

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.375.024

О. Д. АЗАРОВ, Л. В. КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ, В. А. ГАРНАГА, Д. Ю. ПОЗНЯК

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

ПОЛІГАРМОНІЙНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВИХ КАНАЛІВ І ТРАКТІВ

Анотація. У статті здійснено аналіз методів вимірювання амплітудно-частотної характеристики каналів передавання звукової інформації, визначено переваги і недоліки відомих методів вимірювання. Запропонований новий метод вимірювань, який дозволяє швидко отримати крім АЧХ каналу передавання інформації й інші важливі параметри, зокрема, груповий час затримки, коефіцієнт нелінійних спотворень та інші. Показано прилад АПЗТ, побудований на запропонованому методі вимірювань параметрів звукових трактів, а також наведено його параметри. Представлено графіки АЧХ, які отримано із використання запропонованого методу.

Ключові слова: АЧХ, полігармонійні сигнали, звукові тракти, вимірювання.

Аннотация. В статье проведен анализ методов измерения амплитудно-частотной характеристики каналов передачи звуковой информации, определены преимущества и недостатки известных методов измерения. Предложен новый метод измерений, который позволяет быстро получить кроме АЧХ канала передачи информации и другие важные параметры, в частности, групповое время задержки, коэффициент нелинейных искажений и другие. Показан прибор АПЗТ, построенный на предложенном методе измерений параметров звуковых трактов, а также приведены его параметры. Представлены графики АЧХ, полученные с использованием предложенного метода.

Ключевые слова: АЧХ, полигармонические сигналы, звуковые тракты, измерения.

Abstract. The article analyzes the methods of measuring the amplitude-frequency responses of the transmit audio information identified advantages and disadvantages of known methods of measurement. A new method of measurement, which allows a quick response in addition to channel information and other important parameters, such as group delay, distortion factor and others. Showed APZT device, built on the proposed method of measuring parameters of audio paths, and given the options. AFC is a graph obtained using the proposed method.

Key words: AFC, polyharmonic signals, sound path, measurement.

Вступ

Сприйняття людиною інформації в значній мірі відбувається на слух. Для успішного засвоєння цієї інформації потрібно забезпечити належну якість звукового каналу передавання інформації, оскільки, при недостатній якості інформація може бути сприйнята зі спотвореннями і неправильно інтерпретована. Крім того, довгострокове прослуховування неякісного звукового сигналу впливає на самопочуття та здоров'я людини. Саме тому є важливою задача контролю якості каналів передавання звукової інформації. Водночас, варто відзначити, що цією проблемою вже досить давно займаються науковці [1–4] та інженери і розроблено методики оцінювання, а також підготовлено відповідні державні стандарти [5] до визначення якості каналів передавання інформації.

Амплітудно-частотна (АЧХ) є однією з найважливіших характеристик якості каналів і трактів радіомовлення та звукового супроводу телебачення. При вимірюванні АЧХ виникає також задача одночасного оцінювання фазочастотної характеристики (ФЧХ) та характеристики групового часу затримки (ГЧЗ). Коректність виміру частотних характеристик реальних каналів і трактів залежить від рівня вимірювального сигналу, рівня шумів, нелінійних спотворень та наявності специфічних для цифрових систем властивостей, пов'язаних з ущільненням звукового сигналу. Так звану малосигнальну АЧХ, що дозволяє прогнозувати потенційно досяжні характеристики тих чи інших електронних схем, можна отримати лише шляхом комп'ютерного моделювання і аналізу схем. У практиці вимірювань використовується інший підхід; в якому АЧХ і ФЧХ каналу або тракту вимірюються в рамках діапазону сигналу на певному рівні, наприклад – 21 дБ [5].

Аналізуючи підходи і методи вимірювання до вказаної задачі можна прийти до висновку, що існуючі підходи є достатньо громіздкими, і те яким чином та з якими засобами вони виконувалися є застарілими. Розвиток технічних засобів дозволяє запропонувати нові підходи, щодо реалізації таких вимірювань.

Актуальність

Відомі декілька методів вимірювання та оперативного контролю АЧХ та її окремих параметрів – з використанням послідовного набору сигналів з фіксованими частотами, з використанням сигналу, частота якого змінюється в часі та з використанням шумободібного сигналу з рівномірним спектром частот. Вказані методи мають свої недоліки, пов'язані як зі складністю процедури вимірювань, так і з неможливістю адекватного оцінювання параметрів цифрових трактів з ущільненням звукових сигналів. Разом з тим, нові можливості відкривають комп'ютерні методи вимірювань з використанням високоякісних ЦА- і АЦ-перетворювачів та методів спектральної обробки сигналів.

Таким чином, метою статті є розгляд відомих методів вимірювання АЧХ звукових трактів та аналіз можливостей пропонованого полігармонійного методу, який дозволяє з використанням одного вимірювального сигналу отримати усі необхідні частотні характеристики (АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ) звуковому тракту та оцінити якість цифрового ущільнення звуку.

Задачі досліджень:

1. Запропонувати полігармонійні методи для визначення АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ звукових трактів.
2. Провести порівняльний аналіз запропонованих і відомих методів визначення частотних характеристик звукових трактів.

Розв'язання задач

Проаналізуємо відомі методи визначення АЧХ каналів їх переваги і недоліки.

Найпростіший із методів пов'язаний з використанням генератора низьких частот та вольтметра або вимірювача рівня. Вимірювання виконують почергово для кожної точки із фіксованого ряду частот, подаючи на вхід звукового тракту одно-тональний (моногоармонічний) сигнал з генератора. Вимірювачем оцінюють середньоквадратичне значення вихідного сигналу. Недоліком такого моногоармонічного методу є досить великі затрати часу на вимірювання та обробку результатів. Як правило, передбачається вимірювання АЧХ при рівні вхідного сигналу мінус 21 дБ відносно номінального, а рівні вихідних сигналів необхідно нормувати відносно рівня на опорній частоті 1 кГц. Результати, звичайно, необхідно представляти у децибелах, у табличній та графічній формах. При вимірюванні АЧХ міжміських каналів передачі звукового мовлення затрати часу зростають також у зв'язку з необхідністю узгоджувати процес вимірювання між двома операторами, а в результаті вимірювань вноситься додаткова випадкова похибка через флуктуацію в часі коефіцієнту передачі каналу. Моногоармонічний метод погано пристосований до контролю форми АЧХ при оперативних регулюваннях.

У моногоармонічному методі додатково, при наявності взірцевого опорного каналу, за допомогою фазометра, можна виміряти також і ФЧХ. Така можливість є тільки в студійних звукових трактах без пристроїв запису-відтворення звуку. Характеристику групового часу затримки, яка математично є похідною від ФЧХ, можна оцінити виконуючи вимірювання різниці фаз між близькими частотами і враховуючи можливі переходи фази через період. Але, через складність, такий метод вимірювання ГЧЗ практично не використовують.

У аналогових спектроаналізаторах для оцінювання форми АЧХ використовується вимірювальний сигнал з частотною модуляцією – змінюється миттєва частота гармонічного сигналу при незмінній амплітуді. Такий метод найбільш придатний для швидкого графічного відтворення форми АЧХ на екранах з запам'ятовуванням. Через плавну зміну частоти сигналу можливе вимірювання ГЧЗ, але у відомих спектроаналізаторах для звукового діапазону частот ця можливість не використана. При вимірюванні АЧХ звукових трактів метод має недоліки, пов'язані з невисокою точністю вимірювань, складністю отримання відліків на фіксованих частотах та неможливістю синхронізувати вимірювання в міжміських каналах звукового мовлення та з'єднувальних лініях.

У цифрових приладах для вимірювання АЧХ отримав поширення метод, що ґрунтується на шумоподібному вимірювальному сигналі. Формування шумоподібного сигналу з рівномірно розподіленим спектром відбувається в цифровому вигляді за рахунок генератора псевдовипадкової послідовності. За результатами вимірювань оцінюють спектр вихідного сигналу, форма обвідної якого відтворює АЧХ тракту. Такий метод більше пристосований до специфіки вимірювань в звукових каналах і трактах, не вимагає попередньої синхронізації, дозволяє за рахунок цифрового спектрального аналізу або фільтрації отримати відліки АЧХ на окремих частотах, може використовуватись при оперативних регулюваннях. Недоліком шумоподібного сигналу є принципова неможливість вимірювання ФЧХ та ГЧЗ.

Імпульсно-подібний сигнал, наближений до дельта-функції також має рівномірний спектр і використовується, наприклад, для виміру часу акустичної реверберації приміщень. Він може також використовуватись при вимірюванні АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ електричних звукових трактів, оскільки окремі спектральні складові дельта-функції мають однакову амплітуду і початкову фазу. Однак, порівняно з шумоподібним сигналом, амплітуда кожної окремої спектральної складової імпульсного сигналу суттєво менша амплітуди сумарного імпульсу. А це призводить до підвищеного впливу шумів і завад тракту на результати розрахунку АЧХ, ФЧХ і ГЧЗ.

Для реалізації полігармонічного методу вимірювання використовується програмно-апаратний комплекс структури якого наведено на рис. 1. Він складається з програмного забезпечення, яке дозволяє згенерувати тестовий сигнал та самого комплексу, що реалізує синтез в аналоговому вигляді тестовий сигнал і потім передає його через канал зв'язку, якість якого потрібно визначити.

Для вимірювання АЧХ і ФЧХ звукових каналів і трактів пропонується використовувати полігармонічний сигнал (ПГС), який сформовано з суми 10-20 гармонічних складових, значення частот яких можуть задаватись користувачем із нормованого ряду або довільно.

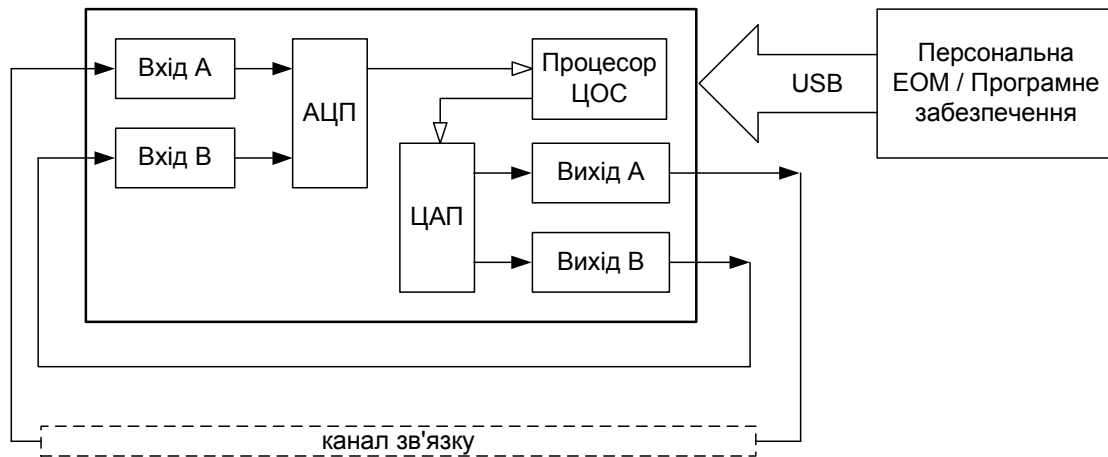


Рисунок 1 – Узагальнена структура пристрою, що реалізує полігармоніальний метод вимірювання АЧХ

Всі амплітуди і початкові фази гармонічних складових однакові:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t)$$

де A_i – амплітуда кожної з N гармонійних складових.

Приклад осцилограми такого полігармонічного сигналу наведено на рис. 1, а його спектр – на рис. 2 (задано частоти 32.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 10000, 16000 Гц). Для отримання АЧХ і ФЧХ необхідно виконати аналіз спектру вихідного сигналу звукового тракту, вибрати опорну частоту (наприклад, 1000 Гц) та розрахувати відхилення рівня сигналу на інших частотах, що дає нерівномірність АЧХ. Для отримання ФЧХ розраховується різниця фаз між кожною спектральною складовою та опорною. Оскільки вимірювання АЧХ і ФЧХ відносні, по одній виборці сигналу, то мінімізуються похибки через флуктації коефіцієнту передачі звукового каналу, а також немає потреби в опорному сигналі для виміру ФЧХ. Останнє суттєво, наприклад, для вимірювання характеристик міжміських каналів звукового мовлення або трактів запису-відтворення магнітофонів.

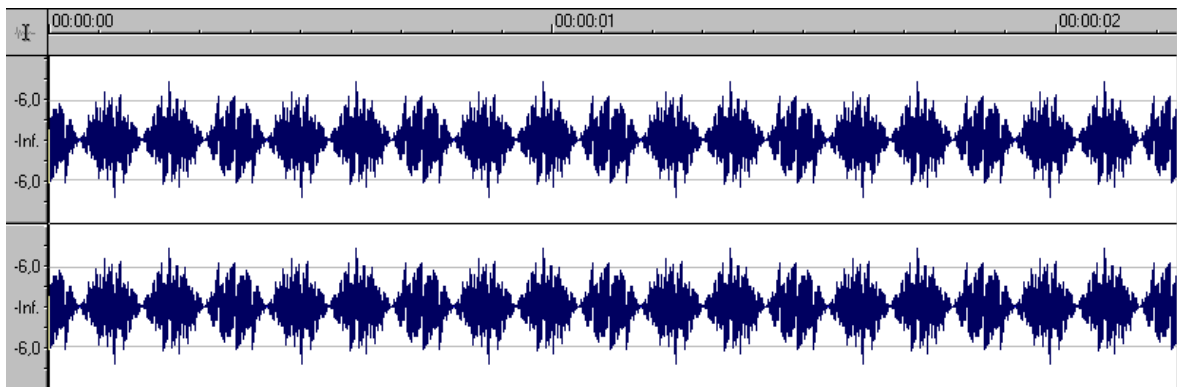


Рисунок 2 – Форма тестового сигналу

Для детальнішого аналізу форми АЧХ та виміру характеристики ГЧЗ пропонується так званий імпульсopodobний сигнал (ІПС), в якому число гармонічних складових порівняно з ПГС збільшено до 50÷150. Назва ІПС пояснюється формою осцилограми сигналу, наведеної на рис. 4. Як видно із спектру ІПС на рис. 5, спектральні складові заповнюють весь діапазон смуги частот 20 Гц – 20 кГц. При цьому АЧХ каналу передавання можна визначити у вигляді відношення отриманого сигналу $S'(t)$ до згенерованого $S(t)$:

$$\frac{S'(t)}{S(t)} = \frac{\sum_{i=1}^N A'_i \sin(2\pi f_i t)}{\sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t)}$$

при цьому відношення A'_i / A_i дозволить оцінити коефіцієнт передачі звукового тракту на відповідній частоті.

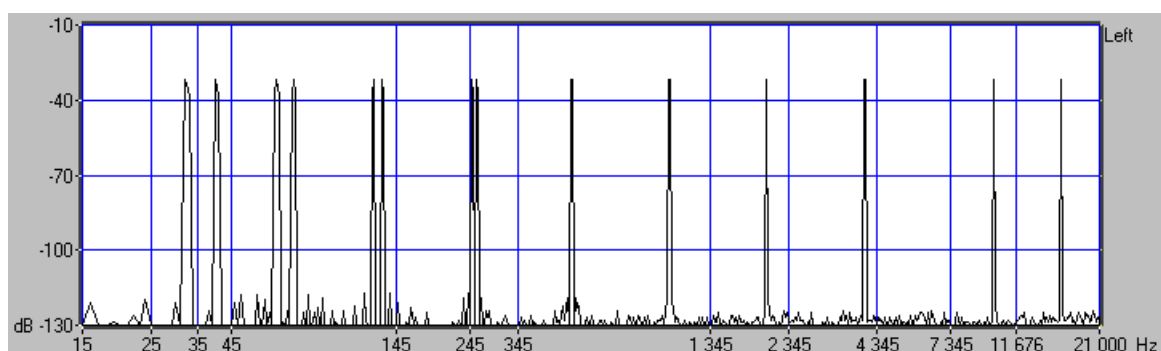


Рисунок 3 – Спектр тестового сигналу

Розрахунок ГЧЗ можливий за рахунок малого кроку по частоті між спектральними складовими. Характеристика групового часу затримки (ГЧЗ) показує різницю в часовій затримці сигналів різних частот, що проходять через звуковий тракт. ГЧЗ визначають як похідну по частоті від фазочастотної характеристики (ФЧХ):

$$G(f) = \frac{d\Psi(f)}{df},$$

де обчислення похідної замінюється обчисленням відношення приросту ФЧХ до приросту частоти на імпульсно-подібному сигналі ІПС.

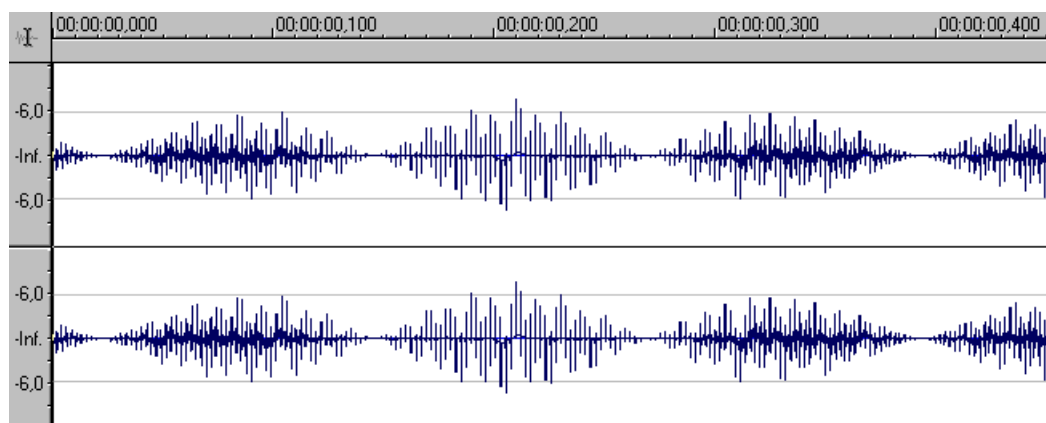


Рисунок 4 – Форма імпульсно-подібного сигналу

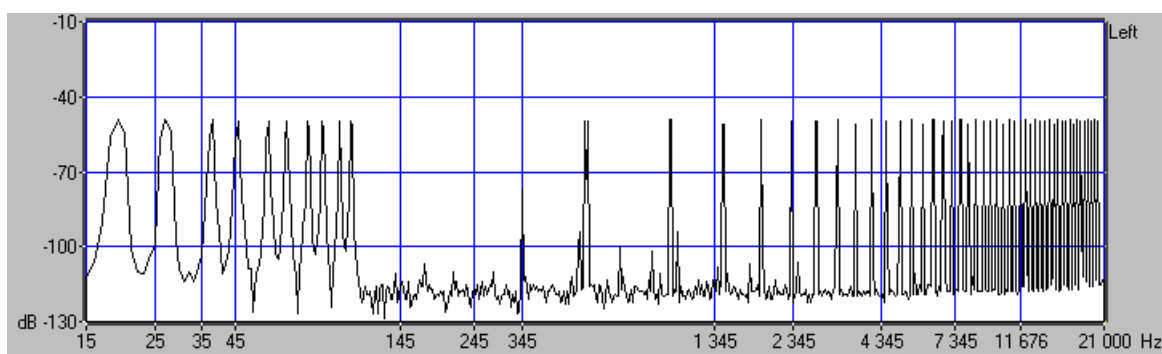


Рисунок 5 – Спектр імпульсно-подібного сигналу

Метод вимірювання АЧХ за допомогою ІПС наочно демонструє свої переваги при контролі параметрів трактів, що мають в своєму складі апаратуру компресії-декомпресії за методами

MPEG. Застосування компресії дозволяє суттєво зменшити полосу пропускання каналу, але зрозуміло, що це призводить до зниження якості сигналу. Вимірювання АЧХ таких каналів методами моногармонічного або частотно модульованого тестового сигналу не виявляє відхилень від норми. В той же час, в деяких випадках суб'єктивна оцінка на реальному звуковому сигналі не дозволяє оцінити АЧХ як таку, що задовольняє відповідним нормам.

Тестовий сигнал, що складається з багатьох спектральних складових є найбільш наближеним до реального звукового сигналу. Саме тому метод вимірювання за допомогою ПГС та ІПС дозволяє найбільш об'єктивно оцінити АЧХ тракту під час передачі звукового сигналу. На рис 5 наведено спектр ІПС після проходження через компресор-декомпресор MPEG-2 з швидкістю пропускання каналу 384 кБіт/с.

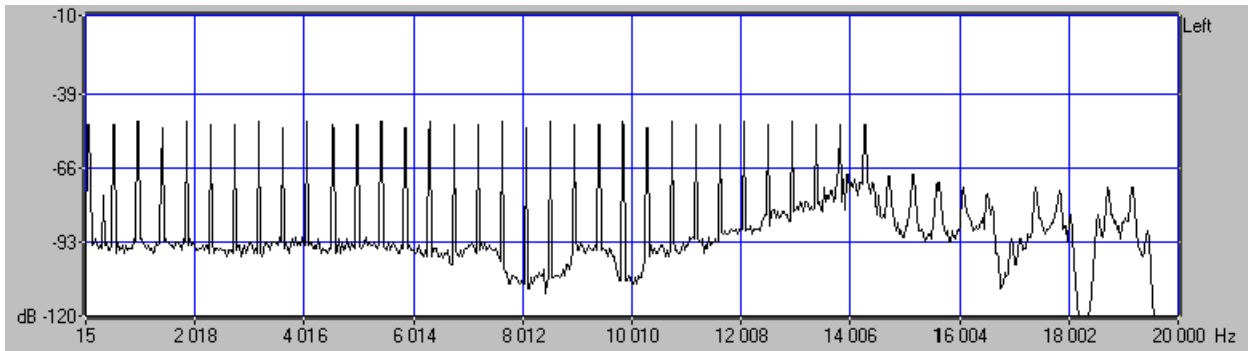


Рисунок 6 – Спектр імпульсо-подібного сигналу після проходження каналу зі стисненням

Авторами було проведено тестування різних методів компресії з різноманітними полосами пропускання, всі результати яких не можуть бути включені до цієї статті. Відзначимо лише, що найкращі результати показав метод компресії MPEG Layer 3. Спектр ІПС після проходження через компресор-декомпресор MPEG Layer 3 з швидкістю пропускання каналу 128 кБіт/с наведено на рис 7.

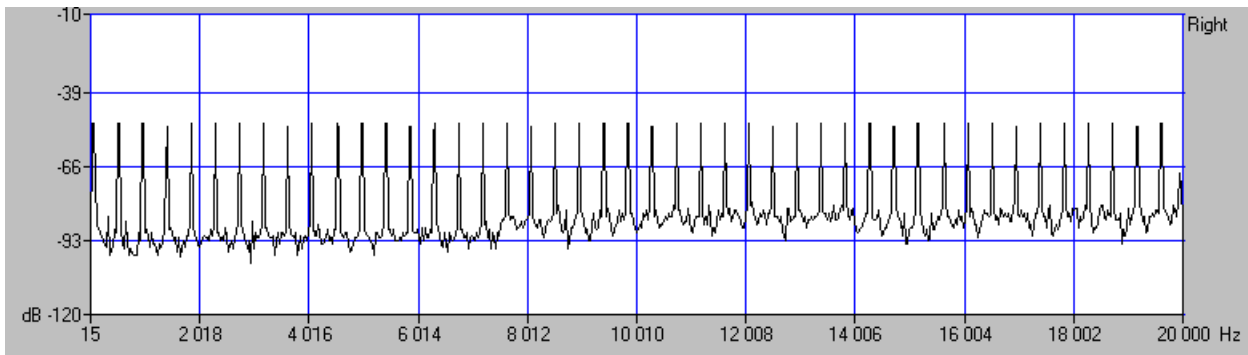


Рисунок 7 – Спектр імпульсо-подібного сигналу після проходження каналу зі компресор-декомпресором MPEG Layer 3

Технічна реалізація методів вимірювань з використанням полігармонічних сигналів можлива в системах з цифроаналоговим і аналого-цифровим перетворювачами (ЦАП і АЦП) та процесором цифрової обробки сигналів. Прикладом такої вимірювально-інформаційної системи є, розроблений за участю авторів, комп'ютерний аналізатор параметрів звукових трактів АПЗТ-02, зовнішній вигляд якого наведено на рис.8.

АПЗТ-02 призначений для автоматизованого виміру електричних характеристик трактів формування та передачі звукових програм радіомовлення та звукового супроводу телебачення, низькочастотних трактів радіоелектронної апаратури, магнітофонів, вимірювачів рівня, тощо. При вимірюванні параметрів звукових трактів АПЗТ-02 замінює собою до 14 окремих приладів: середнькватратичний вольтметр, селективний вольтметр, вимірювач АЧХ, ГЧЗ, фазометр, генератор низьких частот, вимірювач нелінійних спотворень, спектроаналізатор, частотомір, вимірювач інтегральних та психоакустичних шумів, детонometr, генератор для вимірювання параметрів квазіпікових індикаторів, вимірювач опору навантаження. АПЗТ-02 пройшов державну метрологічну атестацію і забезпечує всі вимірювання, що передбачені ГОСТ 11515 "Канали і тракти звукового мовлення. Основні параметри якості. Методи вимірювань".



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд АПЗТ-02

При вимірюванні АЧХ з застосуванням АПЗТ-02, полігармонічний сигнал розраховується як сума гармонічних складових, відтворюється за допомогою ЦАП та подається на вхід звукового тракту, щовимірюється. Вихідний сигнал тракту в АЦП аналізатора перетворюється в цифрову форму, процесор виконує швидке перетворення Фур'є і розраховує спектр сигналу. Визначення параметрів АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ здійснюється шляхом аналізу спектру. Для зменшення систематичних похибок в АПЗТ-02 здійснюється автокалібрування, під час якого визначається, а в подальших розрахунках враховується АЧХ і ФЧХ вимірювальних каналів.

Характеристики входів-виходів АПЗТ-02:

- вхід і вихід - симетричні, стереофонічні;
- діапазон робочих частот - 20 Гц - 20 кГц;
- вхідні діапазони вимірювань - від +18 дБ до мінус 30 дБ з кроком 6 дБ (0 дБ = 0.775 В еф.);
- вихідний рівень сигналу генератора - від +12 дБ до мінус 76 дБ з кроком 0.1 дБ;
- вхідний опір - 150 Ом, 200 Ом, 600 Ом, 100 кОм;
- вихідний опір - 0 Ом, 600 Ом.

Таблиця 1 – Основні характеристики, щоможуть бути визначені за допомогою АПЗТ-02 та їх діапазони

Характеристики	Діапазони значень
середньоквадратична напруга	від +20 до мінус 90 дБ
селективна напруга	від +20 до мінус 90 дБ
шуми інтегральні і псофометричні	від мінус 20 до мінус 90 дБ
рівень селективної перешкоди	від мінус 20 до мінус 90 дБ
частота вхідного сигналу	від 20 до 20000 Гц
амплітудно-частотна характеристика	від 20 до 20000 Гц
фазочастотна характеристика і різниця фаз	від мінус 90 до +90 градусів
груповий час затримки	від 0.5 до 50 мс
коефіцієнт гармонік	від 0.05 до 5%
коефіцієнт різницевого тону	від 0.05 до 5%
коефіцієнт інтермодуляційних спотворень	від 0.05 до 5%
рівень селективної перешкоди	від мінус 20 до мінус 90 дБ
захищеність від перехідних перешкод	від 30 до 80 дБ
захищеність від паразитної амплітудної модуляції	від 30 до 80 дБ
коефіцієнт детонації магнітофона	від 0.01 до 5%;
тривалість імпульсного сигналу для випробувань індикаторів	від 1 до 220 мс

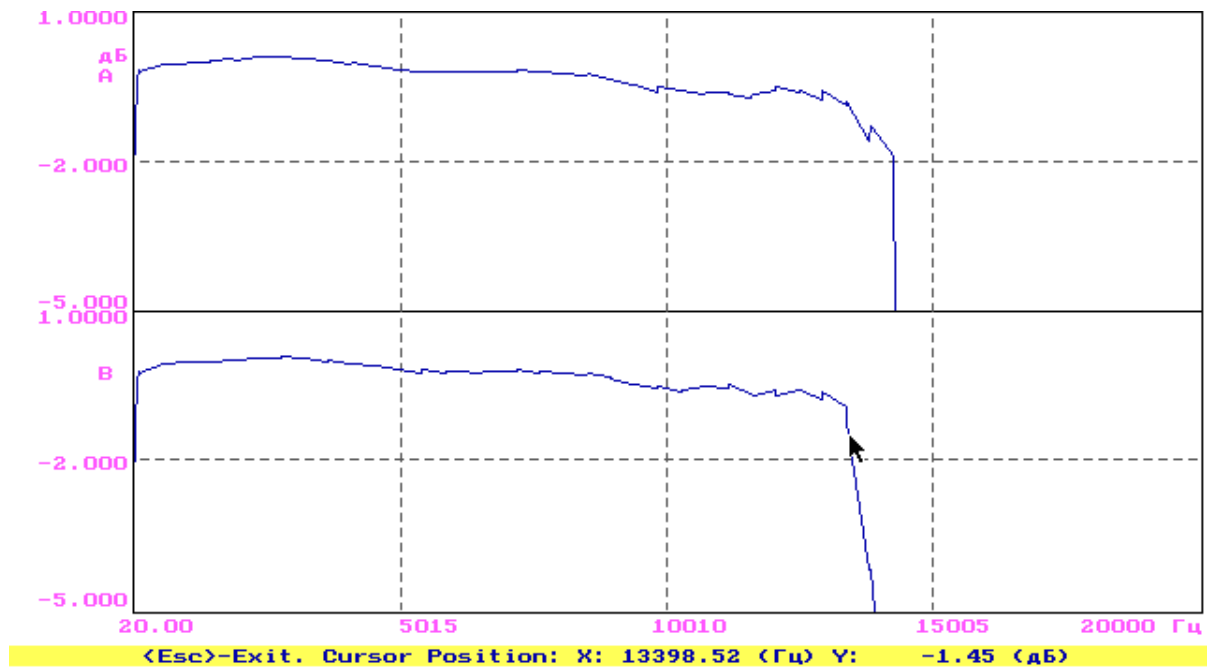


Рисунок 9 – АЧХ стереоканалів міжміського тракту звукового мовлення Київ–Одеса

Висновки:

1. Запропоновано методи полігармонійного вимірювання параметрів каналів передавання. Вони за рахунок наявності у складі тестового сигналу великої кількості гармонійних складових ($20 \div 150$) у одному сигналі складної форми, дозволяють швидко оцінити АЧХ, ФЧХ і ГЧЗ звукового тракту у всьому діапазоні робочих частот, а також отримати і інші характеристики, які наведено у табл. за один прохід пересилання тестового сигналу.
2. Запропонований пристрій має два канали, які дозволяють використовувати процедури самокоригування і за рахунок цього забезпечити високі метрологічні характеристики пристрою.
3. Запропонований полігармонійний метод, дозволяє адекватно оцінити реальну смугу пропускання каналів і трактів з цифровим ущільненням сигналів, оскільки на такому сигналі відслідковується обмеження психоакустичних методів ущільнення звуку.

Література

1. Азаров О. Д. Основитеорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 232 с.
2. Азаров О. Д. Двотактні підсилювачі постійного струму для багато розрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються: монографія / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – 156 с.
3. Азаров О. Д. Методи та засоби високоточного слідкувального аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю: монографія / О. Д. Азаров, О. В. Дудник. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 120 с.
4. Крупельницький Л. В., Азаров О. Д. Аналогові пристрої самокоригуючих АЦП для систем оброблення низькочастотних сигналів / Під редакцією Азарова О. Д. – Монографія – 2005.
5. ГОСТ 11515-91 Каналы и тракты звукового вещания. Основные параметры качества. Методы измерений.

Інформація про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – д. т. н., професор, декан факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету.

Гарнага Володимир Анатолійович – к. т. н., доцент, кафедра обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету.

Крупельницький Леонід Віталійович – к. т. н., доцент, кафедра обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету.

Позняк Дмитро Юрійович – провідний програміст НТЦ "Аналого-цифрові системи" Вінницького національного технічного університету.