Функционально-активные контактные материалы и системы

# Одномерный проводник со знакопеременной контактной разностью потенциалов

*Мультифизический отклик и методы фазового сканирования*

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.20242345

Дата публикации: 17 мая 2026 г.

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. I, Khaustov. V. Functionally Active Contact Materials: the One-Dimensional AltCPD Conductor and Its Multiphysical Response. https://doi.org/10.5281/zenodo.20242345

## Аннотация

Настоящий препринт вводит класс материалов и его элементарную одномерную реализацию, в которой первичным функциональным каналом служит сконструированная популяция внутренних гетероконтактов, а не свойства объёмного переноса. AltCPD-проводник (Alternating Contact Potential Difference conductor; в русской терминологии — ZKRP-проводник, проводник со знакопеременной контактной разностью потенциалов) определён как непрерывный провод, состоящий из N чередующихся гетерогенных сегментов, разделённых N−1 переходами металл–металл или металл–полупроводник. Полярность контактной разности потенциалов спроектирована так, чтобы чередоваться вдоль цепи.

В работе строго различаются три физические величины: (i) статическая контактная разность потенциалов (КРП, CPD), определяемая разностью работ выхода на каждой границе раздела; (ii) термоэлектрический коэффициент Зеебека, определяющий обратимый термоэлектрический отклик; (iii) внешне измеряемое напряжение на клеммах, которое в термодинамическом равновесии обращается в нуль (закон Вольты) и становится информативным только тогда, когда внешние воздействия нарушают равновесие вдоль цепи.

Формулируется линеаризованная модель отклика AltCPD-проводника при мультифизическом возбуждении (тепловом, механическом, химическом, радиационном, электромагнитном); задача обратного измерения ставится как восстановление профиля возмущения {δU_k} по измерениям на клеммах, а метод фазового сканирования вводится как универсальный протокол считывания. Одна и та же аппаратная часть работает в четырёх взаимных режимах — распределённый датчик, приёмник сигнатур, гибридный сборщик энергии и физически неклонируемый идентификатор, — различаемых только терминальной электроникой и протоколом демодуляции.

AltCPD-проводник не предлагается в качестве равновесного источника энергии. Сбор энергии явно ограничен тепловыми градиентами (канал Зеебека), электромагнитными полями окружающей среды (распределённое выпрямление) и мощностью возбуждения, подаваемой извне. Все утверждения работы находятся в рамках обычной неравновесной термодинамики. Для эмпирической валидации указан эталонный прототип на основе стандартных термоэлектрических сплавов (медь–константан, хромель–алюмель).

*Ключевые слова: функционально-активные контактные материалы; FACM; AltCPD-проводник; ZKRP-проводник; знакопеременная контактная разность потенциалов; метод фазового сканирования; распределённое зондирование; приём сигнатур; сбор энергии; физически неклонируемая функция (PUF); термоэлектрическая цепь.*

## Оглавление

Аннотация ... 2
1. Введение ... 4
2. Физические основы и терминологическая дисциплина ... 4
2.1. Контактная разность потенциалов (КРП, CPD) ... 4
2.2. Термоэлектрический коэффициент Зеебека S_AB ... 4
2.3. Терминальная наблюдаемая U_ext ... 5
3. AltCPD-проводник: определение и линеаризованная модель отклика ... 5
3.1. Определение ... 5
3.2. Линеаризованный отклик при мультифизическом возбуждении ... 6
3.3. Терминальная наблюдаемая в матричной форме ... 6
3.4. Спецификация эталонного прототипа ... 6
4. Задача обратного измерения и метод фазового сканирования ... 7
4.1. Постановка обратной задачи ... 7
4.2. Метод фазового сканирования (PSLM) ... 7
4.3. Схемы считывания и пример реконструкции ... 8
5. Связь с существующими методами ... 8
6. Объёмное расширение (концептуальный обзор) ... 10
6.1. Двумерные решётки AltCPD ... 10
6.2. Трёхмерные контактные объёмы ... 10
7. Режим контролируемого возбуждения (работа привода) ... 11
7.1. Джоулев нагрев и эффект Пельтье на чередующихся соединениях ... 11
7.2. Проблема избирательной адресации ... 12
7.3. Сценарии применения режима привода ... 12
8. Четыре режима работы на одном проводнике ... 13
8.1. Режим S — распределённое зондирование ... 13
8.2. Режим R — приём сигнатуры ... 13
8.3. Режим H — гибридный сбор энергии ... 13
8.4. Режим I — физически неклонируемая идентификация ... 13
8.5. Временное мультиплексирование режимов ... 14
9. Классы приложений ... 14
Список литературы ... 16

## 1. Введение

Современные распределённые датчики строятся либо на внешних преобразователях, закреплённых в отдельных точках пассивного кабеля, либо на оптических волокнах, считываемых методом лазерной интерферометрии (DOFS). Оба подхода отделяют сенсорную функцию от самого проводника: провод передаёт сигнал, но не формирует его.

В настоящей работе предлагается смена парадигмы, при которой функция считывания переносится из внешнего преобразователя во внутреннюю топологию проводника. Термин «смена парадигмы» используется здесь в строгом инженерном смысле: роль проводника меняется с пассивного носителя на активный распределённый преобразователь, и при этом не вводится ни одного нового физического принципа, выходящего за рамки устоявшейся контактной электрохимии, термоэлектричества и неравновесной термодинамики.

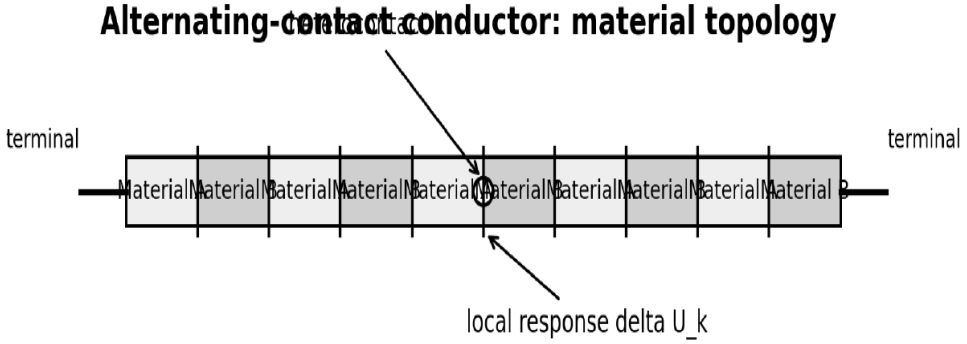



*Рисунок 1. Базовая топология проводника AltCPD/ZKRP: чередующиеся проводящие сегменты образуют цепочку гетероконтактов, каждый из которых работает как локальный чувствительный узел.*

## 2. Физические основы и терминологическая дисциплина

Три различные физические величины обычно смешиваются в неформальных обсуждениях; на протяжении всей работы их следует рассматривать по отдельности.

### 2.1. Контактная разность потенциалов (КРП, CPD)

На границе раздела двух металлов A и B разность работ выхода задаёт статическую ступеньку потенциала:

$$U_AB = (\varphi_A - \varphi_B)/e,$$

где φ_A, φ_B — работы выхода, e — элементарный заряд. КРП является равновесным свойством границы раздела: она не создаёт тока в замкнутом изотермическом однородном контуре (закон Вольты).

### 2.2. Термоэлектрический коэффициент Зеебека S_AB

При наличии температурного градиента на переходе возникает обратимая термоэлектрическая ЭДС:

$$dV = S_AB \cdot dT.$$

Это неравновесный эффект: он существует только при поддерживаемом градиенте температуры.

### 2.3. Терминальная наблюдаемая U_ext

Это измеряемая извне разность потенциалов между двумя концами проводника. В термодинамическом равновесии U_ext = 0 независимо от внутреннего распределения КРП. Величина U_ext становится информативной только тогда, когда внешние воздействия выводят цепочку из равновесия.

Такая дисциплина исключает любые непреднамеренные утверждения о равновесном извлечении энергии. AltCPD-проводник не извлекает энергию из состояния покоя: все наблюдаемые сигналы возникают из неравновесных возбуждений, поступающих от окружающей среды или от считывающей электроники.

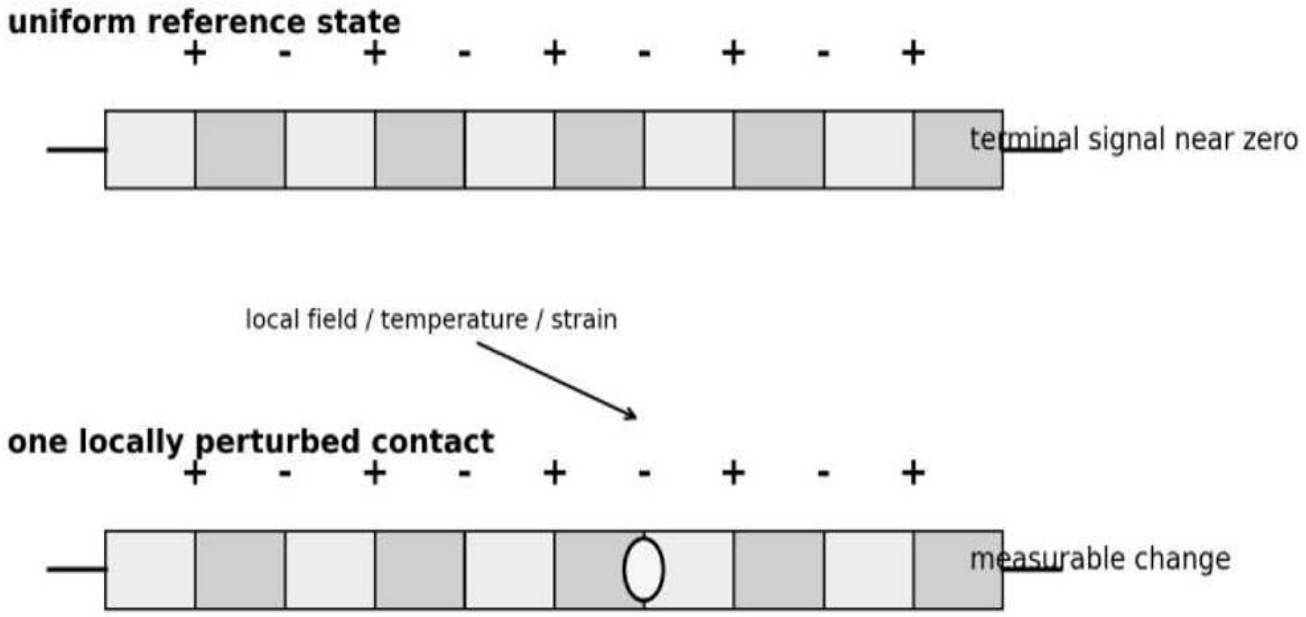



*Рисунок 2. Компенсация равновесного состояния и локальное возмущение: в эталонном состоянии сигнал на клеммах близок к нулю, тогда как локальное возмущение изменяет отклик одного или нескольких контактов и даёт измеримое изменение.*

## 3. AltCPD-проводник: определение и линеаризованная модель отклика

### 3.1. Определение

AltCPD-проводник представляет собой непрерывный одномерный элемент, состоящий из N гетерогенных сегментов {$M_1$, $M_2$, …, M_N}, расположенных так, что КРП на k-м переходе чередуется по знаку:

$$sign(U_k) = (-1)^k.$$

Общее число переходов равно N−1. Проводник имеет ровно две клеммы, физически доступные на его концах; внутренние соединения внешне не доступны.

### 3.2. Линеаризованный отклик при мультифизическом возбуждении

При малых внешних возмущениях локальная КРП на переходе k изменяется линейно по локальным значениям полей возбуждения:

$$\delta U_k = S_{AB}\cdot\delta T_k + K_{\varepsilon}\cdot\varepsilon_k + K_c\cdot c_k + K_r\cdot R_k + K_E\cdot E_k + \ldots,$$

где:

- δT_k — локальное отклонение температуры;
- ε_k — локальная механическая деформация;
- c_k — локальная химическая концентрация;
- R_k — мощность дозы локального излучения;
- E_k — локальная напряжённость электрического поля;
- S_AB, K_ε, K_c, K_r, K_E — коэффициенты чувствительности k-го перехода по соответствующему воздействию.

### 3.3. Терминальная наблюдаемая в матричной форме

Терминальная наблюдаемая U_ext является линейной комбинацией всех локальных возмущений:

$$U_{ext}(t) = \Sigma_{k=1}^{N-1} W_k \cdot \delta U_k(t),$$

где W_k — весовые коэффициенты, определяемые геометрией проводника и конфигурацией считывания. В компактной матричной записи:

$$U_{ext} = W \cdot \delta U, \quad W \in \mathbb{R}^{1\times(N-1)}, \quad \delta U \in \mathbb{R}^{(N-1)\times 1}.$$

### 3.4. Спецификация эталонного прототипа

Для эмпирической валидации предлагается эталонный прототип со следующими параметрами:

- пара материалов: медь–константан (S_AB ≈ 43 мкВ/К) или хромель–алюмель (S_AB ≈ 41 мкВ/К);
- число переходов: N−1 = 100…200;
- шаг соединений (межконтактное расстояние): 5…10 мм;
- общая длина: 0,5…2 м;
- технология соединения: точечная или контактная сварка;
- считывающая электроника: синхронный усилитель (lock-in) либо фазокогерентный АЦП в полосе 1…100 кГц.

Диапазон 1…100 кГц предложен как начальное инженерное окно: он лежит выше доминирующей низкочастотной полосы тепловой релаксации одиночного точечного термоэлектрического перехода (обычно порядка 10…100 Гц для спая термопары миллиметрового масштаба) и ниже частот, на которых для проводника метрового масштаба становятся заметны эффекты длинной линии с распределёнными параметрами.

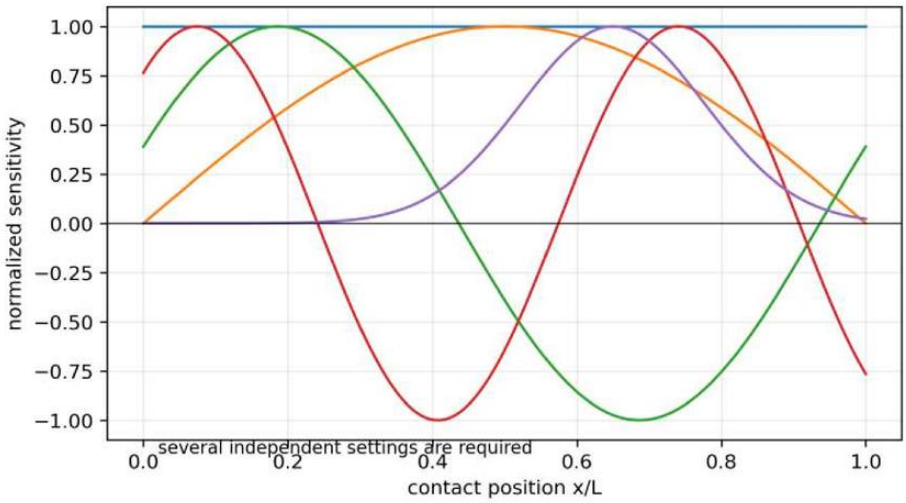



*Рисунок 3. Для восстановления пространственной карты возмущений контактов требуется несколько независимых калиброванных весовых функций: единственного статического измерения недостаточно.*

## 4. Задача обратного измерения и метод фазового сканирования

### 4.1. Постановка обратной задачи

При известной терминальной наблюдаемой U_ext(t) и известной весовой матрице W задача состоит в восстановлении локального профиля возмущения {δU_k(t)}. Это обратная задача размерности (N−1) по единственному скалярному измерению на клеммах: в статической постановке она некорректна и требует дополнительной информации (как правило, частотной или фазовой модуляции), чтобы стать разрешимой.

### 4.2. Метод фазового сканирования (PSLM)

Для решения обратной задачи на клеммы проводника подаются два встречно распространяющихся фазоуправляемых напряжения возбуждения:

$$V_1(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi/2), \quad V_2(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi/2).$$

Эти два встречных возбуждения не предназначены для формирования физической электромагнитной стоячей волны вдоль проводника: в полосе 1…100 кГц электромагнитная длина волны многократно превышает длину прототипа 0,5…2 м. Они реализуют синтетическое фазокодированное зондирование: разность фаз φ посредством синхронной демодуляции выбирает ту пространственную весовую функцию (пространственную гармонику) профиля возмущения, к которой чувствительно измерение. Поэтому перестройка φ от 0 до 2π эквивалентна сканированию виртуального пространственного зонда вдоль откалиброванного проводника — аналогично фазовому сканированию и обработке с синтезированной апертурой в антенных решётках.

Синхронная демодуляция результирующей токовой характеристики по опорному сигналу фазового сканирования даёт набор независимых уравнений измерения относительно профиля

возмущения. Реконструкция выполняется калиброванной обратной обработкой; достижимое пространственное разрешение определяется шагом переходов, отношением сигнал/шум, обусловленностью матрицы W и разрешением по фазе и частоте, а не физической электромагнитной длиной волны.

### 4.3. Схемы считывания и пример реконструкции

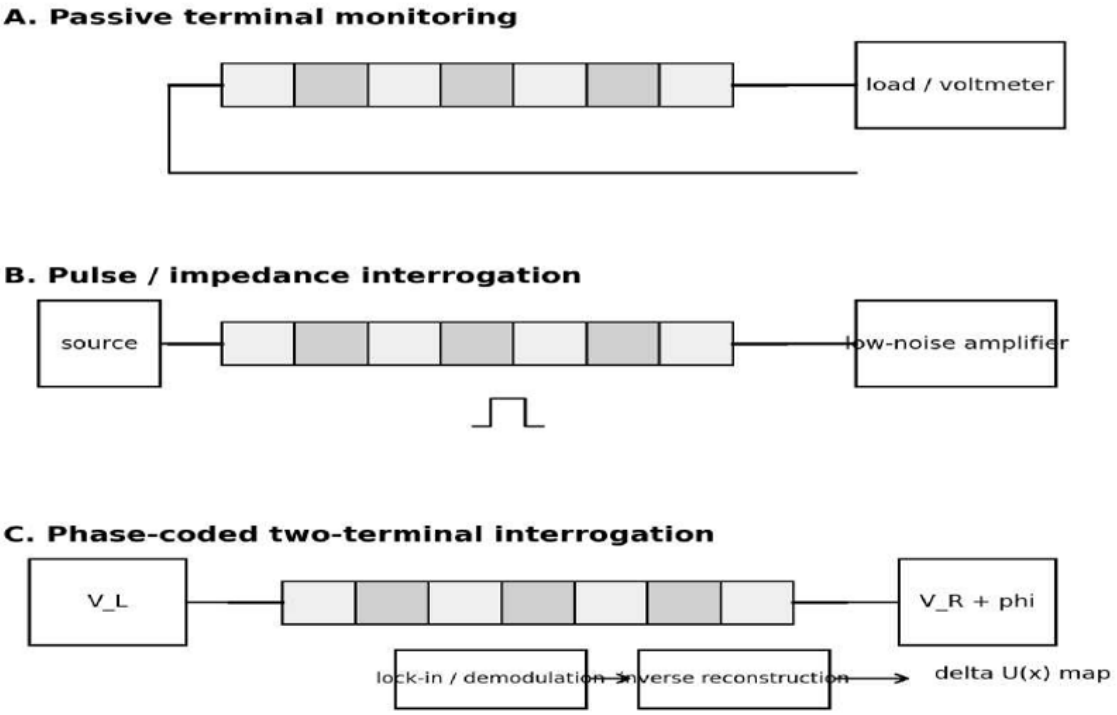



*Рисунок 4. Электрические схемы считывания: (A) пассивный контроль напряжения на клеммах; (B) импульсное/импедансное зондирование; (C) двухполюсное фазокодированное зондирование с синхронной демодуляцией и обратной реконструкцией δU(x).*

Электрические схемы считывания приведены на рисунке 4. Схематичный численный пример принципа реконструкции дан на рисунке 6. Рисунок 6 — исключительно концептуальная иллюстрация: экспериментальная реконструкция в настоящем препринте не приводится. Эмпирическая проверка отнесена к отдельной будущей экспериментальной статье.

## 5. Связь с существующими методами

AltCPD-проводник занимает положение, отличное от всех известных подходов к распределённому зондированию. Сравнительная таблица 1 очерчивает границу.

*Таблица 1. Сравнение проводника AltCPD/ZKRP с существующими методами зондирования и диагностики.*

| **Существующий метод** | **Принцип действия** | **Отличие AltCPD-проводника** | **Типичное пространственное разрешение / локализация** |
|---|---|---|---|
| Термопара | Одиночный спай, точечное измерение $\Delta T$ | Цепь из $N \geq 100$ спаев; пространственный профиль, а не точка | Точечное измерение; внутренняя распределённая локализация отсутствует |
| Тензодатчик | Изменение локального сопротивления в одной точке | Непрерывный пространственный профиль деформации вдоль проводника | Точка или база тензодатчика |
| Термометр сопротивления (Pt100) | Объёмное сопротивление, усреднённое по температуре | Не различает положение вдоль элемента; AltCPD различает | Усреднение по элементу; информация о положении отсутствует |
| Метод ACPD (падение потенциала переменного тока) | Падение потенциала переменного тока на однородном металле для обнаружения поверхностных трещин | Иной класс объекта: дефектоскопия, а не материал; работа на однородных проводниках, а не на сконструированных гетероконтактных цепях | Размеры трещин миллиметрового масштаба вблизи поверхности, зависит от геометрии |
| DOFS (оптическое волокно) | Обратное рассеяние Бриллюэна/Рэлея, лазерный опрос | Требует лазера и фотоники; AltCPD работает в металлических обмотках, жёстких электромагнитных и проводящих средах | Бриллюэн: ~0,1…1 м; Рэлей: сантиметровый масштаб, зависит от интеррогатора |
| Матрицы дискретных датчиков | N отдельных датчиков с N кабелями | Один проводник с двумя выводами; топология встроена в сам провод | Определяется шагом датчиков и плотностью проводки |
| Проводник AltCPD/ZKRP (настоящая работа) | Сконструированная цепь чередующихся гетероконтактов с калиброванным считыванием на клеммах | Топология зондирования встроена в сам проводник | Шаг соединений в эталонном прототипе 5…10 мм; подлежит экспериментальной валидации |

Обратите особое внимание на существующий метод ACPD. Аббревиатура ACPD исторически используется в неразрушающем контроле для обозначения падения потенциала переменного тока — метода определения размеров поверхностных трещин в однородных металлических деталях (Dover et al., 1991). В настоящей работе термин «AltCPD-проводник» (эквивалент в русской терминологии — «ZKRP-проводник») обозначает иной объект: сконструированный гетерогенный провод, функцией которого является распределённое мультифизическое зондирование, а не обнаружение трещин в однородном образце. Эти два понятия не имеют ни общего физического принципа, ни общего класса применения.

## 6. Объёмное расширение (концептуальный обзор)

Одномерный AltCPD-проводник, рассмотренный в разделах 3–4, допускает естественное расширение на двумерные и трёхмерные контактные решётки. В настоящем разделе излагаются концептуальные основы; полная разработка отнесена к последующим работам.

### 6.1. Двумерные решётки AltCPD

Плоская сетка из чередующихся гетероконтактов, нанесённая на гибкую подложку или сотканная из гетерогенных волокон, образует двумерный FACM-лист. Локальная модель отклика обобщается следующим образом:

$$\delta U_{k,l} = S_{AB} \cdot \delta T_{k,l} + K_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_{k,l} + K_{c} \cdot c_{k,l} + \ldots,$$

где (k, l) индексируют узлы двумерной решётки. Наблюдаемая на клеммах величина становится вектором $U_{ext} \in \mathbb{R}^M$, где M — число краевых клемм (обычно от 4 до 16 для прямоугольной сетки), а весовая матрица принимает вид:

$$U_{ext} = W \cdot \delta U, \quad W \in \mathbb{R}^{M \times (N-1)(N'-1)}.$$

Здесь $\delta U \in \mathbb{R}^{(N-1)(N'-1)}$ — векторизованная форма двумерной матрицы возмущений $\delta U_{k,l}$ (выравнивание по строкам или столбцам).

Обратная задача — восстановление двумерной карты возмущений по измерениям на M клеммах — существенно недоопределена при любом $M \ll (N-1)(N'-1)$ и требует одного из следующих подходов:

- частотно-мультиплексированное фазовое сканирование с несколькими ортогональными модами зондирования;
- регуляризация Тихонова с априорными ограничениями на гладкость;
- реконструкция методами сжатого зондирования при допущении разреженности $\delta U$.

Двумерное расширение излагается здесь как концептуальный обзор; его экспериментальная валидация отнесена к последующей работе.

### 6.2. Трёхмерные контактные объёмы

Трёхмерное обобщение — объёмный материал со сконструированной популяцией гетероконтактов по всему объёму — соответствует общей доктрине функционально-активных контактных материалов, опубликованной автором ранее (https://vihrihaosa.ru/). Математическая

структура при этом переходит в задачу томографии с распределёнными параметрами: восстановление трёхмерного скалярного поля δU(x, y, z, t) по конечному набору измерений на поверхностных клеммах.

Обусловленность обратной задачи быстро ухудшается с ростом размерности; практическая трёхмерная реконструкция потребует либо плотных массивов поверхностных клемм, либо многочастотного возбуждения, либо сильных априорных моделей поля возмущений.

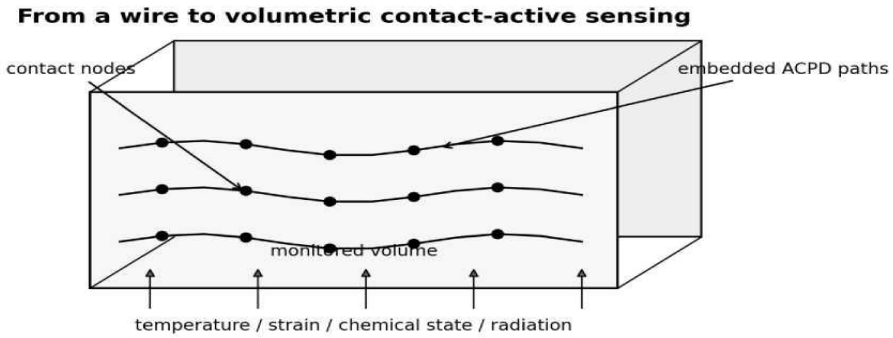



*Рисунок 5. От провода к объёмному контактно-активному зондированию: встроенные тракты AltCPD/ZKRP позволяют превратить материальное тело в диагностическую среду.*

## 7. Режим контролируемого возбуждения (работа привода)

AltCPD-проводник является взаимным (обратимым) элементом: та же гетероконтактная структура, которая воспринимает мультифизические возмущения, способна создавать локальные тепловые и электрические эффекты при возбуждении токами на клеммах. Так открывается режим исполнительного механизма (актуатора).

### 7.1. Джоулев нагрев и эффект Пельтье на чередующихся соединениях

При протекании постоянного или переменного тока I через проводник возникают два эффекта:

- джоулев нагрев, распределённый по проводнику в соответствии с профилем локального удельного сопротивления (в корректно спроектированной цепи — практически равномерный на единицу длины);
- нагрев или охлаждение Пельтье на каждом спае, знак которого чередуется синхронно с полярностью КРП:

$$Q_k^{(P)} = П_AB \cdot I \cdot (-1)^k,$$

где П_AB = S_AB·T — коэффициент Пельтье. Полный тепловой баланс в k-м узле объединяет положительное джоулево слагаемое и знакопеременное пельтье-слагаемое:

$$Q_k^{(total)} = I^2 \cdot R_k + П_AB \cdot I \cdot (-1)^k,$$

где R_k — локальное сопротивление k-го участка. При достаточно малых токах пельтье-слагаемое может превышать знакопеременный контраст нагрева/охлаждения; при больших токах доминирует джоулево слагаемое, которое подавляет пространственную избирательность.

## 7.2. Проблема избирательной адресации

Простое возбуждение последовательным током приводит в действие все соединения одновременно. Избирательное возбуждение отдельного перехода в простой одномерной последовательной топологии нетривиально, поскольку ток одинаков по всей цепи. Возможны три стратегии:

- многотерминальная топология — вспомогательные отводы на выбранных спаях позволяют направлять ток в заданный участок;
- частотно-фазовая адресация — различным соединениям можно придать различные характеристические частоты (за счёт локальных контактных ёмкостей или динамики барьера), что допускает избирательную резонансную активацию;
- адресация во временной области — короткие импульсы тока, запускаемые с одной клеммы, взаимодействуют с каждым спаем с определённой задержкой распространения, что обеспечивает избирательную активацию с временным разрешением, определяемым геометрией линии.

Реализация избирательного возбуждения отнесена к отдельному сопроводительному документу. В настоящем препринте режим исполнительного механизма заявлен только на уровне принципа.

## 7.3. Сценарии применения режима привода

- контролируемое отверждение полимеров вдоль встроенного проводника;
- локальное зондирование коррозионного состояния микроградиентами Пельтье;
- локальная активация функциональных покрытий (катализаторы, материалы с заданным фазовым переходом);
- распределённое термическое структурирование в микрофлюидных и биологических системах;
- активное демпфирование вибраций металлических конструкций за счёт модуляции Пельтье.

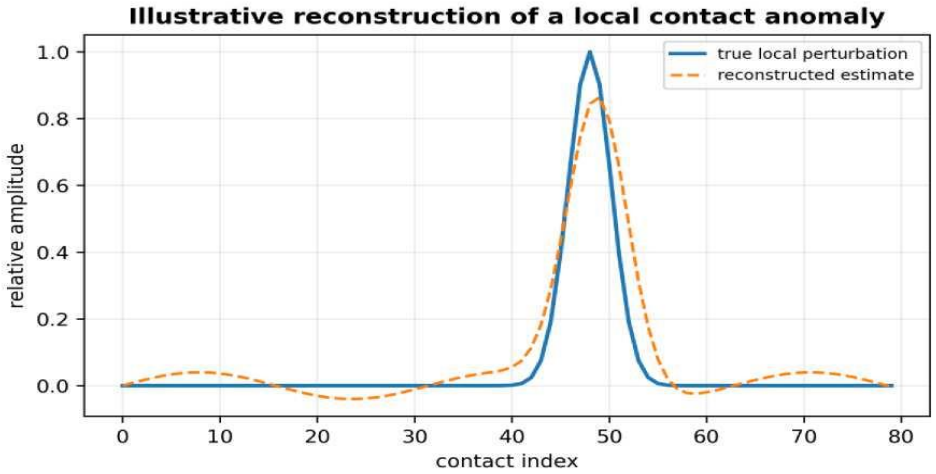



*Рисунок 6. Иллюстрация реконструкции локальной контактной аномалии: истинное локальное возмущение и восстановленная оценка. Это только концептуальный численный пример; экспериментальная реконструкция в препринте не представлена.*

## 8. Четыре режима работы на одном проводнике

AltCPD-проводник — единый пассивный аппаратный элемент, поддерживающий четыре взаимных режима работы, которые различаются только конфигурацией терминальной электроники.

### 8.1. Режим S — распределённое зондирование

Проводник возбуждается двумя фазоуправляемыми источниками на клеммах. Метод фазового сканирования восстанавливает пространственный профиль $\{\delta U_k(t)\}$ мультифизических возмущений. Это основной режим работы, рассмотренный в разделах 3–4.

### 8.2. Режим R — приём сигнатуры

Проводник подвергается воздействию внешнего электромагнитного возбуждения с неизвестными частотой, формой и направлением. Каждый переход испытывает локальное ёмкостное возмущение $\delta U_k(t)$, пропорциональное локальному полю. Возникающая пространственно-временная картина является сигнатурой возбуждения.

Считывание повторно использует опорный сигнал фазового сканирования режима S, но теперь сканирование служит опорой синхронной демодуляции, а не активным зондом постоянного возмущения. Синхронная демодуляция по опорным сигналам фазового сканирования даёт пространственные коэффициенты Фурье сигнатуры; обратное преобразование восстанавливает $\delta U_k(t)$ в реальном времени. Режим реализует селективность по форме: приёмник реагирует на пространственную структуру падающего сигнала вдоль проводника, а не на его абсолютную частоту, поэтому два сигнала одинаковой частоты, но различной пространственной структуры дают различимые отклики.

### 8.3. Режим H — гибридный сбор энергии

Клеммы проводника подключены к нагрузке. Одновременно работают два канала сбора энергии:

- канал Зеебека — при наличии тепловых градиентов знакопеременные КРП конструктивно складываются между парами переходов, испытывающих перепад температур, давая полезное постоянное напряжение на выходе;
- распределённый канал ректенны — слабая несимметричная вольт-амперная характеристика каждого гетероконтакта обеспечивает частичное выпрямление электромагнитных шумов окружающей среды; сумма по $N-1$ переходам даёт измеримую постоянную составляющую.

Выходная мощность невелика и масштабируется с температурным градиентом и плотностью мощности РЧ-поля окружающей среды. Равновесное извлечение энергии не заявляется.

### 8.4. Режим I — физически неклонируемая идентификация

Считывание методом фазового сканирования любого реального AltCPD-проводника выявляет отпечаток микроскопических вариаций КРП, обусловленных невоспроизводимыми деталями изготовления: микрогеометрией точечной сварки, атомным перемешиванием на границе раздела, толщиной оксидной плёнки нанометрового масштаба. Такой отпечаток:

- присущ конкретному физическому образцу;
- не может быть клонирован даже исходным изготовителем;

- считывается за миллисекунды той же сканирующей электроникой, что и в режиме S;
- работает как физически неклонируемая функция (PUF) для аппаратной аутентификации.

### 8.5. Временное мультиплексирование режимов

Четыре режима не являются взаимоисключающими: они мультиплексируются по времени на одном и том же проводнике под программным управлением:

- типовая доля времени зондирования — 90 % в режиме S;
- сбор энергии — 9 % в режиме H в периоды простоя;
- обновление идентификатора — 1 % в режиме I по запросу;
- приём сигнатуры — режим R включается по внешнему триггеру или по расписанию.

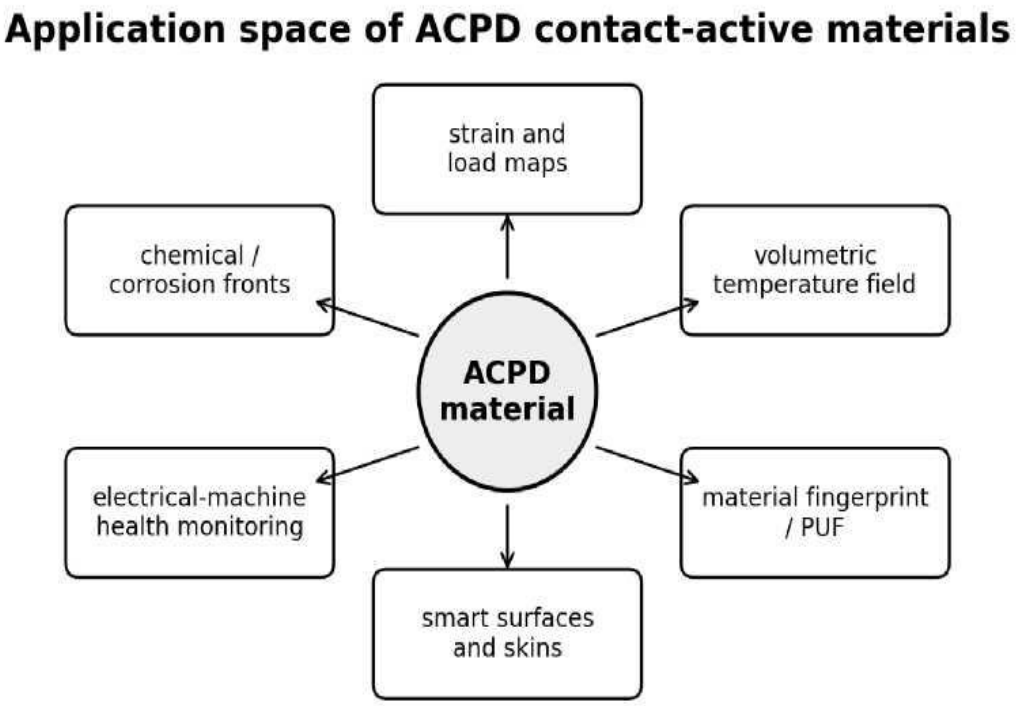



*Рисунок 7. Область применения функционально-активных контактных материалов AltCPD/ZKRP.*

## 9. Классы приложений

AltCPD-проводник и его объёмные обобщения обеспечивают широкий спектр классов применения. Основные категории перечислены в таблице 2. Классы, отмеченные (★), развивают концептуальные предложения, опубликованные автором ранее (https://vihrihaosa.ru/); классы, отмеченные (♦), вводятся в настоящей работе впервые.

*Таблица 2. Классы применения проводника AltCPD/ZKRP и его расширений.*

| № | Класс применения | Режим работы | Статус |
|---|---|---|---|
| 1 | Распределённое измерение температуры вдоль трубопроводов и кабелей | S | ★ |
| 2 | Распределённое измерение деформаций в несущих конструкциях | S | ★ |
| 3 | Распределённое химическое зондирование в промышленных реакторах | S | ★ |
| 4 | Распределённая радиационная дозиметрия вдоль протяжённых линий | S | ♦ |
| 5 | Мультифизический контроль обмоток электродвигателя | S | ★ |
| 6 | Встраиваемые безбатарейные датчики для гражданской инфраструктуры | S + H | ★ |
| 7 | Нерезонансный сверхширокополосный приём сигнатур | R | ★ |
| 8 | Пассивное определение направления и формы электромагнитных сигналов | R | ★ |
| 9 | Скрытная связь за счёт селективной демодуляции по форме сигнала | R | ★ |
| 10 | Гибридный сбор энергии Зеебека и РЧ на одном проводе | H | ★ |
| 11 | Отпечаток материала как аппаратный PUF | I | ★ |
| 12 | Маркировка металлических изделий для защиты от подделки | I | ★ |
| 13 | Аутентификация по сигнатурному отклику | I | ★ |
| 14 | Контролируемое отверждение полимера по встроенному проводнику | Привод | ♦ |
| 15 | Распределённое структурирование Пельтье в микрофлюидных системах | Привод | ♦ |
| 16 | Локальная активация каталитических покрытий | Привод | ♦ |
| 17 | Самодиагностирующаяся проводка в аэрокосмических и автомобильных системах | S + I | ★ |
| 18 | Распределённая реакторная аппаратура в радиационных средах | S | ♦ |
| 19 | Неэлектродная биоэлектрическая томография (концептуально) | R | ♦ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 20 | Ёмкостная биометрия на контактных решётках (концептуально) | R + I | ♦ |

Список не является исчерпывающим. Структурные расширения, рассмотренные в разделе 6 (2D- и 3D-решётки), и многорежимное временное мультиплексирование раздела 8 создают дополнительные составные сценарии применения.

## Список литературы


1. Вольта, А. (1800). О гальванизме, возбуждаемом простым контактом проводящих веществ различного рода. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 90, 403–431.
2. Seebeck, T. J. (1822). Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz. Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1822–1823, 265–373.
3. Peltier, J. C. A. (1834). Nouvelles expériences sur la caloricité des courants électriques. Annales de Chimie et de Physique, 56, 371–386.
4. Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). Транзистор — полупроводниковый триод. Physical Review, 74 (2), 230–231.
5. Melitz, W., Shen, J., Kummel, A. C., & Lee, S. (2011). Микроскопия зонда Кельвина и её применения. Surface Science Reports, 66 (1), 1–27.
6. Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Сложные термоэлектрические материалы. Nature Materials, 7 (2), 105–114.
7. Lu, P., Lalam, N., Badar, M., Liu, B., Chorpening, B. T., Buric, M. P., & Ohodnicki, P. R. (2019). Распределённое волоконно-оптическое зондирование: обзор и перспективы. Applied Physics Reviews, 6 (4), 041302.
8. Dover, W. D., Charlesworth, F. D. W., Taylor, K. A., Collins, R., & Michael, D. H. (1991). Применение измерений поля переменного тока для обнаружения и оценки размеров трещин на воздухе и под водой. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 320 (1554), 271–283.
9. Gao, Y., Al-Sarawi, S. F., & Abbott, D. (2020). Физически неклонируемые функции. Nature Electronics, 3 (2), 81–91.
10. Тихонов, А. Н., Арсенин, В. Я. (1977). Решение некорректно поставленных задач. Нью-Йорк: Winston & Sons [рус. изд.: М.: Наука, 1979].
11. Donoho, D. L. (2006). Сжатое зондирование. IEEE Transactions on Information Theory, 52 (4), 1289–1306.
12. Rowe, D. M. (Ed.). (2018). Справочник по термоэлектрикам: от макро- к наноуровню. Boca Raton: CRC Press.
13. Pollock, D. D. (1991). Термопары: теория и свойства. Boca Raton: CRC Press.
14. Schroder, D. K. (2006). Характеризация полупроводниковых материалов и приборов (3-е изд.). Wiley-IEEE Press.