

ВСТУП

Розвиток пристроїв обчислювальної техніки, постійне їх здешевлення привели до широкого застосування засобів обчислювальної техніки та програмних методів обробки даних у найрізноманітніших галузях [76, 92, 102, 109, 110, 119, 157]. Особливо це стосується зв'язку, телекомунікації, а також інформаційно-вимірювальних і керуючих систем [150, 151]. В останній галузі чітко простежується і зворотний зв'язок – дані, що надходять з інформаційно-вимірювальних систем і вимірювальних каналів систем керування [119, 127], є одним з найважливіших джерел об'єктивної інформації для обчислювальних систем. Тому одним з найпоширеніших елементів каналів вимірювання, зв'язку, обробки сигналів став аналого-цифровий перетворювач (АЦП). АЦП забезпечує перетворення сигналів, що несуть інформацію про навколишній світ і його об'єкти в аналоговому вигляді (у багатьох випадках це сигнали різноманітних первинних перетворювачів фізичних величин – давачів, сенсорів), на відповідний код (найчастіше двійковий) [117, 157], який можна обробляти з допомогою засобів обчислювальної техніки (цифровими методами). Прикладами несистемного використання АЦП можуть бути цифрові вимірювальні прилади, пристрої звукозапису та запису зображень (з використанням цифрових пристроїв пам'яті [96, 103, 109, 112, 119, 124, 150]). Однак більшість АЦП використовуються в складі різноманітних систем – інформаційно-вимірювальних, вимірювально-керуючих, систем технічної діагностики, систем технічного зору, розпізнавання образів та інших [150, 151]. Отже, АЦП є однією з найважливіших ланок інформаційних технологій [98, 99]. Його інформаційна здатність, крім інших параметрів, характеризується також і відношенням діапазону перетворення до поточної похибки, що часто оцінюється в їх “ефективній розрядності” [105, 134, 139, 140]. При цьому діапазон перетворення повинен відповідати вхідному сигналу, тобто визначається зовнішніми відносно АЦП факторами. А поточна похибка великою мірою визначається властивостями самого АЦП.

Завдяки досягненням мікроелектроніки точність, чутливість, габарити, вартість, споживана енергія та інші технічні характеристики інформаційно-вимірювальних і керуючих систем суттєво покращилися [117, 118]. Це привело, своєю чергою, до різкого зростання кількості вимірювальних каналів [129]. Поширеними стали розподілені (дистрибутивні) вимірювальні системи, в яких обробка інформації (найчастіше первинна, але іноді й кінцева) здійснюється або в місці її виникнення, або поблизу. Такі системи значно менше навантажують канали зв'язку, мають вищу “живучість”, менші затрати на зв'язок, часто оснащені модулями безпроводного зв'язку. Також широкого розвитку набули інформаційно-вимірювальні та керуючі системи, вбудовані в технологічне обладнання. АЦП є одним з основних вузлів таких систем [96, 103, 109, 112, 119, 124, 150].

Розвиток технологій мікроелектроніки привів до випуску АЦП в мікроелектронному виконанні. При цьому, тоді як 30 років тому [37, 112] переважали

АЦП, в яких за допомогою мікроелектронних технологій на одному кристалі реалізувалися переважно окремі вузли (пристрої управління та аналогові вузли реалізувалися як окремі мікросхеми), то вже 20 років тому [4] на одному кристалі (як одна мікросхема) реалізувалися АЦП в цілому. Сьогодні відбувся поступовий перехід від випуску АЦП невисокої розрядності та середньої швидкодії до високоякісних АЦП, технічні характеристики яких перевершують відповідні параметри АЦП, виконаних на дискретних елементах. Зокрема, із прецизійних АЦП серійно випускаються 24-розрядні багатодіапазонні сигма-дельта АЦП родини AD77xx [141] фірми Analog Devices, а також 31-розрядні сигма-дельта АЦП ADS1281 [137] фірми Texas Instruments (Burr-Brown).

Крім того, сьогодні більшість мікроконтролерів, що тиражуються багатомільйонними партіями, мають вбудовані АЦП [183]. Хоча здебільшого такі вбудовані АЦП мають порівняно низькі та ненормовані метрологічні параметри (8–12 розрядів, 20 мВ напруга зміщення нуля, ненормовані похибки перетворення, температурні та часові дрейфи), деякі фірми випустили мікросхеми, оснащені прецизійними АЦП. Зокрема, Analog Devices випустила серії мікроконверторів ADuC-8xx [139], що, як повідомила фірма, спеціально проєктовані як базові вузли прецизійних вимірювальних приладів і систем та поєднують високоякісні АЦП з популярними мікроконтролерами. Частина з них мають вбудовані 24-розрядні багатодіапазонні сигма-дельта АЦП, а також інші пристрої введення-виведення як цифрових сигналів (паралельні та послідовні інтерфейси), так і аналогових сигналів – додаткові АЦП, цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), широтно-імпульсні модулятори. Крім цього, як мікроконтролери з вбудованими АЦП, так і мікроконвертори серій ADuC-8xx, мають невисоку ціну [139]. Такий стан робить мікроконвертори практично ідеальною базою для побудови вимірювально-керуючих модулів як традиційних централізованих, так і розподілених систем збору даних сенсорів температури, тиску, витрати та інших фізичних величин [120].

Оскільки результати перетворення в процесі обробки потрібні для прийняття різноманітних рішень, важливо, щоби вони адекватно відображали фізичні величини, які надходять на вхід АЦП. Така необхідна властивість АЦП тісно пов'язана з проблемою встановлення, зберігання та відтворення фізичних величин [12, 24, 88]. Тобто АЦП переважно є метрологічно значущим вузлом і повинен відповідати всім вимогам метрології [26]. Однією з фундаментальних вимог метрології є вимога єдності вимірювань, яка полягає в тому, що до результатів вимірювань ставляться додаткові вимоги. За ДСТУ 2681-94 єдність вимірювань визначається як такий стан вимірювань, за якого їхні результати виражають в узаконених одиницях і похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю [30].

Щодо АЦП вимога єдності вимірювань полягає в тому, що їх параметри, зокрема функція перетворення (ФП), повинні завжди відповідати вимогам чинних стандартів – ГОСТ 8.009-78 [21], ГОСТ 14014-94 [19], ГОСТ 30605-98 [20], ДСТУ 3744-98 [29]. Крім того, ФП АЦП має залишатися у відповідних межах під

час експлуатації, тобто дійсна ФП АЦП не повинна відхилятися від номінальної ФП більше ніж на деяке відоме значення, задане в документації на АЦП. Межі допустимого відхилення, згідно зі стандартами [19–21, 26], задаються межею основної допустимої похибки результату перетворення під час експлуатації в нормальних умовах. Якщо АЦП експлуатується в умовах, які відповідають не нормальним, а вказаним у документації робочим умовам, то допускається розширення меж допустимої похибки за рахунок нормованої межі додаткової допустимої похибки результату перетворення. Однак експлуатацію АЦП в умовах, за яких його похибка не нормується, стандарти забороняють [19–21, 26, 29]. Власне такий порядок експлуатації зумовлений необхідністю забезпечення єдності вимірювань [30]. За умови її дотримання досягається достатня метрологічна надійність засобів вимірювальної техніки, яка полягає у забезпеченні заданої ймовірності того, що межі допустимих похибок результатів перетворення АЦП не будуть перевищені [14].

Отже, метрологічна значущість АЦП полягає в тому, що показник його якості – похибка перетворення, з огляду на необхідність дотримання єдності вимірювань, повинен нормуватися та контролюватися як під час випуску з виробництва, так і під час експлуатації. Тому широкомасштабне тиражування АЦП, особливо їх використання у вбудованих системах, суперечить вимогам забезпечення єдності вимірювань та їх метрологічної надійності. До того ж під час випуску трудомісткість тестування та підлаштування мікроелектронних АЦП, за даними [118], досягає 60 % всієї трудомісткості випуску. Отже, масовий випуск АЦП загострює питання відповідного метрологічного забезпечення як під час випуску з виробництва, так і упродовж довготривалої експлуатації.

Звичайно, не всі АЦП, що входять до складу мікроконтролерів, фактично використовуються, а серед тих, що використовуються, – не всі потребують метрологічного обслуговування. Однак неможливо наперед визначити, які з випущених АЦП (серед тих, що випускаються як окремі вузли, і тих, що входять до складу мікроконтролерів) будуть використовуватися та як саме – котрі як індикатори, а котрі як складові частини пристроїв і систем, де метрологічна надійність результатів їх перетворення матиме вирішальне значення. Хоча це протиріччя існувало раніше, порівняно невеликі кількості АЦП в експлуатації та їх “наочність” (зокрема, легкість візуального виявлення під час метрологічної ревізії) значно полегшували його вирішення. Сьогодні ці суперечності значно загострилися.

Часто через складність доступу, масовість і трудомісткість проведення, наприклад, періодичної метрологічної перевірки, а також інших видів метрологічного обслуговування, цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, що входять у вбудовані вимірювально-керуючі системи автомобілів, автономних метеорологічних станцій, космічних апаратів тощо) не охоплені метрологічним наглядом. Така ситуація призводить до ймовірного порушення єдності вимірювань. Однак, якщо жорстко ставити вимоги обов’язкового проведення періодичної метрологічної перевірки всіх АЦП, то нинішні системи державної та відомчої метрологічної перевірки зовсім не

готові до масового надходження АЦП на метрологічну перевірку – їх пропускна здатність в цьому плані цілком недостатня. У результаті виникає протиріччя між трудомісткістю періодичної метрологічної перевірки великої кількості АЦП, які вже експлуатуються або будуть введені в експлуатацію найближчим часом, та забезпеченням єдності вимірювань і метрологічної надійності цих АЦП. Тому забезпечення метрологічного обслуговування великої кількості АЦП, зокрема, вбудованих у різні системи, є актуальним завданням. Однак розв'язання цього завдання автоматизацією метрологічної перевірки потребує значних капіталовкладень і є екстенсивним шляхом [78, 87].

Крім трудомісткості метрологічної перевірки з погляду органів метрологічного нагляду, істотною є трудомісткість з позиції користувачів засобів вимірювання, які містять АЦП, зокрема, користувачів інформаційно-вимірювальних і керуючих систем. Адже традиційна періодична метрологічна перевірка в процесі експлуатації потребує зупинки системи, вилучення АЦП, його доставки до лабораторії метрологічної перевірки, самої метрологічної перевірки, зворотної доставки до системи, встановлення у систему та запуску системи. Це спонукає користувачів систем ухилятися від метрологічного обслуговування, що, крім загрози втрати єдності вимірювань, загрожує також підвищенням аварійності (наприклад, якщо виходить з допуску ФП АЦП антиблокувальної системи автомобіля) та створенням небезпеки техногенних катастроф (наприклад, у разі виходу з допуску ФП АЦП на електростанції). Тому виникає ще одне протиріччя – між затратами на метрологічне обслуговування і забезпеченням єдності вимірювань та їх метрологічної надійності.

Ще одна суперечність виникає між неперервним характером багатьох сучасних технологічних процесів та необхідністю вилучення АЦП зі складу відповідної вимірювально-керуючої системи на час його періодичної метрологічної перевірки. Зупинка неперервного технологічного процесу призводить до матеріальних збитків, тому міжперевірний інтервал намагаються зробити якнайбільшим, що, своєю чергою, теж формує чергове протиріччя, адже збільшення міжперевірних інтервалів зменшує метрологічну надійність результату перетворення.

Крім того, поширення систем, у складі яких є АЦП, зумовлює протиріччя, пов'язане з кваліфікацією обслуговуючого персоналу. Сьогодні серед нього систематично збільшується частка низькокваліфікованих з погляду метрології осіб (хоча, можливо, висококваліфікованих в інших сферах знань), які не можуть правильно оцінити небезпеку, пов'язану зі зростанням похибки перетворення під час експлуатації різноманітних приладів і систем. При цьому іноді навіть розробники електронної апаратури, розробляючи АЦП або використовуючи готові рішення, не проявляють достатньої пильності, плутаючи точність з розрядністю, не враховуючи дії впливних величин [39], а головне – довіряючи параметрам, вказаним у рекламних матеріалах. Більшість фірм-виробників мікроелектронних АЦП не надають повного переліку їх параметрів (наприклад, практично жодна фірма не наводить параметрів часової стабільності своїх АЦП) і не вказують, для яких умов експлуатації ці

параметри дійсні (наприклад, вказана для АЦП родини AD77xx нелінійність ФП не більше за 0,0015 % [139] не супроводжується поясненням, чи ця нелінійність нормована для нормальних, чи для робочих умов експлуатації, чи на момент випуску з виробництва, чи на увесь час експлуатації). І навіть більше, багато фірм-виробників мікроелектронних АЦП, особливо фірми, які випускають АЦП, вбудовані в мікроконтролери, вказують мінімальний набір параметрів, який взагалі недостатній для розроблення АЦП із нормованими згідно зі стандартами [19, 20, 29] метрологічними характеристиками, а часом з цього набору параметрів навіть неможливо зрозуміти, що за АЦП містить мікроконтролер. В описі таких АЦП зазвичай основна увага приділяється їх інтерфейсу (командам керування та отримання результату перетворення), а не метрологічним (а іноді й технічним) параметрам. При цьому пристрій або систему часто проєктують спеціалісти з програмного забезпечення, які на метрологічні характеристики просто не звертають уваги [8].

Як бачимо, масовий випуск і використання АЦП привів до загострення наявних та появи нових протиріч, для усунення яких треба розв'язати низку науково-технічних задач. Однак ці задачі виявляються взаємопов'язаними, їх окреме розв'язання лише незначно покращить ситуацію, що склалася. Отже, розглянуті протиріччя формують проблему забезпечення єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах обмеження трудомісткості метрологічного обслуговування АЦП.

Як видно з викладеного, ця проблема сьогодні значно загострилася. Її вирішення має багато аспектів – наукових, технічних, економічних, організаційних тощо. Зрозуміло, насамперед потрібно вирішити наукові та технічні аспекти. Відповідно до [5, 6] спочатку сформулюємо ідеальне вирішення цієї проблеми. Чи не найкращим її вирішенням було би оснащення кожного АЦП простою та надійною вбудованою підсистемою метрологічної самоперевірки, що забезпечила би його автоматичне метрологічне обслуговування, тобто бездемонтажну періодичну метрологічну перевірку в процесі експлуатації, без необхідності зупинки системи, в яку АЦП входить. Додатковою важливою вимогою до такої підсистеми метрологічної самоперевірки є її економічна ефективність, під якою розумітимемо порівняно незначне зростання собівартості вимірювального каналу, викликане уведенням до його складу підсистеми метрологічної самоперевірки.

Підсистем метрологічної самоперевірки, які задовольняють такі вимоги, поки що немає. Відомі методи і засоби самотестування, самодіагностики та метрологічної самоперевірки АЦП мають різні недоліки, зокрема, спрямовані на перевірку правильності їх функціонування, а не на оцінку поточної похибки перетворення. Ці методи і засоби не зорієнтовані на забезпечення єдності вимірювань і не сприяють підвищенню метрологічної надійності результатів перетворення. Тому вирішенням проблеми могло б стати створення такої підсистеми метрологічної самоперевірки АЦП, яка відповідає вимогам забезпечення єдності та точності вимірювань і одночасно зменшує витрати на метрологічне обслуговування.

У цій роботі основну увагу звернемо на побудову систем метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП для вимірювальних каналів напруги постійного струму, зокрема, 24-розрядних сигма-дельта АЦП. Для побудови систем метрологічної самоперевірки АЦП нижчої точності можна використати аналогічні рішення, тим більше, що запропоновані методи метрологічної самоперевірки можна реалізувати з використанням досить простих і дешевих апаратних засобів.

У першому розділі визначено вимоги до підсистеми метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП, проаналізовано відомі методи визначення інтегральної нелінійності АЦП та окреслено перспективний напрям досліджень.

У другому розділі описано пропонуваній базовий метод визначення інтегральної нелінійності АЦП та його модифікації, проведено аналітичні дослідження складових похибок всіх модифікацій.

У третьому розділі розроблено методіку імітаційного дослідження сумарної невиключеної (залишкової) похибки визначення інтегральної нелінійності АЦП базовим методом та його модифікаціями, здійснено порівняння властивостей всіх модифікацій.

У четвертому розділі проведено імітаційні дослідження дельта-сигма модулятора та впливу параметрів його компонентів на характер похибки інтегральної нелінійності прецизійних сигма-дельта АЦП. Виконано також імітаційні дослідження сумарної невиключеної похибки корекції інтегральної нелінійності АЦП пропонуваними методами з урахуванням характеру похибки інтегральної нелінійності прецизійних сигма-дельта АЦП та аналітичні дослідження методичної похибки визначення інтегральної нелінійності АЦП пропонуваними методами.

У п'ятому розділі розроблено концепцію побудови підсистеми метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП, яка оснований на розроблених у другому та досліджених у третьому розділі методах визначення інтегральної нелінійності АЦП, методи її реалізації в складі вимірювальних каналів, що містять прецизійні АЦП з гладкою (без розривів і стрибків) ФП (зокрема, 24-розрядних багатодіапазонних сигма-дельта АЦП серій AD77xx і ADuC-8xx), а також розглянуто питання метрологічного обслуговування АЦП з вбудованою підсистемою метрологічної самоперевірки.

У шостому розділі розглянуто можливість використання АЦП з вбудованою підсистемою метрологічної самоперевірки та корекцією нелінійної складової похибки ФП АЦП для реалізації одного з найефективніших методів підвищення точності – методу заміщення, а також наведено приклади вимірювальних каналів температури на основі термометрів опору, які забезпечують високу точність вимірювання за рахунок використання методу заміщення та корекції похибок теплового походження.