Функционально-активные контактные материалы и системы

Ёмкостной термоэлектрический элемент с переходной регенерацией состояния Пельтье–Зеебека

От распределённой ёмкости к обратному термоэлектрическому току

Хаустов Игорь Николаевич[1], Хаустов Владимир Игоревич[2]

[1] Кандидат технических наук (ВАК СССР, 1984 г.)

[2] Независимый исследователь; ORCID: 0009-0007-3657-2309

Лаборатория геометрической волновой инженерии https://vihrihaosa.ru/

Лицензия: CC BY 4.0

DOI: 10.5281/zenodo.22147999

Дата публикации:28 августа 2026 г.

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. I, Khaustov. V. Capacitive Thermoelectric Element with Transient Peltier–Seebeck State Regeneration. https://doi.org/10.5281/zenodo.22147999

Аннотация

Представлен вычислительный анализ ёмкостного термоэлектрического элемента, в котором одна и та же слоистая геометрия одновременно выполняет функции генератора Зеебека и распределённого конденсатора. Электрическая энергия, вырабатываемая поддерживаемой разностью температур, накапливается в распределённой ёмкости, перераспределяется коммутацией и используется для возбуждения тока через термоэлектрические ветви в направлении, противоположном естественному генерирующему току Зеебека. Этот обратный ток меняет знак слагаемого Пельтье и на переходном режиме увеличивает разность температур «горячий–холодный» спай; вследствие тепловой инерции часть возмущения сохраняется после окончания импульса и считывается как послеимпульсный отклик Зеебека, то есть как регенерация переходного состояния.

Доказательная программа построена на четырёх независимых уровнях. Механистический расчёт (N = 500, 43 008 состояний) показывает, что реальный обращённый ток способен записать тепловое состояние Пельтье со знаком; динамический аудит распределённой сети подтверждает накопление энергии (4,0564 мДж при ΔT = 65 К) и сильную передачу импульса, однако простая коммутация выводов сама по себе не обращает цепь; поиск по 12 топологиям и 2400 состояниям выявляет частичный обратный ток, создаваемый перекрёстными связями; пространственный оптимизатор (N = 100) обеспечивает обращение среднего тока цепи при одновременном обращении до 80 % ветвей, тогда как почти глобальный критерий (≥ 95 %) не выполняется ни в одном состоянии. Эти уровни проверяют отдельные причинно-следственные звенья, а не воспроизводят одно замкнутое законченное устройство.

Впоследствии причинная цепь была замкнута в единой электротермической модели: модифицированный узловой анализ (MNA) с разрешением по парам плюс одномерный метод конечных объёмов. В ней токи ветвей, порождаемые топологией, управляют локальными слагаемыми Пельтье, результирующее температурное поле возвращается в зависящие от температуры ЭДС Зеебека термопар типа E, а послеимпульсный отклик нагрузки оценивается на той же траектории. При N = 100 заранее выбранный сильный перекрёстный режим проходит все шесть сквозных критериев с высокой точностью: 80 % ветвей обращаются одновременно, пространственно-средний ток отрицателен в течение 96,99 % импульса, специфичная для Пельтье средняя запись ΔT составляет +32,37 мкК, а превышение причинной нагрузки после импульса +2,91 пДж; две представительные точки скрининга с высокой диэлектрической проницаемостью проходят тот же строгий критерий при сохранённом пороге обращения ≥ 75 %.

Научное содержание работы — управляемое переходное состояние термоэлектрической системы и топологический синтез обращённого тока, а не возврат энергии: вычисленная возвращённая энергия ничтожно мала (доли миллионных долей энергии управляющего импульса), и преимущество по КПД не заявляется. Аттестация материалов, частотно-зависимые диэлектрические потери, трёхмерное распространение тепла и проверка на оборудовании остаются открытыми задачами.

Ключевые слова: термоэлектрическое преобразование; эффект Зеебека; эффект Пельтье; распределённая ёмкость; регенерация переходного состояния; обратный термоэлектрический ток; топология коммутации; модифицированный узловой анализ; согласование импульсной мощности; вычислительная верификация.

Оглавление

Аннотация 2
1. Научное утверждение и объём раскрытого принципа 4
1.1. Концепция работы 4
1.2. Фальсифицируемые условия 5
1.3. Границы новизны и терминология 5
2. Физическая архитектура и координаты коммутации 5
2.1. Пятислойная локальная ячейка 5
2.2. Переменные электрического состояния L-M-U-G 6
2.3. Координаты коммутации 8
2.4. Физическое происхождение обращения, обусловленного топологией 9
3. Определяющие уравнения и численная реализация 9
3.1. Уравнения Зеебека и термоэлектрической ветви 9
3.2. Распределённая ёмкость и MNA 10
3.3. Модель теплового состояния Пельтье 10
3.4. Учёт и контроль электрической энергии 11
3.5. Формальные метрики обращения и реализованные контрольные критерии 11
3.6. Унифицированное сквозное электротермическое замыкание в V53–V53.3 12
4. Результаты I — причинная регенерация состояния Пельтье–Зеебека 14
5. Результаты II — динамическая распределённая зарядка и базовая передача LMUG 16
6. Результаты III — частичный обратный ток ТЭ, управляемый топологией 17
7. Результаты IV — синтез пространственной коммутации в восстановленном блоке N = 100 19
7.1. Прецизионные режимы, значимые для прототипа 20
7.2. Масштабирование по температуре 22
8. Научный синтез: что подтверждено и что остаётся открытым 23
8.1. Результаты V — унифицированное сквозное замыкание при N = 100 (V53) 24
8.2. Результаты VI — испытание ограниченного масштабирования при N = 500 (V53.1) 25
8.3. Результаты VII — проверка совместимых с утечкой материалов с высокой k и строгое подтверждение (V53.2–V53.3) 25
8.4. Уточнённая граница доказательности после унифицированных расчётов 27
9. Следствия для проектирования прототипа 27
9.1. Решающий аппаратный эксперимент 28
10. Ограничения и необходимый следующий уровень валидации 28
11. Воспроизводимость и пакет данных 29
12. Выводы 30
Список литературы 31

1. Научное утверждение и объём раскрытого принципа

1.1. Концепция работы

Описанная архитектура рассматривает термоэлектрический преобразователь как систему с динамическим состоянием, а не только как источник напряжения с непрерывной нагрузкой. Поддерживаемая разность температур между горячей и холодной сторонами создаёт ЭДС Зеебека. Та же слоистая геометрия образует распределённые ёмкости между термоэлектрическими проводниками и электрически изолированным непрерывным проводником G. Коммутация изменяет электрические граничные условия этого накопленного состояния. Если результирующий ток в термоэлектрической ветви противоположен её естественному направлению генерирования по Зеебеку, слагаемое Пельтье меняет знак и может временно увеличить разделение горячего и холодного спаев. После окончания коммутационного импульса ток затухает быстро, а тепловое возмущение — медленно. Такое разделение масштабов времени позволяет получить послеимпульсный отклик Зеебека, несущий информацию и энергию, связанные с намеренно записанным тепловым состоянием.

тепло → ЭДС Зеебека → распределённое накопление → обратный ток ТЭ → знаковое δ Пельтье (ΔT) → послеимпульсный отклик Зеебека

Поэтому вычислительная программа разделяет три вопроса, на которые нужно ответить независимо: (i) способен ли реальный обратный ток ТЭ записать знаковое тепловое состояние; (ii) способна ли распределённая ёмкость и коммутационная цепь самостоятельно сформировать обратный ток; (iii) какая топология пространственной коммутации наилучшим образом распределяет обратный ток по длинной последовательной цепи.

Рабочая гипотеза опирается на разделение электрических и тепловых масштабов времени. Для интерпретации вводится $\Lambda = \tau_th/t_p$, где t_p — длительность импульса передачи, а τ_th — характерное время тепловой релаксации. При $\Lambda \gg 1$ электрический ток может затухнуть, тогда как записанное Пельтье температурное возмущение сохраняется на протяжении конечного окна считывания. Полученные данные не требуют универсального порогового значения Λ: отношение вводится только как компактный дескриптор условия переходного режима.

$$\Lambda = \tau_th / t_p$$

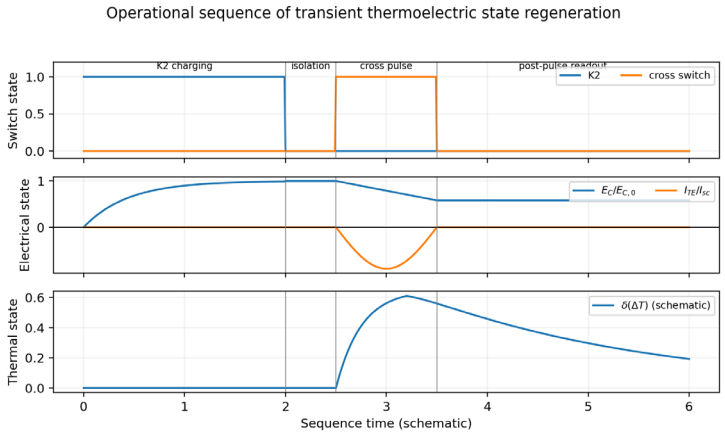


Рисунок 1. Схематическая последовательность операций: динамическая зарядка K2, изоляция, импульс передачи, управляемый топологией обратный ток ТЭ, запись состояния Пельтье и послеимпульсное считывание по Зеебеку (электрическое состояние, состояние коммутаторов, тепловое состояние). Приведённые кривые носят пояснительный характер и не являются дополнительными подогнанными данными.

1.2. Фальсифицируемые условия

- Требование обратного тока принимается только тогда, когда физический ток ветви в модели MNA меняет знак относительно естественного тока Зеебека; изменения математического соглашения о знаке недостаточно.
- Утверждение о регенерации Пельтье требует температурных возмущений на горячей и холодной сторонах правильного знака и положительной послеимпульсной электрической разности по отношению к контрольным опытам.
- Требование обращения, управляемого конденсатором, означает более сильное обращение из динамически заряженного состояния, чем из идентичного во всём остальном состояния с незаряженным конденсатором.
- Требование почти глобального обращения зарезервировано для случая, когда не менее 95 % ветвей ТЭ обращены одновременно на ненулевую длительность. Итоговые данные этому условию не удовлетворяют.

Не утверждается, что данная вычислительная архитектура превышает термодинамический предел максимальной мощности или КПД. Кроме того, критерии и интерпретация результатов построены на контроле состояния, а не на возврате энергии: подтверждённой величиной является знаковое и воспроизводимое термоэлектрическое состояние, тогда как вычисленная возвращённая энергия пренебрежимо мала (порядка долей ppm энергии управляющего импульса).

1.3. Границы новизны и терминология

Работа не претендует на новизну эффекта Зеебека, эффекта Пельтье, эталонных функций термопар типа E, переходной термоэлектрической релаксации, конденсаторов или модифицированного узлового анализа — это устоявшиеся основы [1–5], а импульсно-переходная работа Пельтье изучена теоретически и экспериментально [6, 7]. Столь же известны интерфейсы согласования мощности с коммутацией конденсаторов для сбора энергии малой мощности, включая термоэлектрические генераторы [10]. Предлагаемый вклад уже: полученное из Зеебека распределённое ёмкостное состояние пространственно переключается через программируемые перекрёстные связи ТЭ↔G так, что в термоэлектрических ветвях может быть создан физически знаковый обратный ток; при достаточной глубине он способен работать как электрический привод для записи переходного теплового состояния Пельтье, которое затем считывается откликом Зеебека.

Приоритетная заявка ограничивается этой интеграцией и приведёнными вычислительными доказательствами. Термин «регенерация состояния» обозначает управляемое восстановление и изменение термоэлектрического теплового состояния после электрического импульса и не означает возврата или умножения энергии. Внешние ссылки ниже дают только методологический контекст и не являются доказательством численных утверждений рукописи.

2. Физическая архитектура и координаты коммутации

2.1. Пятислойная локальная ячейка

Масштабируемый физический мотив — M1–D1–G–D2–M2. M1 и M2 — разнородные термоэлектрические фольги; D1 и D2 — диэлектрические слои; G — общий металлический проводник, гальванически изолированный от термоэлектрической цепи. Таким образом, термоэлектрические фольги выполняют несколько функций одновременно: проводят тепло в своей плоскости, несут последовательный термоэлектрический ток, вносят ЭДС Зеебека в разнородные металлические соединения и служат обкладками конденсатора относительно G. Проводник G

работает как распределённый электростатический проводник и шина передачи импульса, а не как электрическая средняя точка термобатареи.

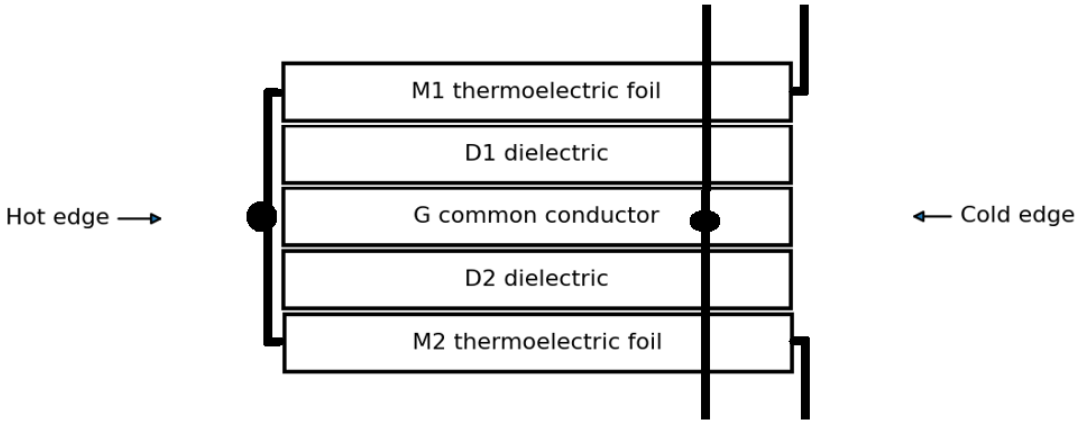


Рисунок 2. Пятислойная расчётная эталонная ячейка (M1–D1–G–D2–M2) и разделение термоэлектрической и ёмкостной функций: горячая кромка, термоэлектрическая фольга M1, диэлектрик D1, общий проводник G, диэлектрик D2, термоэлектрическая фольга M2, холодная кромка.

2.2. Переменные электрического состояния L-M-U-G

Упрощённое представление устройства различает четыре электрически значимых объекта: нижний вывод L термобатареи, электрическую среднюю точку M, верхний вывод U термобатареи и отдельный распределённый общий проводник G. Нагрузка включается между M и G. Динамическая зарядка выполняется через соединение K2 с конечным сопротивлением между G и выбранным внешним выводом. Затем коммутация передачи заново соединяет выбранные узлы ТЭ и G. Это различение принципиально: большой ток в G или в ключе автоматически не означает обратного тока через ветви термоэлектрической последовательной цепи.

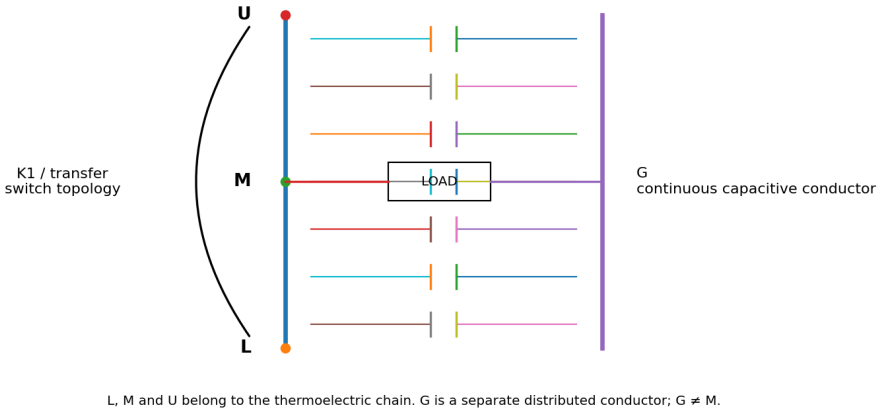


Рисунок 3. Концептуальная топология L-M-U-G. Модель явно различает ток в термоэлектрической цепи и ток в G и в переходных ключах: ток K1/передачи в G, состояние коммутаторов, непрерывный ёмкостный проводник; L, M и U принадлежат термоэлектрической цепи, G — отдельный распределённый проводник (G ≠ M).

Локальный слоистый материал представлен как термоэлектрический металл 1 / диэлектрик / общий проводник G / диэлектрик / термоэлектрический металл 2. В эталонной геометрии длинной фольги каждая фольга имеет длину 1,00 м, ширину 0,05 м и толщину 0,10 мм; толщина диэлектрика 0,10 мм. В наборе цифровых данных используются термоэлектрические проводники хромель–константан, медь для G, относительная диэлектрическая проницаемость ε_r = 1300, теплопроводность диэлектрика 0,30 Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$ и контактное сопротивление перехода 10 мкОм.

Применяются два размера модели, служащие разным научным целям. N = 500 сохраняется в слоях механизма и динамики LMUG, чтобы переходный отклик Пельтье–Зеебека проверялся в длинной распределённой цепи. N = 100 используется только на заключительном этапе пространственного синтеза для ускорения комбинаторного поиска, причём процентные координаты совпадают с индексами пар: 20, 40, 60, 80 и 100 % соответствуют парам 20, 40, 60, 80 и 100. Такое уменьшение является моделью поиска и не означает, что абсолютно оптимальное время импульса переносится без изменений на оборудование с N = 500 или N = 2000.

Таблица 1. Сравнение конфигураций моделей с длинной фольгой (N = 500) и пространственным оптимизатором (N = 100): электрические и геометрические параметры.

Параметр	**Слой длинной фольги, N = 500**	**Пространственный оптимизатор, N = 100**
Пар, N	500	100
Длина x ширина фольги	1,00 м x 0,05 м	1,00 м x 0,05 м
Толщина металла / диэлектрика	0,10 / 0,10 мм	0,10 / 0,10 мм
Диэлектрическая проницаемость e_r	1300	1300
Проверяемые dT, K	10; 25; 50; 65	10; 25; 50; 65
Напряжение холостого хода при 65 K, В	2,07631	0,415262
Сопротивление ТЭ при 65 K, Ом	119,01	23,802
Ток короткого замыкания при 65 K, мА	17,445	17,447
Суммарная распределённая ёмкость, мФ	5,640	1,128

2.2.1. Полные параметры модели и тепловой шунт

Таблица 2. Основные физические и численные параметры решающих моделей и их статус.

Параметр	**Значение**	**Статус в работе**
Эталонная температура холодной стороны, T_c	25 град. C	Принятое граничное условие модели
Длина x ширина фольги	1,00 м x 0,05 м	Принятая геометрия
Толщина фольги хромель/константан	0,10 мм	Принятая геометрия
Толщина меди G	0,10 мм	Принятая геометрия
Толщина диэлектрика	0,10 мм	Принятая геометрия
Доля активной площади конденсатора	0,98	Допущение модели
Относительная диэлектрическая проницаемость	1300	Расчётная точка; материал здесь не аттестован
Теплопроводность диэлектрика	0,30 Вт/(м K)	Расчётная точка
Удельное сопротивление хромеля	0,70e-6 Ом м	Принятое табличное значение

Удельное сопротивление константана	0,49e-6 Ом м	Принятое табличное значение
Удельное сопротивление меди	1,68e-8 Ом м	Принятое табличное значение
Теплопроводность хромель/константан	19 / 21 Вт/(м К)	Принятые табличные значения
Теплопроводность меди	400 Вт/(м К)	Принятое табличное значение
Контактное сопротивление спая	10 мкОм на переход	Допущение модели
Плотность хромель/константан	8700 / 8900 кг/м3	Принятые табличные значения
Теплоёмкость хромель/константан	450 / 410 Дж/(кг К)	Принятые табличные значения
Сопротивление зарядки K2	0,01 Ом	Параметр коммутации модели
Сопротивления ключей (поиск)	0,001; 0,003; 0,01; 0,03; 0,10 Ом	Переменная поиска V52.1
Грубый шаг по времени	Не более 20 мкс; не менее 120 шагов на фазу	Численный контроль
Прецизионный шаг передачи	Не более 1 мкс; не менее 1000 шагов на фазу	Численное подтверждение
Шаг времени зарядки K2	1 мс	Численный контроль
ЭДС термопары типа E	Эталонный полином NIST ITS-90, тип E	Эталонная функция [5]

Пара $\varepsilon_r = 1300$ и $k_диэл = 0{,}30$ Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$ является расчётной точкой, а не аттестованной характеристикой конкретного промышленного диэлектрика. При аппаратной реализации эту точку следует заменить измеренными $\varepsilon_r(f, T)$, тангенсом диэлектрических потерь и ESR, сопротивлением утечки или изоляции, электрической прочностью и $k(T)$ выбранного материала.

Для модели с длинной фольгой $N = 500$ тот же набор параметров даёт $K_TE = 0{,}100$ Вт·К$^{-1}$, $K_G = 1{,}000$ Вт·К$^{-1}$, $K_диэл = 0{,}0015$ Вт·К$^{-1}$ и $K_сумм = 1{,}1015$ Вт·К$^{-1}$. При $\Delta T = 65$ К тепловой поток утечки по Фурье составляет примерно 71,60 Вт. Модель поиска $N = 100$ даёт $K_сумм = 0{,}2203$ Вт·К$^{-1}$ и примерно 14,32 Вт при 65 К. Эти оценки объясняют, почему реальный сигнал состояния после импульса не предполагает энергетического выигрыша при данной макроскопической геометрии. Для унифицированного семейства V53 коэффициент теплоотдачи в ванне $h_b = 5000$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$, сопротивление считывающей нагрузки 3 Ом, окно считывания 5 мс. Каждое представленное звено ТЭ/G использует симметричную геометрическую конечно-объёмную сетку из 29 ячеек с краевыми ячейками 20 мкм. Стандартное прецизионное подтверждение использует шаги считывания 2 мкс и 10 мкс; в V53.3 (HP_ULTRA) — 1 мкс и 5 мкс соответственно.

2.3. Координаты коммутации

Заключительный оптимизатор размещения K2 работает на 100 парах, поэтому процентные координаты совпадают с индексами пар. Он перебирает окна короткого замыкания между элементами: 20–100 %, 40–100 %, 60–100 %, 80–100 %, 20–40 %, 20–60 % и 20–80 %. Для каждого окна проверяются только конфигурации cross, cross + средняя точка и cross + DUALQ (две четвертные точки), обе полярности зарядки K2 и пять значений сопротивления ключа — от 1 мОм до 0,1 Ом. Временная сетка перебирается широко — от 50 мкс до 10 мс — с последующим геометрическим уточнением до 20 мс.

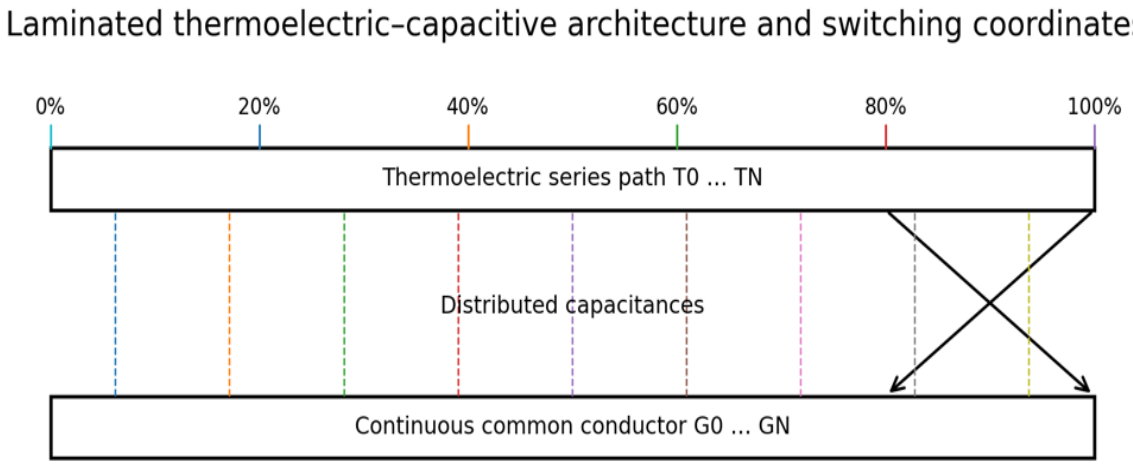


Рисунок 4. Упрощённое представление слоистой термоэлектрически-ёмкостной структуры и координаты коммутации. T0…TN — последовательные термоэлектрические узлы, G0…GN — непрерывный распределённый общий проводник; распределённые ёмкости; перекрёстные связи между пространственно разнесёнными координатами T и G являются управляющей переменной заключительного оптимизатора.

2.4. Физическое происхождение обращения, обусловленного топологией

Перекрёстная коммутация работает путём переназначения пространственных электрических граничных условий уже заряженного распределённого состояния. До передачи напряжения конденсаторов ТЭ–G следуют вдоль цепочки приблизительно монотонному профилю. Перекрёстное соединение T_a↔G_b вместе с T_b↔G_a связывает потенциалы, принадлежащие разным пространственным координатам. Возникающее переходное перераспределение искривляет профиль потенциала узлов ТЭ внутри выбранного окна и вокруг него; поэтому некоторые локальные падения напряжения на ТЭ приобретают знак и величину, способные превзойти парную ЭДС Зеебека.

$$V_{T,i+1} - V_{T,i} > E_{pair} \Rightarrow I_i < 0 \quad \text{(для положительного естественного тока Зеебека)}$$

В соглашении о знаке, принятом в расчётах, ветвь считается обращённой, когда I_i·I_Seebeck < 0. Если естественное направление Зеебека положительно, условие обращения означает V_{T,i+1} − V_{T,i} > E_pair. Таким образом, значимой величиной является не абсолютный ток в G или в ключе передачи, а то, превосходит ли коммутируемый пространственный градиент потенциала на сегменте ТЭ локальную ЭДС Зеебека.

Выводы MID и DUALQ изменяют именно пространственное распределение потенциала, а не просто снижают суммарное сопротивление ключа. Они позволяют обменивать глубину обращения на пространственный охват, высвобождаемую энергию конденсатора и напряжение коммутации. Этим объясняется, почему режим 80–100 % DUALQ может удерживать пространственно-средний ток лишь слегка отрицательным на большей части импульса, тогда как режим 20–40 % с чистым cross даёт существенно более глубокий отрицательный средний ток.

3. Определяющие уравнения и численная реализация

3.1. Уравнения Зеебека и термоэлектрической ветви

ЭДС термопары оценивается по полиному типа E, используемому в расчётах. Для пары, охватывающей T_h и T_c, парная ЭДС равна E_pair = E(T_h) − E(T_c). Для N одинаковых пар в

последовательной цепи U_xx = N·E_pair. Естественный ток короткого замыкания I_кз = U_xx/R_TE. В распределённых слоях MNA ток ветви вычисляется непосредственно из узловых потенциалов:

$$I_i = (V_{T,i} - V_{T,i+1} + E_{pair}) / R_{pair}$$

Знак вычисленного тока служит эталоном физической полярности. Ветвь считается обращённой только при I_i·I_Seebeck < 0.

3.2. Распределённая ёмкость и MNA

Электрическая сеть содержит N + 1 узлов ТЭ и N + 1 узлов G. Каждая пространственная координата несёт распределённую ёмкость между сетями ТЭ и G. В качестве датчика напряжения используется G0. Резистивные цепи ТЭ и G представлены разреженными графами лапласиана; ключи передачи добавляют явные проводимости между выбранными координатами ТЭ и G. Интегрирование по времени использует неявную схему Эйлера для ёмкостной части и разреженную LU-факторизацию. Заключительный оптимизатор кэширует лишь ограниченное число разреженных факторизаций, чтобы избежать роста памяти при полном переборе.

$$E_C = \tfrac{1}{2} \Sigma_j C_j (V_{T,j} - V_{G,j})^2$$

Зарядка K2 не задаётся произвольным начальным профилем напряжения. Начиная с нулевого напряжения конденсаторов, модель динамически подключает выбранный вывод ТЭ к G0 и продвигает расчёт во времени, пока не будут выполнены критерий по току и критерий по ошибке профиля. Полученный профиль распределённого напряжения затем используется как начальное состояние для импульса передачи.

Для воспроизводимости разреженный этап можно записать в блочном виде. Пусть z = [v_T; v_G] объединяет потенциалы узлов ТЭ и узлов G, а C обозначает диагональную матрицу распределённых ёмкостей. При фиксированном состоянии коммутации S неявная схема Эйлера даёт линейную систему

$$[G_{TE} + C/h, -C/h; -C/h, G_G + C/h] \cdot [v_T; v_G]^{(n+1)} = [r_T(v^n, E_{pair}, S); r_G(v^n, S)]$$

Здесь G_TE и G_G — резистивные графы лапласиана термоэлектрической цепи и цепи G, а G_S(S) — матрица проводимостей активных поперечных связей и выводов. Правая часть содержит вектор источника типа E и состояние конденсаторов с предыдущего шага. В реализации G0 работает как вольтметр, разреженная LU-факторизация повторно используется для идентичных конфигураций «ключ/шаг времени», а зарядка K2 получается многократным решением одного и того же класса систем из нулевого напряжения конденсаторов.

3.3. Модель теплового состояния Пельтье

Слой изоляции механизма связывает ток ТЭ с тепловыми состояниями горячей и холодной кромок. Для общего термоэлектрического коэффициента α и мгновенных температур кромок T_h и T_c знаковые мощности Пельтье записываются как αT_hI и αT_cI. Джоулево тепло распределяется между краевыми тепловыми состояниями, между кромками действует связь по Фурье, а постоянная времени граничной релаксации возвращает возмущения к поддерживаемым тепловым резервуарам. Главная знаковая переменная состояния — δ(ΔT) = δT_h − δT_c.

$$Q_{П,h} = \alpha \cdot T_h \cdot I, \quad Q_{П,c} = \alpha \cdot T_c \cdot I, \quad \delta(\Delta T) = \delta T_h - \delta T_c$$

Реализованные уравнения с сосредоточенными краевыми состояниями в явном виде:

$$C_{th} \cdot d(\delta T_h)/dt = -G_b \cdot \delta T_h + K \cdot (\delta T_c - \delta T_h) - \alpha \cdot T_h \cdot I + \tfrac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{TE}$$

$$C_{th}\cdot d(\delta T_c)/dt = -G_b\cdot\delta T_c + K\cdot(\delta T_h - \delta T_c) + \alpha\cdot T_c\cdot I + \tfrac{1}{2}\cdot I^2\cdot R_{TE}$$

Здесь $C_{th} = N\cdot w\cdot t_m\cdot d\cdot(\rho_{chr}\cdot c_{p,chr} + \rho_{con}\cdot c_{p,con})$ — эффективная теплоёмкость, отнесённая к выбранной глубине активной кромки d; $G_b = C_{th}/\tau$ — релаксация к поддерживаемым резервуарам; K — полная кондуктивная связь. При принятом соглашении о знаке тока обратный ток $I < 0$ делает слагаемое $-\alpha\cdot T_h\cdot I$ положительным в уравнении для горячей стороны и $+\alpha\cdot T_c\cdot I$ отрицательным в уравнении для холодной, обеспечивая требуемое знаковое разделение. Глубины d и τ являются параметрами модели и не заявлены как независимо измеренные аппаратные величины.

3.4. Учёт и контроль электрической энергии

Работа источника, джоулевы потери в ТЭ, потери в G, потери в ключах, энергия нагрузки и изменение энергии конденсаторов интегрируются независимо. Каждый решающий электрический слой сообщает относительный остаток первого закона. Слой механизма сравнивает послеимпульсную траекторию с контролем без короткого замыкания и с контролем без Пельтье. Независимый аудит дополнительно пересчитывает 32 самых сильных состояния механизма с поэтапным управлением, при котором связь Пельтье отключается только на время обратного импульса и восстанавливается на стадии считывания.

Таблица 3. Энергетические величины, различаемые на протяжении всей интерпретации.

Величина	**Смысл**
$E_{C,0}$	Распределённая энергия конденсаторов непосредственно перед коммутацией передачи
dE_C	Энергия, фактически высвобожденная из распределённой ёмкости за импульс передачи
$E_{J,TE}$; $E_{J,G}$; E_{sw}	Джоулевы потери в цепи ТЭ, в проводнике G и в ветвях ключей
$Q_П$	Знаковая теплопередача Пельтье, создаваемая фактическим током ТЭ; это перераспределение тепла, а не новый источник энергии
$dE_{load,П}$	Послеимпульсная разность энергии нагрузки, связанная с записью состояния Пельтье при указанном контроле
Q_{rev}/dE_C, Кл/Дж	Обратный заряд, отнесённый к высвобожденной энергии конденсаторов; показатель качества переноса заряда, а не термодинамический КПД

Остаток первого закона для электрической подсистемы на распределённых уровнях коммутации формируется из E_C, W_{source}, $E_{J,TE}$, $E_{J,G}$, E_{sw}, E_{load} и нормируется на максимум модулей этих величин в соответствии с реализацией в расчётах. Это численная диагностика сохранения, а не утверждение о физическом отсутствии опущенных аппаратных паразитов.

3.5. Формальные метрики обращения и реализованные контрольные критерии

Поскольку ключевые требования V51/V52 опираются на пространственно распределённый ток, соответствующие метрики определены явно. Индикатор $1[\cdot]$ равен единице, когда его условие выполнено, и нулю в противном случае.

$$Q_{rev,i} = \text{интеграл } (0\ldots t_p)\ \max[-s\cdot I_i(t), 0]\ dt, \quad s = \operatorname{sign}(I_{Seebeck})$$

$$R_i = Q_{rev,i} / (I_{кз}\cdot t_p), \quad R_{mean} = (1/N)\cdot\Sigma_i R_i$$

$$f_{ST} = (1/(N\cdot t_p))\cdot\Sigma_i \int 1[s\cdot I_i(t) < 0]\ dt, \quad f_{sim,max} = \max_t (1/N)\cdot\Sigma_i\ 1[s\cdot I_i(t) < 0]$$

$$I_{TE,cp}(t) = (1/N)\cdot\Sigma_i I_i(t), \quad f_{rev,mean} = (1/t_p)\cdot\int 1[s\cdot I_{TE,cp}(t) < 0]\ dt$$

Величина Q_rev/ΔE_C имеет размерность Кл/Дж и используется только как показатель эффективности переноса заряда. Это не термодинамический КПД, не коэффициент полезного действия и не доля возврата энергии.

На протяжении всей работы логический критерий принятия решения обозначается составной меткой Vk-Gi, где Vk — вычислительная кампания (версия модели), а Gi — i-й критерий прохождения или непрохождения, оцениваемый в этой кампании. Например, V49-G1 — первый критерий кампании V49 (изоляция механизма), требующий $\delta T_h > 0$ и $\delta T_c < 0$ сразу после наложенного обратного импульса; V52-G4 — четвёртый критерий кампании V52.1 (пространственный оптимизатор), требующий не менее 95 % одновременно обращённых ветвей. Состояние проходит критерий только при выполнении заявленного физического условия; функции принятия решений используют пороговые значения, приведённые ниже.

Таблица 4. Реализованные причинные и реверсивные критерии (гейты).

Критерий	Фактически проверяемое состояние
V49-G1	dT_h > 0 и dT_c < 0 сразу после наложенного обратного импульса
V49-G2	E_load,post - E_load,no-short > 0
V49-G3	E_load,post - E_load,no-Peltier > 0; 32 сильнейших состояния дополнительно проверены с отключённым Пельтье только на время импульса
V52-G1	Динамическая зарядка K2 сошлась
V52-G2	max f_sim не менее 0,80 и доля времени с любым обращением не менее 0,05
V52-G3	Изменение пространственно-среднего тока ТЭ не менее 0,01 длительности импульса
V52-G4	Не менее 95 % ветвей обращены на 0,01 длительности импульса и более; нижний дециль обратного эквивалента не менее 0,002 I_кз
V52-G5	Заряженное состояние добавляет не менее 0,002 I_кз к среднему обратному эквиваленту относительно незаряженного контроля
V52-G6	Высвобожденная доля ёмкостной энергии не менее 1e-4
V52-G7	Относительный электрический остаток первого закона не более 5e-3
V52-G8	Пиковый ток ключа передачи не более 300 А (вычислительный защитный критерий, а не номинал оборудования)

Для воспроизводимости в таблице 4 приведены именно те пороговые значения, которые фактически использовались в функциях принятия решений, а не только номинальные константы, объявленные в других местах исходных файлов. Заключение о недостижимости почти глобального обращения нечувствительно к дополнительным порогам по времени и амплитуде, поскольку ни одно проверенное состояние не превысило 0,80 одновременного обращения.

3.6. Унифицированное сквозное электротермическое замыкание в V53–V53.3

Семейство V53 устраняет разрыв между главной моделью и предыдущей многоуровневой цепью доказательств. Оно не задаёт форму обратного тока и не использует подогнанное время тепловой релаксации τ или подогнанную глубину активной кромки d. Вместо этого электрическое и тепловое состояния продвигаются совместно. Используются два уровня электротермической модели, и оба сохраняются для воспроизводимости. В разделе 3.3 определена модель с сосредоточенной изоляцией механизма, в которой форма обратного тока и параметры τ и d являются явными входными данными; это модель слоя V49. Напротив, вводимый здесь единый проверочный слой таких допущений не делает: он продвигает электрическое и тепловое состояния совместно, так что время тепловой

релаксации и пространственная дискретизация возникают из физической сети, а не накладываются как подогнанные параметры. Эта унифицированная модель используется в слоях V53–V53.3. Таким образом, два уровня отвечают на разные вопросы и приводятся рядом, а не заменяют друг друга.

$$C \cdot dv/dt + G(S) \cdot v + B_L \cdot i_L = b_TE(T)$$

$$L_sw \cdot di_L/dt + R_sw \cdot i_L = B_L\text{^}T \cdot v$$

Здесь v объединяет напряжения узлов ТЭ и G с разрешением по парам, C — распределённая матрица ёмкостей ТЭ–G, G включает проводимости цепи ТЭ, проводника G, утечки и активных ключей, S обозначает состояние коммутации, а b_TE(T) содержит вектор локальных термозависимых термоэлектрических источников. При L_sw = 0 второе соотношение сводится к резистивной модели ключа; конечное L_sw используется только в тесте чувствительности к индуктивности сосредоточенного ключа и межсоединения первого порядка. В настоящей реализации ёмкость, электрические сопротивления, диэлектрическая проницаемость, теплопроводность, теплоёмкость и контактные проводимости фиксированы на каждом цикле; электротермическая температурная обратная связь поступает через локальный источник Зеебека типа E b_TE(T). Поэтому обозначения не подразумевают зависимости C, G или сопротивлений ветвей от температуры в реализации V53–V53.3.

$$E_S,i(T_h,i,\ T_c,i) = \int (T_c,i \ldots T_h,i)\ \alpha_E(T)\ dT, \quad I_i = (V_T,i - V_T,i+1 + E_S,i) / R_i$$

Физический ток I_i, получаемый из MNA, используется без искусственной инверсии знака. Локальная мощность Пельтье вычисляется через П(T) = α(T)·T и тот же ток, который получен из заряженного коммутационного поля.

$$Q_П,h,i = -П(T_h,i) \cdot I_i, \quad Q_П,c,i = +П(T_c,i) \cdot I_i$$

Теплоёмкости вычисляются по композиту хромель/константан и по плотности, теплоёмкости и геометрии меди G в конечно-объёмной схеме: C_th,j = ρ_j·c_p,j·V_j; кондуктивные связи K_jk = k·A/Δx. Диэлектрические слои дают вклад в локальную теплопроводность ТЭ–G, но не представлены независимыми состояниями теплоёмкости диэлектрика; это явное ограничение формы модели, особенно существенное для керамических диэлектриков с высокой k. Таким образом, время тепловой реакции возникает из представленной физической сети, а не накладывается как независимое τ. Наложенная разность температур между горячим и холодным резервуарами обозначается ΔT_res, а средняя разность температур спаев в конечно-объёмной модели ТЭ — ⟨ΔT_TE(t)⟩; эти величины не обязаны совпадать. На каждом шаге по времени обновлённые температуры изменяют E_S,i и тем самым замыкают обратную связь I(t) ↔ T(t).

$$[C/h + G(S,\ T\text{^}n)] \cdot v\text{^}(n+1) + B_L \cdot i_L\text{^}(n+1) = C \cdot v\text{^}n/h + b_TE(T\text{^}n)$$

Реализация использует неявную схему Эйлера и разреженную факторизацию для электрического решения, за которой следует конечно-объёмное обновление температуры и пересчёт локального вектора источников Зеебека. В прецизионном подтверждении шаги по времени на импульсе и на считывании уменьшаются вдвое относительно стандартного подтверждения, что позволяет проверить устойчивость причинных признаков и энергетических остатков к шагу по времени.

Для диэлектрика с утечкой в V53.2–V53.3 заменено ранее некорректное требование обращения в нуль суммарного тока K2. Физически заряженное стационарное состояние может иметь конечный ток утечки. Поэтому сходимость зарядки оценивается по току смещения ёмкостной части и по скорости изменения энергии конденсаторов:

$$\varepsilon_I = max_j\ |C_j \cdot dV_C,j/dt| \ / \ I_кз \to 0, \quad \varepsilon_E = |dE_C/dt| \ / \ P_ref \to 0$$

Остаточная утечка сообщается отдельно и допускается, когда ε_I и ε_E удовлетворяют пределам сходимости. Это исправление модели, а не ослабление реверсивных критериев или причинного решения.

Строгий сквозной критерий V53/V53.3 представляет собой логическую конъюнкцию G1 ∧ G2 ∧ G3 ∧ G4 ∧ G5 ∧ G6. Для совместимого с утечкой подтверждения V53.3 критерий G1 требует нормированного тока смещения $\varepsilon_I \le 5\cdot10^{-5}$ и нормированной скорости энергии конденсаторов $\varepsilon_E \le 5\cdot10^{-5}$ на восьми последовательных этапах зарядки; остаточная утечка постоянного тока допускается. G2 требует $f_{sim,max} \ge 0{,}75$ и $f_{rev,mean} \ge 0{,}01$; G3 — ёмкостный эквивалент обратного тока $\ge 0{,}002\cdot I_{кз}$; G4 — специфичную для Пельтье записанную среднюю $\Delta T \ge 1\cdot10^{-7}$ К; G5 — превышение послеимпульсной нагрузки над согласованным контролем без Пельтье $\ge 1\cdot10^{-14}$ Дж; G6 — относительные остатки первого закона $\le 5\cdot10^{-3}$ как по электрической, так и по тепловой части. На этапе зарядки без утечек в базовой V53 использовалось более раннее правило сходимости: максимальный ток ТЭ/К2 падает ниже $5\cdot10^{-5}\cdot I_{кз}$ в течение пяти последовательных шагов. Эти численные пороги фиксируются перед каждым подтверждающим прогоном и не изменяются после просмотра результата.

4. Результаты I — причинная регенерация состояния Пельтье–Зеебека

Кампания изоляции механизма N = 500 содержит 43 008 уникальных состояний, охватывающих четыре разности температур, две архитектуры накопления, семь нагрузок, три глубины активной кромки, четыре времени граничной релаксации, четыре амплитуды обратного тока, четыре длительности короткого импульса и четыре длительности считывания. Форма обратного тока в этом слое является явным входом модели; поэтому на данной стадии проверяется термоэлектрический и тепловой причинный механизм, а не способность конкретной коммутационной цепи создавать ток.

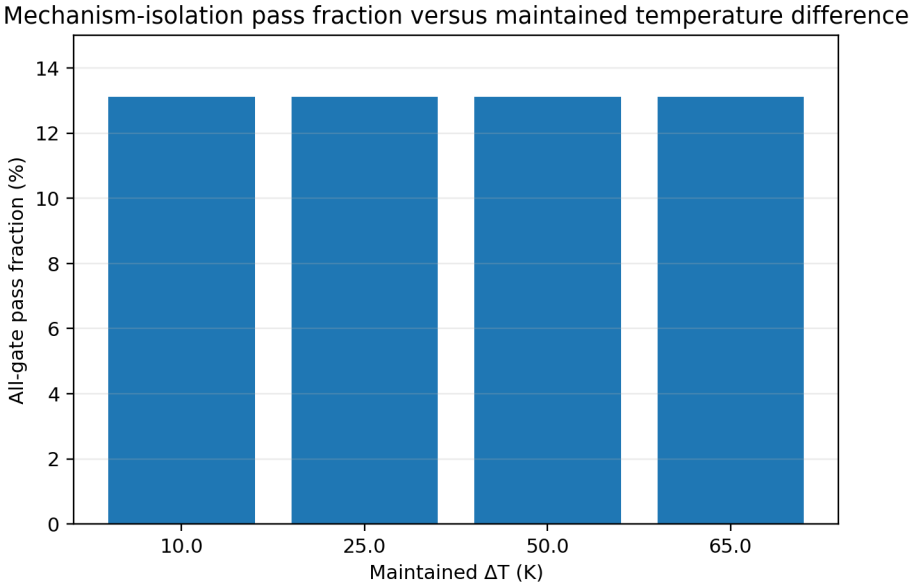


Рисунок 5. Доля состояний, прошедших все критерии, в кампании изоляции механизма (43 008 состояний) в зависимости от поддерживаемой разности температур. Доля инвариантна по проверенным значениям ΔT, тогда как абсолютные тепловые и электрические величины растут с ΔT.

Таблица 5. Статистика прохождения всех критериев в кампании изоляции механизма (43 008 состояний) в зависимости от ΔT.

dT, К	Состояний	Прошли все критерии	Доля прохождения	max d(dT), мК	max избыток нагрузки по Пельтье, нДж
10	10 752	1 410	13,1138 %	1,2413	0,01726
25	10 752	1 410	13,1138 %	3,2517	0,11557
50	10 752	1 410	13,1138 %	7,0129	0,51676
65	10 752	1 410	13,1138 %	9,5241	0,93148

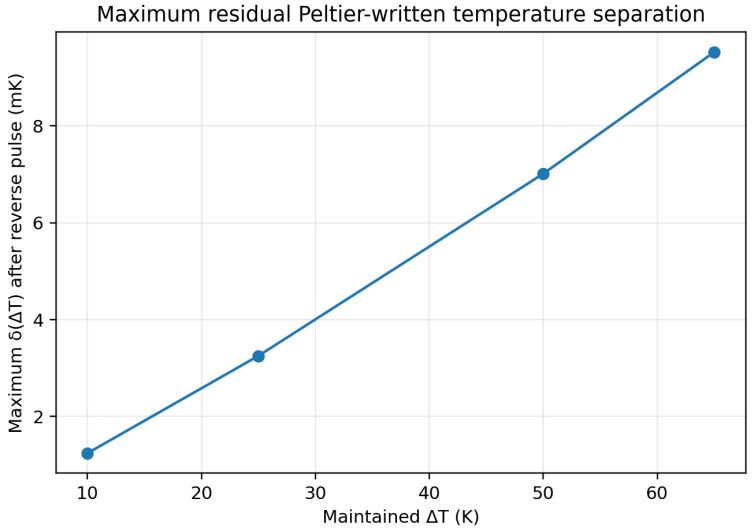


Рисунок 6. Максимальное остаточное приращение разделения температур после обратного импульса; сильнейшее состояние достигает 9,52408 мК при ΔT = 65 К.

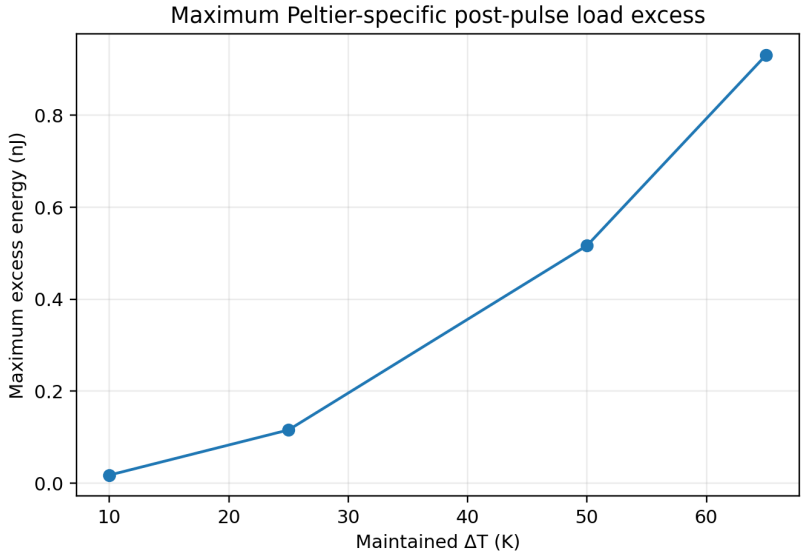


Рисунок 7. Максимальное приращение послеимпульсной нагрузки, обусловленное Пельтье, относительно исходного контроля без Пельтье; сильнейшее значение 0,93148 нДж при ΔT = 65 К.

При ΔT = 65 K сильнейшее состояние теплового разделения даёт δT_h = +6,18668 мК и δT_c = −3,33740 мК сразу после обратного импульса, то есть δ(ΔT) = 9,52408 мК. Сильнейший исходный электрический результат, специфичный для Пельтье, достигается при обратном импульсе 2·I_кз длительностью 5 мс, глубине активной кромки 20 мкм, τ = 0,3 с, R_load = 3 Ом и считывании 5 мс. Превышение послеимпульсной нагрузки над глобальным контролем без Пельтье составляет $9{,}31478 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Независимый поэтапный аудит отвечает на более строгий причинный вопрос. Контрольный опыт получает идентичный обратный ток и идентичную историю джоулева нагрева, но связь Пельтье отключается только на время обратного импульса и восстанавливается при последующем считывании по Зеебеку. Все 32 сильнейших исходных состояния остаются положительными. Для сильнейшего состояния разность, специфичная для этапа, составляет $1{,}24428 \cdot 10^{-9}$ Дж; в верхушке из 32 состояний она изменяется от $3{,}70098 \cdot 10^{-10}$ до $1{,}24428 \cdot 10^{-9}$ Дж. Это подтверждает интерпретацию, согласно которой само короткоимпульсное действие Пельтье записывает состояние, изменяющее более поздний электрический отклик.

Полученный результат не является повышением эффективности. Максимальная возвращённая доля составляет $8{,}57237 \cdot 10^{-7}$, то есть 0,857 миллионных долей энергии, затраченной наложенным обратным импульсом.

Абсолютные масштабы сигналов следует явно сопоставить с поддерживаемой разностью температур и запасённой энергией. Максимальное остаточное разделение δ(ΔT) = 9,52408 мК при рабочем ΔT = 65 K составляет лишь $\sim 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ от поддерживаемой разности, а максимальная специфичная для Пельтье добавочная энергия нагрузки (0,93148 нДж) примерно на шесть порядков ниже энергии, запасённой в конденсаторах (единицы миллиджоулей). Возврат энергии (не более 0,857 ppm) лежит далеко за пределами любого режима, в котором можно было бы заявлять рекуперацию энергии или выигрыш по КПД. Следовательно, никакой термодинамической «регенерации энергии» не происходит: научное содержание состоит в управляемом переходном состоянии термоэлектрической системы и топологическом синтезе обратного тока, а не в энергетическом цикле. В названии формулировка «регенерация состояния» относится к восстановлению контролируемого состояния, а не к возврату энергии.

Таким образом, научная ценность этого слоя — контроль причинного состояния, а не повышение термодинамической эффективности в моделируемой геометрии. Рисунки 6 и 7 соединяют четыре расчётные точки по разности температур только как направляющие для глаза; они не устанавливают непрерывного закона масштабирования или степенной зависимости от ΔT.

5. Результаты II — динамическая распределённая зарядка и базовая передача LMUG

Следующий слой снимает наложенный обратный ток и решает распределённую электрическую сеть напрямую. Зарядка K2 начинается с нулевого напряжения конденсаторов и динамически сходится. При ΔT = 65 K сеть N = 500 запасает 4,0564 мДж. Распределённый профиль содержит примерно одну треть энергии, которую можно было бы предсказать, приписав каждому конденсатору полное напряжение U_xx, что ожидаемо для почти линейного профиля напряжения вдоль цепи.

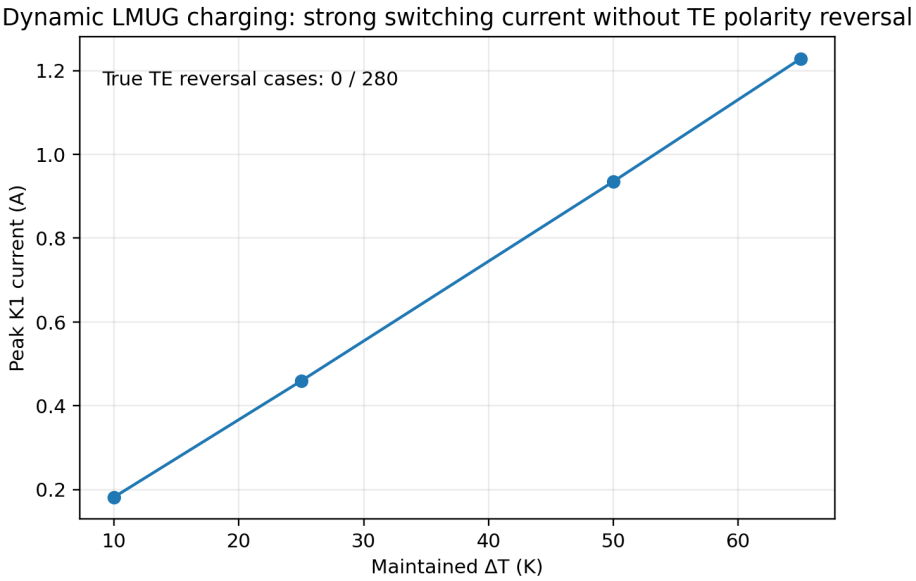


Рисунок 8. Максимальный ток K1 в зависимости от ΔT при аудите полярности базовой динамической схемы LMUG. Коммутационный ток велик, но ни в одном из 280 случаев полярности не обнаружено обращения последовательного тока ТЭ.

Таблица 6. Динамическая зарядка распределённой ёмкости и характеристики базовой передачи в зависимости от ΔT.

dT, K	Запасённая энергия, мДж	Пик K1, A	Пик в сегменте G, A	Минимальный средний ток ТЭ, мА
10	0,0887	0,1817	0,1792	1,6206
25	0,5670	0,4593	0,4529	4,0969
50	2,3509	0,9353	0,9223	8,3425
65	4,0564	1,2286	1,2115	10,9583

При 65 K ток K1 достигает 1,2286 A, тогда как естественный I_кз составляет лишь около 17,45 мА, однако последовательный ток ТЭ ни разу не меняет знак. Сильный импульс преимущественно циркулирует через низкоимпедансный контур G и ключей. Это локализует узкое место на уровне устройства как проблему маршрутизации тока, а не недостатка запасённой электрической энергии.

Связанный набор из 960 состояний подтверждает тот же результат по полярности: полной обратной цепи Пельтье не возникает. Вклад Пельтье в ΔT остаётся отрицательным во всех этих случаях, поскольку ток ТЭ сохраняет генерирующий знак. При этом выход заряженных конденсаторов превышает уровень незаряженного контроля в 960 случаях из 960, а максимальная разница по энергии нагрузки составляет 0,499681 мДж. Следовательно, импульсное согласование энергии в модели реально существует, но его следует отличать от регенерации состояния Пельтье.

6. Результаты III — частичный обратный ток ТЭ, управляемый топологией

Далее поиск по 12 топологиям проверяет явные перекрёстные связи между координатами ТЭ и G. Строгий критерий успеха требует широкого и существенного обращения и намеренно более требователен, чем просто наличие любого отрицательного тока ветви. Ни одно из 2400 состояний не проходит строгий почти глобальный критерий полярности. Однако частичный обратный ток широко

распространён в семействах с перекрёстными связями: 1200 состояний имеют ненулевое время обратного тока ветвей, а 1104 удовлетворяют более сильному критерию обращения с добавлением конденсатора.

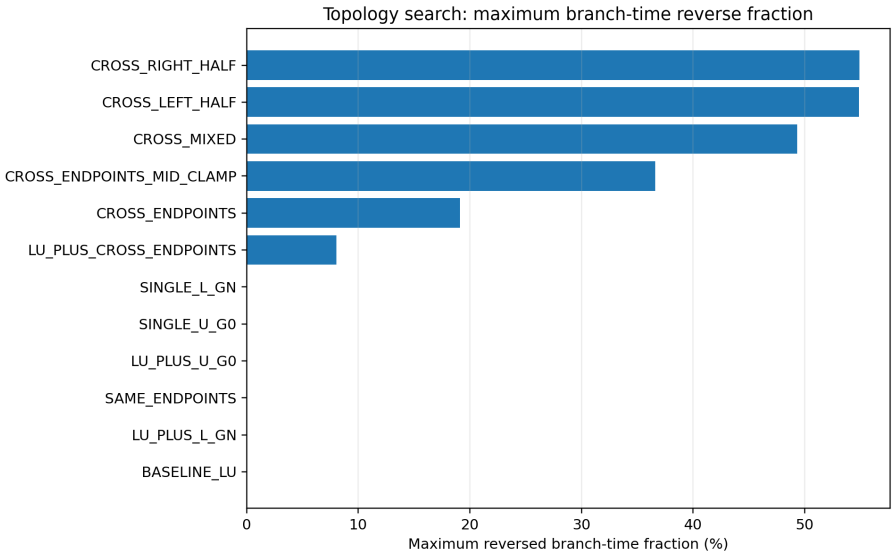


Рисунок 9. Наилучшая доля времени обратного тока ветвей для каждого из 12 проверенных топологических семейств. Полуцепные и смешанные перекрёстные связи расширяют пространственную протяжённость обратного тока.

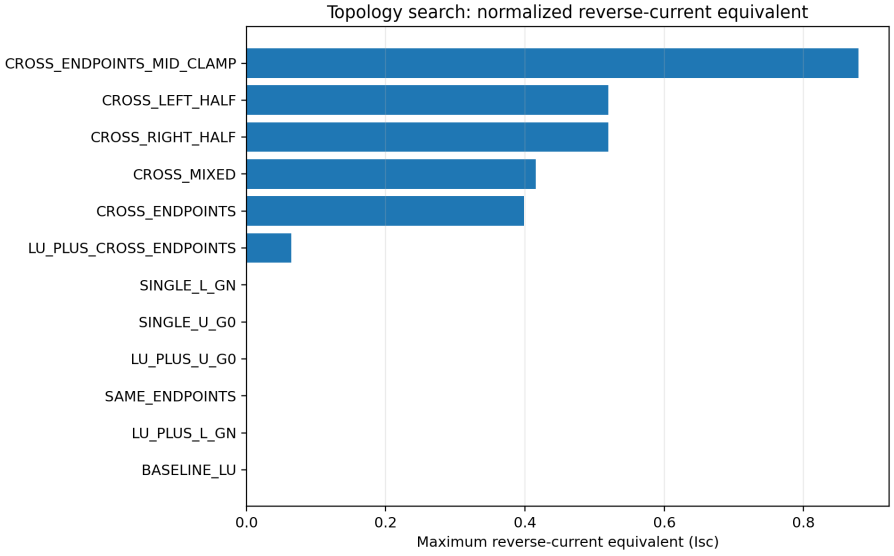


Рисунок 10. Наилучший нормализованный эквивалент обратного тока для каждой топологии. CROSS_ENDPOINTS_MID_CLAMP даёт наибольшую интегральную локальную силу обратного тока, тогда как перекрёстные схемы с полуцепью обеспечивают более широкий охват.

Таблица 7. Результаты по обратному току для двенадцати семейств топологии перекрёстных связей: состояния с обращением, прохождение критерия с конденсатором, лучший обратный эквивалент и лучшее время обращения ветвей.

Топология	Состояний с обращением	Прошли критерий с конденсатором	Лучший обратный эквивалент (I_кз)	Лучшее время обращения ветвей

CROSS_RIGHT_HALF	200	200	0,5200	54,90 %
CROSS_LEFT_HALF	200	200	0,5200	54,84 %
CROSS_MIXED	200	200	0,4158	49,34 %
CROSS_ENDPOINTS_MID_CLAMP	200	200	0,8787	36,62 %
CROSS_ENDPOINTS	200	200	0,3983	19,11 %
LU_PLUS_CROSS_ENDPOINTS	200	104	0,0645	8,03 %

Принципиальное научное изменение в этом слое состоит в том, что обратный ток порождается самой заряженной распределённой схемой, а не предписывается извне. CROSS_ENDPOINTS_MID_CLAMP даёт нормализованный эквивалент обратного тока 0,878714·I_кз. CROSS_RIGHT_HALF обеспечивает 54,8966 % времени обращения ветвей. Метрика обращения по нижнему децилю остаётся нулевой, поэтому данные подтверждают перенос локального (частичного) обратного тока, но не когерентное обращение почти всей последовательной цепи.

7. Результаты IV — синтез пространственной коммутации в восстановленном блоке N = 100

Заключительный электрический оптимизатор использует 100 пар термопар, так что задаваемые координаты коммутации соответствуют непосредственно индексам пар. Исследуются семь пространственных окон: 20–100 %, 40–100 %, 60–100 %, 80–100 %, 20–40 %, 20–60 % и 20–80 %. Каждое окно проверяется как чистый cross, cross + зажим средней точки и cross + два зажима четвертных точек (DUALQ). Перебираются обе полярности зарядки K2, пять сопротивлений ключа (от 1 мОм до 0,1 Ом) и широкая временная сетка от 50 мкс до 10 мс; сильнейшие группы затем уточняются геометрически на временах до 20 мс.

Укрупнённые и уточнённые таблицы содержат 2020 строк. После точной дедупликации перекрывающихся состояний параметров независимый аудит находит 1993 уникальных состояния при 65 К. Из них 187 удовлетворяют широкому критерию обращения не менее 80 %, а 169 обеспечивают отрицательный пространственно-средний ток ТЭ на ненулевом интервале. Ни одно состояние не удовлетворяет почти глобальному критерию не менее 95 %.

При полном переборе максимальная доля одновременно обращённых ветвей составляет 0,80; не менее одного раза обращаются 0,89 ветвей; максимальная доля времени обращения ветвей составляет 0,797605; максимальная доля длительности импульса с отрицательным пространственно-средним током ТЭ — 0,971503. Критерий 95 % не достигнут. Полученный потолок 80 % относится к проверенному пространственному семейству и не устанавливает математической верхней границы.

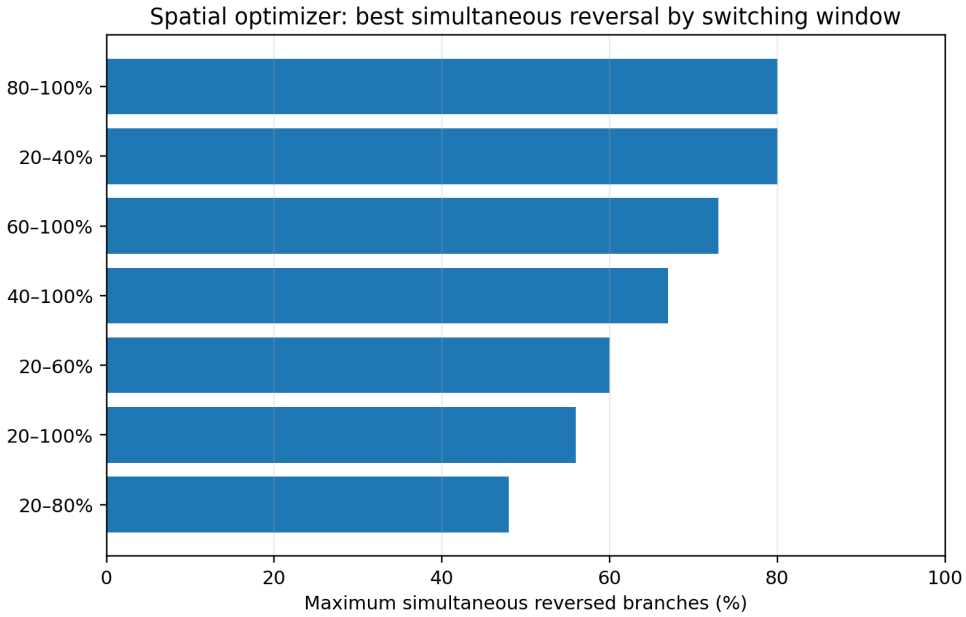


Рисунок 11. Наилучшая доля одновременно обращённых ветвей по пространственному окну при лучшем из трёх стилей зажима. Окна 80–100 % и 20–40 % — единственные из заданных, достигающие 80 % одновременного обращения.

7.1. Прецизионные режимы, значимые для прототипа

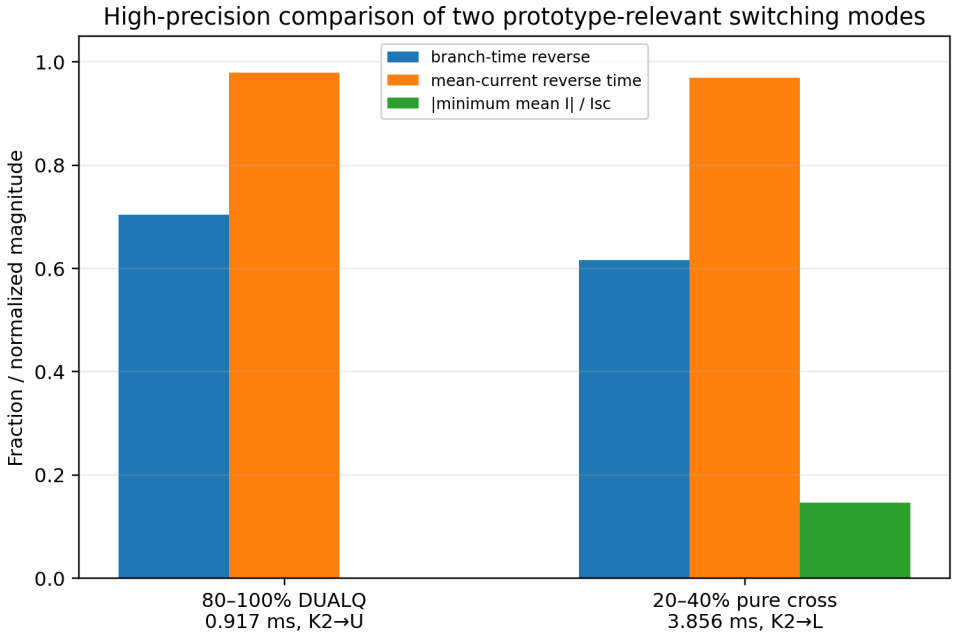


Рисунок 12. Прецизионное сравнение двух взаимодополняющих режимов-кандидатов (доли и нормированные амплитуды: обращение по времени ветвей, обращение среднего тока по времени, минимум |средний ток|/I_кз). Режим 80–100 % DUALQ (0,917 мс, K2→U) электрически экономичен и поддерживает слегка отрицательный средний ток почти на всём импульсе; режим 20–40 % с чистым cross (3,856 мс, K2→L) даёт существенно более глубокое обращение среднего тока.

Таблица 8. Прецизионное сравнение экономичного режима 80–100 % DUALQ и сильного режима 20–40 % с чистым cross.

Метрика	Экономичный 80–100 % DUALQ	Сильный 20–40 % чистый cross
Сторона зарядки K2	U	L
Сопротивление ключа	0,10 Ом	0,10 Ом
Длительность импульса	0,917 мс	3,856 мс
Максимальное одновременное обращение	80,0 %	80,0 %
Ветвей обращены хотя бы один раз	88,0 %	89,0 %
Доля времени обращения ветвей	70,45 %	61,65 %
Доля времени обращения среднего тока	97,95 %	96,98 %
Минимальный средний ток	-0,00103 I_кз	-0,14670 I_кз
Средний обратный эквивалент	0,1848 I_кз	0,2999 I_кз
Высвобожденная энергия конденсаторов	7,86 %	55,57 %
Обратный заряд / высвобожденная энергия	1,155 Кл/Дж	1,114 Кл/Дж
Пиковый ток ключа	0,415 A	0,940 A
Электрический остаток	0,0157 %	0,0528 %

Экономичный режим 80–100 % DUALQ достигает того же 80 % одновременного обращения, высвобождая лишь 7,86 % запасённой энергии конденсаторов, и ограничивает пиковый ток ключа в прецизионном расчёте значением 0,415 A. Его пространственно-средний ток отрицателен в течение 97,95 % импульса, но самое глубокое обращение среднего тока невелико (−0,00103·I_кз). Режим 20–40 % с чистым cross требовательнее: он высвобождает 55,57 % запасённой энергии и достигает пикового тока ключа 0,940 A, но пространственно-средний ток доходит до −0,1467·I_кз, что делает его более убедительным кандидатом для сильной записи Пельтье.

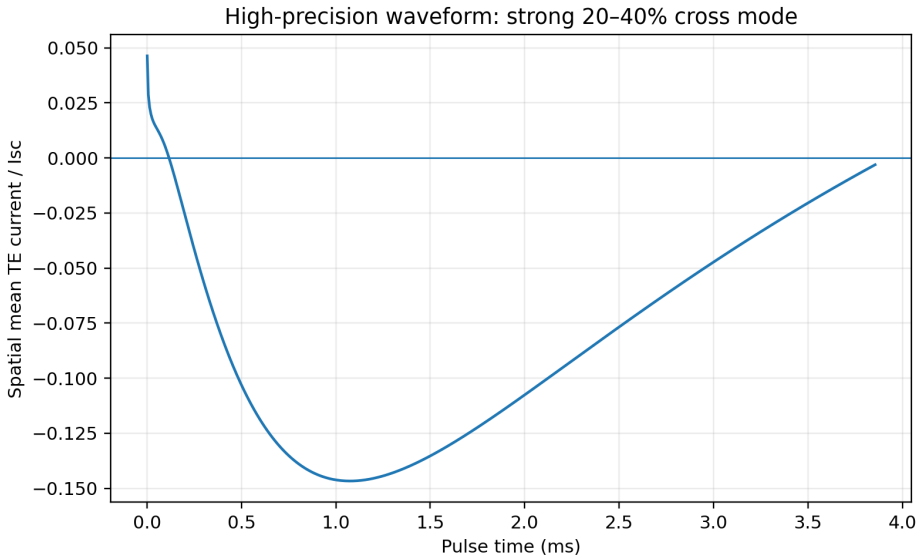


Рисунок 13. Прецизионная осциллограмма сильного финалиста — режима 20–40 % с чистым cross: пространственно-средний ток ТЭ переходит через нуль и остаётся отрицательным на большей части импульса, после чего восстанавливается в сторону естественного направления генерирования.

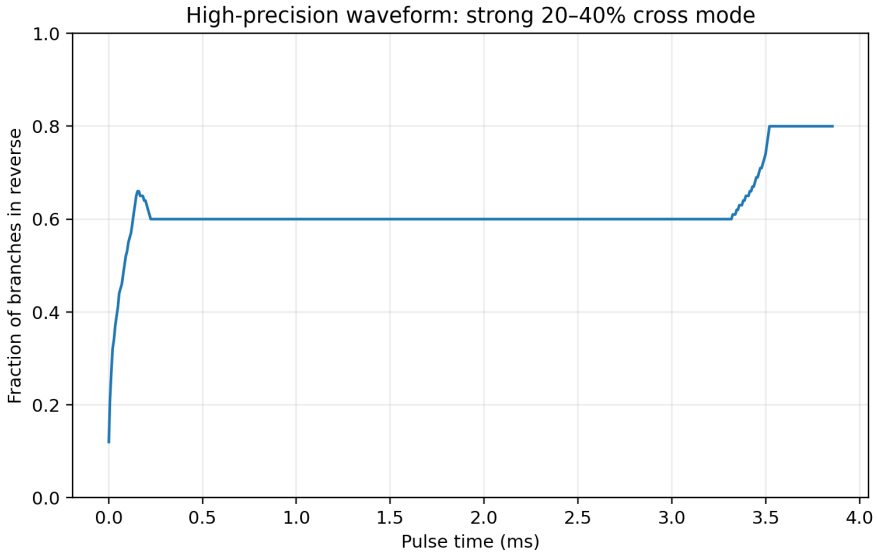


Рисунок 14. Доля из 100 ветвей, одновременно находящихся в обратном направлении, в течение того же прецизионного импульса 20–40 %: широкая область обращения развивается быстро и достигает 80 %.

7.2. Масштабирование по температуре

Ведущие состояния коммутации повторно рассчитываются при ΔT = 10, 25, 50 и 65 К. Нормированная геометрия обращения практически инвариантна к этим четырём значениям: лучшая доля одновременного обращения остаётся равной 0,80, а самая глубокая нормированная инверсия среднего тока — около −0,1456·I_кз в проверочном наборе. Абсолютный масштаб токов определяется Зеебеком. Это подтверждает интерпретацию, согласно которой в линейной электрической модели коммутационная топология и RC-структура определяют нормированную пространственную картину, тогда как ΔT задаёт прежде всего абсолютный масштаб тока.

Таблица 9. Масштабирование по температуре для ведущих состояний коммутации: доли обращения и пиковый ток ключа при ΔT = 10…65 К.

dT, К	max одновременное обращение	max время обращения ветвей	max время обращения среднего тока	Наиболее глубокий средний I/I_кз	max пиковый ток ключа, А
10	80,0 %	72,27 %	97,15 %	-0,1456	0,071
25	80,0 %	72,27 %	97,15 %	-0,1456	0,179
50	80,0 %	72,27 %	97,15 %	-0,1456	0,364
65	80,0 %	72,27 %	97,15 %	-0,1456	0,479

Для устранения кажущегося расхождения уточним: значение 0,940 А (раздел 7.1) относится к единственному прецизионному финалисту 20–40 % с чистым cross при ΔT = 65 К, тогда как значение 0,479 А (раздел 7.2) — максимальный пиковый ток ключа в отдельном проверочном наборе масштабирования по температуре, который включает другой выбранный набор состояний и поэтому не должен совпадать с прецизионным пиком. Оба значения согласуются с соответствующими наборами данных и не противоречат друг другу.

8. Научный синтез: что подтверждено и что остаётся открытым

Вычислительный корпус теперь поддерживает непрерывное, но всё ещё ограниченное научное повествование. Реальный обратный ток ТЭ способен записать знаковое тепловое состояние Пельтье и изменить более поздний отклик Зеебека. Распределённая термоэлектрическая ёмкостная сеть способна динамически заряжаться и выдавать сильный импульсный ток. Коммутация выводов по базовой схеме не приводит к автоматическому обращению цепи ТЭ, но пространственная коммутация с перекрёстными связями может создать подлинный обратный ток ветвей, управляемый конденсатором. Пространственная оптимизация в уменьшенном блоке способна дополнительно провести средний ток цепи через нуль, при этом до 80 % ветвей обращаются одновременно.

Эти результаты образуют причинную лестницу: каждый из четырёх уровней изолирует и проверяет отдельное физическое звено. Слои «механизм–изоляция» и «топология–синтез» взаимно согласованы по знаку и назначению, однако сами по себе они не образуют единой замкнутой траектории. Это замыкание обеспечивается унифицированной электротермической моделью с разрешением по парам, описанной в разделе 8.1, в которой токи ветвей, порождаемые топологией, непосредственно управляют локальными слагаемыми Пельтье, а результирующее температурное поле возвращается в зависящие от температуры ЭДС Зеебека типа E в пределах одной траектории. Поэтому первые четыре раздела устанавливают отдельные причинно-следственные связи, а раздел 8.1 демонстрирует их совместную работу в расчёте на уровне одного устройства.

Таблица 10. Матрица «утверждение–доказательство» четырёхуровневой вычислительной программы.

Научное утверждение	**Статус аудита**	**Доказательства**
Реальный обратный импульс ТЭ может создать знаковое тепловое разделение Пельтье и положительное приращение отклика Зеебека после импульса в сосредоточенной электротермической модели	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ В МОДЕЛИ	V49: 43 008 состояний; 5640 проходят все три исходных критерия; 32 сильнейших проходят также поэтапный аудит с отключением Пельтье только на время импульса
Геометрия длинной фольги автоматически даёт полезный энергетический выигрыш	НЕ ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ	V49: максимальная возвращённая доля Пельтье менее 1e-6 от энергии обратного импульса; умножения чистой энергии не наблюдается
Базовая динамически заряженная последовательная схема коммутации LMUG обращает ток последовательной цепи ТЭ	НЕ ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ	V50.2: 0 из 280 случаев полярности; 0 из 960 полностью связанных цепей
Распределённая ёмкость способна доставить значительную импульсную энергию в электрическую сеть и нагрузку	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ В МОДЕЛИ	V50.2: пиковый ток K1 1,2286 A при 65 K; выход заряженных конденсаторов превышает незаряженный контроль в 960 из 960 случаев (этап B); максимальное превышение 0,499681 мДж
Топологии коммутации с перекрёстными связями способны создать подлинный обратный ток ветвей ТЭ, управляемый конденсатором	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ В МОДЕЛИ	V51: 1200 из 2400 состояний имеют ненулевое время обращения ветвей; 1104 проходят более сильный критерий с добавленным конденсатором
Оптимизация пространственной коммутации способна провести пространственно-усреднённый ток ТЭ через нуль в уменьшенном блоке N = 100	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ В МОДЕЛИ	V52.1: NET_MEAN_CHAIN_REVERSAL_FOUND = True; прецизионный X020_040_NONE достигает минимального среднего тока -0,1467 I_кз, а X080_100_DUALQ удерживает отрицательный средний ток около 97,95 % импульса
Продемонстрировано почти глобальное одновременное обращение не менее 95 % ветвей ТЭ	НЕ ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ	V52.1: максимальная доля одновременного обращения 0,80;

		NEAR_GLOBAL_95PCT_FOUND = False
Точная оптимальная длительность импульса, найденная для N = 100, переносится непосредственно на устройство с 500 или 2000 парами	НЕ УСТАНОВЛЕНО	V52.1 явно уменьшена до N = 100; временные масштабы RC зависят от N и паразитов
Экспериментально проверены рабочие характеристики или эффективность оборудования	НЕ УСТАНОВЛЕНО	Все решающие кампании вычислительные; индуктивность, частотная зависимость ESR, дребезг контактов, пробой, трёхмерный электротермический МКЭ и аппаратные допуски остаются за пределами заключительного оптимизатора

8.1. Результаты V — унифицированное сквозное замыкание при N = 100 (V53)

V53 непосредственно закрывает главный причинный разрыв предыдущей четырёхуровневой программы. Режим 20–40 % pure-cross STRONG заряжается динамически от нулевого напряжения конденсаторов и затем рассчитывается с локальными токами ветвей, слагаемыми Пельтье, температурным состоянием конечного объёма, термозависимыми источниками Зеебека и послеимпульсной нагрузкой, связанными в единой траектории. Обратный ток не задаётся. В прецизионном подтверждении N = 100 при ΔT_res = 65 K 80,0 % ветвей ТЭ обращаются одновременно, а пространственно-средний ток ТЭ отрицателен в течение 96,99 % импульса длительностью 3,856 мс. Нормированный эквивалент обратного тока равен 0,284288·I_кз. Соответствующее вычитание варианта без Пельтье даёт положительную среднюю разность температур, записанную Пельтье, +32,369 мкК, из которых +15,24 мкК сохраняется к концу окна считывания; превышение причинной послеимпульсной нагрузки, обусловленное Пельтье, составляет +2,908 пДж. Все шесть реализованных причинных критериев пройдены. Прецизионный электрический остаток первого закона равен 0,2348 %, тепловой остаток — примерно $1{,}8\cdot10^{-12}$ в относительных единицах.

Таблица 11. Прецизионный результат унифицированной модели V53 при N = 100, режим STRONG.

Метрика	**Прецизионный результат**
Топология / импульс	X020_040_NONE; K2→L; R_switch = 0,10 Ом; 3,856 мс
Максимальная доля одновременно обращённых ветвей	80,0 %
Доля времени с отрицательным пространственно-средним током ТЭ	96,99 %
Эквивалент обратного тока	0,284288 I_кз
Средняя запись dT, специфичная для Пельтье	+32,369 мкК
Остаточная dT, специфичная для Пельтье, после считывания	+15,24 мкК
Превышение послеимпульсной нагрузки над вариантом без Пельтье	+2,908 пДж
Энергия нагрузки по сравнению с вариантом без коммутации	отрицательная разность; выигрыш энергии не заявляется
Сквозной вердикт	PASS: G1–G6 все TRUE

Дальнейший отрицательный контроль остаётся важным для интерпретации: суммарная энергия послеимпульсной нагрузки ниже, чем на траектории без коммутации. Поэтому V53 подтверждает запись управляемого переходного состояния, а не приращение электрической энергии сети.

Причинной величиной является небольшая парная разность EXP − NO_PELTIER, тогда как гораздо больший вклад передачи конденсаторов удаляется контрольными опытами.

8.2. Результаты VI — испытание ограниченного масштабирования при N = 500 (V53.1)

V53.1 переносит те же унифицированные уравнения на N = 500 без повторного поиска по топологии. Для топологии 20–40 % STRONG прецизионный случай 32 мс динамически запасает 3,6465 мДж, создаёт ёмкостный эквивалент обратного тока 0,368199·I_кз и удерживает пространственно-средний ток ТЭ отрицательным в течение 91,47 % импульса. Специфичное для Пельтье записанное состояние составляет +174,12 мкК, а после считывания остаётся +59,48 мкК; согласованное превышение причинной послеимпульсной нагрузки составляет +0,593 нДж. Таким образом, причинная последовательность «накопление → порождаемый топологией обратный ток → запись Пельтье → зависящая от температуры обратная связь Зеебека → послеимпульсный отклик» сохраняется и при N = 500.

Однако максимальная доля одновременно обращённых ветвей составляет 65,2 %, что ниже заранее заданного порога не менее 75 % для широкого обращения. Следовательно, формальный составной флаг END_TO_END_CAUSAL_CHAIN_SUPPORTED остаётся FALSE, даже если критерии G1, G3, G4, G5 и G6 равны TRUE. Порог 75 % намеренно не снижается после просмотра результата. Это разделяет два утверждения, которые не следует объединять: причинное масштабирование подтверждается, тогда как неизменное широкое пространственное обращение при переходе от N = 100 к N = 500 не подтверждается.

Таблица 12. Прецизионный результат масштабирования STRONG при N = 500 (V53.1).

Метрика	N = 500, STRONG	Интерпретация
Импульс / топология	32 мс; X020_040_NONE	ограниченное подтверждение, а не новый поиск
Одновременно обращённые ветви	65,2 %	ниже заданного порога 75 %
Доля времени с отрицательным средним током	91,47 %	ток цепи меняет направление на большей части импульса
Обратный эквивалент	0,368199 I_кз	управляется конденсатором; незаряженный контроль = 0
Средняя dT записи Пельтье	+174,12 мкК	знаковая тепловая запись сохраняется
Остаточная dT после считывания	+59,48 мкК	конечная тепловая память
Превышение нагрузки после импульса	+0,593 нДж	положительный результат относительно согласованного варианта без Пельтье
Составной строгий вердикт	FALSE	не выполнен критерий широкого обращения G2

8.3. Результаты VII — проверка совместимых с утечкой материалов с высокой k и строгое подтверждение (V53.2–V53.3)

Начальный анализ чувствительности V53 к диэлектрику показал, что недостаточная распределённая ёмкость способна разрушить полезный знаковый тепловой отклик. Поэтому последующая кампания с высокой k проверяла представительные точки скрининга на основе $BaTiO_3$, а не комбинировала нереально высокую диэлектрическую проницаемость с теплопроводностью уровня полимера. В V53.2 также было исправлено определение сходимости зарядки при конечной утечке и выполнено

только ограниченное сканирование по времени. Это сканирование выявило два фиксированных состояния, которые уже достигали 80 % одновременного обращения, но требовали более высокого временного разрешения для численного энергетического критерия: точка типа X7S на 10 мс и точка типа X8R на 8 мс. В V53.3 затем пересчитаны только эти заранее выбранные точки на уровнях HP_STANDARD и HP_ULTRA; время стробирования и импульса не изменялось после того, как результат стал известен.

При HP_ULTRA точка типа X7S (ε_r = 3285, k = 2,9 Вт/(м·К)) достигает 80,0 % одновременного обращения, 96,13 % времени отрицательного среднего тока, обратного эквивалента 0,280867·I_кз, средней записи Пельтье +35,273 мкК, остатка после считывания +18,684 мкК и превышения причинной нагрузки +7,042 пДж при электрическом остатке 0,0622 %. Точка типа X8R (ε_r = 2465, k = 2,9 Вт/(м·К)) достигает 80,0 %, 90,14 %, 0,273879·I_кз, +27,857 мкК, +14,946 мкК и +5,801 пДж соответственно при остатке 0,0842 %. Обе точки удовлетворяют критериям G1–G6 при сохранённом пороге одновременного обращения не менее 75 %.

Таблица 13. Строгие прецизионные подтверждения HP_ULTRA для представительных материалов с высокой k (V53.3).

Метрика	**Тип X7S**	**Тип X8R**
Диэлектрическая проницаемость / теплопроводность	3285 / 2,9 Вт/(м К)	2465 / 2,9 Вт/(м К)
Фиксированный импульс	10 мс	8 мс
Время зарядки K2	0,27025 с	0,20350 с
Запасённая энергия	73,64 мкДж	55,1 мкДж
Установившийся ток утечки	0,423 мкА	1,905 мкА
Максимальное одновременное обращение	80,0 %	80,0 %
Доля времени отрицательного среднего тока	96,13 %	90,14 %
Обратный эквивалент	0,280867 I_кз	0,273879 I_кз
Средняя dT записи Пельтье	+35,273 мкК	+27,857 мкК
Остаточная dT после считывания	+18,684 мкК	+14,946 мкК
Причинное превышение после импульса	+7,042 пДж	+5,801 пДж
Электрический остаток	0,0622 %	0,0842 %
Строгий вердикт	PASS	PASS

Эти ряды являются представительными точками скрининга семейства материалов, а не экспериментальной аттестацией конкретной промышленной партии диэлектриков. Значения ε_r, тангенса диэлектрических потерь и удельного сопротивления по постоянному току, использованные для этих точек, основаны на данных по керамике X7S и X8R, приведённых Zhang et al. [8]; представительная теплопроводность k = 2,9 Вт/(м·К) взята из данных Murata для керамики $BaTiO_3$ с высокой диэлектрической проницаемостью для многослойных керамических конденсаторов [9]. Таким образом, эти электрические и тепловые значения образуют основанную на литературе композитную точку скрининга, а не единый совместно измеренный образец. Murata также приводит представительную удельную теплоёмкость около 0,45 Дж/(г·К) для этого класса керамики [9]; при этом теплоёмкость диэлектрика не представлена в настоящей конечно-объёмной модели как независимое тепловое состояние. Удельное сопротивление по постоянному току вводится в модель

утечки во временной области, тогда как приводимые значения тангенса потерь являются только метаданными. Частотно-зависимая комплексная диэлектрическая проницаемость, тангенс диэлектрических потерь, эквивалентное последовательное сопротивление и полезависимое сегнетоэлектрическое поведение остаются за пределами настоящей модели. Поэтому адекватным требованием является устойчивость к физически более правдоподобным комбинациям ε_r и k в рамках заявленной модели, а не аттестация готового диэлектрического компонента.

8.4. Уточнённая граница доказательности после унифицированных расчётов

Следовательно, научный статус стал уже и сильнее, чем в первоначальном четырёхуровневом изложении. Существование единого вычислительного причинного цикла теперь подтверждено при N = 100; две представительные точки с высоким k при N = 100 проходят полный строгий набор критериев; причинные тепловые и электрические признаки сохраняются при N = 500. Не подтверждаются: неизменное широкое пространственное обращение не менее 75 % при N = 500, почти глобальное обращение не менее 95 %, рабочие характеристики оборудования и выигрыш по КПД. Это различие должно определять всё последующее использование термина «регенерация состояния».

Таблица 14. Обновлённая матрица «утверждение–доказательство» после V53–V53.3.

Научное утверждение	Обновлённый статус	Граница доказательности
Унифицированная причинная связь «топология → Пельтье → Зеебек»	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ В МОДЕЛИ	V53, N = 100; критерии G1–G6 все пройдены
Типовая строгая сквозная петля для материала с высокой диэлектрической проницаемостью	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ В МОДЕЛИ	V53.3, типы X7S и X8R; HP_ULTRA; порог не менее 75 % сохранён
Оценка причинной связи при масштабировании до N = 500	ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ	V53.1: положительная причинная связь «обратный ток – Пельтье – считывание», но 65,2 % одновременного обращения
Широкое обращение не менее 75 % при N = 500	НЕ ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ	не более 65,2 % для прецизионного варианта STRONG
Почти глобальное обращение не менее 95 %	НЕ ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ	не наблюдается в проверенном топологическом семействе
Приращение энергии или выигрыш по КПД	НЕ ПОДДЕРЖИВАЕТСЯ / НЕ ЗАЯВЛЯЕТСЯ	энергия нагрузки остаётся ниже контроля без коммутации; причинные приращения лежат в диапазоне пДж–нДж
Аттестация партии оборудования или материала	ОТКРЫТО	требуются измерения комплексной диэлектрической проницаемости, ESR, контактов, трёхмерного распределения тепла и эксперимент

9. Следствия для проектирования прототипа

Расчёты указывают на два взаимодополняющих экспериментальных режима, а не на единый универсальный оптимум. Состояние 80–100 % DUALQ предпочтительно как низковольтный экономичный режим для первых аппаратных испытаний, поскольку сочетает широкое обращение, малую долю высвобождаемой энергии и умеренный пиковый ток ключа. Состояние 20–40 % с чистым cross предпочтительно как средство управления сильной регенерацией, поскольку создаёт существенно более глубокий отрицательный пространственно-средний ток ТЭ. Проверка обоих

режимов позволила бы напрямую различить, масштабируется ли тепловая запись Пельтье преимущественно с пространственным охватом или с глубиной глобального обратного тока.

Численные настройки кандидатов для прототипа N = 100:

- экономичный режим: cross 80 % ↔ 100 % с двойными четвертными зажимами, K2 заряжается от U, R_switch около 0,1 Ом, длительность импульса 0,9–1,0 мс;
- сильный режим: чистый cross 20 % ↔ 40 %, K2 заряжается от L, R_switch около 0,1 Ом, длительность импульса 3,5–4,0 мс.

Эти значения длительности импульса не являются универсальными константами. Для оборудования с N = 500 или N = 2000 распределённое сопротивление, суммарная ёмкость, сопротивление G, паразитное сопротивление ключей и индуктивность межсоединений изменяют соответствующие масштабы времени RC/RLC. Поэтому процентные координаты являются более переносимой конструктивной переменной, чем абсолютная длительность импульса при N = 100.

9.1. Решающий аппаратный эксперимент

Поэтому первый прототип следует рассматривать как заранее определённый эксперимент по фальсификации, а не как демонстрацию эффективности. Проверке подлежат оба численных кандидата: низковольтный режим 80–100 % DUALQ и режим сильного обращения 20–40 % с чистым cross. Требуется быстрое измерение тока ветвей и синхронизированные измерения температуры и считывания; большой ток в G или в ключе без изменения полярности тока ТЭ не является положительным результатом.

Таблица 15. Решающий аппаратный эксперимент и наблюдаемые результаты.

Этап	Измерение	Решающее наблюдение
Зарядка K2	Профиль напряжения распределённой ёмкости V_C(x, t); ток K2	Установившееся ненулевое запомненное состояние до импульса передачи
Перекрёстный импульс	Токи ветвей I_i(t); токи ключей и токи в G	Физическое обращение знака I_i·I_Seebeck < 0 в прогнозируемой области ветвей
Запись Пельтье	Быстрые T_h(t), T_c(t) или локальные косвенные оценки температуры спаев	Правильный знаковый отклик: dT_h > 0, dT_c < 0 при выбранном соглашении об обратном токе
Послеимпульсное сохранение	dT(t) после размыкания ключа передачи	Ненулевое остаточное d(dT) после существенного затухания электрического тока
Считывание по Зеебеку	Напряжение холостого хода (считывания) и энергия нагрузки	Положительная разность после импульса относительно контроля без короткого замыкания и с изоляцией Пельтье
Контроль причинности конденсатора	Повтор с изначально незаряженными конденсаторами	Управляемая топологией составляющая обратного тока уменьшается или исчезает

10. Ограничения и необходимый следующий уровень валидации

Полученный результат является вычислительным и не должен интерпретироваться как проверка эффективности оборудования. Модель представляет собой модифицированный узловой анализ (MNA) с разрешением по парам плюс одномерные конечные объёмы, а не трёхмерную мультифизическую реализацию. Она учитывает индуктивность сосредоточенного ключа и межсоединения первого порядка, но не распределённую частотно-зависимую паразитную индуктивную сеть. Она также не учитывает частотно-зависимое эквивалентное последовательное

сопротивление конденсаторов, дребезг контактов, пробой диэлектрика, электромагнитную совместимость, детальную термодинамику контактов, трёхмерное распространение тепла и производственные допуски. Помимо зависящей от температуры эталонной функции Зеебека типа E, настоящая реализация не включает температурную зависимость удельного электрического сопротивления, теплопроводности, теплоёмкости, диэлектрической проницаемости и потерь, а также контактных свойств во время импульса. Прецизионное уменьшение шага по времени снижает неопределённость временной дискретизации, но не устраняет неопределённость формы модели.

Пространственный поиск при N = 100 намеренно уменьшен. Он устанавливает принципы пространственной коммутации и возможные процентные окна, а не точный аппаратный оптимум для больших N. И наоборот, слой теплового механизма при N = 500 использует наложенную форму обратного тока и поэтому сам по себе не может доказать, что окончательная оптимизированная электрическая топология создаёт такое же распределение тока в том же оборудовании. Эти ограничения смягчаются унифицированной траекторией, замыкающей причинную цепь «накопление → обратный ток → Пельтье → обратная связь Зеебека → послеимпульсный отклик» в одной модели при N = 100, а также ограниченным тестом масштабирования при N = 500. Тем не менее границу масштабирования следует обозначить точно: при N = 500 причинные признаки сохраняются, но заранее заданное одновременное пространственное обращение не менее 75 % не достигается (максимум 65,2 %), поэтому неизменное широкое пространственное масштабирование от N = 100 к N = 500 не установлено.

Граница «материал–модель» также явная. Представительные подтверждения для материала с высокой диэлектрической проницаемостью используют параметры скрининга литературного уровня, а не данные измеренной партии материала; приводимые значения тангенса диэлектрических потерь являются метаданными, а не решённым частотно-зависимым членом потерь. Частотно-зависимая комплексная диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, эквивалентное последовательное сопротивление, полезависимое сегнетоэлектрическое поведение, термодинамика контактов и трёхмерное распространение тепла остаются за пределами настоящей модели. Эти границы не отменяют ни необходимости прототипа, ни необходимости измеренных диэлектрических, контактных и теплопроводящих свойств.

Выигрыш по термодинамической эффективности не установлен; в слое механизма возвращённая энергия Пельтье на много порядков меньше энергии обратного импульса. Поэтому настоящий научный вклад точнее всего описывается как управляемое изменение переходного термоэлектрического состояния и топологически управляемый синтез обратного тока с возможными будущими применениями в импульсном согласовании энергии, активном регулировании теплового состояния, зондировании и термоэлектрических системах микромасштаба.

11. Воспроизводимость и пакет данных

Сопровождающий архив Zenodo содержит полный валидированный вычислительный корпус работы. Он включает полную последовательность решающих кампаний — от изоляции причинного механизма через динамическую зарядку и поиск топологии к пространственному синтезу и унифицированному электротермическому замыканию — вместе с независимым аудитом. Каждая кампания сохраняет свой исходный сценарий, необработанные и производные выходные данные CSV/JSON, файлы вердиктов и локальный манифест SHA-256. Каталог независимого аудита обеспечивает повторную проверку хэшей, таблицы производных для статьи, матрицу «утверждение–доказательство» и поэтапный контроль V49. Манифест верхнего уровня позволяет проверить целостность после загрузки. Архив воспроизводимости, предназначенный для депонирования вместе

с рукописью: DCT_TEPG_ZENODO_REPRODUCIBILITY_PACKAGE_v4_0_20260827.zip; SHA-256: b1be9db2accfb7978ea7aa116e1a0705952c24feb6dacf1ee131323fc2d224af.

Таблица 16. Структура и назначение каталогов архива воспроизводимости.

Каталог пакета	Содержимое	Назначение
00_INDEPENDENT_AUDIT	Аудит хэшей, производные сводки, поэтапный контроль, матрица требований	Пересчёт статистики на уровне рукописи
01_V49_MECHANISM_43008	Кампания механизма N = 500 на 43 008 состояний + сценарий	Причинная регенерация состояния Пельтье–Зеебека
02_V50_2_DYNAMIC_LMUG	280 состояний по полярности + 960 связанных состояний + сценарий	Проверка динамической зарядки и базовой маршрутизации тока
03_V51_TOPOLOGY_2400	2400 состояний топологии + сценарий	Обнаружение частичного обратного тока ТЭ
04_V52_1_SPATIAL_OPTIMIZER_N100	Грубый, уточнённый, температурный и прецизионный поиск при N = 100 + скрипт	Окно коммутации и синтез импульса
05_V53_FAMILY_UNIFIED	Выполненные сценарии V53/V53.1/V53.2/V53.3, необработанные CSV/JSON, прецизионные осциллограммы, рисунки, вердикты	Унифицированное сквозное электротермическое замыкание, масштабирование и подтверждение для материала с высокой диэлектрической проницаемостью

12. Выводы

Вычислительный аудит подтверждает четыре центральных вывода. Во-первых, реальный обратный термоэлектрический ток способен записать знаковое температурное возмущение Пельтье, которое сохраняется после импульса и изменяет последующий отклик Зеебека. Во-вторых, распределённое ёмкостное накопление, получаемое от Зеебека, может формироваться динамически и выдавать сильные электрические импульсы, однако одна лишь базовая коммутация выводов не гарантирует обращения тока ТЭ. В-третьих, пространственная перекрёстная коммутация создаёт подлинный обратный ток, управляемый конденсатором, в термоэлектрических ветвях. В-четвёртых, оптимизация пространственного окна в уменьшенном блоке N = 100 даёт чистое обращение пространственно-усреднённого тока ТЭ и одновременное обращение до 80 % ветвей.

Поскольку требовалось показать, что замкнутый причинный контур действует в пределах одного устройства, цепь была объединена в электротермической траектории с разрешением по парам. Это замыкание связывает порождаемое топологией состояние тока с записью состояния Пельтье на уровне сокращённой распределённой модели. V53 демонстрирует полную траекторию при N = 100 — динамическое накопление → физический обратный ток → запись Пельтье → зависящая от температуры обратная связь Зеебека → послеимпульсный отклик — с сохранением причинности на всех этапах. V53.3 показывает, что две заранее выбранные представительные точки скрининга на основе $BaTiO_3$ с высокой диэлектрической проницаемостью сохраняют эту полную строгую цепочку с высокой точностью при сохранении исходного широкого критерия обращения. V53.1 показывает, что причинный механизм сохраняется при N = 500, но одновременное пространственное обращение падает до 65,2 %, поэтому неизменное широкое масштабирование с порогом не менее 75 % не подтверждается.

Таким образом, теория достаточно продвинута, чтобы определить поддающийся фальсификации аппаратный эксперимент и два конкретных режима коммутации-кандидата. Она ещё недостаточно продвинута, чтобы заявлять когерентное обращение не менее 95 %, неизменное широкое пространственное обращение не менее 75 % при N = 500, универсальный оптимальный закон

синхронизации или выигрыш по термодинамической эффективности. Центральный научный результат — вычислительно подтверждённый механизм управления переходным термоэлектрическим состоянием с явно ограниченным масштабированием и пределами модели материала, а не приращение энергии, не продемонстрированный выигрыш по КПД и ещё не проверенное на оборудовании устройство. Следующий научно значимый шаг — измеренный прототип либо полностью связанная трёхмерная распределённая электротермическая модель с реалистичными паразитами, использующая режимы 80–100 % (экономичный) и 20–40 % (сильное обращение) как заранее определённые экспериментальные проверки, а не бесконечное расширение перебора параметров.

Список литературы

[1] H. J. Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-00716-3.

[2] D. M. Rowe (ed.). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. CRC Press, 2005.

[3] T. C. Harman. Special Techniques for Measurement of Thermoelectric Properties. Journal of Applied Physics, 29 (9), 1373–1374 (1958). DOI: 10.1063/1.1723445.

[4] C.-W. Ho, A. E. Ruehli, P. A. Brennan. The Modified Nodal Approach to Network Analysis. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 22 (6), 504–509 (1975). DOI: 10.1109/TCS.1975.1084079.

[5] D. Ripple. NIST 60: NIST ITS-90 Thermocouple Database. National Institute of Standards and Technology, 1999 (воспроизводит эталонные функции монографии NIST 175 для термопар с буквенными обозначениями).

[6] G. J. Snyder, J.-P. Fleurial, T. Caillat, R. Yang, G. Chen. Supercooling of Peltier Cooler Using a Current Pulse. Journal of Applied Physics, 92 (3), 1564–1569 (2002). DOI: 10.1063/1.1489713.

[7] L. Shen, F. Xiao, H. X. Chen, S. Wang. Numerical and Experimental Analysis of Transient Supercooling Effect of Voltage Pulse on Thermoelectric Element. International Journal of Refrigeration, 35 (4), 1156–1165 (2012). DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.02.004.

[8] M. Zhang, S. Lan, Z. Lv, J. Zeng, H. Su, Y. Lin. High-Performance BaTiO3-Based X7R Ceramics via Core-Shell Structure Design. cMat, 3 (2), e70038 (2026). DOI: 10.1002/cmt2.70038.

[9] Murata Manufacturing Co., Ltd. Каковы физические свойства керамического материала, используемого в чиповых многослойных керамических конденсаторах? (данные по керамике BaTiO3 с высокой диэлектрической проницаемостью); по состоянию на 28 августа 2026 г. https://www.murata.com/en-sg/support/faqs/capacitor/ceramiccapacitor/conf/0011

[10] M. Rodic, M. Milanovic, M. Truntic, B. Oslaj. Pulse-Combined Capacitor Boost Converter for Low-Power Energy Harvesting Applications. Energies, 11 (11), 3156 (2018). DOI: 10.3390/en11113156.