

# Характеристики і структури багатоканальних АЦ-систем, що самокорегуються, для аналізу аудіо сигналів

Крупельницький Л.В.

к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри обчислювальної техніки,  
Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, krupost@gmail.com

*Анотація* — Наведено області застосування та специфіку технічних вимог до параметрів аналого-цифрових систем багатоканального перетворення і аналізу аудіосигналів. Показано, що підвищення точності вимірювальних каналів систем можливо при застосуванні методів калібрування та самокорегування. Наведено структурні рішення багатоканальної АЦ-системи з паралельним перетворенням аудіосигналів та системи аналізу параметрів звукових трактів. Запропоновано методи корегування статичних і динамічних характеристик перетворення з використанням генератора опорних сигналів і послідовним калібруванням діапазонів програмованих підсилювачів. Визначено напрямки розвитку методів самокорегування АЦ-систем.

*Ключові слова:* багатоканальна аналого-цифрова система, аналіз аудіо сигналів, калібрування.

## Characteristics and structure of the multi-channel self-adjusting analog-digital systems for analyzing of audio signals

Leonid V. Krupelnitskyi

PhD, assistant professor, head of the department of Computer Technology,  
Vinnitsia National Technical University  
95 Khmelnytske shose, Vinnitsia, Ukraine, krupost@gmail.com

*Annotation* - An area of application and specifics of technical requirements to the parameters of analog-digital systems for the multi-channel transformation and audio signal analysis is given. It is shown that increasing the measurement channel precision of systems is possible when using methods of calibration and self-adjustability. There are presented structural solutions of the multi-channel analog-digital system with the parallel transformation of audio signals and the system of the parameter analysis of sound channels. The methods of the correction of static and dynamic characteristics of transformation using the reference signal generator and the serial range calibration of programmable amplifiers are proposed. Directions for the development of the self-adjusting methods of digital-analog systems are determined.

*Keywords:* a multi-channel analog-digital system, an analysis of audio signals, calibration.

### I. ВСТУП

Задачі багатоканального аналізу низькочастотних сигналів звукового діапазону частот актуальні для таких застосувань як телерадіомовлення, сейсмозв'язка, тензометрія, діагностика двигунів, біомедицина, акустична локація, аудіо ідентифікація, розпізнавання мови тощо. В цих областях ефективність застосування цифрових методів, в першу чергу, залежить від структурних, схемних та алгоритмічних рішень по забезпеченню потрібної якості перетворення аналогових сигналів.

### II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСОБЛИВОСТЕЙ БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМ АНАЛІЗУ АУДІОСИГНАЛІВ

Необхідність постійного підвищення якості вимірювання і опрацювання аудіосигналів пов'язана з такими особливостями технічних вимог до вимірювальних каналів (ВК) багатоканальних аналого-цифрових систем (АЦ-систем):

- широкий динамічний діапазон аудіосигналів (до 120-140 дБ);
- значні низькочастотні та високочастотні фонові складові сигналу (до 40-60 дБ);
- власні шуми вхідних підсилювачів (мінус 100-130 дБ);
- наведені завади на аналогові вхідні кола (10-30 дБ);
- високі вимоги до лінійності статичної передатної характеристики (СПХ) на всіх діапазонах сигналу (0.001- 0.01%);
- необхідність мінімізації динамічних спотворень спектру сигналів (мінус 90-120 дБ);
- вимоги до низької нерівномірності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) (+-0.03 дБ) та до нелінійності фазо-частотної характеристики (ФЧХ) (+-0.1°) в смузі пропускання корисного сигналу;
- високі вимоги до ідентичності статичних та динамічних характеристик усіх каналів АЦ-системи з урахуванням алгоритмів спільного опрацювання сигналів;

- необхідність мінімізації міжканального впливу та кореляційних залежностей між сигналами в каналах системи;
- змінні кліматичні та механічні впливи (експлуатація на відкритій місцевості, на транспорті);
- високі вимоги до надійності та терміну експлуатації багатоканальної АЦ-системи;
- необхідність мінімізації вартості виробництва та експлуатації АЦ-системи.

### III. САМОКАЛІБРУВАННЯ І САМОКОРЕГУВАННЯ АЦ-СИСТЕМ

В значній мірі вказані вимоги можуть бути враховані та ефективно вирішені при створенні багатоканальних АЦ-систем аналізу аудіосигналів на основі методів автоматичного калібрування та самокорегування. Ці методи пропонуються автором, в тому числі, - і як результат розвитку способів підвищення точності та швидкодії АЦП і ЦАП на основі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [1,2].

Процедури самокорегування АЦ-систем розглядаються як більш розширені, порівняно з процедурами самокалібрування (автокалібрування) в тому сенсі, що самокорегування хоч і має окремий режим калібрування з використанням еталонних сигналів, але й може виконуватись безпосередньо в процесах підсилення, фільтрації, АЦ-перетворення та цифрового аналізу сигналів, без їх переривання. Наприклад, при прискореному врівноваженні в АЦП на основі НПСЧ можуть виникати помилки через не ввімкнення старших розрядів, які будуть компенсовані за рахунок молодших розрядів. Аналогічно, в АЦ-системі з програмованим підсилювачем на вході АЦП може бути автоматично вибрано оптимальний коефіцієнт підсилення, що збільшує відношення сигнал/шум. Також, при аналізі сигналів може застосовуватись адаптивна цифрова фільтрація, яка виділить корисний сигнал на фоні шумів та завад. Слід відмітити, що в більшості АЦ-систем аналізу аудіо сигналів часто можлива або повторна обробка сигналів, або ж навіть повторні вимірювання, ініційовані алгоритмом роботи системи.

Розглянемо дві типові структури багатоканальних АЦ-систем аналізу аудіосигналів, що самокорегуються – з метою виділення елементів їх структурної надлишковості, пов'язаних з можливостями калібрування та самокорегування.

### IV. СТРУКТУРА БАГАТОКАНАЛЬНОЇ АЦ-СИСТЕМИ З ПАРАЛЕЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ АУДІОСИГНАЛІВ

Структурна схема n-канальної системи з каналами паралельного підсилення сигналів акустичних сенсорів, АЦ-перетворення та їх спільного комп'ютерного опрацювання і аналізу наведена на рисунку 1. Така АЦ-система може

використовуватись у сейсмозвізді (сенсори – геофони), в пасивних акустичних решітках (сенсори – мікрофони), в технічній діагностиці і біомедицині (сенсори – електронні стетоскопи) тощо. Аналіз і спільна обробка сигналів цього типу систем, як правило, містить багатократне підсумовування каналних сигналів з різними фазовими здвигами та обчисленнями їх взаємно-кореляційних функцій – для електронного сканування джерел акустичних сигналів та для їх ідентифікації.

Схема на рисунку 1 містить: С – сенсори вхідних аналогових сигналів ( $m$  в кожному каналі); ВК – вхідні комутатори; ПП – програмовані підсилювачі; ФНЧ – антиаліасінгові фільтри низьких частот; КП – компаратори перевантаження; САЦП – сигнальний АЦП, що самокорегується; ДОН – джерело опорної напруги для перемножуючого ЦАП опорних сигналів. Послідовне використання декількох сенсорів вхідного сигналу  $S(1..m)$  потрібне для економії числа каналів системи при можливій зміні груп або типів сенсорів або зміні напрямів прийому акустичного сигналу. Вибір оптимального коефіцієнта підсилення або здійснення повторних вимірювань можливі за рахунок використання компараторів КП, що контролюють можливі перевантаження вхідними сигналами.

Контролер інтерфейсу даних на мікропроцесорі або на спеціалізованому сигнальному процесорі виконує приймання даних від АЦП каналів та передавання їх на персональний комп'ютер (ПК) через обраний швидкісний стандартний інтерфейс (USB, S/PDIF, Bluetooth, Ethernet, Wi-Fi).

ПК за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) здійснює аналіз сигналів та керує процесом корегування АЦ-системи через контролер корегування.

Специфічним пристроєм, доданим до АЦ-системи, що самокорегується, є перемножуючий ЦАП з чітко фіксованою максимальною амплітудою вихідного сигналу, рівною значенню напруги ДОН. ЦАП, в залежності від алгоритму і кроку калібрування відтворює опорні сигнали: імпульси фіксованої амплітуди і періоду, гармонійні та полігармонійні сигнали з заданого набору частот [3]. Ці опорні сигнали одночасно подаються на вхід вимірювальних каналів системи через комутатори ВК та поступають на входи програмованих підсилювачів ПП. Процес корегування статичних та динамічних характеристик ВК відбувається послідовно для кожного з коефіцієнтів підсилення ПП та охоплює параметри комутаторів, підсилювачів, фільтрів, САЦП. Якщо САЦП побудовано на основі НПСЧ, то вказаному процесу передують і їх самокорегування за відомими способами. При цьому схематехніка аналогових пристроїв САЦП має свої характерні риси і може бути побудована на струмовому принципі підсилення [1,4,5].

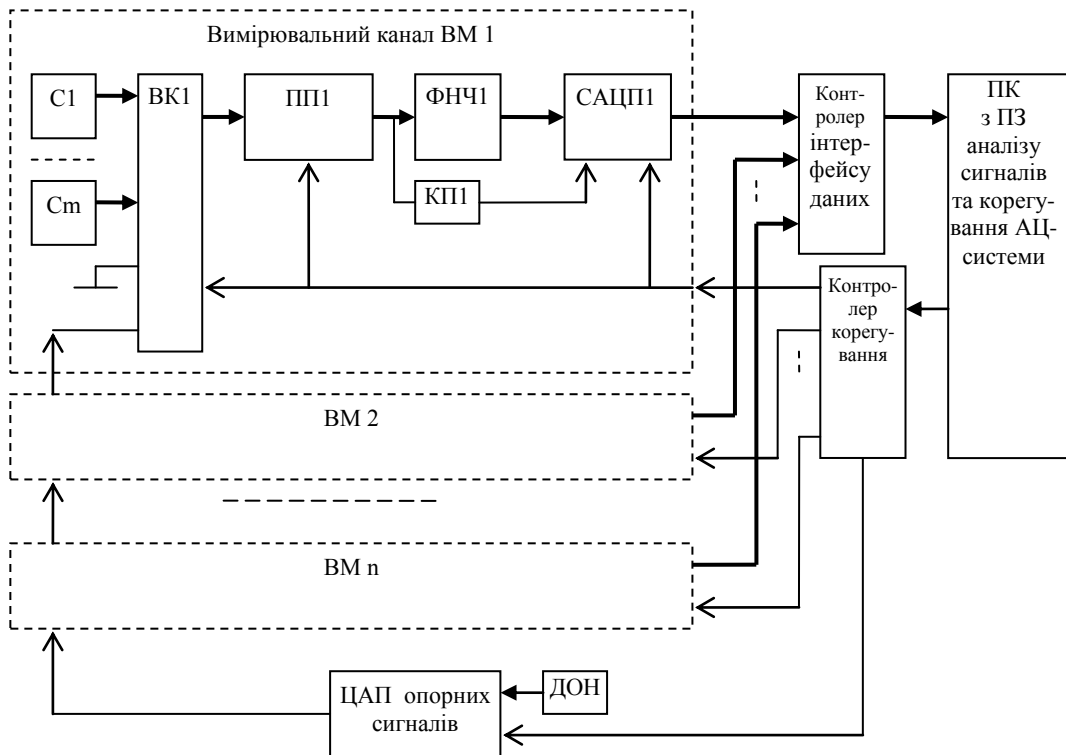


Рисунок 1 – Структура багатоканальної АЦ-системи аналізу сигналів акустичних сенсорів з корегуванням характеристик вимірювальних каналів

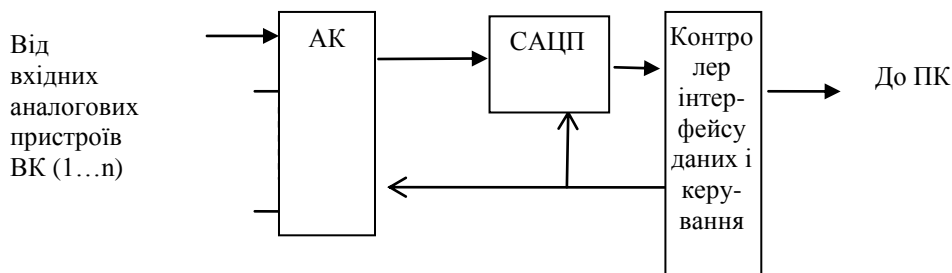


Рисунок 2 – Варіант схеми з послідовним АЦ-перетворенням каналних сигналів

В режимі перетворення і опрацювання сигналів сенсорів результати корегування використовуються для індивідуальної корекції сигналів кожного каналу. Враховуються параметри визначеної реальної статичної характеристики (в часовій області) та реальних АЧХ і ФЧХ (в частотній області). Адаптація АЦ-системи до рівня і складу сигналу в кожному каналі можлива як за рахунок апаратних складових (вихідні сигнали КП, САЦП), так і за результатами програмного аналізу частотного спектру (в сигнальному процесорі і в ПК).

Наведена на рисунку 1 структура передбачає використання окремих АЦП в кожному каналі. Це, зокрема, можуть бути сучасні дельта-сигма АЦП, у яких за рахунок надлишкової частоти дискретизації і цифрової фільтрації-децимації,

можна отримати вихідні дані на рівні 20-24 двійкових розрядів для низькочастотного і аудіо діапазонів сигналу. Проте, такі дельта-сигма АЦП мають вкрай тривалі перехідні процеси і тому не можуть використовуватись в системах з оперативним перемиканнями вхідних сенсорів, з імпульсними сигналами, з короткотривалими комутаційними переваженнями підсилювачів тощо. Для таких застосувань більш оптимальним і економним рішенням є наведена на рисунку 2 схема з послідовним АЦ-перетворенням сигналів в каналах за рахунок використання багатоканального аналогового комутатора АК та АЦП порозрядного врівноваження. Саме такий тип АЦП, що самокорегується, органічно доповнює структуру розглянутою багатоканальної АЦ-системи для аналізу аудіо сигналів.

V. СТРУКТУРА СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ЗВУКОВИХ ТРАКТІВ АПЗТ

Іншим прикладом АЦ-системи для аналізу аудіосигналів є універсальний комп'ютерний вимірювальний прилад – аналізатор параметрів звукових трактів АПЗТ [1,5,6]. Принцип вимірювань ілюструє рисунок 3. ПК синтезує тестовий сигнал та подає його через ЦАП на входи двох або більшої кількості каналів чи трактів (в багатоканальних системах оточуючого звуку до 8 каналів). З виходу звукових трактів сигнали вже окремо перетворюються в цифрову форму та поступають на комп'ютер, де аналізуються їх часові та спектральні характеристики.

Структурна схема АПЗТ, що пояснює призначення основних компонентів і проходження

вимірювального сигналу в АПЗТ, зображена на рисунку 4.

Вхідна вимірювальна частина складається з двох ідентичних каналів А і В. Симетричні аналогові входи мають програмовані значення вхідних опорів для узгодження з різними трактами звукової апаратури (150, 200, 600 Ом і 100 кОм). Вхідний аналоговий комутатор ВК, крім вхідного сигналу, може комутувати також вихідний сигнал вимірювального ЦАП, джерело опорної напруги ДОН і шину “нуля”, що необхідно для самокалібрування коефіцієнтів підсилення і для самокорегування АЧХ і ФЧХ вимірювальних каналів.

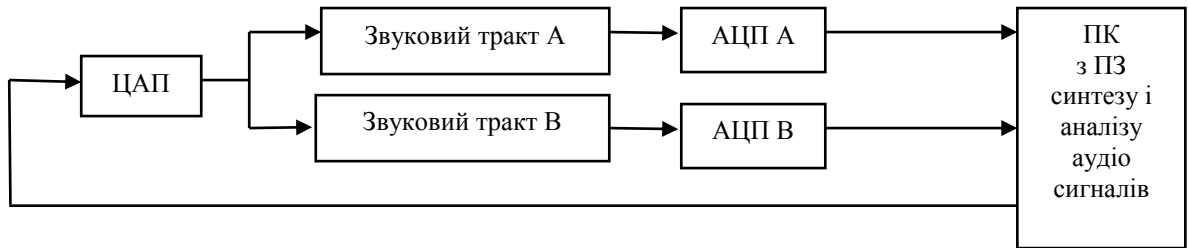


Рисунок 3 – Схема вимірювань параметрів звукових стереоканалів комп'ютерною АЦ-системою

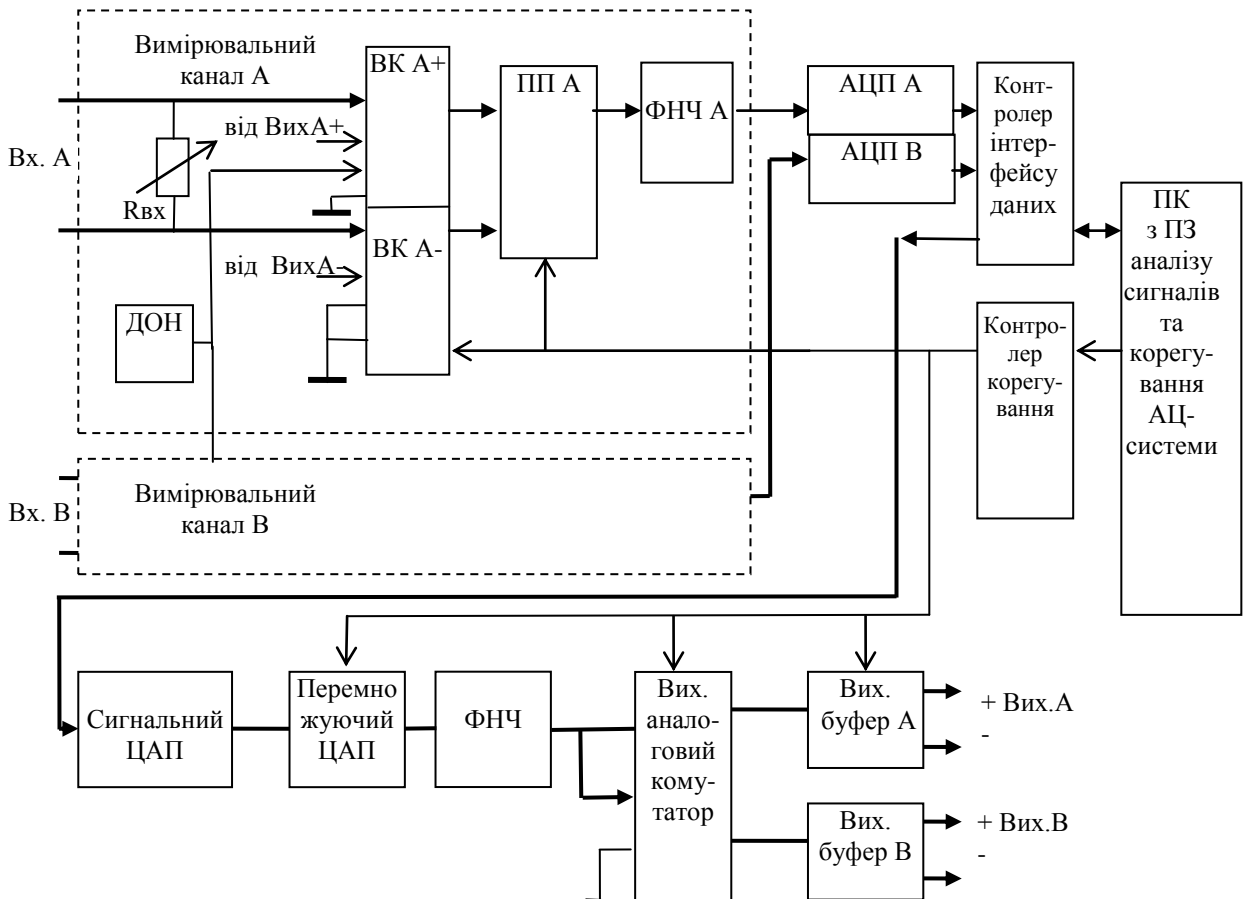


Рисунок 4 – Структура АЦ-системи, що самокорегується, для аналізу параметрів звукових трактів

Програмований підсилювач ПП перетворює симетричний вхідний сигнал в несиметричний і встановлює вхідні діапазони рівнів напруги від +18 дБ до мінус 24 дБ. В якості АЦП в АПЗТ різних моделей використано: 18-розрядний АЦП порозрядного врівноваження на основі НПСЧ; 16-розрядний стереофонічний дельта-сигма АЦП AD1877 (Analog Devices); 24-розрядний USB-кодер зовнішньої звукової карти ESI U24 XL (Ego Systems).

Тракт генерування сигналів містить основний сигнальний 18-розрядний ЦАП AD1861 і перемножуючий ЦАП AD7111 (мікросхеми фірми Analog Devices). Послідовне включення обох ЦАП дозволяє плавно, з кроком 0,1 дБ регулювати рівень вихідного сигналу в діапазоні від мінус 74 до +12 дБ. ФНЧ при смузі пропускання 20 кГц дозволяє обмежити спектр вихідних шумів. Вихідний аналоговий комутатор подає на вихід сигнал ЦАП і дозволяє керувати вибірковою ввімкненням вихідних каналів А і В. Вихідні буферні каскади мають у своєму складі формувачі диференційного сигналу і буферні підсилювачі для роботи на навантаження з низьким опором [5].

Особливостями методу самокорегування АПЗТ, порівняно з АЦ-системою, наведеною на рисунку 1 є наявність окремої процедури калібрування статичних і динамічних характеристик тракту генерування сигналів за допомогою сигнального, перемножуючого ЦАП та вихідних буферних каскадів. Така процедура стає можливою після визначення точного кодового еквівалента напруги ДОН при його комутації на входи вимірювальних каналів і використання найбільшого з діапазонів програмованого підсилювача. Надалі цей діапазон підсилення і АЦП вважаються відкаліброваними, а визначенню підлягають значення реальних вихідних напруг генератора сигналів. Останні, в свою чергу, використовуються для калібрування менших діапазонів програмованого підсилювача за ітераційним алгоритмом «згори донизу».

У результаті застосування методів корегування статичних і динамічних характеристик в АПЗТ реалізовано високоточні вимірювання таких основних параметрів звукових трактів і їх діапазонів:

- середньоквадратична напруга - від +20 до мінус 90 дБ;
- селективне напруга - від +20 до мінус 90 дБ;
- шуми інтегральні і психофотетричні - від мінус 20 до мінус 90 дБ;
- рівень селективної перешкоди - від мінус 20 до мінус 90 дБ;
- частота вхідного сигналу - від 20 до 20 000 Гц;
- амплітудно-частотна характеристика – в смузі від 20 до 20 000 Гц ;
- фазо-частотна характеристика і різниця фаз - від мінус 90 до +90 градусів;

- груповий час затримки - від 0,5 до 5 мс;
- коефіцієнт гармонік - від 0,005 до 5%;
- коефіцієнт різницевого тону - від 0,005 до 5%;
- коефіцієнт інтермодуляційних спотворень - від 0,005 до 5%;
- рівень перехідних завад - від 30 до 80 дБ;
- рівень паразитної амплітудної модуляції - від 30 до 80 дБ.

Конструктивно АПЗТ виконаний у вигляді компактного вимірювального модуля, суміщеного з ноутбуком [6]. Вимірювально-інформаційна АЦ-система АПЗТ пройшла державну метрологічну атестацію та успішно впроваджена на багатьох телерадіокомпаніях України.

## Висновки

Розширення областей застосування багатоканальних АЦ-систем аналізу аудіо сигналів залежить від досягнутого рівнем точності вимірювань. Показано, що ефективним методом підвищення точності є введення структурної надлишковості та розвиток методів калібрування та самокорегування систем. Запропоновано типові структурні схеми багатоканальних АЦ-систем, в яких для калібрування використовуються тестові гармонійні та полігармонійні сигнали, що генеруються окремим ЦАП. Для калібрування статичних характеристик вимірювальних каналів з програмованими діапазонами підсилення використано ітераційні методи, а для корегування АЧХ і ФЧХ - методи на основі спектрального аналізу сигналів.

- [1] Крупельницький Л.В. Азаров О. Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Під заг. ред. О.Д. Азарова, - УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.- 167 с.
- [2] Азаров О. Д., Крупельницький Л. В. Снігур А. В., Решетнік О. О., Гарнага В. А. Коригування статичних похибок вимірювального каналу івс, який містить ацп із ваговою надлишковістю // Проблеми інформатизації та управління. – 2007. – №2. – С. 5 – 9
- [3] Полігармонійні методи вимірювання частотних характеристик звукових каналів і трактів / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Л. В. Крупельницький, Д. Ю. Позняк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 2. – С. 23–29.
- [4] Нелінійні спотворення двотактних підсилювачів постійного струму з вибірковою зворотним з'язком / Азаров О.Д., Крупельницький Л.В., Теплицький М.Ю. // Вісник вінницького політехнічного інституту – Вінниця, ВНТУ, 2014 – №4. С.79-87
- [5] Двотактні підсилювачі струму для цифрового аналізатора параметрів звукових трактів/ Азаров О.Д., Крупельницький Л.В., Теплицький М.Ю. // Проблеми інформатизації та управління – Київ, НАУ, 2014 – №4 (48). С.5-13
- [6] Спеціалізоване і вимірювальне обладнання власної розробки і виробництва для телерадіомовлення. Каталог НТЦ "Аналого-цифрові системи" ВНТУ // Азаров О.Д., Крупельницький Л.В., Стейскал В.Я., Білоконь О.А., - Вінниця, 2015, 40 с.