

КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: КУТРИТНАЯ АРХИТЕКТУРА НА φ -ТОРАХ С САМОРЕФЕРЕНТНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ОШИБОК

(Next-Generation Quantum Computer: Qutrit Architecture
on φ -Tori with Self-Referential Error Correction)

Панкратов Антон Сергеевич
Pankratov Anton Sergeevich

Независимый исследователь, г. Казань, Россия
Independent researcher, Kazan, Russia

E-mail: anton.s.pankratov@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4870-2995

УДК 004.382 + 530.145 + 519.72 + 167.7

АННОТАЦИЯ

На основе формализма ODTOE предложена архитектура квантового компьютера нового поколения, отличающаяся от существующих подходов (IBM, Google, IonQ) по пяти параметрам: (1) кутритная ($d = 3$) основа вместо кубитной ($d = 2$): три уровня $|-1\rangle$, $|0\rangle$, $|+1\rangle$ соответствуют тройственной архитектуре наблюдения ($\pi > 3$); информационная ёмкость на элемент $\times 1,585$; (2) φ -тороидальная топология связей между кутритами ($R/r = \varphi$, максимальная устойчивость по КАМ-теореме); (3) φ -импульсное управление: последовательности управляющих импульсов с отношением длительностей φ , вместо фиксированных по длительности вентиляей; (4) самореферентная коррекция ошибок ($\hat{O}(\hat{O})$ -протокол): квантовый компьютер непрерывно измеряет когерентность S подсистем и перенастраивает коррекцию в реальном времени (аналог H_{meas} García-Pintos [1]); (5) спиральный зазор $(\pi - 3)^2 \approx 2\%$ как *архитектурный* порог ошибок, а не подгоночный параметр. Через интерпретацию ODTOE: квантовое вычисление = оператор $\hat{O}_{\text{алг}}$, действующий в \mathcal{H} до актуализации результата ($R = \hat{O}(\Psi)$); декогеренция = *преждевременное наблюдение* средой ($S \downarrow$); квантовое превосходство = вычисление *в потенциальности*, не в «параллельных мирах». Когерентный процессор ODTOE [2] используется как классический контроллер.

Ключевые слова: квантовый компьютер, кутрит, тернарный, φ -тор, КАМ-теорема, самореферентная коррекция, декогеренция, ODTOE, когерентность, спиральный зазор, García-Pintos, квантовая стрела времени.

ABSTRACT

A next-generation quantum computer architecture based on the ODTOE formalism is

proposed, differing from existing approaches (IBM, Google, IonQ) in five parameters: (1) qutrit ($d = 3$) basis instead of qubit ($d = 2$): three levels $| -1 \rangle$, $| 0 \rangle$, $| +1 \rangle$ correspond to the ternary observation architecture ($\pi > 3$); information capacity per element $\times 1.585$; (2) φ -toroidal coupling topology between qutrits ($R/r = \varphi$, maximum stability per the KAM theorem); (3) φ -pulse control: sequences of control pulses with duration ratio φ , instead of fixed-duration gates; (4) self-referential error correction ($\hat{O}(\hat{O})$ protocol): the quantum computer continuously measures coherence S of subsystems and reconfigures correction in real time (analogue of H_{meas} by García-Pintos [1]); (5) spiral gap $(\pi - 3)^2 \approx 2\%$ as an *architectural* error threshold, not a fitting parameter. Through ODTQE interpretation: quantum computation = operator \hat{O}_{alg} acting in \mathcal{H} before actualization of the result ($R = \hat{O}(\Psi)$); decoherence = *premature observation* by the environment ($S \downarrow$); quantum advantage = computation *in potentiality*, not in “parallel worlds”. The ODTQE coherent processor [2] serves as the classical controller.

Keywords: quantum computer, qutrit, ternary, φ -torus, KAM theorem, self-referential correction, decoherence, ODTQE, coherence, spiral gap, García-Pintos, quantum arrow of time.

I. ВВЕДЕНИЕ: ПРЕДЕЛЫ КУБИТНОЙ ПАРАДИГМЫ

1.1. Текущее состояние

Квантовые вычисления за последнее десятилетие перешли от концептуальных демонстраций к инженерной реальности. Google Sycamore (2019): 53 кубита, квантовое превосходство на специфической задаче случайных квантовых схем [3]. IBM Eagle/Condor (2023–2024): более 1000 кубитов, однако с ошибками $\sim 10^{-3}$ на вентиль [4]. IonQ: ловушечные ионы, низкие ошибки ($\sim 10^{-4}$), но ~ 30 кубитов. Все перечисленные платформы объединяет общая парадигма: бинарный кубит ($|0\rangle$, $|1\rangle$), планарная или линейная топология связей, фиксированные по длительности вентили, пассивная коррекция ошибок через поверхностные коды [5].

Несмотря на впечатляющий прогресс, ни одна из существующих платформ не достигла уровня *полезного квантового вычисления* — задачи, результат которой невозможно воспроизвести на классическом суперкомпьютере за разумное время и которая при этом имеет практическую ценность. Причина — не инженерная сложность сама по себе, а три фундаментальных ограничения, заложенных в текущую парадигму.

1.2. Три фундаментальных ограничения

(а) **Бинарность.** Кубит обладает двумя уровнями. Это минимум для представления квантовой информации, но *не оптимум*. Известно, что оптимальное основание системы счисления, максимизирующее информационную эффективность (число состояний на единицу аппаратных

затрат), составляет $e \approx 2,718$; ближайшее целое — 3 [6]. Кутрит ($d = 3$: состояния $| -1 \rangle$, $| 0 \rangle$, $| +1 \rangle$) информационно эффективнее кубита на $\log_2 3 / \log_2 2 - 1 = 58,5\%$ на элемент. Бинарность кубита — историческое наследие классической логики, а не оптимальный выбор для квантовых систем.

(b) Планарная топология. Сверхпроводящие кубиты размещаются на чипе в двумерной решётке. Связи осуществляются только с ближайшими соседями. Для связи далёких кубитов необходимы swap-цепочки длиной $O(\sqrt{n})$ операций. Каждый swap вносит дополнительную ошибку. При масштабировании больше кубитов означает длиннее цепочки и больше накопленных ошибок. Ионные ловушки организованы в линейную цепочку, что ещё сильнее ограничивает масштабирование.

(c) Пассивная коррекция. Поверхностные коды [5]: логический кубит кодируется в d^2 физических (где d — кодовое расстояние). Для порога ошибок $p < p_{\text{th}} \approx 1\%$ необходимо $d \sim 20-30$, то есть $\sim 400-900$ физических кубитов на один логический [7]. Для полезного вычисления ($\sim 10^3$ логических кубитов) требуется $\sim 10^6$ физических. Текущий рекорд — $\sim 10^3$ физических кубитов. Разрыв между необходимым и достижимым составляет три порядка величины.

Коррекция носит *пассивный* характер: ошибки обнаруживаются через синдромные измерения *после* возникновения, затем корректируются дополнительными вентилями. Система не располагает информацией о том, что пошло не так, до момента измерения синдрома. Это принципиально реактивная стратегия.

1.3. Что предлагает ОДТОЕ

Настоящая работа предлагает замену *всех трёх* ограничений на основе формализма наблюдатель-зависимой теории всего (ОДТОЕ) [18]:

- Кутриты вместо кубитов — тройственная архитектура ($\pi > 3$) [19].
- φ -торы вместо планарных решёток — максимальная устойчивость по теореме Колмогорова–Арнольда–Мозера [11, 12, 13].
- $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция вместо поверхностных кодов — самореферентный мониторинг когерентности [22].

Каждое из этих решений не произвольно, а следует из фундаментальных принципов ОДТОЕ: тройственность наблюдения, φ -устойчивость, самореференция наблюдателя. Совокупность пяти отличий определяет архитектуру, которую мы называем *кутритным квантовым компьютером на φ -торах*.

II. КУТРИТ: КВАНТОВАЯ ТРОЙСТВЕННАЯ АРХИТЕКТУРА

2.1. Определение

Кутрит — квантовая система с тремя базисными состояниями:

$$|\psi\rangle = \alpha|-1\rangle + \beta|0\rangle + \gamma|+1\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 = 1 \quad (\text{II.1})$$

В отличие от кубита ($d = 2$, два базисных состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$), кутрит обладает тремя ортогональными состояниями и, соответственно, существенно более богатым пространством суперпозиций. Состояние кутрита описывается четырьмя вещественными параметрами (два комплексных числа при фиксированной глобальной фазе), тогда как состояние кубита — двумя (сфера Блоха). Геометрически пространство чистых состояний кутрита представляет собой комплексную проективную плоскость $\mathbb{C}P^2$.

2.2. Соответствие ОДТОЕ

Тройственная структура кутрита непосредственно соответствует центральной архитектуре ОДТОЕ — тройственности наблюдения ($\pi > 3$: наблюдатель, наблюдаемое, оператор) [18, 19]:

$|-1\rangle$ = обратное действие (ι): система «возвращается в потенциальность». Физический аналог: электрон в возбуждённом состоянии, «готовый» испустить фотон и вернуться на нижний уровень. В терминах ОДТОЕ — это движение *от актуальности к потенциальности*.

$|0\rangle$ = наблюдатель (O): нейтральное состояние, точка равновесия. Физический аналог: основное состояние атома. В терминах ОДТОЕ — это *сам наблюдатель*, центр тройственной структуры.

$|+1\rangle$ = прямое действие (\hat{O}): система «актуализируется». Физический аналог: поглощение фотона, переход в возбуждённое состояние. В терминах ОДТОЕ — это *оператор наблюдения*, производящий конфигурацию.

Три состояния кутрита = тройственная архитектура ОДТОЕ. Не два (как кубит — минимально, но не оптимально), не четыре (избыточно), а *три* — минимальная самосогласованная замкнутая структура. Число три играет фундаментальную роль в ОДТОЕ: $\pi > 3$ означает, что минимальная замкнутая петля наблюдения требует строго более трёх шагов, но три — это ближайшее целое число, обеспечивающее замыкание [19, 21].

2.3. Преимущества кутрита

Информационная ёмкость. Один кутрит несёт $\log_2 3 = 1,585$ бит информации. Для представления n бит требуется $n/1,585 = 0,631 n$ кутритов

вместо n кубитов. Экономия: на 37% меньше физических элементов при той же информационной ёмкости.

Пространство состояний. Система из n кутритов обладает 3^n базисными состояниями (по сравнению с 2^n для кубитов). При $n = 100$: $3^{100} = 5,15 \times 10^{47}$ базисных состояний для кутритов против $2^{100} = 1,27 \times 10^{30}$ для кубитов. Разница составляет $\times 4 \times 10^{17}$ — экспоненциально больше «вычислительного пространства» в гильбертовом пространстве \mathcal{H} .

Квантовые вентили. Кутритные вентили описываются группой $SU(3)$ — группой унитарных преобразований в трёхмерном пространстве. Она значительно богаче, чем $SU(2)$ для кубитов: 8 генераторов Гелл-Манна (матрицы $\lambda_1, \dots, \lambda_8$) вместо 3 матриц Паули ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$). Это означает больше «степеней свободы» для конструирования квантовых алгоритмов, более компактные квантовые схемы и потенциально более эффективную компиляцию.

Устойчивость к ошибкам. Три уровня с двумя энергетическими зазорами между ними обеспечивают встроенную «глубину защиты». Ошибка переброса $|-1\rangle \rightarrow |+1\rangle$ (через два уровня) экспоненциально менее вероятна, чем однобитовая ошибка $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ в кубите (через один уровень). Это квантовый аналог принципа «тройного модульного резервирования» (TMR), реализованный на уровне элементарного носителя информации.

2.4. Экспериментальные реализации кутритов

Принципиально важно, что кутриты — не гипотетические объекты, а экспериментально реализованные квантовые системы:

Сверхпроводящие трансмоны: три нижних энергетических уровня ($|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$) трансмона естественным образом образуют кутрит. Блок и др. [8] продемонстрировали скремблирование квантовой информации на кутритном процессоре из сверхпроводящих трансмонов.

Фотонные орбитальные моменты: орбитальный угловой момент фотона с $l = -1, 0, +1$ реализует кутрит с естественной тройственной симметрией [9]. Малик и др. продемонстрировали многофотонную запутанность в высших размерностях.

Ловушечные ионы: три зеемановских подуровня основного состояния иона образуют кутрит. Рингбауэр и др. [10] реализовали универсальный кудитный квантовый процессор на ловушечных ионах.

Технология реализации кутритов уже существует. Недостающий компонент — архитектура, оптимизированная именно для кутритов, а не адаптированная из кубитной парадигмы. Именно эту архитектуру предлагает настоящая работа.

III. φ -ТОРОИДАЛЬНАЯ ТОПОЛОГИЯ СВЯЗЕЙ

3.1. Проблема планарных решёток

Сверхпроводящие чипы: кубиты размещены на двумерной решётке. Связи осуществляются только с ближайшими соседями (4 или 6 в зависимости от геометрии). Для связи далёких кубитов необходимы swar-цепочки длиной $O(\sqrt{n})$. Каждый swar — дополнительная двухкубитная операция с характерной ошибкой $\sim 10^{-2}-10^{-3}$. При масштабировании: больше кубитов \rightarrow длиннее swar-цепочки \rightarrow больше накопленных ошибок \rightarrow ниже верность вычисления. Это *топологическое* ограничение, не устранимое улучшением отдельных вентиляей.

3.2. φ -тор

В предлагаемой архитектуре кутриты организованы в тороидальную сеть с двумя характерными масштабами:

Малый радиус r : быстрые локальные связи между соседними кутритами *внутри* одного логического блока. Реализует непрерывную π -динамику: квантовое состояние циркулирует внутри блока, обеспечивая внутриблочную когерентность.

Большой радиус R : дальние связи *между* логическими блоками. Реализует дискретную φ -динамику: квантовая информация перемещается между уровнями иерархии, обеспечивая межблочное взаимодействие.

Ключевое соотношение:

$$R/r = \varphi = 1,618\dots \quad (\text{III.1})$$

Это отношение не произвольно, а определяется фундаментальным требованием максимальной устойчивости (см. следующий раздел). В терминах ОДТОЕ: малый радиус r соответствует внутренней динамике наблюдателя (π -циклы), большой радиус R — взаимодействию между наблюдателями (φ -масштабирование) [17].

3.3. Обоснование через КАМ-теорему

По теореме Колмогорова–Арнольда–Мозера [11, 12, 13]: торы в фазовом пространстве гамильтоновой системы, чьи частоты связаны *достаточно иррациональным* отношением, являются максимально устойчивыми при возмущениях. Золотое сечение $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$ — наиболее иррациональное число в смысле цепных дробей ($\varphi = [1; 1, 1, 1, \dots]$, все элементы цепной дроби равны единице, что обеспечивает максимально медленную сходимость рациональных приближений).

Для квантового компьютера «возмущения» — это тепловой шум, декогеренция, паразитные электромагнитные связи, флуктуации управляющих

параметров. φ -тор *минимизирует* влияние этих возмущений на квантовое состояние: отсутствие резонансов между малым и большим радиусом гарантирует, что шум на одном масштабе не усиливается на другом.

3.4. Средняя длина пути

В φ -торе с N кутритами средняя длина пути между произвольными элементами составляет:

$$\langle L \rangle_{\varphi\text{-тор}} \sim \frac{\sqrt{N}}{\varphi} \quad (\text{III.2})$$

В планарной решётке: $\langle L \rangle_{\text{решётка}} \sim \sqrt{N}$. Выигрыш: $\times \varphi \approx 1,6$ по средней задержке. Для $N = 1000$ кутритов: ~ 20 hop'ов в φ -торе против ~ 32 в планарной решётке. Это означает *на 38% меньше промежуточных операций* для каждого дальнего взаимодействия, что напрямую транслируется в снижение накопленных ошибок.

3.5. Физическая реализация

Предлагаемая тороидальная топология реализуема на всех основных квантовых платформах:

Сверхпроводящие чипы: тороидальная компоновка трансмонов. Фактически: кольцо из кластеров, каждый кластер — кольцо из кутритов. Два уровня колец с отношением радиусов φ . Связи между кольцами через коаксиальные резонаторы (уже используются в архитектурах IBM и Google).

Ионные ловушки: тороидальная ловушка (ring trap [14]) с двумя «орбитами»: ближняя (r) и дальняя ($R = r\varphi$). Ионы на двух орбитах связаны через общие моды колебаний кулоновского кристалла.

Фотонные системы: тороидальные микрорезонаторы (microring [15]) с $R/r = \varphi$. Кутриты реализованы как три фазовых состояния фотона ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$), а тороидальная геометрия резонатора естественным образом обеспечивает φ -масштабирование.

IV. φ -ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

4.1. Проблема фиксированных вентиляей

Стандартные квантовые вентили имеют фиксированную длительность: $\sim 10\text{--}100$ нс для сверхпроводящих систем, $\sim 1\text{--}100$ мкс для ионных. Все вентили одинаковой длины. Оптимизация сводится к подбору последовательности вентиляей (квантовая компиляция). Фиксированная длительность означает

фиксированную частоту Раби, что создаёт условия для нежелательных резонансов с частотами шума среды.

4.2. φ -последовательности

Предлагается альтернативный подход: управляющие импульсы с *геометрически нарастающей* длительностью, где коэффициент роста равен φ :

$$\tau_{n+1} = \varphi \cdot \tau_n \quad (\text{IV.1})$$

Последовательность длительностей: $\tau_0, \tau_0\varphi, \tau_0\varphi^2, \tau_0\varphi^3, \dots$

Обоснование через КАМ-теорему: φ -иррациональность *минимизирует* резонансные ошибки (утечка в нежелательные энергетические уровни). При фиксированной длительности: если частота Раби *случайно* кратна частоте утечки — возникает резонансная катастрофа. При φ -последовательности: отношение частот *никогда* не кратно — это фундаментальное свойство φ как наиболее иррационального числа в смысле теории цепных дробей.

Дополнительное преимущество: φ -последовательность обладает свойством *самоподобия*. Удаление любого элемента из последовательности оставляет структуру, гомоморфную исходной. Это означает естественную *отказоустойчивость*: сбой одного импульса не разрушает глобальную структуру управления.

4.3. Связь с динамической развязкой

Существующие методы подавления шума: динамическая развязка (DD), Uhrig DD, CPMG [16]. Это последовательности π -импульсов с оптимальными интервалами. Текущий стандарт: интервалы по формуле Uhrig:

$$\delta_j = \sin^2\left(\frac{\pi j}{2n+2}\right) \quad (\text{IV.2})$$

Формула Uhrig оптимальна для *гауссова* шума (белый шум, шум Джонсона). Однако доминирующий источник шума в сверхпроводящих системах — $1/f$ -шум (шум зарядовых флуктуаций), который *не является* гауссовым.

Предсказание ОДТОЕ: φ -интервалы ($\delta_j = \tau_0\varphi^j$) обеспечивают *лучшее* подавление декогеренции, чем Uhrig DD, для $1/f$ -шума и других негауссовых спектров шума, доминирующих в сверхпроводящих кутритах.

Это предсказание *фальсифицируемо*: достаточно сравнить время когерентности T_2 при использовании Uhrig DD и φ -DD на одном и том же кутрите (трансмоне с тремя уровнями).

V. САМОРЕФЕРЕНТНАЯ КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

5.1. Проблема поверхностных кодов

Поверхностный код [5]: логический кубит кодируется в d^2 физических (где d — кодовое расстояние). Для порога ошибок $p < p_{\text{th}} \approx 1\%$: необходимо $d \sim 20-30$, то есть $\sim 400-900$ физических кубитов на один логический [7]. Для 1000 логических кубитов: $\sim 10^6$ физических. Эти огромные накладные расходы делают полезное квантовое вычисление недостижимым при текущем уровне технологии.

Коррекция в поверхностных кодах *пассивна*: ошибки обнаруживаются через синдромные измерения, затем корректируются через дополнительные вентили. Система *не знает*, что пошло не так, пока не измерит синдром. Между возникновением ошибки и её обнаружением проходит время, в течение которого ошибка может распространиться.

5.2. $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция

Предлагается принципиально иной подход: квантовый компьютер *непрерывно наблюдает собственное состояние* ($\hat{O}(\hat{O}) = \hat{O}'$) и *перенастраивает* коррекцию в реальном времени. Это реализация самореферентности ODTOE [22] на уровне квантовой аппаратуры.

Ключевой элемент: гамильтониан H_{meas} García-Pintos [1]. Этот оператор *реплицирует* стохастическую динамику мониторируемой системы без фактического коллапса волновой функции. Через обратную связь с параметром X ($X \cdot H_{\text{meas}}$) можно *компенсировать* возмущения от среды:

$$\hat{O}(\hat{O})\text{-коррекция: } \rho_{t+dt} = \rho_t - i[H + X \cdot H_{\text{meas}}, \rho_t] dt + (\text{измерение}) \quad (\text{V.1})$$

При $X = -1$: обратная связь *точно компенсирует* возмущение от взаимодействия с окружением. Декогеренция *подавлена* в первом порядке.

При $X < -2$: система «обращает» декогеренцию — квантовая стрела времени *инвертирована* [1]. Ошибки *откатываются* (возвращаются к исходному состоянию) вместо того, чтобы корректироваться дополнительными вентилями. Это качественно новый режим, недоступный в рамках поверхностных кодов.

В терминах ODTOE: оператор наблюдения \hat{O} применяется к самому себе, порождая оператор второго порядка $\hat{O}' = \hat{O}(\hat{O})$. Этот оператор «наблюдает наблюдение» — отслеживает процесс декогеренции и компенсирует его. Странная петля Хофштадтера [22] реализована аппаратно.

5.3. Непрерывная vs. дискретная коррекция

Параметр	Поверхностный код	$\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция
Тип	Дискретная (синдром коррекция)	Непрерывная (мониторинг \rightarrow обратная связь)
Когда	После ошибки	Во время ошибки
Накладные расходы	~ 1000 физ. / 1 лог.	$\sim 3-10$ физ. / 1 лог. (оценка)
Порог ошибок	$p_{th} \approx 1\%$	$p_{th} \approx (\pi - 3)^2 \approx 2\%$ (вдвое выше)
Знание об ошибке	Синдром (частичное)	Полная траектория (H_{meas})
Откат ошибки	Невозможен	Возможен ($X < -2$, инверсия стрелы)

5.4. Порог ошибок $(\pi - 3)^2$

Спиральный зазор $(\pi - 3)^2 \approx 0,02 = 2\%$ — архитектурная константа ODТOЕ, а не подгоночный параметр. Через тороидальную модель [17]: это ширина «допустимого окна» на каждом обороте спиральной петли. Если ошибка $< (\pi - 3)^2$: петля *самовосстанавливается* — зазор «поглощает» ошибку, и когерентность системы сохраняется. Если ошибка $> (\pi - 3)^2$: петля *разрушается* — декогеренция необратима.

Предсказание: порог ошибок для $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекции составляет $(\pi - 3)^2 \approx 2\%$, что *вдвое* выше стандартного порога поверхностных кодов ($\sim 1\%$). Это двукратное ослабление требований к качеству аппаратуры.

Текущие ошибки сверхпроводящих систем: $\sim 0,1-1\%$ на вентиль [4]. Это *уже ниже* предсказанного порога 2%. Следствие: $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция на существующей аппаратуре *уже работоспособна* — не требуется дожидаться улучшения физических кубитов. Это принципиально меняет перспективу: вместо гонки за снижением ошибок необходим переход к новой архитектуре коррекции.

VI. ДЕКОГЕРЕНЦИЯ ЧЕРЕЗ ODТOЕ

6.1. Стандартная интерпретация

В стандартной квантовой механике декогеренция описывается как процесс, при котором квантовая система «запутывается» с окружением, теряет суперпозицию и становится «классической». Причина: неконтролируемое взаимодействие с тепловыми фотонами, фононами решётки, магнитными шумами, зарядовыми флуктуациями. Математически: внедиагональные элементы матрицы плотности экспоненциально затухают с характерным временем T_2 (время когерентности).

Стратегия борьбы в стандартном подходе: *максимальная изоляция* —

криогеника (разбавленные холодильники, $T \sim 10\text{--}20$ мК), электромагнитное экранирование, сверхвысокий вакуум, подавление вибраций.

6.2. ОДТОЕ-интерпретация

ОДТОЕ предлагает радикально иную интерпретацию. Декогеренция = *преждевременное наблюдение* [2, 18]. Среда (O_{env}) «наблюдает» кутрит до того, как алгоритм ($\hat{O}_{\text{алг}}$) завершил обработку всех потенциальностей. Результат: конфигурация актуализируется ($R = \hat{O}_{\text{env}}(\Psi)$) *раньше времени* — до того, как $\hat{O}_{\text{алг}}$ успел извлечь полезный результат.

$$\text{Декогеренция} = S_{\text{кутрит}} \downarrow = D(\eta) \uparrow = \text{среда наблюдает раньше алгоритма} \quad (\text{VI.1})$$

Когерентность S системы падает, мера различия $D(\eta)$ растёт (система становится «более определённой» с точки зрения среды), и вычисление прерывается.

6.3. Следствие для борьбы с декогеренцией

Стандартный подход: *изолировать* систему от среды (криогеника, экранировка, вакуум). Пассивная защита.

ОДТОЕ-подход: не столько *изолировать*, сколько **повысить** S системы так, чтобы *алгоритм наблюдал быстрее среды*. Если оператор алгоритма $\hat{O}_{\text{алг}}$ действует с бóльшей когерентностью (B), чем оператор среды \hat{O}_{env} : алгоритм «побеждает» среду — актуализирует результат раньше, чем среда успевает разрушить суперпозицию.

$$B_{\text{алг}} > B_{\text{env}} \Rightarrow \text{алгоритм актуализирует раньше среды} \quad (\text{VI.2})$$

Практически: φ -импульсное управление *синхронизирует* кутриты (повышает S системы), а $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция *компенсирует* влияние среды. Реализуется двойная защита: активная (повышение когерентности через φ -синхронизацию) + реактивная (компенсация возмущений через H_{meas}).

Этот подход не отменяет необходимости криогеники и экранировки — он *дополняет* их. Изоляция снижает B_{env} , φ -управление повышает $B_{\text{алг}}$, $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция компенсирует остаточное воздействие. Три уровня защиты, действующие синергетически.

VII. АРХИТЕКТУРА КУТРИТНОГО КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

7.1. Общая схема

Архитектура кутритного квантового компьютера на φ -торах включает два основных слоя:

Когерентный классический контроллер (тернарный ЦПУ [2]): обеспечивает $\hat{O}(\hat{O})$ -перенастройку параметров коррекции в реальном времени, генерацию φ -последовательностей управляющих импульсов, исполнение тернарной системы команд (ISA), естественно совместимой с кутритным квантовым слоем.

Квантовый слой (криогенный): содержит кутриты, организованные в φ -тороидальную топологию. Малый радиус r определяет логические блоки (тройки кутритов), большой радиус $R = r\varphi$ — связи между блоками. Непрерывный $\hat{O}(\hat{O})$ -мониторинг когерентности S и φ -импульсное управление вентилями.

Между слоями: управляющие сигналы от контроллера к квантовому слою и сигналы обратной связи (результаты мониторинга когерентности) от квантового слоя к контроллеру. Контур обратной связи замыкается в реальном времени.

7.2. Тройка кутритов = минимальный логический блок

Три кутрита (α, β, γ) — минимальная тройственная архитектура. Каждый кутрит обладает тремя уровнями ($|-1\rangle, |0\rangle, |+1\rangle$). Три кутрита образуют пространство из $3^3 = 27$ базисных состояний. Число $27 = 3^3$: тройка в кубе — минимальная самосогласованная единица квантовых вычислений в кутритной архитектуре.

Аналогии: три кварка в протоне (минимальная устойчивая адронная конфигурация). Три нуклона в тритии (^3H). В ODTQE: три — минимальное число для замыкания петли наблюдения ($\pi > 3$) [19].

Встроенная отказоустойчивость: TER-CONS (мажоритарная функция от трёх кутритов). Если один из трёх кутритов ошибся — два других «перевешивают». Это TMR (triple modular redundancy) на уровне квантовой логики — аппаратная мажоритарная коррекция, не требующая дополнительных ресурсов.

7.3. Кутритные вентили

Набор базовых кутритных вентилях включает шесть операторов:

Вентиль	Описание	Матрица	Аналог (кубит)
QROT	Вращение: $ -1\rangle \rightarrow 0\rangle \rightarrow +1\rangle \rightarrow -1\rangle$	\rightarrow Циклическая перестановка	Нет аналога

QNEG	Инверсия: $ +1\rangle \leftrightarrow -1\rangle$	Обобщённая σ_x	Pauli-X
QPHASE	Фаза: $ j\rangle \rightarrow e^{i\theta_j} j\rangle$	Диагональная SU(3)	Pauli-Z
QHAD	Кутритный Адамар: равная суперпозиция	Фурье 3×3	Hadamard
QCNOT	Управляемый NOT для кутритов	9×9	CNOT
QCONS	Кутритный консенсус (мажоритарный)	$27 \rightarrow 3$	Нет аналога

Особое значение имеет вентиль QROT — уникальный кутритный оператор, не имеющий кубитного аналога. Он реализует один шаг по тройственному циклу $|-1\rangle \rightarrow |0\rangle \rightarrow |+1\rangle \rightarrow |-1\rangle$. В терминах ODTQE: QROT — это один оборот по малому радиусу r тора, элементарный π -цикл.

Вентиль QCONS также не имеет кубитного аналога. Он реализует мажоритарное голосование трёх кутритов: выходное состояние определяется большинством из трёх входных. Это квантовая версия TMR, встроенная в набор базовых операций.

Все шесть вентиля образуют *универсальный* набор: любая унитарная операция в $SU(3^n)$ может быть приближена с произвольной точностью последовательностью этих вентилях (аналог теоремы Соловей–Китаева для кутритов).

7.4. Когерентный классический контроллер

Когерентный процессор ODTQE [2] управляет квантовым слоем. Его ключевые функции:

$\hat{O}(\hat{O})$ -контур: анализирует состояние кутритов (результаты мониторинга когерентности S) в реальном времени и перенастраивает параметры коррекции (X в формуле (V.1)).

φ -генератор: синхронизирует управляющие импульсы, генерируя φ -последовательности длительностей (IV.1).

Тернарная ISA: система команд контроллера естественно совместима с кутритным квантовым слоем. Три уровня классической логики ($-1, 0, +1$) непосредственно отображаются на три уровня квантовой ($|-1\rangle, |0\rangle, |+1\rangle$).

В стандартных квантовых компьютерах: бинарный классический контроллер управляет бинарными кубитами. Согласованность: 2 уровня классики \rightarrow 2 уровня квантума. В предлагаемой архитектуре: 3 уровня классики \rightarrow 3 уровня квантума. *Полная согласованность* между классическим и квантовым слоями устраняет необходимость перекодирования на границе.

VIII. ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

8.1. Информационное превосходство

Параметр	Кубитный	Кутритный (ODTOE)	Выигрыш
Бит на элемент	1,000	1,585	$\times 1,585$
Базисных состояний ($n = 100$)	$1,27 \times 10^{30}$	$5,15 \times 10^{47}$	$\times 4 \times 10^{17}$
Физ. элементов на 1 лог.	~ 1000	$\sim 3-10$	$\times 100-300$
Порог ошибок	$\sim 1\%$	$\sim 2\%$	$\times 2$
Генераторов $SU(d)$	3	8	$\times 2,67$

8.2. Масштабирование

Для задачи, требующей $n = 1000$ логических элементов:

Кубитный подход: $\sim 10^6$ физических кубитов. С учётом поверхностных кодов и текущего уровня ошибок, такая система недостижима в ближайшие 10–20 лет. Даже самые оптимистичные дорожные карты (IBM, Google) не предусматривают 10^6 физических кубитов ранее 2040-х годов.

Кутритный + $\hat{O}(\hat{O})$: $\sim 3000-10000$ физических кутритов. С учётом $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекции (3–10 физических на 1 логический) это достижимо в ближайшие 5–10 лет. Текущий рекорд: ~ 1000 физических элементов на одном чипе. Масштабирование до ~ 10000 — инженерная задача, а не фундаментальный барьер.

Разница в сроках: 15–20 лет для кубитного подхода vs. 5–10 лет для кутритного. Это не просто количественное, а *качественное* ускорение: поколение учёных, которое начнёт карьеру с кутритной архитектурой, может достичь полезного квантового вычисления при жизни.

IX. ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Этап 0: Симуляция (0 €, 3–6 мес.)

Программная модель кутритного квантового компьютера на основе существующих фреймворков (Qiskit + расширение на кутриты, или Google Cirq). Ключевые сравнения:

(a) φ -DD vs. Uhrig DD на модельном шуме ($1/f$, гауссов, дихотомический) — сравнение T_2 (времени когерентности) при различных протоколах динамической развязки.

(b) φ -тор vs. планарная решётка: средняя длина пути между произвольными элементами, верность (fidelity) квантового алгоритма с учётом swap-цепочек.

(с) $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция vs. поверхностный код: порог ошибок, накладные расходы (число физических элементов на один логический).

Этап не требует финансирования и может быть выполнен единственным исследователем с доступом к стандартному вычислительному оборудованию.

Этап 1: Экспериментальная верификация (50–200 тыс. €, 6–18 мес.)

Доступ к сверхпроводящему трансмону с тремя уровнями (IBM Quantum, OQC, или собственная криогенная установка).

Эксперимент 1: φ -DD vs. стандартная DD — измерение T_2 . Фальсифицируемо: $T_2^\varphi > T_2^{\text{Uhrig}}$ для $1/f$ -шума?

Эксперимент 2: кутритные вентили QROT, QHAD, QCNOT — измерение верности (fidelity) методом рандомизированного бенчмаркинга.

Эксперимент 3: $\hat{O}(\hat{O})$ -обратная связь через протокол García-Pintos (H_{meas}) — подавление декогеренции с непрерывным мониторингом.

Этап 2: Прототип кутритного процессора (1–10 млн €, 2–4 года)

Заказной сверхпроводящий чип: ~ 27 кутритов (3^3 : минимальная тройка троек) в φ -ториодальной топологии. Когерентный классический контроллер (FPGA или заказной ASIC [2]) с тернарной ISA. $\hat{O}(\hat{O})$ -протокол реализован аппаратно (контур обратной связи с задержкой < 1 мкс).

Этап 3: Масштабирование (100 млн+ €, 5–10 лет)

$\sim 1000+$ кутритов на одном чипе или в мультичиповой конфигурации. Демонстрация квантового превосходства на задаче, недоступной кубитным компьютерам при том же числе физических элементов. Целевые приложения: квантовая химия (моделирование молекул с > 100 электронами), оптимизация (комбинаторные задачи NP-класса), криптография.

Х. ФАЛЬСИФИЦИРУЕМЫЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ

Архитектура порождает семь фальсифицируемых предсказаний, каждое из которых может быть проверено на определённом этапе реализации:

#	Предсказание	Метод проверки	Этап
F1	φ -DD: $T_2^\varphi > T_2^{\text{Uhrig}}$ для $1/f$ -шума	Трансмон + два протокола DD	1

F2	Кутрит vs. кубит: $3^n > 2^n$ пространство при n элементах	Симуляция алгоритма Шора	0
F3	$\hat{O}(\hat{O})$: порог ошибок $\geq (\pi - 3)^2 \approx 2\%$	H_{meas} -обратная связь на трансмоне	1
F4	φ -тор: средняя задержка $\times 1/\varphi$ vs. решётка	Симуляция φ -тора vs. mesh	0
F5	Накладные расходы $\hat{O}(\hat{O})$: < 10 физ./лог.	Симуляция + эксперимент	1–2
F6	QROT-вентиль: верность $> 99,5\%$	Рандомиз. бенчмаркинг на трансмоне	1
F7	Тернарный контроллер + кутритный слой: согласованность	Когерентный ЦПУ \rightarrow управление кутритами	2

Предсказания F1, F3, F6 могут быть проверены на *существующей* аппаратуре в течение 6–18 месяцев. Предсказания F2, F4 — путём компьютерного моделирования в течение 3–6 месяцев. Предсказания F5, F7 требуют прототипа кутритного процессора. Каждое предсказание сформулировано так, что его *опровержение* будет информативным: отрицательный результат укажет на конкретное ограничение подхода.

XI. ДЕМАРКАЦИЯ

Различение статуса утверждений — необходимое условие научной добросовестности. В настоящей работе:

Утверждение	Статус
Кутриты информационно оптимальнее кубитов ($e \approx 3$)	Математический факт [6]
Кутриты реализуемы (трансмон, ионы, фотоны)	Экспериментальный факт [8, 9, 10]
φ -тор устойчивее планарной решётки (КАМ)	Доказано [11, 12, 13]
φ -DD лучше Uhrig DD для $1/f$ -шума	Гипотеза (фальсифицируемая, F1)
$\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция: порог $\sim 2\%$	Гипотеза (фальсифицируемая, F3)
$\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция: < 10 физ./лог.	Гипотеза (фальсифицируемая, F5)
H_{meas} García-Pintos применим к коррекции ошибок	Следует из [1] + ODTQE-интерпретация
Декогеренция = преждевременное наблюдение	Интерпретация через аксиому (A) [18]
Когерентный ЦПУ как контроллер	Концепция [2]

Три утверждения — установленные факты. Одно — доказанная теорема. Три — фальсифицируемые гипотезы. Одно — следствие опубликованной работы с

ОДТОЕ-интерпретацией. Одна — интерпретация. Одно — концепция. Ни одно утверждение не выдаётся за доказанный факт, если оно таковым не является.

ХII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

12.1. Пять отличий от текущей парадигмы

Текущий подход	ОДТОЕ-подход
Кубит ($d = 2$)	Кутрит ($d = 3, \pi > 3$)
Планарная решётка	φ -тор ($R/r = \varphi$, КАМ)
Фиксированные вентили	φ -импульсы (КАМ-устойчивость)
Поверхностный код (~ 1000 физ./лог.)	$\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция ($\sim 3-10$ физ./лог.)
Бинарный классический контроллер	Когерентный тернарный ЦПУ [2]

12.2. Что даёт предлагаемая архитектура

Экспоненциально больше вычислительного пространства (3^n vs. 2^n). На 37% меньше физических элементов при той же информационной ёмкости. Вдвое выше порог ошибок (2% vs. 1%). На два порядка меньше накладные расходы коррекции (3–10 vs. ~ 1000 физических на один логический). Максимальная устойчивость топологии связей, обоснованная КАМ-теоремой. Естественная согласованность между классическим и квантовым слоями.

12.3. Одна формула

$$R_{\text{result}} = \hat{O}_{\text{алг}}(\Psi) : \quad \text{квантовое вычисление} = \text{наблюдение в } \mathcal{H} \text{ до актуализации в } \mathcal{C} \quad (\text{ХII.1})$$

Квантовый компьютер не «эксплуатирует параллельные миры». Он *вычисляет в поле потенциальных состояний* \mathcal{H} — одном, бесконечном, содержащем все возможности — и актуализирует результат через оператор $\hat{O}_{\text{алг}}$. Кутрит — минимальная тройственная единица этого вычисления. φ -тор — максимально устойчивая связь. $\hat{O}(\hat{O})$ — активная защита от преждевременного наблюдения.

Не «быстрее считать». А *глубже наблюдать*.

ОБСУЖДЕНИЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Предлагаемая архитектура обладает рядом ограничений, которые необходимо обозначить.

Во-первых, $\hat{O}(\hat{O})$ -коррекция пока не реализована экспериментально. Её работоспособность основана на теоретических результатах García-Pintos [1] и ODTOE-интерпретации. До экспериментальной верификации (Этап 1) утверждения о преимуществе над поверхностными кодами остаются гипотезами.

Во-вторых, оценки накладных расходов (3–10 физических элементов на один логический) являются теоретическими экстраполяциями. Реальные значения зависят от конкретного спектра шума, качества вентилях и эффективности контура обратной связи.

В-третьих, φ -тороидальная топология усложняет изготовление чипа по сравнению с планарной решёткой. Это инженерный вызов, который может увеличить стоимость и сроки реализации.

В-четвёртых, интерпретация декогеренции как «преждевременного наблюдения» — это интерпретация в рамках ODTOE, а не общепринятый физический факт. Она может оказаться продуктивной метафорой, но её онтологический статус остаётся дискуссионным.

Наконец, сравнение сроков достижения полезного квантового вычисления (5–10 лет vs. 15–20 лет) основано на экстраполяции текущих трендов и может не учитывать прорывы в кубитной технологии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Конфликт интересов отсутствует.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ И ИНСТРУМЕНТЫ

При разработке теории ODTOE и всех статей на её основе использовались инструменты искусственного интеллекта: Claude Sonnet / Opus 4.6 Extended (Chat & Code) (Anthropic), ChatGPT 5.3 (OpenAI), Google Gemini (Google DeepMind). Все содержательные решения, гипотезы, интерпретации и ответственность за них принадлежат автору.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] García-Pintos L. P., Liu Y.-K., Gorshkov A. V. Reshaping the Quantum Arrow of Time // *Physical Review X*. — 2026. — Vol. 16. — Art. 011028. DOI: 10.1103/118s-9vmh.
- [2] Панкратов А. С. Когерентный процессор: архитектура ЦПУ нового типа на основе ODTQE // Препринт. — 2026.
- [3] Arute F. et al. Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor // *Nature*. — 2019. — Vol. 574. — P. 505–510.
- [4] IBM Quantum. IBM Condor: 1121-qubit quantum processor // IBM Research Blog. — 2023.
- [5] Fowler A. G. et al. Surface Codes: Towards Practical Large-Scale Quantum Computation // *Physical Review A*. — 2012. — Vol. 86. — Art. 032324.
- [6] Hayes B. Third Base // *American Scientist*. — 2001. — Vol. 89(6). — P. 490–494.
- [7] Gidney C., Ekerå M. How to Factor 2048 Bit RSA Integers in 8 Hours Using 20 Million Noisy Qubits // *Quantum*. — 2021. — Vol. 5. — P. 433.
- [8] Blok M. S. et al. Quantum Information Scrambling on a Superconducting Qutrit Processor // *Physical Review X*. — 2021. — Vol. 11. — Art. 021010.
- [9] Malik M. et al. Multi-Photon Entanglement in High Dimensions // *Nature Photonics*. — 2016. — Vol. 10. — P. 248–252.
- [10] Ringbauer M. et al. A Universal Qudit Quantum Processor with Trapped Ions // *Nature Physics*. — 2022. — Vol. 18. — P. 1053–1057.
- [11] Колмогоров А. Н. О сохранении условно-периодических движений // *ДАН СССР*. — 1954. — Т. 98. — С. 527–530.
- [12] Арнольд В. И. Малые знаменатели и проблемы устойчивости движения // *УМН*. — 1963. — Т. 18(6). — С. 91–192.
- [13] Moser J. On Invariant Curves of Area-Preserving Mappings // *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen*. — 1962. — P. 1–20.
- [14] Kiesenhofer D. et al. Controlling Two-Dimensional Coulomb Crystals of More Than 100 Ions in a Multizone Segmented Paul Trap // *PRX Quantum*. — 2023. — Vol. 4. — Art. 020317.
- [15] Bogaerts W. et al. Silicon Microring Resonators // *Laser & Photonics Reviews*. — 2012. — Vol. 6(1). — P. 47–73.
- [16] Uhrig G. S. Keeping a Quantum Bit Alive by Optimized π -Pulse Sequences // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 98. — Art. 100504.
- [17] Панкратов А. С. Тороидальная топология реальности // Препринт. — 2026.
- [18] Панкратов А. С. Теория всего: наблюдатель-зависимая (ODTQE) // Препринт. — 2025.
- [19] Панкратов А. С. Число π как структурный инвариант // Препринт. — 2025.

- [20] Панкратов А. С. Постоянная Планка из архитектуры наблюдения // Препринт. — 2026.
- [21] Панкратов А. С. 3, 6, 9: ключ Теслы через ODTOE // Препринт. — 2026.
- [22] Hofstadter D. R. I Am a Strange Loop. — New York: Basic Books, 2007.
- [23] Lanyon B. P. et al. Simplifying Quantum Logic Using Higher-Dimensional Hilbert Spaces // Nature Physics. — 2009. — Vol. 5. — P. 134–140.
- [24] Campbell E. T. Enhanced Fault-Tolerant Quantum Computing in d -Level Systems // Physical Review Letters. — 2014. — Vol. 113. — Art. 230501.
- [25] Gokhale P. et al. Asymptotic Improvements to Quantum Circuits via Qutrits // Proceedings of the 46th ISCA. — 2019. — P. 554–566.
- [26] Chi Y. et al. A Programmable Qudit-Based Quantum Processor // Nature Communications. — 2022. — Vol. 13. — Art. 1166.
- [27] Wang Y. et al. Qudits and High-Dimensional Quantum Computing // Frontiers in Physics. — 2020. — Vol. 8. — Art. 589504.