

Управление образования г. Пензы
МБОУ «Лицей современных технологий управления № 2» г. Пензы

**Разработка способа обнаружения и локализации
утраты электроэнергии на участке электросети**

Выполнили:

Акинин Егор Владимирович,
Мисулин Александр Сергеевич,
Миронов Владислав Максимович,
обучающиеся МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы

Руководители:

Адамский Сергей Сергеевич,
учитель информатики,
педагог-методист МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы

Пенза, 2026 г

Содержание

Введение.....	3
Актуальность проблемы.....	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 1 Описание математической модели и разбор существующих проблем	4
1.1 Базовые формулы	4
1.2 Описание метода:	5
1.3 Математический аппарат, необходимый для локализации	6
1.4 Чувствительность (точность) метода	8
1.5 Алгоритм работы метода локализации	10
1.6 Существующие методы, их плюсы и минусы	11
Глава 2 Создание теоретической и реальной модели.....	12
2.1 Создание теоретической модели	12
2.2 Разработка реальной модели (макета) и испытание метода на неидеальных данных	16
2.3 Система сбора и обработки информации.	19
Заключение	20
Список использованных источников	21
Приложение 1.	22

Введение

Проблема хищения электроэнергии в частном секторе представляет собой значимый источник коммерческих потерь для энергосистемы России, наносящий ежегодный ущерб в миллиарды рублей. По экспертным оценкам, только сегмент нелегального майнинга криптовалют приводит к потерям, превышающим 10 млрд рублей в год. Фактические данные сетевых компаний подтверждают масштаб проблемы: в 2024 году в одном лишь регионе обслуживания ПАО «Россети Ленэнерго» было выявлено около 5,6 тыс. случаев безучетного потребления, а сумма взысканий составила почти 487 млн рублей. За неполные 8 месяцев 2025 года уже взыскано более 388 млн рублей.

Существующие методы борьбы, основанные на сплошных физических проверках линий после обнаружения диспропорции, являются экономически неэффективными. Они требуют значительных ресурсов, носят реактивный характер и не обеспечивают оперативного обнаружения и точной локализации нарушителей, что позволяет хищениям возобновляться.

Целью работы является создание универсального метода, позволяющего в реальном времени отслеживать аномальные или несанкционированные потребления электроэнергии с их локализацией.

Задачи проекта:

1. Определить необходимые физические законы для разработки метода.
2. Определить зависимости между проявлениями несанкционированного и санкционированного потребления электроэнергии.
3. Создать теоретическую модель для теоретической проверки разрабатываемого метода
4. Апробировать метод на реальной модели для проверки метода в неидеальных условиях
5. Разработать программное обеспечение для автоматизации процесса

В данном контексте разработка автоматизированного алгоритма для дистанционного детектирования и точной локализации точек несанкционированного потребления приобретает высокую практическую значимость. Предлагаемое решение, основанное на анализе баланса токов и вычислении производной от нормированных потерь мощности, позволяет перейти от затратных обходов к целевым проверкам. Это обеспечит существенное снижение операционных издержек сетевых компаний и создаст действенный инструмент для сокращения многомиллиардных потерь,

способствуя повышению экономической устойчивости распределительных сетей.

1. Описание математической модели и разбор существующих проблем

1.1 Базовые формулы

Предлагаемый метод основывается на необычном взгляде на закон Ома, поэтому ниже приведены базовые формулы этого закона:

Сопротивление проводов из закона Ома для неполного участка цепи:

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow R = \frac{V}{I} \quad (1.1)$$

где:

V – Напряжение, R – Сопротивление, I – Сила тока

Расчёт сопротивления проводов на основе материала и поперечного сечения:

$$R = \frac{p \cdot l}{S} \quad (1.2)$$

где: p – удельное сопротивление материала; l – длина проводника;
 S – площадь поперечного сечения

Так как некоторые счётчики электроэнергии округляют значения до целых, мы можем добиться от них точности только в 0.5В, для чего будем пользоваться следующей формулой:

$$V_{\text{факт}} = \frac{\sum_n V}{n} \quad n \in N \quad (1.3)$$

Далее, так как счётчики позволяют нам смотреть мощность, которая потребляется домом, будем пользоваться ей тоже. Так как она также выдаётся с погрешностью, будем пользоваться следующими правилами для усреднения напряжения:

$$\text{Если } \frac{P_n}{I_n} \text{ больше } V_{\text{факт}}:$$

$$V_n = V_{n \text{ факт}} + \frac{\frac{P_n}{I_n} - V_{n \text{ факт}}}{2} \quad (1.3.1)$$

В противном случае -

$$V_n = V_{n \text{ факт}} - \frac{V_{n \text{ факт}} - \frac{P_n}{I_n}}{2} \quad (1.3.2)$$

где:

I_n – сила тока протекающего через счётчик; $V_{n \text{ факт}}$ – напряжение на счётчике, усреднённое по формуле 1.3; P_n – Мощность дома, получаемая со счётчика

При помощи формул (1.3.1) и (1.3.2) мы вводим поправку, которая уменьшает влияние погрешности округления напряжения внутри счётчика электроэнергии

1.2 Описание метода:

Суть метода обнаружения несанкционированного потребления электроэнергии заключается в следующем равенстве:

$$I_{\text{стан}} = \sum I_n \quad (n \in N) \quad (2.1)$$

где:

$I_{\text{стан}}$ – показание силы тока, получаемое с приборов учёта электроэнергии, стоящих на подстанции, $\sum I_n$ – сумма силы токов на всех домах (n – кол-во домов)

При отсутствии несанкционированного потребления суммарный ток, измеренный на подстанции, должен соответствовать току, рассчитанному через сумму токов, получаемых из приборов учёта электроэнергии, подключённых к легальным потребителям. Однако при наличии незаконного подключения прибор учета электроэнергии на вводе фиксирует общий ток, включая составляющую от «анонимной» нагрузки. При этом прямой расчет тока, исходя из известных сопротивлений легальных потребителей, естественно, эту составляющую не учитывает. Вследствие этого баланс нарушается, и равенство между измеренным и расчетным значением тока не выполняется. Нарушение данного равенства является прямым индикатором наличия на линии несанкционированного потребителя.

1.3 Математический аппарат, необходимый для локализации

Из закона Ома для неполного участка цепи и формулы мощности следует, что потери на проводах можно посчитать через падение напряжения на них и сопротивление проводов:

$$P_{n_1} = \frac{\Delta V^2}{R_n}; (n \in N) \quad (3.1)$$

где P_{n_1} – фактические потери на проводах, посчитанные через падение напряжения; ΔV – падение напряжения на проводах; $\Delta V = V_n - V_{n+1}$ (нумерация (n) ведётся от начала улицы); R_n – сопротивление проводов, посчитанное по формуле (1.2)

Те же самые потери можно посчитать через ток, протекающий по проводам, и сопротивление проводов:

$$P_{n_2} = (\sum I_k)^2 R; (k \in N) \quad (3.2)$$

где: P_{n_2} – расчётные потери на проводах, посчитанные через ожидаемые протекающие токи; R – сопротивление проводов, посчитанное по формуле (1.2); $\sum I_k$ – сумма токов на домах до k включительно (нумерация k идёт от конца улицы)

И фактические и теоретические потери в проводах сильно зависят от сопротивления конкретного участка сети, который, в свою очередь, зависит от длины. А длина эта зависит от расположения линий электропередач и домов на местности, и может меняться в широких пределах даже в рамках одного анализируемого участка сети. Поэтому для повышения точности определения необходимо провести нормирование сопротивлений разных участков, чтобы можно было сравнивать потери на них напрямую. Для этого воспользуемся следующей формулой:

$$P_{n_{1пр}} = \frac{P_{n_1} * R_{ср}}{R_n}; (n \in N) \quad (3.3)$$

где: $P_{n_{1пр}}$ – приведённое значение реальных потерь на проводах;

P_{n_1} – реальные потери на проводах, согласно формуле (3.2);

$R_{ср}$ – Среднее значение сопротивлений всех участков цепи;

R_n – значение сопротивление, соответствующее данному участку цепи.

Формула приведённых теоретических потерь выглядит аналогично:

$$P_{n_{2пр}} = \frac{P_{n,2} * R_{ср}}{R_n}; (n \in N) \quad (3.4)$$

На следующем этапе производится анализ разности между нормированными фактическими и теоретическими потерями. Полученный массив данных используется для построения графической зависимости, аппроксимирующей распределение аномалий вдоль линии. Точка максимального отклонения, соответствующая экстремуму первой производной данной функции (самое резкое возрастание потерь на проводах), будет указывать на сегмент с несанкционированным потребителем:

Формула нахождения разницы между реальными потерями и теоретическими:

$$\Delta P_n = P_{n_{1пр}} - P_{n_{2пр}}; (n \in N) \quad (3.5)$$

где $P_{n_{1пр}}$ – приведённое значение реальных потерь на проводах;

$P_{n_{2пр}}$ – приведённое значение теоретических значений на проводах

Для количественной оценки динамики изменения выявленных отклонений вдоль линии электропередачи применяется аппарат дифференциального исчисления. В данном контексте ключевое значение имеет не столько строгий математический или физический смысл производной, сколько её прагматическая интерпретация как индикатора скорости изменения исследуемого параметра от одного контрольного участка к другому. Таким образом, переход к анализу производной позволяет перейти от простого сравнения величин к определению точки наиболее резкого изменения сигнала, что и является целью локализации. Говоря языком формул,

$$\varphi = \frac{X_n - X_{n-1}}{\theta}; (n \in N) \quad (3.6)$$

где φ – производная; X_n – значение переменной в позиции n ; X_{n-1} – значение переменной в позиции $n-1$; θ – шаг, за который изменилась переменная, в нашем случае он всегда равен единице, следовательно, производную можно считать по следующей формуле:

$$\varphi = X_n - X_{n-1}; (n \in N) \quad (3.7)$$

где: X_n – значение переменной в позиции n ; X_{n-1} – значение переменной в позиции $n-1$; φ – производная

Для корректной интерпретации результатов вводится инверсия знака производной. Поскольку в данной модели наличие несанкционированной нагрузки приводит к монотонному нарастанию отрицательного расхождения между фактическими и теоретическими параметрами по направлению к точке подключения, исходная производная принимает отрицательные значения. Чтобы получить наглядный положительный пик, соответствующий локализации аномалии, используется производная с противоположным знаком. Итоговая формула имеет вид:

$$\varphi = \Delta P_{n-1} - \Delta P_n; (n \in N) \quad (3.8)$$

где: ΔP_{n-1} – значение разницы мощности на участке n-1; ΔP_n – значение разницы мощности на участке n; φ – производная

1.4 Чувствительность (точность) метода

Важно отметить, что чувствительность предлагаемого метода, то есть его способность обнаруживать факт несанкционированного потребления и корректно локализовать нарушителя, является величиной, зависящей от ряда технических параметров системы. Она определяется, главным образом, двумя группами факторов: класс точности и порог чувствительности электросчетчиков, установленных в контрольных точках сети, а также активным сопротивлением проводов (линии электропередачи) между соседними узлами учета.

Количественная оценка пороговой чувствительности метода, а также анализ влияния каждого из перечисленных факторов могут быть получены с использованием аналитических соотношений, представленных далее:

Формула пороговой мощности обнаружения предложенного метода:

$$P_{\text{обн}} \geq P_{\text{потребщ}} * \delta_{\text{макс}} \quad (4.1)$$

где: $P_{\text{обн}}$ – минимальная мощность несанкционированного потребления электроэнергии, которую возможно обнаружить при помощи предлагаемого метода; $P_{\text{потребщ}}$ – потребляемая мощность на всём участке цепи, потребляемая контролируемом сегменте цепи. $P_{\text{потребщ}}$ берётся из показаний измерительных приборов (счётчиков), находящихся на подстанции; $\delta_{\text{макс}}$ – коэффициент точности приборов учёта электроэнергии, вычисляемый по формуле:

$$\delta_{\text{макс}} = \delta_{\text{максподст}} + \delta_{\text{макспотреб}} \quad (4.2)$$

где $\delta_{\text{максподст}}$ - Максимальная погрешность измерения мощности на подстанции (Исходя из требований ПАО Россеть, не более 0,5%); $\delta_{\text{макспотреб}}$ - Максимальная погрешность измерения мощности приборов учёта у потребителей, согласно классу точности (Исходя из требований ПАО Россеть, не более 1%)

Таким образом следует, что мы можем обнаружить (только обнаружить, не локализовать) факт неучтённого потребления электроэнергии, превышающего 1,5% от общего потребления в данном сегменте сети

Для локализации места несанкционированного потребления используется следующая формула пороговой мощности локализации предложенного метода:

$$P_{\text{лок}} \geq P_{\text{обн}} + \alpha; \quad (4.3)$$

где $P_{\text{лок}}$ – Минимальная мощность, необходимая методу для локализации аномального потребления электроэнергии; $P_{\text{обн}}$ – см. выше; α – Аддитивная поправка, вычисляемая по формуле (4.4):

$$\alpha = I_{\text{min}} * U_{\text{сети}} \quad (4.4)$$

где: $U_{\text{сети}}$ – Среднее напряжение в сети (Согласно ГОСТу, оно должно быть равно $230\text{В} \pm 10\%$). Для простоты можно брать величину равную 220В, так как среднее падение напряжения к концу улицы составляет примерно 20 вольт, то есть конечное напряжение 210 В, $(230+210)/2 = 220\text{В}$

I_{min} – минимальный ток, вычисляемый по формуле (4.5):

$$I_{\text{min}} = \frac{\Delta U_{\text{min}}}{R_{\text{сегм}}} \quad (4.5)$$

где: ΔU_{min} – Дискретная величина измерения напряжения прибором учёта, принимаемая равная 0,1В в соответствии с классом точности;

$R_{\text{сегм}}$ – Величина сопротивления участка, привязанного к конкретному дому.

Следует отметить, что данная величина будет варьироваться для разных участков сети вследствие различий в фактической длине и состоянии проводников. Однако, как правило, это отклонение не носит существенного характера в рамках однотипной инфраструктуры. Поэтому для оценочных расчетов порога чувствительности метода допустимо использовать усредненное значение сопротивления линии, что обеспечивает приемлемую

для первичного анализа точность без необходимости индивидуального замера каждого сегмента.

1.5 Алгоритм работы метода локализации

Реализация метода начинается с первичной диагностики факта наличия несанкционированного потребления на контролируемом участке сети на основе проверки балансового равенства (2.1).

После подтверждения аномалии запускается основной алгоритм локализации. На первом его этапе для каждого сегмента сети вычисляется величина отклонения мощности ΔP_n согласно формуле (3.5). Затем, на основе полученного массива данных, по формуле (3.8) определяются значения производной, которые выступают ключевым диагностическим признаком.

Физический смысл используемой производной заключается в отражении скорости изменения расхождения между измеренными и эталонными параметрами вдоль линии. Непосредственно в точке несанкционированного подключения этот рост достигает экстремума, что приводит к формированию ярко выраженного максимума на графике зависимости производной от номера участка. Таким образом, локализация нарушителя осуществляется путём идентификации номера сегмента, соответствующего максимальному значению производной. Для наглядной интерпретации результатов зависимости, включая экстремальную точку, строится график, представленный далее.

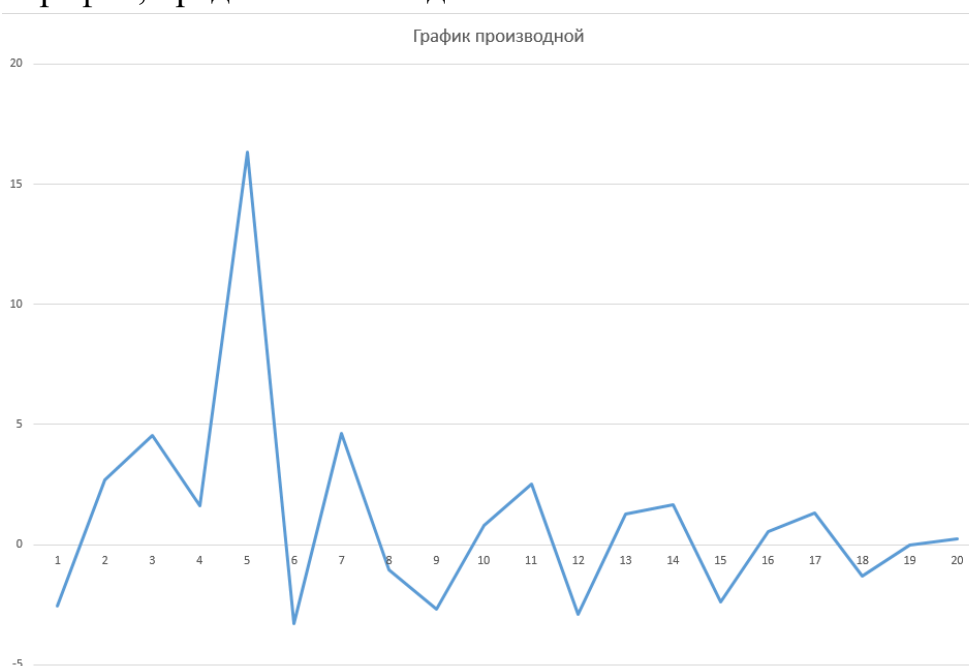


Рисунок 1, график зависимостей

1.6 Существующие методы, их плюсы и минусы

- **Организационные меры: плановые и внеплановые проверки (рейды)**

Наиболее распространённый и традиционный метод, заключающийся в физическом обходе контролёрами энергосбытовых компаний потребителей для визуальной проверки целостности пломб, корректности подключения счетчиков и выявления несанкционированных врезок.

Плюсы: прямое выявление нарушений с возможностью составления акта на месте. Психологический эффект (сдерживающий фактор для потенциальных нарушителей). Не требует сложного технического оснащения для начала реализации.

Минусы: высокая трудоёмкость и стоимость, так как требует привлечения большого числа персонала для охвата значительных территорий. Низкая оперативность и эффективность: проверки носят выборочный и периодический характер, между рейдами хищения остаются незамеченными. Нарушители успевают скрыть следы к моменту проверки.

- **Технические средства защиты приборов учета**

Эта группа методов направлена на усложнение или блокировку физического вмешательства в работу счетчика. К ним относятся антимагнитные и антивандальные пломбы, защитные боксы, счетчики с внутренней памятью и журналом событий.

Плюсы: затрудняют самые простые и массовые способы хищения (остановка магнитом, механическое воздействие). Создают материальное доказательство вмешательства (сорванная пломба). Относительно недорогие в качестве единичного решения.

Минусы: не решают проблему, а лишь усложняют один из способов. Опытные нарушители находят обходные пути (например, "наброс" на линию до счетчика). Такие методы сами по себе не сигнализируют о факте хищения, требуют физической проверки для выявления. Защищают только точку учета, но не всю линию электропередачи.

- **Методы балансового анализа (существующие)**

Основаны на сравнении объема электроэнергии, отпущенной в сеть, с суммой показаний всех счетчиков потребителей. Выявление значительной

отрицательной разницы указывает на наличие потерь, часть которых может быть связана с хищениями.

Плюсы: позволяют констатировать факт наличия потерь на целом участке сети.

Минусы: не обеспечивают локализацию. Не позволяют определить, на каком именно отрезке линии или у какого потребителя происходит хищение. Чувствительны к погрешности приборов учета, что может маскировать или имитировать потери.

Подводя итог обзору методов, можно сделать вывод, что большинство существующих методов являются ресурсоемкими и не обеспечивают точной локализации. Они либо требуют больших человеческих ресурсов (рейды), либо только констатируют факт проблемы (балансовый анализ), не решая ключевую задачу — оперативное и точное определение точки несанкционированного подключения для минимизации затрат на проверку. Это подтверждает актуальность разработки новых, более эффективных алгоритмических решений, подобных предлагаемому в проекте.

Глава 2 Создание теоретической и реальной модели

2.1 Создание теоретической модели

Методология и средства моделирования в теоретической среде:

Для верификации предложенного метода было проведено имитационное моделирование в специализированной программной среде Multisim Power Pro Edition 14.3 (далее – Multisim). Выбор данного программного обеспечения обусловлен его широким признанием в инженерном сообществе для задач проектирования и тестирования электрических схем, что обеспечивает достоверность полученных результатов.

Моделирование предполагает создание эквивалентной схемы участка распределительной сети. Несмотря на кажущуюся простоту данной задачи, процесс требует учета ряда специфических особенностей моделирующей платформы:

1. Обеспечение корректности расчета. В соответствии с требованиями программы для корректного функционирования источников питания и исключения ошибок симуляции в модель в обязательном порядке вводится узел заземления вблизи эквивалента генерирующей станции.

2. Адекватность модели линии электропередачи. Поскольку модель проводов в Multisim по умолчанию предполагает нулевое активное сопротивление, для приближения модели к реальным условиям необходимо вводить сосредоточенные эквиваленты сопротивлений линий между узлами нагрузки («домами»). Для этого используются резисторы с номиналом, соответствующим расчетному сопротивлению реального кабеля на заданном участке.

3. Организация системы учета. Ввиду отсутствия в библиотеке компонентов интегрированного счетчика электроэнергии, учетные функции реализуются совокупностью отдельных виртуальных приборов: вольтметра, амперметра и ваттметра. Для повышения точности считывания показаний мощности на ваттметре устанавливается отображение четырех значащих цифр после запятой вместо стандартных трех.

4. Моделирование несанкционированной нагрузки. Для имитации акта нелегального потребления энергии в схему вводится переменное сопротивление (потенциометр) номиналом 10 кОм с дискретностью шага 0.1%. Диапазон потребляемой им мощности задается от 1.5 до 2.5 кВт, что соответствует типовым мощным бытовым электроприборам (от электрочайника до компактного тепловентилятора). Данный диапазон позволяет оценить чувствительность метода к нагрузкам разной величины.

Фрагмент топологии моделируемого участка сети представлен на Рисунке 2. Схема реализует классическую радиальную архитектуру распределительной линии низкого напряжения, к которой параллельно подключены несколько узлов нагрузки, условно обозначенных как потребительские домовладения.

Модель включает следующие ключевые элементы:

- Источник питания, имитирующий питающую подстанцию.
- Линия электропередачи, смоделированная с использованием отрезков провода и сосредоточенных резистивных элементов для учета падения напряжения.
- Узлы учета, расположенные в ключевых точках схемы для фиксации электрических параметров.
- Стандартные (легальные) нагрузки, подключенные через штатные узлы учета.
- Несанкционированная нагрузка, подключенная к линии в обход счетчика.

В конфигурации, показанной на Рисунке 2, точка несанкционированного подключения (условно обозначающая "вора") расположена в сегменте линии между четвертым и пятым условным домовладением. Данная топология позволяет исследовать влияние неучтенной нагрузки на распределение параметров сети в смежных точках измерения и отражает типичный случай скрытого вмешательства в распределительную инфраструктуру.

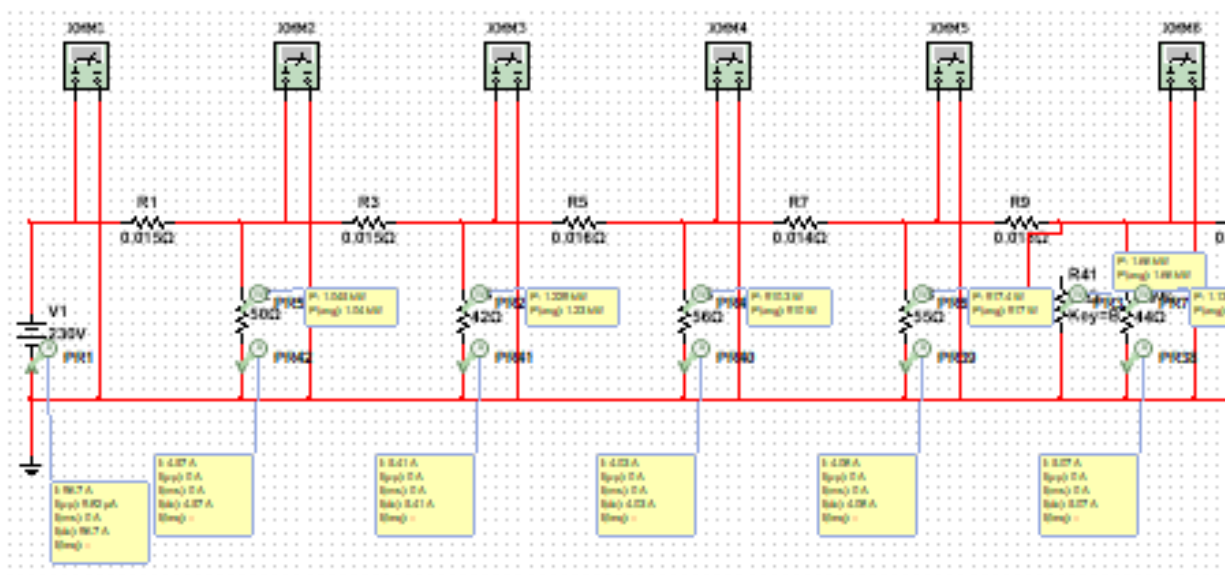


Рисунок 2, фрагмент симуляции

Для последующей обработки на вычислительной машине исходные данные должны быть представлены в структурированном формате, совместимом с используемым программным обеспечением. С этой целью в среде Microsoft Excel 2013 (далее Excel) создаётся набор файлов, содержащих таблицы с предопределённой структурой, оптимизированной для импорта и анализа в рамках разработанного алгоритма:

Таблица 1

Номер дома	Станция	1	2	...	n
Вольты
Амперы
Ватты

Следующим этапом верификации методики является проведение серии имитационных экспериментов в среде Multisim, моделирующих два ключевых сценария: штатный режим работы сети и режим с наличием несанкционированного потребителя. Целью данных экспериментов является

практическое подтверждение работоспособности балансового уравнения (2.1), лежащего в основе метода первичного детектирования факта хищения.

Для проведения проверки была использована модель участка сети с 20 домовладениями. Данное количество было выбрано как оптимальное, исходя из проведённых расчётов, хотя алгоритм сохраняет функциональность при ином количестве потребителей. В первом эксперименте (штатный режим) были получены данные, сведенные в таблицу 2. Анализ данных подтверждает полное соответствие измерений формуле (2.1): сумма токов, учтённых всеми домовыми приборами, равна току, фиксируемой на источнике питания. Этот результат, ожидаемый с точки зрения законов сохранения, служит базовым подтверждением корректности модели и измерительной цепочки:

Таблица 2:

Номер дома	Вольты	Амперы	Ватты	Сопротивление участка
Станция	230	89,24	20405	
Вязова1	228,658	4,57	1045	0,015
Вязова2	227,384	5,41	1229	0,015
Вязова3	226,112	4,03	910	0,016
Вязова4	225,055	4,08	917	0,014
Вязова5	223,77	5,07	1132	0,018
Вязова6	222,511	4,93	1095	0,019
Вязова7	221,776	3,4	752	0,012
Вязова8	220,907	4,08	899	0,015
Вязова9	220,047	4,77	1047	0,016
Вязова10	219,017	4,55	994	0,021
Вязова11	218,128	3,11	676	0,02
Вязова12	217,508	4,09	888	0,015
Вязова13	216,875	3,86	835	0,017
Вязова14	216,274	6,35	1369	0,018
Вязова15	215,842	4,68	1008	0,016
Вязова16	215,508	5	1075	0,015
Вязова17	215,214	4,29	921	0,017
Вязова18	215,084	3,64	780	0,01
Вязова19	214,944	3,83	820	0,015
Вязова20	214,861	5,5	1178	0,015

Примечание: для более понятного вида, данные в таблице были представлены не в горизонтальном, а в вертикальном плане. Во втором эксперименте в схему был введён элемент, моделирующий несанкционированное потребление («вора»). Результаты измерений для этого случая представлены в таблице в приложении А. Как и прогнозировалось,

баланс мощностей был нарушен: мощность на источнике питания составила приблизительно 20 кВт, в то время как суммарная учтённая мощность домовых нагрузок составила лишь около 18 кВт. Образовавшаяся диспропорция (порядка 1.5 кВт) соответствует мощности, потребляемой внедрённой в схему аномальной нагрузкой. Данный эксперимент эмпирически доказывает, что формула (2.1) является эффективным инструментом для фиксации факта наличия в сети неучтённого потребителя.

Таким образом, практические симуляции подтвердили теоретическую основу метода, что позволяет перейти к следующему этапу — применению алгоритма локализации точки несанкционированного подключения, описанного в главе 2, подразделе 2.5, к ситуации, смоделированной во втором эксперименте

Как видно из таблицы, приведённой в приложении 1, Проведенный анализ демонстрирует прямую корреляцию: пиковое значение вычисленной производной фиксируется именно на том участке (доме), где было смоделировано несанкционированное подключение, что полностью подтверждает работоспособность алгоритма локализации в идеальных условиях.

2.2 Разработка реальной модели (макета) и испытание метода на неидеальных данных

Для сборки экспериментального макета были использованы следующие материалы и компоненты:

- Основание из фанеры размерами 1000×1000×3 мм. (100 руб)
- Три однофазных электросчетчика, соответствующих международному стандарту IEC 62053-21, первого класса точности. (730*3=2190 руб.)
- Медный кабель длиной 10 метров с поперечным сечением жилы ~1 мм². (300 руб.)
- Четыре лампы накаливания различной мощности, две из которых моделируют легальных потребителей, а две — незаконных. (310 руб.)
- Четыре патрона для установки ламп. (223 руб.)
- Семь автоматических выключателя (500*7=3500 руб.).
- Шесть клеммных разветвителей (340 руб.)
- Три модуля беспроводной передачи данных на базе ESP32. (449*3 = 1347 руб.)
- Микрокомпьютер RerkaPi, выполняющий функции сервера сбора данных (7685 руб.)

- Розетка модульная (357 руб.)
 - DIN рейка, 6 штук (135*6 = 810 руб.)
- Общая стоимость макета: 17207 рублей.
Общий вид стенда представлен на рисунке 3.

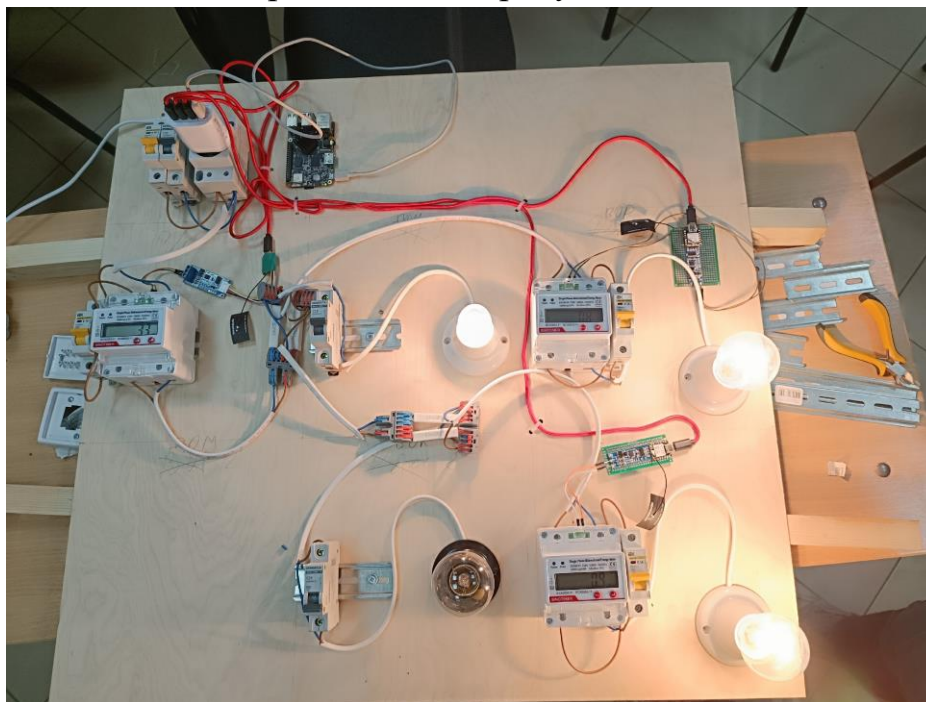


Рисунок 3, фотография стенда

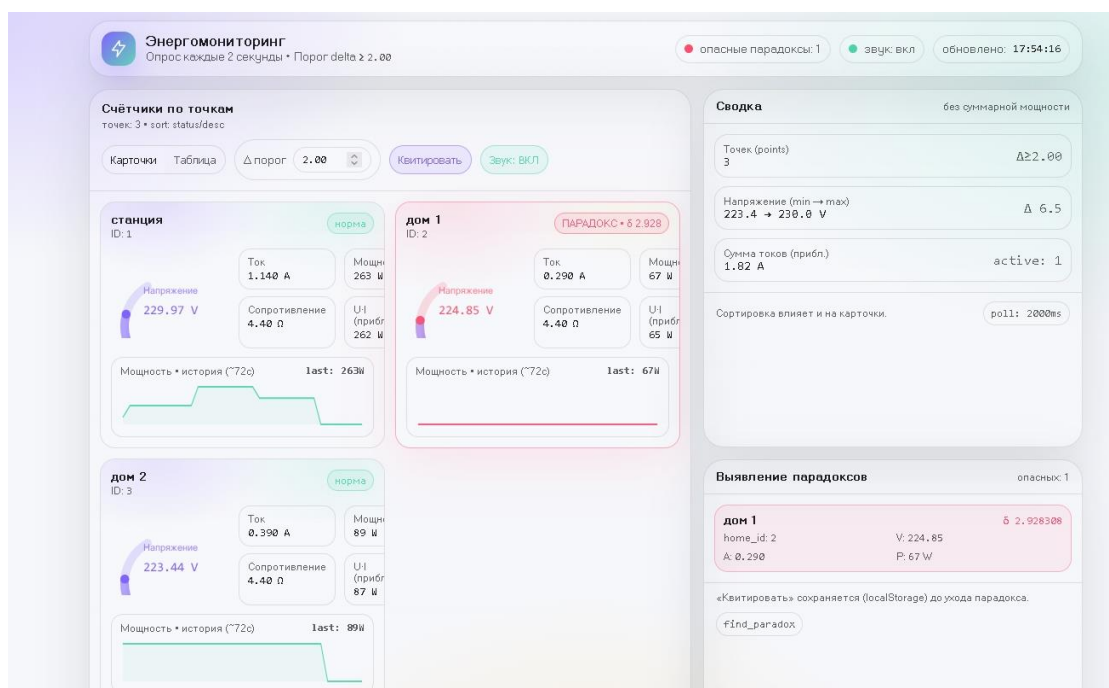


Рисунок 4, вид интерфейса мониторингового сервиса

Расчёт точности макета:

Для определения целесообразной мощности нагрузки, которую имеет смысл подключать к разрабатываемому макету, необходимо выполнить

расчёты в соответствии с формулами, приведёнными в подразделе 1.4. В качестве исходных данных примем следующее: макет содержит две лампы накаливания мощностью 95 и 60 Вт соответственно. Кроме того, в схеме установлены цементные резисторы сопротивлением 2,2 Ом каждый. Поскольку резисторы включены как в фазный, так и в нулевой проводники, эквивалентное сопротивление каждого отдельного участка составляет 4,4 Ом, что, в свою очередь, соответствует мощности порядка 10 Вт. Следовательно, мощность потребления $P_{\text{потребц}}$:

$$90+65+10=165 \text{ Ватт.}$$

Необходимо учитывать, что, согласно пояснению к формуле (4.1), величина $P_{\text{потребц}}$ берётся по показаниям приборов учёта электроэнергии (счётчиков) на станции. Вместе с тем её расчёт выполняется с целью определения минимального порогового значения мощности обнаружения, поскольку суммарное потребление станции включает также несанкционированные потери электроэнергии. Это приводит к увеличению мощности обнаружения, что, в свою очередь, снижает итоговую точность. Следует отметить, что указанное увеличение является несущественным и им можно пренебречь. Если же оно будет существенно повышать нижнюю границу обнаружения, то это означает, что мощность потребления самого нарушителя достаточно велика и, соответственно, заметно превышает нижнее пороговое значение, что обеспечивает возможность его обнаружения.

Теперь посчитаем коэффициент точности приборов исходя из формулы (4.2). Все счётчики в макете имеют первый класс точности, тогда $\delta_{\text{максподст}} = \delta_{\text{макспотреб}} = 1\%$, отсюда:

$$\delta_{\text{макс}} = 1\% + 1\% = 2\%$$

Тогда:

$$P_{\text{обн}} = 165 * 2\% = 3.3 \text{ Вт}$$

Выходит, что минимальная мощность обнаруживаемых хищений для нашего макета численно равна 3.3 Ватта.

Теперь подставим формулу (4.5) в формулу (4.4), после чего получившееся равенство подставим в формулу (4.3), получим:

$$P_{\text{лок}} \geq P_{\text{обн}} + \frac{\Delta U_{\text{min}}}{R_{\text{сегм}}} * U_{\text{сети}}$$

где: $P_{\text{обн}} = 3.3 \text{ Вт}$, $\Delta U_{\text{min}} = 0,1 \text{ В}$, $R_{\text{сегм}} = 4.4 \text{ Ом}$ Для простоты макета везде были поставлены одинаковые сопротивления, имитирующие высокую длину

проводов электролинии), $U_{\text{сети}} = 225\text{В}$ (это среднее значение, которое было получено из нескольких замеров)

Получаем:

$$P_{\text{локмин}} = 3.3 + \frac{0.1}{4.4} * 225 = 8.413 \text{ Вт}$$

Для экспериментальной верификации полученного значения на физической модели была использована светодиодная лампа номинальной мощностью 8–9 Вт, то есть соответствующая рассчитанному пороговому диапазону. При подключении указанной лампы в макет в качестве имитатора «вора» было установлено, что алгоритм с высокой надёжностью фиксирует наличие «вора» на рассматриваемом участке, однако обеспечить его точную локализацию удаётся не всегда. Иными словами, факт присутствия дополнительной нагрузки определяется корректно, тогда как локализация источника потребления иногда даёт неверный результат.

2.3 Система сбора и обработки информации.

С программной точки зрения демонстрационная система состоит из трёх частей:

1. Подсистема сбора информации. Она выполняет опрос счётчиков по интерфейсу RS-485, по протоколу MODBUS RTU, с заданной периодичностью, и записывает данные в базу данных Postgres. Для опроса счётчиков и отправки данных используются модули на базе ESP32, код для которых написан на платформе ESP-IDF на языке C с использованием модуля esp-modbus и встроенных библиотек платформы.

2. Подсистема обработки информации. Она, также с заданной периодичностью обращается к базе данных, вычитывает оттуда данные, выполняет над ними математические преобразования, описанные выше, делает выводы о наличии или отсутствии несанкционированного потребления электроэнергии и его локализации. Данная обработка написана на языке Си.

3. Подсистема отображения обработанной информации. Она представляет собой веб-сервер на Grafana, который обеспечивает лёгкий доступ к этим данным через сеть интернет с любого компьютера / планшета / мобильного телефона.

Исходные коды всех трёх подсистем вместе с подробным описанием расположены по адресам: <https://github.com/glutesha/counter-modbus-node>

https://github.com/AlexVoidITO/panopticum_show.git

Заключение

В ходе выполненного проекта разработан и экспериментально проверен метод обнаружения и локализации несанкционированного потребления электроэнергии на основе балансового анализа электрических параметров сети. Данная методика позволяет в режиме реального времени отслеживать возникновение аномальных потерь энергии и автоматически фиксировать факт безучётного потребления по отклонению баланса токов в контролируемом сегменте. В отличие от традиционных подходов, основанных на периодических рейдах и визуальном осмотре линий электропередач, предложенное решение обеспечивает оперативное выявление нарушений без необходимости сплошных физических проверок, что значительно повышает эффективность и экономичность борьбы с хищениями электроэнергии.

В работе последовательно реализованы теоретическое обоснование метода, компьютерное моделирование и практическая проверка на созданном макете. Разработанная математическая модель включает систему балансовых уравнений, позволяющих рассчитать ожидаемые токи и потери на участках сети при известной легальной нагрузке. Несанкционированное подключение выявляется как нарушение равенства между измеренными приборами учёта токами и расчётными значениями. Для локализации источника хищения предложен алгоритм анализа распределения потерь: вводится сравнение фактических и расчетных (теоретических) потерь на разных участках линии с их нормированием, после чего вычисляется производная разности этих потерь вдоль линии. Максимум модуля производной указывает на участок с резко возросшими потерями, то есть на точку подключения нелегальной нагрузки. Моделирование в среде Multisim подтвердило работоспособность метода в идеальных условиях: при внесении в схему «потребителя-вора» баланс мощностей нарушался, и алгоритм корректно зафиксировал аномалию, а также указал сегмент с дополнительной нагрузкой по резкому скачку потерь.

Практические испытания на созданном лабораторном стенде показали высокую эффективность и прикладную значимость разработанной системы. Макет электрической сети с тремя узлами учёта (электросчётчиками) и регулируемой нагрузкой позволил воспроизвести сценарии с различными величинами несанкционированного отбора энергии. Результаты экспериментов подтвердили, что метод способен надёжно обнаруживать факт хищения электроэнергии даже при относительно небольшой «краже» (порядка нескольких процентов от суммарного потребления сегмента). Так, для собранного стенда минимальная обнаруженная мощность нелегальной нагрузки составила около 3,3 Вт, что согласуется с расчетной пороговой чувствительностью метода. Локализация конкретного места подключения в

реальных условиях также достигнута: алгоритм верно определил участок линии, на котором присутствовал «вор», при достаточно существенной аномальной нагрузке. Таким образом, поставленные в проекте задачи полностью выполнены: создан универсальный подход к автоматическому контролю утечек электроэнергии, реализованы программные средства сбора и обработки данных, а эффективность метода доказана как моделированием, так и испытаниями на физическом стенде.

Разработанный метод обладает хорошими перспективами развития и внедрения. В дальнейшем возможно повышение чувствительности и точности локализации за счет применения более совершенных приборов учёта (например, интеллектуальных счётчиков с более высоким классом точности и функцией регистрации вмешательств) и увеличения числа контрольных точек на линии. Алгоритм может быть доработан с учётом влияния внешних факторов – сезонных колебаний нагрузки, неравномерности фазных нагрузок, а также помех и погрешностей измерений в реальных сетях. Интеграция системы в состав умных сетей (Smart Grid) и автоматизированных информационно-измерительных систем позволит проводить мониторинг потребления в масштабе всего распределительного участка и обнаруживать хищения практически в режиме онлайн. Дополнительно, применение методов машинного обучения для анализа профилей нагрузки обещает повысить обнаруживаемость скрытых аномалий и снизить вероятность ложных срабатываний.

Список использованных источников

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство. – М.: ЭНАС, 2016. – 456 с.
2. ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. – Введ. 01.10.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с.
3. Галиев И.Р., Грибанов А.А. Методы выявления безучётного потребления электроэнергии // Вестник науки. – 2024. – № 11 (80). – С. 1342–1345. Электронный ресурс: <https://вестник-науки.рф/article/18882> (дата обращения: 12.01.2026).
4. Counter-modbus-node / GitHub-репозиторий [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/glutesha/counter-modbus-node> (дата обращения: 12.01.2026).
5. Panopticum_show / GitHub-репозиторий [Электронный ресурс]. – URL: https://github.com/AlexVoidITO/panopticum_show (дата обращения: 12.01.2026).

Приложение 1.

Таблица с данными, вычисленными по модели с вором

Номер дома	Напряжение на вводе, В.	Потребляемый ток, А	Потребляемая мощность, Вт	Сопротивление участка, Ом	Реальные потери на проводах, Вт	Сумма токов, А	Теоретические потери на проводах, Вт	Разница потерь, Вт (формула 3.5)	Производная (формула 3.8)
Станция	230	96,7	22000						
Вязова1	228,55	4,57	1045	0,015	140,167	89,24	119,46	20,710	0,917
Вязова2	227,17	5,41	1229	0,015	127,328	84,67	107,535	19,793	-0,101
Вязова3	225,78	4,03	910	0,016	120,409	79,26	100,514	19,894	3,510
Вязова4	224,62	4,08	917	0,014	95,618	75,23	79,233	16,384	-3,729
Вязова5	223,21	5,07	1132	0,018	111,235	71,15	91,121	20,113	20,181
Вязова6	221,95	4,93	1095	0,019	82,896	66,08	82,964	-0,068	-0,093
Вязова7	221,22	3,4	752	0,012	44,896	61,15	44,871	0,024	0,053
Вязова8	220,35	4,08	899	0,015	49,997	57,75	50,026	-0,029	-0,058
Вязова9	219,49	4,77	1047	0,016	46,117	53,67	46,087	0,0300	0,020
Вязова10	218,47	4,55	994	0,021	50,225	48,9	50,215	0,01	0,01
Вязова11	217,58	3,11	676	0,02	39,338	44,35	39,338	0	0,049
Вязова12	216,96	4,09	888	0,015	25,461	41,24	25,511	-0,049	-0,082
Вязова13	216,33	3,86	835	0,017	23,495	37,15	23,462	0,033	0,048
Вязова14	215,73	6,35	1369	0,018	19,933	33,29	19,948	-0,015	-0,012
Вязова15	215,3	4,68	1008	0,016	11,610	26,94	11,612	-0,002	0,038
Вязова16	214,97	5	1075	0,015	7,392	22,26	7,432	-0,040	-0,060
Вязова17	214,67	4,29	921	0,017	5,084	17,26	5,064	0,020	0,038
Вязова18	214,54	3,64	780	0,01	1,664	12,97	1,682	-0,018	-0,019
Вязова19	214,4	3,83	820	0,015	1,306	9,33	1,306	0,001	-0,004
Вязова20	214,32	5,5	1178	0,015	0,459	5,5	0,453	0,005	0,005

РЕЦЕНЗИЯ научного руководителя на проектную работу

«Разработка способа обнаружения и локализации утраты электроэнергии на участке электросети»

Представленная проектная работа посвящена разработке и экспериментальной проверке метода обнаружения и локализации несанкционированного потребления электроэнергии (в том числе на линиях частного сектора). Тема является актуальной: авторы обоснованно указывают на значимость коммерческих потерь и практическую потребность сетевых организаций в более оперативных, чем «сплошные обходы», подходах к выявлению нарушений.

Авторы предложили метод первичного детектирования на основе баланса токов (сопоставление тока на подстанции и суммы токов потребителей) и алгоритм локализации по анализу распределения потерь: рассчитываются фактические и теоретические потери на участках, выполняется нормирование по сопротивлениям сегментов, далее вычисляется производная разности нормированных потерь; максимум (пик) производной интерпретируется как участок резкого изменения, соответствующий точке аномалии. Подход логично выведен из базовых соотношений (закон Ома, мощность), а математическая часть изложена последовательно, включая оценку чувствительности/порогов обнаружения и локализации.

Практическая часть выполнена на хорошем уровне. Работоспособность подтверждена:

- имитационным моделированием в Multisim (на примере участка сети с несколькими потребителями и введением «незаконной» нагрузки), где показано нарушение баланса и корректная локализация в идеальных условиях;
- созданием физического стенда (электросчётчики, нагрузка, имитация линии сопротивлениями, сбор данных на ESP32 по RS-485/Modbus, хранение в Postgres, обработка на C, визуализация в Grafana). Описаны состав стенда и ориентировочная стоимость, приведены результаты испытаний на «неидеальных» данных: факт наличия аномалии фиксируется надёжно, точность локализации при малой мощности нарушителя нестабильна — что является честным и важным результатом.

Достоинства работы:

1. комплексность: теория → моделирование → физическая проверка → программная автоматизация (сквозной инженерный цикл);
2. корректная постановка вопроса о точности: введены пороговые оценки, обсуждается влияние погрешностей и сопротивлений линии;
3. адекватная архитектура демонстрационной системы сбора/обработки/визуализации данных.

Заключение. Работа завершённая, содержит элементы исследовательской новизны для прикладного уровня, подтверждена моделированием и экспериментом на стенде, а также подкреплена программной реализацией. Считаю, что проект **соответствует требованиям к проектной/исследовательской работе и рекомендуется к защите.**

Научный руководитель: Адамский С. С.

Дата: «12» января 2026 г.

