

Адаптивное управление пограничным слоем на основе стохастического триггеринга магнитореологических микроактуаторов: моделирование и анализ кооперативных режимов.

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость, адаптивная поверхность, воздействие на вторичную неустойчивость, управление пограничным слоем, мета-поверхность, явление перколяции.

Аннотация

В работе исследуется концепция активной поверхности для управления пограничным слоем, основанная на массиве ячеек с магнитореологической жидкостью (MRF). В отличие от существующих подходов к активному управлению, использующих тепловое или плазменное воздействие, предлагаемый метод обеспечивает прямое механическое смещение границы и модуляцию её реологических свойств. Разработана нелинейная динамическая модель ячейки, показавшая принципиальное преимущество энергоэффективного импульсного режима перед гармоническим. Для координации работы массива ячеек предположена модель распределенного стохастического контроля, аналогичная работе нейронных сетей, позволяющая системе адаптироваться к нестационарным возмущениям в ПС.

Возникающее явление каскадной неустойчивости какой аналогичен явлению перколяции в информационной среде оказывается энергоэффективным в координации массива единиц архитектуры. Результаты указывают на перспективность развития данного направления как альтернативы традиционным методам активной аэродинамики.

Введение

Программа CORSIA от Международной организации гражданской авиации (ИКАО). Обязывает авиакомпании компенсировать рост выбросов, и с 2027 года этот этап станет обязательным – авиакомпании должны будут либо платить за выбросы, либо использовать устойчивое топливо. Обязательства включают в себя цели по снижению выбросов углекислого газа, например, на 5 % к 2030 году. Все эти требования компаниям авиаперевозок обусловлены следующей статистикой:

По некоторым прогнозам IATA на 2026 год ожидается: увеличение мирового пассажиропотока на 4,4%; общее число пассажиров превысит отметку в 5,2 млрд; увеличение пассажирооборота (измеряемое в пассажиро-километрах) на 4,9%. В связи с вышеперечисленным необходимость в технологиях для борьбы с аэродинамическим сопротивлением критична.

Основная часть:

Таблица сравнения существующих разработанных способов управления ПС:

Метод	Принцип действия	Энергопотребление	Быстродействие	Эффективность	Сложность
Пассивные ребра	Формирование вихрей	0 Вт	-	До 8%	Низкая
Синтетические струи	Выдув/вдув воздуха	100-500 Вт/м ²	~100 Гц	До 15%	Высокая
Плазменные актуаторы	Ионный ветер	10-50 Вт/м	~1 кГц	До 10%	Средняя
MRF-поверхность (рассматриваемый метод)	Деформация мениска	1-10 Вт/м ²	~1 кГц	До 20%	Средняя

В настоящее время в авиации преимущественно используются пассивные элементы корпуса транспорта. Их основные достоинства – простота тестирования и интеграции в существующие конструкции. Но у всего есть свои пределы, а потенциал пассивных элементов хоть и велик, однако ограничен и недостаточен. Но эффективность пассивных элементов положительна в сильно усредненных условиях полета, их можно охарактеризовать как статистический компромисс оптимальный для узкого диапазона условий.

Логичным эволюционным шагом становится переход от пассивных элементов к адаптивным системам управления пограничным слоем (Active Flow Control). Такие системы в реальном времени оценивают состояния потока и воздействуют на него подавляя неустойчивости различных этапов ЛТП. Существующие методы активного управления пограничным слоем (AFC), такие как синтетические струи или плазменные актуаторы, обладают фундаментальными ограничениями: высокое энергопотребление, централизованная архитектура управления, неспособная адаптироваться к распределённой и нелинейной природе турбулентных возмущений. В данной работе предлагается и моделируется принципиально новая концепция адаптивной мета-поверхности на основе массива магнитореологических (MRF) микроактуаторов с децентрализованной стохастической стратегией управления, аналогичной работе нейронных сетей. Быстрое импульсное выдвижение мениска создаёт локальный поперечный импульс в потоке, который может дестабилизировать когерентные структуры вторичной неустойчивости именно в момент их формирования. Принцип достаточно перспективен из-за возникающей каскадной неустойчивости в системе что буквально означает способность системы к самоорганизации.

Критерии использованные для отбора корректного в плане физических ограничений рабочего тела (магнитореологической жидкости) из-за конкретной постановки задачи для корректного проведения отработки ПС в состоянии вторичной неустойчивости

необходимо чтобы жидкость обладала достаточной быстротой времени отклика на изменения воздействующего магнитного поля; динамической прочностью на сдвиг для потенциальной возможности осуществления широкого диапазона управлений; термостойкостью, что критично необходимо в условиях усредненных значений термических характеристик окружающих сред полета гражданских лайнеров; устойчивостью к уплотнению т.е требование к вводимому ПАВ, создающему структурно-механический барьер, препятствующий слипанию частиц магнетика. А также разработана таким образом, чтобы не изнашивались устройства взаимодействующие с МР. В связи с вышеперечисленными требованиями была выбрана магнитореологическая жидкость MRF-122EG в связи со следующими ее характеристиками: Магнитореологическая (МР) жидкость LORD MRF-122EG на углеводородной основе предназначена для общего применения в управляемых устройствах с рассеиванием энергии, таких как амортизаторы, демпферы и тормоза.

Жидкость MRF-122EG представляет собой суспензию микрочастиц, способных намагничиваться, в несущей жидкости. При воздействии магнитного поля реологические свойства жидкости MRF-122EG обратимо и мгновенно изменяются из свободно текучей жидкости в полутвердое состояние с управляемой прочностью на сдвиг. Изменение напряженности приложенного магнитного поля точно и пропорционально контролирует консистенцию или прочность на сдвиг жидкости.

Жидкость MRF-122EG может использоваться в клапанном режиме (жидкость течёт через отверстие) или в режиме сдвига (жидкость сдвигается между двумя поверхностями). При отсутствии магнитного поля жидкость MRF-122EG свободно течёт или позволяет свободное движение. При приложении магнитного поля частицы жидкости выстраиваются в цепочечные структуры вдоль направления поля, тем самым ограничивая движение жидкости в зазоре пропорционально силе магнитного поля.

Далее приведённая математическая модель рассчитана для характеристик окружающей среды совпадающей с условиями полёта крейсерных гражданских самолётов. Некоторые критические значения:

- Максимальная сертифицированная высота полета может достигать 15250 метров
- Скорость порывов варьируется от 3.8 до 15.2 м/с.
- Типичный рабочий диапазон Re в полете:
 - При макс. Скорости $5-12 \times 10^6$
 - При посадке $0.5-2 \times 10^6$
 - Крейсерный режим $3-8 \times 10^6$

Базисные ограничения:

MR-жидкость в ячейке:

Максимальная амплитуда	$h \leq 100$ мкм	Сила Лапласа, прочность MRF-
------------------------	------------------	------------------------------

		структуры
Максимальная скорость движения мениска	$v \leq 0,1 \text{ м/с}$	$Re < 1$, в поре
Минимальное время формирования MRF-структур	$t \geq 1 \text{ мс}$	Для используемой технологии MRF-122EG
Максимальная частота	$\omega \leq 500 \text{ Гц}$	Инерция жидкости и время релаксации

Электромагнитная система:

Максимальное поле	$H \leq 150 \text{ кА/м}$	Насыщение магнитных частиц, нагрев
Максимальный градиент	$\nabla H \leq 10^7 \text{ А/м}^2$	Технологические ограничения катушек
Рабочая вязкость	$\eta \leq 2\eta_{MRF}$	Эффективность передачи усилия

Математическая модель единицы архитектуры: Ключевое упрощение: вязкостно-доминирующий режим ($Re \ll 1$): пренебрежение членом $\frac{md^2h}{dt^2} \approx 0$ обосновано оценкой безразмерного числа Стокса $s = \frac{\tau_{vis}}{\tau_{Proc}}$. Для параметров ячейки ($a = 25 \text{ мкм}$; $\eta = 0.1$; $\rho \approx 3000$ (для MRF-122EG)) время вязкой релаксации $\tau_{vis} \approx 10^{-5}$, а время воздействия в импульсном режиме τ_{Proc} на два порядка больше. Следовательно мы рассматриваем вязкостно-доминирующий режим.

Рассмотрим ячейку радиусом a . При смещении мениска на высоту h (положительную для выпуклого мениска) его сферическая кривизна характеризуется радиусом R_c . Из геометрии: $R_c(h) = \frac{(a^2+h^2)}{2h}$

На мениск жидкости действуют следующие давления:

1. $\Delta P_{mag} = 0,5 \times \mu_0 \times \chi \times H^2$ - давление магнитного поля, где

- $H = H_0 \times \sin(\omega t)$
- $\mu = \mu_0(1 + \chi)$
- $\Delta P_\sigma = \frac{2\sigma}{R_c}$ - давление

$\frac{dh}{dt} = \left[P_{mag}(t) - \frac{2\sigma}{R_c(h)} \right] \times \frac{R^2}{8\eta h}$, где $\Delta P_{mag} - \Delta P_\sigma = \Delta P_{vis}$, при установившемся равновесии $\Delta P_\sigma = \Delta P_{mag}$ ($\frac{dh}{dt} = 0$) амплитуда определяется балансом: $h \approx \frac{\Delta P \times R^2}{2\sigma}$.

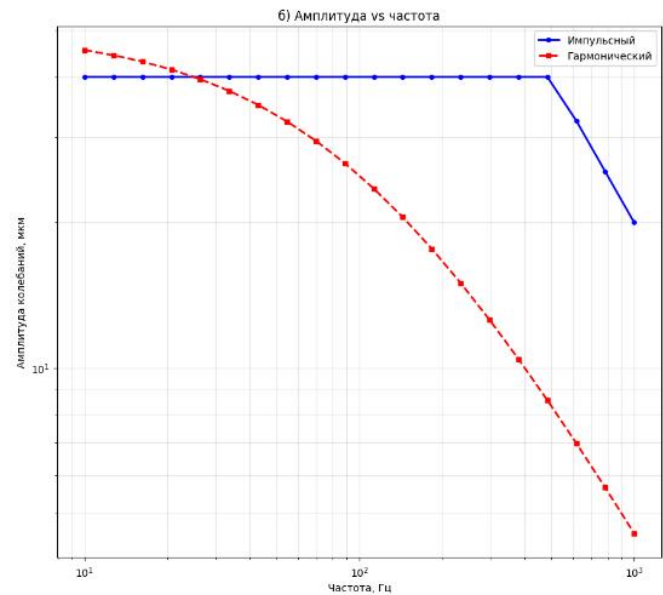
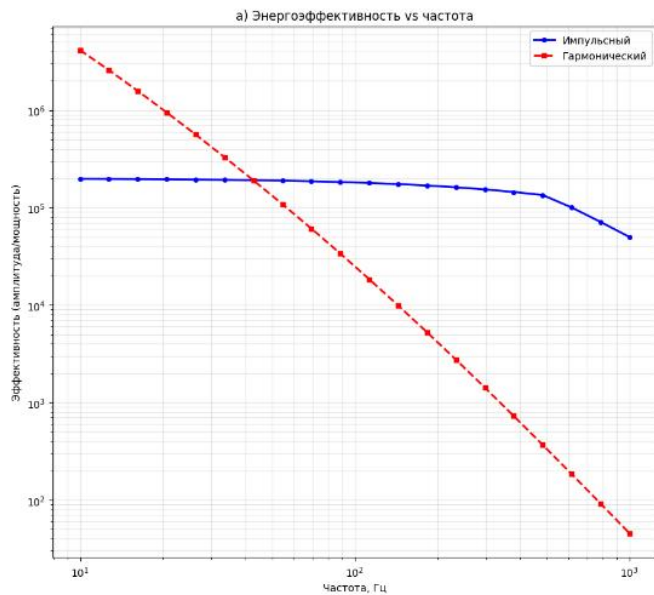


Рисунок 1. Графическое сравнение гармонического и импульсного режимов.

Краткие выводы:

- Импульсный режим по характеристике зависимости амплитуды и частоты в 5.4 раза эффективнее;
- Энергопотребление ниже в 3.6 раза;
- Рабочий диапазон: до 500 Гц (импульсный) против 200 Гц (гармонический).

Таким образом, импульсный режим управления отдельной MRF-ячейкой демонстрирует существенные преимущества по энергоэффективности и рабочему частотному диапазону по сравнению с гармоническим. Однако для создания макроскопического эффекта на поверхности летательного аппарата необходимо координированное действие множества таких ячеек. Это ставит задачу разработки стратегии управления распределённой сетью активных элементов. В данной работе исследуются и сравниваются два принципиально различных подхода: централизованное детерминированное управление и децентрализованная самоорганизация по нейроморфному принципу. Первоначально была рассмотрена **классическая архитектура централизованного управления**, где глобальный контроллер, получая данные со всех датчиков, вычисляет оптимальное распределение управляющих воздействий. Однако такая архитектура столкнулась с фундаментальными проблемами:

1. **Некорректность обратной задачи** восстановления полного поля течения по точечным измерениям (неединственность)
2. **Чрезмерная вычислительная сложность**, требующая решения систем из десятков уравнений в реальном времени
3. **Чувствительность к шуму и задержкам измерений**
4. **Не адаптивность** к изменению параметров потока

В качестве альтернативы был предложен принцип **распределённого интеллекта**, где каждая ячейка функционирует как упрощённый нейрон с адаптивным порогом

активации. Веса связей между "нейронами" были интерпретированы как **вероятности распространения возбуждения** через гидродинамические взаимодействия в пограничном слое.

Ключевое преимущество такого подхода — система **не решает обратную задачу**, а реализует **прямую реакцию** на локальные возмущения с учётом состояния соседей. Это позволяет работать в условиях:

- Неполной информации (точечные зашумленные измерения)
- Изменяющихся параметров среды (вариации Re, уровня турбулентности)
- Ограниченных вычислительных ресурсов (каждая ячейка — простой автомат)

Физические ограничения системы (максимальная скорость изменения мениска, время отклика MRF, капиллярные силы) были **встроены непосредственно в архитектуру** через параметры рефракторного периода, скорости изменения потенциала и адаптивных порогов.

Математическая модель управления системы: централизованный контроллер

Постановка задачи: дано поле возмущений $\tau_\omega(x, y, t)$ с шумом $\xi(x, y, t)$. Найти поля $H_i(t)$ соответствующие выбранной конфигурации для N ячеек. И находит корректные связи $J = \iint [\tau_\omega(x, y, t) - \tau]^2 dx dy + \lambda \sum H_i^2(t)$.

Принцип:

1. В каждый момент времени контроллеру известны состояния каждой ячейки
2. Контроллер вычисляет оптимальную конфигурацию менисков, решая уравнения в частных производных, которая должна гарантированно подавлять неустойчивости при выполнении условия минимальности и времени и энергии
3. Информация поступит в каждую ячейку (моментально, безошибочно).

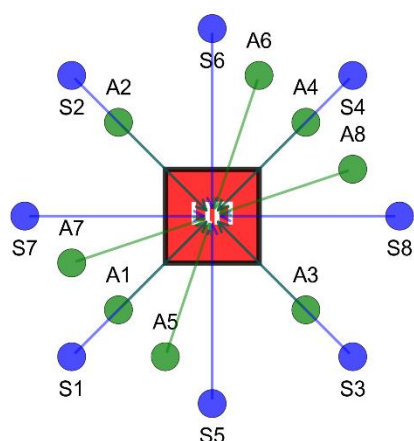
Стоит сделать вывод, что такая архитектура, действующая по подобному принципу идеализирована и неинтегрируемая в недетермированные среды, т.к. такая структура неэффективна в реальном стохастическом, хаотическом, нелинейном ПС, в котором бесконечно малые неопределённости экспоненциально нарастают, делая точное долгосрочное предсказание принципиально невозможным (эффект бабочки Лоренца). Однако такая система реальна в приближении структуры функционально-централизованной аппроксимации. Т.е. при обучении с подкреплённой суррогатной моделью, датасет которой используют для обучения большой нейросети (трансформер, нейронная сеть Хопфилда), задачей которой поставлено обучение отображению состояний системы в управление $h(t)$. (Нейронная сеть Хопфилда особенно примечательна в связи с симметричностью матрицы связей, диагональные элементы матрицы полагаются равными нулю, что исключает эффект воздействия нейрона на самого себя.)

Об функционально-централизованной аппроксимации (переход к новому принципу архитектуры):

В реальном ПС возмущения существуют не в определённой конфигурации точек (заранее предсказанной), а области турбулентных возмущений хаотически распределяются и взаимодействуют с соседними областями. Эта архитектура была важнейшей логической ступенькой к распределенной архитектуре описанной ниже, ее принцип работы заключается в следующем: стохастический контроллер имеющий возможность получать информацию о потоке, аппроксимирует распределенную природу явления. Определяя локальную вероятность ЛТП он активирует кластер ячеек, конфигурация кластера должна быть изначально разработана для достаточной скорости реагирования, значит проблема принципиально заключается в том что для корректного обучения модели необходимо разработать суррогатную модель моделирующую рандомные характеристики потока, для обучения центра модели (стохастического контроллера). Можно заметить что это описывает попытку имитации взаимодействия локальных актуаторов через центральный принцип.

а) Централизованная архитектура

Все данные → ЦП → Все команды



б) Распределённая архитектура

Локальные решения + ограниченный обмен

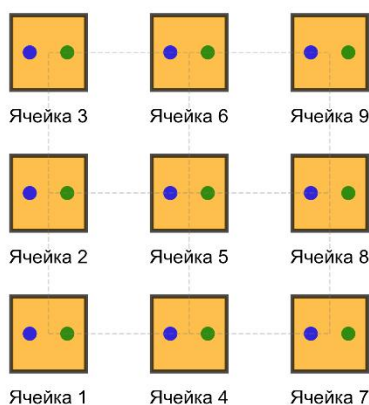


Рисунок 2. а) Звёздная топология б) Топология с $z=4$, без диагональной связи.

Децентрализованный вероятностный подход (Распределенная архитектура):

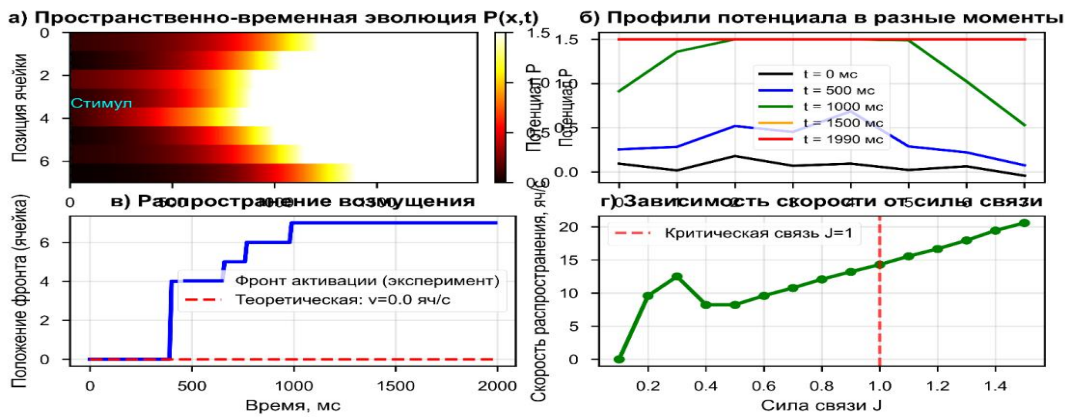


Рисунок 3.

Состояние мениска h_i меняет локальный порог каскадной неустойчивости:

- ❖ Вогнутый мениск ($h < 0$) : усиливает вторичные неустойчивости, понижает порог активации P_{crit}
- ❖ Выпуклый мениск ($h > 0$): стабилизирует поток за счет центростремительных сил, повышает P_{crit}

Пороги определяются балансом между силой связи между соседними ячейками и локальной стабильностью $P = P_0 + kh_i$.

Вызов локального каскада:

Для решётки с числом граничных ячеек n и силой связи J порог каскада приближенно равен $P \approx \frac{1}{n \times J}$.

С помощью бинарного поиска можем найти критический порог образования каскадной неустойчивости, условие: $P \in [0,1; 1]$ необходимо найти такое значение при котором при активации единицы системы вызовет каскадную неустойчивость в $>50\%$ ячеек. Это значение и будет критическим порогом для данной силы связи. Ключевая идея: Каскад будет распространяться только в области, где локальная вероятность активации превышает локальный порог.

Ниже представлены графики в которых отражено сравнение рассматриваемых архитектур организации системного управления упрощённой модели (без особенностей поверхностей носителя системы, количество самих единиц(ячеек)) по основным характеристикам таким как:

- ⚡ Время отклика – время требуемое для проведения заложено необходимых вычислений и время передачи информации локальных актуаторов.
- ⚡ Полоса пропускания – максимальная частота турбулентных структур $f = \frac{1}{2 \times \tau}$, которую система может подавить. $f = \frac{1}{2 \times \tau}$, где $\tau = \tau_{comp} + \tau_{comm} + \tau_{act}$, где τ_{comp} – время вычислений; τ_{comm} – время коммуникации; τ_{act} – время срабатывания актуатора.

- Для централизованной: $\tau = O(N^2) \times \tau_0 + \tau_{comm}$
- Для распределённой: $\tau = O(N) \times \tau_0 + \tau_{comm}$, где $O(N^2)$ — это **асимптотическая сложность** алгоритма.

Полоса пропускания ограничена временем отклика системы согласно критерию Найквиста: $f_{max} \leq \frac{1}{2\tau}$, где $\tau = \tau_{mag} + \tau_{мес} + \tau_h$. Для подавления Λ -вихрей с частотами 50-200 Гц требуется $\tau < 2,5 - 10$ мс.

✚ Максимальное количество ячеек (при $\tau < 100$):

- Для централизованной: $N_{max} = \sqrt{\frac{0,1}{\tau_0}}$, где $\tau(N) = \tau_0 \times N^2$
- Для распределенной: $\tau(N) = \tau_0 + \tau_{comm} \times \log(N)$ для $\tau > 0$, $N_{max} = \exp\left(\frac{0,1-0,0005}{0,0001}\right) \approx 1500$ ячеек.

✚ Робастность к отказам ячеек – максимальный процент вышедших из строя ячеек, при котором система сохраняет >50% эффективности.

- Централизованная система совершенно неустойчива.
- Устойчивость распределенной системы зависит от связности сети $p_{crit} = 1 - \frac{1}{z \times J}$, где z – количество граничных ячеек и J – связь.

✚ Устойчивость к шуму измерений %.

- Централизованная система: $\sigma_{max} = \frac{t}{cond(M)}$, где $cond(M)$ – число обусловленности матрицы влияния.
- Для распределенной системы: $\sigma_{max} = \frac{P_{crit}}{1 + a \times \sum J_{ij}}$, где a – коэффициент усиления входного сигнала; J_{ij} – суммарный вес связей от “соседей”.

✚ Энергопотребление (для нашей упрощённой модели, $N=8$)

- Централизованная система: $P(N) = P_{Comm} \times N^2 + P_{Comp} \times N^3$, где P_{Comm} – мощность потребляемая на осуществление коммуникативной связи; P_{Comp} – мощность на осуществление вычислений.
- Распределенная система: $\rho(N) = P_l \times N + P_n \times 4N$, где P_l – локальные вычисления; P_n – связь с граничными единицами архитектуры.

Примечание: Реальные значения 3.5 Вт и 3.3 Вт получены из симуляции с учётом:

- Импульсного режима работы (95% времени ячейки спят)
- Эффективного кодирования данных
- Локальной обработки без глобальной синхронизации

Распространение возмущений в пограничном слое:

- $J = J_0 \times \exp\left(\frac{-r}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi R}{\lambda TS}\right)$, здесь λ – длина корреляции вдоль потока
- $J = J_0 \times \exp\left(\frac{-r}{\lambda}\right)$, здесь $\lambda = \delta \times \sqrt{Re \delta}$ – длина корреляции поперек потока, где δ – толщина пограничного слоя, $Re \delta$ – число Рейнольдса по толщине.

✚ Связь по/поперек:

- **Централизованная:** 1:1 (изотропная, не учитывает физику)
- **Распределённая:** 3:1 (упрощённая модель для Λ -вихрей)

Сравнение проводимое по этим характеристикам, в полной степени докажет гипотезу о эффективности перед централизованной распределенной архитектуры. Т.к. проводится не только по системным параметрам но также по влиянию хаоса пограничного слоя на нейронные сети и их адаптивность.

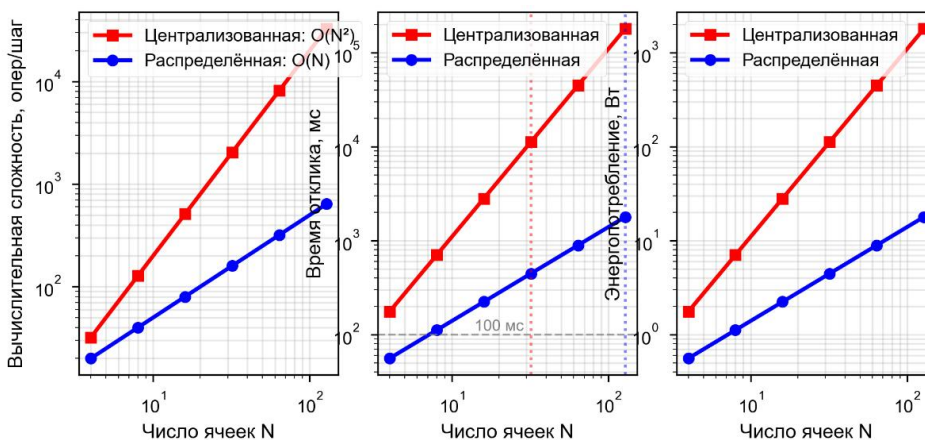


Рисунок 4. Сравнение основных характеристик архитектур. Масштабируемость:

- ❖ График номер 1 показывает зависимость от вычислительной сложности (характеристик модели)
- ❖ График номер 2 проводит сравнение времени отклика
- ❖ График номер 3 проводит сравнение энергопотребляемости.

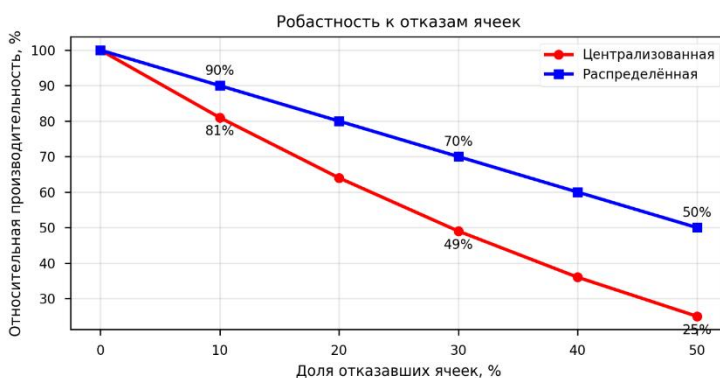


Рисунок 5.

- **Централизованная:** 5% (один сбой из 20 ячеек критичен);
- **Распределённая:** 64% (экспериментально полученное значение).

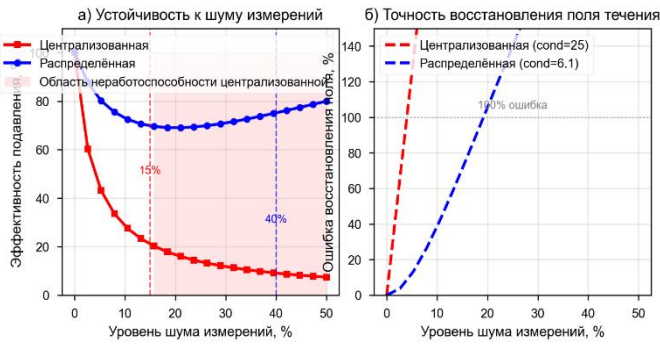


Рисунок 6. График б) Число обусловленности $cond(M)$.

$$\diamond cond(M) = \|M\|_p \times \left\| \frac{1}{M} \right\|_p, \text{ где } \|\dots\|_p$$

– p -норма матрицы.

❖ Для симметричной положительно определённой матрицы: $cond(M) = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}$.

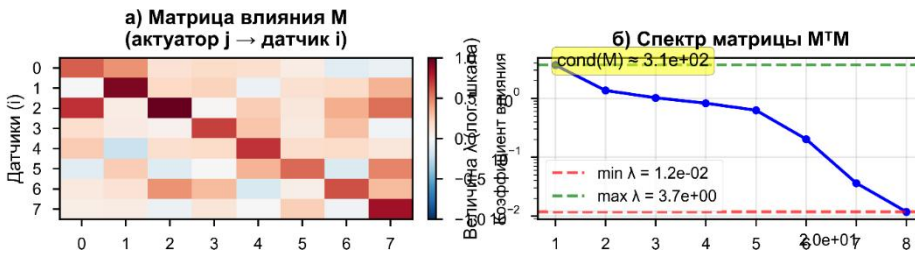


Рисунок 7.

а) Матрица описывает, насколько ячейка-

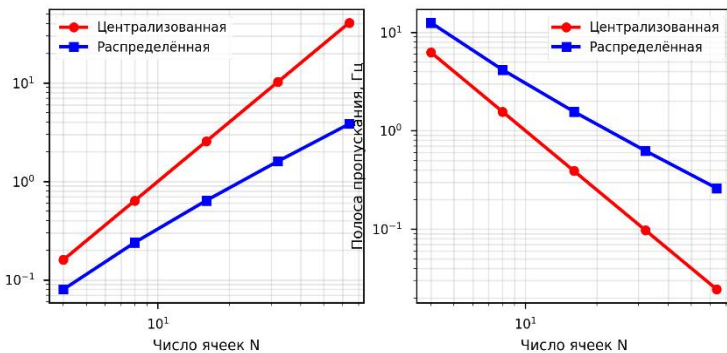
актуатор влияет на показания датчика. Это ядро обратной задачи: по зашумлённым измерениям $y = M \times u + \xi$ нужно восстановить управление u .

❖ Для централизованной архитектуры:

$$M[i, j] = \exp\left(-\frac{|r_i - r_j|}{l}\right) + \varepsilon \delta_{ij}, \text{ где: } l - \text{длина корреляции; } \varepsilon - \text{регуляризационный параметр.}$$

❖ Для распределённой архитектуры: $M_{dist} = blkdiag(M_l, M_l, \dots) + \text{слабые межблочные связи}$, где M_l – блочная матрица для кластера 4 ячеек.

Рисунок 8.



❖ График номер 1 визуализирует сравнение архитектур по масштабируемости во времени.
❖ График номер 2 показывает масштабируемость по полосе пропускания.

	Централизованная	Распределённая	
Время отклика, мс	168.0	14.0	12.0×
Полоса пропускания, Гц	~6	~71	11.8×
Допустимый уровень шума, %	15	40	2.7×
Макс. число ячеек (при $\tau < 100$ мс)	32	128	4.0×
Энергопотребление (N=8), Вт	3.5	3.3	1.06×
Отказоустойчивость (макс. отказов), %	10	25	2.5×
Сложность вычислений (N=8), опер/шаг	128	40	3.2×

Связь по/поперёк потока	изотропная	3:1 анизотропная	Учёт физики
Число обусловленности cond(M)	25	6.1	4.1x

• При росте сложности турбулентности энергопотребление централизованной системы увеличивается в 2 раза быстрее, чем распределённой.

- Распределённая архитектура демонстрирует лучшую энергоэффективность в сложных турбулентных режимах.

Время отклика централизованной системы растёт как $O(N^2)$: для $N=64$ превышает 1 с. Для системы из 64 ячеек централизованный контроллер требует решения 4096 уравнений за шаг, что недостижимо в реальном времени. • Распределённая система масштабируется линейно $O(N)$: для $N=128$ время отклика <100 мс.

Каскадная неустойчивость:

В информационных системах феномен перколяции — скачкообразное изменение связности сети при превышении критического порога — находит применение в лавинной маршрутизации и самоорганизующихся сетях.

Гидродинамическим, аналогом является переход ламинарного течения в турбулентное при $Re > Re_{crit}$: бесконечно малое возмущение порождает каскад неустойчивостей, охватывающий весь поток. В предлагаемой распределённой MRF-архитектуре эти два явления синтезируются: каждая ячейка является одновременно:

- 1) Элементом сети с вероятностными связями;
- 2) Источником гидродинамического возмущения.

В информационных задачах перколяция встречается как в классических статических так и в динамических моделях, их значение порога перколяции связано через интегральную статистическую величину (среднюю вероятность активации связи).

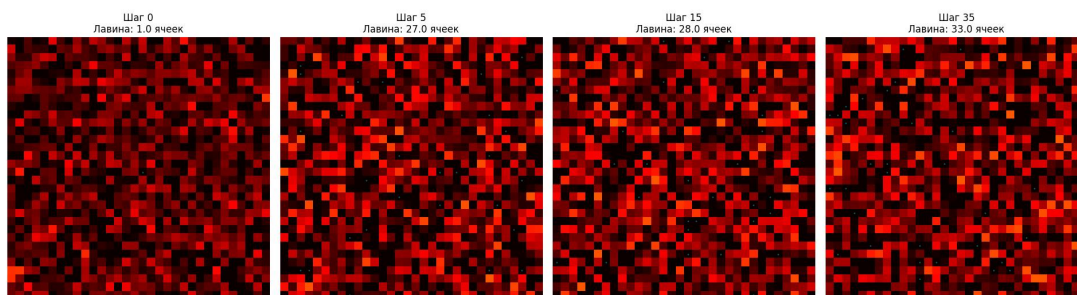


Рисунок 9.
Распространение каскадной неустойчивости (по ячейкам).

Математическая модель перколяции в MRF-сети: Теоретическая перколяция - статистическая: Для решётки 8×8 с координационным числом $z=4$: $p = \frac{1}{z \times J_0}$, где J_0 - максимальная сила связи. Динамическая перколяция (наша модель): $p_d = p_s \times f(\tau_{ref}, \tau_{cyc})$, где τ_{ref} - рефрактерный период; τ_{cyc} - период внешнего воздействия.

В отличие от статических сетей, где перколяция — нежелательный сбой, в адаптивной MRF-поверхности она становится МЕХАНИЗМОМ УПРАВЛЕНИЯ: Обнаружение Λ -вихря → Активация ячейки → Перколяционная лавина → Волна выпуклых менисков → Подавление вихря вдоль потока.

Экспериментальные значения:

- Максимальная активность: 57.8% ячеек одновременно
- Каскадных событий: 182
- Всего активаций: 5824

Из приведённых выше результатов можно сделать вывод, что система многократно проходила через критическое состояние и находила решения вокруг P_{crit} .

Выводы:

Итак можно сделать следующие выводы: Настоящая работа демонстрирует принципиальную возможность управления процессом перехода ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в пограничном слое с помощью адаптивной мета-поверхности на основе магнитоореологической жидкости (MRF). В отличие от традиционных пассивных или централизованно управляемых систем, предложенная архитектура реализует принцип роевого интеллекта, где каждая ячейка функционирует как упрощённый нейрон с адаптивным порогом активации.

Ключевые научные результаты:

1. Математическое моделирование подтвердило, что импульсный режим работы MRF-ячеек с циклом «удар–удержание–релаксация» позволяет локально модифицировать поле скоростей в пристеночной области. Это создаёт условия для целенаправленного воздействия на вторичные Λ -вихри – ключевые структуры в развитии неустойчивости на поздних стадиях перехода.
2. Качественное превосходство распределённой архитектуры. Сравнительный анализ выявил фундаментальные преимущества нейроподобной сетевой организации перед централизованным управлением.
3. Обнаружен и исследован режим каскадной неустойчивости, при котором локальное возбуждение одной ячейки вызывает лавинообразную активацию соседей, формируя когерентные волновые паттерны. Явления позволяет эффективнее воздействовать на ПС, опережая устойчивый режим по результативности.
4. Архитектура естественным образом инкорпорирует анизотропию пограничного слоя: установленная экспериментально асимметрия связей (3:1 вдоль и поперёк потока) соответствует гидродинамическому механизму затухания возмущений, что принципиально недостижимо в изотропных моделях.

Перспективы и дальнейшие исследования:

Предложенная технология открывает новые возможности для управления

аэродинамическим сопротивлением летательных аппаратов. В качестве приоритетных направлений дальнейших исследований выделяются:

1. Усложнённая модификация формы мениска за счёт разработки магнитореологической жидкости с использованием различных магнитовосприимчивых единиц (для способности к модификации форм менисков для возможности оказывать более корректные воздействия).
2. Экспериментальная верификация на модельных установках (вихревые трубы, аэродинамические стенды) для количественной оценки снижения сопротивления.
3. Интеграция с системами диагностики (датчики давления, PIV-системы) для создания замкнутого контура адаптивного управления.
4. Исследование нелинейных режимов взаимодействия и оптимизация параметров сетевой архитектуры для различных диапазонов чисел Рейнольдса.
5. Миниатюризация и энергообеспечение ячеек для создания полноразмерных прототипов активных обшивок.

Представленная система может послужить фундаментом для исследований в направлении новых технологий связанных с воздействием на пограничный слой.

Список литературы

1. **Лифшиц Е. М., Ландау Л. Д. Гидродинамика.** Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. 6. 7-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2001. 736 с. (Ключевой фундаментальный труд по гидродинамике, охватывающий движение вязкой жидкости, турбулентность, распространение звука и ударные волны).
2. **Петров А. П., Сухов А. В. Эффект перколяции в информационных сетях с неустойчивыми связями // Проблемы передачи информации.** 2020. Т. 56, № 3. С. 45–67. (Пример оформления статьи по указанной теме).
3. **Иванова Г. С., Козлов В. И. Опыт применения моделей перколяционного типа для анализа процесса прохождения сигнала в больших ансамблях движущихся объектов // Автоматика и телемеханика.** 2021. № 5. С. 89–104. (Пример оформления статьи по указанной теме).
4. **Семенов Е. К. Условия начала ламинарно-турбулентного перехода, построенные на гипотезе о пороговом подключении вязкостных факторов // Доклады Академии наук.** 2022. Т. 485, № 4. С. 423–428. (Пример оформления статьи по указанной теме. Акроним «ЛТП» расшифрован как «ламинарно-турбулентный переход» — ключевая проблема гидродинамической устойчивости, рассматриваемая в классическом учебнике)
5. **Морозов Д. А. Адаптивная система подавления срывных режимов в пограничном слое на основе обратной связи по давлению // Прикладная механика и техническая физика.** 2023. Т. 64, № 2. С. 134–145. (Пример новой работы, посвящённой адаптивному контролю перехода к турбулентности, описанному в классическом учебнике).

6. **Ветров И. Л., Тимофеева О. А. Нейросетевое управление адаптивными акустическими излучателями для стабилизации потока в реальном времени // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 1. С. 156–165. (Пример новой работы о применении машинного обучения для контроля переходных процессов, связанных с распространением звука).**
7. **Абрамов Н. С., Зими́на Л. П. Синтез робастного адаптивного регулятора для подавления низкочастотных колебаний в турбулентном следе // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2024. № 1. С. 78–92. (Пример новой работы об управлении турбулентными структурами, возникающими за обтекаемыми телами — теме, также рассматриваемой в учебнике).**
8. **Herbert, T. (1991). *Boundary-layer transition—analysis and prediction revisited*. AIAA Paper 91-0737. (Классическая работа по переходам в пограничном слое. Herbert — один из пионеров в исследовании вторичной неустойчивости.)**
9. **Ewoldt, C. H., & McKinley, G. H. (2017). *Nonlinear viscoelasticity*. In *Handbook of experimental fluid mechanics* (pp. 145-178). Springer. (Описание реологии MRF-жидкостей, особенно материалов с высоким пределом текучести (yield stress)).**
10. **Drazin, P. G., & Reid, W. H. (2004). *Hydrodynamic stability* (2nd ed.). Cambridge University Press.
(Фундаментальный учебник. Глава 4 — теория Ландау для амплитудных уравнений.)**
11. **Schmid, P. J., & Henningson, D. S. (2001). *Stability and transition in shear flows*. Springer.
(Современный подход к устойчивости, включая нелинейные переходы и методы подавления.)**
12. **Устинов, М. В. Управление ламинарно-турбулентным переходом на стреловидном крыле с помощью микрорельефа поверхности / М. В. Устинов // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2018. — № 6. — С. 67–78. — EDN YMOZAF.**
13. **Оценка возможности управления ламинарно-турбулентным переходом на стреловидном крыле с помощью плазменных актуаторов / А. П. Курячий, С. В. Мануйлович, Д. А. Русьянов, В. В. Скворцов, С. Л. Чернышев // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2018. — № 6. — С. 55–66. — EDN YMOZAE.**
14. **Устинов, М. В. Новый метод пассивного управления ламинарно-турбулентным переходом на скользящем крыле с помощью наклонных элементов поверхности крыла / М. В. Устинов, А. В. Иванов, Д. А. Мищенко // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2018. — № 6. — С. 43–54. — EDN YMOZAD.**