

В. Скальський, Б. Оліярник, Р. Плахтій, Р. Сулим
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів,
Відділ конструкційної міцності матеріалів у робочих середовищах

АНАЛОГОВИЙ ТРАКТ ВІДБОРУ І ОБРОБКИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

© Скальський В., Оліярник Б., Плахтій Р., Сулим Р., 2005

The conception of design of analog chain of 8 channels portable device for selection and processing of acoustic emission signals is considered. The results of electrical schematic diagram designing of the analog part units of the device taking into account the modern achievements in circuit engineering and electronic facilities production are obtained.

Актуальність проблеми. Апаратурна база засобів для АЕ-досліджень відзначається широтою спектра модифікацій приладів [1–3]. Більшу частину їх становлять дорогі і великі за габаритами АЕ-комплекси та апаратура для лабораторних досліджень. Особливістю апаратури є універсальність її застосування, можливість проведення діагностики складних конструкцій, виробів та об'єктів, технологічних процесів виробництва тощо. Вона також забезпечує відбір АЕ-інформації як по одному АЕ-тракту відбору і обробки, так і по декількох каналах одночасно. Однак здебільшого апаратурні засоби вже фізично і морально застаріли. Тому актуальність проблеми апаратурного забезпечення для проведення неруйнівного контролю матеріалів та виробів, а також їх технічного діагностування полягає у забезпеченні потреб сфери сучасного виробництва портативною апаратурою, яку можна було б використовувати як контрольний або індикаторний засіб в технологічному процесі виробників, так і для контролю великогабаритних об'єктів довготривалої експлуатації.

Стан проблеми. Якщо узагальнити усі відомі у літературі розробки АЕ-засобів, то їх можна класифікувати на такі групи [2]: для комплексних досліджень, спеціалізованого призначення, для контролю стану великогабаритних об'єктів та портативні одно- і багатоканальні.

Засоби для комплексних досліджень призначені для приймання сигналів АЕ під час розвитку дефектів, що виникають у матеріалах, виробках і конструкціях. Оснащені, як правило, пристроями, що здатні виділяти сигнали на фоні шумів і завад. Вони дають змогу оцінювати різноманітні параметри АЕ-випромінювання і визначати стан контрольованого об'єкта. До такого класу приладів належать: АФ-11, АФ-15, АП-51 ЭМ, “Малахит-АЭ-1А”, АВН-3 комплексна система АП-33Э-УКД-44Э тощо.

Із АЕ-апаратури цієї групи потрібно також виокремити систему SIMS серії 3000 фірми “Dugan/Endevco” (США), модель 920 тієї самої серії, що уможливають проводити багатопараметричні дослідження сигналів АЕ під час різноманітних випробувань зразків і конструкцій. Для розв'язання різних дослідницьких завдань можуть бути використані системи серії 9500 фірми CGR (Франція), серії 7500 фірми “Trodyne” (США), а також прилад моделі 4300 фірми PAC (США).

Засоби спеціалізованого призначення розроблялись здебільшого для розв'язання конкретних задач неруйнівного контролю: для відбракування виробів під час їх механічних випробувань; для реєстрації за сигналами АЕ моменту виникнення в конструкційних машинобудівних матеріалах напружень, що відповідають фізичній межі текучості; для оцінки пластичного об'єму матеріалу; для дослідження явища корозії під напруженням; для реєстрації і аналізу сигналів АЕ під час тертя твердих тіл тощо. Серед них можна виокремити РІПТ-2А, прилад АЭРКТ-8, РИФ, “Сигнал-5”, ДСС-5АЭ, АКТ-1, АЕ-систему ДСП-5, “Эхо” тощо.

Існують спеціальні розробки приладів для контролю якості зварних з'єднань:

АРКС-3, КМС-М207, прилади серії 2200 фірми РАС (США), ИРТ-2, 4ИРДС-2 тощо.

Система “Малахит АЭ-2Б” застосовується для відбраковочного контролю виробів з лінійною локалізацією дефектів, а “Малахит-АЭ-4А” – для безперервного контролю локальних ділянок виробів. Відомі також прилади типу FRP-1 фірми РАС, призначені для реєстрації сигналів АЕ під час випробовування виробів зі склопластика і типу 6120, які здатні контролювати стан і прогнозувати термін служби підшипників ковзання. У будівельній індустрії використовується прилад ИИАЭ-ЗА для реєстрації АЕ під час визначення фізико-механічних властивостей пористих композитних матеріалів (бетонів, розчинів, керамічних виробів, порошкових матеріалів тощо).

Відомо багато АЕ приладів, призначених для контролю стану гірських масивів, стабільності виробітку, прогнозування гірничих ударів. До них відносяться, зокрема, “Прогноз-1” і “Прогноз-М”, що дають можливість здійснювати контроль напружено-деформованого стану ділянок гірських порід, оцінювати ступінь їх нестабільності.

Засоби АЕ-контролю великогабаритних об'єктів дають змогу визначати місцезнаходження дефектів, що розвиваються. Знання координат джерел АЕ уможливорює оцінювати розподіл дефектів у межах зони контролю та з урахуванням енергетичних параметрів випромінювання оцінити ступінь небезпеки пошкоджень. Такі АЕ-системи використовуються для виявлення небезпеки появи і накопичення дефектів, визначення місцеположення джерел АЕ та як системи превентивного контролю аварійних ситуацій відповідальних споруд. До приладів і систем цієї групи відносяться АЕ комплекси АФ-32, АФ-33 та АФ-34, АМУР-6, “Малахит-АЭ-5Б”, САКС, МАРС, а також “Лосамат” та “Лосараг-4” фірми CGR, система 1032 фірми “Dunegan/Endevco” та серії 3000 фірми РАС.

Системи для АЕ-контролю великогабаритних об'єктів є, як правило, багатоканальними. Кількість каналів визначає кількість первинних перетворювачів АЕ (ПАЕ), які можна об'єднувати в антени або розетки, найчастіше по чотири в кожній. За мережевого розташування ПАЕ на об'єкті контролю кількість каналів визначається схемою їх комутації. В групі багатоканальних систем можна виділити прилади для перевірки акустично не пов'язаних об'єктів. Серед них є пристрої з автоматичною комутацією каналів. Вони по черзі підключаються до загальної системи обробки сигналів. Тоді зменшується обсяг апаратного комплексу, але разом з тим втрачається частина інформації.

Щоб підвищити достовірність АЕ-контролю, розроблено системи з комутаторами, які працюють у режимі очікування. Вони дають змогу підключати АЕ-канал до системи обробки лише у разі появи на вхідному тракті сигналу АЕ або коли параметр, що реєструється, досягає певного значення. Так, в приладі “Малахит-АЭ-4А” підключення одного із восьми каналів до системи збору інформації відбувається на певному рівні активності в АЕ-тракті. Втрати інформації тоді знижуються, однак за великої активності АЕ виникає проблема вибору пріоритету кожного каналу. Подібних недоліків позбавлені системи з автономними паралельними вимірювальними трактами.

Під час перевірки стану великих об'єктів складної конфігурації, визначення координат або зон розташування джерел емісії виконується різноманітними методами. Найбільш розповсюдженими із них є метод обчислення координат шляхом проведення триангуляційних розрахунків і зонний метод визначення місця знаходження джерел АЕ. Обидва ґрунтуються на реєстрації різниці часів приходу сигналів АЕ, які прийняті групою ПАЕ. Подібні принципи реалізовані в приладах і системах: АФ-32-АФ-34, “Малахит-АЭ-5Б”, “Малахит-АЭ-6Б”, МАРС, САКС, система 1032 серії 3000 фірми РАС, апаратура модифікацій “ЕМА”, MISTRAS 2001, а також чотириканальних засобах АЕ-контролю, які мають багатфункціональне призначення [2].

У Фізико-механічному інституті НАН України розроблено низку АЕ-засобів. Серед них одноканальний прилад для реєстрації сигналів АЕ, який знайшов своє застосування у виробничих умовах машинобудівного комплексу [4]. Він може бути використаний також базовим приладом для набуття необхідних знань та практичних навичок студентами вищих учбових закладів, інженерно-технічним персоналом або науковими співробітниками під час розробки та освоєння методик відбору та реєстрації САЕ у процесі технічної діагностики виробів. Серед портативних засобів

АЕ-контролю необхідно виділити портативний накопичувач вибірок сигналів АЕ SVR-6 [5], призначений для реєстрації сигналів АЕ по 4-х каналах у лабораторних, виробничих і польових умовах обстежень об'єктів контролю та передачі записаної (накопиченої) інформації в ПК по інтерфейсу RS-232 для подальшої її обробки чи зберігання. Прилад забезпечує відбір сигналів АЕ на фоні завад за допомогою частотної та амплітудної селекції, виділення абсолютного значення максимальної амплітуди за час дискретизації, аналого-цифрове перетворення, часову прив'язку і збереження вибірок в енергонезалежному запам'ятовувальному пристрої. Для оперативного контролю наявна індикація усередненої частоти проходження вибірок, сумарної кількості їх накопичення, часу випробування та обсягу вільної пам'яті.

Модернізований портативний накопичувач вибірок сигналів АЕ СК-7 [6] забезпечує виділення, відбір, первинну обробку і збереження Flash-пам'яті сигналів АЕ, їх візуалізацію, необхідну вторинну обробку переданих інтерфейсом в персональний комп'ютер. Засоби самоконтролю приладу забезпечують тестування пам'яті, звукову індикацію її переповнення, контроль якості фіксації ПАЕ, цифрову індикацію напруги акумуляторної батареї, візуальну індикацію її розряджання та автоматичне виключення за глибокого розряду. Програмне забезпечення приладу СК-7 виконане в діалоговому режимі згідно зі стандартною технологією і працює в середовищі операційної системи Windows 95/98 і вище.

У підсумку досягнень в області апаратурного забезпечення під час проведення АЕ-досліджень, методів обробки сигналів АЕ потрібно звернути увагу на напрямок, який все більше отримує визнання у наукових дослідженнях. Йдеться про інтелектуальні системи обробки сигналів АЕ [7], які побудовані на застосуванні нейронноподібних процедур для їх аналізу. Такі процедури використовують набір певних сигналів АЕ, що розвивають пам'ять, яка далі може використовуватися для отримання інформації про невідоме джерело. Більшість використовуваних сьогодні нейронних мереж являють собою мережі із прямим зв'язком, для яких вхідні дані необхідно попередньо обробляти. Автоасоціативні мережі ефективні як під час розв'язання прямих, так і обернених задач, як лінійних, так і нелінійних. У [7] продемонстрований спосіб обробки сигналу, алгоритм програмування, що має високу швидкодію, нечутливий до шумів. Необхідно підкреслити, що не в усіх випадках застосування АЕ потрібні повні можливості нейронноподібних систем. Показані ситуації, коли детальний характер САЕ не має значення або ж оцінюється тільки один параметр.

Мета роботи – розробити аналогову частину АЕ-тракту 8-канального портативного приладу АЕ.

Результати розробки. В основу розроблення 8-канального приладу АЕ покладено отримані експериментальні результати і практичні напрацювання, а також відомі літературні дані. Концепція побудови приладу показана на рис. 1. В момент приходу сигналів, що перевищують встановлений пороговий рівень шумів за будь-яким з 8-ми каналів, починається запис їх в цифровому форматі усіма каналами з часовою прив'язкою у кожному. Сім каналів приладу оцифровують тільки огинаючу сигналу, а один – його хвильове відображення. Отримана інформація візуалізується на дисплеї персонального комп'ютера у реальному масштабі часу.

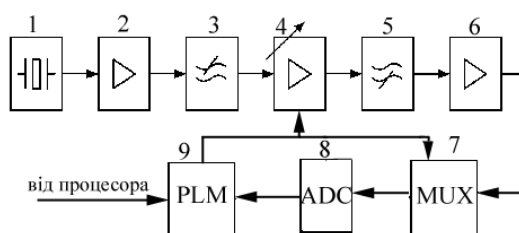


Рис. 1. Блок-схема аналогової частини приладу: 1 – ПАЕ; 2 – попередній підсилювач; 3 – фільтр низької частоти (ФНЧ); 4 – підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення; 5 – фільтр високої частоти (ФВЧ); 6 – масштабний підсилювач; 7 – комутатор; 8 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 9 – програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС)

Для підсилення електричних сигналів ПАЕ розроблено попередній підсилювач (ПП), що встановлюється безпосередньо біля ПАЕ. Він призначений для формування основної смуги пропускання та компенсації втрат сигналу у з'єднувальних кабелях (рис. 2).

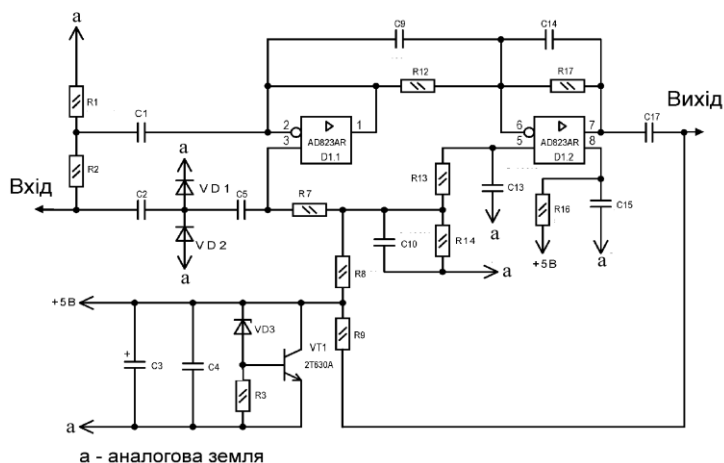


Рис. 2. Принципова електрична схема ПП

Розроблений ПП виконаний із застосуванням операційних підсилювачів (ОП) фірми “Analog Devices”. Вказані ОП відзначаються малою споживаною потужністю зі збереженням основних електричних параметрів, необхідних для роботи з сигналами малого рівня. Такі підсилювачі широко використовуються під час виготовлення активних фільтрів та попередніх підсилювачів у прецизійному обладнанні з автономним живленням та у медичній апаратурі.

Основні електричні параметри ПП

Діапазон напруг живлення.....	3...36 V
Вихідний струм.....	15 mA
Максимальна робоча частота.....	16 MHz
Температурний дрейф.....	2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Максимальний вхідний струм.....	25 pA
Вхідний опір.....	$10^{13} \Omega$
Вхідна ємність.....	1,8 pF
Рівень шумів, приведений до входу.....	10 nV $\sqrt{\text{Hz}}$

Для уникнення перевантажень вхідних каскадів ПП сигналами великих амплітуд на вході встановлено симетричний діодний обмежувач з напругою обмеження $\pm 400 \text{ mV}$. Перший каскад ПП виконаний за схемою повторювача. Як відомо, повторювач має великий вхідний та малий вихідний опори та коефіцієнт підсилення, що дорівнює 1. Він використовується для узгодження великого опору ПАЕ з входом підсилювача. Другий каскад ПП виконаний за схемою інвертуючого підсилювача з коефіцієнтом підсилення 40 dB. Конденсатори, встановлені в колах від'ємних зворотних зв'язків ОП, використовуються для частотного корегування характеристик ОП. Живлення ПП здійснюється по кабелю через вихідний роз'єм. Для частотної розв'язки корисного сигналу та постійної напруги живлення використовується джерело струму в основному блоці та блокувальний конденсатор в ПП. ОП живиться через транзисторний параметричний стабілізатор з напругою стабілізації 5 В.

Формування робочої смуги частот відбувається за допомогою ФНЧ та ФВЧ. Фільтри виконані у вигляді активних фільтрів Баттерворта 2-го порядку з комутованою частотою зрізу. Порівняно з фільтрами Чебишева, Бесселя, Кауера та Кея фільтр Баттерворта має найпоскішу

характеристику в смузі пропускання, хоча і меншу крутизну спаду до смуги зникання. Але для подальшого перетворення корисного сигналу в цифрову форму та отримання заданої точності перетворення нерівномірність характеристики в смузі пропускання виходить на перший план, оскільки досліджуваний сигнал лежить в смузі пропускання, а не на спаді характеристики. Ось чому найбільш корисним у цьому випадку є застосування фільтра Баттерворта.

Для виконання фільтра ФНЧ використовували ОП тієї самої фірми. Фільтр реалізований у вигляді неінвертуючого підсилювача напруги з коефіцієнтом підсилення 1,59. Частотну характеристику фільтра формують резистори і конденсатори, включені в коло додатного зворотного зв'язку. Для комутації частот зрізу використовується швидкодіючий комутатор фірми “Analog Devices”, який до постійно підключеного ланцюжка резисторів підключає один або два додаткових ланцюжки. Управління комутатором здійснюється за командою процесора через цифрову шину.

Фільтр ФВЧ виконаний в аналогічний спосіб. Для комутації частот зрізу комутатор до постійно підключеного ланцюжка конденсаторів підключає один або два додаткових ланцюжки. Управління комутатором є аналогічне.

Для основного підсилення корисного сигналу в смузі робочих частот використали підсилювачі з програмованим коефіцієнтом підсилення фірми “Microchip” (рис. 3). Вони не потребують зовнішньої об'язки та зворотних зв'язків. Управління коефіцієнтом підсилення відбувається програмно, командами процесора по послідовному інтерфейсу SPI. Коефіцієнт підсилення може приймати 8 фіксованих значень від 1 до 32. За послідовним інтерфейсом може бути встановлений режим енергозаощадження в час, коли підсилювач не використовується.

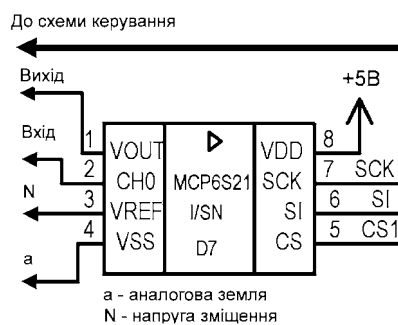


Рис. 3. Принципова електрична схема підсилювача з програмованим коефіцієнтом підсилення

Основні електричні параметри підсилювача

Програмовані коефіцієнти підсилення.....	+1,+2,+4,+5,+8,+10,+16,+32
Похибка встановленого коефіцієнта.....	±1%
Дрейф напруги на виході.....	±275 μV
Максимальна робоча частота.....	12 MHz
Рівень шумів, приведений до входу.....	10 nV/√Hz
Струм споживання.....	1 mA
Напруга живлення.....	2,5...5,5 V

У разі непрогнозованого перевищення рівня сигналу для захисту від перевантаження елементів схеми та переповнення АЦП вступає в дію масштабний підсилювач. Він виконаний за схемою інвертуючого підсилювача з коефіцієнтом підсилення 3. В коло від'ємного зворотного зв'язку ОП увімкнений симетричний діодний обмежувач. Під час досягнення входним сигналом рівня близько 0,8 V діоди починають відкриватися, відповідно коефіцієнт підсилення зменшується. За входної напруги більше 1,2 V масштабний підсилювач працює як повторювач. Далі сигнал АЕ подається на комутатор.

В приладі використано швидкодіючі комутатори фірми “Analog Devices”. Вони виготовлені за перспективною субмікронною технологією, що дало змогу істотно зменшити розміри

інтегрованих елементів та зв'язків між ними. В результаті вдалося зменшити перехідний опір комутатора та споживану потужність, а також збільшити його швидкодію. Комутатори сумісні як з ТТЛ-, так із КМОП-логікою.

АЦП використовується для перетворення вхідних аналогових сигналів кожного каналу в цифровий вигляд для подальшого збереження в пам'яті. В приладі використано швидкодіючий АЦП фірми "Analog Devices". Це паралельний 12-розрядний АЦП конвеєрного типу. Він складається з 4-х внутрішніх АЦП, кожний з яких формує свою частину розрядів. Перший внутрішній АЦП формує 4 старших розряди, які, своєю чергою, знову перетворюються в аналогову форму на цифро-аналоговому перетворювачі з внутрішнім підсилювачем і віднімаються від загального повного сигналу. Отриманий залишок ніби по конвеєру подається на наступний внутрішній АЦП, що формує чергові молодші розряди, які, своєю чергою, знову перетворюються в аналогову форму на 2-му цифро-аналоговому перетворювачі з внутрішнім підсилювачем. Отриманий сигнал знову віднімається від попереднього залишку і перетворюється в наступні молодші розряди на 3-му АЦП. Завдяки таким складним перетворенням з проміжними підсиленнями залишку одержуємо більшу точність аналого-цифрового перетворення, особливо, стосовно сигналів низького рівня. Підготовлені в такий спосіб дискрети вихідних розрядів подаються на логіку цифрового корегування, що усуває можливі неточності і через вихідні буфери видаються на вихід АЦП. Під час переповнення АЦП на спеціальному виході з'являється сигнал переповнення.

Для підвищення завадостійкості вхідний каскад АЦП виконаний у вигляді диференційного підсилювача з запам'ятовуванням сигналу. Сигнал на час дискретизації запам'ятовується на конденсаторах, а вхід АЦП відключається від загальної схеми. Отже, АЦП по черзі оцифровує сигнали з кожного каналу. Період дискретизації задається командами процесора через ПЛІС. Цифровий код, що відповідає аналоговому сигналу, з виходу АЦП через шинні формувачі надходить для запису на оперативний запам'ятовувальний пристрій (ОЗП). У приладі використано ОЗП фірми "Samsung".

Як бачимо із рис. 1, для формування сигналів управління комутатором та підсилювачами зі змінним коефіцієнтом підсилення, забезпечення запису даних в ОЗП, накопичення і доступу до них з боку мікропроцесора використовується ПЛІС. Тут використовували ПЛІС фірми "Xilinx".

Висновки. Розроблено концепцію побудови аналогового тракту 8-канального портативного АЕ-приладу, сумісного з персональним комп'ютером типу Note Book, з використанням сучасної елементної бази та схемотехнічних рішень. Створено електричні принципи схеми та відпрацьовано на макетах режими роботи основних вузлів аналогової частини приладу: попереднього підсилювача, фільтрів низької та високої частот, підсилювача із програмованим коефіцієнтом підсилення, масштабного підсилювача, комутатора аналого-цифрового перетворювача, що дає змогу істотно знизити споживану потужність та підвищити оперативність обробки необхідної АЕ-інформації.

1. Ерминсон А.Л., Муравин Г.Б., Шин В.В. Акустико-эмиссионные приборы и системы // Дефектоскопия. – 1986. – № 5. – С. 3–11. 2. Скальський В.Р., Демчина Б.Г., Карпукін І.І. Руйнування бетонів і акустична емісія (Огляд). Повідомлення 2. Корозія залізобетону. Апаратурні засоби. АЕ-контроль та діагностика будівельних споруд // Технич. діагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №2. – С.9–27. 3. Ямагучі К. Системи акустико-емісійного контролю // Хісакай кенса. – 1988. – 38, № 6. – С. 498 – 502. 4. Скальський В.Р. Прибор для регистрации сигналов акустической эмиссии СВР-4 // Технич. диагностика и неразруш. контроль. – 1995. – № 1. – С. 71–79. 5. Скальський В.Р., Пустовой В.М., Бархан А. Портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії SVR – 6 // Технич. диагностика и неразруш. контроль. – 1999. – №3. – С.35 – 46. 6. Скальський В.Р., Карпукін І.І. Модернізований портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії СК-7 // Зб. наук. праць ФМІ НАН України "Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів". – Київ – Львів, 2002. – Вип. 7. – С. 77–82. 7. Wolfgang S., Grabec I. Intelligent processing of acoustic emission signals // Mater. Eval. – 1992. – 50, №7. – P. 826 – 832.