^*)}, \quad (2.11)$$

где  $f_i(x)$  – текущее значение  $i$ -ой целевой функции;  $f_i(x_i^*)$  – оптимальное значение  $i$ -й целевой функции при оптимальном для этой функции аргументе  $x_i^*$ .

Из (2.11) непосредственно следует, что показатель эффективности для «идеальной» оптимизации, когда для всех  $N$  целевых функций достигается их оптимум, т.е.:

$$f_i(x) = f_i(x_i^*); 1 \leq i \leq N. \quad (2.12)$$

При выполнении условий (2.12) имеем:

$$E_{ж}(x) = N. \quad (2.13)$$

Очевидно, что для жесткой связности ( $b = 0$ ) в обычных технических приложениях это невозможно, если только все  $N$  функций не достигают

экстремума при одном и том же значении аргумента. Во всех реальных случаях многоцелевой оптимизации:

$$E_{\text{ж}}(x) \neq N. \quad (2.14)$$

Можно также утверждать, что  $E_{\text{ж}}(x) < N$ , если задачей оптимизации является поиск  $x$ , доставляющего функциям максимум (т.е., когда  $f_i(x^*)$  – максимумы всех функций), и, наоборот,  $E_{\text{ж}}(x) > N$ , если задачей оптимизации является поиск  $x$ , доставляющего функциям минимумы (рис. 2.4).

Проанализируем некоторые свойства и особенности предложенного показателя эффективности многоцелевой оптимизации жестко связанных аргументов. Пусть  $N = 2$ , тогда выражение (2.11) приобретает вид:

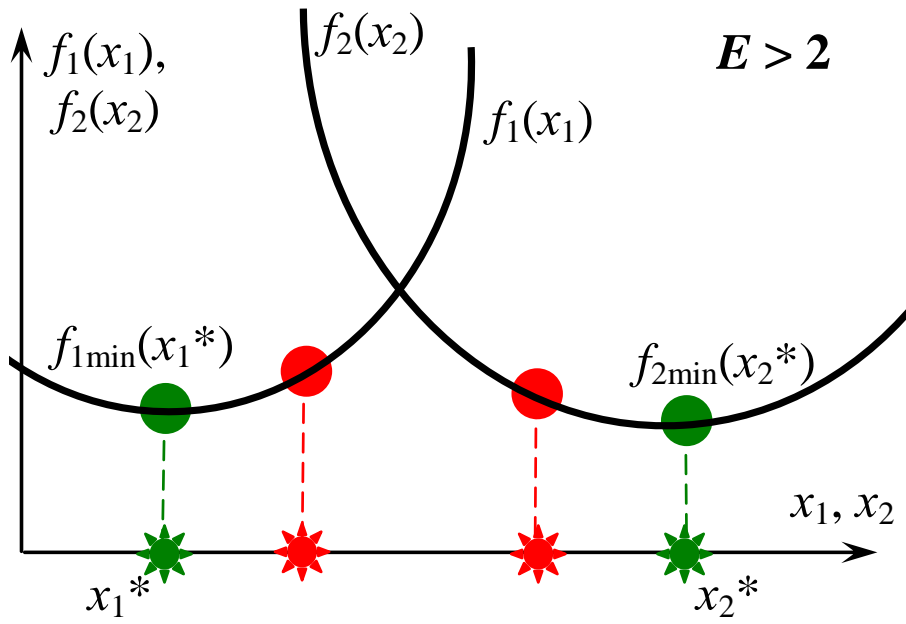
$$E_{\text{эс}}(x) = \frac{f_1(x)}{f_1(x_1^*)} + \frac{f_2(x)}{f_2(x_2^*)} \quad (2.15)$$

При  $f_1(x) = f_2(x)$  функция (2.15) достигает максимума, что соответствует оптимальности по Парето (см. рис. 2.3).

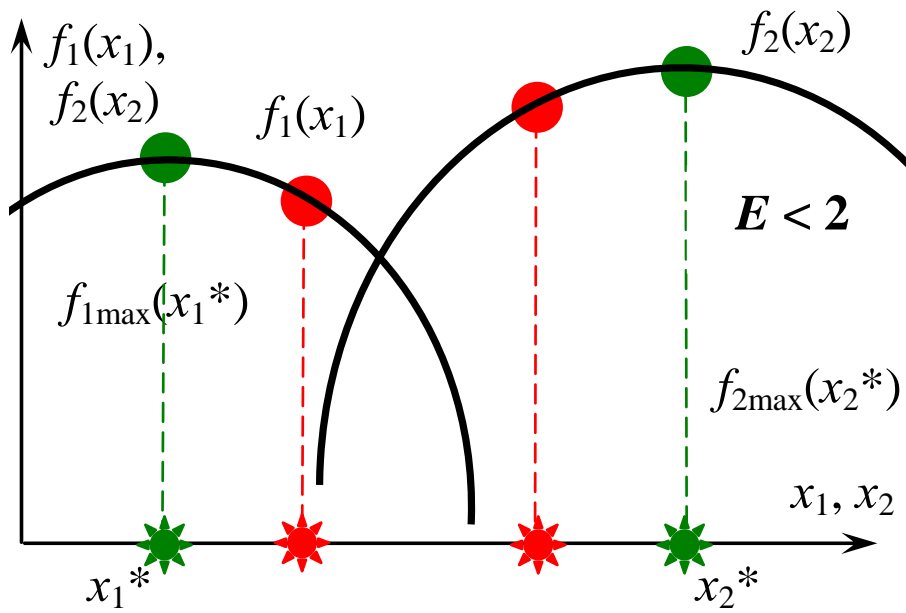
Перейдем теперь к сложным системам со слабосвязанными параметрами отдельных подсистем. Для разных функций аргументы такой системы могут одновременно отличаться, а значит, в формуле (2.15) должно появиться значение ширины зоны связности  $b$ :

$$E_c(x, b) = \frac{f_1(x, b)}{f_1(x_1^*)} + \frac{f_2(x, b)}{f_2(x_2^*)} \quad (2.16)$$

Очевидно, что от конкретного вида числителей в правой части (2.16) будет существенно зависеть вид функции эффективности  $E_c(x, b)$ . При этом зависимость  $f_i(x)$  определяется исключительно видом и свойствами оптимизируемого объекта, а  $f_i(b)$  – правилами оптимизации.



a)



б)

Рисунок 2.4 – Знак выражения  $(E_{ж}(x) - N)$  при  $N = 2$ :а –  $E > 2$ ;б –  $E < 2$

Например, если в двухцелевой оптимизации  $f_i(x)$  – параболы,  $x_1, x_2$  – концы отрезка  $b$ , а  $x$  – его середина, то:

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-6)^2}{5} + \frac{(x-17)^2}{30}; \quad b = 0; \quad (2.17)$$

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-0.5-6)^2}{5} + \frac{(x+0.5-17)^2}{30}; \quad b = 1; \quad (2.18)$$

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-2.5-6)^2}{5} + \frac{(x+2.5-17)^2}{30}; \quad b = 5; \quad (2.19)$$

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-16-6)^2}{5} + \frac{(x+16-17)^2}{30}; \quad b = 16, \quad (2.20)$$

а зависимость (2.16) интерпретируется семейством кривых, представленных на рис. 2.5.

Как видно из рисунка, величина зоны связности  $b$  существенно сдвигает оптимальное значение оптимизирующих аргументов  $x_1^*$  и  $x_2^*$ , находящихся на концах отрезка  $b$ . Этот метод хорош для малых и постоянных отрезков  $b$ , когда расстояние между его концами невелико и фиксация на них аргументов  $x_1$  и  $x_2$  не намного снижает точность оптимизации.

## 2.2.2 Многоцелевая оптимизация систем со слабосвязанными аргументами с помощью метода подвижного окна

Метод скользящего (подвижного) окна – локальное усреднение показателя, позволяющее снять влияние случайных явлений с эмпирических кривых и вскрыть закономерные пространственные изменения изучаемого признака [104]. Наблюдаемые в ближайших точках (в пределах окна) данные суммируются и делятся на число точек в окне; полученное значение присваивается средней точке. Затем в заданном направлении окно перемещается на 1 точку и операция повторяется. Размер окна зависит от характера распределения и при обработке

признаков обычно включает 3—5 близлежащих точек наблюдения. Результаты сглаживания зависят от числа точек в окне и числа приемов сглаживания.

Метод представляет собой один из вариантов проведения начального этапа корреляционного анализа. При использовании данного метода создается регулярная сетка точек. Суть «окна» заключается в том, что для подсчета искомой величины в каждой точке берутся не все точки сетки, а только определенное количество ближайших (8, 32, ...), попадающих в квадратное «окно» с центром в данной точке. Окно «перемещается» по всем узлам сетки. Далее, после того, как найдены значения, можно построить карту изолиний.

Метод скользящего окна позволяет строить карты изокоррелят, и на их основе выделять отдельные участки, для которых можно/нельзя использовать данные модели с учетом выбранных нами параметров вероятности [105].

Метод широко применяется в моделировании состояний электротехнического оборудования [106], в частности, в задачах построения математических моделей по результатам наблюдений занимает одно из главных мест в современной теории принятия решений. Большинство процессов не могут быть описаны с помощью традиционных статистических моделей, поскольку они являются существенно нелинейными и имеют или хаотичную, или квазипериодическую, или смешанную (стохастическую, хаос-динамическую, детерминированную) основу. Адекватным аппаратом для построения моделей практически любых нелинейных структур могут служить искусственные нейронные сети, которые имеют способность к моделированию нелинейных процессов, адаптации и позволяют работать с зашумленными данными [107].

В нашем случае речь идет о функциях, где *аргументом не является время*. Поэтому мы можем предоставить возможность аргументам перемещаться внутри зоны связности и, кроме того, позволить самой зоне связности изменяться при движении, т.е. положить  $b = b(x)$ . Теперь в перечень исходных данных, кроме целевых функций, дополнительно входят ширина зоны связности как функция оптимизирующего аргумента и интервал оптимизации вдоль оси оптимизирующего аргумента [18 – 20].

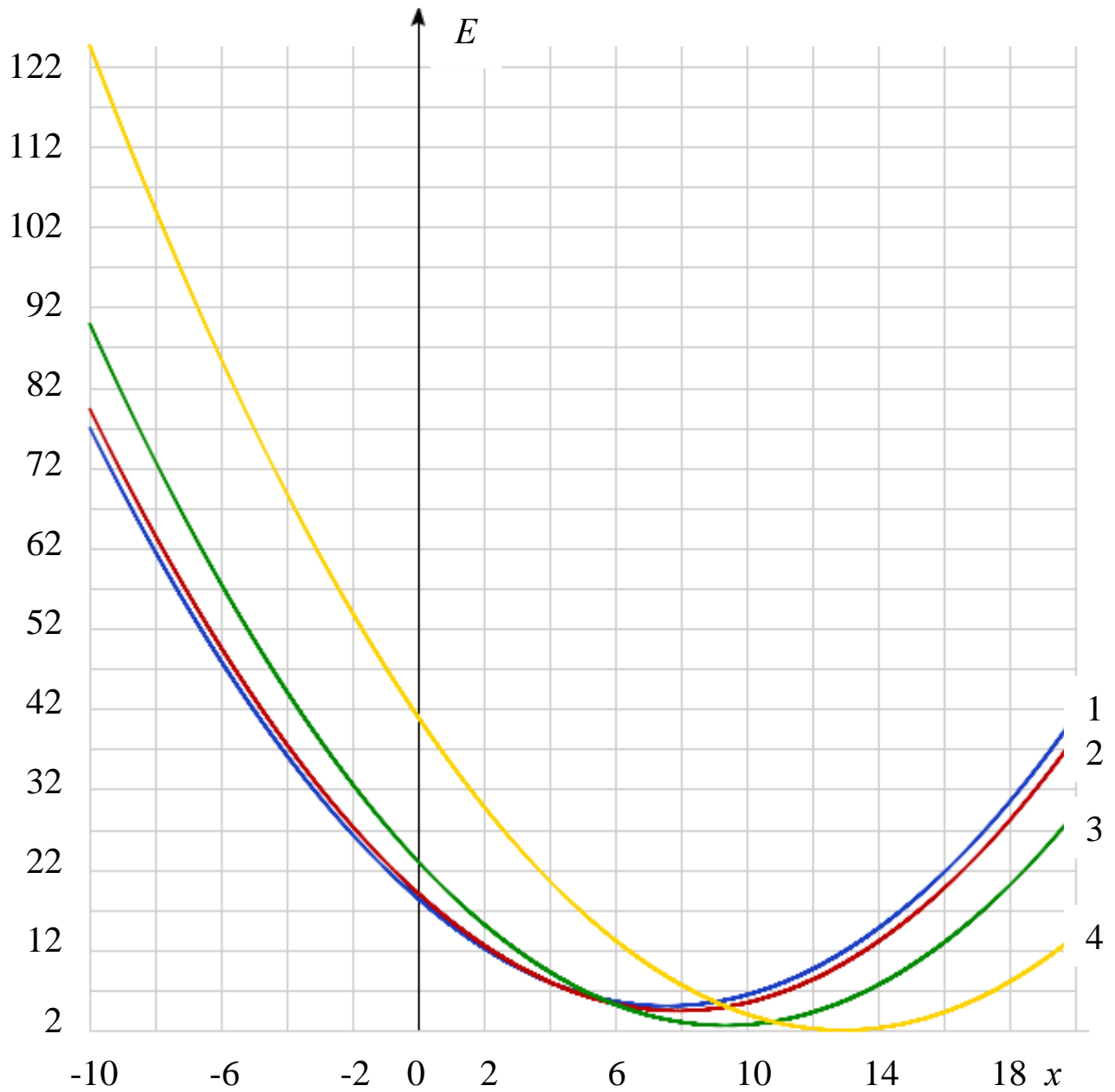


Рисунок 2.5 – Влияние аргумента  $x$  на показатель эффективности  $E$ , рассчитанный по формулам (2.14) – (2.17) при различных значениях  $b$ :

- 1)  $b = 0$ ;
- 2)  $b = 1$ ;
- 3)  $b = 5$ ;
- 4)  $b = 16$



Именно ширина зоны связности  $b = b(x)$  становится в этом методе величиной скользящего окна, которая, естественно, в общем случае также является переменной функцией аргумента  $x$ . Для оптимизационных расчетов методом «скользящего окна» отрезок шириной  $b$  дискретно перемещается вдоль оси  $x$ , порождая дискретные значения  $E_c(x, b)$ . Шаг дискретизации является в этом методе настройкой пользователя и может выбираться последним или функционально привязываться к переменным параметрам оптимизируемой системы произвольно. Работу метода иллюстрирует рис. 2.6.

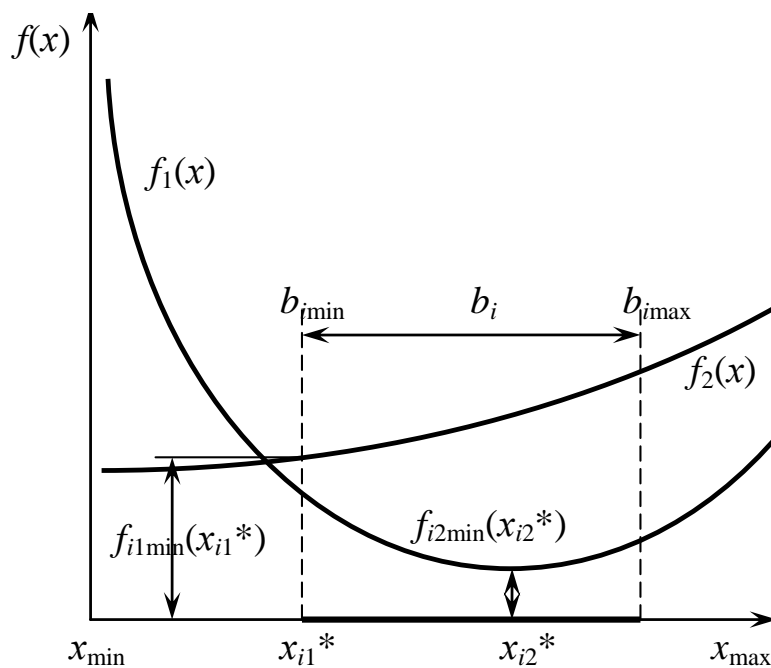


Рисунок 2.6 – Схема к методу оптимизации систем со связанными подсистемами с помощью скользящего окна

Пусть на отрезке  $x_{min} - x_{max}$  определены две функции:  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  и заданы текущие  $i$ -е дискретные значения аргумента  $b_{imin}$  и  $b_{imax}$ , определяющие начало и конец текущего  $i$ -го расположения зоны связности вдоль оси  $x$ . Затем рассчитываются минимизирующие (максимизирующие) на отрезке  $b_{imin}$  и  $b_{imax}$  значения  $x_{i1}^*$  и  $x_{i2}^*$  (см. рис. 2.6), а также соответствующие им минимальные (максимальные) значения функций  $f_{i1min}(x_{i1}^*)$  и  $f_{i2min}(x_{i2}^*)$ .

Далее, в соответствии с (2.16) рассчитывается значение функции эффективности  $E_{ic}(x, b)$  для этого расположения и этой ширины зоны  $b_i$ .

В зависимости от соотношения величины зоны связности и разницы между значениями аргумента  $x$ , доставляющими экстремумы отдельным целевым функциям, возможны три варианта допустимых оптимизационных решений.

1. Если из-за особенностей объекта проектирования (например, асинхронного электродвигателя) учитываемая связность аргументов в нем (например, скольжение) не может достигать значений, соизмеримых с метрикой между экстремумами зависящих от скольжения функций, то оптимизация последних может быть выполнена «почти по Парето».

2. Если учитываемая связность аргументов соизмерима с метрикой между экстремумами, но меньше его, то возможна оптимизация «глубже, чем по Парето».

3. Если учитываемая связность аргументов больше, чем метрика между экстремумами, то возможна математически точная оптимизация функций как абсолютно не связанных между собой.

Указанные возможности могут быть легко экстраполированы на случаи многоцелевой оптимизации с тремя и более целевыми функциями.

В общем алгоритме оптимизации систем со слабосвязанными параметрами по показателю эффективности  $E$  методом скользящего окна (рис. 2.7) все промежуточные значения  $E_{ic}(x, b)$  «собираются» в единую базу, позволяющую выбрать наилучшее в некотором смысле значение ширины зоны связности  $b$ .

Точность метода однозначно (при одних и тех же целевых функциях) определяется шагом движения скользящего окна [108]. Обычно при решении оптимизационных задач точность оптимизации задается как исходный параметр, а соответствующий этой точности шаг вычисляется [109].

Таким образом, в нашем методе величина скользящего окна вычисляется как оптимум с точки зрения удовлетворения требований связанных параметров объекта проектирования, а шаг его движения, – с точки зрения удовлетворения требований точности.

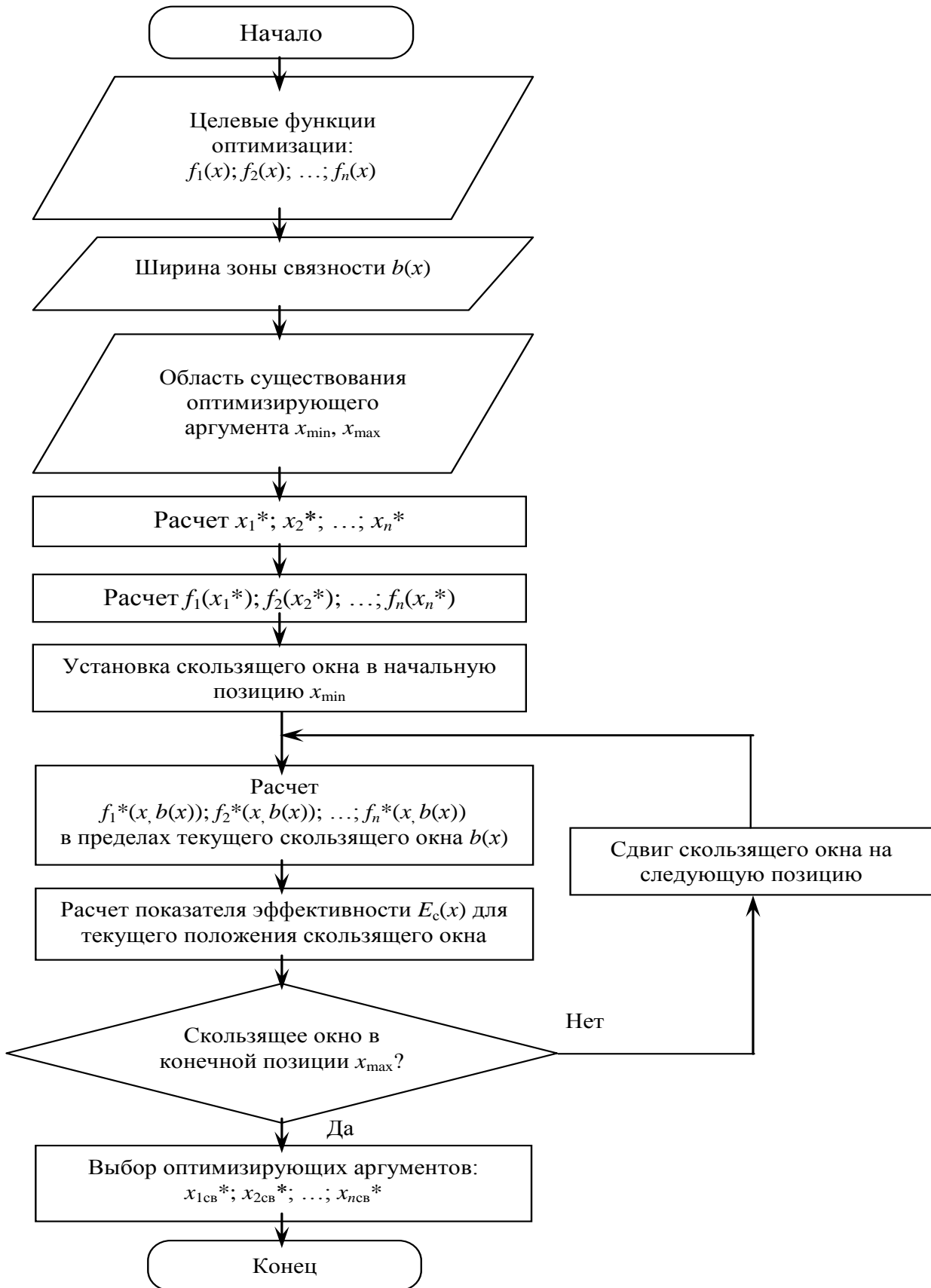


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма оптимизации систем со слабосвязанными параметрами по показателю эффективности  $E$  методом скользящего окна

## 2.3 Оптимизация с ограничениями в качестве целевой функции

Целью этого этапа работы на этом этапе являлось повышение качества проектирования технических систем на примере оборудования, содержащего асинхронные электродвигатели, за счет использования параметров связности оптимизирующих аргументов в качестве целевой функции оптимизационных расчетов.

Для достижения этой цели в работе были решены следующие задачи:

- выполнена классификация ограничений и связности аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем;
- выполнена оптимизация сложной системы по связности на примере объекта «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель».

### 2.3.1 Классификация ограничений и связности аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем

Если рассматривать сложную систему, которую мы собираемся проектировать или которой мы предполагаем управлять в качестве цепочки связанных между собой элементов, то, как известно [110], в этой цепочке всегда есть «слабое звено», – некоторый элемент, ограничивающий эффективность решения оптимизационных задач в САПР и АСУ. Иногда при взаимозависимости параметров отдельных элементов слабое звено представляет собой кластер из связанных элементов, в которых уже сами связи можно рассматривать как «слабые звенья» системы в целом.

Классическая *одноцелевая* оптимизация в САПР предполагает наличие целевой функции, вектора оптимизирующих аргументов (их количество определяет размерность задачи), от которых эта функция зависит, формул или правил вычисления значения функции по значениям этих аргументов и, наконец, ограничений на область существования аргументов. При этом ограничения в САПР воспринимаются как некоторые «досадные» природные, ресурсные,

юридические или прочие запреты на произвольное независимое варьирование аргументов проектировщиком в процессе оптимизации (назовем их *ограничениями первого рода* – ОНР) (рис. 2.8 а).

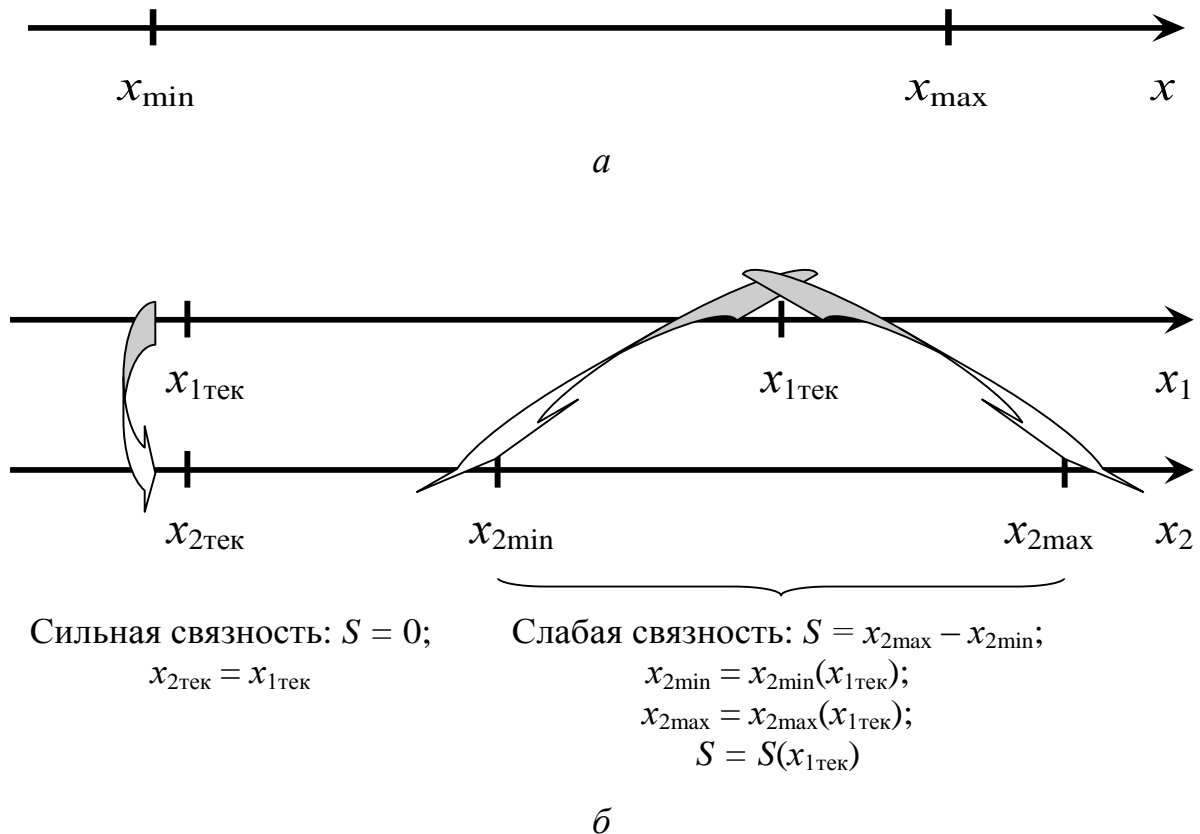


Рисунок 2.8 – Классификация ограничений при оптимизации связанных сложных технических систем:

а – ограничения первого рода (ОНР);

б – ограничения второго рода (ОВР)

Связи между аргументами (*ограничения второго рода* – ОВР) в этом случае просто понижают размерность исходной задачи оптимизации, упрощая ее решение (рис. 2.8 б).

С другой стороны, существует большая группа сложных систем, в которых одна (глобальная) связь между аргументами доминирует над всеми остальными в том смысле, что она присутствует в наибольшем количестве решающих правил (формул и т.п.) в процессе оптимизации, ее выбор оказывает решающее влияние

на объект в целом (рис. 2.9). В этом случае перспективным представляется постановка и решение обратной задачи, когда именно *величина связности становится оптимизирующим аргументом*, а остальные параметры существования системы в целом переводятся в список ограничений первого или второго рода.

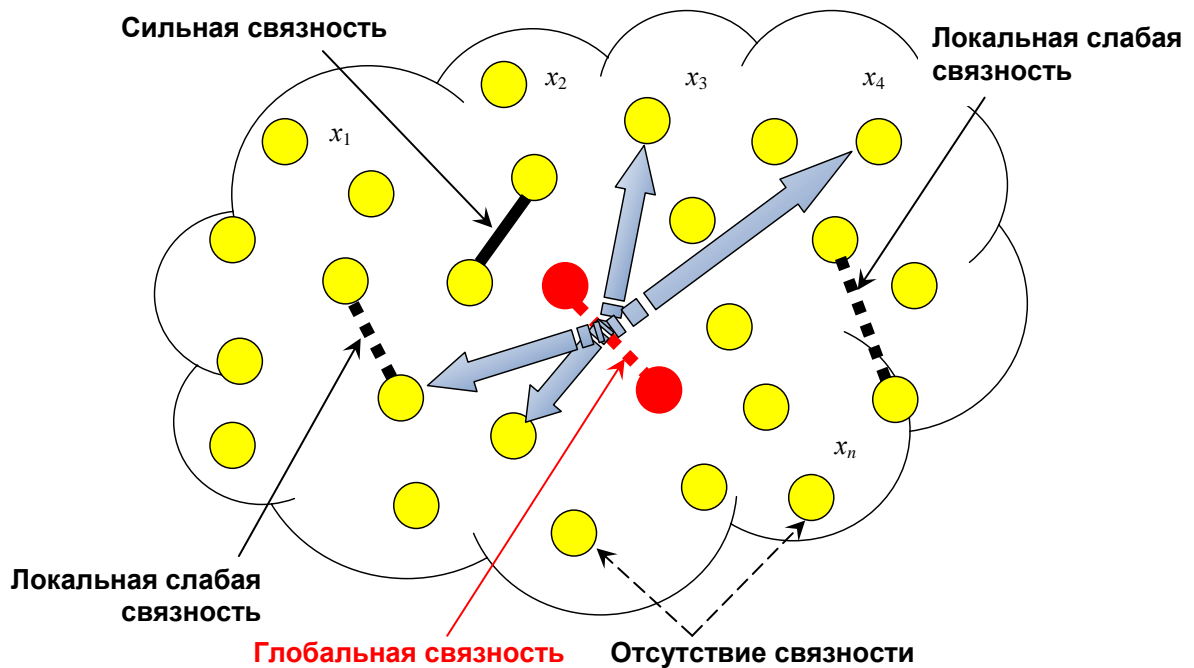


Рисунок 2.9 – Локальные и глобальная связности параметров сложных систем

В то же время, в реальных сложных технических системах (например, в электротехническом оборудовании) целевых функций всегда существует больше одной, например, стоимость и масса, размеры и надежность и т.п. Это порождает в САПР задачи *многоцелевой* оптимизации, не имеющие, в общем случае, однозначного решения. Это решение проектировщик вынужден выбирать из множества «приемлемых», например, множества Парето, что, с одной стороны, делает задачу «нечеткой» (нельзя математически доказать, что выбранное решение действительно оптимально), а с другой, – создает новые возможности для расширения множества «приемлемых» решений [6].

### 2.3.2 Оптимизации сложной системы по связности на примере объекта «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель».

Рассмотрим в качестве примера систему системы «электрогенератор – электродвигатель» (рис. 2.10). Пусть в этой системе подсистема «Топливный (дизельный) электрогенератор покупная (ее проектирование состоит в выборе подходящей модели), а подсистема «Асинхронный электродвигатель» – подлежит проектированию в части оптимизации конструкции и основных электромеханических параметров.

На рис. 2.10 приведены также основные расчетные характеристики подсистем, причем, расход топлива генератором  $Q$  примем за естественную целевую функцию оптимального проектирования, а номинальный момент на валу  $M_H$  – техническим заданием на *потребительскую характеристику* системы в целом. Максимальный электромагнитный момент  $M_m$  связан с номинальным следующим соотношением [32]:

$$M_m = \frac{3 \cdot p \cdot U_H^2}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \left[ r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \frac{1}{M_H}, \quad (2.21)$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение;

$p$  – количество полюсов электродвигателя;

$M_H$  – номинальный момент на валу двигателя;

$x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора;

$x_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора;

$x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора;

$r_1$  – активное сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре;

$r_2$  – активное сопротивление обмотки ротора;

$r_2'$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора


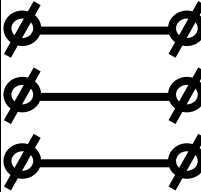
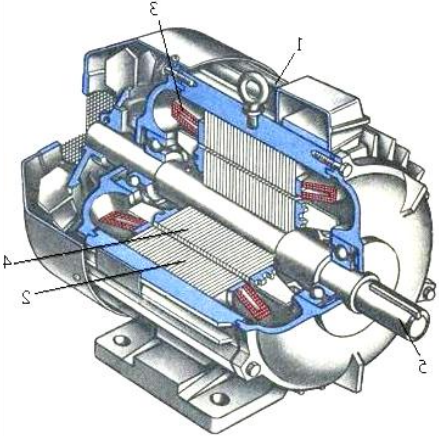


Общий вид подсистемы	Связь	Общий вид подсистемы	
 <p data-bbox="225 674 715 712">Бензиновый электрогенератор</p>	 <p data-bbox="858 969 954 1055">Мини ЛЭП</p>	 <p data-bbox="1110 1070 1394 1155">Асинхронный электродвигатель</p>	
 <p data-bbox="233 1211 707 1249">Дизельный электрогенератор</p>			
 <p data-bbox="256 1688 687 1727">Газовый электрогенератор</p>			
<p data-bbox="150 1749 767 1877">Параметры подсистемы: расход топлива, <math>Q</math>; напряжение на выходе, <math>U</math>; ток в ветвях, <math>I</math>; частота на выходе, <math>n_1</math></p>	<p data-bbox="852 1749 963 1832">Трех-фазная</p>	<p data-bbox="1023 1749 1469 1877">Параметры подсистемы: момент на валу, <math>M</math>; частота вращения вала, <math>n_2</math></p>	

Рисунок 2.10 – Объект проектирования: система «электрогенератор – электродвигатель», соединенная трехфазной связью и его основные параметры



Как известно, работа  $A$  постоянной силы, приложенной к вращающемуся телу, равна произведению вращающего момента  $M$  на угол поворота  $\varphi$ :

$$A=M\cdot\varphi. \quad (2.22)$$

Если работа совершается силой, приложенной к вращающемуся телу, и притом равномерно, то мощность в этом случае рассчитывается по формуле:

$$P=M\cdot f_2. \quad (2.23)$$

Таким образом, мощность силы [Вт], приложенной к вращающемуся телу, равна произведению вращающего момента [Н·м] на угловую скорость [об/мин].

Физический смысл кривых на рис. 2.11 такой: площадь под ними представляет собой некоторую интегральную мощность  $P_{\text{инт}}$ , развиваемую асинхронным электродвигателем при изменении количества оборотов его вала (при неизменной частоте сети  $f_1$ ) от  $f_{2\text{min}}$  до  $f_{2\text{max}}$ :

$$P_{\text{инт}} = \int_{f_{2\text{min}}}^{f_{2\text{max}}} M(f_2) df_2, \quad (2.24)$$

а площадь между кривыми 1 и 2 – интегральное изменение мощности при переходе от частоты генератора 50 Гц к частоте 45 Гц.

Повышение момента на валу двигателя приводит не только к снижению числа его оборотов (рис. 2.11). При недостаточной мощности генератора это, в свою очередь, приводит к падению частоты тока, вырабатываемого последним (рис. 2.11), и к срабатыванию частотной защиты [111 – 113], приводящему к увеличению мощности генератора за счет повышения расхода горючего.

Разница частот между кривыми имеет прямое отношение к скольжению, что позволяет поставить и решить задачу оптимизации скольжения как глобальной связности в системе «генератор – двигатель», где целевой функцией выступает

расход горючего [82]. В работе в рамках САПР такую задачу решали методом подвижного окна, описанным выше [6].

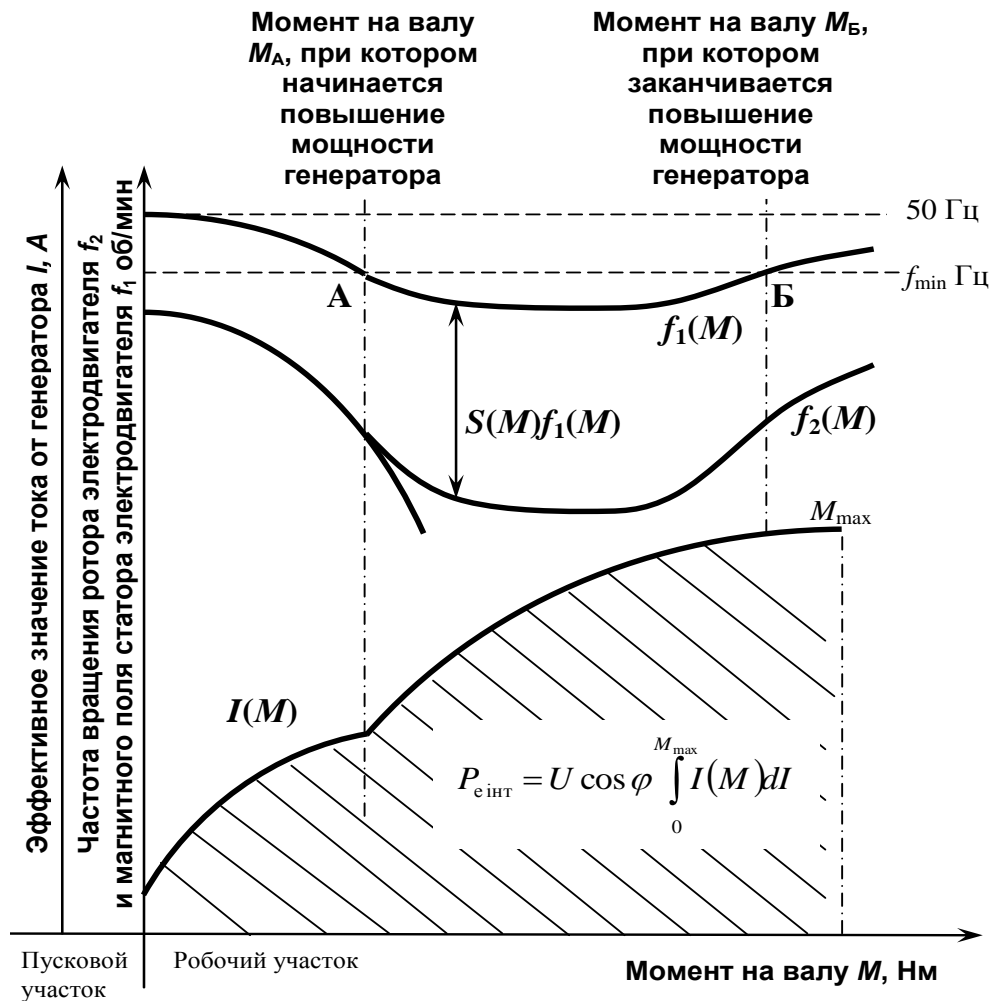


Рисунок 2.11 – Зависимости частот  $f_1$  и  $f_2$  от момента на валу

Примером такого ОТР в АД, которое оказывает существенное влияние практически на все его эксплуатационные характеристики, является реальное текущее электрическое скольжение  $s = (f_1 - f_2) / f_1$ , которое связывает параметры различных материальных субстанций (поле и физический объект), принадлежащих к различным подсистемам системы «генератор – АД»:  $f_1$  – частота вращения магнитного поля статора,  $f_2$  – частота вращения ротора двигателя. В случае системы «ТГ-АД» с близкими значениями мощности *оба* эти параметра, а следовательно и скольжение, существенно зависят от момента на

валу АД  $M$ :  $f_1(M)$ ,  $f_2(M)$  и  $s(M)$ . Но скольжение одновременно является *расчетной* характеристикой в САПР АД.

Это означает, что во время проектирования расчетное (номинальное) значение скольжения  $S$  – суть число, а фактическое скольжение  $s$  – функция режима работы АД. Поэтому в работе реализован метод «обратного» расчета скольжения  $S$ , которому предшествует «прямой» расчет функции  $s(M)$  (рис. 2.12).

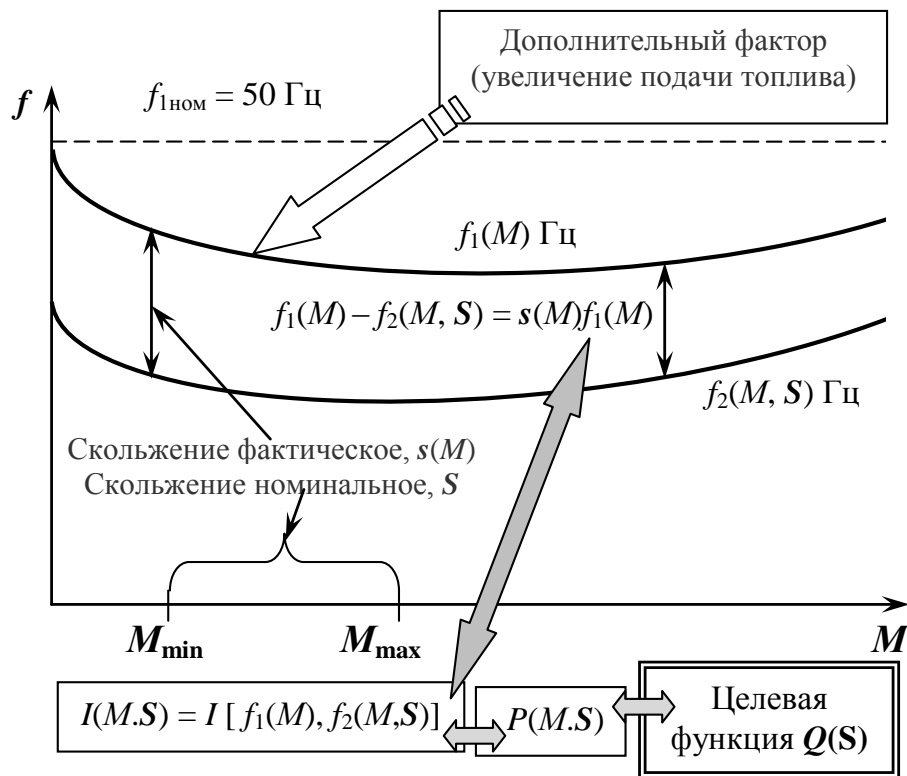


Рисунок 2.12 – Информационная схема оптимизации расчетного значения скольжения  $S$

Отметим, что вид кривых на рис. 2.12 – с явно выраженным минимумом – соответствует такому режиму работы системы, когда некоторый «дополнительный фактор» всякий раз разгоняет мощность работы генератора при критическом уменьшении частоты вращения магнитного поля статора  $f_1$ . При этом значение  $f_1$  восстанавливается, а расход топлива  $Q$  в генераторе – увеличивается.

На рис. 2.12 обозначены оба вида скольжения: фактическое (текущее)  $s$  и номинальное  $S$ .

Последовательность операций метода при использовании в качестве глобальной связи скольжения приведена на рис. 2.13. Сначала происходит выбор вида промежуточной целевой функции оптимизации, далее – выявление всех учитываемых в САПР связей между элементами системы, и, наконец, выбор глобальной связи.



Рисунок 2.13 – Последовательность операций при расчете скольжения  $S$  в САПР системы «ТГ-АД»

Далее строятся зависимости  $f_1(M)$  и  $f_2(M, S)$  и определяются функции  $I(M, S)$  и  $P(M, S)$ . Интегрируя последнее, получаем целевую функцию – расход топлива  $Q(S)$  в генераторе.

Оптимизация в рамках предложенного метода заключается в подборе такого номинального значения  $S$ , при котором интегральный расход топлива  $Q$  в генераторе будет минимальным. В любом случае, имея «прямую» зависимость  $Q(S)$ , можно решать обратную задачу оптимизации: поиск номинального значения скольжения  $S^*$ , которое (в заданных пределах) гарантирует не превышение заданного расхода топлива  $Q^*$ . Такая задача, по существу, является задачей оптимизации со связанными аргументами, поскольку скольжение  $S$  является функцией слабосвязанных между собой моментов  $M_{\min}$  и  $M_{\max}$ .

Дальнейшая последовательность операций при проектировании асинхронного двигателя соответствует стандартной схеме [32, 28] (см. Приложение А), но скольжение в результатах расчетов уже не «получается» и не проверяется на соответствие допуску, а является результатом описанных выше оптимизационных расчетов [7, 11, 13].

## 2.4. Выводы

1. Главным результатом настоящего исследования является предложенный показатель эффективности оптимизации слабосвязанных систем, позволяющий оценивать количественно глубину оптимизации за пределами Парето-оптимальных решений. Наличие такого показателя позволило предложить новую постановку оптимизационных задач, в которой целевыми функциями являются уже не параметры подсистем объекта, а допустимая свойствами последнего ширина зоны связности его аргументов. Поскольку ширина зоны связности определяется с конструкцией объекта либо технологией его изготовления, такая постановка позволяет применять эти задачи в системах автоматизированного проектирования.

2. Для сравнительной возможности оценки разных вариантов объектов со слабосвязанными параметрами предложен показатель, представляющий собой сумму относительного отклонения от оптимальности по всем целевым функциям.

Для систем с малым возможным отклонением оптимизируемых аргументов предложен ускоренный метод оптимизации с помощью скользящего окна постоянной ширины и с фиксированными концами. Для систем с относительно большим возможным отклонением оптимизируемых аргументов предложен расширенный метод оптимизации с помощью подвижного окна переменной ширины и с плавающими концами.

3. Выполнена классификация ограничений и связностей аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем. Введено понятие «глобальная связность», влияющая на большинство конструктивных и эксплуатационных параметров системы в целом. В стандартных схемах проектирования асинхронных электродвигателей такой глобальной связностью является скольжение – целевая функция оптимизации. Предложена постановка и решение обратной задачи, когда в качестве целевой функции выступает важнейшая потребительская характеристика – расход горючего, а величина связности становится оптимизирующим аргументом, при этом остальные параметры существования системы переводятся в список ОПР и/или ОВР

### РАЗДЕЛ 3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Экспериментальное обеспечение является частью технического обеспечения САПР [114] и представляет собой лабораторное оборудование для натуральных (физических) экспериментов и компьютерную технику для виртуальных экспериментов.

Экспериментальное обеспечение служит в САПР поддержкой принятия как структурных, так и параметрических решений в процессах оптимизации с точки зрения соблюдения различных ограничений, например, тепловых, механических, электрических и др.

Экспериментальное обеспечение незаменимо также в САПР для определения свойств материалов, закладываемых в конструкцию (плотности, прочности, жесткости, теплоемкости, теплопроводности, электропроводности, и многих других), которые, как правило, у реальных веществ и их композиций намного отличаются от «паспортных» справочных данных, а некоторых отсутствуют вообще.

Поскольку проектировщики в САПР работают с моделями будущих объектов, экспериментальное обеспечение позволяет им убеждаться, что принятые ими методы и модели адекватны и соответствуют заданной точности оптимизационных расчетов.

### 3.1 Экспериментальная поддержка проектирования процессов теплообмена

Важнейшим этапом при проектировании асинхронного электродвигателя является тепловой расчет.

В «стандартной» постановке тепловой расчет выполняется для номинальной нагрузки, определяется среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды. Он включает в себя следующие этапы.

1. Расчет превышения температуры внутренней поверхности статора над температурой воздуха внутри двигателя.

Коэффициент увеличения потерь выбирается по сравнению с полученными при расчетной температуре, согласно классу изоляции:  $K_p = 1,15$ . Тогда:

$$\Delta P'_{en1} = K_p \cdot \Delta P_{e1} \frac{2 \cdot l_\delta}{l_{cp1}} = 1,15 \cdot 230,882 \frac{2 \cdot 7,8}{35,31} = 117,31 \text{ (Вт)} \quad (3.1)$$

Коэффициент, учитывающий часть потерь в сердечнике статора, передаваемых воздуху внутри двигателя, выбирается в зависимости от класса изоляции и числа пар полюсов:  $K = 0,19$ .

Коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора выбирается в зависимости от исполнения:  $\alpha_1 = 71$ . Тогда:

$$\Delta \Theta_{nos1} = \frac{K(\Delta P'_{en1} + \Delta P_c)}{\pi \cdot D \cdot l_\delta \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_1} = \frac{0,19(230,882 + 66,666)}{3,14 \cdot 8,8 \cdot 7,8 \cdot 10^{-4} \cdot 71} = 18,696 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (3.2)$$

2. Расчет перепада температур в изоляции пазовой части обмотки статора

Расчетный периметр поперечного сечения паза статора выбирается равным  $P_{n1} = 3,63 \text{ см}$ .

Средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции выбирается равной  $\lambda_{екв} = 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ .



Среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки выбирается равным  $\lambda'_{\text{екв}} = 1.08 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_{\text{изн1}} &= \frac{\Delta P_{\text{ен1}}'}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_{\delta}} \left( \frac{b_{\text{ук}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) \cdot 10^2 = \\ &= \frac{117.31}{36 \cdot 3.63 \cdot 7.8} \left( \frac{0.02}{0.16} + \frac{0.6 + 0.43}{16 \cdot 1.08} \right) \cdot 10^2 = 2.124 \text{ (}^\circ\text{С)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

3. Расчет перепада температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta P'_{\text{эл1}} = K_p \cdot \Delta P_{\text{ел}} \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} = 1.15 \cdot 230.882 \frac{2 \cdot 9.856}{35.31} = 148 \text{ (Вт)}. \quad (3.4)$$

Односторонняя толщина витка изоляции лобовой части катушки принимается равной  $b_{\text{ук}} = 0.02 \text{ см}$ .

Для всыпной обмотки из круглого провода  $\lambda'_{\text{екв}} = 1.08 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_{\text{изн1}} &= \frac{\Delta P_{\text{ен1}}'}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_{\delta}} \left( \frac{b_{\text{ук}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) \cdot 10^2 = \\ &= \frac{117.31}{36 \cdot 3.63 \cdot 7.8} \left( \frac{0.02}{0.16} + \frac{0.6 + 0.43}{16 \cdot 1.08} \right) \cdot 10^2 = 0.001296 \text{ (}^\circ\text{С)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

4. Расчет превышения температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины.

Средняя ширина катушки:

$$b_{кз} = \pi(D + 2h_{n1}) \cdot \frac{\beta}{2 \cdot p} = 3.14(8.8 + 1.3) \cdot \frac{1}{6} = 5.97 \text{ (см)}. \quad (3.6)$$

Длина вылета лобной части:

$$l_{\text{вл1}} = K_{\text{вл1}} \cdot b_{кз} + B = 0.5 \cdot 5.97 + 1 = 3.98 \text{ (см)}; \quad (3.7)$$

$$\Delta\Theta_{\text{новл1}} = \frac{K \cdot \Delta P'_{\text{эн1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_1} = \frac{0.19 \cdot 0.148}{3.14 \cdot 8.8 \cdot 7.8 \cdot 10^{-4} \cdot 71} = 0.018 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (3.8)$$

5. Расчет среднего превышения температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_1' &= \frac{(\Delta\Theta_{\text{нос1}} + \Delta\Theta_{\text{изн1}}) \cdot 2 \cdot l_{\delta}}{l_{\text{сп1}}} + \frac{(\Delta\Theta_{\text{новл1}} + \Delta\Theta_{\text{изн1}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{вл1}}}{l_{\text{сп1}}} = \\ &= \frac{(18.696 + 2.124) \cdot 2 \cdot 7.8}{35.31} + \frac{(0.018 + 0.001296) \cdot 2 \cdot 3.9}{35.31} = 9.209 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

6. Расчет среднего превышения температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды.

Коэффициент подогрева воздуха выбираем равным  $\alpha_g = 17$ .

Условный периметр поперечного сечения ребер станины  $\Pi_p = 0.1$ .

Тогда эквивалентная поверхность охлаждения корпуса составит:

$$\begin{aligned} S_{\text{корп}} &= (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p \cdot 10^2)(l_{\delta} + 2 \cdot l_{\text{вл1}}) \cdot 10^{-4} = \\ &= (3.14 \cdot 13.1 + 8 \cdot 0.1 \cdot 10^2)(7.8 + 2 \cdot 3.9) \cdot 10^{-4} = 0.191 \text{ (м}^2\text{)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя составляет:

$$\begin{aligned}\Sigma\Delta P' &= \Sigma\Delta P + (K_p - 1)(\Delta P_{e1} + \Delta P_{e2}) = \\ &= 323 + (1.15 - 1)(231 + 66.66) = 368.235 \text{ (Bm)};\end{aligned}\quad (3.11)$$

$$\begin{aligned}\Sigma\Delta P'_g &= \Sigma\Delta P' - (1 - K)(\Delta P_{e1}' + \Delta P_{c1}) - 0.9 \cdot \Delta P_{мех} = \\ &= 368.24 - (1 - 0.19)(0.148 + 33.354) - 0.9 \cdot 2.945 = 298.514 \text{ (Bm)};\end{aligned}\quad (3.12)$$

$$\Delta\Theta_g = \frac{\Sigma\Delta P'_g}{S_{корп} \cdot \alpha_g} = \frac{298.514}{0.191 \cdot 17} = 91.91 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.13)$$

7. Итоговый расчет среднего превышения температуры обмотки статора и температуры стали над температурой окружающей среды:

$$\Delta\Theta_1 = \Delta\Theta_1' + \Delta\Theta_g = 9.209 + 91.91 = 101.121 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.14)$$

$$\Delta\Theta_{cm} = \Delta\Theta_{нов1} + \Delta\Theta_g = 18.696 + 91.91 = 110.608 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.15)$$

Как видно из примера расчета приведенного выше, точность последнего вызывает серьезные сомнения. Все коэффициенты, используемые в расчете, выбираются из универсальных таблиц, которые, как известно, содержат информацию, приведенную со значительным допуском.

Кроме того, вид расчетных формул не отображает законы теплопередачи, а является чисто эмпирическим, т.е. полученные экспериментально в условиях, как правило, весьма далеких от условий, в которых будет работать проектируемый электродвигатель.

Поэтому экспериментальная проверка теплового состояния образца, изготовленного по результатам проектирования, является важным элементом системы поддержки принятия решений.

Такая проверка возможна двумя путями:

– расчетом по моделям, построенным на законах тепломассообмена;

– прямым измерением температуры поверхностей работающего электродвигателя.

### 3.1.1 Расчет тепломассообмена в асинхронном электродвигателе

Асинхронный электродвигатель физически представляет собой гетерогенную среду с внутренними источниками тепла (при прохождении электрического тока в соответствии с законом Джоуля-Ленца, а также при трении подвижных частей двигателя в подшипниках) и со стоками через поверхность в окружающую среду.

Процессы, в которых обмен веществом и/или энергией осуществляется через границы между элементами гетерогенных сред, весьма разнообразны. Это, прежде всего, теплообмен, массообмен, адсорбция, абсорбция и многие другие. Научный и практический интерес к ним огромен и не затухает уже столетия, т. к. именно транзит субстанции через границу определяет интенсивность обмена, а значит, все его технико-экономические показатели, включая конструкцию оборудования, создаваемого для проведения этих процессов. Данные процессы относятся к термодинамическим, самопроизвольным и описываются, на первый взгляд, простыми законами.

Так, в качестве основного закона *теплоотдачи* принят закон Ньютона, в соответствии с которым количество тепла  $dQ$ , отданное элементом поверхности  $dF$  с температурой  $t_n$  в окружающую среду с температурой  $t_{cp}$  за время  $dt$ , прямо пропорционально разности температур  $(t_n - t_{cp})$  и величинам  $dF$  и  $dt$  [115, 116]:

$$dQ = \alpha(t_{ст} - t_{ж})dFdt, \quad (3.16)$$

а при установившемся состоянии процесса теплоотдачи, когда температура среды и поверхности остаются неизменными:

$$Q = \alpha(t_{ст} - t_{ж})F\tau \text{ Дж}, \quad (3.17)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Как сказано выше, величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , в свою очередь, зависит от большого числа факторов:

- рода жидкости (газ, пар, капельная жидкость);
- характера течения жидкости (вынужденное или свободное);
- формы поверхности и ее линейных размеров;
- состояния поверхности (растворение, осаждение);
- состояния и свойств жидкости (температура, давление, плотность или удельный вес, теплоемкость, теплопроводность, вязкость и т.п.);
- параметров движения (скорость, турбулентность);
- температуры поверхности.

Основным кинетическим уравнением *массообменных* процессов является уравнение массопередачи, которое основано на общих кинетических закономерностях химико-технологических процессов [117].

Скорость процесса [в кг/(м<sup>2</sup>с)] равна движущей силе  $\Delta$ , деленной на сопротивление  $R$ :

$$dM / dF = \Delta dR \quad (3.18)$$

где  $dM$  – количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую в единицу времени;  $dF$  поверхность контакта фаз.

При установившемся состоянии процесса массоотдачи, когда температура среды и поверхности остаются неизменными, обозначив  $1/R = K$ , получим

$$M = K\Delta F \quad (3.19)$$

В последнем выражении, называемом основным уравнением

массоотдачи, величина  $K$  характеризует скорость процесса переноса вещества из одной фазы в другую. По аналогии с процессом теплоотдачи коэффициент  $K$  называют коэффициентом массоотдачи.

Зависимость коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи от большого числа факторов не позволяет дать общую формулу для его определения и в каждом частном случае необходимо прибегать к опытным исследованиям [118].

Из (3.17) и (3.19) непосредственно вытекает, что такие исследования должны опираться на знание площади тепломассообмена  $F$  в любом варианте эксперимента, что позволит функционально связать эту площадь с параметрами технологии и конструкций и получить зависимости для обратного расчета площадей взаимодействия (а, значит, и конструкции электродвигателей) в САПР [119, 120]. В то же время, как указывалось выше, площадь тепломассообмена  $F$  в неподвижных, а тем более, подвижных обменниках, также весьма стохастична даже для электродвигателей со строго установленными габаритами.

Поэтому непосредственная оценка текущего значения такой площади позволяет разомкнуть круг «для определения  $K$  надо знать  $F$ , а для определения  $F$  надо знать  $K$ ».

Очевидно, что эксперименты для такой оценки должны быть неразрушающими, позволяющими получить максимальную информацию о пространственном расположении границ тепломассообмена для последующего оценивания их площади, дисперсии и других геометрических характеристик. На сегодняшний день существует способ послойного сканирования внутренних зон различных гетерогенных объектов, – это компьютерная томография, однако, она применяется, в основном, в медицине для просвечивания биологических тканей [121, 122]. Кроме того, результатом томографии является серия изображений, содержащая в которых интегральную информацию весьма трудно оценить численно.

Основные физические законы, описывающие тепломассообмен через поверхность, весьма просты и содержат в качестве аргумента первую степень

площади этой поверхности. Казалось бы, при прочих равных условиях (интенсивность и время обмена) площадь, как целевая функция оптимизации электродвигателей, должна при проектировании последних монотонно возрастать, – увеличить площадь всегда означает повысить обмен! К сожалению, в реальных условиях всегда находятся обстоятельства, не позволяющие наращивать площадь обмена беспредельно, – это и габариты электродвигателя, и предельное увеличение количества его деталей и узлов, и предельное измельчение его элементов, и многое другое. Это определяет наличие максимума целевой функции – количества перешедшего через границу энергии и(или) вещества, а значит и поиск таких характеристик электродвигателей, которые доставляют этот максимум.

Парадокс заключается в том, что, назначая в процессе проектирования параметры и размеры, мы не можем даже приблизительно гарантировать их реализацию в реальном объекте. Например, реальная площадь поверхности теплообмена, – величина, лишь весьма приблизительно совпадающая с тем значением этой площади, которое можно получить расчетом, анализируя чертеж электродвигателя. Это связано, во-первых, со сложным, стохастическим рельефом поверхности (шероховатостью на микроуровне и отклонениями от стандартных размеров – на макроуровне), тепловыми деформациями и пр. Кроме того, критическое сближение поверхностей теплообмена, неизбежное при увеличении количества элементов, может исказить всю физическую модель процесса, удаляя ее от описания «простых» физических законов.

Еще сложнее и стохастичнее дело обстоит тогда, когда элементы электродвигателя не только не имеют «стандартных» размеров, но еще и перемещаются в пространстве и времени [3].

В этих условиях приходится рассчитывать на прямое измерение суммарных поверхностей элементов гетерогенных сред на опытных и лабораторных образцах. Создание методов такого измерения, причем неразрушающего, а также выявление параметров (чем их меньше, тем лучше),

которые непосредственно измеряются в этом случае, и является основной проблемой при решении данной задачи.

Проектировщики стремятся для усиления теплообмена сделать поверхность тепломассообмена как можно больше, сохранив при этом габаритные размеры соответствующего электродвигателя. Это заставляет их дробить отдельные элементы, на поверхности которых протекает процесс, и предельно усложнять их форму.

Поэтому прямое отображение поверхности обмена в электродвигателе не представляется возможным.

Остается любым из возможных способов получить первичное отображение исследуемой поверхности (чертеж, фотография) и далее выполнить свертку таких отображений к единому числу, удобному в качестве поддержки принятия решения проектировщиком.

Способы сверки таких отображений относятся к информационной поддержке САПР асинхронных электродвигателей и будут рассмотрены в следующем подразделе.

### 3.2 Информационное обеспечение экспериментальной поддержки проектирования

Отображения внутренних или внешних поверхностей асинхронного двигателя (рис. 3.1) могут быть цветными или черно-белыми, содержащими контрастные переходы и мелкие детали. Все это позволяет отнести их к фотореалистическим, требующим значительной мобилизации всех компьютерных ресурсов при их свертке.

Для изображений подобного типа можно выделить три основных вида фрактальных свертков, обладающих различными свойствами и подходящих для решения различных задач проектирования (табл. 3.1).



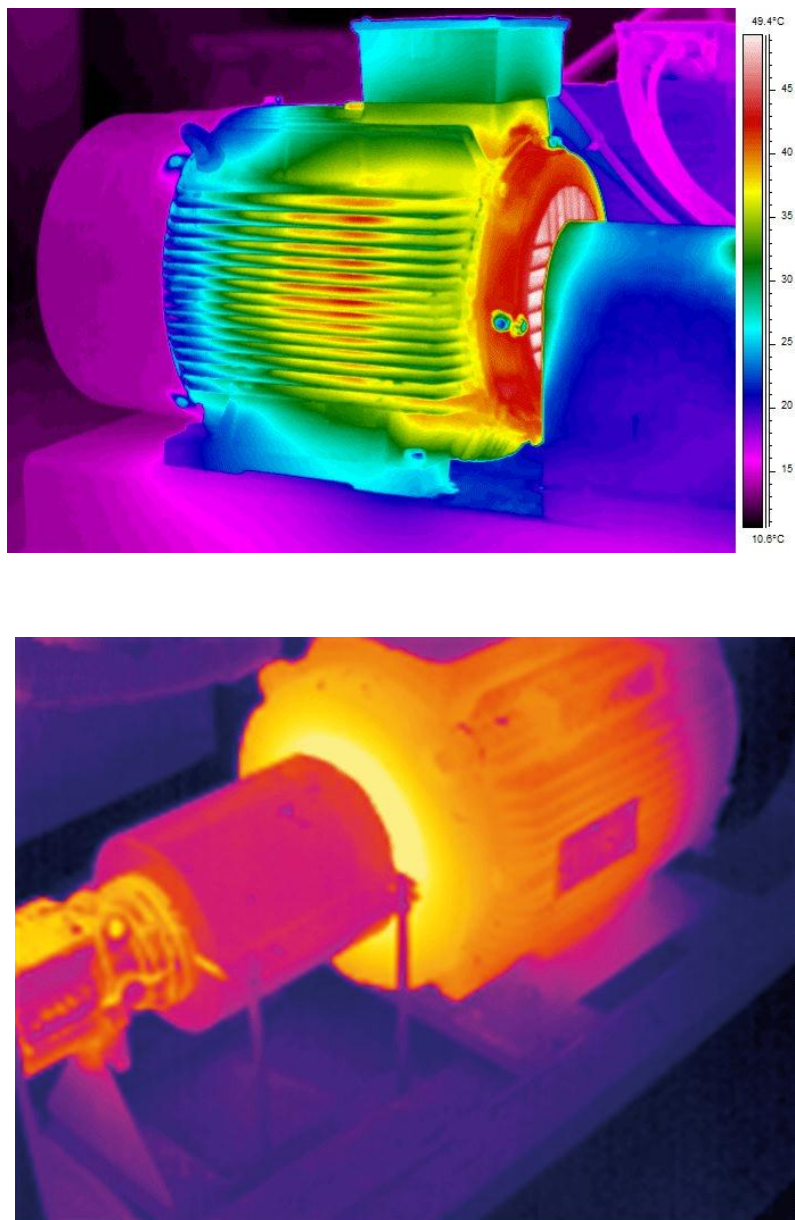


Рисунок 3.1 – Виды отображений от поверхностей асинхронного электродвигателя

Так, свертка с помощью расчета хаусдорфховской размерности черно-белого отображения представляет собой одно число, удобное для экспресс-анализа соответствующих электродвигателя, свертка с помощью принципа сжимающих отображений представляет собой значительный массив чисел, который позволяет, однако, довольно быстро восстановить исходное изображение.

Таблица 3.1 – Виды сверток и их характеристики

№ пп	Вид свертки	Результат свертки	Область применения	Возможность обратного преобразования
1	С помощью расчета хаусдорфовской размерности	Число	Неподвижное изображение	Нет
2	С помощью принципа сжимающих отображений	Массив чисел		Есть
3	С помощью параболического преобразования	Число	Подвижное изображение	Нет

Это удобно для хранения и передачи соответствующих изображений, а свертка с помощью параболического преобразования позволяет сводить к одному числу пространственные изображения.

Свертки первого и третьего видов начинаются с того, что у исходного изображения (рис. 3.2, а) осуществляется выделение границ (рис. 3.2, б) между элементами гетерогенной смеси [123, 124].

Для свертки второго вида выделение границ не производится, вместо этого кадры отображения подвергают бинаризации – сведению всего многообразия серых полутонов к двум: черному и белому. Информационные технологии выполнения трех видов сверток томографических изображений выглядят следующим образом.

*1. Свертка с помощью расчета хаусдорфовской размерности [125, 126].*

Как правило, определение корреляционной размерности и энтропии осуществляется для мультифракталов – неоднородных фрактальных объектов, которые имеют не только геометрические, но и статистические характеристики.

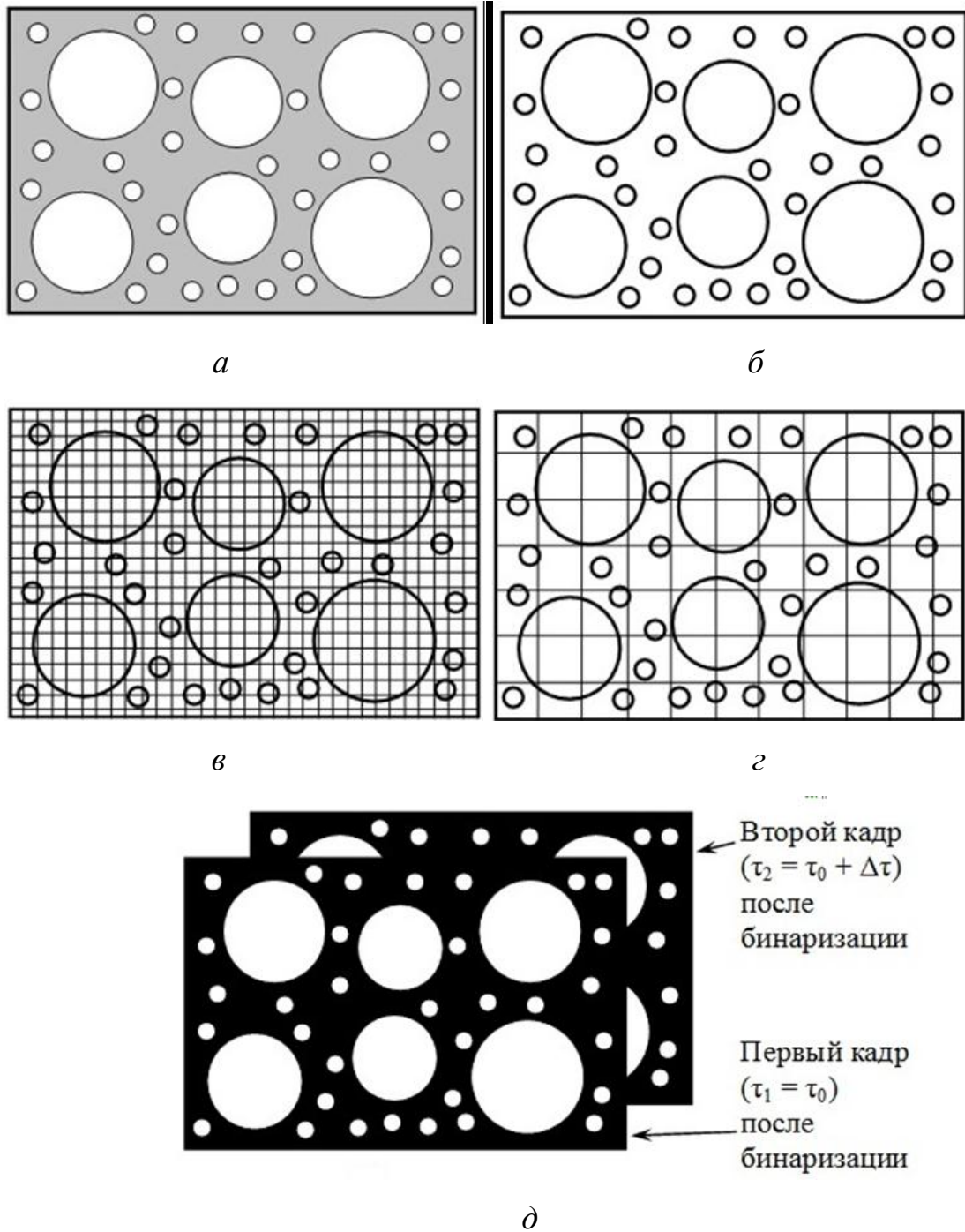


Рисунок 3.2 – Схемы этапов свертки поверхности теплообмена:

- a* – томограмма (сечение);
- б* – выделенные границ в сечении;
- в* – к расчету хаусдорфской размерности границ в сечении;
- г* – к свертке с помощью принципа сжимающих отображений;
- д* – два последовательных кадра после бинаризации, готовые к свертке с помощью параболического преобразования

Другими словами неоднородные фракталы имеют неравномерное распределение точек множества или разную плотность «заселенности» множества.

Поэтому при исследовании мультифракталов говорят об обобщенной фрактальной размерности [125, 127], которая может быть представлена фрактальными (хаусдорфовскими) размерностями.

Как отмечено в работе [127], величина функции мультифрактального спектра фактически равна хаусдорфовой размерности ( $D$ ) некоторого однородного фрактального подмножества из исходного множества, которое дает доминирующий вклад в статистические характеристики множества. Поэтому в первом приближении можно считать, что  $D$  является фрактальной размерностью относительно однородных фракталов в мультифрактальном множестве.

Хаусдорфовская свертка начинается (рис. 3.2, *в*) с покрытия изображения небольшими квадратами со стороной  $n$ . Далее подсчитывается количество таких квадратиков, в которые попадают фрагменты выделенных границ [128, 129].

## 2. Свертка с помощью принципа сжимающих отображений.

Как известно, фотореалистичные изображения не являются в точности (полностью) самоподобными, т. е. не содержат такого самоподобия, которое наблюдается во фракталах [130, 131]. Тем не менее, в любом изображении имеются области, которые подобны при различном масштабе.

Отличие такого локального (ограниченного, кусочного) самоподобия от самоподобия, присутствующего во фракталах, состоит в том, что изображение формируется из преобразованных копий *частей* самого себя, а не *всего* самого себя. Эти преобразованные части не образуют точную копию оригинального изображения, и, следовательно, допускается некоторая ошибка в подобном представлении изображения. Это означает, что изображение, которое кодируется как множество преобразований, применяемых к определённым частям изображения, будет не идентичной копией оригинального изображения,

а его аппроксимацией [132].

Фрактальная свертка с помощью принципа сжимающих отображений начинается с разбиения изображения на фрагменты – блоки (рис. 3,2 з). Основная идея блочного разбиения изображения заключается в том, что изображение  $\mu_{origin}$  разделяется на  $N$  неперекрывающихся ранговых блоков  $R_i$ ,  $i \in \{1 \dots N\}$ , которые покрывают всё изображение, т. е. содержат каждый пиксель изображения.

Затем формируется множество  $D$ , состоящее из бóльших по площади, чем ранговые, доменных блоков  $D_j$ ,  $j \in \{1 \dots M\}$  того же изображения  $\mu_{origin}$ , которые могут перекрываться и не содержать каждый пиксель изображения.

Далее производится подбор каждому ранговому блоку некоторого доменного, наиболее близкого ему по заданному критерию [133 – 135].

*3. Свертка в помощь дискретных дифференциальных преобразований.*

Для свертки в число неподвижных изображений (например, цифровой фотографии) используются уравнения, не содержащие временного параметра, в частности, уравнение Лапласа – дифференциальное статическое (независящее от времени) эллиптическое уравнение в частных производных, которое в трехмерных декартовых координатах имеет следующий вид [136, 137]:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (3.20)$$

где  $u$  – некоторая фазовая переменная,  $x$ ,  $y$  и  $z$  – декартовы координаты на плоскости.

Уравнение Лапласа возникает во многих физических задачах механики, теплопроводности, электростатики, гидравлики. В частности, многие двумерные статические задачи теплопроводности описываются выражением [138]:

$$\left( \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (3.21)$$

где фазовая переменная  $T$  – температура,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $x$  и  $y$  – декартовы координаты на плоскости.

Поскольку в теплофизике величина коэффициента теплопроводности  $\lambda$  всегда больше нуля, задача (3.21) сводится к двумерному варианту задачи (3.20).

Введем понятие «коэффициент  $S$ » и придадим ему такие свойства: он всегда неотрицателен и может принимать только два значения, соответствующих границам яркости: 0 (черный) или 255 (белый). Тогда выражение вида (3.21) распадается на два уравнения, связанных логическим союзом «или» (очевидный союз «и» опускаем) [4]:

$$S = 0 \text{ или } \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (3.22)$$

что позволяет решать их уже не только относительно  $u$ , но и относительно  $S$ . Для этого условимся, что  $S = 255$  в том единственном допустимом условиях (3.21) случае, когда справедливо второе уравнение из (3.22). Тогда это решение выглядит так:

$$S = 0 \Big|_{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \neq 0}; \quad (3.23)$$

$$S = 255 \Big|_{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0}. \quad (3.24)$$

Таким образом, если в результате какого-либо преобразования функции  $u(x, y)$  удастся подтвердить или опровергнуть равенство нулю правой части

(3.22), то тем самым будет однозначно определено значение бинарной переменной  $S$ .

Пусть  $(x, y)$  – координаты точки некоторого плоского изображения, а  $u_{xy}(x, y)$  – яркость этой точки. Поскольку минимальная единица изображения пиксель конечного размера, преобразуем непрерывное уравнение (3.22) в уравнение в конечных разностях [139]:

$$S \left( \frac{\partial^2 u_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{xy}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow S \frac{a_{(i+1),j} - 2a_{i,j} + a_{(i-1),j}}{\Delta i^2} + S \frac{a_{i,(j+1)} - 2a_{i,j} + a_{i,(j-1)}}{\Delta j^2} = 0, \quad (3.25)$$

где  $i, j$  – дискретные координаты (номера) пикселей вдоль осей  $x$  и  $y$ , соответственно;  $a_{ij}$  – дискретная яркость пикселя с координатами  $i$  и  $j$ :

$$\begin{aligned} x &\Leftrightarrow i, & i &= 0, 1, 2, \dots, N \text{ с шагом в } 1 \text{ пиксель;} \\ y &\Leftrightarrow j, & j &= 0, 1, 2, \dots, M \text{ с шагом в } 1 \text{ пиксель;} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$u_{xy} \Leftrightarrow a_{ij}, \quad a_{ij} = 0, 1, 2, \dots, 255 \text{ с шагом в } 1 \text{ градацию яркости.}$$

Согласно принятым в выражениях (3.26) размерностям, конечные разности  $\Delta i = \Delta j = 1$ . Поэтому дискретное выражение (3.25), так же, как и непрерывное выражение (3.21), в свою очередь, распадается на два выражения, связанных логическим «или»:

$$S = 0 \cup a_{(i+1),j} + a_{(i-1),j} + a_{i,(j+1)} + a_{i,(j-1)} = 4a_{i,j}. \quad (3.27)$$

Т.е. если правое уравнение в (3.27) выполняется, то  $S = 255$ , если нет, – то  $S = 0$ .

Расчетная схема для дискретного дифференциального эллиптического уравнения в конечных разностях имеет следующий вид (рис. 3.3).

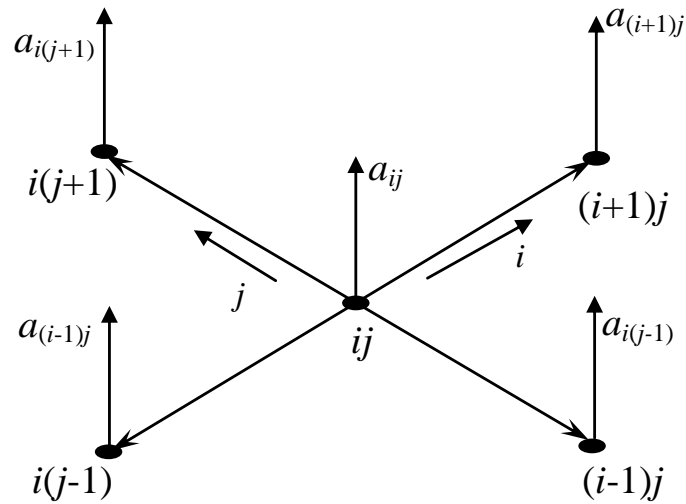


Рисунок 3.3 – Расчетная схема для дискретного дифференциального уравнения эллиптического типа

Коэффициентов  $S_{ij}$  в изображении столько, сколько в нем пикселей. Если считать каждый из них новым (после ДДП-1) значением яркости соответствующего пикселя, получим сеточное поле дискретных (0 – черный; 255 – белый) яркостей  $S_{ij}$  размерностью  $M \times N$  или, фактически, новое изображение, которое представляет собой *результат ДДП-1 начального изображения* (рис. 3.4):

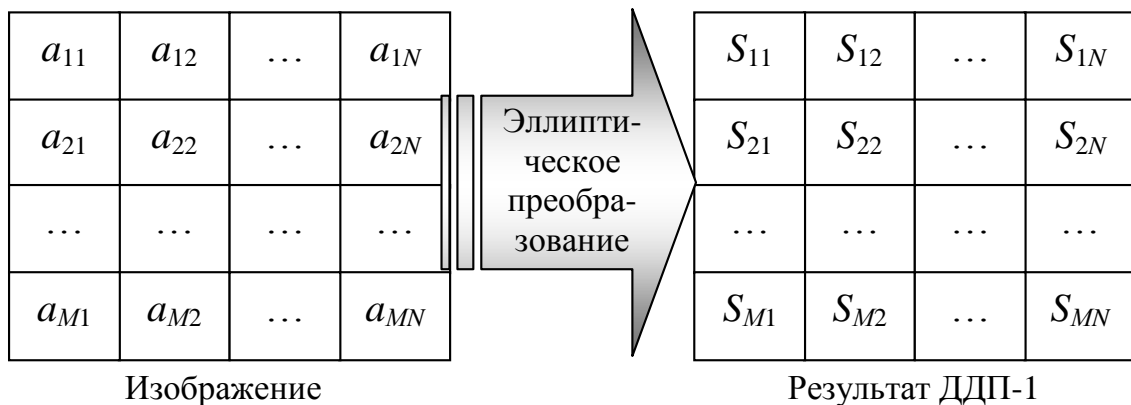


Рисунок 3.4 – Результат ДДП – 1 начального изображения

Схема алгоритма ДДП-1 приведена на рис. 3.5.



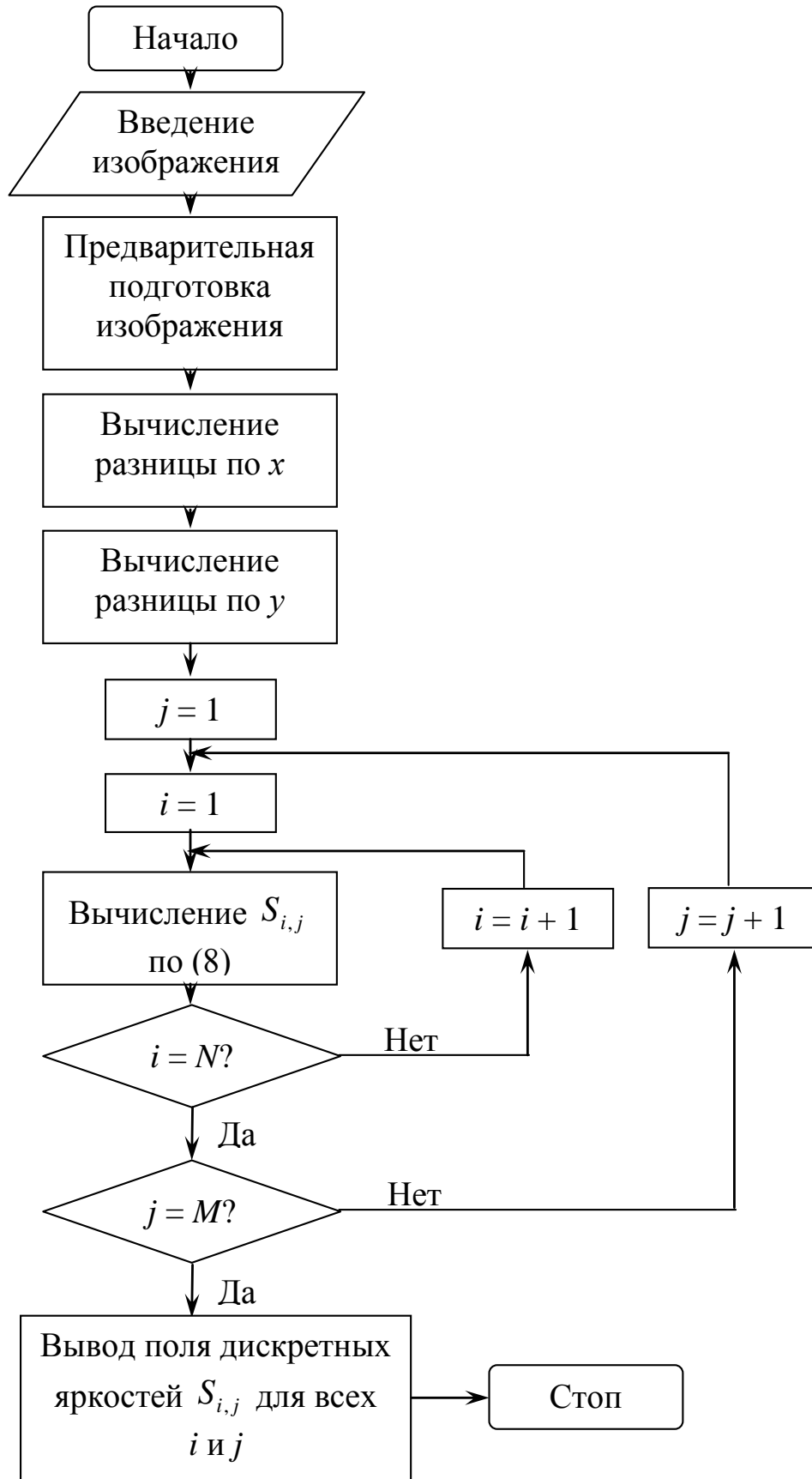


Рисунок 3.5 – Схема алгоритма ДДП-1

Из (3.26) непосредственно вытекает, что, если изображение состоит из

пикселей одинаковой яркости, то для всех его пикселей правая часть (3.26) всегда равна 0, а  $S$  всегда равен 255 и результат ДДП-1 выглядит как белое изображение.

При появлении на изображении участков, отличающихся яркостью от фона, на результате ДДП-1, в свою очередь, появляются «черные» ( $S = 0$ ) линии границ этих участков, по суммарной площади которых (одно число!) можно судить о распространенности последних.

Таким образом, результат ДДП-1 может служить *мерой разнородности изображения, состоящего из отдельных фрагментов разных размеров*.

Для свертки в число подвижных изображений (например, видеопотоков) используются разностные дифференциальные уравнения, содержащие временной параметр, в частности, уравнение теплопроводности Фурье – дифференциальное динамическое (зависящее от времени) параболическое уравнение в частных производных, которое в трехмерных декартовых координатах имеет следующий вид [136, 137]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = D \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3.28)$$

где  $D$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – непрерывное время.

По аналогии с ДДП-1, перейдем к конечным разностям, дополнительно приняв [64, 71, 140]:

$$\tau \Leftrightarrow k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K \text{ с шагом в 1 кадр видеопотока}; \quad (3.29)$$

$$D \Leftrightarrow D_{ij}, \quad D_{ij} \text{ – коэффициент для каждого } ij\text{-го пикселя.} \quad (3.30)$$

Тогда (3.25) для видеопотока (двухмерное пространство + время) будет интерпретировано так:

$$\frac{\partial a_{i,j}}{\partial \tau} \Leftrightarrow \frac{a_{(k+1),i,j} - a_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (3.31)$$

$$D \left( \frac{\partial^2 a_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow D_{i,j} \left( \frac{a_{(i+1),j,k} - 2a_{i,j,k} + a_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{a_{i,(j+1),k} - 2a_{i,j,k} + a_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right), \quad (3.32)$$

в результате чего получаются следующие уравнения:

$$D_{i,j} = \frac{\frac{a_{i,j,(k+1)} - a_{i,j,k}}{\Delta k}}{\left( \frac{a_{(i+1),j,k} - 2a_{i,j,k} + a_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{a_{i,(j+1),k} - 2a_{i,j,k} + a_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right)}. \quad (3.33)$$

Согласно принятым в выражениях (3.26) и (3.29) размерностям, конечные разности  $\Delta i = \Delta j = \Delta k = 1$ . Поэтому (3.33) упрощается до выражения:

$$D_{i,j} = \frac{a_{i,j,(k+1)} - a_{i,j,k}}{a_{(i+1),j,k} + a_{(i-1),j,k} + a_{i,(j+1),k} + a_{i,(j-1),k} - 4a_{i,j,k}}. \quad (3.34)$$

Расчетная схема для дискретного дифференциального преобразования параболического типа (ДДП-2) имеет следующий вид (рис. 3.6).

Как и в случае дискретного ДДП-1, коэффициентов  $D_{i,j}$  в изображении столько, сколько в нем пикселей. Если считать каждый из них новым (после параболического преобразования) значением яркости соответствующего пикселя, получим сеточное поле дискретных (0 – черный; 255 – белый) яркостей  $D_{i,j}$  размерностью  $M \times N$  или, фактически, новое изображение, которое представляет собой *результат дискретного дифференциального преобразования второй степени (ДДП-2) начального видеопотока* (рис. 3.7):

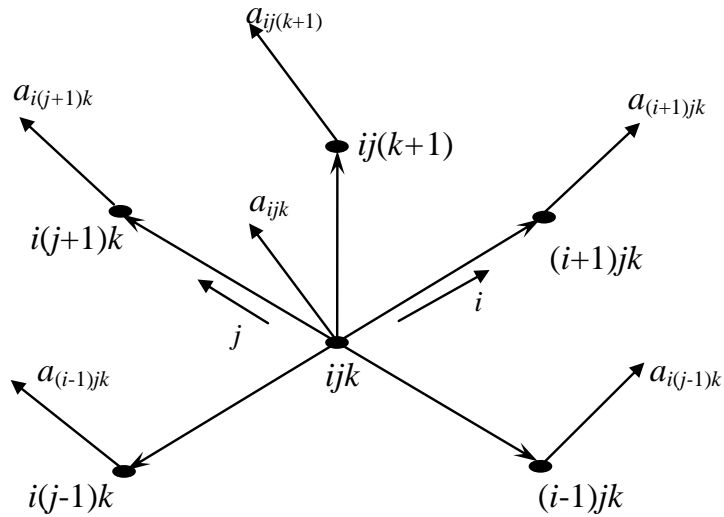


Рисунок 3.6 – Расчетная схема для разностного дифференциального уравнения второй степени в конечных разностях

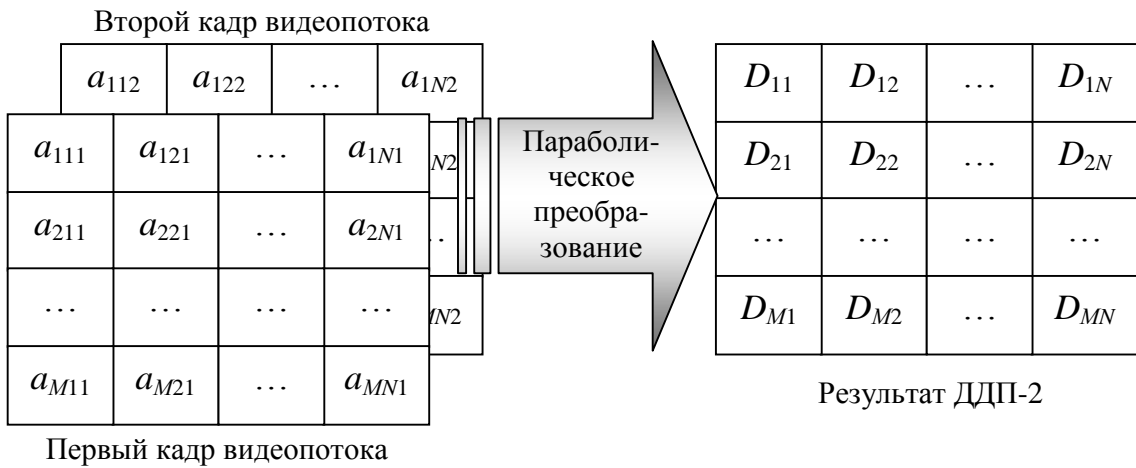


Рисунок 3.7 – Результат дискретного дифференциального преобразования второй степени (ДДП – 2) начального видеопотока

Поскольку в числителе (3.34) стоит временной градиент яркости, все неподвижные пиксели останутся нулевыми («черными»), а попытка применить параболическое преобразование для любых одинаковых изображений (кадров видеопотока) приведет к получению «черного» прямоугольника. В результате можно считать преобразование (3.34) средством для выделения контуров [139, 141] *только в подвижной части видеопотока.*

Схема алгоритма ДДП-2 видеопотока приведена на рис. 3.8.

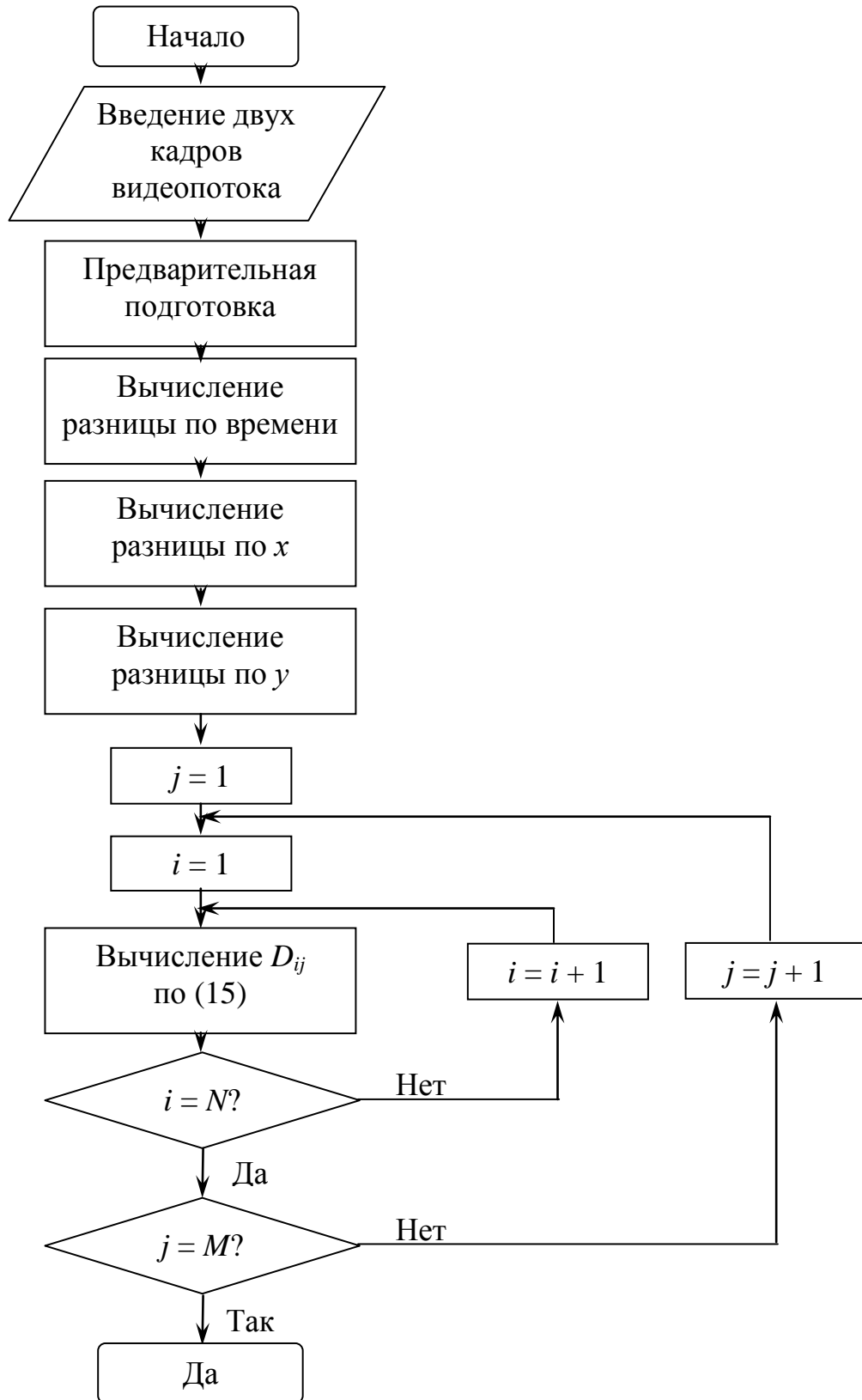


Рисунок 3.8 – Схема алгоритма ДДП-2

Наличие ДДП-2 предоставляет возможность выполнить его численную оценку, которую в дальнейшем можно использовать для проектирования или управления.

### 3.3 Информационная поддержка измерений параметров асинхронных электродвигателей в САПР

Некоторые параметры асинхронных электродвигателей могут быть косвенно измерены при экспериментальной поддержке САПР с помощью цветового анализа отображений, получаемых экспериментально при работающем электродвигателе.

Таким образом можно измерять, например, скорость его вращения. Для этого на вал двигателя одевается диск с цветным изображением (примеры на рис. 3.9) и делаются последовательные цифровые фотографии при строго заданном интервале между ними.

Как известно, полноцветное цифровое двухмерное изображение размером  $I \times J$  пикселей однозначно описывается списком последних [142]. Атрибутами каждого пикселя в таком списке являются восемь чисел: две дискретные координаты пикселя  $i$  ( $1 \leq i \leq I$ ) и  $j$  ( $1 \leq j \leq J$ ), три длины волны в соответствии с *RGB*-разложением:  $\lambda_R$ ,  $\lambda_G$  и  $\lambda_B$  и три дискретные (от 0 до 255) яркости для каждой из этих волн: ( $0 \leq Q_R \leq 255$ ;  $0 \leq Q_G \leq 255$ ;  $0 \leq Q_B \leq 255$ ) соответствующего пикселю полного цвета.

Как известно, длины волн видимого света  $\lambda_{св}$  располагаются в диапазоне  $380 \leq \lambda_{св} \leq 780$  нм. При *RGB*-разложении этот диапазон условно разбивается на три поддиапазона: красный  $575 \leq \lambda_R \leq 760$  нм, зеленый  $485 \leq \lambda_G \leq 575$  нм и синий  $380 \leq \lambda_B \leq 485$  нм [143]. Откладывая границы поддиапазонов на трех ортогональных осях, получим «параллелепипед видимого света» (рис. 3.10) [2, 9].



Рисунок 3.9 – Варианты цветных дисков для измерения скорости вращения вала двигателя

Поверхность электродвигателя, работающего при номинальной нагрузке, будучи нагретой в зоне измерения до сравнительно невысоких температур (в разных местах от 40 до 100 °С) излучает электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне. Инфракрасное излучение или инфракрасные лучи – это электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света (с длиной волны 780 нм) и коротковолновым радиоизлучением (1 – 2 мм). Инфракрасную область спектра согласно международной классификации разделяют на такие поддиапазоны: ближний *IR-A* (от 780 до 1400 нм), средний *IR-B* (1400 – 3000 нм) и далёкий *IR-C* (свыше 3000 нм) [144, 145].

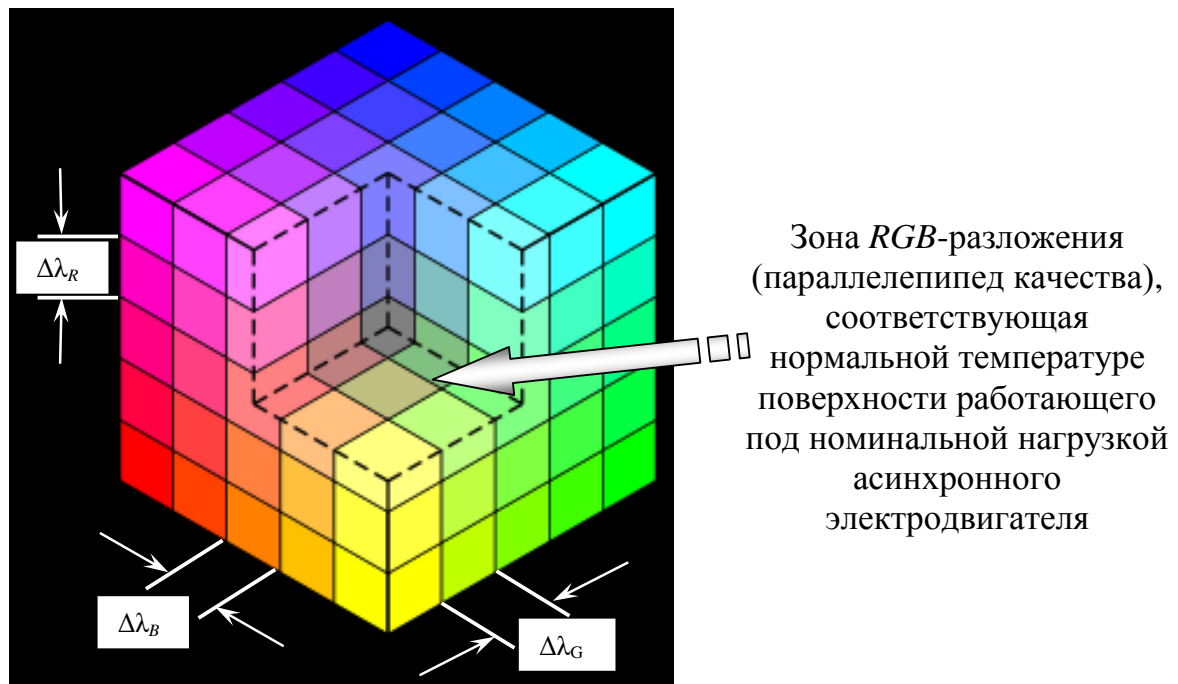


Рисунок 3.10 – Общий параллелограмм *RGB*-разложения видимого света и выделение «параллелепипеда качества» в нем, соответствующего нормальной температуре поверхностей электродвигателя

Соответственно, на этих поддиапазонах тоже может быть условно построен «параллелепипед инфракрасного излучения».

Если в указанных параллелепипедах выделить некоторые области, которые идентифицируются как «допустимый цвет», то все остальные точки общего параллелепипеда, не входящие в эту область, будут определять дефектные «битые» пиксели.

Связь между *RGB*-разложением и размерами параллелепипеда качества устанавливается с помощью нейронной сети, предварительно обученной по экспериментальным данным.

В рамках предлагаемого метода *RGB*-разложение  $\lambda_{Rij}$ ,  $\lambda_{Gij}$  и  $\lambda_{Bij}$  каждого *ij*-го пикселя, содержащегося в исходном отображении (цифровой фотографии поверхности электродвигателя), подвергается компьютерной обработке в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 3.11.



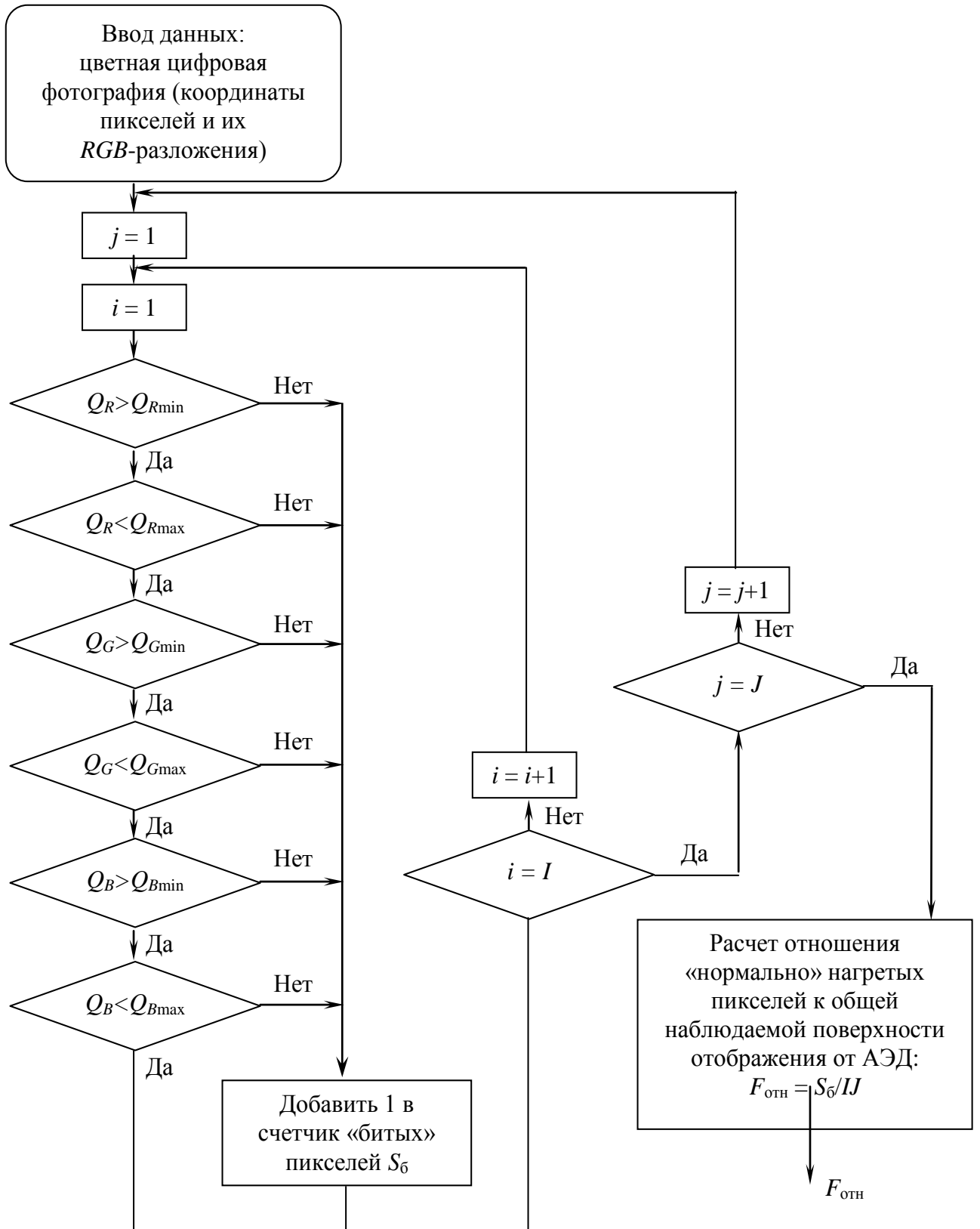


Рисунок 3.11 – Блок схема алгоритма расчета относительной площади нормально нагретой части поверхности асинхронного электродвигателя, работающего под нагрузкой

Результат такой обработки – одно число: в виде отношения количества «битых» пикселей к общему количеству пикселей на изображении  $F_{\text{отн}}$  и является результатом измерения.

Общая схема метода измерения параметров асинхронного электродвигателя (относительного количества «битых» пикселей) представлена на рис. 3.12.

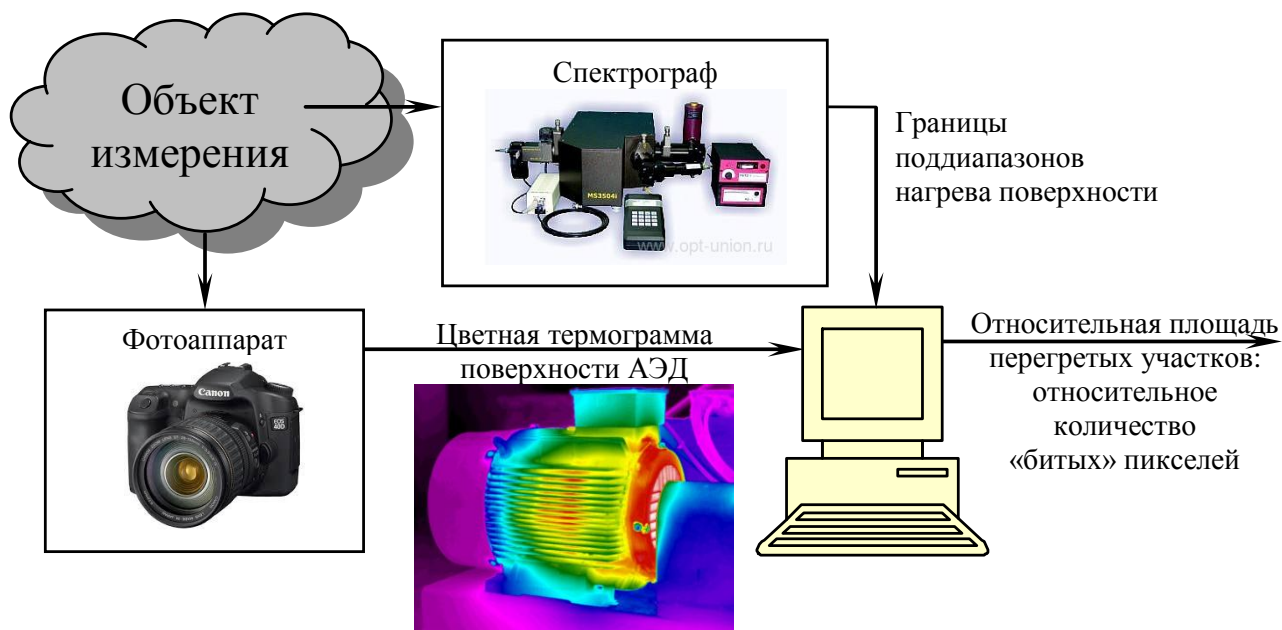


Рисунок 3.12 – Схема метода измерения качества (относительного количества «битых» пикселей) на отображении

Информация, снимаемая с Объекта измерения, представляет собой два потока измерительных данных: от поверхности электродвигателя – на фотоаппарат и от металла перед заливкой – на спектрограф.

### 3.4. Выводы

1. Анализом существующего метода расчета асинхронного электродвигателя установлено, точность последнего вызывает серьезные сомнения, поскольку все коэффициенты, используемые в расчете, выбираются из универсальных таблиц, которые, как известно, содержат информацию, приведенную со значительным допуском. Кроме того, вид расчетных формул не отображает законы теплопередачи, а является чисто эмпирическим, т.е. полученные экспериментально в условиях, как правило, весьма далеких от условий, в которых будет работать проектируемый электродвигатель. Поэтому для эффективного проектирования электродвигателей необходимо дополнительно включить в состав соответствующей САПР экспериментальное обеспечение.

2. Экспериментальное обеспечение является частью технического обеспечения и представляет собой лабораторное оборудование для натуральных (физических) экспериментов и компьютерную технику для виртуальных экспериментов. Экспериментальное обеспечение служит в САПР поддержкой принятия как структурных, так и параметрических решений в процессах оптимизации с точки зрения соблюдения различных ограничений, например, тепловых, механических, электрических и др.

3. Экспериментальное обеспечение незаменимо также в САПР для определения свойств материалов, закладываемых в конструкцию (плотности, прочности, жесткости, теплоемкости, теплопроводности, электропроводности, и многих других), которые, как правило, у реальных веществ и их композиций намного отличаются от «паспортных» справочных данных, а некоторых отсутствуют вообще. Поскольку проектировщики в САПР работают с моделями будущих объектов, экспериментальное обеспечение позволяет им убеждаться, что принятые ими методы и модели адекватны и соответствуют заданной точности оптимизационных расчетов.

4. Асинхронный электродвигатель физически представляет собой гетерогенную среду с внутренними источниками тепла (при прохождении электрического тока в соответствии с законом Джоуля-Ленца, а также при трении подвижных частей двигателя в подшипниках) и со стоками через поверхность в окружающую среду.

5. Отображения внутренних или внешних поверхностей асинхронного двигателя, полученные, в основном, инфракрасной фото или видеосъемкой, могут быть цветными или черно-белыми, содержащими контрастные переходы и мелкие детали. Все это позволяет отнести их к фотореалистическим, требующим значительной мобилизации всех компьютерных ресурсов при их свертке. Для изображений подобного типа, представляющих собой большой объем информации, можно выделить три основных вида сверток к числу (группе чисел), обладающих различными свойствами и подходящих для решения различных задач проектирования: фрактальная свертка, свертка с помощью расчета хаусдорфовской размерности и свертка с помощью дискретных дифференциальных преобразований.

6. Усовершенствован метод дискретного дифференциального преобразования неподвижных отображений от объекта проектирования с помощью конечно-разностного представления дифференциального уравнения в частных производных второго порядка Лапласа. В рамках метода для каждого пикселя изображения в соответствии с приведенными в статье расчетной схемой и формулой выполняется *пространственное* преобразование, заключающееся в замене текущего значения яркости пикселя на новое, имеющее две градации яркости – черное и белое. После попиксельного сложения относительное количество черных пикселей превращаются в единственное число – результат дискретного дифференциального преобразования первого типа.

7. Усовершенствован метод дискретного дифференциального подвижных отображений от объекта измерения с помощью конечно-разностного представления дифференциального уравнения в частных

производных второго порядка Фурье. В рамках метода для каждого пикселя изображения в соответствии с приведенными в статье расчетной схемой и формулой выполняется *пространственно-временное* преобразование, заключающееся в замене текущего значения яркости пикселя на новое, имеющее две градации яркости – черное и белое. После попиксельного сложения относительное количество черных пикселей превращаются в единственное число – результат дискретного дифференциального преобразования второго типа.

## РАЗДЕЛ 4

### САПР АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ «OPTILOG» И ЕЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

#### 4.1 Структура САПР «OPTILOG»

##### 4.1.1 Структурная основа САПР «OPTILOG»

В основе системы автоматизированного проектирования «OPTILOG» – основная структурная схема расчета конструкции и параметров асинхронного электродвигателя [31, 32].

На рис. 4.1 приведена структурная схема расчета конструкции и параметров асинхронного электродвигателя. Она разделяет весь процесс на три стадии:

- проектирование конструкции асинхронного двигателя;
- проектирование параметров асинхронного двигателя, не зависящих от скольжения;
- проектирование параметров асинхронного двигателя, зависящих от скольжения.

На рис. 4.2 приведена сравнительная схема методов проектирования асинхронных электродвигателей. Из сказанного в предыдущем разделе следует, что скольжение является главной связью в системе «источник переменного напряжения – асинхронный электродвигатель»; поэтому варианты проектирования, когда скольжение выбирается по таблицам (существующий метод 1) или задается в качестве одного из исходных данных на проектирование (существующий метод 2), не является оптимальным.

В работе был предложен новый метод (рис 4.2), в котором оптимальное скольжение получается в результате расчета с помощью описанного в Разделе 2 метода.

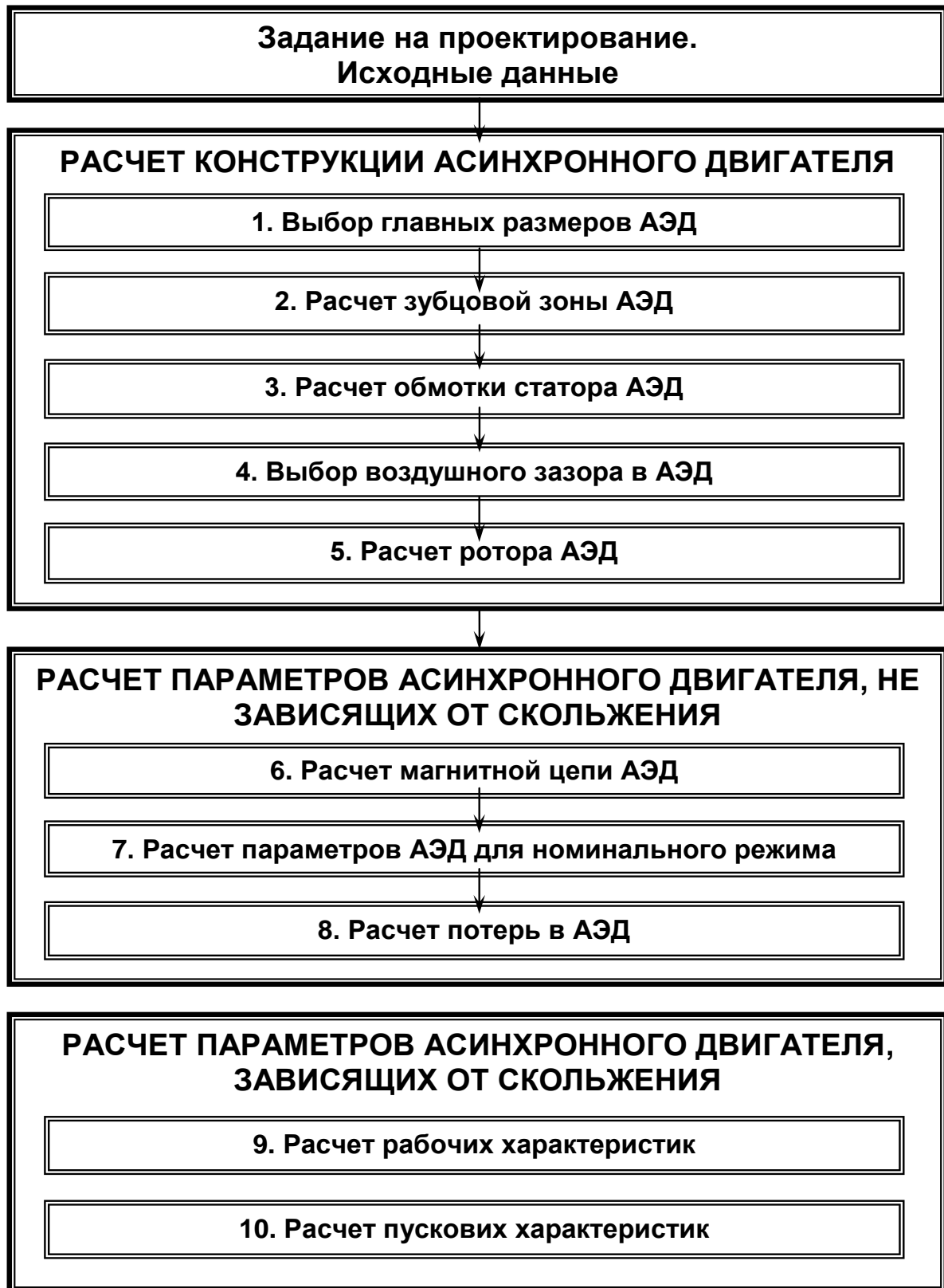


Рисунок 4.1 – Структурная схема расчета конструкции и параметров асинхронного электродвигателя

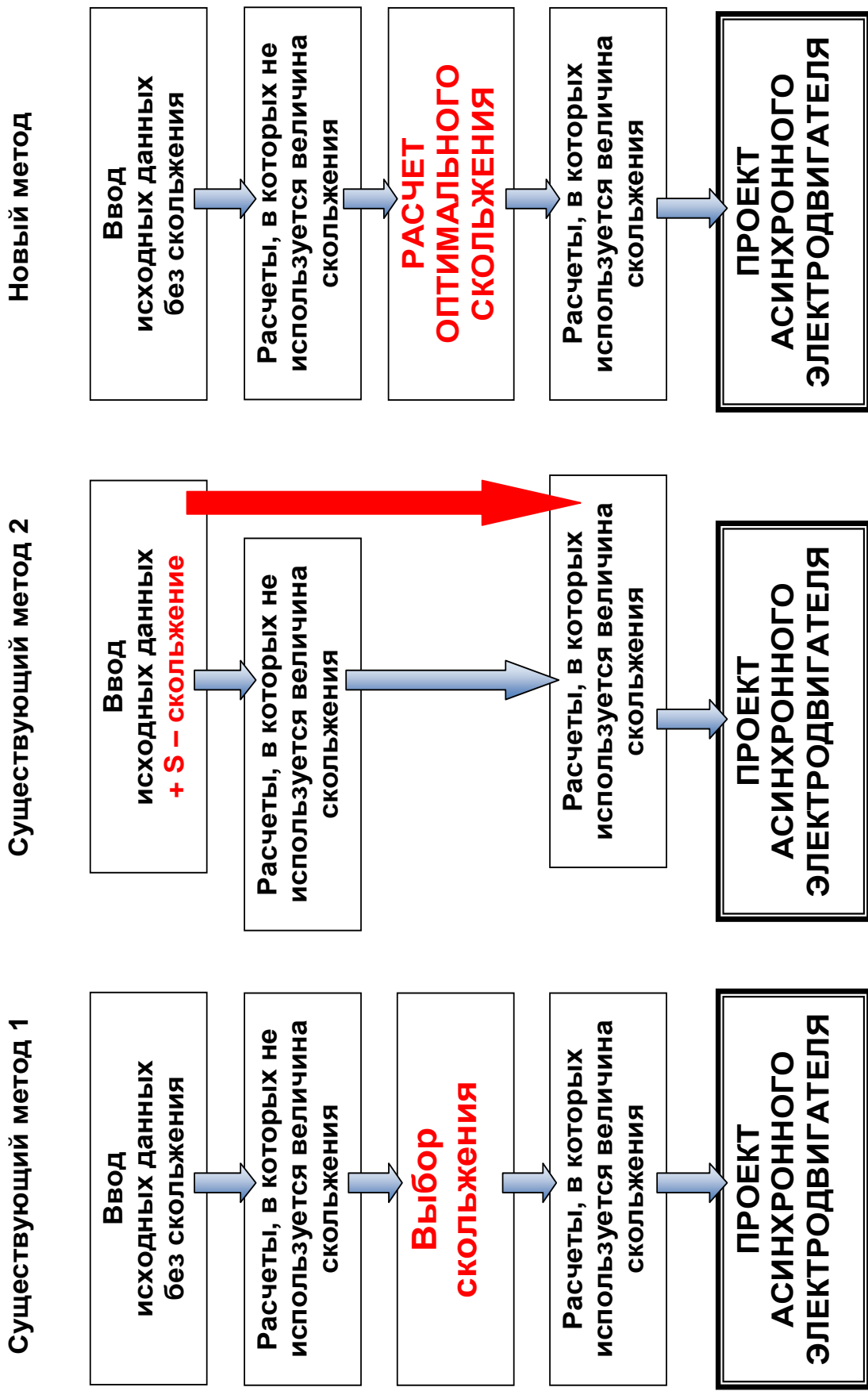


Рисунок 4.2 – Сравнительная схема методов проектирования асинхронных электродвигателей



#### 4.1.2 Пример оптимизации системы «генератор – двигатель» с помощью САПР «OPTIGLOC»

Решение задачи оптимизации в САПР «OPTIGLOC» рассмотрим на примере проектирования системы «топливный генератор – асинхронный электродвигатель», в основе которой генератор марки «Champion GG3300» (покупной) (рис. 4.3) и двигатель, разработанный в САПР как модернизированный вариант электродвигателя «АИР 80 В2» (рис. 4.4).



Рисунок 4.3 – Электрогенератор марки «Champion GG3300» номинальной мощностью 2,6 кВт



Рисунок 4.4 – Асинхронный электродвигатель «АИР 80 В2» номинальной мощностью 2,2 кВт

Технические характеристики электрогенератора «Champion GG3300» приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики генератора «Champion GG3300»

Тип электростанции	бензиновая
Тип запуска	ручной
Количество фаз	1 (220 вольт)
Объем двигателя	208 куб. см
Мощность двигателя	6.5 л. с.
Количество цилиндров	1
Количество тактов	4
Тип охлаждения	воздушное
Расход топлива	1.5 л/ч
Удельный расход топлива	230 г/кВтч
Объем бака	15 л
Активная мощность	2.60 кВт
Максимальная мощность	3 кВт
Вольтметр	есть
Количество розеток 220 В	2
Вес	47 кг

Электродвигатель трехфазный АИР80В2 (АИР 80 В2) относится к серии общепромышленных асинхронных электродвигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором. Этот электродвигатель имеет две схемы подключения (треугольник/звезда) в зависимости от напряжения сети – 220/380 В.

Мощность асинхронного электродвигателя АИР 80В2 составляет 2,2 кВт, а частота оборотов – 2855 об/мин. Высота оси вращения (габарит)

электродвигателя АИР80 В2 – 80 мм, диаметр вала – 22 мм. Двигатель АИР80 В2 предназначен для работы в режиме S1 – продолжительный режим работы, при которой нагрузка на электродвигатель неизменна в течение длительного времени. Степень защиты IP55 – повышенная защита электродвигателя от влаги и пыли. Класс изоляции обмоток статора "F" – пиковая температура нагрева 150 °С.

Технические характеристики электродвигателя «АИР 80 В2» приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики электродвигатель «АИР 80 В2»

Тип (марка)	АИР 80 В2
Мощность, Р	2,2 кВт
Напряжение сети, $U$	220 / 380 В
Частота вращения, $n$	2855 об/мин
Номинальный ток, $I$	4,85 А
Коэффициент полезного действия, КПД	81,0 %
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,85
Отношение моментов пускового к номинальному, $M_{п}/M_{н}$	2,2
Отношение моментов максимального к номинальному, $M_{max}/M_{н}$	2,3
Отношение сил тока пускового к номинальному, $I_{п}/I_{н}$	7,0
Масса электродвигателя	15 кг

Включение трехфазного электродвигателя исполнения 220/380 В в однофазную сеть 220 В возможна через конденсатор по схеме «треугольник» с потерей 30 % мощности.

**Режим работы системы.** Система «топливный (бензиновый) генератор – асинхронный электродвигатель» представляет собой покупной генератор модели «Champion GG3300» и проектируемый электродвигатель, характеристики которых приведены выше.

Мощности генератора, работающего в штатном режиме достаточно для поддержания работы электродвигателя, при этом, «штатный» расход топлива составляет 1,5 л/час или 0,23 кг/кВтч (см. табл. 4.1).

Нагрузка на электродвигатель нестабильна, при ее резком возрастании (в эксперименте – в соответствии с графиками, приведенными на рис. 4.5) падает частота тока на выходе генератора, что приводит к форсированию его мощности и, как следствие, восстановления частоты до разрешенного уровня на выходе и, соответственно, повышению расхода топлива в бензиновом генераторе.

Режим изменения расхода топлива зависит от выбранного при проектировании электродвигателя значение скольжения  $S$ .

Эксперимент показал, что зависимость расхода топлива от заложенной в проект величины скольжения имеет минимум (рис. 4.6 – 4.8), поиск которого и является оптимизационной задачей.

Таким образом, **задание на проектирование** формулируется следующим образом. Спроектировать систему «топливный генератор – асинхронный электродвигатель», которая реагирует на изменение нагрузки минимальным для этого случая расходом топлива.

**Цель оптимизации** – минимизация расхода топлива  $Q$  при нестабильной нагрузке на валу электродвигателя.

**Оптимизируемая функция** – скольжение в асинхронном электродвигателе.

**Момент вращения электродвигателя** определяется величиной магнитного потока, током и угловым сдвигом между ЭДС и током в роторе электродвигателя.

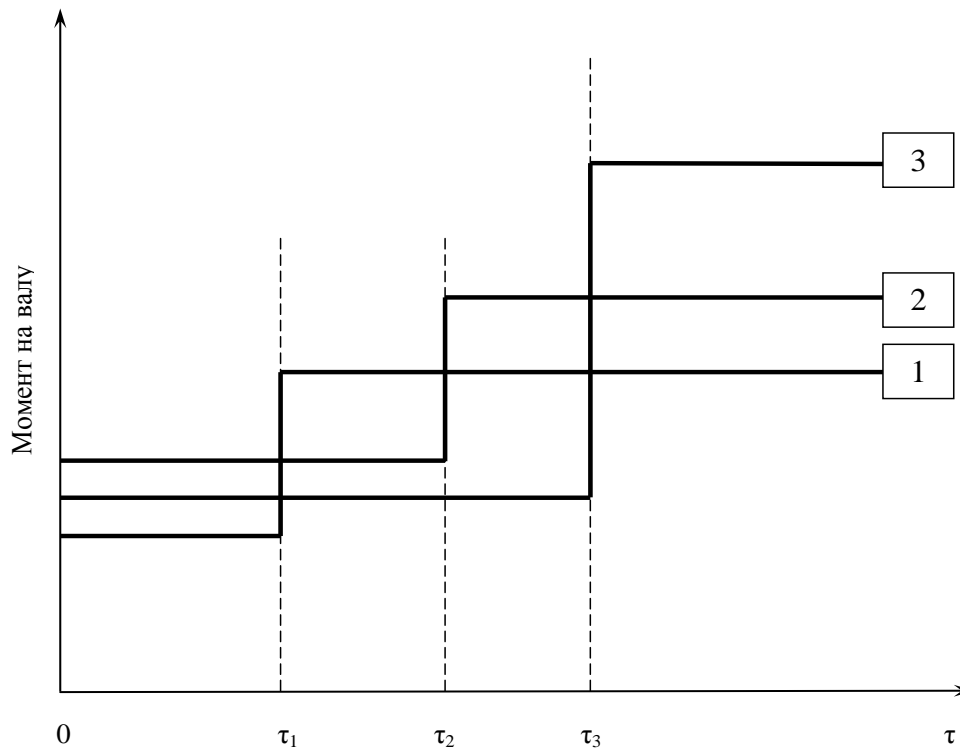


Рисунок 4.5 – Графики изменения нагрузки в эксперименте по влиянию скольжения на расход топлива

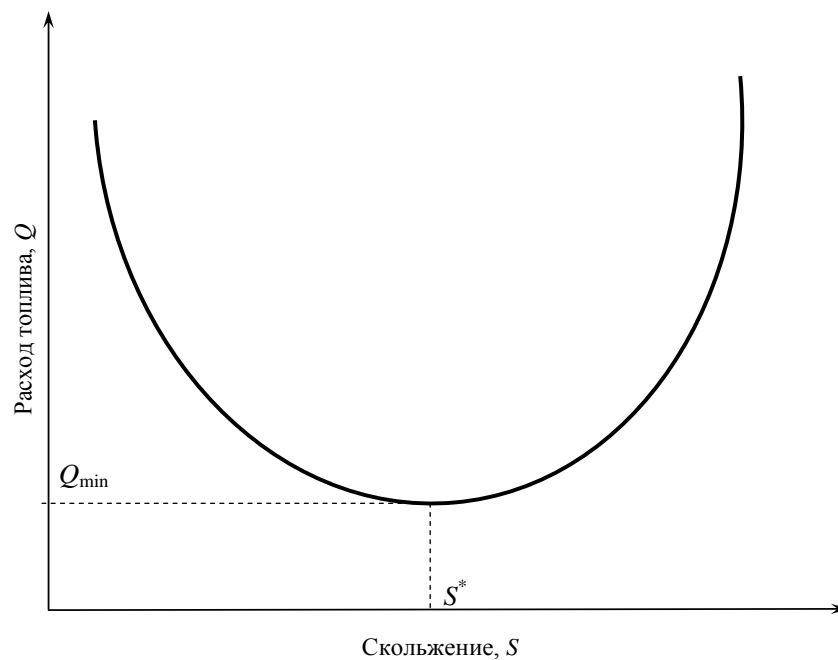


Рисунок 4.6 – Зависимость расхода топлива от выбранного (рассчитанного) скольжения  $S$  для режима 1 (см. рис. 4.5)

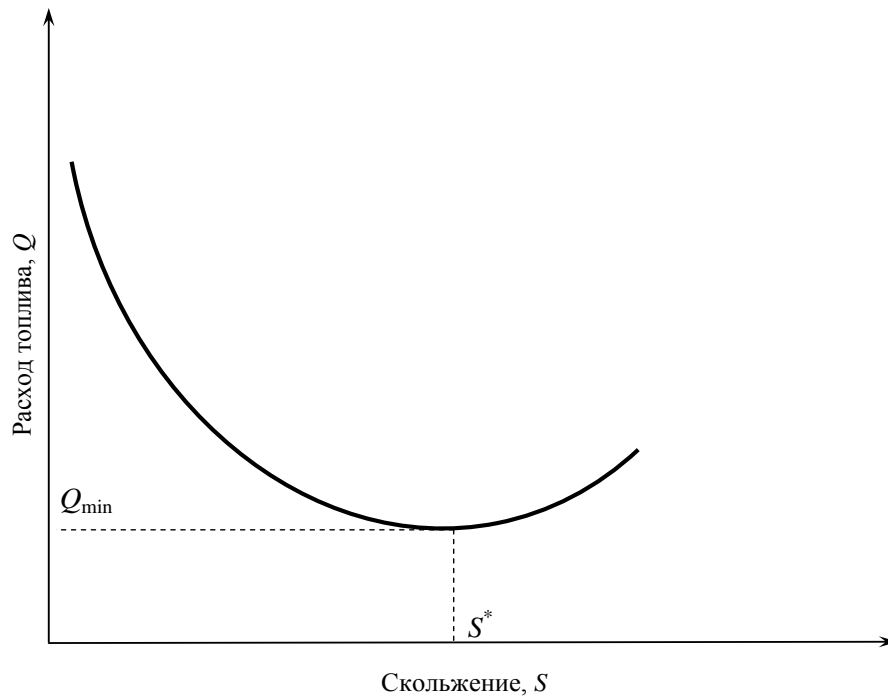


Рисунок 4.7 – Зависимость расхода топлива от выбранного (рассчитанного) скольжения  $S$  для режима 2 (см. рис. 4.5)

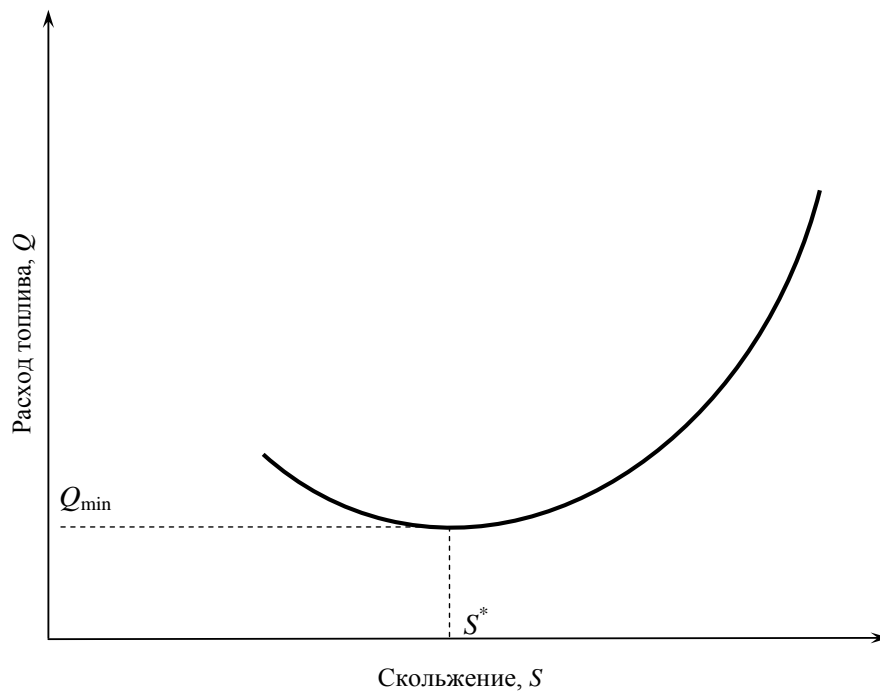


Рисунок 4.8 – Зависимость расхода топлива от выбранного (рассчитанного) скольжения  $S$  для режима 3 (см. рис. 4.5)

Каждая из этих величин в свою очередь зависит от скольжения, поэтому для исследования рабочих характеристик асинхронных двигателей устанавливается зависимость момента от скольжения и влияния на него подводимого напряжения и частоты.

Момент вращения может быть также определен по электромагнитной мощности на валу как отношение этой мощности к угловой скорости ротора.

Величина момента пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна квадрату частоты.

Характерными значениями момента в зависимости от скольжения (или скорости) являются начальное значение момента (когда электродвигатель еще неподвижен), максимальное значение момента (и соответствующее ему скольжение, называемое критическим) и минимальное значение момента в пределах скоростей от неподвижного состояния до номинальной.

Значения момента для номинального напряжения приводятся в каталогах для электрических машин. Знание минимального момента необходимо при расчете допустимости пуска или самозапуска механизма с полной нагрузкой механизма. Поэтому его значение для конкретных расчетов должно быть либо определено, либо получено от завода-поставщика.

Величина максимального значения момента определяется индуктивным сопротивлением рассеяния статора и ротора и не зависит от величины сопротивления ротора.

**Критическое скольжение** определяется отношением сопротивления ротора к эквивалентному сопротивлению (обусловлено активным сопротивлением статора и индуктивным сопротивлением рассеяния статора и ротора).

Увеличение только активного сопротивления ротора сопровождается увеличением критического скольжения и перемещением максимума момента в область более высоких скольжений (меньшей скорости вращения ротора) (рис. 4.9).

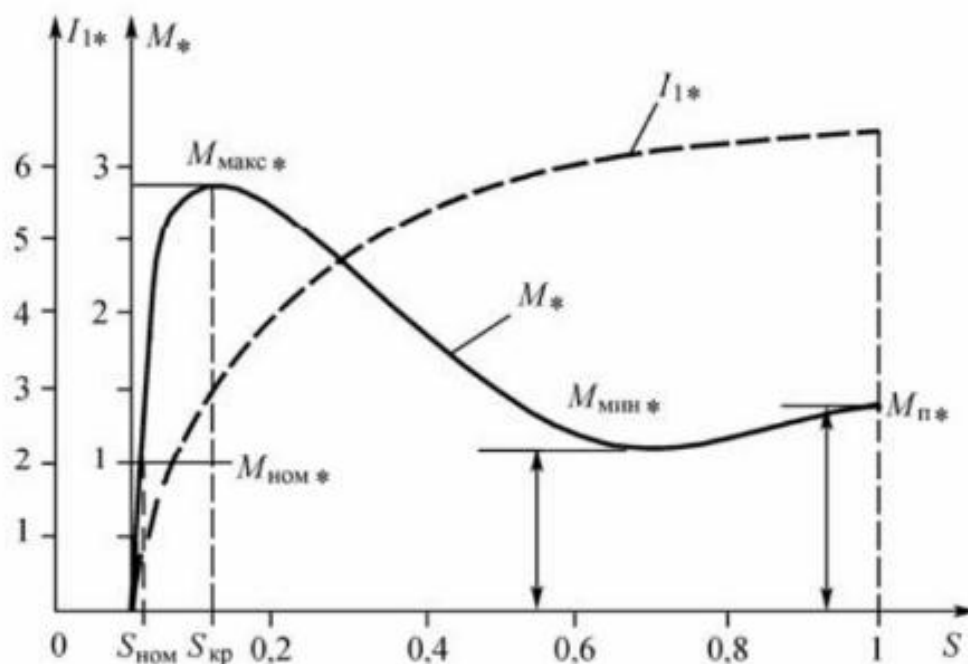


Рисунок 4.9 – Зависимость тока и момента от скольжения

Таким путем может быть достигнуто изменение характеристик моментов. Изменение скольжения возможно увеличением сопротивления цепи ротора или потока.

Первый вариант осуществим только для асинхронных двигателей с фазным ротором (от  $S=1$  до  $S=S_{ном}$ ), но не экономичен. Второй вариант осуществим при изменении питающего напряжения, но только в сторону уменьшения.

Диапазон регулирования мал, так как  $S$  возрастает, но одновременно уменьшается перегрузочная способность асинхронного двигателя. По экономичности оба варианта, примерно, равноценны.

В асинхронных двигателях с фазным ротором изменение момента при различных скольжениях осуществляется с помощью сопротивления, вводимого в цепь обмотки ротора. В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором изменение момента может быть достигнуто за счет применения двигателей с переменными параметрами или с помощью частотных преобразователей.



Таким образом, установлено, что использование подхода к проектированию конструкций асинхронных электродвигателей как к системам, состоящим из подсистем со связанными параметрами, позволяет улучшить показатели качества таких систем за счет «заоптимальной» оптимизации их конструктивных характеристик.

В результате анализа проблем и методов автоматизированного проектирования связанных технических объектов в САПР выполнена постановка и предложен усовершенствованный метод решения задач оптимизации слабосвязанных технических систем за счет использования в качестве целевой функции оптимизации размера области связности аргументов последней, что предоставляет дополнительные возможности проектировщику, поскольку параметры целевых функций отражают одни свойства объекта проектирования, а параметры области связности, как правило, другие, такие, которые при «обычной» оптимизации остаются вне внимания последней [5, 15, 16].

Теоретически доказаны и практически, с помощью компьютерного эксперимента и производственных испытаний подтверждены возможности повышения скорости проектирования и качества продукции электротехнической промышленности за счет использования САПР, обеспечивающих эффективную оптимизацию параметров слабосвязанных подсистем объекта проектирования с целевой функцией в виде области связности.

В ЧП «СЭП Энерго-КОМ» было проведено испытание САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), которая базируется на предложенных моделях и методе оптимизации параметров сложных систем по глобальной связности параметров их подсистем и обеспечивает поддержку принятия проектных решений для элементов последних.

В качестве объекта автоматизированного проектирования использовали систему «Дизельный генератор – асинхронный двигатель переменного тока». В

результате испытаний установлено, что использование упомянутой выше САПР «OPTIGLOC» позволило уменьшить удельный расход дизельного топлива в генераторе на 5,3 %, сохранив при этом неизменным срок службы системы и стабильность выполнения ею технических задач, а также снизить сроки проектирования в среднем на 13,7 %.

#### 4.1.3 Структура и основные подсистемы САПР «OPTIGLOC»

Общая структура САПР «OPTIGLOC» приведена на рис. 4.10. Она включает блоки ввода исходных данных и классификации поставленной в этих данных задачи с точки зрения вида проектирования: объект, содержащий электродвигатель, проектирование по «стандартной» схеме с выбором величины скольжения, проектирование по новой схеме с определением скольжения с помощью оптимизационных расчетов, предложенных в настоящей работе.

Далее выполняется предварительный расчет асинхронного двигателя «до скольжения», выбор или расчет скольжения и окончательный расчет, после которого проектирование заканчивается.

Схема содержит два дополнительных и экспериментальный блоки.

Первый дополнительный блок запускается в тех случаях, когда из технического задания на проектирование следует, что предстоит создавать двигатель ответственного назначения, который будет работать в неблагоприятной среде со значительными вероятностями возможных рисков угроз его работоспособности.

Второй дополнительный блок предназначен для проектирования электродвигателей, которые предназначены для работы в сети, частично недоступной для мониторинга. Это порождает задачу обеспечения таких электродвигателей интеллектуальным блоком, в задачи которого входит определение неисправностей в сети поддержка принятия решения по их устранению.

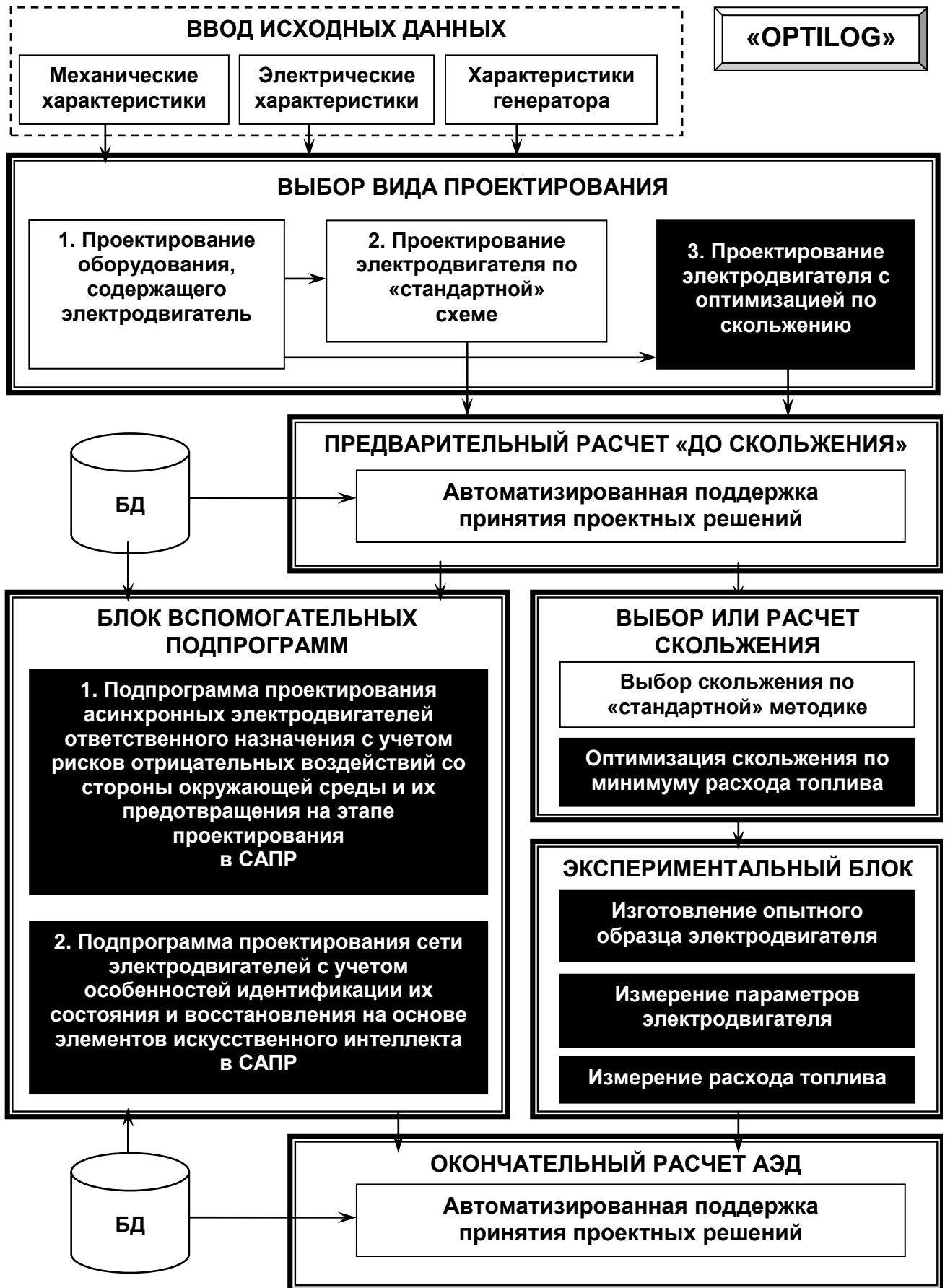


Рисунок 4.10 – Структура и главные подсистемы САПР «OPTIGLOC»

Экспериментальный блок САПР «OPTIGLOC» создан для изготовления опытного образца проектируемого варианта электродвигателя и испытание его на лабораторном стенде с возможностью оценки теплового состояния узлов двигателя с помощью отображения и компьютерной обработки инфракрасного излучения от его поверхности, а также измерения скорости вращения вала асинхронного электродвигателя, механического момента на нем, скольжения и расхода горючего в бензиновом генераторе.

#### 4.1.4 Производственные испытания САПР «OPTIGLOC»

Кроме лабораторных испытаний результатов исследований, их подвергали производственным испытаниям на предприятии, содержащем возможности для полного цикла «проектирование – изготовление – практическая эксплуатация». В частности, двигатель, спроектированный с помощью САПР «OPTIGLOC», работающий от бензинового электрогенератора испытывали в качестве основного в автономном подъемнике с большими перепадами нагрузки.

Таким образом, в ЧП «СЭП Энерго-КОМ» было проведено испытание САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), которая базируется на предложенных моделях и методе оптимизации параметров сложных систем по глобальной связности параметров их подсистем и обеспечивает поддержку принятия проектных решений для элементов последних.

В качестве объекта автоматизированного проектирования использовали систему «Дизельный генератор – асинхронный двигатель переменного тока». В результате испытаний установлено, что использование упомянутой выше САПР «OPTIGLOC» позволило уменьшить удельный расход дизельного топлива в генераторе на 5,3 %, сохранив при этом неизменным срок службы системы и стабильность выполнения ею технических задач, а также снизить сроки проектирования в среднем на 13,7 %.

## 4.2 Работа САПР «OPT1GLOC» при проектировании объектов ответственного назначения

Среди объектов проектирования существуют такие, которые по одному или нескольким параметрам можно отнести к «объектам ответственного назначения». Примером таких объектов может быть ответственное электрооборудование, составляющими которого являются, в частности, уникальные электродвигатели, линии электропередач (ЛЭП) и пр.

Вместе с объектами инфраструктуры, расположенными на всем протяжении ЛЭП, последняя, при своем проектировании, требует особых подходов и проектных решений, вытекающих, в основном, из высокой стоимости подобного оборудования и значительно большего влияния рисков на показатели его работы, чем для обычных объектов.

Существует понятие «проклятие процесса проектирования». Суть этого понятия в том, что проектировщик, работая над проектом, не может знать заранее, будет ли продукт его труда, воплощенный «в железе», соответствовать всем требованиям, возложенным на него техническим заданием на объект. И дело тут не в ошибках проектировщика (ошибки можно избежать!), а во внутренних и внешних условиях работы будущего объекта, которые невозможно однозначно предсказать, – отсюда многочисленные, иногда очевидные, а иногда и не очень (латентные), риски, которые будут сопровождать проект на всех этапах его жизненного цикла.

В связи с этим, поддержка принятия решений в планировании будущих латентных мультипликативных (многочисленных) рисков проектов электротехнических сооружений ответственного назначения должна основываться не только на свойствах такого объекта, но и на повышенной ответственности прогнозирования рисков событий, которые еще не произошли и оперативных мер по нейтрализации последствий таких событий с минимальными потерями для ресурсов и целей проекта. Действительно, по аналогии с тем, что под термином «моделирование» математики понимают и

создание модели, и работу с ней, в теории проектирования под «риском» понимают и ожидания «плохого» события, и действия по устранению его последствий [10, 12].

Первая фаза – ожидание события относится к начальной фазе проектирования, а планирование рисков на этой части – к попыткам (если это вообще возможно) предотвратить события и накопить больше ресурсов для нейтрализации события, если оно произойдет.

Пока рисковое событие не произошло (если она вообще состоится), о его «опасности» можно судить только по показателю вероятности, однако в уникальных проектах для экспериментального определения вероятности всегда не хватает необходимой для этого статистики.

Вторая фаза – нейтрализация события. Эта фаза, как правило, опасна тем, что негативные последствия затрагивают различные аспекты и фазы проектирования: даже единичные риски, которые «состоятся», станут мультипликативными, нанося ущерб различным областям проектирования и требуя решения новой проблемы – оперативного перераспределения различных исходных ресурсов между этими областями на стадии проектирования (сколько надо огнетушителей на будущем объекте и как их расположить на нем?).

В таких условиях оптимизация такого перераспределения в течение всего проектирования является важнейшим фактором достижения цели проекта.

Риск проекта – это неопределенное событие или условие, которое будет иметь положительное или отрицательное влияние как минимум на одну цель проекта, если оно произойдет. Причиной возникновения рисков являются неопределенности в каждом проекте. Риски разделяют на «известные» – те, которые заранее определены, оценены, для которых возможно планирование на стадии проектирования, и риски «неизвестные» – те, которые вообще не идентифицированы и не могут быть спрогнозированы.

Будущие риски также можно разделить на внезапные (известные и неизвестные), – их нельзя было предвидеть ни на стадии проектирования, ни впоследствии, по каким-либо скрытым «предвестникам бедствия», и внезапно-

предсказуемые – их можно было предвидеть при надлежащей организации проектных и профилактических работ.

Как известно, управление рисками обычно включает в себя процедуру идентификации рисков – определение рисков, способных повлиять на объект проектирования, и документирование их характеристик. Численная оценка рисковой ситуации может быть выполнена заранее по значению рисковых параметров – параметров, «подозрительных» на увеличение вероятности возникновения того или иного рискового события.

Наблюдение за рисковыми параметрами может привести к выявлению плавных (увеличение напряжения) или скачкообразных (появление трещины) изменений в них на этапе варьирования этих параметров в САПР.

Подобные изменения могут происходить как в параметрах, «привязанных» к известным рискам, так и параметрах, которые в отношении известных рисков на этапе проектирования не подозревались.

К сожалению, процесс проектирования предусматривает не только известные риски закрытого списка-реестра, но и неизвестные, которые не входят в реестр, но не становятся от этого менее опасными для достижения целей проектирования и последующей эксплуатации ответственного электротехнического объекта.

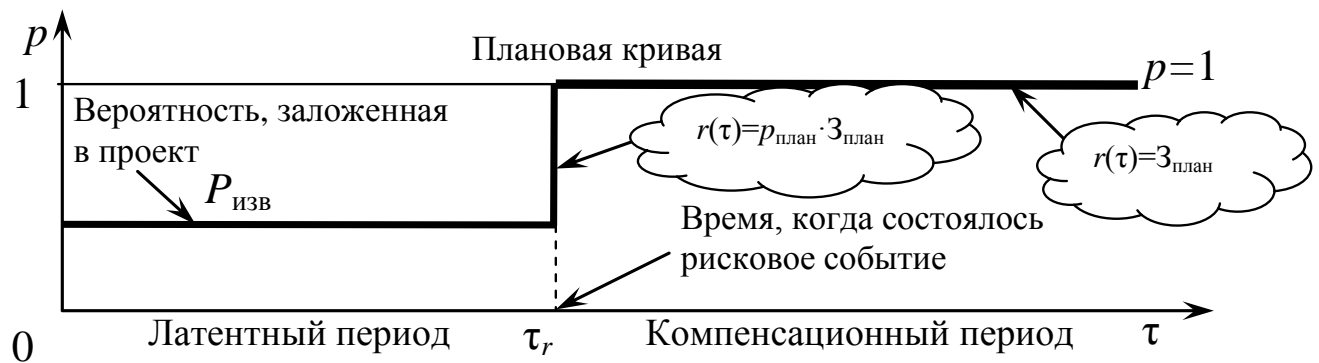
Существенной особенностью классификации «неизвестных» рисков является то, что не все виды рисков до начала идентификации известны, то есть у лица, которое занимается проектированием, нет уверенности в том, что причиной проблем в создании новых объектов не появится какой-нибудь новый, не описанный ранее риск, класс которого еще необходимо создать.

Введем понятие «жизненный цикл вероятности наступления рискового события» и построим его график для известного планового риска (рис. 4.11, *a*). У известного планового риска гипотетическая вероятность  $p_{\text{гип}}$  является константой на протяжении ее жизненного цикла, если только наступление гипотетического рискового события не превращает эту вероятность в «твердую» единицу.

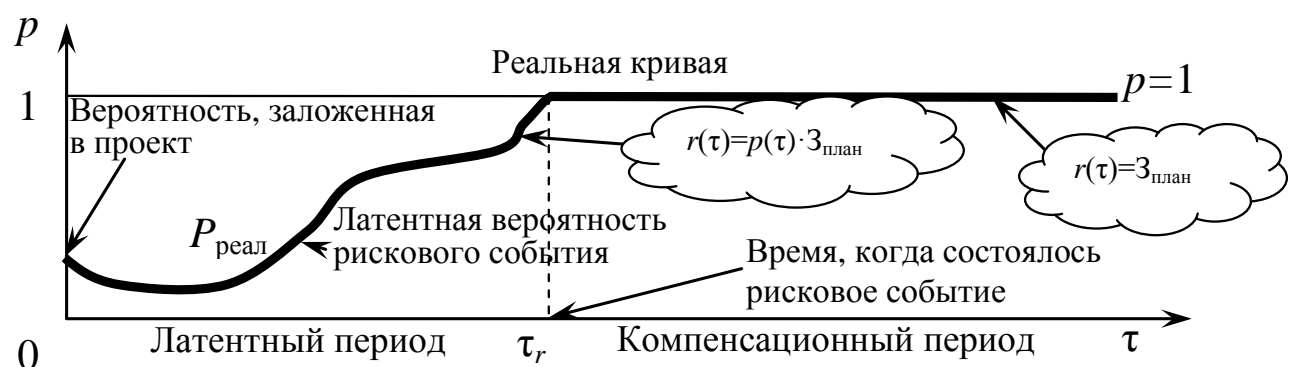
При проектировании лицо, его осуществляющее, как правило, пользуется весьма приблизительными экспертными оценками, справочниками-прогнозами о вероятности природогенных катастроф, бизнес-прогнозом и т. п.

Таковыми же случайными, гипотетическими представляются и плановые затраты, закладываемые при проектировании на компенсацию риска, – можно утверждать, что эта величина также носит вероятностный характер.

Понятно, что вероятность фактического риска, оставаясь полностью или частично скрытой от наблюдателя, не совпадает с плановой, полученной на этапе проектирования, более того, она может существенно меняться в обе стороны в течение латентного периода ее жизненного цикла (рис. 4.11, б).



а)



б)

Рисунок 4.11 – Схемы жизненных циклов вероятности наступления рискового события известных рисков проектирования: планового (а) и реального (б)



Что касается неизвестных рисков, то они всегда неожиданны, а следовательно ожидаемая вероятность до того, как этот риск реализуется, равна нулю (рис. 4.12).

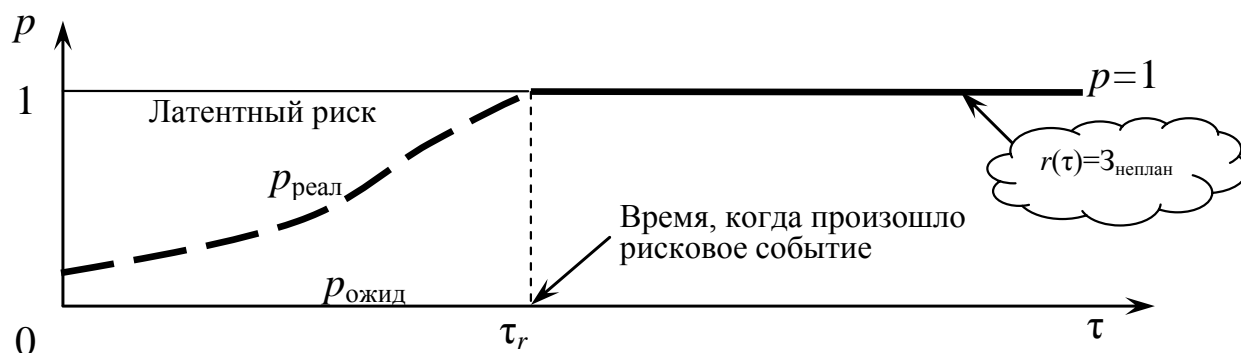


Рисунок 4.12 – Схема жизненного цикла вероятности неизвестного проектного риска

После наступления рискованной ситуации в одном из элементов ее последствия распространяются на другие элементы проектирования, далее – на следующие и, в итоге, могут охватить весь проект.

Латентная ситуация для смешанных рисков «дважды латентная», – неизвестно не только само изменение, но неизвестно также и то, в чем оно заключается «физически»!

В результате такого подхода создана когнитивная модель финансовых потоков, объединяющих все предложенные в работе принципы моделирования различных аспектов проектирования проектов ответственного назначения. Показано, что с помощью этих моделей можно будет при необходимости решать задачи оптимизации потоков ресурсов между элементами проектируемого объекта с целью компенсации последствий рискованных событий в этих элементах.

В работе для этой цели использовали математический метод тензорного исчисления.

### 4.3 САПР асинхронных электродвигателей с элементами искусственного интеллекта

Электротехническое оборудование (источники электроэнергии, ЛЭП, потребители электроэнергии и многочисленное вспомогательное: контролирующее, обеспечивающее, защитное, ограничивающее, автоматизирующее, накапливающее, перерабатывающее и передающее информацию, а также прочее) чаще всего объединяется в сложные сетевые системы, требующие мониторинга параметров ее надежности.

Любая система обеспечения надежности повреждаемых во время хранения и эксплуатации сетевых объектов, то есть объектов, которые состоят из отдельных элементов и связей между ними, требует, как минимум, сведений о начальном состоянии их структуры, а также результатов анализа структуры текущего состояния. Если подобные объекты изначально или в результате повреждений частично недоступны для такого мониторинга, с анализом их состояния возникают проблемы. В этом случае исследователь имеет возможность получить лишь ограниченную информацию о значении некоторых характеристик доступной части сетевого объекта за некоторый период до текущего времени включительно.

Понятно, что в этом случае наличие лишь части информации о состоянии структуры сетевого объекта, которую, тем не менее, необходимо воспроизвести, относит систему распознавания к обучающимся системам. Такие системы автоматизировано распознают образы в условиях частично утраченных или вынужденно распараллеленных данных, они могут с некоторой вероятностью и ошибаться. Все это является признаком систем с искусственным интеллектом.

Для управления современной электротехнической сетью «сильных токов» необходимо иметь, как правило, приближающуюся к ней по структуре сеть «слабых токов», то есть компьютерную сеть. В последнее время все большее распространение получают беспроводные компьютерные сети (БКС), которые

позволяют значительно лучше приспособляться к потребностям большого количества пользователей информационных систем. Широкое использование таких сетей приводит к росту требований к их надежности, отказоустойчивости и производительности. Высокая производительность сети обеспечивается, в первую очередь, отсутствием явных и скрытых узких мест и дефектов, которые приводят как к параметрическому замедлению скорости работы в сети, так и к структурной недостижимости отдельных элементов беспроводной сети из-за выхода из строя процессоров и коммуникационных компонентов [17]. При этом существенным является время, затрачиваемое на восстановление работоспособности сети.

При проектировании и эксплуатации БКС важно уметь оценивать состояние их структуры также потому, что именно от него зависит работоспособность сети на протяжении запланированного жизненного цикла. В отличие от «обычных» проводных сетей, беспроводные лишены возможности постоянного внутреннего мониторинга своей структуры.

Проблема осложняется также тем, что элементы БКС не имеют постоянных «соседей» для взаимотестирования, поскольку они часто перемещаются в пространстве, постоянно изменяя перечень ближайших серверов и узлов другого назначения.

Решение задач структурного диагностирования БКМ представляет собой сложную задачу еще и потому, что сетевые структурные неисправности делятся на различные типы, для поиска каждого из которых необходимо использовать различные методы и виды диагностического оборудования. К этому следует добавить, что надежность самих систем диагностирования требует постоянного внимания исследователя. Поиск и устранение неисправностей программного обеспечения, как правило, не входит в задачи структурного диагностирования БКС, и отсюда возникает дополнительная проблема отделения неисправностей прикладного программного обеспечения от неисправностей сети.

Кроме этого, поиск структурных неисправностей даже одного типа осложняется отсутствием единого формализованного подхода, общего

алгоритма действий администратора-диагноста. В практике автоматизированного структурного диагностирования и синтеза БКС используются различные способы их представления, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, но не является единственным.

Отсутствие формализованного метода определения области подозреваемых неисправностей приводит к высоким временным затратам на проведение диагностического эксперимента и, следовательно, на поиск неисправности.

Также в настоящее время отсутствует единая формализованная методология, теоретически обоснованное морфологическое среду, что позволяет локализовать каждого из видов неисправностей.

Это приводит к необходимости наличия у диагноста достаточно высокого уровня опыта и знаний в области морфологического анализа и прогнозирования состояния структуры сложных систем для обеспечения корректности постановки диагностического эксперимента.

Указанные проблемы обуславливают высокие временные затраты на поиск неисправности, а также сужают диапазон субъектов, обеспечивающих корректное решение задачи поиска структурной неисправности, что, в свою очередь, приводит к высокой трудоемкости и сложности решения данной проблемы.

С другой стороны, в последнее время широкое распространение получили методы обработки зрительных изображений и видеопотоков, современных интеллектуальных методов распознавания образов и тому подобное, которые предоставляют возможности «вытянуть» даже с поврежденного изображения существенную информацию, необходимую для диагностики текущего состояния, воспроизведения или реинжиниринга БКС.

Остается только не до конца разработанной проблема отображения сложной структуры на зрительное изображение, то есть структурная визуализация сложных систем [147 – 150].

Целью этой части работы было повышение работоспособности

беспроводных компьютерных сетей путем своевременного их восстановления или реинжиниринга за счет разработки и внедрения интеллектуального распознавания состояния структуры повреждаемых сетевых объектов с частично недоступными для мониторинга элементами с помощью ее морфологического отображения на зрительный образ и последующей интеллектуальной обработки этого образа [151].

Как известно, на серверах беспроводной сети во время ее работы накапливается много информации, которая может вообще не использоваться пользователями для основной работы, но которая, в то же время, содержит на скрытом уровне важные знания о структуре сети и ее «историю» от начала эксплуатации до текущего времени.

В работе предложен интеллектуальный метод распознавания структуры частично недоступного для мониторинга сетевого объекта, в частности БКС, общая схема которого приведена на рис. 4.13.

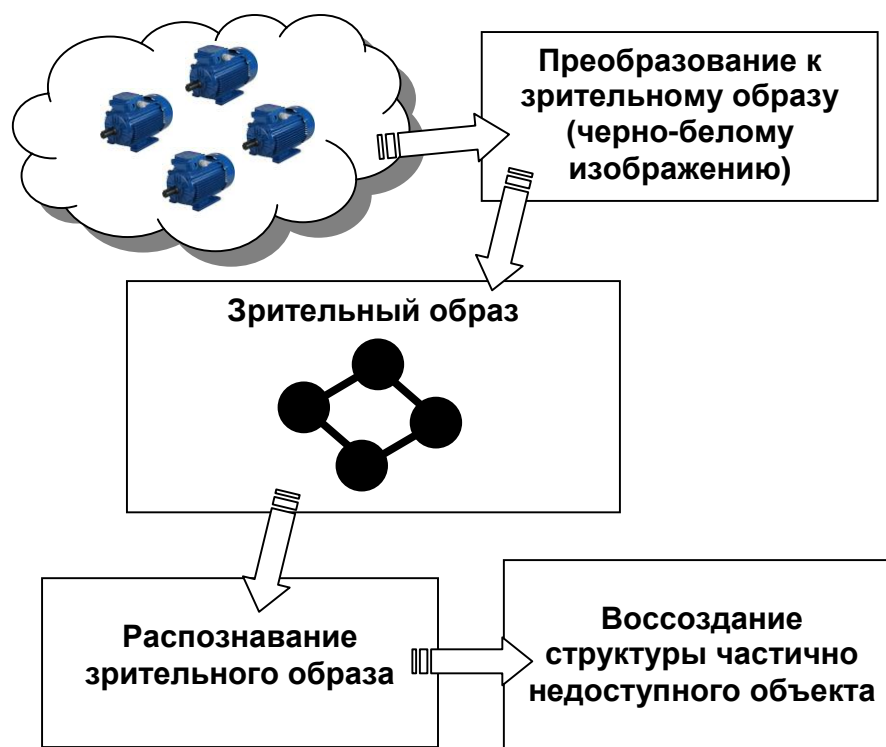


Рисунок 4.13 – Схема интеллектуального распознавания структуры частично недоступного для мониторинга сетевого объекта

Важно, что с выходом из строя отдельных структурных единиц электротехнической системы, информация, которая хранится на доступных узлах, остается (до определенных пределов) информативной с точки зрения диагностики.

Такие знания носят вероятностный характер, но использование современных интеллектуальных методов «вытягивания» полезных знаний, на первый взгляд, неинформативных трендов (нейронные сети, марковские модели, и тому подобное) делает данный путь диагнозов структуры БКС весьма актуальным.

#### 4.4 Выводы

1. На основе разработанной структурной основы САПР «OPTIGLOC» и основных подсистем, предложенных в настоящей работе, в частности, метода оптимизации по глобальной связности, предложена общая структура САПР «OPTIGLOC». В ее основе подсистемы трех этапов создания проекта: проектирование конструкции асинхронного двигателя; проектирование параметров асинхронного двигателя, не зависящих от скольжения и проектирование параметров асинхронного двигателя, зависящих от скольжения.

1. Приведен расчет оптимальной системы «генератор – двигатель» с помощью САПР «OPTIGLOC» на примере проектирования системы «топливный генератор – асинхронный электродвигатель», в основе которой генератор марки «Champion GG3300» (покупной) и двигатель, разработанный в САПР как модернизированный вариант асинхронного электродвигателя «АИР 80 В2».

2. При проектировании электротехнических объектов ответственного назначения для смешанных рисков возникает «дважды латентная» ситуация, – неизвестно не только само изменение свойств объекта проектирования, но

неизвестно также и то, в чем оно заключается «физически»! В работе создана когнитивная модель действий проектировщика, объединяющая все предложенные в работе принципы моделирования различных аспектов работы САПР. Показано, что с помощью этих моделей можно решать задачи оптимизации элементов проектирования с целью компенсации последствий будущих рисков событий в элементах. Для этой цели использовали математический метод тензорного исчисления.

3. Любая система обеспечения надежности повреждаемых во время хранения и эксплуатации сетевых объектов электротехники, то есть объектов, которые состоят из отдельных элементов и связей между ними, требует, как минимум, сведений о начальном состоянии их структуры, а также результатов анализа структуры текущего состояния. Если подобные объекты изначально или в результате повреждений частично недоступны для мониторинга, с таким анализом возникают проблемы. В этом случае исследователь имеет возможность получить лишь ограниченную информацию о значении некоторых характеристик доступной части сетевого объекта за некоторый период до текущего времени включительно. Предложено использовать для этой цели подсистему САПР асинхронных электродвигателей с элементами искусственного интеллекта.

4. В ЧП «СЭП Энерго-КОМ» было проведено испытание САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), которая базируется на предложенных моделях и методе оптимизации параметров сложных систем по глобальной связности параметров их подсистем и обеспечивает поддержку принятия проектных решений для элементов последних.

5. В качестве объекта автоматизированного проектирования использовали систему «Дизельный генератор – асинхронный двигатель переменного тока». В результате испытаний установлено, что использование упомянутой выше САПР «OPTIGLOC» позволило уменьшить удельный расход дизельного топлива в генераторе на 5,3 %, сохранив при этом неизменным срок

службы системы и стабильность выполнения ею технических задач, а также снизить сроки проектирования в среднем на 13,7 %.



## ВЫВОДЫ

1. Анализом проблем и существующих методов автоматизированного проектирования сложных электротехнических систем, в частности, асинхронных электродвигателей, установлено, что при проектировании близких по мощности подсистем «топливный электрогенератор» и «асинхронный электродвигатель» их необходимо рассматривать в тесной взаимосвязи. Для этого введено понятие и предложен метод расчета глобальной связи между аргументами проектируемого объекта в САПР систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель». Эта связь доминирует над другими в том смысле, что он присутствует в наибольшем количестве моделей в процессе проектирования, в связи с чем результат его вычисления осуществляет решающее влияние на объект в целом. Предложен метод расчета в САПР систем «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель», в котором промежуточной целевой функцией является не потребительские качества объекта (мощность, масса, стоимость, КПД, и т. п), а упомянутый глобальный связь (в данном случае – скольжение электродвигателя).

2. Для решения многокритериальных задач при проектировании параметров сложных систем с глобальной связью между их элементами (например, скольжением) разработан метод подвижного окна, в котором на каждой текущей позиции ширина окна соответствует текущей величине скольжения, при этом выполняется поиск приемлемых решений на каждой позиции окна с последующей обработкой полученных данных. Это позволило свести многокритериальные задачи к однокритериальным и тем самым повысить эффективность автоматизированного проектирования и качество проектов.

3. Для организации оптимизационных расчетов «за скольжением» создана модель, в которой удалось связать частоты вращения магнитного поля

генератора и ротора двигателя с финишной характеристикой эффективности САПР: расходом топлива в генераторе. Такая модель позволяет перейти к оптимизации характеристик двигателя по схеме: найти скольжения, что обеспечивает минимум расхода топлива, и подставить его в дальнейшие расчеты параметров электродвигателя. Такую оптимизацию через весьма сложные математические модели, принимающих в ней участие, можно выполнить любым из дискретных методов подбора. Дальнейшая последовательность операций при проектировании асинхронного двигателя соответствует стандартной схеме, но номинальное скольжение в результатах расчетов уже не задается и не проверяется по таблицам на соответствие допуска, а является результатом описанных выше оптимизационных расчетов.

4. На основе разработанных методов и моделей в работе была создана САПР «OPTIGLOC», которая содержит блок классификации вида проектирования: выбор готового двигателя, проектирование с выбором величины номинального скольжения, проектирование с расчетом номинального скольжения с помощью оптимизационных, предложенных в данной работе. Далее выполняется расчет номинального скольжения асинхронного двигателя и окончательный расчет «по скольжению», после которого заканчивается проектирование. Первый дополнительный блок запускается в тех случаях, когда проектируется двигатель ответственного назначения со значительной вероятностью угроз его работоспособности. Второй дополнительный блок поддерживает проектирование электродвигателей, которые предназначены для работы в сети, частично недоступной для мониторинга.

5. Для повышения качества проектирования в состав САПР «OPTIGLOC» дополнительно привлекли экспериментальное обеспечение, в частности ускоренный метод экспериментальной оценки скольжения в двигателе, работающем под нагрузкой. В рамках метода вместо обычного стробоскопического использовали диск с изображением геометрического фрактала с последующим цифровым фотографированием этого изображения в двух временных точках и применением отображений параболического

преобразования.

6. В ЧП «СЭП " Энерго-КОМ» было проведено испытание САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC». В качестве объекта автоматизированного проектирования использовали систему «Дизельный генератор – асинхронный двигатель переменного тока». В результате испытаний установлено, что использование САПР «OPTIGLOC» позволило снизить удельный расход дизельного топлива в генераторе на 5,3 %, сохранив при этом неизменным срок службы системы и стабильность выполнения потребительских задач, а также снизить сроки проектирования в среднем на 13,7 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Становский, А.Л. Разработка методов преобразования многомерной измерительной информации к числу с помощью дифференциальных уравнений в частных производных / А.Л. Становский, А.В. Шмараев, И.В. Прокопович, Д.А. Пурич, П.С. Швец, В.В. Бондаренко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2015. – № 4/4 (76). – С. 56 – 61. *Издание входит в международные наукометрические базы Scopus, BASE, ULRICHSWEB, DRIVER, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, FreeFullPDF, eLIBRARY.*

2. Становский, А. Л. Разработка метрологического обеспечения управления технологическим процессом литья медных анодов / А.Л. Становский, А.В. Шмараев, И.В. Прокопович, Д.А. Пурич, П.С. Швец, В.В. Бондаренко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – Харьков, 2015. – № 4/3 (24). – С. 55 – 59. *Издание входит в международные наукометрические базы BASE, ULRICHSWEB, DRIVER, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, FreeFullPDF, eLIBRARY.*

3. Становский, А. Л. Автоматизированное проектирование теплообменных аппаратов с помощью фрактальных сверток компьютерных томограмм / А.Л. Становский, А.В. Торопенко, П.С. Швец, В.В. Бондаренко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 10. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. — С. 140 – 155. *Издание входит в международные наукометрические базы BASE, ULRICHSWEB, DRIVER, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, FreeFullPDF, eLIBRARY.*

4. Становський, О. Л. Оптимізація зв'язності елементів в задачах автоматизованого проектування систем / О.Л. Становський, П.С. Швець, А.В. Торопенко, В.В. Бондаренко, А.О. Становський, О. Абу Шена, О.М. Красножон

// Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2015. – № 49(1158)2015. – С. 170 – 175.

5. Shvets, P. S. The computer-aided design of rubber-metal products / P. S. Shvets, O. Yu. Lebedeva, V. V. Bondarenko // Праці Одеського національного політехнічного університету. – Одеса: ОНПУ, 2015. – С. 63 – 72.

6. Шве́ц, П.С. Многоцелевая оптимизация объектов со связанными параметрами с помощью метода скользящего окна / П.С. Шве́ц, Д.А. Монова, В.В. Бондаренко, Е.А. Оборотова // Научный журнал «ScienceRise». – Харьков, 2016. – № 4(21). – С. 31 – 36. *Издание входит в международные наукометрические базы BASE, ULRICHSWEB, DRIVER, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, FreeFullPDF, eLIBRARY.*

7. Становский, А. Л. Автоматизированное проектирование сложных систем по ограничениям / А.Л. Становский, П.С. Шве́ц, В.В. Бондаренко // Научный журнал «ScienceRise». – Харьков, 2016. – № 4(21). – С. 31 – 36. *Издание входит в международные наукометрические базы BASE, ULRICHSWEB, DRIVER, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, FreeFullPDF, eLIBRARY.*

8. Бовнегра, Л. В. Обобщение метода виртуального объекта на расчеты оптимальных параметров сложных систем // Л. В. Бовнегра, В.В. Бондаренко, С.В. Кошулян // Материалы XXI семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одеса: ОНПУ, 22 – 23 января 2013. – С. 112 – 113.

9. Прокопович, И. В. Особенности технологического процесса литья как нестабильного объекта моделирования // И. В. Прокопович, В.В. Бондаренко, В.В. Добровольская // Материалы XXI семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одеса: ОНПУ, 22 – 23 января 2013. – С. 114 – 115.

10. Щедров, І. М. Підтримка прийняття рішень в управлінні латентними мультиплікативними ризиками проєктів будівництва мегаспоруд //

І.М. Щедров, К.І. Березовська, В.В. Бондаренко // Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Молодь у світі сучасних технологій», МССТ-2015. – Херсон, ХНТУ, 4 – 5 червня 2015. – С. 228 – 231.

11. Бондаренко, В. В. Проектування складних електротехнічних систем / В.В. Бондаренко, П.С. Швець, Д.О. Пурич // Матеріали XXII семінара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 4 – 5 марта 2014. – С. 65 – 67.

12. Швець, П. С. Оптимизация параметров оборудования по критерию связности элементов / П.С. Швець, В.В. Бондаренко, Д.О. Пурич // Матеріали XXII семінара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 4 – 5 марта 2014. – С. 68 – 70.

13. Торопенко, А. В. Элементы технических систем с переменной связностью / А.В. Торопенко, Д.А. Пурич, П.С. Швець, В.В. Бондаренко // Матеріали XXIII семінара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 10 – 12 марта 2015. – С. 47 – 48.

14. Швець, П. С. Оптимизация технических систем по критерию связности между их элементами / П.С. Швець, Д.А. Пурич, А.В. Торопенко, В.В. Бондаренко // Матеріали XXIII семінара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 10 – 12 марта 2015. – С. 49 – 55.

15. Лебедева, О. Ю. Автоматизация проектирования технологического процесса изготовления гумовометалевих виробів. / О.Ю. Лебедева, О.Абу Шена, В.В. Бондаренко, О.М. Красножон // Матеріали 2-ої Всеукраїнської конференції «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості 2015». – Івано-Франківськ, 6 – 9 жовтня 2015. – С. 59 – 60.

16. Становський, О. Л. Фазовий портрет технологічного процесу виготовлення гумовометалевих виробів / О.Л. Становський, О.Ю. Лебедева, О. Абу Шена, В.В. Бондаренко // II Міжнародна науково-технічна internet-

конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами». – Київ, НУХТ, 25 листопада 2015. – С. 87.

17. Становський, А. О. Використання методу поля напрямків в діагностиці бездротових комп'ютерних мереж / А.О. Становський, В.В.Бондаренко, Абу Шена О., О.І. Дадерко // V міжнародна міжвузівська школа-семінар «Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі (МіЗДТС-2015)». – Івано-Франківськ, 16 – 19 листопада 2015. – С. 73 – 76.

18. Становский, А. Л. Оптимизация связности элементов в САПР / А.Л. Становский, В.В. Бондаренко, В.В. Добровольская, Осама Абу Шена, И.А. Саух // Материалы 17-й международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 23 – 27 мая 2016 г. – С. 32 – 33.

19. Становский, А. Л. Оптимизация систем при связанных аргументах / А.Л. Становский, В.В. Бондаренко, В.В. Добровольская, Осама Абу Шена, И.А. Саух // Материалы VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Інформатика та системні науки». – Полтава, 10 – 12 березня 2016 р. С. 290 – 292.

20. Швець, П. С. Оптимізація зони зв'язності в САПР / П.С. Швець, Т.П. Становська, В.В. Бондаренко, Абу Шена Осама // Материалы XXIV научно-технического семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса, 11 января 2016. – С. 9 – 11.

21. Stanovskyi, O. Mathematical modeling and optimization of complex systems on a global connection parameters in CAD / O. Stanovskyi, P. Shvets, V. Bondarenko, O. Toropenko, Abu Shena Osama, Walid Hussain // Materials of IX Annual Scientific Conference "Information Technology end Automation – 2016". – Odessa, October 11-14, 2016. – P. 8 – 9.

22. "Induction (Asynchronous) Motors" (PDF) [Text]. Mississippi State University Dept of Electrical and Computer Engineering, Course ECE 3183,

'Electrical Engineering Systems for non-ECE majors'. Retrieved 2 December 2012.

23. Ступичный асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором [Текст] / Neudorfer. *Glaser's Annalen*, 2001. – № 6/7. – S. 237 – 242.

24. Шабалов, П. Г. Авиационный электропривод [Текст] / П. Г. Шабалов, Е. Ф. Галкин. – Самара: СГАУ, 2005. – 52 с.

25. Промышленное оборудование. Применение асинхронных электродвигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lesopilka777.ru/raznotematicheskoe/81-poleznye-materialy/718rimjenjenijeasinkhronnykheljektrodvigateljej.html>. – 7.11.2014.

26. Ozyurt, C. H. Parameter and Speed Estimation of Induction Motors from Manufacturers Data and Measurements [Text] / C. H. Ozyurt // Middle East Technical University. – 2005. – P. 33 – 34.

27. Каталог электродвигателей. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://electromotor.com.ua/documentation/poleselektro\\_katalog.pdf](http://electromotor.com.ua/documentation/poleselektro_katalog.pdf). – 14.07.2016.

28. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

29. Аспекты подбора бензинового электрогенератора. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://generatorvolt.ru/ehlektrogenerator/aspekty-podbora-benzinovogo-ehlektrogeneratora.html>. – 01.06.2014.

30. Маркович, И. М. Режимы энергетических систем [Текст] / И. М. Маркович. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 360 с.

31. Воробьев, В. Е. Расчет трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Текст] / В. Е. Воробьев, В. И. Рябуха, А. А. Томов. – С.Пб.: СЗПИ, 2000. – 151 с.

32. Горохов, В. Л. Расчет асинхронных двигателей [Текст] / В. Л.



Горохов, А. Н. Лукин, Г. М. Жигалова. – М.: МГТУ, 2008. – 91 с.

33. CAD Standards (March 2015). – Facilities Engineering Services Section. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://fess.fnal.gov/engineering/CADStandardManual.pdf>>. – 08.02.2016.

34. Инфракрасная фотография: теория и практика. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://prophotos.ru/lessons/6596-osnovyi-infrakrasnoy-s-emki>>. – 23.03.2015.

35. Завидей, В. И. Тепловой контроль состояния футеровки объектов металлургии с использованием тепловизоров нового поколения / В.И. Завидей, В.А. Сизов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/3408/4768>>. – 29.04.12.

36. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – 2013. – 20 с.

37. Правила и рекомендации по регулированию частоты и перетоков. – 2007. – 20 с.

38. Армирование резин. Справочник химика. Режим доступа: <http://chem21.info/info/1483333/> – 12.06.2015.

39. Магнитная резина. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id393832p1.html/> – 02.07.2015.

40. Kenny, J.C. Carbonblack filled natural rubber. Structural investigations / J.C. Kenny, V.J. McBrierty, Z. Rigbi, D.C. Douglass // *Macromolecules*. – 1991. – Vol. 24, Issue 2. – P. 436–443. doi: 10.1021/ma00002a015

41. Shaffer, G.D. An Archaeomagnetic Study of a Wattle and Daub Building Collapse / G. D. Shaffer // *Journal of Field Archaeology*. – 1993. – Vol. 20, Issue 1. – P. 59–75. doi: 10.2307/530354

42. Matthews, F.L. *Composite Materials: Engineering and Science* / F.L. Matthews, R.D. Rawlings. – Boca Raton. – 1999. – 470 p.

43. Kardar, M. *Statistical Physics of Particles* / M. Kardar. – 2007 – Available at: <http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/physics/statistical-physics/statistical-physics-particles> – 16.10.2015.
44. Лебедева, Е.Ю. Метод проектирования систем с существенно различными свойствами материалов элементов / Е.Ю. Лебедева, А.Н. Красножон, Ан.А. Становский // Матер. XXII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – 2014. – С. 57–58.
45. Зуховицкий, С. И. Линейное и выпуклое программирование [Текст] / С. И. Зуховицкий, Л. И. Авдеева. – М.: Наука, 1994. – 288 с.
46. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст] / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
47. Шоробура, Н. Н. Решение задач многокритериальной оптимизации сложных объектов и систем. – ДонНТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita\\_shorobura.pdf](http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita_shorobura.pdf)>. – 11.07.2010.
48. Многокритериальная оптимизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://ru.wikipedia.org/wiki/Многокритериальная\\_оптимизация](http://ru.wikipedia.org/wiki/Многокритериальная_оптимизация)>. – 26.10.2013.
49. Тонконогий, В. М. Разработка САПР многониточного резьбошлифования [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, А. А. Березовский // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – № 41. – С. 212 – 216.
50. Тонконогий, В. М. Многоцелевая оптимизация методом комплексного генетического алгоритма [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, Д. А. Монова // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 6. – Харків, НТУ «ХП», 2011. – С. 276 – 281.
51. Становский, А. Л. Эволюционная оптимизация электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами [Текст] / А. Л. Становский, П.

С. Швец, А. В. Торопенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2013. – № 4/3 (64). – С. 36 – 40.

52. Тонконогий, В. М. Многопараметрическая оптимизация методом комплексного генетического алгоритма [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, Д. А. Монова // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании – 2011». – Севастополь: СНТУ, 5 – 10 сентября 2011. – С. 56 – 57.

53. Духанина, М. А. Эволюционная оптимизация слабосвязанных систем [Текст] / М. А. Духанина, Е. Ю. Лебедева, П. С. Швец, Л. А. Одукалец // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова, Київ, 2013. – № 67 – С. 74 – 81.

54. Становский, А. Л. Оптимизация слабосвязанных систем в автоматизированном проектировании и управлении [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швец, И. Н. Щедров // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 6. – Харків, НТУ «ХП», 2011. – С. 129 – 134.

55. Прокопович, И. В. Адаптивный генетический алгоритм для «мягких» эволюционных вычислений [Текст] / И. В. Прокопович, П. С. Швец, И. И. Становская, М. А. Духанина // Праці Одеського політехнічного університету, 2012. – Вип. 2(39). – С. 218 – 224.

56. Джакония, В. Е. Телевидение [Текст] / В. Е. Джакония. – М.: Горячая линия, Телеком, 2002. – 640 с.

57. ГОСТ 5689-32. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Текст] / М.: Издательство стандартов, 2003. – 35 с.

58. Промышленный программно-аппаратный комплекс анализа изображений SIAMS 700 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://www.siams.com/products/siams700/siams700.htm>>. – 22.11.2014.

59. Колесникова, Е. В. Фрактальная размерность как мера трансформации серийной проектной деятельности в операционную [Текст] / Е. В. Колесникова, И. И. Становская // Праці Одеського політехнічного університету – Одеса, 2013. – Вип. 2(41). – С. 282 – 288.

60. Тонконогий, В. М. Принятие решения о выборе способа литья в нечетких условиях литейного производства [Текст] / В. М. Тонконогий, В. Д. Гогунский, И. И. Становская // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Харків, НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 7. – С. 122 – 129.

61. Прокопович, И. В. Система интеллектуального мониторинга процесса литья [Текст] / И. В. Прокопович, А. А. Коряченко, И. И. Становская // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2011. – Вип. 44. – С. 278 – 282.

62. Гогунский, В. Д. Управление комплексными рисками программы сопровождения систем аварийной защиты объектов ответственного назначения [Текст] / В. Д. Гогунский, Т. В. Бирик, И. И. Становская // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування. – 2012. – № 2. – С. 104 – 108.

63. Абу Айаш, Т. А. Новый метод фрактального сжатия подвижных изображений [Текст] / Т. А. Абу Айаш, Г. Н. Востров, П. А. Становский // Труды ОНПУ. – 2005. – Спецвыпуск. – С. 98 – 101.

64. Востров, Г. М. До питання про фрактальне кодування відеопотоків [Текст] / Г. М. Востров, Т. А. Абу Айаш, П. О. Становський // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2005. – Вип. 17. – С. 41 – 48.

65. Становський, П. О. Розробка методу фрактального кодування-декодування відеопотоків [Текст] / П. О. Становський, Є. В. Малахов, О. О. Арсірій // Труды ОНПУ. – 2007. – Вип. 2(28). – С. 113 – 116.

66. Становский, П. А. Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от телевизора [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В.

Шихирева // Праці Одеського національного політехнічного університету. – Одеса, 2012. – Вип. 2(39). – С. 67 – 71.

67. Малахов, Е. В. Кодирование информации для поиска видеопотоков в хранилищах данных [Текст] / Е. В. Малахов, П. А. Становский // Труды ОНПУ. – 2008. – Вып. 2(30). – С. 156 – 159.

68. Становский, П. А. Кодирование и поиск подвижных и неподвижных изображений в хранилищах данных [Текст] / П. А. Становский // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск «Комп'ютерні системи та мережі». – Київ: Техніка, 2009. – Вип. 72. – С. 231 – 234.

69. Оборский, Г. А. Измерение параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [Текст] / Г. А. Оборский, В. М. Рязанцев, Ю. В. Шихирева // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 8. – Харків, НТУ «ХП», 2013. – С. 124 – 132.

70. Становский, П. А. Автоматизированный мониторинг протекания технологических процессов с помощью низкочастотных видеопотоков [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25. – Ч. II. – С. 70 – 74.

71. Тонконогий, В. М. Видеообработка изображений в системе автоматического измерения дефектности износостойких покрытий на режущем инструменте [Текст] / В. М. Тонконогий, П. А. Становский // Труды ОПУ. – Одеса, 2005. – Вип. 1(23). – С. 112 – 115.

72. Бовнегра, Л. В. Оценка состояния режущего инструмента с помощью параболического преобразования видеопотока со сходящей стружки [Текст] / Л. В. Бовнегра, П. А. Становский, Ю. В. Шихирева // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 7. – Харків, НТУ «ХП»,

2012. – С. 8 – 17.

73. Бовнегра, Л. В. Метод оценки износа режущего инструмента с помощью параболического преобразования видеопотока со сходящей стружки [Текст] / Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева, Т. И. Носенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С.Пухова. – 2012. – Вип. 65. – С. 60–67.

74. Шихирева, Ю. В. Особенности проектирования и управления процессами нагрева твердеющего железобетона внутренними источниками тепла [Текст] / Ю. В. Шихирева, Г. А. Оборский, О. С. Савельева // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2014. – № 2/5 (68). – С. 20 – 24.

75. Становська, Т. П. Инфракрасный метод измерения тепловых параметров затвердевания бетона [Текст] / Т. П. Становська, М. А. Духанина, Ю. В. Шихирева // Холодильна техніка і технологія. – Одеса, 2013. – № 2(142). – С. 112 – 115.

76. Оборский, Г. А. Экспресс-метод оценки изменений температуры элементов РЭА [Текст] / Г. А. Оборский, О. С. Савельева, Ю. В. Шихирева // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 12 – 16.

77. Шоробура, Н. Н. Разработка моделей и программных средств для многокритериальной оптимизации сложных объектов в компьютерных информационных системах. – Донецк: ДНТУ [Электронный ресурс]. – <http://www.masters.donntu.edu.ua/2004/kita/shorobura/diss/index.htm>, 1.04.2011.

78. Системы автоматизированного проектирования САПР CAD/CAM/CAE. Ограничения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://sapr-cad.ru/glava-optimizatsiya/ogranicheniya>>. – 13.01.15.

79. Крилевич, С. Д. Разработка системы автоматизированного решения вычислительных задач в САПР, основанной на методе программирования в

ограничениях / С.Д. Крилевич, А.В. Григорьев. // Донецк – Донецкий национальный технический университет.

80. Нариньяни, А. С. Программирование в ограничениях и недоопределенные модели / А.С. Нариньяни, В.В. Телерман, Д.М. Ушаков., И.Е. Швецов // Информационные технологии 1998. – № 7. – С. 13 – 22.

81. Григорьев, А. В., Система автоматизированного решения вычислительных задач в САПР, основанная на методе программирования в ограничениях / А.В. Григорьев, С.Д. Крилевич // Донецкий национальный технический университет [Электронный ресурс] – Режим доступа: <[http://vuzlib.com.ua/articles/book/13645-Sistema\\_avtomatizirovannogo\\_re/1.html](http://vuzlib.com.ua/articles/book/13645-Sistema_avtomatizirovannogo_re/1.html)>

82. Перпері, А. О. Модернізація математичного методу генетичного алгоритму для оптимізації геометрії шліфувальних кіл [Текст] / А.О. Перпері, П.С. Швець, Д.А. Монова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – № 41. – С. 217 – 221.

83. Nameyer, K. Electrical Machine: Basics, Design, Function, Operation. RWTH Aachen University Institute of electrical machines. – Retrieved 11 January 2013. – P. 133.

84. Metallургические печи: основы тепловой работы печей, нагревательные и термические печи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mashmex.ru/metallurgi/79-teplovaya-rabota-pechi.html?showall=1>. – 09.02.2016.

85. Почему на эскалаторах в метро перила движутся быстрее, чем ступеньки? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thequestion.ru/questions/37006/pochemu-na-eskalatorakh-v-metro-perila-dvizhutsya-bystrye-chem-stupenki>. – 02.04.2016.

86. Бакулин, А. С. Сооружения, устройства и подвижный состав метрополитена [Текст] / А.С. Бакулин, К.И. Кудринская, П.А. Куи, Е.Т. Мосин, В.А. Пронин, Е.А. Федоров. – М.: Транспорт, 1979. – 239 с.

87. Становський, О. Л. Автоматизоване проектування технології виготовлення гумометалевих виробів [Текст] / О.Л. Становський, О.Ю. Лебедєва, О.М.А. Абу Шена, О.М. Красножон // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Процессы управления. – Харьков, 2015. – № 5/1 (77). – С. 23 – 28.

88. Савельєва, О. С. Інформаційні технології проектування конструкції та технології виготовлення гумометалевих виробів [Текст] / О.С. Савельєва, І.І. Становська, О.Ю. Лебедєва, А.В. Торопенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2016. – № 2/2 (80). – С. 28 – 35.

89. Fleming, P.J. Application of Multiobjective Optimization to Compensator Design for SISO Control Systems. – Electronics Letters. – 1986. – Vol. 22. – No. 5, P. 258–259.

90. Fleming P.J. Computer-Aided Control System Design of Regulators using a Multiobjective Optimization Approach. – Proc. IFAC Control Applications of Nonlinear Prog. and Optim., Capri, Italy. – 1985. – 47– 52.

91. Становский, А. Л. САПР электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швец, А. В. Торопенко // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 8. – Харків, НТУ «ХПШ». – С. 133 – 143.

92. Становский, А. Л. Эволюционная оптимизация слабосвязанных технических систем в САПР [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швец, Д. А. Желдубовский // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – 2011. – Вип. 2(36). – С. 234 – 238.

93. Сигал, И.Х. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. Учебное пособие [Текст] / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. – М.: Физматлит, 2002.



94. Шеховцов, А.В. Решение многокритериальной оптимизации с использованием адаптивных алгоритмов [Текст] / А. В. Шеховцов, В. В. Крючковский, А. Н. Мельник // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – № 2(20). – С. 26 – 32.

95. Dasgupta D. Optimisation in Time-Varying environments using Structured Genetic Algorithms, Technical Report No IKBS-17-93. – Dec. 1993.

96. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators [Text]. New York, N.Y.: IEEE. ISBN 0-7381-3978-5. – 2004.

97. Сидорова, Н. В. Оптимізація силікатних матеріалів неавтоклавного твердіння по комплексу критеріїв якості з використанням елементів аксонометрії [Текст] / Н. В. Сидорова, Ю. В. Доценко, А. О. Перпері // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Випуск 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь, 2008. – Т. 39. – С. 119 – 122.

98. Постановка задачи многокритериальной оптимизации. Множество Парето [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/ch1101.mod/?cou=MO/base.cou>>. – 16.04.2011.

99. Безрук, В. М. Принятие оптимальных решений в телекоммуникационных сетях с учетом совокупности показателей качества [Текст] / В. М. Безрук, А. Н. Буханько // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 52 – 66.

100. Перпери, А. А. К решению задачи многоцелевой оптимизации [Текст] / А. А. Перпери, В. М. Тонконогий, Д. А. Монова // Материалы XIX семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 17 – 18 марта 2011. – С. 5 – 6.

101. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 176 с.

102. Петросян, Л. А. Теория игр [Текст] / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. В. Шевкопляс. – СПб: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
103. Редукторы Ц2-250, Ц2-300, Ц2-350, Ц2-400, Ц2-400П. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.evroprivod.ru/catalogue/cylindrical/double-stage/reduktory-c2-400-c2-400p>. – 07.08.2015.
104. Метод скользящего окна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nashislova.ru/geo/page/metod\\_skolzyaschego\\_okna.8392/](http://www.nashislova.ru/geo/page/metod_skolzyaschego_okna.8392/). – 11.04.16.
105. Метод скользящего окна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://basegroup.ru/community/glossary/windowing>. – 16.11.14.
106. Мокін, Б. І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів / Б.І. Мокін, В.Б. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 99 с.
107. Кветный, Р. Н. Вероятностные нейронные сети в задачах идентификации временных рядов / Р.Н. Кветный, В.В. Кабачий, О.О. Чумаченко // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 3. – С. 1 – 6.
108. Батищев, Д. И. Оптимизация в САПР / Батищев Д.И., Львович Я.Е., Фролов В.Н. // Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1997. – 416 с.
109. Кочегурова, Е. А. Теория и методы оптимизации // Томск: ТПУ, 2012. – 157 с.
110. Управление по ограничениям [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.businessstuning.ru/op/219-upravlenie-po-ogranicheniyam.html>.
111. Технические правила организации автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка) // Стандарт ОАО “СО-ЦДУ ЕЭС”, 2005.
112. 80. Беркович, М. А. Автоматика энергосистем / М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
113. Александров, В. Ф. Частотная разгрузка в энергосистемах [Текст] /

В. Ф. Александров, В. Г. Езерский, О. Г. Захаров, В. С. Малышев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007.

114. Виды обеспечения САПР. Техническое обеспечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://www.studfiles.ru/preview/6262594/page:2/>>. – 16.12.2014.

115. prEN ISO 13790. Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating / Sweden, 2002. – P. 10 – 31.

116. Valancius K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation / K. Valancius, A. Skrinska. – Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – P. 179–185.

117. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, В.П. Касьяненко. – М.: КолосС, 2008. – 591 с.

118. Реальная структура твердого тела / М.: МГУ, 2006. – Режим доступа: <<http://www.fnm.msu.ru/documents/15real15.pdf>>. – 12.07.2014.

119. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. – Т. 1, 2.

120. Кострова Г.В. Обладнання нафтогазової та хімічної галузі / Г.В. Кострова, О.С. Савельєва, О.Л. Становський. – Одеса: ОНПУ, 2011. – 145 с.

121. Левин Г.Г. Оптическая томография / Г.Г. Левин, Г.Н. Вишняков. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.

122. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии / Ф. Наттерер. – М.: Мир, 1990. – 288 с.

123. Canny J.A Computational Approach to Edge Detection / J.A. Canny. – Transactions on pattern analysis and machine intelligence, IEEE. – V. PAMI-8, 1986. – №. 6. – P. 679–698.

124. Aizenberg I. Image Processing Using Cellular Neural Networks Based on Multi-Valued and Universal Binary Neurons / I. Aizenberg, C. Butakoff // Journal of

VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology. – 2002. – Vol. 32. – P. 169–188.

125. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

126. Номоев А.В. Фрактальная размерность границ зерен керамики с нанодисперсными добавками / А.В. Номоев, Л.С. Викулина // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, Вып. 12. – С. 139–142.

127. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

128. Измеров М.А. Методы определения фрактальной размерности инженерных поверхностей / М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 3(11). – С. 10–19.

129. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

130. Lauwerier H.A. Fractals (Mathematics, Programming and Applications) / H.A. Lauwerier, J.A. Kaandorp // Report CS-R8762 – Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam, The Netherlands, 1987. – P. 1–33.

131. Lin H. Fast pyramidal search for perceptually based fractal image compression / H. Lin, A.N. Venetsanopoulos – Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto University, Canada, 1996. – P. 1–4. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/icip.1996.559461>.

132. Fisher Y. Fractal image compression / Y. Fisher – SIGGRAPH'92 Course Notes: From Folk Art to Hyperreality, P. Prusinkiewicz, ed., 1992. – P. 1 – 21.

133. Востров Г.Н. Принцип сжимающих отображений и его применение для фрактального сжатия изображений / Г.Н. Востров, Т.А. Абу Айаш – Труды Одесского политехнического университета. – 2001. – Вып. 2 (14). – С. 96–99.

134. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах / Р.М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 198 с.

135. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1989. – 267 с.
136. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики [Текст] / В. С. Владимиров, В. В. Жаринов. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.
137. Шарма, Дж. Н. Уравнения в частных производных для инженеров [Текст] / Дж. Н. Шарма, К. Сингх. – М.: Техносфера, 2002. – 320 с.
138. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел [Текст] / А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
139. Численное решение параболических уравнений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elib.ispu.ru/library/lessons/mizonov/index.html>. – 21.04.2012.
140. Становський П.О. Розробка методу фрактального кодування-декодування відеопотоків / П.О. Становський, Є.В. Малахов, О.О. Арсірій // Труды ОНПУ. – 2007. – Вып. 2 (28). – С. 113–116.
141. Сойфер, В. А. Компьютерная обработка изображений. Ч. 2. Методы и алгоритмы, математика [Электронный ресурс]. – Самарский государственный аэрокосмический университет, 1996. – Режим доступа: <<http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/68.html>>. – 11.06.2010.
142. Синтез цвета // Фотокинетика: Энциклопедия / Под редакцией Е.А. Иофиса. – М.: Советская энциклопедия, 1981. – 342 с.
143. Свет и цвет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://www.myshared.ru/slide/179154/>>.
144. Что такое инфракрасное излучение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://www.uborgsauna.ru/theory/whatir.htm>>
145. Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. – М.: Наука, 1964. – 225 с.
146. Построение эпюр в статически неопределимых системах. Методы расчета. Режим доступа: <http://www.soprotmat.ru/sila.htm>. – 11.07.2014.

147. Савельева, О. С. Парето-оптимизация многоцелевых функций со слабосвязанными аргументами / О.С. Савельева, П.С. Швец, Ан.А. Становский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2014. – № 3. – С. 13 – 18.

148. Нестеренко, С. А. Метод діагностики стану структури складного об'єкта машинобудування / С.А. Нестеренко, Ан.О. Становський, А.В. Торопенко // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2013. – Вип. 8. – С. 116 – 123.

149. Становська, Т. П. Метод розкриття невизначеності у структурі складного об'єкта // Т.П. Становська, Ан.О. Становський, А.В. Торопенко, Г.В. Налєва // Холодильна техніка і технологія. – 2013. – № 2(142). – С. 109 – 111.

150. Нестеренко, С. А. САПР реинжиниринга механических систем в эксплуатации / С.А. Нестеренко, Д.А. Пурич, Ан.А. Становский, Д.А. Монова // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Харків: НУУ «ХПІ», 2015. – Вип. 1(25). – С. 109 – 115.

151. Нестеренко, С. А. Перетворення структури складної технічної системи із частково недоступними елементами до зорового образу / С. А. Нестеренко, Ан. О. Становський, А. В. Торопенко, П. С. Швець // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2015. – № 5/3 (77). – С. 30 – 35.

152. Гурин, Я. С. Проектирование серий электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

153. Коголь, И. М. Асинхронные машины. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://freejkinstrukcija.ru/4338.html>>. – 29.06.2015.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО  
 ДВИГАТЕЛЯ (ДО СКОЛЬЖЕНИЯ)

В созданной программе был реализован алгоритм расчета трехфазного асинхронного электродвигателя [152]. В качестве исходных данных были приняты параметры, указанные в таблице П.1.

Таблица П.1 – Исходные данные для расчета

Наименование параметра	Значение параметра
Полезная мощность на валу, кВт	4
Частота сети, Гц	
Число полюсов $2p$	4
Номинальное напряжение, В	220/380
Высота оси вращения $h$ , мм	100
Тип Ротора	Короткозамкнутый
Тип клетки ротора	Литая
Степень защиты	IP44
Способ охлаждения	IC0141
Класс нагревостойкости изоляции	B
Марка стали	
Толщина стали, мм	0,5

Результаты расчета произведенного программой в сравнении с результатами расчета из примера приведены в табл. П.2. Отклонения значений параметров не превышает 4 %, что является допустимым при проведении инженерных расчетов.



Таблица П.2 – Результаты предварительного расчета параметров электродвигателя

Индекс	Параметр	Значение, вычисленное в программе	Значение, приведенное в примере	Отклонение в процентах
1001	Коэффициент заполнения сталью сердечника статора	0,97	0,97	0,00%
1002	Коэффициент заполнения сталью сердечника ротора	0,97	0,97	0,00%
1101	Число пазов у статора	36	36	0,00%
1102	Число пазов у ротора	28	28	0,00%
1201	Припуски по ширине паза, мм	0,1	0,1	0,00%
1202	Припуски по высоте паза, мм	0,1	0,1	0,00%
1300	Коэффициент полезного действия	0,84	0,84	0,00%
1400	Коэффициент мощности $\cos(f)$	0,855	0,855	0,00%
1500	Подводимая мощность, В*А	5569,479492	5560	0,17%
1600	Наружный диаметр сердечника статора, мм	175	175	0,00%
1700	Мощность на 1мм длины сердечника, В*А/мм	48	47	2,08%

1800	Длина сердечника статора, мм	115	118	2,61%
2200	Внутренний диаметр сердечника статора, мм	112	112	0,00%
2201	Отношение D1/Dн1	0,643	0,64	0,47%
2300	Воздушный зазор между статором и ротором, мм	0,3	0,3	0,00%
2400	Наружный диаметр сердечника ротора, мм	111,339996	111,4	0,05%
2500	Отношение D2/Dн1	0,23	0,23	0,00%
2600	Внутренний диаметр листов ротора, мм	40	40	0,00%
2900	Тип обмотки статора	Однослойная всыпная концентрическая	Однослойная всыпная концентрическая	—
3100	Число пазов на полюс и фазу	3	3	0,00%
3200	Шаг обмотки по пазам	9	9	0,00%
3300	Укорочение шага	1	1	0,00%
3400	Коэффициент распределения	0,959795	0,96	0,02%
3600	Обмоточный коэффициент статора	0,959795	0,96	0,02%
3800	Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб	0,005735	0,00588	2,53%

3900	Коэффициент падения напряжения в обмотке статора	0,966	0,967	0,10%
4000	Предварительное число витков в обмотке фазы	174,000458	169,5	2,59%
4100	Предварительное число эффективных проводников в пазу	28,500076	28,3	0,70%
4300	Принятое число эффективных проводников в пазу	29	28	3,45%
4400	Уточненное число витков обмотки фазы	174	168	3,45%
4500	Эффективное число витков обмотки фазы статора	167,004333	161,1	3,54%
4600	Уточненная расчетная длина сердечника статора, мм	116,983055	121	3,43%
4700	Принятая длина сердечника статора, мм	116	120	3,45%
5200	Конструктивная длина сердечника статора, мм	116	120	3,45%
5600	Конструктивная длина сердечника ротора, мм	116	120	3,45%
5700	Уточненное значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб	0,005732	0,00593	3,45%

5800	Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Т	0,882415	0,883	0,07%
6200	Эффективная длина сердечника статора, мм	112,520004	116,4	3,45%
6300	Предварительное значение магнитной индукции в спинке статора, Т	1,575	1,55	1,59%
6400	Расчетная высота спинки статора, мм	16,17256	16,4	1,41%
6500	Высота паза статора, мм	15,32744	15,1	1,48%
6600	Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора, мм	9,773845	9,77	0,04%
6700	Предварительное значение магнитной индукции в расчетном сечении зубца, Т	1,79	1,75	2,23%
6800	Ширина зубца с равновеликим сечением, мм	4,965736	5,08	2,30%
6900	Большая ширина паза, мм	7,283251	7,3	0,23%
7000	Ширина шлица паза, мм	3,5	3,5	0,00%
7100	Высота шлица паза, мм	0,5	0,5	0,00%
7200	Меньшая ширина паза, мм	5,047908	4,9	2,93%

7400	Площадь поперечного сечения паза в свету, мм <sup>2</sup>	85,185471	82,8	2,80%
7500	Площадь поперечного сечения корпусной изоляции, мм <sup>2</sup>	10,89651	10,6	2,72%
7600	Односторонняя толщина корпусной изоляции, мм	0,25	0,25	0,00%
7700	Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой, мм <sup>2</sup>	70,288963	68,2	2,97%
7701	Площадь поперечного сечения прокладок между катушками в пазу, на дне паза и под клином, мм <sup>2</sup>	4	4	0,00%
7800	Максимально допустимый диаметр изолированного проводника, мм	1,376737	1,351	1,87%
8200	Площадь поперечного сечения голого провода, мм <sup>2</sup>	1,237	1,227	0,81%
10600	Среднее зубцовое деление статора, мм	11,111416	11,1	0,10%

10700	Средняя ширина катушки обмотки статора, мм	100,002747	99,9	0,10%
10800	Средняя длина лобовой части обмотки, мм	159	159	0,00%
10900	Средняя длина витка обмотки, мм	550	558	1,45%
11100	Форма пазов ротора	Овальный полузакрытый	Овальный полузакрытый	
11200	Зубцовое деление по наружному диаметру ротора, мм	12,492319	12,5	0,06%
11300	Высота шлица, мм	0,5	0,5	0,00%
11400	Ширина шлица, мм	1	1	0,00%
11600	Большой радиус, мм	2,4905	2,4	3,63%
11700	Высота паза ротора, мм	18	18	0,00%
11800	Расчетная высота спинки ротора, мм	23,137499	23,56	1,83%
11900	Эффективная длина пакета ротора, мм	112,520004	116,4	3,45%
12000	Магнитная индукция в спинке ротора, Т	1,050617	1,08	2,80%
12200	Меньший радиус, мм	1,01675	1	1,65%
12300	Расстояние между центрами радиусов, мм	14,129244	14,1	0,21%
12400	Площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup>	60,835938	58,56	3,74%

14000	Предварительное поперечное сечение кольца литой клетки, мм <sup>2</sup>	145,348053	143,5	1,27%
14100	Высота кольца, мм	23	23	0,00%
14200	Длина кольца, мм	6,333922	6,5	2,62%
14400	Средний диаметр кольца, мм	86,339996	88,4	2,39%
14500	Удельная проводимость меди обмотки статора при расчетной температуре, См/мкм	48,049179	47	2,18%
14600	Удельная проводимость алюминия обмотки ротора при рабочей температуре, См/мкм	22,131147	21,5	2,85%
14700	Активное сопротивление обмотки фазы r1, Ом	1,615076	1,6255	0,65%
14900	Коэффициент влияния укорочения шага на пазовое расстояние kb'	1	1	0,00%
15000	Коэффициент влияния укорочения шага на пазовое расстояние kb	1	1	0,00%
15100	Коэффициент проводимости рассеяния пазов Лп1	1,370446	1,32	3,68%

15300	Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора	0,874665	0,861	1,56%
15400	Коэффициент дифференциального рассеяния статора	0,0141	0,0141	0,00%
15500	Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора	2,19873	2,16	1,76%
15600	Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора	0,87524	0,873	0,26%
15700	Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора	4,377843	4,355	0,52%
15800	Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора x1, Ом	1,909349	1,942	1,71%
16000	Активное сопротивление стержня клетки, Ом	0,00009	0,00009	0,00%
16100	Коэффициент приведения тока кольца к току стержня	0,445042	0,449	0,89%



16200	Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, Ом	0,000029	0,00003	3,45%
16300	Центральный угол скоса, рад.	0,348799	0,349	0,06%
16400	Коэффициент скоса пазов ротора	0,991629	0,9965	0,49%
16500	Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора	11155,71777	11200	0,40%
16600	Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом	1,44426	1,4103	2,35%
16800	Коэффициент проводимости рассеяния пазов Лп2	1,797166	1,796	0,06%
17000	Коэффициент дифференциального рассеяния ротора	0,016667	0,0168	0,80%
17100	Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	2,540713	2,487	2,11%

17200	Коэффициент проводимости рассеяние короткозамыкающих колец литой клетки	0,246217	0,254	3,16%
17300	Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов	1,484439	1,51	1,72%
17400	Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора	6,068536	6,047	0,35%
17500	Индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом	0,000292	0,0002866	1,85%
17600	Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора $\times 2'$ , Ом	3,247115	3,21	1,14%
20200	Коэффициент воздушного зазора, учит. зубчатость статора	1,321646	1,335	1,01%
20300	Коэффициент воздушного зазора, учит. зубчатость ротора	1,031148	1,033	0,18%

20400	Коэффициент, учитывающий наличие радиальных вентиляционных каналов	1	1	0,00%
20500	Коэффициент воздушного зазора	1,362813	1,379	1,19%
20600	Магнитное напряжение воздушного зазора на один полюс, А	287,477722	292,9	1,89%
20701	Ширина зубца статора при большей ширине паза, мм	4,965736	5,11	2,91%
20702	Ширина зубца статора при меньшей ширине паза, мм	4,958164	5,08	2,46%
20703	Ширина зубца статора в расчетном сечении, мм	4,965736	5,095	2,60%
20801	Магнитная индукция в равновеликом сечении зубца статора, Т	1,765678	1,746	1,11%
20900	Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце статора, мм	15,32744	15,1	1,48%
21000	Магнитное напряжение зубцов статора, А	20,329891	19,8	2,61%

21101	Ширина зубца ротора в расчетном сечении $b_{32}'$ , мм	7,142888	7,05	1,30%
21102	Ширина зубца ротора в расчетном сечении $b_{32}''$ , мм	6,686572	6,67	0,25%
21103	Ширина зубца ротора в расчетном сечении $b_{32}$ , мм	6,91473	6,86	0,79%
21203	Магнитная индукция в третьем расчетном сечении $B_{32cp}$ , Т	1,621363	1,658	2,26%
21400	Расчетное значение напряженности магнитного поля в зубце ротора, А/см	10,09299	10,06	0,33%
21500	Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце ротора, мм	17,54665	17,8	1,44%
21600	Магнитное напряжение зубцов ротора, А	17,78556	17,9	0,64%
22600	Высота спинки статора, мм	16,32744	16,4	0,44%
22700	Магнитная индукция в спинке статора, Т	1,561842	1,555	0,44%

22800	Расчетная длина магнитной силовой линии спинки статора, мм	62,70327	62,2	0,80%
22900	Магнитное напряжение спинки статора, А	39,574612	39,9	0,82%
23000	Расчетная длина магнитной силовой линии спинки ротора, мм	24,401339	25	2,45%
23100	Магнитное напряжение спинки ротора, А	5,380723	5,3	1,50%
23200	Намагничивающая сила магнитной цепи на один полюс, А	381,341522	375,1	1,64%
23300	Коэффициент насыщения магнитной цепи	1,302749	1,284	1,44%
23400	Намагничивающий ток, А	3,466379	3,46	0,18%
23600	Главное индуктивное сопротивление хм, Ом	41,848373	41,1	1,79%
23800	Коэффициент рассеяния статора	0,031029	0,0316	1,84%
23900	Коэффициент сопротивления статора	0,025954	0,0256	1,36%
24001	Параметр 1 схемы замещения $r'1$ , Ом	1,615076	1,6255	0,65%

24002	Параметр 2 схемы замещения $x'1$ , Ом	2,054622	2,003	2,51%
24003	Параметр 3 схемы замещения $r''2$ , Ом	1,541423	1,5007	2,64%
24004	Параметр 4 схемы замещения $x''2$ , Ом	3,477548	3,416	1,77%
24100	Реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении, А	3,420856	3,47	1,44%
24200	Электрические потери в обмотк статора при синхронном вращении, Вт	60,172218	58,7	2,45%
24401	Магнитные потери в зубцах статора для стали марок 2013 и 2211, Вт	33,347008	33,7	1,06%
24500	Расчетная масса стали спинки статора, кг	7,482368	7,48	0,03%
24601	Магнитные потери в спинке статора для стали марок 2013 и 2211, Вт	77,302284	79,6	2,97%
24700	Суммарные магнитные потери в сердечнике статора при холостом ходе, Вт	127,922852	128,8	0,69%

24801	Механические потери для двигателей со степенью защиты IP44, Вт	21,102539	21,1	0,01%
25201	Приведенное активное сопротивление короткого замыкания, Ом	3,056499	3,1262	2,28%
25202	Приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом	5,602376	5,419	3,27%
25203	Приведенное полное сопротивление короткого замыкания, Ом	6,270979	6,256	0,24%
25300	Механическая мощность двигателя, Вт	4044,912109	4044,9	0,00%
25400	Добавочные потери при номинальной нагрузке, Вт	23,809523	23,8	0,04%
25500	Сопротивление схемы замещения $R_H$ , Ом	28,695274	28,262	1,51%
25600	Полное сопротивление схемы замещения $Z_H$ , Ом	32,187267	31,853	1,04%

25800	Активная составляющая тока статора при синхронном вращении, А	0,28378	0,28	1,33%
25900	Расчетный ток ротора, А	6,979486	6,91	1,00%
26000	Активная составляющая тока статора, А	6,955801	7,15	2,79%
26100	Реактивная составляющая тока статора, А	4,232493	4,3	1,59%
26200	Фазный ток статора, А	8,242174	8,34	1,19%
27300	Электрические потери в обмотке статора при нагрузке, Вт	334,163345	339,2	1,51%
27400	Электрические потери в обмотке ротора при нагрузке, Вт	211,649506	215	1,58%
27500	Суммарные потери в двигателе, Вт	723,647766	727,9	0,59%
27600	Подводимая мощность двигателя, Вт	4565,647949	4727,9	3,55%
27700	Коэффициент полезного действия двигателя, Вт	87,610786	84,6	3,44%



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПП «Спеціалізовано-енергетичне  
підприємство Енерго-КОМ»

Е.В. Куракова

«14» 06 2016р.

## АКТ

Ми, такі що підписалися нижче: від ПП «Спеціалізовано-енергетичне підприємство Енерго-КОМ» – головний інженер Єдалов А.М. та від ОНПУ – завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, кандидат технічних наук Бесараб О.М., доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, канд. техн. наук, доцент Швець П.С. та старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Бондаренко В.В. склали цей акт в тому, що з 1 лютого 2016 року до 28 травня 2016 року в ПП «СЕС Енерго-КОМ» було проведено випробування розробленої в ОНПУ аспірантом Бондаренко В.В. САПР електротехнічного обладнання «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), яка базується на запропонованих моделях і методі оптимізації параметрів складних систем по глобальній зв'язності параметрів їхніх підсистем та забезпечує підтримку прийняття проектних рішень для елементів останніх.

В якості об'єкта автоматизованого проектування використовували систему «Дизельний генератор – асинхронний двигун змінного струму». В результаті випробувань встановлено, що використання згаданої вище САПР електротехнічного обладнання «OPTIGLOC» дозволило зменшити питому витрату палива в генераторі на 5,3 %, зберігши при цьому незмінним строк служби системи та стабільність виконання нею технічних завдань, і знизити строки проектування, у середньому, на 13,7 %.

Від ПП СЕС «Енерго-КОМ»:



А.М. Єдалов


Від ОНПУ:



О.М. Бесараб



П.С. Швець



В.В. Бондаренко