

Разрешение противоречия «площадь ↔ габариты» в теплоотводе электронного модуля

Демонстрационный отчёт для курсовых и дипломных работ по электронике: ТРИЗ-анализ инженерной задачи, тепловые расчёты, технико-экономическое сравнение и план работы над проектом.

Тип задачи	Методология	Дата анализа	Формат
Инженерная / электроника (учебный кейс)	ТРИЗ: 9 фаз, 4 стратегии	28 сентября 2026	Демо-кейс для сайта

1. Резюме

Тема курсовой или дипломной работы: «Разработка системы теплоотвода силового модуля импульсного преобразователя». При естественной конвекции воздух забирает тепло слабо, поэтому потери в 30 Вт можно отвести только большой поверхностью, а большая поверхность у классического радиатора означает большой объём. Габарит же жёстко задан: 110 × 70 × 30 мм, вентилятор запрещён требованием надёжности. Это классическое ТРИЗ-противоречие: площадь теплоотдачи должна быть большой и малой одновременно.

Агент Trizly прошёл полный девятифазный цикл анализа для инженерной задачи: сформулировал технические и физическое противоречия, определил идеальный конечный результат (ИКР), провёл ресурсный аудит, сгенерировал решения по четырём стратегиям (принципы и матрица, су-поле и стандарты, физические эффекты, принципы разделения), объединил их, проверил «скептиком» и ранжировал. Дополнительно в отчёт включены образец тепловых расчётов, технико-экономическое сравнение вариантов и таблица «что из анализа идёт в какой раздел работы».

Итог: лучший по составному критерию вариант — «панель шкафа как радиатор» (0.75). В расчётном примере оптимизированный радиатор в допустимом габарите вместе с тепловым мостом на панель даёт $R_{s-a} \approx 1,09$ К/Вт при допустимых 1,13 К/Вт ($T_j \approx 109$ °С, запас мал), а снижение потерь с 30 до 22 Вт добавляет запас ($T_j \approx 95$ °С). Одно лишь увеличение радиатора не работает: для 30 Вт потребовалась бы высота около 58 мм вместо 30.

2. Описание задачи (кейс)

Контекст. Разрабатывается силовой модуль DC-DC преобразователя 48 В → 24 В мощностью 600 Вт (КПД ≈95%), который устанавливается в шкаф автоматики. Тепловыделение сосредоточено в силовом каскаде на пятне около 50 × 30 мм. Кейс учебный: числа приближены к типичным и служат для иллюстрации методики.

Исходные данные (в формате задания на курсовую)

Мощность потерь на радиаторе	$P = 30$ Вт (длительный режим)
Температура воздуха в шкафу	$T_a = 55$ °С (максимальная)
Допустимая температура кристалла	$T_j \leq 110$ °С по проекту (предельная по справочнику 150 °С, запас на надёжность)
Тепловые сопротивления	$R_{j-c} = 0,5$ К/Вт (эквивалентное для группы приборов, принято); $R_{c-s} = 0,2$ К/Вт (тепловая паста или прокладка)
Охлаждение	Естественная конвекция, вентилятор не допускается
Габарит модуля с радиатором	не более 110 × 70 × 30 мм (231 см³)
Ограничение по стоимости	надбавка к себестоимости не более 300 ₽ на изделие; программа 2 000 изделий в год

Штатный радиатор: алюминиевый профиль 100 × 60 × 25 мм, 12 рёбер толщиной 1,5 мм, высота рёбер 20 мм, зазор ≈3,8 мм, без анодирования

Площадь оребрения: ≈540 см² **Расчётное сопротивление радиатора:** $R_{s-a} \approx 2,6$ К/Вт

Температура кристалла при 30 Вт: ≈155 °С (предел 110 °С)

Допустимые потери без перегрева: ≈16 Вт (≈55% от требуемых)

Симптом. Опытный образец перегревается: тепловая защита срабатывает, и мощность приходится ограничивать примерно вдвое. Простое решение — взять радиатор больше — упирается в габарит: по оценке нужна площадь около 1 260 см² (в 2,3 раза больше), то есть при той же плотности оребрения высота около 58 мм. Плотнее оребрить нельзя: зазор 3,8 мм уже мал для естественной конвекции.

Цель проекта. Обеспечить $T_j \leq 110$ °С при 30 Вт и $T_a = 55$ °С без вентилятора, в габарите 110 × 70 × 30 мм, с надбавкой к себестоимости не более 300 ₽ на изделие.

Кейс сконструирован как репрезентативный пример класса задач «пассивный теплоотвод в ограниченном объёме» (блоки питания, светодиодные драйверы, инверторы, промышленные модули) — данные иллюстративные; студент подставляет данные своего задания и проверяет расчёты по своим нормативам и справочникам.

3. Классификация типа задачи ФАЗА 0 — INTAKE+

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАДАЧА — электроника, тепловой режим, конструирование радиаторов.

Границы системы: силовые приборы — тепловой интерфейс — радиатор — воздух в шкафу и монтажная панель

Главная полезная функция: отводить 30 Вт от кристаллов при заданной температуре, не увеличивая габарит

Условия эксплуатации: круглосуточная работа, воздух до 55 °С, запылённость, вертикальный монтаж на панели

Ограничения: габарит 110 × 70 × 30 мм; без вентилятора; надбавка ≤300 ₽ на изделие

4. Техническое противоречие ФАЗА 1

ТП-1 (основное): Увеличение площади теплоотдающей поверхности (парам. 6 — площадь неподвижного объекта) → рост габаритов радиатора (парам. 8 — объём неподвижного объекта).

ТП-2 (вторичное — цена любого «умного» решения): Улучшение производительности теплоотвода (парам. 39 — производительность) → усложнение устройства (парам. 36).

Матрица (39 × 36) в справочнике агента рекомендует принципы:

№10 Предварительное действие

№28 Замена механической схемы

№13 Наоборот

№35 Изменение параметров

Для основной пары 6 × 8 ячейки в компактном справочнике агента нет, поэтому принципы для неё определяются стратегиями В-С и принципами разделения. Принципы из матрицы фиксируются в Фазе 1 и применяются в Фазе 4.

Цепочка «почему» (углубление до корня)

- Почему рост площади увеличивает габариты?** При естественной конвекции коэффициент теплоотдачи мал (порядка 5–10 Вт/(м²·К)), и недостаток компенсируется только площадью; у классического оребрения площадь растёт вместе с объёмом — рёбра вытягиваются в высоту и ширину.
- Почему нельзя просто уплотнить рёбра?** При малом зазоре пограничные слои соседних рёбер смыкаются, воздух хуже проходит между рёбрами, эффективный коэффициент теплоотдачи падает; узкие каналы забиваются пылью. Площадь «в объёме» ограничена аэродинамикой.
- Почему габарит жёстко ограничен?** Радиатор рассматривается как отдельная деталь, пристроенная к источнику внутри фиксированного объёма; тепло снимается с малого пятна только этим радиатором, а огромная поверхность окружения (панель шкафа, корпус) в теплоотводе не участвует.

Физическое противоречие (Уровень 3)

Теплоотдающая поверхность должна быть **большой** (чтобы отвести 30 Вт при малом коэффициенте теплоотдачи) — функция 1,
и одновременно должна быть **малой** (чтобы уместиться в габарит 110 × 70 × 30 мм) — функция 2.

Зона конфликта: по месту — объём над силовым каскадом внутри модуля; по времени — установившийся режим при максимальной нагрузке и температуре воздуха 55 °С; по условию — естественная конвекция без вентилятора, вертикальный монтаж.

5. Идеальный конечный результат (ИКР) ФАЗА 2

ИКР-1 (функциональный): Тепло само уходит в окружающую среду с нужной интенсивностью без увеличения габаритов радиатора: площадь «появляется» без объёма.

ИКР-2 (ресурсный): Используя только существующие ресурсы (монтажную панель шкафа, металлические детали конструкции, воздух, температурный перепад, излучение), тепловой поток распределяется по всей доступной поверхности и отдаётся окружающему воздуху.

ИКР-3 (предельный — устранение элемента): Отдельного радиатора нет вообще, но тепло отводится: либо роль радиатора выполняет панель, либо тепловыделение снижено до уровня, не требующего радиатора.

6. Ресурсный анализ ФАЗА 3

Тип ресурса	Что доступно	Статус
Вещество	Стальная монтажная панель шкафа; металлическое основание модуля; медные полигоны платы; тепловые интерфейсы (паста, прокладка); материал радиатора (алюминий, медь)	Панель и полигоны не участвуют в теплоотводе
Поле	Тепловой поток и температурный перепад ≈ 55 К; естественная конвекция; тепловое излучение; теплопроводность металлов	Излучение почти не используется (нет анодирования)
Пространство	Поверхность панели шкафа вокруг модуля; боковые и нижняя поверхности модуля; вертикальные каналы между рёбрами	Панель — большая свободная поверхность
Время	Паузы и пики нагрузки; тепловая инерция радиатора	Режим длительный, инерция мала
Информация	Данные о потерях по режимам; температура радиатора; результаты моделирования	Потери не связаны с оптимизацией схемы
Функция/свойство	Силовая схема допускает снижение потерь (синхронное выпрямление, транзисторы с меньшим сопротивлением канала)	Не использовано

7. Генерация решений — 4 параллельные стратегии ФАЗА 4

Ниже — необработанные решения по каждой стратегии до объединения (Фаза 5) и проверки (Фаза 6).

А. Принципы + матрица противоречий

- **№10 Предварительное действие** (по матрице) — заранее «растечь» тепло: тепловая труба или медная пластина под источником распределяет тепло по всей площади оребрения до перегрева пятна.
- **№28 Замена механической схемы** (по матрице) — заменить схему теплоотдачи: естественную конвекцию — принудительной (малый вентилятор), твёрдотельную теплопроводность — двухфазным переносом (тепловая труба).
- **№13 Наоборот** (по матрице) — вместо увеличения теплоотвода уменьшить тепловыделение (синхронное выпрямление, транзисторы с меньшими потерями); вместо «радиатор внутри модуля» — «панель шкафа как радиатор».
- **№35 Изменение параметров** (по матрице) — изменить параметры теплообмена: зазор между рёбрами, излучательную способность поверхности (чёрное анодирование), материал основания (медь вместо алюминия).
- **№6 Универсальность** (дополнительно) — панель шкафа выполняет функции несущей конструкции и радиатора.
- **№3 Местное качество** (дополнительно) — разная высота и шаг рёбер по зонам радиатора.
- **№17 Переход в другое измерение** (дополнительно) — вертикальная ориентация рёбер: вытяжной эффект в каналах усиливает поток.

В. Су-поле + 76 стандартов

Модель: S1 (радиатор) — F (тепловое поле) → S2 (окружающий воздух). Поле «слабое»: при естественной конвекции малый коэффициент теплоотдачи, поэтому для отвода нужной мощности требуется большая площадь.

- **Стандарты 5.2.1 и 5.2.2** — использовать поля и ресурсы, уже присутствующие в системе: большая поверхность панели шкафа и её конвекция; тепловой мост от модуля к панели.
- **Стандарт 5.3.1 (и 3.1.5)** — заменить теплопроводность твёрдого тела фазовым переходом и капиллярной структурой: тепловая труба или паровая камера в основании радиатора.
- **Стандарт 1.2.5** — заменить плохо управляемое поле (естественная конвекция) легко управляемым (принудительный обдув).
- **Стандарты 1.2.6 и 3.1.4** — увеличить степень дробления поверхности: рёбра → штырьки, пористые металлы; ограничение — пыль и слипание пограничных слоёв.
- **Стандарт 2.1.2** — сделать объект менее чувствительным к вредному эффекту: приборы с меньшими потерями и лучшим тепловым сопротивлением «кристалл-корпус».

С. Физические эффекты

- **Фазовый переход и скрытая теплота** — в тепловой трубе тепло переносится испарением и конденсацией с малым перепадом температур; выигрыш есть, когда узкое место — растекание тепла с малого пятна.
- **Тепловое излучение** — чёрное анодирование повышает излучательную способность (ориентировочно с $\approx 0,1$ у чистого алюминия до $\approx 0,8-0,9$); вклад растёт с температурой, но ограничен затенением между рёбрами.
- **Естественная конвекция и эффект тяги** — вертикальные каналы усиливают поток; у зазора между рёбрами есть оптимум (как ориентир, порядка 6 мм и более для естественной конвекции).
- **Теплопроводность и растекание** — медное основание (≈ 390 Вт/(м·К)) вместо алюминиевого (≈ 200 Вт/(м·К)) снижает сопротивление растекания.
- **Теплоёмкость (буфер)** — отрицательный результат: масса радиатора ≈ 178 г, теплоёмкость ≈ 160 Дж/К; даже 150 Дж пикового тепла (15 Вт $\times$ 10 с) дают лишь $\approx 0,9$ К, а задача — длительная нагрузка.
- **Эффект Пельтье** — отклонён: активное охлаждение добавляет собственное тепловыделение и усложнение конструкции.

D. ARIZ-85V

Не потребовалось — стратегии А-С дали достаточное покрытие решения; переход к Фазе 5 без полного цикла ARIZ.

Принципы разделения противоречивых свойств

- **По месту:** тепло собирается на малом пятне в модуле, а отдаётся на большой поверхности, вынесенной за пределы малого габарита (панель, корпус).
- **По времени:** для пиков — тепловая инерция, для длительного режима — постоянный тепловой путь (в этом кейсе буфер не помогает).
- **По условию:** эффективность площади зависит от зазора, ориентации и температуры: площадь «включается» конвекцией и излучением там, где для них есть условия.
- **Целое/часть:** габарит принадлежит части (модулю), а площадь — целому (система «модуль + шкаф»).

8. Синтез решений ФАЗА 5

1. Панель шкафа как радиатор (тепловой мост)

Модуль монтируется на стальную панель шкафа через тепловую прокладку с диэлектрическими свойствами; панель работает как второй параллельный тепловой путь, не увеличивая габарит модуля. Принципы №13, №6; стандарты 5.2.1, 5.2.2.

2. Тепловая труба или паровая камера в основании радиатора

Две тепловые трубы $\varnothing 6$ мм в основании распределяют тепло с пятна 50×30 мм по всей площади оребрения, повышая эффективность использования площади. Принципы №10, №35; стандарт 5.3.1.

3. Оптимизация оребрения и излучения

Профиль под допустимый габарит $110 \times 70 \times 30$ мм: 9 рёбер, зазор 7 мм, высота рёбер 25 мм, чёрное анодирование. Принципы №35, №3, №17; стандарты 1.2.6, 5.2.5.

4. Снижение тепловыделения

Синхронное выпрямление и транзисторы с меньшим сопротивлением канала: потери с 30 до 22 Вт (КПД с 95,2% до 96,5%). Принцип №13; стандарт 2.1.2.

5. Принудительная конвекция (малый вентилятор)

Вентилятор на штатном радиаторе повышает эффективный коэффициент теплоотдачи в несколько раз; резервный вариант, если пассивные решения не дают запаса. Принцип №28; стандарт 1.2.5.

9. Адверсарная проверка ФАЗА 6

Каждое решение проверено «скептиком» (ведущий инженер по тепловым режимам, конструктор, экономист) по 4 критериям: физика, экономика, реализуемость, побочные эффекты.

Решение	Статус	Реализуемость	Трудоёмкость	Ключевые риски
1. Панель шкафа как радиатор	С ДОРАБОТКОЙ	4/5	Низкая	Зависит от монтажа у заказчика (тонкая, окрашенная или занятая панель); диэлектрическая прокладка повышает контактное сопротивление; нужно требование к монтажу в документации
2. Тепловая труба	С ДОРАБОТКОЙ	3/5	Высокая	Стоимость; чувствительность к ориентации и термоциклированию; заметный выигрыш только при узком месте в растекании тепла
3. Оптимизация оребрения	ПОДТВЕРЖДЕНО	4,5/5	Низкая	Ограниченный выигрыш ($\approx 25\%$ по сопротивлению): сама по себе задачу не решает; анодирование нужно снять под тепловой интерфейс; хуже работает при горизонтальной ориентации рёбер
4. Снижение тепловыделения	ПОДТВЕРЖДЕНО	4/5	Средняя	Перепроектирование силовой схемы, стоимость компонентов, проверка ЭМС и КПД
5. Принудительная конвекция	С ДОРАБОТКОЙ	3/5	Средняя	Противоречит требованию «без вентилятора»; подвижная часть и пыль; выход за габарит по высоте (≈ 35 мм); нужен контроль отказа вентилятора

10. Ранжирование по составному критерию ФАЗА 7

$Composite = \text{Инновационность} \times 0,30 + \text{Реализуемость} \times 0,30 + \text{Стоимость} \times 0,20 + \text{Универсальность} \times 0,20$

№1 · Панель шкафа как радиатор — 0.75

Инновационность 0.65 · Реализуемость 0.85 · Стоимость 0.90 · Универсальность 0.60

№2 · Оптимизация оребрения и излучения — 0.72

Инновационность 0.35 · Реализуемость 0.95 · Стоимость 0.85 · Универсальность 0.80

№3 · Снижение тепловыделения — 0.71

Инновационность 0.70 · Реализуемость 0.70 · Стоимость 0.55 · Универсальность 0.90

№4 · Тепловая труба или паровая камера — 0.64

Инновационность 0.80 · Реализуемость 0.60 · Стоимость 0.40 · Универсальность 0.70

№5 · Принудительная конвекция (вентилятор) — 0.59

Инновационность 0.30 · Реализуемость 0.70 · Стоимость 0.65 · Универсальность 0.80

Рекомендуемая связка для проекта: «панель шкафа как радиатор» вместе с оптимизированным оребрением и чёрным анодированием ($T_j \approx 109^\circ\text{C}$ при 30 Вт, надбавка ≈ 250 ₽ на изделие). Для запаса по температуре — снижение потерь до 22 Вт ($T_j \approx 95^\circ\text{C}$), но надбавка ≈ 430 ₽ выходит за лимит 300 ₽ и рассматривается для следующей ревизии изделия. Тепловая труба и вентилятор — резерв.

11. Анализ эволюции и системный оператор ФАЗА 8

	Прошлое	Настоящее	Будущее
Надсистема	Электроника с запасом по объёму и мощности	Рост плотности мощности, ограниченные габариты, запрет на вентиляторы	Тепловое проектирование на уровне всей системы: шкаф, платформа, жидкостное охлаждение
Система	Отдельный пассивный радиатор, растущий вместе с мощностью	Радиатор с оптимизированным оребрением и тепловыми интерфейсами	Интегрированный «тепловой путь»: корпус-радиатор, тепловые трубы и паровые камеры, двухфазное охлаждение
Подсистема	Простые прямые рёбра	Профилированные рёбра с анодированием	Топологически оптимизированные, градиентные и пористые структуры

Закон эволюции: переход от размера к структуре: площадь создаётся геометрией и пористостью, а не объёмом; интеграция функций («корпус = радиатор»); переход к системам с фазовыми переходами и управляемыми полями.

Следующее вероятное новое противоречие: «тепловая эффективность ↔ технологичность и стоимость»: сложные структуры (пористые, напечатанные, с тепловыми трубами) лучше отводят тепло, но труднее и дороже в серии; кроме того, плотное оребрение конфликтует с запылённостью и обслуживанием.

12. Образец тепловых расчётов

Методический образец: значения эффективного коэффициента теплоотдачи h_{eff} приняты для иллюстрации (порядок величины для естественной конвекции с учётом излучения). В дипломной работе их уточняют по корреляциям для вертикальных ребристых поверхностей (например, типа Эленбааса) или CFD-моделированием и проверяют экспериментом.

12.1. Допустимое тепловое сопротивление радиатора

$$T_j = T_a + P \cdot (R_{j-c} + R_{c-s} + R_{s-a})$$
$$R_{s-a, \max} = (T_j - T_a) / P - R_{j-c} - R_{c-s} = (110 - 55) / 30 - 0,5 - 0,2 \approx 1,13 \text{ K/Вт}$$

12.2. Штатный радиатор

$$\text{Зазор: } (60 - 12 \cdot 1,5) / 11 \approx 3,8 \text{ мм}$$
$$A = 12 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 100 + 12 \cdot 1,5 \cdot 100 + 11 \cdot 3,8 \cdot 100 \approx 54\,000 \text{ мм}^2 = 540 \text{ см}^2$$
$$R_{s-a} = 1 / (h_{\text{eff}} \cdot A) = 1 / (7 \cdot 0,054) \approx 2,65 \text{ K/Вт} \quad (h_{\text{eff}} = 7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \text{ принято})$$
$$T_j = 55 + 30 \cdot (0,7 + 2,65) \approx 155 \text{ °C} \rightarrow \text{допустимые потери } P_{\max} = 55 / (0,7 + 2,65) \approx 16,4 \text{ Вт (55\% от 30 Вт)}$$

12.3. Почему простое увеличение радиатора не работает

$$\text{Требуемая площадь при } h_{\text{eff}} = 7: A = 1 / (7 \cdot 1,13) \approx 0,126 \text{ м}^2 = 1\,260 \text{ см}^2 \text{ (в 2,3 раза больше)}$$
$$\text{Плотность оребрения штатного радиатора: } 540 \text{ см}^2 / 150 \text{ см}^3 = 3,6 \text{ см}^2/\text{см}^3$$
$$\text{Требуемый объём: } 1\,260 / 3,6 \approx 350 \text{ см}^3 \rightarrow \text{при основании } 100 \times 60 \text{ мм высота } \approx 58 \text{ мм (допустимо 30 мм)}$$
$$\text{Весь допустимый габарит (231 см}^3\text{) при той же плотности даёт } \approx 830 \text{ см}^2, \text{ то есть } \approx 66\% \text{ от требуемой площади}$$

12.4. Оптимизированный радиатор в габарите 110 × 70 × 30 мм

$$9 \text{ рёбер } \times 1,5 \text{ мм, зазор 7 мм (ширина 69,5 мм), высота рёбер 25 мм, длина 110 мм}$$
$$A = 9 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 110 + 9 \cdot 1,5 \cdot 110 + 8 \cdot 7 \cdot 110 \approx 57\,100 \text{ мм}^2 \approx 571 \text{ см}^2 \text{ (всего +6\%)}$$
$$h_{\text{eff}} = 9 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \text{ (принято: рациональный зазор и чёрное анодирование)} \rightarrow R_{s-a} = 1 / (9 \cdot 0,0571) \approx 1,95 \text{ K/Вт}$$
$$T_j = 55 + 30 \cdot (0,7 + 1,95) \approx 134 \text{ °C} \rightarrow \text{задачу одна оптимизация не решает}$$

12.5. Тепловой мост на панель шкафа (параллельные тепловые пути)

Параметр ребра для панели (сталь, $k = 50 \text{ Вт/(м·К)}$, толщина 2 мм, $h = 8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$): $m = \sqrt{(2h / (k \cdot \delta))} = \sqrt{(2 \cdot 8 / (50 \cdot 0,002))} \approx 12,7 \text{ м}^{-1}$; характерная длина $1/m \approx 79 \text{ мм}$
Эффективная площадь панели принята консервативно $A_n = 0,05 \text{ м}^2$ (500 см²) $\rightarrow R_n = 1 / (8 \cdot 0,05) = 2,5 \text{ К/Вт}$
 $R_{s-a} = (1/1,95 + 1/2,5)^{-1} \approx 1,09 \text{ К/Вт} \leq 1,13 \text{ К/Вт}$ ✓ (запас по сопротивлению $\approx 3,5\%$)
 $T_j = 55 + 30 \cdot (0,7 + 1,09) \approx 109 \text{ }^\circ\text{C}$ (запас до 110 °C всего $\approx 1 \text{ К}$)

12.6. Снижение потерь и вентилятор

Потери 22 Вт: КПД = $600 / (600 + 22) \approx 96,5\%$ (при 30 Вт — 95,2%); $R_{s-a, \max} = 55 / 22 - 0,7 = 1,8 \text{ К/Вт}$
Штатный радиатор: $T_j = 55 + 22 \cdot (0,7 + 2,65) \approx 129 \text{ }^\circ\text{C}$ X; оптимизированный: $\approx 113 \text{ }^\circ\text{C}$ X (чуть выше предела); оптимизированный + панель: $\approx 95 \text{ }^\circ\text{C}$ ✓
Вентилятор на штатном радиаторе ($h_{\text{eff}} = 25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, принято): $R_{s-a} = 1 / (25 \cdot 0,054) \approx 0,74 \text{ К/Вт}$; $T_j = 55 + 30 \cdot (0,7 + 0,74) \approx 98 \text{ }^\circ\text{C}$ ✓, но высота $\approx 35 \text{ мм}$

12.7. Ограничения модели

- Не учтены: сопротивление растекания тепла от пятна 50 × 30 мм по основанию, контактное сопротивление «модуль — панель» и влияние диэлектрической прокладки, неравномерность температуры рёбер, влияние ориентации.
- Значения h_{eff} , A_n , R_{j-c} приняты для иллюстрации; результат чувствителен к ним, поэтому в работе нужна проверка моделированием и измерением температуры (термопары, тепловизор).

13. Техничко-экономическое сравнение (образец)

Вариант	R_{s-a} , К/Вт	T_j , °C	Надбавка, ₽/шт	На программу, ₽/ год	Габарит, мм	Вывод
1. Штатный радиатор	2,65	155	0	0	100×60×25	не проходит
2. Оптимизированный радиатор	1,95	134	+160	320 000 (+45 000 оснастка)	110×70×30	не проходит
3. Оптимизированный + тепловой мост	1,09	109	+250	500 000 (+45 000 оснастка)	110×70×30	проходит, запас $\approx 1 \text{ К}$
4. Штатный + вентилятор	0,74	98	+320	640 000	100×60×35	выше лимита по цене и высоте
5. Вариант 3 + снижение потерь до 22 Вт	1,09	95*	+430	860 000 (+45 000 оснастка)	110×70×30	запас $\approx 15 \text{ К}$, но выше лимита 300 ₽

* при потерях 22 Вт. **Допущения:** программа 2 000 изделий в год; надбавки условные: оптимизированный профиль +160 ₽ (материал и анодирование), тепловой мост +90 ₽, снижение потерь +180 ₽; разовая оснастка (экструзионная матрица) $\approx 45 \text{ 000}$ ₽. Студент заменяет данные цифрами своего предприятия и добавляет затраты на разработку, испытания и гарантийные риски.

14. Как использовать анализ в курсовой или дипломной работе

Раздел работы	Что берётся из анализа	Что студент делает сам
Введение	Формулировка противоречия и цели: $T_j \leq 110^\circ\text{C}$ при 30 Вт в габарите 110×70×30 мм без вентилятора	Обосновывает актуальность по своей теме и литературе
Аналитический раздел	Описание модуля, ТП и ФП, ИКР, ресурсы	Обзор литературы, стандартов и существующих радиаторов, анализ аналогов
Конструкторская часть	Варианты решений, критерии выбора, ранжирование	Чертёж радиатора и кронштейна, 3D-модель, допуски, спецификация
Расчётная часть	Методика: тепловая схема замещения, оценка радиатора, параллельные тепловые пути	Свои исходные данные, коэффициенты по корреляциям, расчёт с учётом растекания и контактного сопротивления
Моделирование и эксперимент	Постановка задачи и критерии проверки	Тепловая модель в программном комплексе, методика и результаты измерений
Экономическая часть	Структура сравнения вариантов	Реальные цены, объёмы, накладные расходы, оснастка
Безопасность	—	Требования к температуре доступных частей, электробезопасности и пожарной безопасности по действующим нормативам

Академическая честность. Отчёт — образец методики анализа. Исходные данные, расчёты, чертежи и выводы студент выполняет самостоятельно по своему заданию и указывает источники; цифры кейса иллюстративные. Расчёты и рекомендации обязательно проверяются по нормативам и согласуются с научным руководителем.

15. План работы над проектом (пример на 12 недель)

Недели	Этап	Результат
1–2	Постановка задачи, обзор литературы и стандартов по тепловым режимам	Исходные данные, цель и задачи, список источников
3–4	ТРИЗ-анализ (противоречия, ИКР, ресурсы, генерация решений)	5–7 вариантов теплоотвода, критерии выбора
5–6	Тепловые расчёты (схема замещения, оценка вариантов)	Расчётная часть, сравнительная таблица вариантов
7–8	Конструкция выбранного варианта и тепловое моделирование	Чертежи, 3D-модель, карты температур
9–10	Методика испытаний, экономическая часть, безопасность	Программа измерений, расчёт надбавки и окупаемости
11–12	Оформление, презентация, подготовка к защите	Пояснительная записка, доклад, слайды

16. Приложение: инструменты ТРИЗ, использованные в анализе

Матрица противоречий (39 параметров)

40 принципов изобретательства

Су-польный анализ

76 стандартов

Принципы разделения (время/место/условие/целое-часть)

Физические эффекты

ИКР (3 уровня)

Ресурсный чек-лист (6 типов)

Системный оператор

Законы эволюции технических систем

Адверсарная верификация

Многокритериальное ранжирование