

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

БЛОКИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

© Скальський В.Р., Оліярник Б.О., Плахтій Р.М., Сулим Р.І., 2005

Описано принципи побудови та роботи блоків цифрової обробки сигналів акустичної емісії (АЕ), що призначені для роботи в портативному варіанті приладу. Вони виконані з урахуванням тенденцій розвитку сучасної схемотехніки та із застосуванням елементної бази відомих світових виробників.

Principles are described constructions and work of blocks of the digital signal which are intended for work in the portable variant of device processing of acoustic emission .They are done taking into account the progress trends of modern circuit engineering and with application of element base of the known world producers.

Актуальність проблеми

Проблема технічного діагностування (ТД) та неруйнівного контролю (НК) великогабаритних об'єктів довготривалої експлуатації з кожним днем стає все гострішою. Це стосується відповідальних промислових об'єктів, що працюють у різних сферах життєдіяльності людини. На розв'язання вказаної проблеми спрямовані розробки нових перспективних методів і засобів для НК таких об'єктів контролю. Важливе місце тут відводиться застосуванню явища акустичної емісії.

Особливістю апаратури для АЕ-досліджень є її універсальність, що дає змогу діагностувати стан будь-яких виробів чи елементів конструкцій в реальних умовах експлуатації. Якщо систематизувати відомі у літературі розробки АЕ-апаратури, то можна їх класифікувати так [1, 2]: 1 – для комплексних досліджень; 2 – спеціалізованого призначення; 3 – для контролю стану великогабаритних об'єктів; 4 – портативні одно- і багатоканальні.

Стан проблеми

В світі відомі розробки портативних засобів АЕ-контролю, які виготовлені як в Україні [3–6], так і поза її межами [7–9]. Серед них необхідно відзначити розробки, що здійснювались у Фізико-механічному інституті НАН України [3–5]. Так, створено одноканальний прилад для реєстрації сигналів АЕ (САЕ), який застосовується у виробничих умовах машинобудівного комплексу [3]. Він може служити також базовим приладом для набуття необхідних знань та практичних навичок студентами вищих навчальних закладів, інженерно-технічним персоналом або науковими співробітниками під час розробки та освоєння методик відбору та реєстрації САЕ у ході технічної діагностики виробів. Відома розробка портативного накопичувача вибірок сигналів АЕ SVR-6 [4], що призначений для реєстрації сигналів АЕ по чотирьох 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 САЕ 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 [5] забезпечує виділення, відбір, первинну обробку сигналів і збереження у Flash-пам'яті сигналів АЕ, їх візуалізацію, необхідну вторинну обробку сигналів, переданих інтерфейсом в персональний комп'ютер. Засоби

самоконтролю приладу забезпечують тестування пам'яті, звукову індикацію її переповнення, контроль якості фіксації первинних п'єзоперетворювачів (ПАЕ), цифрову індикацію напруги акумуляторної батареї, візуальну індикацію її розрядження та автоматичне вимкнення 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 галузі апаратного забезпечення під час АЕ-діагностування [10], методів обробки сигналів АЕ, отриманих під час НК об'єктів контролю, потрібно привернути увагу на напрямок, який отримує все більше визнання у наукових дослідженнях. Йдеться про інтелектуальні системи обробки сигналів АЕ [11], котрі побудовані на застосуванні нейроподібних процедур для їх аналізу. Такі процедури використовують набір певних сигналів АЕ, що навчають розвиток пам'яті, яка надалі 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 [11] продемонстрований спосіб обробки сигналу, алгоритм програмування, що має високу швидкість, нечутливий до шумів. Необхідно підкреслити, що не у всіх випадках застосування АЕ потрібні повні можливості нейроподібних систем. Показані ситуації, коли детальний характер САЕ не має значення або ж оцінюється всього один параметр.

Мета роботи – розробити та практично реалізувати схеми електричні принципи блоків цифрової обробки сигналів АЕ портативного багатоканального приладу на базі переносного комп'ютера типу Note Book.

Концепція побудови приладу

В основу розроблення цифрових вузлів обробки сигналів АЕ покладено отримані експериментальні результати і практичні напрацювання, а також відомі літературні дані. Концепція побудови приладу показана на рис. 1.

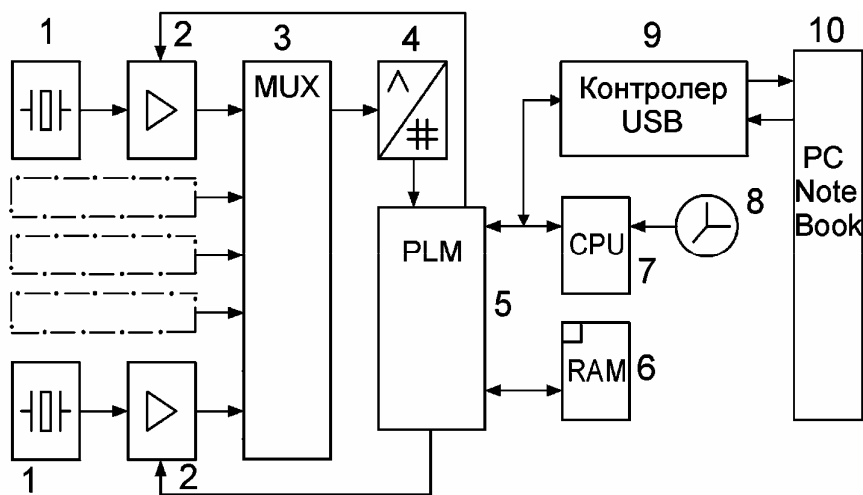


Рис. 1. Блок-схема портативного багатоканального приладу АЕ: 1 – первинний п'єзоперетворювач сигналів АЕ; 2 – аналоговий тракт каналу; 3 – комутатор; 4 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 5 – програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС); 6 – оперативний запам'ятовувальний пристрій (ОЗП); 7 – мікроконтролер; 8 – годинник; 9 – контролер USB; 10 – ПК типу note book

Портативний прилад відбору, реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії призначений для використання під час неруйнівного контролю (НК) матеріалів, виробів та конструкцій різної форми та функціонального призначення. Приладом забезпечується виділення, реєстрація та попередня обробка сигналів АЕ з подальшим збереженням їх в пам'яті ПК типу Note Book для

необхідної обробки отриманих даних, їх візуалізації в реальному масштабі часу тощо. За допомогою відповідного програмного забезпечення передбачається визначати координати місця знаходження джерел САЕ з графічним їх відображенням на дисплеї комп'ютера у співвідношенні зі зображенням розгортки об'єкта контролю і відтворення хвильового відображення події АЕ. Приладом реєструються такі характеристики САЕ: хвильове відображення сигналу, амплітуда огинаючої, сумарний рахунок, сума амплітуд огинаючої, швидкість підрахунку, час наростання переднього фронту імпульсу, його тривалість тощо.

У момент надходження САЕ, що перевищує встановлений пороговий рівень шумів, по будь-якому з аналогових каналів, починається запис сигналів АЕ в цифровому форматі на всіх каналах з часовою прив'язкою у кожному. Отримана інформація візуалізується на дисплеї ПК у реальному масштабі часу і зберігається на жорсткому диску.

Виконання основних вузлів цифрової обробки САЕ

Комутатори. Сигнал АЕ, виділений і підсилений в аналоговому тракті, подається на чотиріканальний комутатор (рис. 2). Залежно від кількості аналогових каналів застосовують різну кількість комутаторів. На вхід комутатора подають сигнали з кожного аналогового каналу, а виходи під'єднані до АЦП. За командою процесора один із входів комутатора по черзі під'єднується до входу АЦП. Команди на комутатор подаються по цифровій шині від програмованої інтегральної схеми.

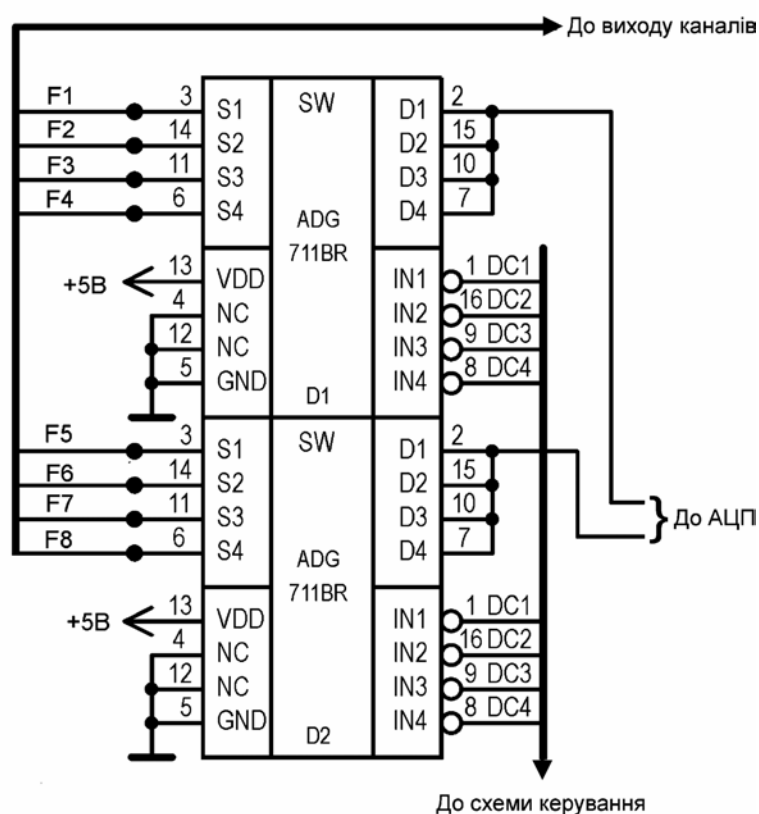


Рис. 2. Принципова електрична схема комутаторів

У 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. Комутатор сумісний як з ТТЛ, так із КМОП-логікою.

Основні електричні параметри комутатора

Максимальна робоча частота.....	200 MHz
Час вмикання	16 ns
Час вимикання.....	10 ns
Перехідний опір у ввімкненому стані.....	до 5 Ω
Напруга живлення.....	1,8...5,5 V

Аналого-цифровий перетворювач. АЦП служить для перетворення вхідних аналогових сигналів кожного каналу в цифровий вигляд для подальшої обробки та збереження в пам'яті. У приладі використано швидкодіючий АЦП фірми “Analog Devices”. Це паралельний дванадцятирозрядний АЦП конвеєрного типу. Архітектура його побудови наведена на рис. 3.

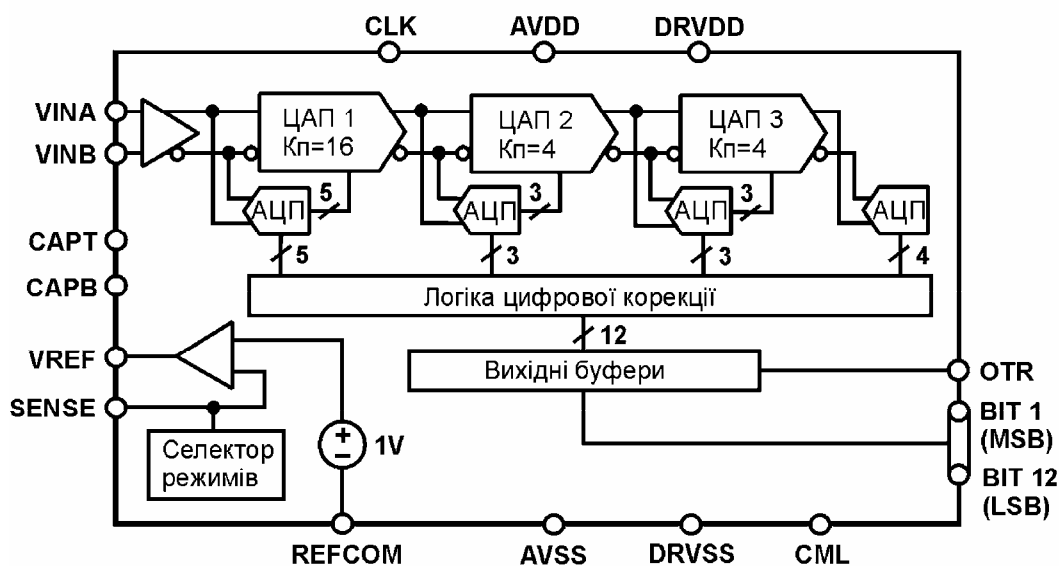


Рис. 3. Архітектура побудови АЦП: VINA – інвертувальний аналоговий вхід; VINB – неінвертувальний аналоговий вхід; CAPT, CAPB – вивід корекції шумів, VREF – опорна напруга; SENSE – вивід вибору опорної напруги; REFCOM – земля опорної напруги, AVSS – аналогова земля; DRVSS – земля цифрової частини; CML – середня точка синфазного сигналу; BIT 1 (MSB) – молодший цифровий розряд даних; BIT 12 (LSB) – старший цифровий розряд даних; OTR – індикація переповнення; DRVDD – живлення цифрової частини; AVDD – живлення аналогової частини; CLK – тактовий вхід

Він складається з чотирьох внутрішніх АЦП, кожен з яких формує свою частину розрядів. Перший внутрішній АЦП формує чотири старші розряди, які, своєю чергою, знову перетворюються в аналогову форму на цифроаналоговому перетворювачеві (ЦАП) 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 другому ЦАП з внутрішнім підсилювачем. Отриманий сигнал знову віднімається від попереднього залишку і перетворюється в наступні молодші розряди на третьому АЦП. Завдяки таким складним перетворенням з проміжними підсиленнями залишку одержуємо більшу точність аналого-цифрового перетворення, особливо стосовно сигналів низького рівня. Підготовані у такий спосіб дискретні вихідні розряди подаються на логіку цифрової корекції, що усуває можливі неточності і через вихідні буфери видаються на вихід АЦП. За переповнення АЦП на спеціальному виході з'являється сигнал переповнення.

Для підвищення завадостійкості вхідний каскад АЦП виконаний у вигляді диференційного підсилювача із 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

Програмована логічна інтегральна схема. Для формування сигналів управління аналоговим трактом, комутатором та забезпечення запису даних в ОЗП, накопичення і доступу до них зі сторони мікропроцесора служить ПЛІС (рис. 4).

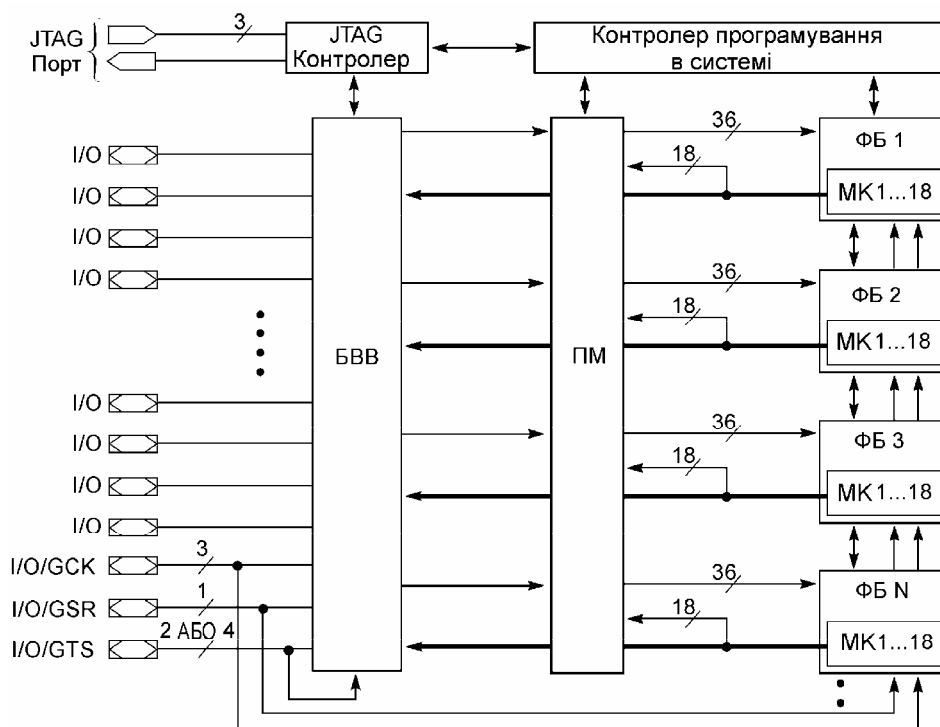


Рис. 4. Архітектура побудови ПЛІС: I/O – вивід вхід/вихід; GSK – глобальні сигнали тактування; GSR – глобальні сигнали встановлення/скидання; GTS – глобальні сигнали керування третім станом

Тут використовується ПЛІС фірми “Xilinx”. Мікросхеми цього типу застосовують для створення нестандартних арифметико-логічних пристроїв, дешифраторів, мультиплексорів тощо. Мікросхема являє собою підсистему, що складається з восьми функціональних блоків (ФБ), блока вводу-виводу (БВВ), з'єднаних перемикальною матрицею (ПМ). БВВ забезпечує буферизацію всіх входів і виходів мікросхеми (МС). Кожний ФБ складається з 18-ти макрокомірок (МК) зі структурою 36V1 і дає змогу одержати 18 логічних функцій практично від будь-якої комбінації з 36 змінних. ПМ забезпечує подання будь-яких вихідних сигналів ФБ і вхідних сигналів на входи ФБ. Від 12 до 18 вихідних сигналів кожного ФБ (залежно від кількості виводів у корпусі) і відповідні сигнали дозволу виходу подаються безпосередньо на БВВ.

Кожна МК мікросхеми може виконувати як логічну комбінаторну, так і реєстрову функції. МК має п'ять основні і чотири додаткові входи. Запам'ятовуючий елемент в МК може бути сконфігурований як D-тригер або як тактований тригер-защипка, або ж може не використовуватися. Під час ввімкнення МС всі реєстри переводять в початковий стан, запрограмований користувачем. Якщо початковий стан не заданий, то реєстри встановлюються в нуль. Крім того, на кожен МК надходять ще чотири глобальні керуючі сигнали (три тактові і один сигнал встановлення/скидання), які можуть бути використані для керування роботою тригера. Глобальні керуючі сигнали надходять безпосередньо з керуючих виводів МС.

БВВ виконує функцію інтерфейсу між внутрішніми логічними сигналами та контактами МС. Він може працювати з сигналами, що мають стандартні КМОП або ТТЛ рівні. У мікросхемі є можливість керування тривалістю фронту вихідного сигналу для кожного вихідного буфера, що дає змогу, за необхідності, зменшити рівень перешкод на виходах МС за рахунок незначного зменшення швидкодії.

ПЛІС, яка використана у цій розробці, має архітектурні особливості, що дають змогу вносити зміни в схему, не змінюючи призначення виводів. Це дає розробнику впевненість в тому, що призначення вхідних та вихідних контактів залишиться незмінним за будь-яких непередбачених змін принципової схеми і здійснити розробку друкованої плати. МС програмується в системі через стандартний JTAG-інтерфейс. Таке програмування дає змогу швидко і ефективно вносити зміни в проект і тоді немає необхідності виймати мікросхему з розроблюваного пристрою.

У ПЛІС використовуються передові методи, що забезпечують повний захист схеми від несанкціонованого зчитування і випадкового стирання. Захист від зчитування (код секретності) встановлює користувач, щоб виключити можливість зчитування чи копіювання схеми. Код секретності може бути відмінений тільки за повного стирання пам'яті МС.

МС забезпечує можливість встановлення режиму економічного енергоспоживання не тільки для всієї схеми, але й для вибраних користувачем МК, що дає змогу істотно знизити енергоспоживання МС загалом.

Основні технічні параметри

Затримка сигналу від входу до виходу по всіх виводах.....	10 ns
Частота роботи 16-ти розрядного лічильника.....	125 MHz
Кількість макрокомірок.....	144
Кількість вентилів.....	3200
Кількість тригерів.....	144
Вихідний струм.....	24 mA
Мінімальна кількість циклів програмування.....	10000
Час зберігання записаної конфігурації.....	не менше від 20-ти років

Мікроконтролер. Роботою приладу керує восьмирозрядний високопродуктивний мікроконтролер фірми "Atmel". Він забезпечує синхронізацію роботи всієї системи, прийом команд від персонального комп'ютера, обробку і видачу сигналів управління для вузлів пристрою, формує кадри передавання даних і доповнює їх часом виникнення події. Розвинена архітектура процесора дає змогу підтримувати 133 потужні інструкції. До складу мікроконтролера входять 32 регістри загального призначення що безпосередньо приєднані до арифметично-логічного пристрою (АЛП). Система команд процесора уможливить одночасний доступ до двох незалежних регістрів, що істотно збільшує його продуктивність. Внутрішня архітектура процесора наведена на рис. 5.

Основні технічні параметри мікроконтролера:

- внутрішня перепрограмувана пам'ять для програм об'ємом 128 kb;
- внутрішній енергонезалежний перепрограмуваний пристрій (ЕППЗП) об'ємом 4 kb;
- внутрішній оперативний запам'ятовувальний пристрій об'ємом 4 kb;
- 53 входи/виходи загального призначення;
- 32 регістри загального призначення;
- лічильник реального часу;
- 4 гнучкі таймери/лічильники з методами порівняння;
- двопровідний байторієнтований послідовний інтерфейс;
- восьмиканальний АЦП на 10 розрядів з диференційним входом і програмованим підсиленням;
- програмований таймер з внутрішнім генератором;
- послідовний серійний інтерфейс (SPI) для системного програмування;
- тестовий інтерфейс (JTAG) що забезпечує доступ до систем відлагодження та системного програмування;
- шість режимів енергозбереження, що встановлюються програмно;
- тактова частота, що встановлюється програмно;
- напруга живлення 4,5—5,5 В;
- продуктивність 16 млн. операцій/с.

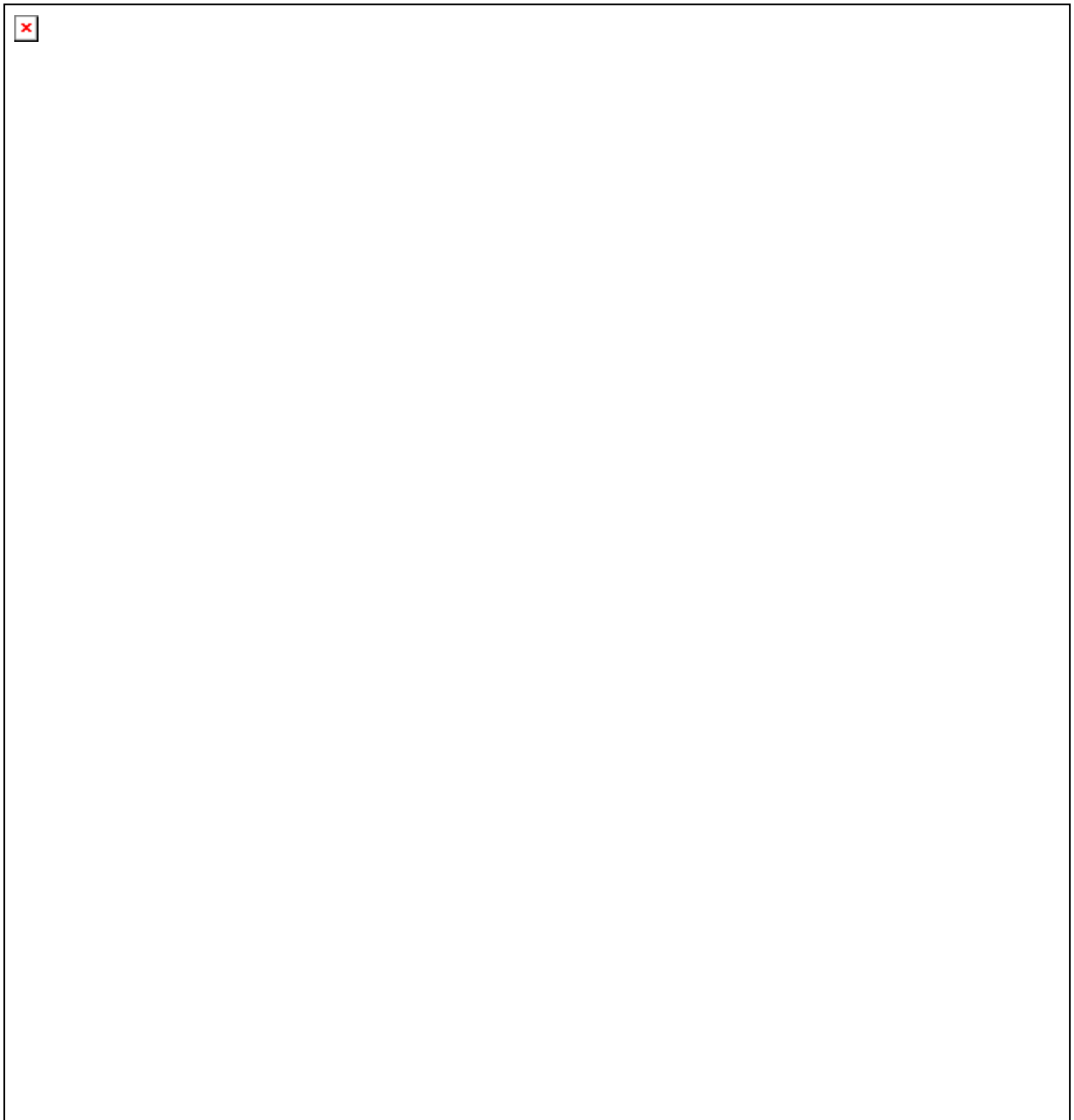


Рис. 5. Внутрішня архітектура мікроконтролера

Годинник реального часу. Для фіксації дати і часу виникнення події в приладі використовують годинник фірми “Maxim”. Це годинник реального часу, що підраховує секунди, хвилини, години, день місяця, місяць, день тижня і рік з корекцією високосного року. Корекція дійсна до 2100 року.

Основні технічні параметри

- об’єм ОЗП з акумуляторним живленням для зберігання даних – 96 байт;
- можливість видання двічі на день програмованого сигналу будильника;
- виходи годинника з частотами 1 Hz і 32,768 kHz;
- підтримує послідовний серійний інтерфейс (SPI);
- монопольний режим для читання;
- резервування основного живлення мікросхеми;

- напруга живлення 2...5,5 V;
- мікросхема забезпечує автоматичну корекцію календаря, якщо кількість днів місяця менша за 31;
- годинник працює як в 12-, так і в 24-годинному форматі.

Принципова електрична схема годинника наведена на рис. 6.

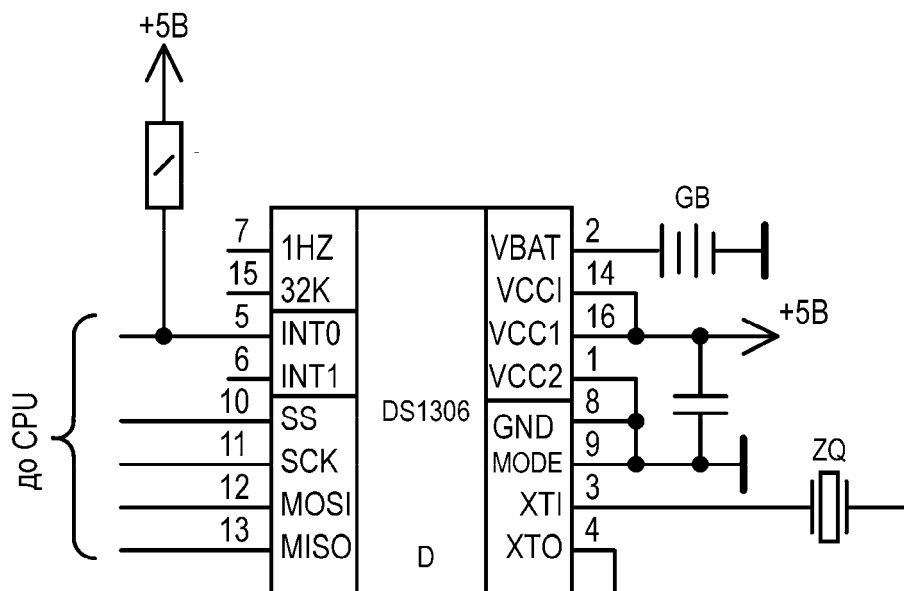


Рис. 6. Принципова електрична схема годинника реального часу

Контролер USB. Для організації обміну даними з персональним комп'ютером використовується мікросхема контролера і прийомо-передавача послідовного серійного інтерфейсу USB фірми "FTDI". Вказана мікросхема забезпечує перетворення даних паралельного порту приладу в послідовні дані для передавання через порт USB на персональний комп'ютер і навпаки. Завдяки використанню помножувача тактової частоти вдалося значно підвищити швидкість обміну даними. Принципова електрична схема контролера та прийомо-передавача послідовного серійного інтерфейсу USB наведена на рис. 7.

Основні технічні параметри

- Тактова частота.....6 MHz
- Швидкість обміну даними.....12 Mbit/s
- Підтримка програмного забезпечення.....Windows 98/98 SE/2000/ME/XP
- Напруга живлення.....4,35–5,25 V

Всі дані заносять на жорсткий диск персонального комп'ютера типу Note Book, де відбувається їх аналіз і обробка. За допомогою комп'ютера здійснюється керування приладом. З нього може встановлюватися кількість каналів обробки події, час дискретизації сигналів, задаватись необхідне підсилення каналів, поріг рівня шуму і смуга пропускання.

Живлення приладу здійснюється напругою +5В, що подається через роз'єм порта USB персонального комп'ютера Note Book. Конструктивне виконання – у вигляді ПК Note Book із вмонтованою монтажною платою або на окремому піддоні, що приєднується до ПК.

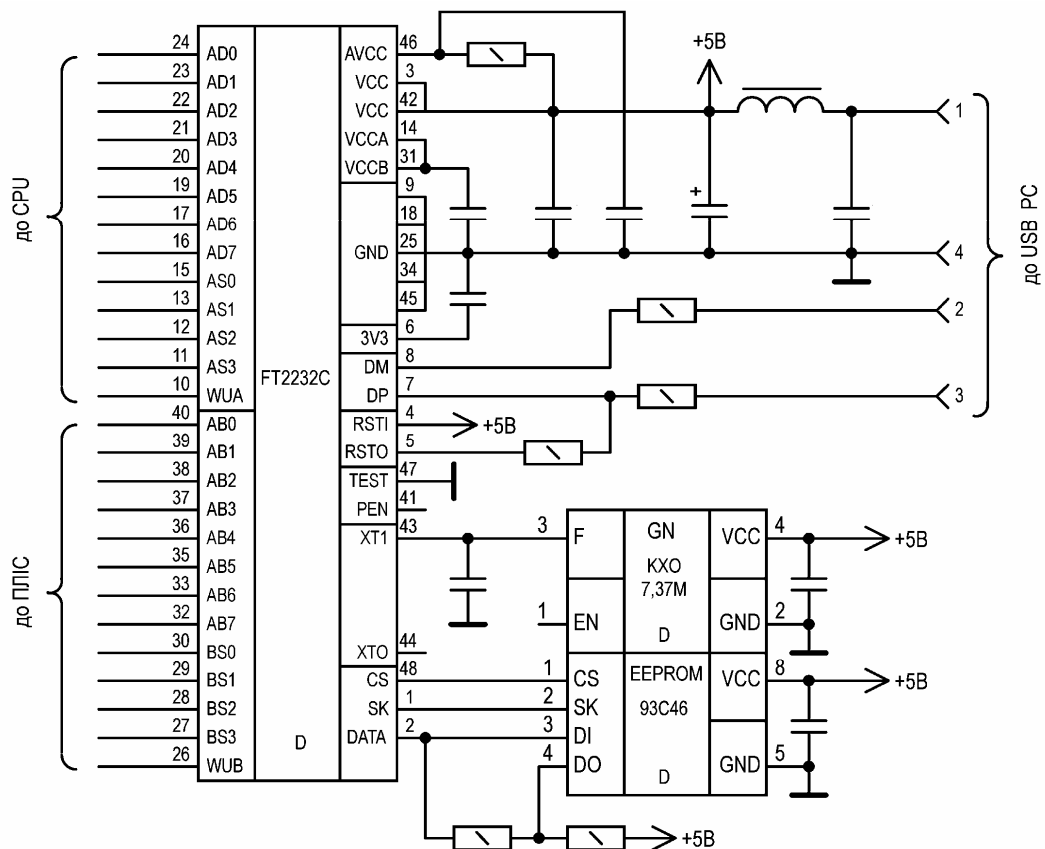


Рис. 7. Принципова електрична схема контролера і прийомо-передавача інтерфейсу USB

Висновки. Розроблено концепцію побудови основних цифрових вузлів портативного АЕ-приладу, сумісного з персональним комп'ютером типу Note Book з використанням сучасної елементної бази та схемотехнічних рішень. Відпрацьовано на макетах основні функціональні вузли цифрової обробки сигналу АЕ та передачі отриманих даних для збереження та подальшої обробки на ПК.

Технічні характеристики блоків цифрової обробки САЕ відповідають сучасним світовим аналогам. Цю розробку разом з відповідним аналоговим трактом можна без особливих капіталовкладень запровадити у серійне виробництво, що дасть змогу підвищити ефективність діагностування виробів і споруд.

1. Скальський В. Р., Демчина Б. Г., Карпунін 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. 2. Ерминсон А. Л., Муравин Г. Б., Шин В. В. Акустико-емиссионные приборы и системы // *Дефектоскопия*. – 1986. – № 5. – С. 3–11. 3. Скальський В. Р. Прибор для регистрации сигналов акустической эмиссии СВР-4 // *Технич. диагностика и неразруш. контроль*. – 1995. – № 1. – С. 71–79. 4. Скальський В. Р., Пустовой В. М., Бархан А. Портативний накопичувач виборок сигналів акустичної емісії SVR – 6. // *Технич. диагностика и неразруш. контроль*. – 1999. – №3. – С.35–46. 5. Скальський В.Р., Карпунін І.І. Модернізований портативний накопичувач виборок 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. 6. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. – К., 1999. 7. MISTRAS 2001. AEDSP-32/16. User's manual. – Rev. 1. PAC Part Number 6300-1000. – 1995. – 300 p. 8. Ямагучі К. Системи акустико-емісійного контролю // *Хіхакай кенса*. – 1988. – 38. – № 6. – С. 498–502. 9. CGR Locamat: Multichannel acoustic emission source localization system / *Prospect of Corporation CGR*. – Paris, 1982. – 12 p. 10. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – К., 2003. 11. Wolfgang S., Grabec I. Intelligent processing of acoustic emission signals // *Mater. Eval*. – 1992. – 50. – №7. – P. 826–832.