УДК 681.841:621.375(045)

[1]**Ю. В. Пепа,** канд. техн. наук,
[2]**О. М. Кнурьов,** асист.

ПСИХОАКУСТИЧНІ КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ЗВУЧАННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ ЗВУКОВОЇ ЧАСТОТИ

[1]Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: pepa_yu@mail.ru
[2]Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iasy@nau.edu.ua

Розглянуто питання високоякісного звуковідтворення з урахуванням особливостей слухового сприйняття людини. Наведено результати досліджень якості звучання підсилювачів потужності звукової частоти високоякісної звуковідтворювальної апаратури.

Ключові слова: високоякісне звуковідтворення, акустика, звуковідтворювальна апаратура, поріг чутності, слух.

Вступ. Проблема високоякісного відтворення звуку давно турбує фахівців в галузі акустики. Раніше для оцінювання якості звучання висококласної звуковідтворювальної апаратури широко використовувався термін «висока якість відтворення звуку». Цей термін, на жаль, забутий, а якість звучання оцінюється за такими виміряними параметрами, як коефіцієнт гармонік ($K_г$), коефіцієнт інтермодуляційних спотворень ($K_і$), наявністю динамічних спотворень (ТІМ-спотворень) та іншими, описаними у працях [1; 2], але вони не дають повного й істинного уявлення про якість звучання того або іншого звуковідтворювального пристрою.

Постановка завдання. Під час проведення слухових експертиз перевага надається апаратурі не з кращими, а з гіршими параметрами. Це зумовлено тим, що наведені вище параметри обирають без урахування особливостей слуху людини. Психоакустичні дослідження [3] допоможуть знайти інший, більш оптимальний підхід до оцінювання якості звучання звуковідтворювальної апаратури.

Основний зміст роботи. Розглянемо криві, зображені на рис. 1.

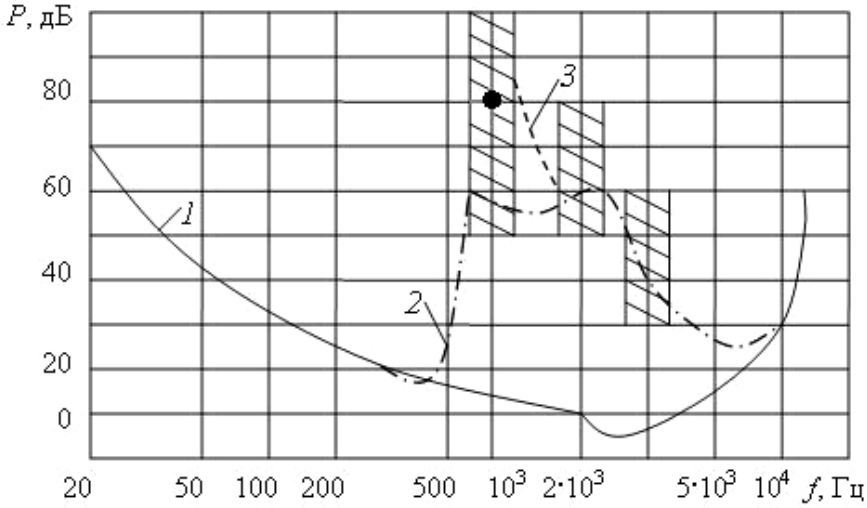

Рис. 1. Залежність абсолютного порога чутності звуку від частоти

Суцільною лінією *1* показано залежність абсолютного порога чутності (АПЧ) звуку від частоти. Ділянку вище від цієї кривої називають площиною чутності. На ній чорною точкою позначено чистий (синусоїдний) тон частотою 1 кГц і рівнем гучності 80 дБ. Проведемо

такий експеримент. Припустимо, що одночасно з цим тоном (назвемо його заважальним або маскувальним) буде звучати ще один зі змінною частотою й амплітудою (назвемо його вимірювальним). У діапазоні частот 20 … 500 Гц вимірювальні тони не будуть чутні доти, доки їхні рівні не перевищать рівні, обмежені кривою АПЧ. Як тільки це станеться, вимірювальні тони будуть чутні разом із заважальними. У цьому діапазоні АПЧ і поріг чутності тону під час маскування збігаються. В діапазоні частот 500 ... 1000 Гц вимірювальний тон сильно маскується заважальним (штрихпунктирна крива *2* на рис. 1). Щоб вимірювальний тон був чутний у цьому діапазоні, його рівень має бути набагато більшим від АПЧ, тобто під час маскування заважальним тоном поріг чутності вимірювального тону розміщується вище від кривої АПЧ. У діапазоні частот 1000...2000 Гц вимірювальний тон не буде чутний доти, доки його рівень не перевищить АПЧ на 50 дБ, причому, якщо його рівень буде збільшуватися й надалі, то чутним виявиться не він, а різницевий тон, частота якого менша від заважального тону з частотою 1 кГц. Це явище буде спостерігатися доти, доки рівень вимірювального тону не досягне деякого нового порога чутності, обмеженого штриховою лінією *3* (рис. 1), після чого поряд з різницевим і заважальним тонами стає чутним і вимірювальний. Обидва ці пороги варто розрізняти. В октаві, розташованій вище від частоти заважального тону, поріг чутності вимірювального тону завжди набагато вищий за поріг чутності різницевих тонів. Якщо частота вимірювального тону близька до основної, подвоєної або потроєної частоти заважального тону, то в широкому діапазоні рівнів (виділені штрихуванням на рис. 1) чутні биття. У діапазоні частот 2000...10000 Гц поріг чутності вимірювального тону розміщується вище від рівнів, обмежених штрихпунктирною кривою (рис. 1). За більш низьких рівнів чутний тільки заважальний тон. На найвищих частотах (10000...20000 Гц) маскувальна дія заважального тону зникає й вимірювальний тон стає чутним, як тільки його рівень перевищить АПЧ.

Криві пороги чутності вимірювального тону під час маскування його заважальним тоном з частотою 1 кГц та рівнями 30, 50, 70 і 90 дБ показано на рис. 2. Вимірювальний тон стане чутним тільки тоді, коли його рівень перевищить відповідний поріг чутності. Нижче від цих порогів буде чутний тільки заважальний тон. Діапазон маскування вимірювального тону звужується зі зменшенням рівня заважального тону.

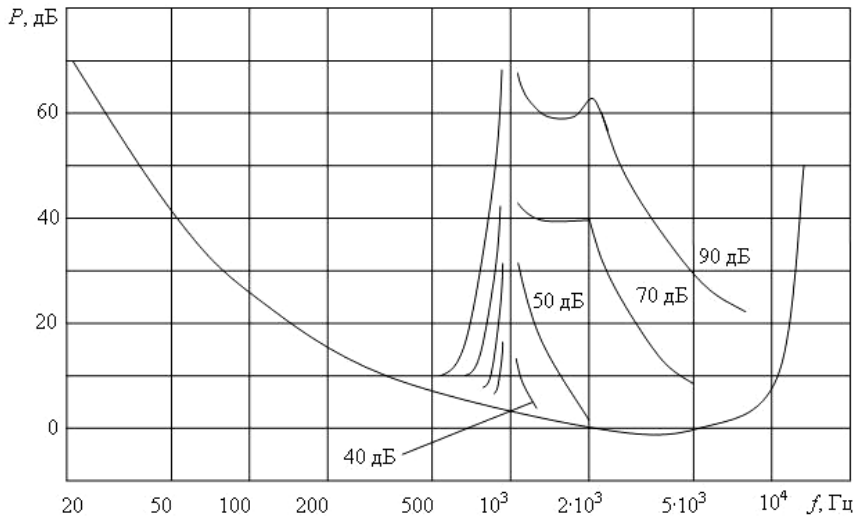

Рис. 2. Пороги чутності вимірювального тону у разі маскування його заважальним тоном з частотою 1 кГц

Розглянемо тепер, які мінімальні зміни рівня сприймаються слухом. Залежності порога чутності синусоїдного тону частотою 1 кГц та рівнями 40, 60, 80 і 90 дБ від глибини й частоти його модуляції синусоїдальним тоном змінної частоти показано на рис. 3, з якого

видно, що найбільш чутливий слух людини до частоти модуляції 3...4 Гц. На цій частоті, за рівня тону 90 дБ, слух сприймає глибину модуляції близько 1 %.

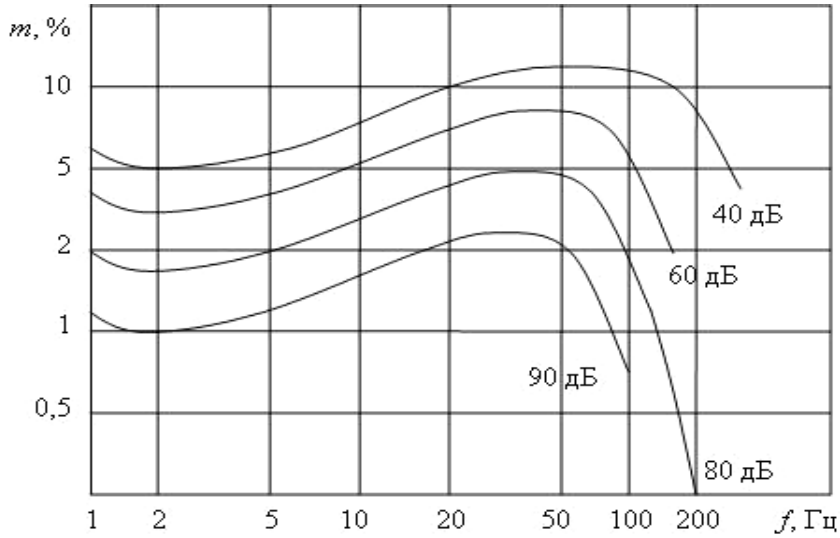

Рис. 3. Залежності порога чутності синусоїдного тону частотою 1 кГц від глибини й частоти його модуляції синусоїдним тоном змінної частоти

Аналіз кривих порогів чутності, показаних на рис. 1 і 2, дозволяє пояснити різке збільшення чутливості слуху до амплітудної модуляції частотою понад 200 Гц. Слухове сприйняття нижньої бічної частоти модуляції визначається в цій ділянці кривою АПЧ, ефект маскування при цьому мінімальний.

Під час проходження музичних і мовних сигналів через попередні підсилювачі звукової частоти й підсилювачі потужності змінюються фазові співвідношення між складовими співзвуччя, що проявляються у вигляді тимчасових спотворень. Порогова величина сприйнятого на слух тимчасового зсуву залежить від характеру звукового сигналу.

Проведемо експеримент. Пропустимо через підсилювач імпульсний звуковий сигнал, що містить високочастотну й низькочастотну складові. Через тимчасовий зсув між цими складовими тембр вихідного співзвуччя зміниться. За імпульсного характеру сигналу порогове значення слухового сприйняття тимчасового зсуву становить близько 2 мс.

Особливості слухового сприйняття звукового сигналу дозволяють зробити деякі висновки про допустимі значення $K_г$ і $K_і$.

1. Аналіз кривих, зображених на рис. 1 і 2, показує, що всі гармоніки з амплітудою, нижчою від рівня, обмеженого кривою *2*, будуть нечутні. Складається враження наявності великої кількості та значних за амплітудою гармонік вищих порядків. Наприклад, як видно з рис. 1, рівень 15-ї гармоніки може досягати рівня 30 дБ (тут і далі рівень гармонік зазначений відносно максимальної потужності сигналу частотою 1 кГц … 80 дБ). Однак це не відповідає дійсності, оскільки, по-перше, амплітуда допустимих з погляду слухового сприйняття гармонік швидко падає зі зменшенням рівня сигналу (рис. 2), наприклад, за рівня 50 дБ амплітуди гармонік, що роблять найбільший внесок у $K_г$ (з другої до шостої), мають бути нижчими за криву АПЧ, по-друге, сконструювати підсилювач звукової частоти, амплітуди гармонік якого повторювали б АПЧ, майже неможливо. Це все дійсне для одночастотного сигналу. У разі підсилення реального сигналу процеси виникнення продуктів нелінійності будуть набагато складнішими. Тому під час проектування підсилювального пристрою варто прагнути того, щоб спектр підсиленого сигналу був обмежений п’ятьма гармоніками. Згідно з рис. 1 рівні другої, третьої, четвертої й п’ятої гармонік не повинні перевищувати відповідно 30, 46 та 60 дБ, що відповідає $K_г = 3{,}32$ %.

Але настільки велике значення допустимого $K_г$ не повинно викликати ніяких ілюзій, оскільки воно фактично на 99 % визначається рівнем другої гармоніки, а розробники апаратури високої якості відтворення звуку розуміють, як важко сконструювати підсилювач з різким спадом амплітуд гармонік вищого порядку, до яких найбільш чутливий слуховий апарат людини. Саме ця особливість слухового сприйняття вказує на неприпустимість рекомендувати під час вибору $K_г$ підсилювача потужності звукової частоти (ППЗЧ) брати до уваги $K_г$ джерел сигналу (мікрофони, попередні підсилювачі, мікшери і т. ін.), а також гучномовців. Ці пристрої, на відміну від підсилювачів звукової частоти, не синтезують гармонік вищого порядку, а тому зумовлені ними спотворення менш помітні на слух.

Висновки щодо допустимого $K_і$ під час аналізу рис. 1 і 2 отримати ще простіше. Всі сигнали з частотами, що є різницею або сумою двох тонів, які не створюють биттів (тобто не потрапляють у заштриховані ділянки на рис. 1), повинні лежати нижче від рівня АПЧ, а це – 90 дБ (рис. 2). Такому рівню відповідає $K_і = 0{,}003$ % і саме це значення наведено в працях [1; 2]. Особливо це стосується різницевих сигналів, оскільки крутість спаду лівої частини кривої порога чутності *2* (рис. 1) суттєво вища від правої. Дійсно, якщо на вхід підсилювача подати два рівні за амплітудою сигнали з частотами, наприклад, 19 кГц і 20 кГц, заважальний сигнал сумарної частоти виявиться далеко за межами чутного діапазону частот, а різницевий з частотою 1 кГц буде добре чутний, якщо $K_і > 0{,}003$ %, причому його рівень тим вищий, чим більший $K_і$.

Порівняння необхідних значень $K_г = 3{,}32$ % і $K_і = 0{,}003$ % показує, що вимірювати потрібно не перший, а другий параметр. У крайньому випадку, можна обмежитися вимірюванням $K_г$, але в найбільш широкому діапазоні частот. Зростання цього коефіцієнта в діапазоні вищих звукових частот (10...20 кГц) неявно свідчить про велике значення $K_і$.

2. У разі використання нестабілізованих джерел живлення низькочастотні складові з частотами близько 50, 100 і 200 Гц виявляються промодульованими пульсаціями напруги випрямлювача. На слух це сприймається як биття. Особливо відчутно цей ефект проявляється за максимальної потужності ППЧЗ. Сприйнятливість слуху до такого роду спотворень ілюструє рис. 3. Очевидно наявністю цих спотворень можна пояснити той факт, що за більших амплітуд пульсацій «баси» матимуть «жорсткість». Глибина амплітудної модуляції визначається вихідним опором випрямлювача та коефіцієнтом пульсацій напруги живлення. Усунути цей ефект можна двома способами. Перший і самий очевидний – застосування стабілізатора. Однак створити стабілізатор на струм 10...15 А (в імпульсі) досить складно і економічно невигідно. Другий спосіб – збільшити глибину від'ємного зворотного зв'язку, що зумовить збільшення коефіцієнта підсилення ППЗЧ ($K_п$). Але з ряду причин і це також не є оптимальним варіантом.

В останні роки за кордоном ця проблема вирішується введенням додаткового (крім основного ланцюга $R2$, $R1$, що визначає коефіцієнт підсилення ППЗЧ за змінною напругою K_U) ланцюга частотно-залежного від'ємного зворотного зв'язку (рис. 4). Вона утворена операційними підсилювачами $DA1$ і $DA2$. На $DA2$ складено інтегратор з частотою зрізу

$$f_і = \frac{1}{2\pi R5C2}.$$

На $DA1$ складений інвертор і через резистор $R3$ сигнал додаткового від'ємного зворотного зв'язку надходить у ланцюг основного від'ємного зворотного зв'язку. Загальна частота зрізу обох ланцюгів від'ємного зворотного зв'язку становить:

$$f_{в.\,зв.\,з} = \frac{R2}{2\pi R5C2R3}.$$

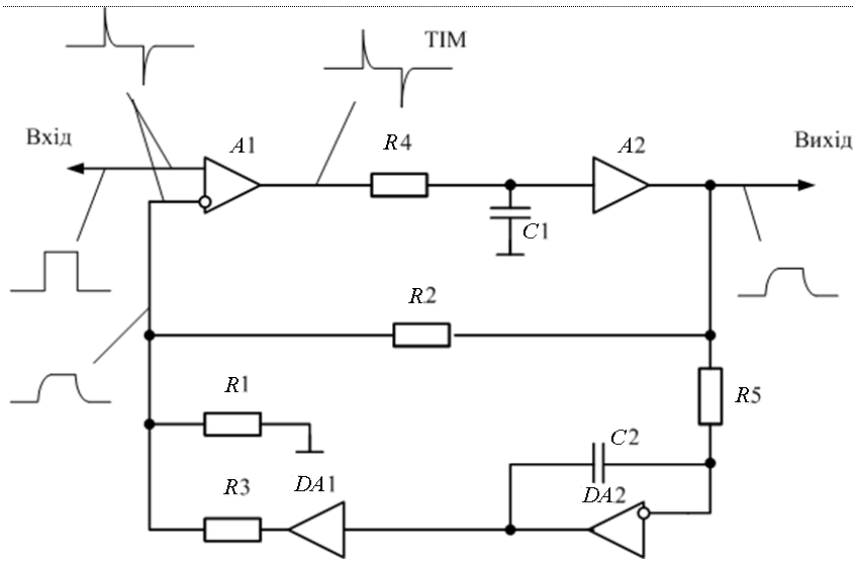

Рис. 4. Спрощена структурна схема типового ППЗЧ

На частоті сигналу $f > f_{\text{в. зв. з}}$ працює тільки ланцюг основного від'ємного зворотного зв'язку. Якщо $f = f_{\text{в. зв. з}}$, інтегратор починає поводитися як фільтр низьких частот першого порядку, що спричиняє збільшення глибини від'ємного зворотного зв'язку на 6 дБ на октаву. Зі зниженням частоти глибина від'ємного зворотного зв'язку збільшується й досягає граничного значення, зумовленого коефіцієнтом підсилення операційного підсилювача $DA2$, а також коефіцієнтом підсилення K_0 самого підсилювача, тобто дозволяє збільшити K_0 на кілька порядків тільки в діапазоні низьких частот.

Необхідне значення частоти $f_{\text{в. зв. з}}$ можна вибрати, керуючись залежностями, наведеними на рис. 3. Видно, що значення $f_{\text{в. зв. з}}$ має становити 2...5 Гц, оскільки вона відповідає найменшій чутливості слуху до сприйняття амплітудної модуляції.

Розглянемо тепер ті властивості ППЗЧ, які призводять до виникнення динамічних спотворень. Структурну схему типового ППЗЧ з осцилограмами сигналів у різних точках показано на рис. 4. Функції вхідного диференціального каскаду виконує підсилювач $A1$ із коефіцієнтом підсилення K_1. Фільтр низьких частот $R4C1$ формує однополюсну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) підсилювача з головним полюсом на частоті f_0 (рис. 5). Другий каскад являє собою підсилювач $A2$ із коефіцієнтом підсилення K_2. Весь підсилювач охоплений ланцюгом від'ємного зворотного зв'язку ($R2R1$).

Простежимо процеси, що відбуваються в ППЗЧ, якщо на його вхід подати імпульсний сигнал. Вхідний сигнал підсилюється першим каскадом з коефіцієнтом підсилення K_1, а оскільки зворотний зв'язок увімкнеться тільки після проходження сигналу через фільтр низьких частот $R4C1$ зі сталою часу

$$\tau = R4C1 = \frac{1}{2\pi f_0},$$

а більшість підсилювачів проектується на максимальне значення коефіцієнта підсилення $K_{\text{п}}$, то перший каскад неминуче обмежить сигнал, що до нього надійшов. Саме ця обставина є основною причиною виникнення динамічних спотворень.

Тут доречно повернутися до вибору $K_{\text{г}}$ і $K_{\text{і}}$. Річ у тім, що режим обмеження зумовлює додаткове збільшення кількості та енергії гармонік. Частина з них неминуче потрапляє в область частот більш низьких, ніж в якій маскування немає (на рис. 1 і 2 діапазон частот

нижчий за 1 кГц). Звідси й вимога проектувати підсилювачі, що створюють мінімальну кількість гармонік.

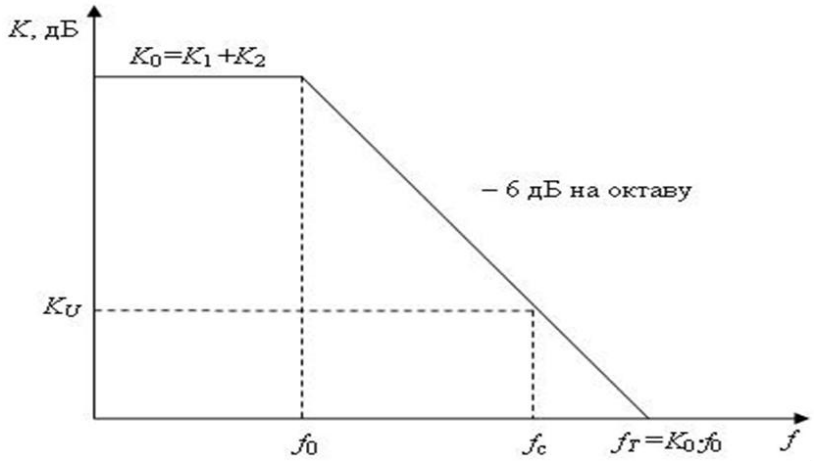

Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика ППЗЧ

Через якийсь час від'ємний зворотний зв'язок повністю увімкнеться і полюс АЧХ підсилювача з частоти f_0 зміститься на частоту f_c (рис. 5), що характеризує поводження ППЗЧ у сталому режимі.

Незважаючи на те, що слух сприймає тільки досить великі тимчасові спотворення (понад 2 мс), це не повинно бути приводом для оптимізму, оскільки таку затримку створює ФНЧ з головним полюсом АЧХ на частоті 79 Гц. Тому, навіть якщо виключити всі фактори, що впливають на виникнення динамічних спотворень, але використовувати ППЗЧ, АЧХ якого буде мати головний полюс на частоті $f_0 < 79$ Гц, тимчасова затримка буде перевищувати 2 мс і добре сприйматися на слух.

Основні результати досліджень. Основними методами запобігання динамічним спотворенням можуть бути зменшення глибини від'ємного зворотного зв'язку, збільшення частоти f_0, зниження коефіцієнта підсилення вхідного диференціального каскаду K_1 й досягнення необхідного підсилення K_p за рахунок другого каскаду K_2, збільшення динамічного діапазону каскадів $A1$ і $A2$. Треба, однак, мати на увазі, що зменшення глибини від'ємного зворотного зв'язку негативно позначиться на $K_г$ і $K_і$, а це потребує розроблення спеціальних високолінійних підсилювальних каскадів. Слід зважати на зменшення глибини від'ємного зворотного зв'язку з підвищенням частоти. Наприклад: $f_0 = 1$ кГц, $K_0 = 80$ дБ, $K_U = 30$ дБ (рис. 5). Тут глибина від'ємного зворотного зв'язку на частоті 20 кГц становить 24 дБ, а на частоті 40 кГц – усього 18 дБ, що вказує на неприпустимість великої кількості гармонік, компенсувати які неможливо через недостатнє підсилення в петлі від'ємного зворотного зв'язку.

Значення виміряних аналізатором спектра СК4-56 амплітуд гармонік і розраховані за ними значення $K_г$ для диференціального підсилювального каскаду на мікросхемі, каскаду на ламповому тріоді та каскаду, виконаного на парі комплементарних транзисторів, з'єднаних за схемою емітерного повторювача, що працюють у режимах AB та A, наведено в таблиці.

Перехід від режиму AB до A зменшує $K_г$ у чотири рази, що дозволяє зменшити K_0 ППЗЧ на 13 дБ і як наслідок збільшує f_0 на дві октави. Вимозі одержання монотонно спадного ряду амплітуд гармонік найбільше відповідає каскад на ламповому тріоді. Сприятливий спектр гармонік, більша лінійність і, як наслідок, менша глибина від'ємного зворотного зв'язку значною мірою визначають «м'якість» звучання лампових підсилювачів.

Значення виміряних аналізатором спектра СК4-56 амплітуд гармонік і розрахованих за ними значень $K_г$

Вихідний каскад	Вихідна напруга (режим), В	Рівень гармонічних складових, дБ						Сумарний коефіцієнт гармонік, %
		2	3	4	5	6	7	
К159НТ1Б	4,5	– 70	– 26	– 70	– 60	– 72	– 66	4,45
	3	– 66	– 36	– 66	– 66	– 78	– 70	1,6
	1	– 62	– 58	–	–	–	–	0,16
6Н2П	10	– 46	– 52	– 70	– 82	–	–	1
	5	– 50	– 64	– 70	–	–	–	0,33
	2	– 62	–	–	–	–	–	0,085
КТ814, КТ815	(АВ)	– 38	– 42	– 80	– 48	– 56	– 58	1,59
	(А)	– 50	– 56	– 60	– 62	– 68	–	0,38

Висновки.

1. Значення $K_г$ і $K_і$ повинні узгоджуватися з рекомендаціями психоакустики, а розподіл гармонік необхідно вимірювати аналізатором спектра або, подаючи на вхід ППЗЧ двочастотний сигнал (19 і 20 кГц однакової амплітуди), вимірювати компоненти спотворень у діапазоні різницевих частот 1...10 кГц або в крайньому випадку на одній частоті 1 кГц.

2. Особливу увагу необхідно приділити вимірюванню динамічних характеристик ППЗЧ і всього тракту.

3. Прагнути до створення найбільш лінійних підсилювальних ланцюгів, що дозволять зменшити глибину від'ємного зворотного зв'язку і знизити небезпеку виникнення динамічних спотворень.

4. Загальне уявлення про якість ППЗЧ може дати такий експеримент. Від'єднавши високочастотну головку акустичної системи та замінивши її резистором еквівалентного опору більш високої потужності, подати на вхід ППЗЧ два тони однакових амплітуд у діапазоні частот 20...30 кГц з різницею частот 1...2 кГц. Рівень відтвореного акустичною системою звуку і буде характеризувати значення $K_г$ і $K_і$.

Список літератури

1. *Дідковський В. С.* Основи архітектурної та фізіологічної акустики: навч. посіб. / В. С. Дідковський, С. А. Луньова. – К.: Наук. думка, 2001. – 424 с.
2. *Грінченко В. Т.* Основи акустики: навч. посіб. / В. Т. Грінченко, І. В. Вовк, В. Т. Маципура. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с.
3. *Petri-Larmi M.* Psichoacoustic Deleetion Threshold of Transient Intermodulation Distortion / M. Petri-Larmi, M. Otala, J. Lammasmiemi // Journal of the Audio Engineering Society. – 1980. – N 28. – P. 98–104.

Ю. В. Пепа, А. Н. Кнурёв

Психоакустические критерии качества звучания усилителей мощности звуковой частоты

Рассмотрены вопросы высококачественного звуковоспроизведения с учетом особенностей слухового восприятия человека. Приведены результаты исследований качества звучания усилителей мощности звуковой частоты высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуры.

Y. Pepa, A. Knurev

Psychoacoustic quality criteria sounding power amplifier audio frequency

The problems of Hi-Fi view of features of human auditory perception, as well given as the results of testing of sound quality audio power amplifiers Hi-Fi reproducing apparatus.