

12. Поплавская, Т. В. Интерференционный метод управления развитием возмущений в ударном слое на пластине [Текст]: межд. конф. / Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский, А. А. Маслов, С. Г. Миронов, И. С. Цырюльников // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика, 2011. – С. 306–311.
13. Терещенко, Ю. М. Моделирование течения на пластине с турбулизатором [Текст] / Ю. М. Терещенко, И. А. Ластивка, Л. Г. Волянская, Е. В. Дорошенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 5. № 8 (53). – С. 56–58. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1280/1181>
14. Бородулин, В. И. Универсальный механизм порождения пристенной турбулентности и детерминированная турбулентность [Текст] / В. И. Бородулин, Ю. С. Качанов // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – С. 653–655.
15. Корнилов, В. И. Влияние вертикальных устройств разрушения вихрей на аэродинамическое сопротивление плоской пластины [Текст] / В. И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 269–279.
16. Szwaba, R. Shock wave – boundary layer interaction control by air-jet streamwise vortices [Text] / R. Szwaba, P. Flaszynski, J. Szumski, J. Telega // 8th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows Lyon, 2007.
17. Kirilovskiy, S. Study of flow control by localized volume heating in hypersonic boundary layers [Text] / S. Kirilovskiy, P. Polivanov, A. Sidorenko, A. Maslov // CEAS Space Journal. – 2014. – Vol. 6, Issue 3-4. – P. 119–132. doi: 10.1007/s12567-014-0064-y
18. Ingard, U. On the theory and design of acoustic resonators [Text] / U. Ingard // J. Acoustic Soc. Am. 1953. – V. 25 (6). – P. 1037 – 1061.
19. Tijdeman, H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes [Text] / H. Tijdeman // Journal of Sound and Vibration. – 1974. – Vol. 39, Issue 1. – P. 1–33. doi: 10.1016/s0022-460x(75)80206-9
20. Zwikker, C. Sound Absorbing Materials [Text] / C. Zwikker, C. W. Kosten. – Amsterdam, NY, Elsevier, 1949. – Chaps 1-2.
21. Karal, F. C. The analogous acoustical impedance for discontinuities and constrictions of circular cross section [Text] / F. S. Karal // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1953. – Vol. 25, Issue 2. – P. 327–334. doi: 10.1121/1.1907041
22. Ingard, U. Notes On Duct Attenuators (N4) [Text] / U. Ingard. – Self-published, Kittery Point, NE, 1999.
23. Paiva, R. The helmholtz resonator tree [Text] / R. Paiva, V. Valimaki // Proc. of the 15th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-12), York, UK, 2012.

В роботі наведено результати розробки центрального модуля обробки і передачі даних програмно-апаратного комплексу для комп'ютеризації навчального експерименту. Представлено методичку розрахунків аналого-цифрового входного тракту системи. Розроблена система може використовуватись в навчальному експерименті і для розширення можливостей більш дорогого наукового обладнання

Ключові слова: комп'ютеризація, автоматизація, вимірювання, аналого-цифровий перетворювач, датчик, віддалена взаємодія, експеримент

В работе приведены результаты разработки центрального модуля обработки и передачи данных программно-апаратного комплекса для компьютеризации учебного эксперимента. Представлена методика расчетов аналого-цифрового входного тракта системы. Разработанная система может быть успешно использована как в учебном эксперименте, так и для расширения возможностей научного оборудования

Ключевые слова: компьютеризация, автоматизация, измерение, аналого-цифровой преобразователь, датчик, удаленное взаимодействие, эксперимент

УДК 004.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47797

РОЗРОБКА СХЕМИ ПРОГРАМНО- АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Р. Ю. Лопаткін

Кандидат фізико-математичних наук,
доцент, завідувачий*

E-mail: lopatkin@iap.sumy.org

С. М. Ігнатенко

Науковий співробітник

E-mail: mynameissergey@gmail.com

*Науково-дослідний центр

навчально-наукових приладів

Інститут прикладної фізики НАН України

вул. Петропавлівська, 58, м. Суми, Україна, 40000

1. Вступ

Навчальний експеримент в навчальному процесі є основою вивчення природничих наук. Комп'юте-

ризація експерименту розширює обізнаність учнів з досліджуванним фізичним явищем, формує навички і надає їм впевненості під час використання сучасних експериментальних методів, ознайомлює з передови-

ми засобами пізнання, видами контролю за технологічними процесами на виробництві, дає змогу по-новому розглядати методику постановки навчального експерименту.

Ринок засобів комп'ютеризації і автоматизації експериментальних установок для навчальних і дослідних лабораторій постійно вимагає нових науково-технічних рішень, які побудовані на сучасній технологічній базі і відповідають рівню розвитку суспільства. Подібні системи складаються з аналогових сенсорів, аналого-цифрового перетворювача сигналу, засобів комутації з комп'ютером користувача і безпосередньо програмного забезпечення, яке відображає в встановленому форматі отримані експериментальні дані. Часто функції аналого-цифрового перетворювача виконує центральний модуль системи, який виконує комутацію, попередні розрахунки, керування модулями виконання якщо передбачено зворотній зв'язок, візуалізацію т. і. Тому розробка центрального модуля зазвичай починається з розрахунку вхідного аналогово-цифрового тракту, що дозволяє заздалегідь забезпечити задекларовані в технічному завданні параметри.

2. Аналіз останніх досліджень публікацій

За останні роки цифрові лабораторії в школах стали звичними і необхідними, а також могутнім інструмент для проведення демонстраційних дослідів, що дозволяє кожному, хто вчиться, стати співучасником демонстрації вчителя [1, 2].

Спеціальні системи або цифрові лабораторії, що призначені для використання в навчальному експерименті, виробляються досить багатьма відомими іноземними фірмами. Серед них провідне місце посідають Nova5000 (Fourier Systems Ltd., Ізраїль) [3], Xplorer GLX (Pasco Inc., США) [4], Cobra4 (Phywe GmbH, Німеччина) [5].

Вимірювальна система Nova5000 являє собою мобільний персональний комп'ютер з досить малими обчислювальними ресурсами, який неможливо модернізувати до сучасного технологічного рівня. Також Nova5000 орієнтована на індивідуальне використання. Точність вимірювання напруги $\pm 3\%$.

Xplorer GLX являє собою портативний графічний реєстратор даних. Він підходить для збору та аналізу даних в режимі реального часу, навіть без комп'ютера. Включає в себе 2 датчика температури, датчик напруги, вбудований динамік і звуковий датчик, а також дозволяє підключити до 4 додаткових датчиків. При необхідності його можна підключити до комп'ютера, передати на нього всі дані і проводити аналіз за допомогою ПЗ PASCO Capstone. Індивідуальне використання.

Cobra4 являє собою комп'ютерний інтерфейс. Основними перевагами якого є бездротові датчики, методичні вказівки до експериментів, але на англійській та німецькій мовах. В комплект входять програмне забезпечення, модулі інтерфейсу і датчики. Наші інтерфейси тематичної спрямованості відкривають нові можливості в навчанні.

Всі перелічені цифрові лабораторії будуються за принципом сенсорі-перетворювач-комп'ютер-користувач і передбачають індивідуальну роботу учня з кон-

кретною експериментальною установкою. Головними недоліками перелічених цифрових лабораторій є їхня вартість (>500 \$), відсутність україномовного інтерфейсу та методик, можливості проведення дистанційного та демонстраційного експериментів.

Окрім спеціалізованих систем є системи для промислової автоматизації [6–8], які є дорогими, потребують додаткового обладнання для узгодження сигналів з датчиків, громіздкі, потребують специфічних знань від експериментатора.

Розроблена програмно-апаратна платформа [9] частково перекидає вищеописані недоліки, такі як ціна, потреба в специфічних знаннях, створення додаткового обладнання, але й створює нові – безпосередній зв'язок експериментальної установки з комп'ютером і мережею живлення, необхідність розташування комп'ютера якомога ближче до експериментальної установки через технічні вимоги на інтерфейси зв'язку, неможливість отримання колективного доступу до експериментальної установки без специфічного програмного забезпечення.

Таким чином, актуальним є розробка вітчизняного сучасного програмно-апаратного комплексу (ПАК) для комп'ютеризації навчального експерименту з мінімальними витратами ресурсів, побудованого на принципі модульності і мережевих технологіях передачі даних.

3. Цілі та задачі дослідження

Метою роботи є розробка схеми та розрахунки аналогово-цифрового вхідного тракту системи. Основними критеріями при цьому мають бути: ціна, надійність, доступність комплектуючих, простота використання та характеристики не гірші аналогічних систем.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Розробка структурної схеми аналого-цифрового вхідного тракту.
2. Розрахунки параметрів комплектуючих аналогово-цифрового вхідного тракту для досягнення наступних характеристик:
 - кількість каналів вимірювання – 4(8);
 - швидкість обробки даних – не менше 2000 вимірювань за секунду;
 - точність вимірювання – до 1 %;
 - захищеність вхідного тракту при виході вхідного сигналу за діапазон вимірювання.

4. Розробка структурної схеми та розрахунок вхідного тракту

4. 1. Розробка структурної схеми вимірювального комплексу

У будь-якому вимірювальному приладі відбувається обробка інформації, в результаті якої вхідному сигналу $x(t)$ або сукупності вхідних сигналів ставиться відповідність число Y – результат вимірювань.

У цифрових вимірювальних приладах деякі або всі операції (виключаючи операцію масштабування або нормування вхідного сигналу) виконуються в дискретній формі. Для цього досліджуваний сигнал на

тому чи іншому етапі за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) перетворюють в коди, які потім піддаються цифровій обробці. Однак деякі операції можуть виконуватися на аналогових елементах. Таким чином, в тракці цифрового вимірювального приладу здійснюється в загальному випадку аналого-цифрова обробка сигналів.

Згідно з визначенням по ГОСТ 16263 – 70, цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) характеризуються двома особливостями: наявністю аналого-цифрового перетворення сигналів і цифрового відображення результату вимірювання. Технічно зазначені операції реалізуються за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і блоку реєстрації з цифровим відліковим пристроєм, який служить для представлення результату вимірювання в цифровій формі, зручній для візуального відліку, а також при необхідності – і для реєстрації. У складі ЦВП є також вхідні аналогові перетворювачі – вхідні пристрої (ВП): прості – масштабні (подільники, підсилювачі) і складні – функціональні (перетворювачі змінної напруги, потужності в постійну напругу, струму в напругу, неелектричних величин в електричні і т. д.). В прилади з цифровою обробкою інформації, як правило, входять арифметичні пристрої (АП) для виконання обчислювальних операцій. Роботу всіх вузлів синхронізує блок керування (БК). Структурна схема ЦВП, яка є в основі всіх відомих аналогів зображена на рис. 1, а, структурна схема адаптованого ЦВП – на рис. 1, б.

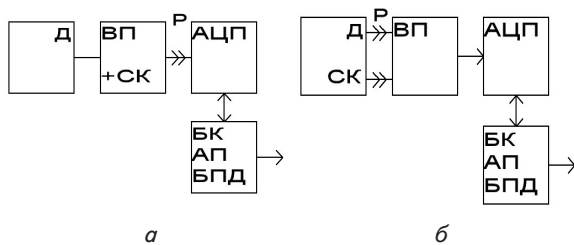


Рис. 1. Структурні схеми: а – ЦВП; б – адаптованого ЦВП

Розглянемо роботу ЦВП наведеного на рис. 1, а. Датчики фізичних величин складаються з сенсора (Д) і вхідного перетворювача (ВП). У всіх відомих аналогів функцію ВП виконує операційний або інструментальний підсилювач. Всі регулювання проводяться в самому датчику і зводяться до нормалізації вихідного сигналу (СК) до певного вихідного діапазону напруги (0..5 В у всіх відомих аналогів). Після нормалізації сигнал через роз'єм (Р) надходить до АЦП, обробляється арифметичним перетворювачем (АП) та передається на пристрій візуалізації через блок передачі даних (БПД). Всіма процесами керує блоком керування (БК). При даній структурі кожен датчик повинен мати вхідний перетворювач для нормалізації сигналу. Кожен датчик повинен бути налаштований за допомогою допоміжного обладнання.

Розглянемо схему адаптованого ЦВП зображену на рис. 1, б. На відміну від попередньої схеми в складі датчику не міститься операційний підсилювач.

Зокрема, датчик складається з сенсора (Д) та систем корекції (СК) роботи інструментального підсилювача (ВП), який знаходиться в базовому блоці вимірювального комплексу. Сигнали з Д і СК через роз'єм (Р)

надходять до інструментального підсилювача (ВП) з якого до АЦП та системи обробки даних. Завдяки тому, що використовується високоякісний інструментальний підсилювач, потрібно зробити налаштування лише базового блоку ПАК.

Побудова аналогової частини ПАК за схемою наведеною на рис. 1, б має свої переваги та недоліки, які досить тяжко згрупувати за критеріями. Наприклад візьмемо критерій собівартості для пристрою з чотирма аналоговими каналами та набором з 15 датчиків. При використанні стандартного підходу необхідно застосувати мінімум по одному операційному (інструментальному) підсилювачі в кожному з 15-ти датчиків замість чотирьох більш якісних інструментальних підсилювачів в кожному з каналів вимірювання. В кожному з датчиків при стандартному підході повинні бути схеми фільтрації напруги живлення, еталонної напруги, схеми корекцій, які в більшості датчиків можливо виділити при використанні адаптованого ЦВП.

Якщо взяти за критерії точність, надійність, якість, то використавши високоякісний роз'єм в адаптованому ЦВП ми отримаємо кращі показники, адже деталей менша кількість і вони більш якісні, надійні. Щодо надійності, то в адаптованому ЦВП досить гарно можна реалізувати захист від виходу зі строю АЦП. Також адаптований варіант ЦВП дозволяє досить легко розширити функціональні можливості пристрою, створювати нові датчики фізичних величин.

Запропоновано [10] на основі передових технологій, перш за все, мікропроцесорних, інтерактивних і телекомунікаційних, створення ПАК широкого призначення, який може входити до складу будь-якого наукового і навчального обладнання. Основою ПАК є модульність і застосування мережевих протоколів передачі даних.

Модульний підхід дозволить швидко адаптувати ПАК під існуюче обладнання і розробити нові комп'ютеризовані наукові і навчальні прилади, а застосування прийнятих стандартів передачі даних надасть змогу побудувати інтерактивні прилади і установки з віддаленим доступом до них користувачів. Також ПАК може бути корисним для застосування більш дорогого наукового обладнання [11] з можливістю колективного використання, де отримання інформації, а також управління експериментом, може бути здійснено через Інтернет.

Використання мережевих протоколів для обміну даних дозволяє гнучко будувати схеми взаємодії користувача з обладнанням. Схеми роботи користувача з комп'ютеризованої за допомогою ПАК експериментальною установкою можуть бути різні і диктуються конкретними умовами.

4. 2. Розрахунок аналогового вхідного тракту

При побудові вхідного тракту за схемою наведеною на рис. 1, а, сенсор (Д) можливо підключати до входу інструментального підсилювача напряму, а отже інструментальний підсилювач повинен мати високий вхідний опір, малу напругу зміщення і високий коефіцієнт підсилення з можливістю його регулювання. В якості інструментального підсилювача візьмемо мікросхему AD623В. Основними перевагами її є: низька вхідна та вихідна напруга зміщення 25 мкВ та 200 мкВ відповідно, великий вхідний опір 2 ГОм, великий

коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу 100 Дб, коефіцієнт підсилення 1...1000 з похибкою 0.1 %, можливість регулювання зміщення вихідного сигналу, наявність захисту входів від перевищення вхідного сигналу напругу живлення, входи та вихід Rail to Rail, досить низька ціна. Але використання цієї мікросхеми вимагає додаткового операційного підсилювача, в якості котрого вибрали AD712. Як видно на спрощеній схемі вхідного тракту, наведеній на рис. 2, підсилювач AD712 має коефіцієнт підсилення рівний одиниці і слугує для усунення впливу паразитного струму (-50 мкА) на виводі ref на вхідний подільник, підключений до виводу 5.

Виводи 1...7... – це контакти на роз'ємі для підключення датчика. За допомогою подачі напруги на вивід 5 можемо зміщувати діапазон роботи сенсора. Наприклад АЦП вимірює вхідний сигнал в межах 0...2.5 В. Потрібно вимірювати сигнал амплітудою ±250 мВ, для цього встановлюємо коефіцієнт підсилення інструментального підсилювача рівним 5. На виході амплітуда сигналу дорівнюватиме ±1.25 В. Для приведення її до вхідного діапазону АЦП достатньо подати на вивід 5 напругу 1.25 В. Також завдяки такому підходу можливо компенсувати напругу зміщення сенсорів.

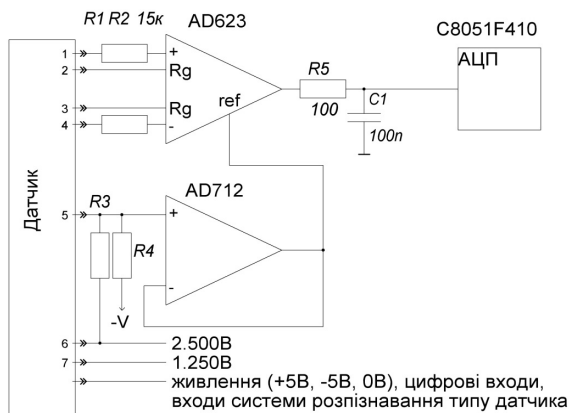


Рис. 2. Спрощена схема вхідного тракту

Резистори R1, R2 слугують для обмеження струму через входи при перевищенні вхідного сигналу напруги живлення, розраховані за формулою 1.

$$R = \frac{V_{inp} - V_s + 0.7}{0.01A}, \tag{1}$$

де V_{inp} – напруга на виводах 1 та 4 відносно землі, V_s – напруга живлення інструментального підсилювача =5 В.

Провівши підстановку значень, отримаємо захищеність підсилювача від перевищення вхідного сигналу робочий діапазон. При R=15 кОм, максимальна напруга на входах становитиме 150 В.

Коефіцієнт підсилення інструментального підсилювача різний для датчиків і встановлюється резистором Rg підключеним до виводів 2, 3 відповідно формули 2.

$$R_g = \frac{100k\Omega}{G - 1}, \tag{2}$$

де G – коефіцієнт підсилення.

Резистор R3 слугує лише для усунення появи напруги на виводі 5 при відсутності датчика. Ланцюг R5, C1 слугує для усунення впливу АЦП на роботу підсилювача. Оскільки використовуємо один АЦП послідовного наближення з вбудованим пристроєм вибірки-зберігання і перемикаємо комутатором між 8-ма аналоговими каналами, то з'являється ефект короткого замикання виходу підсилювача. Підключення пристрою вибірки-зберігання з розрядженим внутрішнім конденсатором до виходу підсилювача напругу призводить до появи загасаючих коливань, з часом загасання до 80 мкс, що є недопустимим. Адже потрібно знімати данні з 8-ми каналів з частотою не нижче 2 кГц, а це в свою чергу означає що час можливої роботи АЦП (час вимірювання 5 мкс) складає $T = 1/F = 1/(8 \cdot 2000) = 62.5\mu s$, отже не зможемо дочекатися встановлення сигналу на виході підсилювача. Для усунення цього ефекту використовуємо ланцюг R5, C1 ($\tau=10$ мкс) номінали якого були підібрані експериментальним шляхом.

4. 3. Розрахунок цифрового вхідного тракту

Цифрова обробка сигналів неминуче призводить до виникнення методичних похибок. Ці похибки можна розділити на чотири групи:

- похибка дискретизації, що виникає в результаті дискретизації вхідного сигналу в часі. Вихідне значення сигналу – це сума відліків в дискретні моменти часу;
- похибка квантування, що виникає в результаті заміни миттєвого значення вхідного сигналу його числовим кодом, який і призводить до похибки квантування;
- динамічні похибки, що виникають із-за інерційності вхідних ланцюгів, через зміни вхідного сигналу за час перетворення;
- похибки, що вносяться перешкодами, а також інструментальні похибки вхідних елементів, що мають випадковий характер.

У загальному випадку результуюча похибка може складно залежати від окремих складових. Однак стосовно до вимірювальних приладів завдання спрощується.

Аналіз похибки дискретизації вхідного сигналу, проведений в [12], показав, що при правильному виборі розрядності АЦП, його режиму перетворення, а також вхідних пристроїв ЦПП похибка дискретизації буде мізерно мала, у порівнянні з похибкою квантування.

Похибка квантування носить випадковий характер і може бути віднесена до перешкод. Однак її доцільно виділити окремо з двох причин: по-перше, похибка квантування є однією з вихідних величин для синтезу параметрів АЦП (частоти Квант імпульсів, часу перетворення і т. д.); по-друге, вона часто має переважуючий вплив в порівнянні з іншими складовими і визначає точність усього процесу перетворення і обробки сигналу.

Квантування чисел є нелінійної операцією, отже m-розрядне двійкове число A представляється b-розрядних двійковим числом $B = F(A)$, причому $b < m$. В результаті квантування число A представляється з помилкою

$$Y = B - A = F(A) - A. \tag{3}$$

Крок квантування q визначається вагою молодшого числового розряду $q = 2^{-b}$. При квантуванні використовується усічення або округлення.

Як показано в [13] у всіх випадках абсолютне значення помилки не перевищує кроку квантування:

$$\max|Y_{yc}| < 2 - b = q, \tag{4}$$

$$\max|Y_{okr}| < 2 - b - 1 = q/2, \tag{5}$$

де Y_{yc}, Y_{okr} – похибка усічення та округлення відповідно.

У завданнях цифрової обробки сигналів помилки квантування чисел розглядаються як стаціонарний шумоподібний процес з рівномірним розподілом ймовірності за діапазоном розподілу помилок квантування.

Похибка квантування для будь-якого сигналу, який має величину декількох LSB, може бути апроксимована некорельованою з сигналом пилкоподібною формою, що має амплітуду розмаху q , рівну 1 LSB. Хоча цей аналіз не можна назвати точним, але він достатній для багатьох додатків. Аналіз реального спектру шумів квантування був проаналізований в класичній роботі В. Р. Беннеттом з Bell Labs 1948 році, а незабаром за Беннеттом пішли й інші роботи з опису шумів квантування.

Як показано в роботі Беннетта, величина середньоквадратичної потужності шумів має вигляд:

$$\sqrt{e^2(t)} = \frac{q}{\sqrt{12}}. \tag{6}$$

Як було показано [14], цей шум апроксимується гауссовим розподілом і поширюється майже однорідно в смузі 0 до $f_s/2$, де f_s – мінімальна частота дискретизації сигналу відповідно до теореми Котельникова. За певних умов, коли строби шуму і сигналу гармонійно пов'язані, шум квантування стає корельованим, і енергія концентрується на гармоніках сигналу. При цьому середньоквадратичне значення залишається приблизно рівним $q/\sqrt{12}$.

Обчислимо співвідношення сигнал-перешкода при квантуванні. При величині кроку квантування q і загальному числі ступенів, що укладаються в межах характеристики АЦП, рівному $L = 2^n$, n – число двійкових розрядів, амплітуда гармонічного сигналу не повинна перевищувати величини $Lq/2$, а середня потужність сигналу – величини $0.5 \times (Lq/2)^2$ (щоб уникнути обмеження сигналу). Отже, співвідношення сигнал – перешкода при квантуванні гармонійного сигналу $P_s/P_q \leq 3/2 \times L^2$ і після підстановки отримаємо

$$\frac{P_s}{P_q} \leq \left(\frac{3}{2}\right) \times (2^n)^2, \tag{7}$$

або в логарифмічному вигляді

$$D(\text{дБ}) = 10 \times \lg\left(\frac{P_s}{P_q}\right) = 6.02 \times n + 1.76. \tag{8}$$

Співвідношення (7) можна розглядати як окремий випадок загального вираження $P_s/P_q \leq 3 \times (2n)^2 / K^2$,

де K – пікфактор сигналу, тобто відношення максимального значення до середньоквадратичного.

Як показано в [14] при гармонійному вхідному сигналі $K = \sqrt{2}$, що призводить до формули (7); при випадковому сигналі з нормальним законом розподілу коефіцієнт K може бути прийнятий 2,5–3. У цьому випадку $P_s/P_q \leq (2n)^2/3$, а середньоквадратична напруга не повинна перевищувати $U_{ser} \leq L \times q / 6.6$.

Розрахуємо вольтметри з діапазонами $\pm 12,5$ В ($\pm 2,5$ В) і точністю вимірювання 0,05 В (0,01В). В приладі виберемо джерело опорної напруги 2,5 В. Для перетворення діапазону вхідного сигналу в діапазон вимірювання напруги АЦП потрібно перед інструментальним перетворювачем (ВП) з одиничним коефіцієнтом підсилення встановити дільник напруги на 10 (2). Вихідна напруга і точність вимірювання буде відповідно $\pm 1,25$ В і 0,005 В. Тоді число рівнів квантування буде дорівнює $N = 1.25 / 0.005 = 250$ і повний розмах напруги шумів $V_{p-p} = 5$ мВ, а середньоквадратичний рівень шумів $V_{rms} = 5 / 6.6 = 0.76 \mu\text{В}$.

Як показано в [15] розрядність коду АЦП, вільна від шумів, визначається таким чином:

$$N_0 = \frac{\lg\left(\frac{V_s}{V_{p-p}}\right)}{\lg(2)} = 7.96 \text{ біт.}$$

Ефективна роздільна здатність АЦП обчислюється за формулою:

$$N_0 = \frac{\lg\left(\frac{V_s}{V_{rms}}\right)}{\lg(2)} = 10.69 \text{ біт.}$$

Отже для вимірювача необхідний АЦП з розрядністю 12 біт (1 біт на визначення знаку напруги). Для забезпечення точності вимірювань слід звернути увагу на розрахунок вхідного дільника напруги на 10 (2). Для забезпечення точності вимірювань необхідно підібрати резистори з точністю не гірше ніж 0,1 %. Вхідний підсилювач повинен мати коефіцієнт посилення одиницю і на вході АЦП при нульовому вхідному сигналі має бути половина опорної напруги – 1,25 В.

5. Результати розробки схеми вхідного цифро-аналогового тракту

Проведено синтез та розрахунки вхідного цифро-аналогового тракту модуля прийому і передачі даних ПАК для комп'ютеризації навчального експерименту. Розрахунки показують, що задля отримання необхідних характеристик системи необхідно застосувати АЦП з комутатором на 8 входів, розрядністю не нижче 12 Біт, та часом вимірювання не більше 15 мкс. Кожен канал вимірювання повинен містити один інструментальний підсилювач AD623 і один операційний підсилювач AD712. Розраховано систему захисту від високої вхідної напруги амплітудою до ± 150 В, а також схему усунення впливу АЦП на роботу інструментального підсилювача. Обрано високоякісні компоненти для створення вхід-

ного тракту, які дозволяють проводити підсилення вхідного сигналу (1...1000 разів), його вимірювання з точністю 1 %. Наведені розрахунки підтверджуються дослідженням реалізованого програмно-апаратного комплексу.

6. Висновки

Для створення ПАК розроблено схему вхідного аналого-цифрового тракту центрального модуля прийому, обробки і передачі даних. Розраховано необхідні характеристики схеми та обрано відповідні комплектуючі для отримання характеристик обробки сигналу не гірших за характеристики відомих анало-

гів, а саме точність вимірювання постійної напруги до 1 %, кількість вимірювань на канал – 2000 за секунду. Розраховано захист від перевищення напруги (до 150 В) на вході діапазону вимірювання.

Розроблені схемні рішення дозволяють створити достатньо надійний і дешевий ПАК, який не поступається за характеристиками аналогічним системам закордонного виробництва, має можливість легкого, без додаткових специфічних компонентів, приєднання, створення нових датчиків.

Створений ПАК був застосований для розширення можливостей більш дорогого наукового обладнання [11] з можливістю колективного використання, де отримання інформації, а також управління експериментом, може бути здійснено через Інтернет.

Література

1. Комплексное программно-аппаратное решение для общеобразовательной школы [Электронный ресурс] / Ю. В. Федорова. – Режим доступа: <http://www.int-edu.ru/page.php?id=886> – 10.07.2015. – Загол. з екрану.
2. Aflalo, E. Learning Approach and Learning: Exploring a New Technological Learning System [Текст] / E. Aflalo, E. Gabay // International Journal for the Scholarship of Teaching and Learning. – 2013. – Vol. 1, Issue 7. – P. 14.
3. Fourier Systems Inc. [Electronic resource]. – Available at: <http://fourier-sys.com/> – 10.07.2015. – Title from the screen.
4. PASCO: Home [Electronic resource]. – Available at: <http://pasco.com/> – 10.07.2015. – Title from the screen.
5. PHYWE – Cobra4 Wireless [Electronic resource]. – Available at: <https://www.phywe.de/en/12605-89> – 10.07.2015. – Title from the screen.
6. L-CARD [Electronic resource]. – Available at: <http://www.lcard.ru> – 15.07.2015. – Title from the screen.
7. АКОН [Electronic resource]. – Available at: <http://www.akon.com.ua> – 15.07.2015. – Title from the screen.
8. ХОЛИТ Дейта Системс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://holit.com.ua> – 15.07.2015. – Загол. з екрану.
9. Галуза, А. А. Программно-аппаратная платформа для разработки систем автоматизации лабораторного эксперимента [Текст] / А. А. Галуза, И. В. Коленов, А. И. Беляева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 9 (65). – С. 11–16. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18446/16193>
10. Лопаткин, Р. Ю. Организация дистанционного физического эксперимента с помощью универсального программно-аппаратного комплекса [Текст] / Р. Ю. Лопаткин, В. В. Куприенко, В. А. Иващенко, С. Н. Игнатенко // Управляющие системы и машины: информационные технологии : международный научный журнал. – 2011. – № 5. – С. 73–75.
11. Внученко, А. А. Автоматизированный гониометр для исследования местоположения примесных атомов в монокристаллах методом каналирования ионов [Текст] / А. А. Внученко, А. Б. Крамченков, В. Л. Денисенко, А. Н. Бугай, С. Н. Игнатенко, Ю. А. Павленко, Р. Ю. Лопаткин, В. Е. Сторижко // ВАНТ. – 2013. – № 2 (84). – С. 152–156.
12. Горлач, А. А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике [Текст] / А. А. Горлач, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – К. : Техника, 1985. – 151 с.
13. Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов [Текст] / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
14. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
15. Аналого-цифровое преобразование [Текст] / под ред. У. Кестера. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.