

**ГАПОН ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; e-mail: [Dmytro.Hapon@khp.edu.ua](mailto:Dmytro.Hapon@khp.edu.ua).

**ДОМНІН ІГОР ФЕЛІКСОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту іоносфери, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4403>; e-mail: [domninpro@ukr.net](mailto:domninpro@ukr.net).

**ДЕМ'ЯНЕНКО РОМАН ІГОРОВИЧ** ✉ – доктор філософії (PhD), старший викладач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0902-2607>; e-mail: [Roman.Demianenko@khp.edu.ua](mailto:Roman.Demianenko@khp.edu.ua).

**СОЛОДОВНИК АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3196-3530>; e-mail: [Andrii.Solodovnyk@khp.edu.ua](mailto:Andrii.Solodovnyk@khp.edu.ua).

**СВЕТЕЛІК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7005-6761>; e-mail: [Oleksandr.Svetelik@khp.edu.ua](mailto:Oleksandr.Svetelik@khp.edu.ua).

## СУЧАСНЕ АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЇВ ОБЛІКУ ТА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ADE9112

У статті представлено архітектуру приладу для обліку та моніторингу показників якості електричної енергії, що побудований на базі ізольованого аналого-цифрового перетворювача сигма-дельта типу нового покоління ADE9112. Показано, що інтеграція гальванічної розв'язки сигналів та живлення, покращені шумові характеристики, підтримка високих частот дискретизації та надійні інтерфейси дозволяють значно спростити схемотехніку, зменшити кількість дискретних компонентів, а також підвищити точність і достовірність вимірювань у широкому динамічному діапазоні. Виконано порівняльний аналіз нового покоління ADE9112 із попереднім рішенням ADE7912, що продемонстрував розширення функціональних можливостей, збільшення швидкодії та розширення робочого температурного діапазону для промислових застосувань. Обґрунтовано доцільність використання ADE9112 з точки зору відповідності сучасним методам вимірювання якості електричної енергії відповідно до стандарту IEC 61000-4-30 та вимог електромагнітної сумісності. Особливу увагу приділено питанням синхронізації каналів у багатофазних системах, забезпеченню узгодження часових рядів вимірювань та збереженню фазової відповідності для точних розрахунків енергетичних величин. Запропоновано типову архітектуру вимірювального тракту з використанням ADE9112 у поєднанні з мікроконтролерами, що дозволяє реалізувати як потоковий обробку даних, так і інтеграцію з мережевими інтерфейсами верхнього рівня. Продемонстровано інженерні рекомендації щодо побудови входних ланцюгів, антиліас-фільтрації, програмної конфігурації режимів дискретизації та перевірки цілісності даних, а також наведено підходи до забезпечення електробезпеки й відповідності вимогам електромагнітної сумісності. Отримані результати підтверджують доцільність застосування ADE9112 у сучасних системах обліку та моніторингу якості електроенергії, а також слугують базою для подальшого вдосконалення апаратно-програмних комплексів у сфері енергетики.

**Ключові слова:** ADE9112; вимірювання якості електроенергії; аналого-цифровий перетворювач сигма-дельта типу ( $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП); гальванічна розв'язка; облік електроенергії.

**Вступ.** Сучасні електроенергетичні системи характеризуються зростанням частки децентралізованої генерації, використанням силової перетворювальної техніки та збільшенням кількості нелінійних споживачів, що підвищує вимоги до точності й надійності контролю параметрів електричної енергії. У таких умовах пристрої обліку та моніторингу повинні забезпечувати коректне вимірювання не лише діючих значень напруги і струму, а й показників якості електричної енергії (Power Quality, PQ), зокрема коефіцієнт гармонійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD). Для реалізації таких вимірювань широко застосовуються аналого-цифрові перетворювачі (АЦП, ADC) сигма-дельта типу ( $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП), які забезпечують високу розрядність, добрі шумові характеристики та стабільну фазову поведінку. Критично важливими є одночасна вибірка кількох каналів і точна часова синхронізація, що безпосередньо впливає на достовірність

енергетичних розрахунків у багатофазних системах. Особливу увагу під час проектування вимірювальних трактів приділяють питанням електробезпеки та електромагнітної сумісності, для чого застосовується гальванічна розв'язка між вимірювальними та цифровими колами. Інтегровані ізольовані аналого-цифрові перетворювачі нового покоління, зокрема мікросхема ADE9112, поєднують функції високоточного перетворення та ізоляції, спрощуючи апаратну реалізацію і забезпечуючи відповідність сучасним вимогам до вимірювання якості електричної енергії згідно зі стандартом IEC 61000-4-30 [1].

**Мета статті.** Теоретично обґрунтувати застосування ізольованого  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП ADE9112 у вимірювальних трактах пристроїв моніторингу та аналіз його відповідності вимогам до точності, фазової синхронності, спектральних характеристик та завадостійкості. Формування практичних

© Д. А. Гапон, І. Ф. Домнін, Р. І. Дем'яненко, А. О. Солодовник, О. О. Светелік, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**  
**Конфлікт інтересів:** Автори заявили про відсутність конфлікту

рекомендацій щодо, інтеграції ADE9112 у пристрої обліку та моніторингу якості електроенергії.

**1. Архітектурні підходи до вимірювання показників якості електричної енергії.** Для коректного обчислення показників якості електроенергії прилади моніторингу повинні забезпечувати багатоканальну синхронну дискретизацію сигналів напруги і струму з високою розрядністю, низьким рівнем шуму та передбачуваною фазовою затримкою у смузі частот до десятків кілогерц. Саме ці вимоги обумовлюють вибір архітектури вимірювального тракту та типу аналого-цифрового перетворення.

На практиці застосовують три основні підходи до побудови вимірювальних систем моніторингу якості електричної енергії.

**Перший підхід** ґрунтується на використанні аналогового фронт-енду (АФЕ, від англ. Analog Front-End), які поєднують аналого-цифрове перетворення з вбудованою цифровою обробкою сигналів і апаратною реалізацією основних енергетичних та PQ-метрик. Такі рішення дозволяють суттєво скоротити час розробки, однак обмежують гнучкість реалізації власних алгоритмів [2].

**Другий підхід** передбачає використання дельта сигма ( $\Delta\Sigma$ ), чи реєстру послідовних наближень (successive-approximation register, SAR) АЦП з одночасною вибіркою для власних алгоритмів розрахунку якості електроенергії.  $\Delta\Sigma$  АЦП забезпечують високу розрядність і низький рівень шуму, що є критично важливим для спектрального аналізу та точного розрахунку гармонічних складових. Водночас їх недоліком є відносно вузька смуга пропускання через використання внутрішніх фільтрів, що може обмежувати ефективність при аналізі швидкоплинних перехідних процесів [3]. Натомість SAR АЦП забезпечують ширшу смугу пропускання та кращу відтворюваність фронтів сигналів, характерних для нестационарних режимів роботи мережі. Проте вони мають нижчу розрядність і вищий рівень шуму порівняно з  $\Delta\Sigma$  АЦП. У межах цього підходу вся цифрова обробка сигналів і розрахунок показників якості електричної енергії виконується на рівні мікроконтролера або цифрового сигнального процесора, що надає високу гнучкість програмної реалізації [4].

**Третій підхід** полягає у застосуванні ізольованих  $\Sigma\text{-}\Delta$  модуляторів, які використовуються переважно у високовольтних або шунтових вимірювальних трактах. Такі мікросхеми забезпечують гальванічну розв'язку між вимірювальними колами та цифровою частиною системи, а подальша цифрова фільтрація та обробка виконуються у мікроконтролері або програмованій логічній інтегральній схемі. Цей підхід є доцільним у промислових застосуваннях з підвищеними вимогами до електробезпеки та електромагнітної сумісності [5].

**2. Класи мікросхем для моніторингу якості електричної енергії.** Окрему групу становлять ізольовані аналого-цифрові перетворювачі сигма-дельта типу ( $\Sigma\text{-}\Delta$  модулятори), які забезпечують

гальванічну розв'язку між вимірювальними ланцюгами та цифровою частиною пристрою, що є критично важливим для високовольтних і промислових застосувань з підвищеними вимогами до електробезпеки та електромагнітної сумісності [6]. Нижче наведено стислий огляд типових представників кожного з перелічених класів мікросхем.

#### **Інтегровані АФЕ для енергометрів та PQ:**

- Analog Devices ADE9430 – поліфазний АФЕ з повним набором енергетичних та PQ-метрик (середнє квадратичне значення (Root Mean Square, RMS), коефіцієнт потужності (Power Factor, PF), потужність (активна/реактивна/повна (P/Q/S)), енергії, частота, фазові кути) та опційною бібліотекою ADSW-PQ-CLS для подій (sag/swell), ВТДН (THD), тощо; оптимізований під клас S за IEC 61000-4-30 (за бібліотекою). Інтегрована опора з низьким дрейфом ( $< \pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  для каналу з програмованим підсилювачем посилення (programmable-gain amplifier, PGA) та АЦП спрощує калібрування і термостабільність, а наявні плати оцінювання прискорюють прототипування систем з класом S [7].

- Analog Devices ADE9000 – АФЕ попереднього покоління для 3-фазних систем із сімома АЦП-каналами та вбудованим модулем процесора цифрової обробки сигналів (digital signal processor, DSP) подій PQ; платформа сімейства ADE9x з масштабованістю точності (Class 1.0...0.2). Підтримує інтерфейси переривань і доступ до перересемплованих форм сигналів для спрощення аналізу [8].

- STMicroelectronics STPM3x / STPMS2, STPM3x – приклад інтегрованого метрологічного АФЕ (до 4  $\Sigma\text{-}\Delta$  АЦП + «жорсткий» DSP для RMS/потужностей/енергій), сумісний із різними первинними перетворювачами (шунт, трансформатори струму, Роговські котушки). STPMS2 – комплементарний двоканальний  $\Sigma\text{-}\Delta$  модулятор із вхідним підсилювачем для побудови розподілених вимірювальних вузлів [9].

- Microchip ATM90E36A – трифазний енергометричний АФЕ із сімома  $\Sigma\text{-}\Delta$  АЦП, орієнтований на вимірювання як енергетичних величин, так і метрик якості (дискретне перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform, DFT), THD, тощо), доступ до «сирих» потоків від АЦП дозволяє реалізувати власні PQ-алгоритми [10].

- Cirrus Logic CS5480/84 – енергометричний АФЕ з трьома/чотирма 24-бітними 4-го порядку  $\Sigma\text{-}\Delta$  модуляторами; заявлена точність енергії 0,1% на 4000:1 динамічному діапазоні; наявні методики калібрування й застосункові нотатки [11].

#### **Багатоканальні $\Delta\Sigma$ -АЦП з одночасною вибіркою (для власної DSP):**

- Analog Devices AD7768/AD7768-4 – 8/4-канальні 24-біт  $\Delta\Sigma$  з окремим модулятором і цифровим фільтром на канал, смуга до  $\approx 110 \text{ кГц}$  із масштабуванням енергоспоживання; добре підходять для одночасної дискретизації напруги/струму (U/I) з контрольованою фазовою характеристикою [12].

- TI ADS1278 / ADS131E08 / ADS131E08S / ADS131M08. ADS1278 – 8-кан., 24-біт  $\Delta\Sigma$  до 144 тис. зразків за сек (kilosample(s) per second, ksp/s)/кан. для широкосмугових задач. ADS131E08 – 8-кан., 24-біт до 64 ksp/s/кан, прямо позиціонується під power monitoring & protection; варіант E08S дає до 118 дБ динамічного діапазону на 1 ksp/s. ADS131M08 – енергоефективний 8-кан., 24-біт до 32 ksp/s/кан, з PGA до  $\times 128$  і високим вхідним імпедансом (полегшує пряме підключення шунтів/дільників) [13, 14].

- Microchip MCP3912/13/14/19 – сімейство одночасно-вибіркових АФЕ (4–6 каналів) із  $\Delta\Sigma$ -ядрами, призначене для лічильників/моніторингу; підтримує різні первинні сенсори (шунти, трансформатори струму, Роговські котушки, датчики Холла) і має захист конфігурації/помилка циклічного надлишкового коду (Cyclic Redundancy Check, CRC) на інтерфейсі [15].

- Renesas ISL26134 – малошумний 24-біт  $\Delta\Sigma$  АЦП (2/4 диф. входи) із PGA ( $\times 1/2/64/128$ ), сумісний по виводах із ADS1232/34; може слугувати прецизійним фронтендом для каналів напруги/струму в PQ-системах із власною DSP [16].

**Одночасно-вибіркові SAR-DAQ (реєстри послідовних наближень – системи збору даних (data acquisition, DAQ, DAS) (коли критичні транзйєнти й ширша смуга):**

- Analog Devices AD7606B – 8-канальний 16-біт DAS із справжніми біполярними входами ( $\pm 10/\pm 5/\pm 2.5$  В), внутрішнім PGA, фільтром низьких частот (low-pass filter, LPF) та захистом до  $\pm 21$  В; до 800 ksp/s сукупно, 5 МОм вхідного опору – зручно при прямому вимікненні трансформаторів струму/напруги [17].

- TI ADS8598H – 8-канальний 18-бітний одночасної вибірки SAR-ADC з інтегрованим АФЕ (PGA, LPF, вхідний драйвер, 1 МОм імпеданс), до 500 ksp/s/кан; доречний для реєстрації швидких подій PQ та аналізу перехідних [18].

- Maxim (ADI) MAX11046 – 4/6/8-кан., 16-біт одночасної вибірки; високий вхідний імпеданс і біполярні діапазони спрощують узгодження з сенсорами та захистами ліній [19].

**Ізольовані  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятори (для шунтів/високої ізоляції; фільтрація SINC у мікроконтролерах/програмованих логічних схемах):**

- Analog Devices AD7403 – 16-бітний ізольований  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятор (iCoupler®), вхід  $\pm 250$  мВ, до 20 МГц тактування; призначений для відокремленого вимірювання струмів/напруг у високовольтних системах і ліній із високою стійкістю до перехідних процесів у загальному режимі (Common-Mode Transient Immunity, CMTI) [20].

- Texas Instruments AMC1306 ( $\pm 50$  мВ /  $\pm 250$  мВ) – підсилений (reinforced) ізольований модулятор із подвійним емнісним бар'єром, сертифікована ізоляція (DIN V VDE V 0884-10, UL1577), варіанти з Manchester/низьковольтною диференціальною передачею сигналів (low-voltage differential signaling, LVDS), є виконання з

інтегрованим перетворювачем постійного струму (AMC3306). Поширене рішення для шунтів на боці високої напруги, в інверторах, джерелах безперебійного живлення і PQ-реєстраторах [21].

**3. Порівняльний аналіз архітектур вимірювальних трактів.**

**Точність/шуми і фільтрація.** АФЕ на кшталт ADE9430/ADE9000 дають готові енергетичні та PQ-метрики, знімаючи чималу частину DSP-навантаження, але диктують фіксовані тракти обчислень. «Чисті»  $\Delta\Sigma$ -АЦП (AD7768, ADS1278/ADS131E08/M08) забезпечують високий SNR/ENOB і контрольовані групові затримки фільтрів – ці варіанти зручні, коли потрібна своя класифікаторика подій/спектральні методи. SAR-DAQ (AD7606B, ADS8598H) перевершують  $\Delta\Sigma$  за смугою та стійкістю до транзйєнтів, але потребують уважнішого антиліас-проекування.

**Синхронність і фазові похибки.** Для правильного обчислення PQ критична одночасна вибірка (simultaneous sampling) усіх каналів та стабільна фазова характеристика фільтрів; це реалізовано як у  $\Delta\Sigma$ -сім'ях (AD7768, ADS131E08/M08), так і в SAR-DAQ (AD7606B, ADS8598H). В АФЕ сімейств ADE9xxx/STPM3x синхронність забезпечує внутрішній DSP-ланцюжок.

**Ізоляція та фронтенд.** Якщо струм вимірюється шунтом у високому потенціалі, ізольовані  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятори (AD7403, AMC1306) або інтегровані ізольовані АФЕ (де доступно) суттєво спрощують безпеку та електромагнітну сумісність (EMC). Для трансформаторних/роговських сенсорів важливі високий вхідний імпеданс та біполярні діапазони (AD7606B, ADS8598H).

**Нормативи PQ.** Для приладів класів IEC 61000-4-30 (Class A/S) інтегровані бібліотеки (ADE9430 + ADSW-PQ-CLS) прискорюють відповідність; альтернативно, «чисті» АЦП потребують ретельної валідації частотних/фазових похибок і часових вікон для алгоритмів PQ.

Таким чином інтегровані АФЕ (ADE9430/ADE9000, STPM3x/ATM90E36A) мінімізують час розробки й забезпечують готові метрики PQ, в той час як багатоканальні  $\Delta\Sigma$ -АЦП (AD7768, ADS1278/ADS131E08/M08, MCP391x, ISL26134) – оптимальні для «кастомних» алгоритмів із високими вимогами до співвідношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR)/фазової відповідності. Також може бути доцільним використання одночасних SAR-DAQ (AD7606B, ADS8598H, MAX11046) коли пріоритет – транзйєнти і широка смуга. Слід відмітити, що у високовольтних/шунтових трактах ізоляцію найпростішим способом забезпечують  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятори (AD7403, AMC1306).

Таким чином, ізольовані  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП з одночасною вибіркою каналів та інтегрованим живленням дають змогу зменшити кількість дискретних компонентів і підвищити достовірність вимірювань.

**4. Ізольований аналого-цифровий перетворювач ADE9112.** На рис. 1 представлені ключові можливості мікросхеми ADE9112.

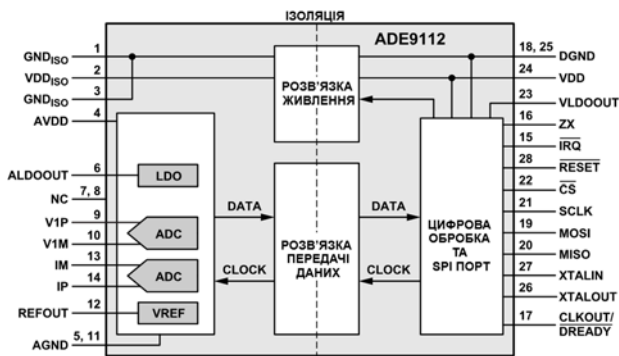


Рисунок 1 – Ключові можливості ADE9112

Ключові можливості ADE9112 [22]:

- Два (у серії – до трьох) 24-розрядних  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП з одночасною вибіркою.
- Інтегрована безпечна гальванічна розв'язка сигналу й живлення (ізолюваний живильний домен вимірювальних входів).
- Покращені шумові показники (типово до  $\approx 91$ – $95$  дБFS залежно від каналу та режиму фільтрації).
- Підтримка підвищених частот дискретизації (до 32 ksp/s) для покриття гармонік і швидких перехідних.
- Гнучкі входні конфігурації, у т.ч. диференційні режими для каналу напруги (до  $\pm 1$  В diff).
- Надійні інтерфейси: послідовні периферійні інтерфейси (Serial Peripheral Interface, SPI) з бінапрямним CRC, апаратні лінії подій/збоїв (Interrupt requests, IRQ), можливість daisy-chain.
- Розширений діапазон робочих температур (типово  $-40$ ... $+125$  °C) для промислових застосувань.
- Корпус wide-body (28 виводів) з підвищеною електричною міцністю ізоляції.

Структурна схема вимірювального тракту на ADE9112 зображено на рис. 2.

Струм фази вимірюється шунтом низького опору (0,001...0,010 Ом) у ізолюваному домені, напруга — через дільник з обмеженням амплітуди та антиаліас-фільтрацією. Шунтовий канал підключається до високочутливого входу, а канал напруги — до диференційного входу з розширеним динамічним діапазоном. Завдяки інтегрованому ізолюваному живленню вимірювальних ланцюгів усувається потреба у зовнішніх DC-DC з гальванічною розв'язкою, спрощується топологія плати та підвищується EMC [23, 24].

Для пікових перевантажень напруга зі шунта паралельно подається і на «широкодінамічний» канал, що дає змогу зберегти безперервність вимірювань без насичення АЦП [25].

ADE9112 забезпечує одночасну вибірку всіх активних каналів. Для багатofазних або багатолінійних систем доцільно синхронізувати кілька мікросхем загальним тактуванням та періодично узгоджувати лічильники семплів на рівні прошивки мікроконтролера. Алгоритм типового узгодження передбачає: знімок поточних лічильників семплів, оцінку міжмодульного зсуву, програмне коригування та повторну перевірку. Відхилення в один такт вибірки вважається допустимим і не впливає на енергетичні розрахунки у смузі до кількох кілогерц.

Для обґрунтування доцільності переходу на нову платформу у табл. 1 наведено порівняльний аналіз ключових характеристик аналого-цифрових перетворювачів ADE9112 та ADE7912.

У транспортному шарі SPI рекомендується вмикати контроль цілісності (CRC) та обробляти апаратні події/помилки (IRQ) для мінімізації пропусків даних.

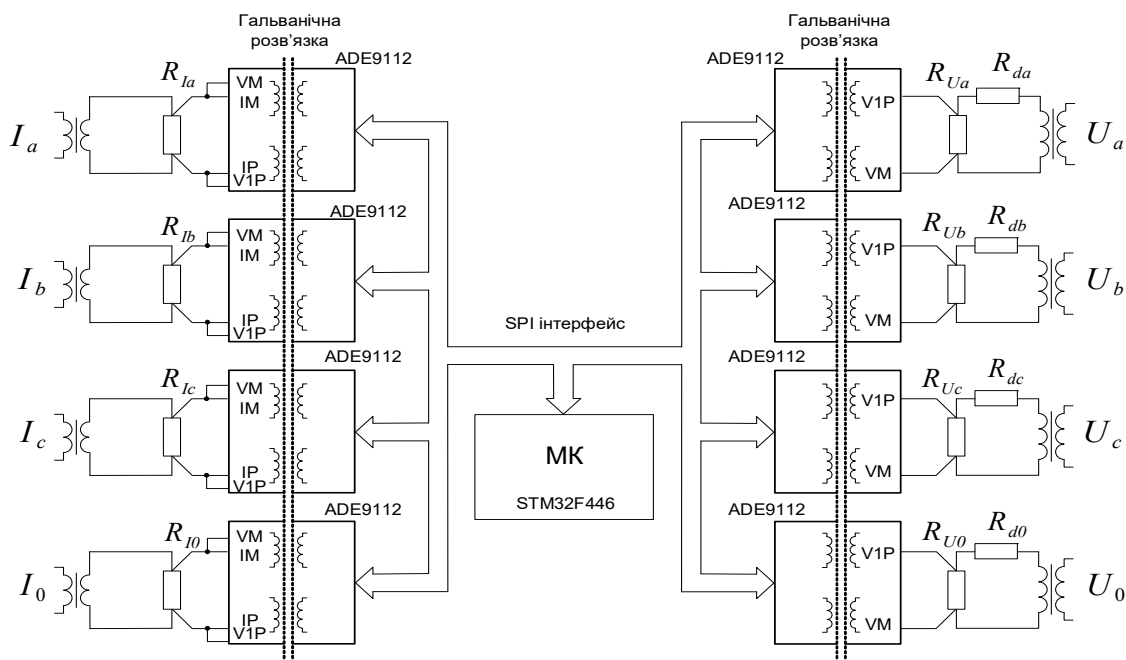


Рисунок 2 – Структурна схема вимірювального тракту на ADE9112

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз відмінностей ADE9112 та ADE7912 [26]

Параметр	ADE9112 (актуальне)	ADE7912 (попереднє)	Примітка
Шум/точність (типово)	≈91–95 дБFS	≈70 дБ у смузі до 3 кГц	Вищий запас точності на гармоніках
Макс. частота вибірки	до 32 ksp/s	до ~8 ksp/s	Краще покриття швидких подій
Вхідні режими	Гнучкі, у т.ч. диференційні (до ±1 В diff)	Фіксовані: струм ±31,25 мВ; напруга ±500 мВ	Більший динамічний діапазон
Інтерфейс/надійність	SPI + CRC (bi-dir), IRQ, daisy-chain	SPI, базовий CRC регістрів/даних	Стійкість до помилок лінії
Температури	-40...+125 °С	-40...+85 °С	Промисловий діапазон
Ізоляція/живлення	Інтегрована безпечна ізоляція + ізольоване живлення	iCoupler® + isoPower®	Спрощення живлення вимірювальних кіл
Корпус	SOIC W FP-28 (wide body)	SOIC-20 (wide body)	Не сумісні за выводами

Міграція з ADE7912 (попереднє покоління ізольованих  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП) на ADE9112 (актуальна платформа з поліпшеними шумовими характеристиками, вищою швидкістю вибірки та розширеним температурним діапазоном) спрямована на підвищення точності вимірювань, розширення динамічного діапазону та спрощення відповідності сучасним вимогам EMC/безпеки.

**5. Практичні рекомендації щодо проектування та впровадження.** Нижче подано технічні рекомендації у форматі, придатному для включення до науково-технічної публікації або конструкторської документації.

#### 5.1 Апаратні зміни.

**Футпринт (посадочне місце електронного компонента на друкованій платі, Footprint) і трасування плати:**

1. Дії – перепроектувати монтажне місце під 28-контактний wide-body корпус ADE9112; оновити топологію шарів, відступів та вирізів у зоні ізоляційного бар'єра; перевірити ширину доріжок/зазорів відповідно до робочої напруги та категорії перенапруги виробу.

2. Особливості – у ADE9112 інше розташування ізоляційних відступів і контактів живлення/інтерфейсів; необхідно перерозвести земляні домени (силовий/вимірювальний/логічний), мінімізувати паразитні ємності через бар'єр.

3. Критерії приймання – візуальна перевірка правил проектування (Design Rule Checking, DRC), дотримання кліренсу/крипу (мінімальної відстані уздовж поверхні ізоляції між провідними елементами), відсутність «петель» за землею навколо ізоляційного бар'єра, безконфліктність з keep-out зонами (ділянками друкованої плати, у межах яких заборонено розміщення компонентів).

#### Вхідні ланцюги та антиаліас-фільтрація:

1. Дії – уточнити схему входів з урахуванням диференційних режимів каналу напруги ADE9112 (порівняно з SE-входами в ADE7912):

- для струму (шунт) — перевірити масштабування на рівні мВ, термостабільність  $R_{SH}$  та тепловий дрейф;

- для напруги — оновити дільник/буфер, симетрію плечей, підбор фільтрів резистор-конденсатор (resistor-capacitor, RC) / індуктивність-

конденсатор (inductor-capacitor, LC) з урахуванням нових частот дискретизації/декімації;

- виконати симуляцію anti-alias з оцінкою групової затримки (узгодження фаз між каналами U/I).

2. Особливості – диференційний вхід знижує чутливість до спільного завадження, але висуває вимоги до добору парних елементів, трасування «симетрією» та балансування ємностей.

3. Критерії приймання – відгук тракту відповідає заданій смузі; фазовий зсув між каналами у робочому діапазоні частот – у межах допуску алгоритмів P-Q; запас по кляпнуванню і перенапругах підтверджено випробуваннями.

#### 5.2 Програмно-алгоритмічна частина.

##### Конфігурація фільтрів і частот дискретизації:

1. Дії – оновити ініціалізацію: вибір режимів фільтрації/декімації, цільову  $f_S$  на виході АЦП, синхронізацію між кількома мікросхемами; перерахувати часові вікна для RMS/DFT/THD.

2. Особливості – інша фільтрова архітектура ADE9112 → зміна групової затримки; необхідне повторне калібрування фазової відповідності між каналами.

3. Критерії приймання – узгоджені часові ряди U/I; стабільні оцінки P, Q, S та фазових кутів на тестових синусах і квазіперіодичних сигналах.

##### Цілісність даних та подієва модель:

1. Дії – увімкнути/перевірити CRC (бінапрямний), обробити переривання (IRQ) для подій, збоїв та переповнень комірок пам'яті (first in, first out; FIFO); за потреби реалізувати daisy-chain SPI для багатоканальних систем.

2. Особливості – обов'язково вести лічильники втрат кадрів/CRC-помилки, логувати перезапуски/ресинхронізації для польової діагностики.

3. Критерії приймання – нуль виявлених CRC-помилки на тривалих прогонах; відсутність розсинхронізації при температурних і напругових «сканах».

#### 5.3 Електромагнітна сумісність (EMC) та ізоляція.

##### EMC-проектування [27, 28]:

1. Дії – перевірити розміщення та номінали розв'язних конденсаторів (локально для кожного домену), шляхи повернення струмів, екранування та Y-

конденсатори між доменами; мінімізувати петлі високочастотних струмів.

2. Особливості – зміна внутрішньої структури та швидкодії в ADE9112 може вплинути на емісії/чутливість; доцільні емпіричні «стеки» фільтрів на вході/живленні.

3. Критерії приймання – проходження таргетних профілів випробувань (провідні/випромінювані емісії; імунітет до електростатичних розрядів (Electrostatic Discharge, ESD) / швидких електричних перехідних процесів (Electrical Fast Transient, EFT) / перенапруг (Surge)) на референсній та серійній платі.

#### **Електрична безпека та бар'єр ізоляції:**

1. Дії – підтвердити кліренс/крип для заявлених категорій перенапруг і робочих напруг; перевірити компонування оптозасорів, вирізів у платі та відстаней до металевих частин корпусу.

2. Критерії приймання – відповідність обраним стандартам безпеки/ізоляції виробу (лабораторні протоколи, акт макетних випробувань).

#### **5.4 Метрологічна валідація:**

##### **Калібрування та контроль похибок [29]:**

1. Дії – провести первинне калібрування по напрузі/струму/фазі; зафіксувати коефіцієнти у енергонезалежній пам'яті (Non-Volatile Memory, NVM); виконати термоциклування з перевіркою дрейфу.

2. Набір тестів – він включає перевірку статичних точок (0, 5, 20 та 100 % діапазону) для оцінки лінійності й повторюваності, аналіз гармонічних спотворень у діапазоні 2–40-ї гармоніки для визначення впливу фільтрації та динамічних похибок, дослідження перехідних процесів типу sag/swell та імпульсів з метою оцінки відновлення сигналу й відсутності пропусків, а також довготривалий прогон протягом 24–72 годин для контролю стабільності нульових показів і температурного дрейфу.

3. Критерії приймання – сукупна похибка у межах специфікації виробу для всього температурного/частотного/динамічного діапазону.

#### **5.5 Рекомендований порядок міграції (етапи)**

1. Передпроектний аналіз. Розрив pin-to-pin, оцінка ризиків, матриця сумісності підсистем (живлення, годинник, SPI, Інтерфейс введення/виведення загального призначення (General-purpose input/output, GPIO)).

2. Електрична схема. Оновлення входів (шунт/дільник), фільтрів, живлення, ізоляційних компонентів.

3. Плата. Новий футпринт, домени «землі», бар'єри, маршрути годинника/SPI.

4. Програмне забезпечення/прошивка. Конфігурація фільтрів, обробка CRC/IRQ, синхронізація багатокрокових вимірювань.

5. Прототипування. Макет/еталонний стенд, первинна калібровка, регресія алгоритмів P-Q.

6. EMC/безпека. Корекція фільтрації/екранування за результатами лабораторних вимірювань.

7. Доводка та серіалізація. Термо- та тривалі тести, фінальні коефіцієнти, документація виробу.

**Висновок.** Проведений аналіз підтвердив, що мікросхема ADE9112 є ефективним рішенням для побудови вимірювальних трактів пристроїв обліку та моніторингу показників якості електричної енергії. Порівняно з платформою ADE7912, вона забезпечує покращені шумові характеристики, розширену частоту дискретизації, підвищену надійність інтерфейсів та стабільну роботу у розширеному температурному діапазоні. Інтегрована гальванічна розв'язка, гнучкі вхідні режими та наявні механізми контролю цілісності даних спрощують побудову апаратної частини та підвищують точність вимірювань. Отримані результати підтверджують доцільність застосування ADE9112 у сучасних пристроях P-Q-моніторингу та створюють основу для подальшого вдосконалення апаратно-програмних комплексів у сфері енергетичних вимірювань.

#### **Список літератури**

1. IEC 61000-4-30:2015+AMD1:2021 CSV. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods. Official edition. 2021.
2. Recent advances in ultra-high-speed wireline receivers with ADC-DSP-based equalizers / S. Jang et al. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*. 2024. Vol. 4. P. 290–304. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojsscs.2024.3506692>.
3. Zhou Y., Xu B., Chiu Y. A 12-b 1-GS/s 31.5-mW time-interleaved SAR ADC with analog HPF-assisted skew calibration and randomly sampling reference ADC. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2019. Vol. 54, no. 8. P. 2207–2218. DOI: <https://doi.org/10.1109/jssc.2019.2915583>.
4. Mounika P., Pu Y. G., Lee K.-Y. A 1.4mW Sigma Delta ADC with configurable filter for sensor applications. *2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Paris, France, 4–7 July 2023. 2023. P. 697–699. DOI: <https://doi.org/10.1109/icufn57995.2023.10200609>.
5. Lee W., Chae Y. Power reduction techniques for energy-efficient audio continuous-time delta-sigma modulator. *2024 21st International SoC Design Conference (ISOC)*, Sapporo, Japan, 19–22 August 2024. 2024. P. 71–72. DOI: <https://doi.org/10.1109/isoc62682.2024.10762241>.
6. All-in-one three-phase smart meter and power quality analyzer with extended IoT capabilities / E. Viciano et al. *Measurement*. 2022. No. 206. 112309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112309>.
7. ADE9430 datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ade9430.html>.
8. ADE9000 datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ade9000.html>.
9. STPM32, STPM33, STPM34 Datasheet - production data. *Electronic Components Distributor - Mouser Electronics Europe*. URL: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/389/stpm32-956482.pdf>.
10. ATM90E36A. *Microchip Technology*. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/atm90e36a>.
11. CS5480. *Cirrus Logic*. URL: <https://www.cirrus.com/products/cs5480>.
12. AD7768 datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad7768.html>.
13. ADS1278 data sheet, product information and support. *Texas Instruments*. URL: <https://www.ti.com/product/ADS1278>.
14. ADS131E08 data sheet, product information and support. *Texas Instruments*. URL: <https://www.ti.com/product/ADS131E08>.

15. MCP3912. *Microchip Technology*. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3912>.
16. ISL26134 - Low-Noise 24-bit Delta Sigma ADC. *Renesas*. URL: <https://www.renesas.com/en/products/isl26134>.
17. AD7606B datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad7606b.html>.
18. ADS8598H data sheet, product information and suppor. *Texas Instruments*. URL: <https://www.ti.com/product/ADS8598H>.
19. MAX11046 datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/max11046.html>.
20. AD7403 datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad7403.html>.
21. AMC1306M05 data sheet, product information and support. *Texas Instruments*. URL: <https://www.ti.com/product/AMC1306M05>.
22. ADE9112 datasheet and product info. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ade9112.html>.
23. A versatile  $\pm 25$ -A shunt-based current sensor with  $\pm 0.25\%$  gain error from  $-40$  °C to  $85$  °C / Z. Tang et al. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2022. Vol. 57, no. 12. P. 3716–3725. DOI: <https://doi.org/10.1109/jssc.2022.3204520>.
24. A 30-n $\Omega$  accuracy low power two-step ratiometric shunt resistance measurement system using a switching regulator-based current generator for shunt-based current sensors / S. Kawahara et al. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, no. 24. P. 40188–40195. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3393442>.
25. Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: a review / H. Shao et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 191. 114094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114094>.
26. ADE7912/ADE7913 (Rev. C). Data Sheet. *Analog Devices*. URL: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7912\\_7913.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7912_7913.pdf).
27. IEEE Std 1459-2025. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. Replaces IEEE Std 1459-2010 ; effective from 2025-05-16. Official edition. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. 61 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2025.11004570>.
28. EN 55032 (CISPR 32): EMC standard for multimedia equipment. *IB-Lenhardt AG*. URL: <https://ib-lenhardt.com/kb/glossary/en-55032-cispr-32>.
29. Calibration of a class A power quality analyser connected to the cloud in real time / A. Cano-Ortega et al. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 16. 3209. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13163209>.
- no. 206, Dec. 2022, Art. no. 112309, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112309>
7. “ADE9430 datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ade9430.html>
8. “ADE9000 datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ade9000.html>
9. “STPM32, STPM33, STPM34 Datasheet - production data.” *Electronic Components Distributor - Mouser Electronics Europe*. [Online]. Available: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/389/stpm32-956482.pdf>
10. “ATM90E36A.” *Microchip Technology*. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/atm90e36a>
11. “CS5480.” *Cirrus Logic*. [Online]. Available: <https://www.cirrus.com/products/cs5480>
12. “AD7768 datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad7768.html>
13. “ADS1278 data sheet, product information and support.” *Texas Instruments*. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/ADS1278>
14. “ADS131E08 data sheet, product information and support.” *Texas Instruments*. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/ADS131E08>
15. “MCP3912.” *Microchip Technology*. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3912>
16. “ISL26134 - Low-Noise 24-bit Delta Sigma ADC.” *Renesas*. [Online]. Available: <https://www.renesas.com/en/products/isl26134>
17. “AD7606B datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad7606b.html>
18. “ADS8598H data sheet, product information and support.” *Texas Instruments*. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/ADS8598H>
19. “MAX11046 datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/max11046.html>
20. “AD7403 datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad7403.html>
21. “AMC1306M05 data sheet, product information and support.” *Texas Instruments*. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/AMC1306M05>
22. “ADE9112 datasheet and product info.” *Analog Devices*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ade9112.html>
23. Z. Tang, R. Zamparete, Y. Furuta, T. Nezuka, and K. A. A. Makinwa, “A versatile  $\pm 25$ -A shunt-based current sensor with  $\pm 0.25\%$  gain error from  $-40$  °C to  $85$  °C,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 12, pp. 3716–3725, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/jssc.2022.3204520>
24. S. Kawahara, Y. Furuta, S. Wada, S. Taniguchi, and T. Nezuka, “A 30-n $\Omega$  accuracy low power two-step ratiometric shunt resistance measurement system using a switching regulator-based current generator for shunt-based current sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 24, pp. 40188–40195, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3393442>
25. H. Shao, R. Henriques, H. Morais, and E. Tedeschi, “Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 191, Mar. 2024, Art. no. 114094, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114094>
26. “ADE7912/ADE7913 (Rev. C). Data Sheet.” *Analog Devices*. [Online]. Available: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7912\\_7913.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7912_7913.pdf)
27. *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, IEEE Std 1459-2025, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2025.11004570>
28. “EN 55032 (CISPR 32): EMC standard for multimedia equipment.” *IB-Lenhardt AG*. [Online]. Available: <https://ib-lenhardt.com/kb/glossary/en-55032-cispr-32>
29. A. Cano-Ortega, F. Sanchez-Sutil, J. C. Hernandez, C. Gilbert-Torres, and C. R. Baier, “Calibration of a class A power quality analyser connected to the cloud in real time,” *Electronics*, vol. 13, no. 16, Aug. 2024, Art. no. 3209, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13163209>

## References

1. *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods*, IEC 61000-4-30:2015+AMD1:2021 CSV, IEC, 2021.
2. S. Jang, J. Lee, Y. Choi, D. Kim, and G. Kim, “Recent advances in ultra-high-speed wireline receivers with ADC-DSP-based equalizers,” *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*, vol. 4, pp. 290–304, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/ojsscs.2024.3506692>
3. Y. Zhou, B. Xu, and Y. Chiu, “A 12-b 1-g/s 31.5-mw time-interleaved SAR ADC with analog HPF-assisted skew calibration and randomly sampling reference ADC,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 8, pp. 2207–2218, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/jssc.2019.2915583>
4. P. Mounika, Y. G. Pu, and K.-Y. Lee, “A 1.4mw sigma delta ADC with configurable filter for sensor applications,” in *2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Paris, France, Jul. 4–7, 2023. IEEE, 2023, pp. 697–699, doi: <https://doi.org/10.1109/icufn57995.2023.10200609>
5. W. Lee and Y. Chae, “Power reduction techniques for energy-efficient audio continuous-time delta-sigma modulator,” in *2024 21st International SoC Design Conference (ISOC)*, Sapporo, Japan, Aug. 19–22, 2024. IEEE, 2024, pp. 71–72, doi: <https://doi.org/10.1109/isoc62682.2024.10762241>
6. E. Viciana, F. M. Arrabal-Campos, A. Alcalde, R. Baños, and F. G. Montoya, “All-in-one three-phase smart meter and power quality analyzer with extended IoT capabilities,” *Measurement*,

Hadžiuvana (received) 18.12.2025

UDC 621.316

**GAPON DMYTRO** – Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; e-mail: [Dmytro.Hapon@khpi.edu.ua](mailto:Dmytro.Hapon@khpi.edu.ua).

**DOMNIN IGOR** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Leading Researcher of the Institute of Ionosphere, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4403>; e-mail: [domninpro@ukr.net](mailto:domninpro@ukr.net).

**DEMIANENKO ROMAN** ✉ – Doctor of Philosophy (PhD), Senior Lecturer of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0902-2607>; e-mail: [Roman.Demianenko@khpi.edu.ua](mailto:Roman.Demianenko@khpi.edu.ua).

**SOLODOVNYK ANDRIY** – Postgraduate Student at the Department of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3196-3530>; e-mail: [Andrii.Solodovnyk@khpi.edu.ua](mailto:Andrii.Solodovnyk@khpi.edu.ua).

**SVETELIK OLEKSANDR** – Postgraduate Student at the Department of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7005-6761>; e-mail: [Oleksandr.Svetelik@khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Svetelik@khpi.edu.ua).

## MODERN HARDWARE FOR METERING AND MONITORING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY BASED ON ADE9112

The article presents the architecture of a device for measuring and monitoring electrical energy quality indicators, based on the new generation ADE9112 isolated sigma-delta analogue-to-digital converter. It is shown that the integration of galvanic isolation of signals and power supply, improved noise characteristics, support for high sampling frequencies, and reliable interfaces significantly simplify the circuitry, reduce the number of discrete components, and increase the accuracy and reliability of measurements over a wide dynamic range. A comparative analysis of the new generation ADE9112 with the previous ADE7912 solution was performed, demonstrating expanded functionality, increased speed, and an extended operating temperature range for industrial applications. The feasibility of using the ADE9112 was justified in terms of compliance with modern methods of measuring electrical energy quality in accordance with the IEC 61000-4-30 standard and electromagnetic compatibility requirements. Particular attention is paid to the issues of channel synchronisation in multiphase systems, ensuring the coordination of measurement time series and maintaining phase correspondence for accurate calculations of energy values. A typical architecture of the measuring path using ADE9112 in combination with microcontrollers is proposed, which allows both streaming data processing and integration with upper-level network interfaces. Engineering recommendations for building input circuits, anti-aliasing filtering, software configuration of sampling modes and data integrity verification are demonstrated, and approaches to ensuring electrical safety and compliance with electromagnetic compatibility requirements are presented. The results obtained confirm the feasibility of using the ADE9112 in modern electricity metering and quality monitoring systems, and serve as a basis for further improvement of hardware and software complexes in the energy sector.

**Keywords:** ADE9112; power quality measurement; sigma-delta analogue-to-digital converter ( $\Sigma$ - $\Delta$  ADC); galvanic isolation; electricity metering.