

# Формирователь сигнала треугольной формы

Евгений Колесников

Устройство формирует напряжение треугольной формы из входного синусоидального напряжения. Схема формирователя содержит удвоитель частоты, двухполупериодный выпрямитель, компаратор, переключатель полярности, блок масштабирования и сумматор. Формирователь имеет высокую линейность напряжения и выполнен на базе операционных усилителей и аналоговых перемножителей напряжений. Основная область применения формирователя сигнала треугольной формы – преобразователи напряжения во временной интервал.

Сигнал треугольной формы широко используется в радиотехнике, вычислительной технике, радиолокации, преобразователях напряжения во временной интервал, широтно-импульсных модуляторах, схемах управления современных источников питания, устройствах временной задержки, измерительной технике и т.д.

Схемы формирователей треугольной формы широко освещены в литературе. Простейшим таким формирователем является схема с последовательным соединением компаратора и интегратора. Наряду с простотой основным недостатком этой схемы является зависимость амплитуды выходного напряжения от частоты входного сигнала, невысокая линейность, особенно на низких частотах, и несимметричность выходного напряжения в переходных режимах [1].

Для формирования сигнала треугольной формы часто используется гене-

ратор, построенный на базе триггера Шмита и интегратора [2]. Недостатками такого формирователя являются взаимная зависимость амплитуды и частоты и ручное управление, а также невозможность регулирования частоты выходного напряжения изменением частоты входного сигнала в связи с отсутствием в схеме входа.

Интересным схемным решением является формирователь, схема которого приведена в [3]. Работа устройства заключается в противофазном суммировании двух сигналов, получающихся после двухполупериодного выпрямления, входное напряжение одного из которых сдвинуто по фазе на угол  $90^\circ$  [3]. Основным недостатком этого формирователя является низкая линейность.

Несколько повысить точность и линейность формирования треугольного напряжения позволяет применение в схеме аналого-цифрового фор-

мирователя [4]. Однако применение в устройстве реактивных элементов снижает быстродействие устройства.

В статье описывается разработка формирователя треугольного напряжения, свободного от приведённых выше недостатков.

На рис. 1 приведена структурная схема устройства. Формирователь содержит удвоитель частоты *УЧ*, двухполупериодный выпрямитель *ДВ*, компаратор *К*, переключатель полярности *ПП*, блок масштабирования *БМ* и сумматор *С* [5].

Устройство работает следующим образом. Входное синусоидальное напряжение переменного тока  $u_{вх} = U_{mвх} \sin \omega t$  (рис. 1) с частотой  $\omega$  подаётся на входы удвоителя частоты *УЧ*, компаратора *К* и первый вход сумматора *С*.

На выходе удвоителя частоты *УЧ* формируется напряжение  $u_1 = U_{mвх} \sin 2\omega t$ , удвоенной частотой  $2\omega$  и амплитудой  $U_{mвх}$ , которое подаётся на вход двухполупериодного выпрямителя *ДВ* (рис. 1).

После выпрямления выпрямителем *ДВ* напряжение  $u_2$  имеет форму двухполупериодного выпрямления и подаётся на вход переключателя полярности *ПП* (рис. 1).

Одновременно компаратор *К* преобразует входное синусоидальное напряжение  $u_{вх}$  в напряжение  $u_3$  прямоугольной формы, которое подаётся на управляющий вход переключателя полярности *ПП* и управляет полярностью его выходного напряжения. Причём положительное выходное напряжение  $u_3$  компаратора *К* приводит к изменению полярности выходного напряжения  $u_2$  двухполупериодного выпрямителя *ДВ* на противоположную, а нулевое напряжение – не изменяет полярность напряжения  $u_2$ . Коэффициент передачи переключателя полярности *ПП* выбран равным единице, поэтому в первый полупериод входного напряжения  $u_{вх}$  он работает как инвертор, а во второй – как повторитель (рис. 1). В результате на выходе переключателя полярности *ПП* формируется несинусоидальное напряжение  $u_4$ , которое состоит из фрагмен-

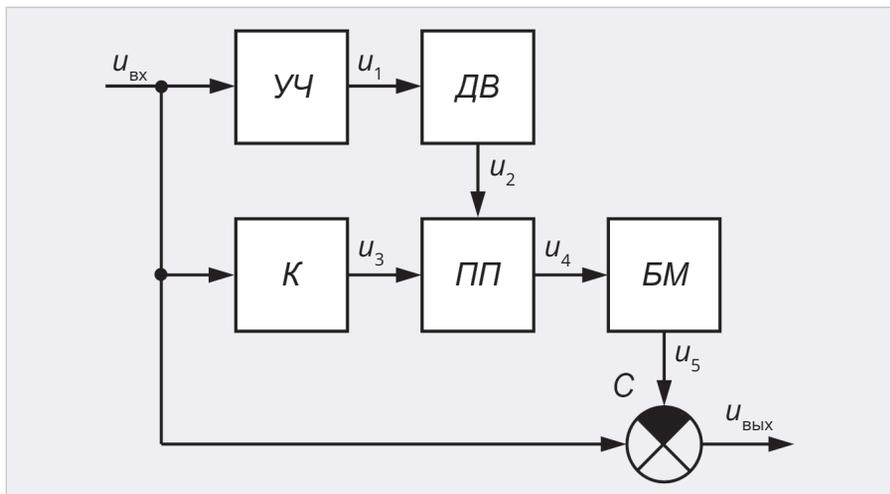


Рис. 1. Структурная схема формирователя сигнала треугольной формы: *УЧ* – удвоитель частоты; *ДВ* – двухполупериодный выпрямитель; *К* – компаратор; *ПП* – переключатель полярности; *БМ* – блок масштабирования; *С* – сумматор

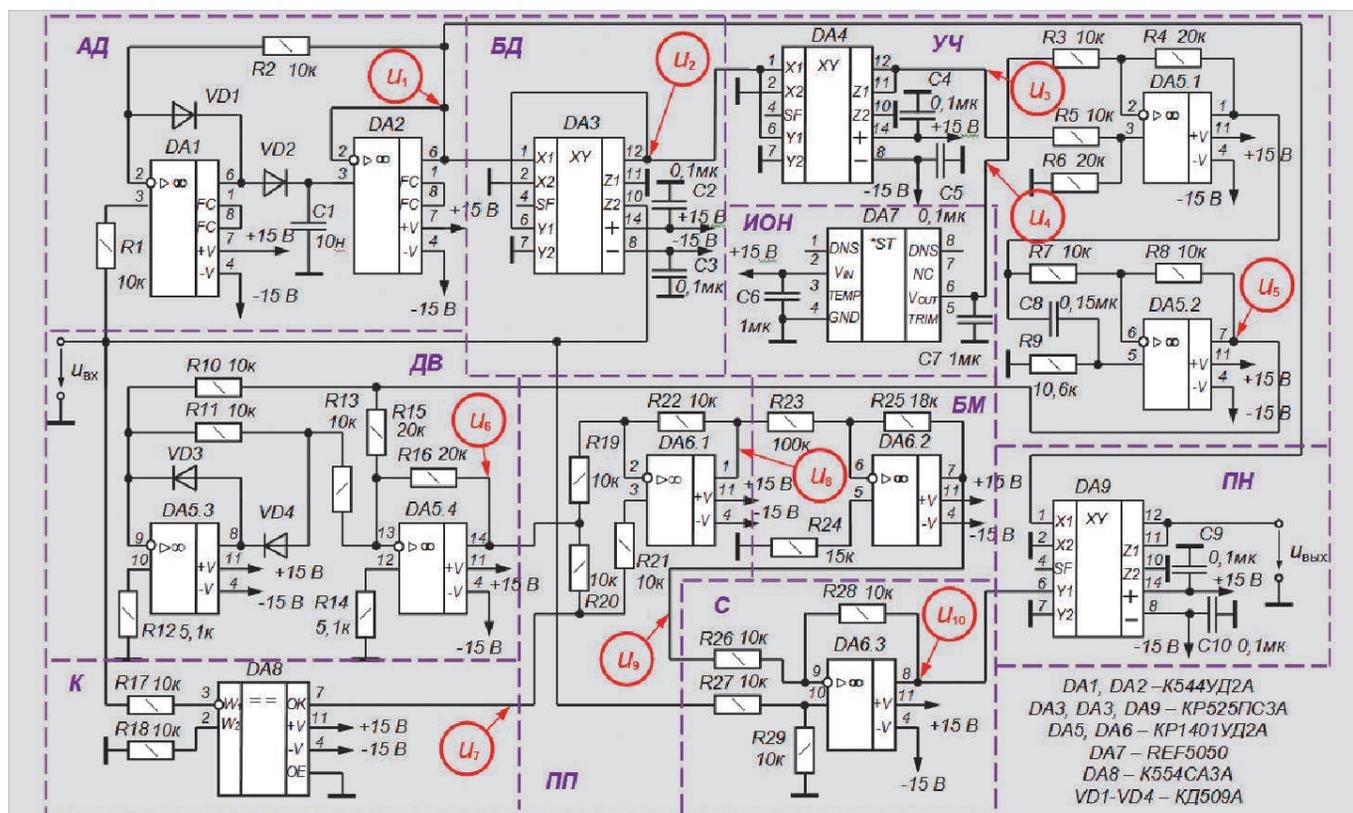


Рис. 2. Принципиальная схема формирователя сигнала треугольной формы

тов синусоид и подаётся на вход блока масштабирования БМ.

В блоке масштабирования БМ напряжение  $u_4$  масштабируется по амплитуде, и на его выходе формируется напряжение  $u_5$ , которое подаётся на второй вход сумматора С (рис. 1). Коэффициент передачи блока масштабирования БМ выбран  $K_{\text{н}} = 0,18$ .

В сумматоре С полученное напряжение  $u_5$  складывается с входным синусоидальным напряжением  $u_{\text{вх}}$ . В результате на выходе сумматора С и устройства формируется напряжение  $u_{\text{вых}}$  треугольной формы.

С целью проверки работоспособности формирователя по структурной схеме автором была разработана его принципиальная схема, которая приведена на рис. 2. На основании полученной схемы был создан опытный образец формирователя и проведены его лабораторные исследования. В результате проведённых исследований были получены осциллограммы напряжений устройства, приведённые на рис. 3.

Следует отметить, что конфигурация и параметры принципиальной схемы несколько отличаются от построения структурной схемы в связи с особенностями применяемых в схеме устройства интегральных микросхем (ИМС) (рис. 2). Для упрощения принципиаль-

ной схемы устройства умножитель частоты УЧ был выполнен на основе квадратора. Это потребовало введения в схему формирователя дополнительных узлов: амплитудного детектора АД, блока деления БД и перемножителя напряжений ПН.

Таким образом, амплитудный детектор АД формирователя выполнен на операционных усилителях (ОУ) DA1, DA2, которые выбраны типа K544UD2A с высоким входным сопротивлением с полевыми транзисторами на входе [6]. Блок деления БД выполнен на ИМС DA3 перемножителя напряжений типа KP525PC3A, включённого по схеме делителя [6]. Умножитель частоты выполнен на перемножителе напряжений DA4 типа KP525PC3A, включённом по схеме квадратора [6], параллельного сумматора на ОУ DA5.1 на ИМС типа KP1401UD2A и фазосмещателя на  $90^\circ$  на ОУ DA5.2. В качестве источника опорного напряжения ИОН применена ИМС DA7 типа REF5050 с прецизионным выходным напряжением  $+5$  В. Двухполупериодный выпрямитель ДВ в виде активного выпрямителя на ОУ DA5.3, DA5.4 [7]. Компаратор К представляет собой ИМС DA8 компаратор напряжений типа K554CA3A. Переключатель полярности ПП выполнен на ОУ DA6.1, DA6.2 совместно с выходным транзистором компаратора DA8.

Сумматор С представляет собой параллельный сумматор на ОУ DA6.3. Перемножитель напряжений ПН выполнен на ИМС DA9 перемножителя напряжений типа KP525PC3A, включённого по схеме перемножителя (рис. 2).

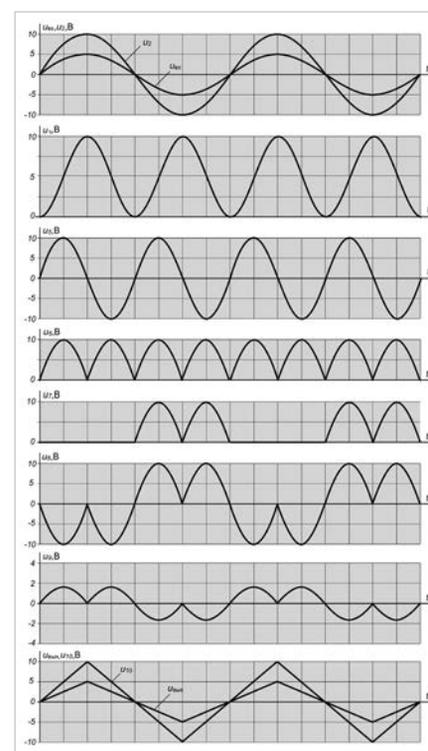


Рис. 3. Осциллограммы напряжений формирователя сигнала треугольной формы

Рассмотрим работу принципиальной схемы (рис. 2) формирователя. Входное синусоидальное напряжение  $u_{\text{вх}} = U_{m \text{ вх}} \sin \omega t$  подаётся на вход амплитудного детектора АД, блока деления БД и компаратора К (рис. 2). В блоке деления БД входное напряжение  $u_{\text{вх}}$  делится на его амплитуду  $U_{m \text{ вх}}$ , в результате чего на выходе блока деления БД формируется напряжение  $u_2 = 10 \sin \omega t$  с амплитудой напряжения 10 В, независимой от амплитуды входного напряжения  $U_{m \text{ вх}}$  (в структурной схеме амплитуда напряжения  $u_2$  имеет единичное значение) [7]:

$$u_2 = \frac{10(z_2 - z_1)}{(x_1 - x_2)} + y_2 = \frac{10z_2}{x_1} = \frac{10U_{m \text{ вх}} \sin \omega t}{U_{m \text{ вх}}} = 10 \sin \omega t \text{ В,}$$

где  $x_2 = y_2 = z_1 = 0$ , поэтому эти входы DA3 в схеме (рис. 2) подключены к общему проводу.

Амплитуда напряжения  $u_2$  принята равной 10 В с целью увеличения точности формирователя (рис. 2). Синусоидальное напряжение  $u_2 = 10 \sin \omega t$  подаётся на вход квадратора на ОУ DA4 удвоителя частоты УЧ, на выходе которого формируется напряжение, содержащее постоянную составляющую напряжения 5 В [7]:

$$u_3 = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} + z_2 = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{10 \sin \omega t \cdot 10 \sin \omega t}{10} = 10 \sin^2 \omega t = 10(1 - \cos 2\omega t) = (5 - 5 \cos 2\omega t) \text{ В,}$$

где  $x_2 = y_2 = z_2 = 0$ , поэтому эти входы DA4 в схеме (рис. 2) подключены к общему проводу.

Напряжение  $u_3$  подаётся на неинвертирующий вход параллельного сумматора на ОУ DA5.1 с коэффициентом усиления, равным 2, на инвертирующий вход которого подаётся напряжение  $u_4 = 5$  В с источника опорного напряжения на DA7. Тем самым компенсируется постоянная составляющая напряжения  $u_3$ . Выходное напряжение ОУ DA5.1 подаётся на вход фазосмещателя ФС на ОУ DA5.2, который выполнен в виде фазового фильтра и сдвигает фазу входного напряжения на  $\phi = 90^\circ$  в сторону опережения (рис. 3) [7]:

$$\phi = 180^\circ - 2 \arctg(R9C8 \cdot 2\omega) = 180^\circ - 2 \arctg(10,6 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 314) = 180^\circ - 2 \arctg 1 = 180^\circ - 2 \cdot 45^\circ = 90^\circ. (1)$$

В результате на выходе ОУ DA5.2 и на выходе удвоителя частоты УЧ формируется переменное синусоидальное напряжение  $u_4$  амплитудой 10 В (рис. 3):

$$u_5 = [5 - 5 \cos(2\omega t + 90^\circ) - 5] \cdot 2 = 10 \sin 2\omega t \text{ В.}$$

Выходное напряжение  $u_5$  удвоителя частоты УЧ выпрямляется двухполупериодным выпрямителем ДВ на ОУ DA5.3, DA5.4, на выходе которого формируется напряжение  $u_6$  (рис. 3), поступающее на вход переключателя полярности ПП.

Переключатель полярности ПП выполнен по схеме управляемого усилителя на ОУ DA6.1 [8] и управляется выходным транзистором компаратора напряжения DA8, на выходе которого формируется импульсное напряжение  $u_7$  из входного напряжения формирователя  $u_{\text{вх}}$  (рис. 3). В первый полупериод входного напряжения  $u_{\text{вх}}$  выходной транзистор компаратора К на ОУ DA8 открыт, и управляемый усилитель на ОУ DA6.1 работает как инвертирующий усилитель, во второй полупериод транзистор компаратора К закрыт, и управляемый усилитель работает как неинвертирующий. В результате выходное напряжение  $u_8$  переключателя полярности ПП состоит из фрагментов полусинусоид его входного напряжения (рис. 3).

Выходное напряжение  $u_8$  переключателя полярности ПП подаётся на вход блока масштабирования БМ на ОУ DA6.2, где инвертируется и уменьшается до  $u_9 = 1,8$  В. Это напряжение  $u_9$  вычитается в параллельном сумматоре С на ОУ DA6.3 из входного напряжения  $u_{\text{вх}}$  с выхода удвоителя частоты УЧ. В результате на выходе сумматора С формируется напряжение  $u_{10}$  треугольной формы амплитудой, равной 10 В (рис. 3), которое подаётся на вход  $u_1$  перемножителя напряжений ПН на DA9. На вход  $x_1$  подаётся напряжение  $u_1$  с выхода амплитудного детектора АД (рис. 2).

При этом в перемножителе напряжений ПН происходит восстановление амплитуды входного сигнала  $u_{\text{вх}}$ :

$$U_{m \text{ вх}} = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} + z_2 = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{10 \cdot U_{m \text{ вх}}}{10} = U_{m \text{ вх}},$$

где  $x_2 = y_2 = z_2 = 0$ , поэтому эти входы DA9 в схеме (рис. 2) подключены к общему проводу.

В результате на выходе перемножителя напряжений ПН и на выходе схемы формирователя образуется напряжение  $u_{\text{вых}}$  треугольной формы с амплитудой, равной амплитуде входного сигнала  $U_{m \text{ вх}}$ .

Следует отметить, что особенностью работы рассмотренного формирователя является то, что он настроен на про-

мышленную частоту 50 Гц входного сигнала  $u_{\text{вх}}$ . Если для работы формирователя требуется другая частота входного сигнала, то необходимо изменить параметры фазосмещателя ФС в соответствии с выражением (1). Для работы устройства в широком диапазоне частот необходимо в формирователе использовать широкополосный фазосмещатель ФС, выполненный, например, по схеме, приведённой в [9].

В случае работы формирователя с фиксированным значением амплитуды входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  необходимость в амплитудном детекторе АД и перемножителе напряжений ПН отпадает. При этом на входе формирователя необходимо включить усилитель с соответствующим коэффициентом передачи, чтобы напряжение на входе удвоителя частоты УЧ было равно 10 В.

## Литература

1. Кауфман М., Сидман А.Г. Практическое руководство по расчётам схем в электронике: Справочник. В 2 т. Т. 1 / пер. с англ.; под ред. Ф.Н. Покровского. М.: Энергоатомиздат, 1991. 368 с.
2. Алексеенко А.Г. и др. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985. 256 с.
3. Шустов М.А. Аддитивный формирователь сигнала треугольной формы // Радиотехника. 2003. № 1. С. 95.
4. Пат. 81859 Российская Федерация, МПК H03K 4/06. Аналого-цифровой аддитивный формирователь сигнала треугольной формы / Дубровин В.С., Зюзин А.М. № 2008146321/22; заявл. 24.11.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9.
5. Пат. № 222828 Российская Федерация, МПК H03K 4/06, H03B 28/00. Формирователь сигнала треугольной формы / Колесников Е.Б. № 2023128369 /07; заявл. 30.10.2023; опубл. 19.01.2024, Бюл. № 2.
6. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. М.: Радио и связь, 1991. 376 с.
7. Пейтон А.Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352 с.
8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3 т. Т. 1 / пер. с англ. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Мир, 1993. 413 с.
9. Пат. № 205068 Российская Федерация, МПК G01R 25/04. Устройство сдвига фазы на 90 градусов / Колесников Е.Б. № 2021109335/28; заявл. 05.04.2021; опубл. 25.06.2021, Бюл. № 18.



## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### Нужны ли ИИ огромные дата-центры? EPFL предлагает альтернативу облачной модели

Стремительный рост использования искусственного интеллекта за последние три года сделал ИИ ключевым инструментом для работы с конфиденциальными данными – от медицинских карт и клиентских запросов до внутренних корпоративных документов. Однако доминирующая сегодня модель ИИ-сервисов по-прежнему опирается на облачную инфраструктуру и гигантские дата-центры, находящиеся под контролем ограниченного круга технологических корпораций.

Исследователи EPFL (Швейцарская высшая техническая школа Лозанны) утверждают, что такая архитектура не является неизбежной – и представили программное решение, способное радикально изменить представление о том, где и как должен работать ИИ.

#### Как работает ИИ сегодня

В типичном сценарии пользователь формирует запрос локально, после чего данные отправляются в облако, где мощное серверное оборудование выполняет вывод (inference) и возвращает результат. Именно этот этап, а не обучение моделей, по оценкам экспертов, потребляет до 80–90% всей вычислительной мощности, связанной с ИИ.

В результате обучение и эксплуатация крупных языковых моделей – таких как ChatGPT, Gemini или Claude – сосредоточены в масштабных дата-центрах, что усиливает:

- зависимость от облачных провайдеров;
- риски утечки и повторного использования данных;
- энергопотребление и водную нагрузку;
- вопросы технологического и цифрового суверенитета.

#### Plug-and-play распределённый ИИ

Исследователи EPFL – Готье Ворон, Джемари Ризк и Рашид Геррауи из Лаборатории распределённых вычислений (DCL) – разработали программное обеспечение Anyway Systems, которое позволяет запускать крупные открытые модели ИИ полностью локально, без передачи данных в облако.

Система автоматически объединяет несколько машин в локальной сети в отказоустойчивый вычислительный кластер, используя методы самостабилизирующихся распределённых вычислений. Установка занимает около 30 минут и не требует специализированного персонала.



Ключевая особенность – возможность развёртывания очень крупных моделей (вплоть до сотен миллиардов параметров) на нескольких стандартных GPU вместо дорогостоящих серверных стоек.

По утверждению разработчиков, модель масштаба GPT-120B может быть развернута на четырёх обычных машинах с одним GPU каждая (примерно по 2300 CHF за карту) вместо специализированного оборудования стоимостью около 100 000 CHF.

#### Конфиденциальность, суверенитет и устойчивость

Отказ от облака напрямую решает сразу несколько системных проблем:

- конфиденциальность – данные не покидают локальную инфраструктуру;
- суверенитет ИИ – контроль над моделями, алгоритмами и данными остаётся у организации или государства;
- устойчивость – снижается потребность в масштабировании энергоёмких дата-центров.

Как подчёркивает профессор Рашид Геррауи, несмотря на то что распределённая архитектура может приводить к небольшому росту задержек ответа, точность моделей не страдает, что было подтверждено в пилотных тестах.

#### От блокчейна – к ИИ

Интересно, что базовые алгоритмы Anyway Systems изначально разрабатывались для других областей – в частности, для блокчейн-систем и криптовалют, где отказоустойчивость и децентрализация критически важны. Три года назад команда DCL адаптировала эти принципы к машинному обучению и, по их словам, получила «почти идеальное совпадение задач и методов».

#### Поддержка и первые внедрения

Стартап Anyway Systems был отобран одним из первых получателей гранта программы Startup Launchpad AI Track, поддерживаемой UBS. Сейчас платформа проходит тестирование в компаниях и государствен-

ных структурах по всей Швейцарии, включая сам EPFL.

Пользователи оценивают компромиссы между скоростью, качеством и экономией ресурсов, а также потенциал масштабирования.

Профессор Давид Атиенца, заместитель вице-президента EPFL по исследовательским платформам, отмечает, что устойчивый подход Anyway Systems хорошо вписывается в стратегию университета по снижению ресурсной нагрузки при внедрении новых LLM-моделей, включая Apertus.

#### Почему это не Google AI Edge

Разработчики подчёркивают принципиальное отличие от решений вроде Google AI Edge. Последние ориентированы на запуск небольших моделей на одном устройстве и не поддерживают распределённое выполнение крупных LLM в масштабе организации.

Аналогично популярные инструменты для локального запуска LLM (Llama, msty.ai и др.) обычно работают на одной машине, создавая единичную точку отказа и требуя дорогостоящего «серверного» железа для масштабирования.

Anyway Systems решает эти проблемы автоматически: отказ узлов, их отключение или добавление происходят прозрачно для пользователя, влияя лишь на задержку ответа.

#### Взгляд вперёд: ИИ у себя дома

Пока система не предназначена для работы на одном домашнем ноутбуке, однако разработчики уверены, что история вычислений указывает именно в эту сторону.

По словам Геррауи, в перспективе пользователи смогут:

- скачивать открытые ИИ-модели;
- дообучать их на собственных данных;
- полностью контролировать архитектуру, параметры и поведение ИИ.

И всё это – без участия крупных облачных платформ.

