

УДК 658.8:004.9

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ГЕНЕРАТИВНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ



**В.Ф. Алексеев**  
Доцент кафедры  
проектирования  
информационно-  
компьютерных систем  
БГУИР, кандидат  
технических наук, доцент  
alexvikt.minsk@gmail.com



**Д.В. Лихачевский**  
Декан факультета  
компьютерного  
проектирования БГУИР,  
кандидат технических  
наук, доцент  
likhachevskyd@bsuir.by



**Г.А. Пискун**  
Доцент кафедры  
проектирования  
информационно-  
компьютерных систем  
БГУИР, кандидат  
технических наук, доцент  
piskunbsuir@gmail.com

### **В.Ф. Алексеев**

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

### **Д.В. Лихачевский**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием проблем радиочастотной идентификации объектов, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

### **Г.А. Пискун**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

**Аннотация.** Рассматриваются ключевые аспекты определения целевых функций и их ограничений в контексте задач оптимизации, связанных с генеративным проектированием. В рамках статьи анализируются методы формулирования целевых функций, их влияние на результаты проектирования, а также способы определения ограничений, которые учитывают различные технические, экономические и экологические факторы. Особое внимание уделяется примерам из практики, иллюстрирующим влияние корректного определения целевых функций и ограничений на эффективность проектирования.

Статья будет представлять интерес для специалистов в области инженерии, дизайна и оптимизации, а также на исследователей, интересующихся современными методами проектирования.

**Ключевые слова:** генеративное проектирование, целевая функция, ограничения, оптимизация проектных решений

**Введение.** Одним из наиболее перспективных путей в области разработки электронных систем является генеративное проектирование, которое позволяет использовать алгоритмические подходы для автоматизации процесса создания проектных решений. Основная идея генеративного проектирования заключается в использовании алгоритмов, которые способны генерировать множество вариантов проектирования на основе заданных параметров и ограничений. Этот процесс позволяет значительно ускорить разработку проектов, обеспечить высокую степень инновации. Особое внимание следует уделить определению целевых функций и их ограничений, так как они играют ключевую

роль в процессе проектирования. Само решение целевой функции ориентировано на принятие решений с учётом ограничений [1].

В общем случае целевая функция зависит от целого ряда аргументов, которые в той или иной степени влияют на процессе оптимизации. Целевые функции, как правило, представляют собой количественные показатели, которые необходимо максимизировать или минимизировать. Это могут быть такие параметры, как масса конструкции, прочность, устойчивость к нагрузкам и др. Принимая во внимание множество факторов, влияющих на конечный продукт, необходимо обеспечить баланс между техническими, технологическими, производственными требованиями и экономическими показателями [2].

Ограничения в задачах оптимизации выполняют важную роль, так как они определяют допустимые пределы для проектируемых решений. Они могут быть связаны с физическими характеристиками материалов, геометрическими ограничениями, соблюдением нормативных требований и другими параметрами. Правильная формулировка и учёт этих ограничений помогают избежать нецелесообразных конструктивных решений и гарантируют выполнение критических требований к проекту [3].

Актуальность исследований подчеркивается работами [4–7], которые поднимают вопросы о том, как генеративные методы могут быть интегрированы в существующие системы управления проектами. В свою очередь, зарубежные работы, например, исследования [4], показывают значимость применения машинного обучения и искусственного интеллекта в контексте генеративной политики, что открывает новые горизонты для оптимизации и инноваций.

Цель настоящей статьи – рассмотреть существующие методы и подходы по определению целевых функций и ограничений в задачах оптимизации.

**Определение целевых функций и ограничений в задачах оптимизации.** Целевая функция в задаче оптимизации представляет собой математическое выражение, которое необходимо максимизировать или минимизировать. Например, в области генеративного проектирования целевой функцией может быть масса конструкции, которую следует минимизировать, или прочность материала, которую необходимо максимизировать. Определение целевой функции является ключевым моментом, так как именно от нее зависит, насколько эффективно будет найдено оптимальное решение [1–3].

Рассмотрим задачу на примере проектирования печатной платы. В задачах оптимизации, используемых в генеративном проектировании электронных средств, ключевым этапом является четкое определение целевых функций и ограничений. Целевая функция (objective function) представляет собой математическое выражение, которое необходимо минимизировать или максимизировать для достижения оптимального решения. Ограничения (constraints) – это условия, которые должны быть соблюдены в процессе оптимизации и определяют допустимую область решений.

Выбор целевых функций и ограничений напрямую влияет на конечный результат генеративного проектирования. Некорректно сформулированные целевые функции могут привести к получению непрактичных или неэффективных решений, а игнорирование важных ограничений – к созданию нереализуемых проектов.

Целевые функции в генеративном проектировании электронных средств могут включать:

– минимизацию занимаемой площади печатной платы (PCB) – стремление к уменьшению габаритов устройства, что особенно важно для портативных и мобильных устройств. Математически это может быть выражено как:

$$\min f(x) = \text{Area}(\text{PCB}(x))$$

где  $\text{Area}(\text{PCB}(x))$  – функция, вычисляющая площадь печатной платы в зависимости от параметров проектирования  $x$  (например, расположение компонентов, трассировка проводников).

Пример: при размещении компонентов на печатной плате целевая функция может заключаться в минимизации площади платы при заданных ограничениях на расстояние между компонентами и требованиях к трассировке.

– минимизация длины проводников (trace length) – уменьшение длины проводников снижает паразитные эффекты (индуктивность, емкость) и улучшает целостность сигнала. Целевая функция может быть определена как:

$$\min f(x) = \sum \text{Length}(\text{trace}_i(x)) \quad \text{for } i = 1 \text{ to } N$$

где  $\text{Length}(\text{trace}_i(x))$  – функция, вычисляющая длину  $i$ -го проводника в зависимости от параметров трассировки  $x$ ,  $N$  – общее количество проводников.

Пример: оптимизация трассировки печатной платы с целью минимизации общей длины проводников, особенно для высокоскоростных сигналов.

– максимизация рассеиваемой мощности (heat dissipation) – обеспечение эффективного отвода тепла от компонентов, особенно для мощных устройств. Целевая функция в этом случае выглядит как:

$$\max f(x) = \text{HeatDissipation}(x)$$

где  $\text{HeatDissipation}(x)$  – функция, вычисляющая рассеиваемую мощность в зависимости от параметров конструкции  $x$  (например, расположение радиаторов, вентиляционных отверстий).

Пример: оптимизация расположения компонентов и радиаторов для обеспечения максимального отвода тепла от микропроцессора.

Минимизация стоимости (cost) – снижение затрат на материалы, производство и сборку устройства. В этом случае целевая функция выглядит так:

$$\min f(x) = \sum \text{Cost}(\text{component}_i(x)) \quad \text{for } i = 1 \text{ to } M$$

где  $\text{Cost}(\text{component}_i(x))$  – функция, вычисляющая стоимость  $i$ -го компонента в зависимости от выбора компонентов  $x$ ,  $M$  – общее количество компонентов.

Пример: выбор оптимальных компонентов и технологий производства для минимизации общей стоимости печатной платы.

Ограничения в генеративном проектировании электронных средств могут быть представлены в виде:

– геометрические ограничения – ограничения на размеры компонентов, расстояние между ними, минимальную ширину проводников, зазоры.

Пример: минимальное расстояние между двумя BGA компонентами должно быть не менее 2 мм.

$$\text{Distance}(\text{Component\_A}, \text{Component\_B}) \geq \text{MinDistance}$$

– электрические ограничения – ограничения на импеданс проводников, максимальный ток, допустимое падение напряжения, электромагнитную совместимость (ЕМС).

Пример: импеданс проводника должен быть в пределах  $50 \pm 10$  Ом.

$$Z_{\text{trace}}(x) \in [Z_{\text{min}}, Z_{\text{max}}]$$

– тепловые ограничения – ограничения на максимальную температуру компонентов, градиент температуры.

Пример: температура микропроцессора не должна превышать 85 °C.

$Temperature(\text{Microprocessor}) \leq \text{MaxTemperature}$

– производственные ограничения – ограничения, связанные с технологическими возможностями производства (например, минимальная ширина дорожек, максимальное количество слоев печатной платы).

Пример: минимальная ширина проводника на печатной плате должна быть не менее 0,1 мм.

$Width(\text{trace}_i) \geq \text{MinWidth}$

– ограничения по надежности – ограничения, направленные на обеспечение требуемого уровня надежности и долговечности устройства.

Пример: обеспечение заданного среднего времени наработки на отказ (MTBF).

$MTBF(\text{system}) \geq \text{Required\_MTBF}$

Формулирование целевых функций и ограничений является итеративным процессом, требующим тесного взаимодействия между разработчиками и экспертами в предметной области. Важно учитывать все существенные факторы, влияющие на производительность, надежность и стоимость электронного устройства.

Пример: рассмотрим задачу оптимизации размещения компонентов на печатной плате для питания беспроводного зарядного устройства.

Целевая функция: Минимизация площади печатной платы.

Ограничения: минимальное расстояние между индукционной катушкой и другими компонентами: 5 мм; максимальная температура компонентов: 70 °C; соответствие требованиям электромагнитной совместимости (ЕМС); ограничения на габариты печатной платы (например, она должна помещаться в заданный корпус); соответствие требованиям по импедансу проводников питания.

В этом случае, алгоритм оптимизации будет искать оптимальное размещение компонентов, удовлетворяющее всем заданным ограничениям и минимизирующее площадь печатной платы. Результатом будет компактная и эффективная схема питания беспроводного зарядного устройства, удовлетворяющая требованиям по надежности и электромагнитной совместимости.

**Примеры оптимизации электронных средств.** Авторы имеют большой практический опыт проектирования электронных средств с учетом критериев оптимизации.

Статья [4] рассматривает ключевые аспекты прототипирования и концептуального проектирования средств медицинской электроники, акцентируя внимание на важности интерактивного взаимодействия врача и медицинского оборудования. Рассматриваются факторы, способствующие эффективной коммуникации между врачом и медицинским оборудованием, такие как интуитивный интерфейс и адаптация технологий к требованиям клинических задач. Описываются методы прототипирования интерфейсов, позволяющие учитывать потребности пользователей на ранних стадиях разработки. Рассматриваются инструменты и технологии, которые помогают создать прототипы, способствующие тестированию концепций и сбору обратной связи от врачей, что, в свою очередь, повышает качество и удобство использования медицинских устройств. Обсуждается процесс концептуального проектирования, который включает в себя этапы исследования

потребностей, генерации идей и создания дизайн-концепций. Подчеркивается значимость прототипирования и концептуального проектирования в развитии медицинских технологий, направленных на улучшение качества медицинских услуг и опыт взаимодействия врачей с оборудованием.

В работе [5] приводится описание общих принципов проектирования технических систем. Рассмотрены основные этапы и методология моделирования и проектирования технических систем. Приведены практические примеры моделирования технических систем. Предназначено для студентов второй ступени высшего образования технических университетов, может быть использовано аспирантами и инженерами, занимающимися вопросами моделирования и оптимального проектирования технических систем.

В статье [6] рассмотрены ключевые аспекты тепловых процессов, происходящих в радиоэлектронных устройствах, и предложены алгоритмы, позволяющие эффективно анализировать и прогнозировать температурные режимы в таких конструкциях. Авторы подчеркивают важность термического анализа для обеспечения надежности и долговечности элементов радиоэлектронной аппаратуры, а также необходимость учета различных факторов, влияющих на тепловые характеристики. В результате проведенных исследований предложены алгоритмы, позволяющие оптимизировать тепловые процессы, повышая эффективность радиоэлектронных устройств.

Статья [7] показывает, что современные технические (вычислительные, электронные) средства в большинстве случаев строятся на базе радиоэлектронных компонентов, например процессоры, графические чипы и т. д., которые при работе выделяют десятки ватт тепловой энергии. В связи с этим одной из приоритетных задач проектирования таких устройств становится эффективное отведение посредством введения пассивных или активных систем охлаждения избыточной тепловой энергии как от полупроводниковых приборов, так и от электронных средств в целом. Цель работы. Исследование влияния конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств (ГК ТС), особенностью которых является использование внутри корпусов только пассивных систем охлаждения, а также сравнительный анализ эффективности отведения тепла от процессора для каждой рассматриваемой конструкции корпуса. Материалы и методы. Эксперименты проводились на разработанных в программной среде SolidWorks Flow Simulation трехмерных параметрических моделях различных типов ГК ТС, особенностью которых являлась различная конфигурация тепловых каналов, сформированных внешним оребрением крышки корпуса. Результаты. Реализация моделей позволила исследовать процесс охлаждения процессора, установленного в современных ГК ТС, а также проанализировать влияние конфигурации и формы ребер на отведение избыточной тепловой энергии от процессора в режиме пассивного охлаждения и при обдуве ГК ТС воздухом, движущимся сверху (перпендикулярно крышке) или сбоку (параллельно крышке) при постепенном увеличении мощности процессора с 10 до 25 Вт. Показано, что оребренный корпус при пассивном охлаждении обеспечивает отвод тепла от процессора мощностью 10 Вт больше, чем неоребранный (понижение температуры составляет 4.1 °C); при 25 Вт – на 11.01 °C. Установлено, что направление (перпендикулярное или параллельное) движения воздуха при обдуве ГК ТС значительно влияет на эффективность охлаждения нагретой поверхности корпуса (при мощности процессора 45 Вт разность составляет более 10 °C). Заключение. Разработанные трехмерные модели позволили наиболее эффективно реализовать систему охлаждения теплонагруженных высокомоощных радиоэлектронных компонентов, расположенных в герметичных корпусах, за счет реализации внешнего оребрения корпусов.

В материалах [8] Представлены результаты исследования по отведению тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров с воздушным охлаждением (КВО). Проведены четыре эксперимента, в которых при помощи трехмерного твердотельного параметрического моделирования выявлены наиболее эффективные варианты исполнения

КВО. В первом эксперименте был разработан башенный радиатор с несущей конструкцией в виде медных прутков и установленным вертикально вентилятором. Это дало возможность определить эффективность передачи тепловой энергии по радиатору. В следующем эксперименте в разработанной ранее модели заменили медные прутки на тепловые трубки и убрали вентилятор, что позволило обосновать необходимость наличия или отсутствия обдува при постепенном увеличении мощности процессора во время его эксплуатации. В третьем случае изменяли скорость вращения вентилятора, благодаря чему установили предельную скорость воздушного потока для эффективного охлаждения радиатора. В последнем эксперименте определили оптимальную конструкцию КВО, позволившую эффективно реализовать рассеивание тепловой энергии от процессора при различной его мощности. Экспериментально доказана необходимость использования КВО в таких современных технических средствах, как персональные компьютеры, сервера, вычислительные комплексы и т. д., в которых нет ограничений по обеспечению массогабаритных параметров.

В [9] представлены результаты изучения влияния длины и количества тепловых трубок, входящих в состав радиаторной конструкции, на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от современных процессоров. Проведены исследования для радиаторных конструкций, состоящих из теплосъемной пластины, тепловой трубки и теплообменника (ребристого радиатора), установленных на процессор и находящихся в открытой среде (движение воздуха происходит без перемешивания, что характерно для свободной конвекции) или в замкнутой среде (происходит циркуляция потоков воздуха в замкнутом контуре, что свойственно для естественной конвекции в ограниченном пространстве). Численное моделирование осуществлялось посредством модуля Flow Simulation программного комплекса SolidWorks. Показано, что от естественного движения потоков воздуха в открытой или замкнутой среде значительно зависит значение разности температур, сформированных на концах тепловых трубок (ТТ). Установлено, что с увеличением длины ТТ от 100 мм до 500 мм происходит увеличение разности температур как в случае движения потоков воздуха в открытой среде, так и в замкнутой. В частности, увеличение разности температур на концах одной ТТ диаметром 6 мм при мощности процессора 50 Вт составило 29,54 °C (открытая среда) и 47,14 °C (замкнутая среда); для трех ТТ – 9,13 °C (открытая среда) и 16,28 °C (замкнутая среда); для пяти ТТ – 5,24 °C (открытая среда) и 10,11 °C (замкнутая среда). Установлено, что увеличение количества ТТ диаметром 6 мм и длиной 500 мм от 1 до 5 шт. приводит к снижению разности температур, в частности, при мощности процессора 50 Вт разность температур составила 36,17 °C (одна ТТ в открытой среде) и 55,59 °C (одна ТТ в замкнутой среде); 11,04 °C (три ТТ в открытой среде) и 19,06 °C (три ТТ в замкнутой среде); а также 6,3 °C (пять ТТ в открытой среде) и 11,56 °C (пять ТТ в замкнутой среде). Полученные результаты могут быть использованы для модернизации систем охлаждения различных технических средств, построенных на базе процессоров, а также проектировании новой высокопроизводительной аппаратуры с учетом использования тепловых трубок.

**Заключение.** В современных условиях, когда требования к проектированию становятся все более сложными и многообразными, задача оптимизации в генеративном проектировании приобретает особую актуальность. Определение целевых функций и их ограничений является ключевым этапом в этом процессе, так как от правильного выбора этих параметров зависит эффективность и успешность проектных решений.

В ходе исследования проанализированы различные подходы к формулированию целевых функций. Основное внимание было уделено тому, как правильно установить ограничения, которые могут быть связаны как с физическими свойствами материалов, так и с технологическими процессами.

Рассмотрены примеры применения методов оптимизации в генеративном проектировании. Гибкость и адаптивность в подходах к оптимизации открывают новые

возможности для инновационных решений, способствуя созданию более эффективных и устойчивых продуктов.

Дальнейшие исследования в области определения целевых функций и их ограничений будут способствовать развитию генеративного проектирования и повышению конкурентоспособности предприятий в различных отраслях. Интеграция передовых методов оптимизации и современных технологий, таких как машинное обучение и искусственный интеллект, может значительно расширить возможности проектирования, открывая новые пути для реализации креативных и инженерных идей.

### **Список литературы**

- [1] Розенберг, Р. К. Введение в динамику физических систем / Р. К. Розенберг, Д. К. Карнопп. – New York : McGraw-Hill, 1983. – 420 с.
- [2] Аропа, Я. С. Введение в оптимальное проектирование / Я. С. Аропа. – 4-е изд. – Oxford : Butterworth-heinemann, 2016. – 928 с.
- [3] Деб, К. Многокритериальная оптимизация с использованием эволюционных алгоритмов / К. Деб. – Chichester : John Wiley & Sons, 2001. – 508 с.
- [4] Алексеев, В. Ф. Прототипирование и концептуальное проектирование средств медицинской электроники = Prototyping and conceptual design of medical electronics / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // Медэлектроника –2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции, Минск, 5–6 декабря 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.]. – Минск, 2024. – С. 202–206.
- [5] Моделирование и оптимальное проектирование технических систем : учебно-методическое пособие / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун, В. В. Шаталова. – Минск : БГУИР, 2024. – 99 с.
- [6] Алексеев, В. Ф. Алгоритмы иерархического анализа тепловых процессов радиоэлектронных средств / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский // Цифровая среда: технологии и перспективы : сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Брест, 31 октября–1 ноября 2024 г. / Брестский государственный технический университет ; редкол.: Н. Н. Шалобыта (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2024. – С. 221–226.
- [7] Пискун, Г. А. Влияние конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств на эффективность отведения тепла от процессора = Effect of the Configuration and Shape of External Ribs of Sealed Enclosures of Electronic Devices on Heat Removal Efficiency / Г. А. Пискун [и др.] // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 5. – С. 63–75.
- [8] Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения=Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 54–62.
- [9] Оценка влияния длины и количества тепловых трубок на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора = Assessment of the influence of the length and number of heat pipes on the efficiency of the removal of excess thermal energy from the processor / Г. А. Пискун [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 139–150.

### **Авторский вклад**

**Алексеев Виктор Федорович** – постановка задачи исследования, определение целевых функций и ограничений в задачах оптимизации, заключение.

**Лихачевский Дмитрий Викторович** – постановка задачи исследования, примеры оптимизации электронных средств.

**Пискун Геннадий Адамович** – введение, определение ограничений в задачах оптимизации, примеры оптимизации электронных средств.

## **DETERMINATION OF OBJECTIVE FUNCTIONS AND THEIR CONSTRAINTS IN OPTIMIZATION PROBLEMS IN GENERATIVE DESIGN**

**V.F. Alekseev**

*Associate Professor, Department  
of Information Computer  
Systems Design, PhD of  
Technical sciences, Associate  
Professor*

**D.V. Likhachevsky**

*Dean of the Faculty of Computer  
Design of BSUIR,  
PhD of Technical Sciences,  
Associate Professor*

**G.A. Piskun**

*Associate Professor of the  
Department of Design of  
Information and Computer  
Systems of BSUIR, PhD of  
Technical Sciences, Associate  
Professor*

**Abstract.** The article considers key aspects of defining objective functions and their constraints in the context of optimization problems related to generative design. The article analyzes methods for formulating objective functions, their impact on design results, and methods for defining constraints that take into account various technical, economic, and environmental factors. Particular attention is paid to practical examples illustrating the impact of correctly defining objective functions and constraints on design efficiency.

The article will be of interest to specialists in the field of engineering, design, and optimization, as well as to researchers interested in modern design methods.

**Keywords:** generative design, objective function, constraints, optimization of design solutions.