

СТІВЕН ВІТТ

# **ЯК МУЗИКА СТАЛА ВІЛЬНОЮ**

**Цифрова революція  
та перемога піратства**

«НАШ ФОРМАТ» · Київ · 2017

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

# ЗМІСТ

Вступ .....	9
Розділ 1 .....	14
Розділ 2 .....	40
Розділ 3 .....	53
Розділ 4 .....	74
Розділ 5 .....	87
Розділ 6 .....	100
Розділ 7 .....	115
Розділ 8 .....	130
Розділ 9 .....	145
Розділ 10 .....	167
Розділ 11 .....	177
Розділ 12 .....	198
Розділ 13 .....	212
Розділ 14 .....	225
Розділ 15 .....	244
Розділ 16 .....	266
Розділ 17 .....	280
Розділ 18 .....	293
Розділ 19 .....	312
Розділ 20 .....	322
Епілог .....	338
Коментар до джерел .....	347
Подяки .....	352

[Купити книгу на сайті kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

## Розділ 1

**СМЕРТЬ ФОРМАТУ** мрз проголосили в конференц-залі в німецькому місті Ерлангені навесні 1995 року. Група експертів, які мали би бути неупередженими, остаточно піднесли гарбуза цій технології, віддавши перевагу її вічному супернику — формату мр2. Це був кінець, і винахідникам технології мрз це було відомо. Вони втратили державне фінансування, їхні корпоративні спонсори від них відмовилися і, попри чотирирічну рекламну кампанію, їхнім форматом користувався лише один довгостроковий клієнт.

Увага в конференц-залі була прикута до Карлгайнца Бранденбурга, який був рушійною інтелектуальною силою цієї технології й лідером мрз-команди. Шлях до цієї технології було вказано ще в дисертації Бранденбурга, і протягом останніх восьми років він працював на комерціалізацію своїх ідей. Амбітний і розумний, він умів заражати людей своїм баченням музичного майбуття. Під його керівництвом працювали п'ятнадцять інженерів, і він розпоряджався бюджетом досліджень у мільйони доларів. Однак після щойно проголошеного вироку здавалося, що він спровадив свою команду на кладовище.

Бранденбург не мав командирської фізичної статури. На зріст він був дуже високий, але горбився і вражав чудернацькою жестикуляцією й мімікою. Він постійно гоїдався на підборах, похитуючи своє довготелесе тіло вперед-назад, а коли говорив, кивав головою, ніби обводячи нею круги м'яких контурів. Його темне волосся було задовгим, вічна нервова усмішка виставляла напоказ невеличкі криві зуби, з-під шарнірних окулярів виглядали вузькі темні очка, а зі скуйовдженої бороди стирчали окремі пасма типу бакенбардів.

Він говорив стиха, довгими граматично бездоганними реченнями, перемежованими короткими, гострими вдихами. Був ввіч-

ливий, неймовірно доброзичливий і завжди прагнув, щоб усі почувалися затишно, але від цього все тільки поверталось на гірше. Говорячи, він, як правило, зупинявся на практичних питаннях, і, мабуть, відчуваючи нудьгування з боку слухачів, вряди-годи підсилав перцю до своєї повзучої технічної мови недотепними заялженими жартами. У його особистості поєднувалися дві потужні всеббивчі сили: скептицизм інженера й національно-специфічний консерватизм, так званий «typisch Deutsch» («типово німецький») менталітет.

А втім, він був блискучим. Його математичний талант був неперевершеним, і він тримав сучасників у полоні свого чару. Хай навіть то були найкращі знавці найскладніших галузей науки і техніки, які все життя перебували у сферах найбільшої конкуренції поблизу самого вершечка. Зазвичай вони аж ніяк не слабували на інтелектуальну скромність, однак, коли заходилося про Бранденбурга, їхня зарозумілість якось нишкла, і, стишуючи голос, вони вдавалися до спокійнісіньких, ба й сповідних тонів. «Він дуже добре розуміється в математиці», — казав один. «Він таки насправді досить розумний», — говорив другий. «Він розв'язав проблему, якої я не спромігся вирішити», — визнавав третій, а це — для інженера! — було найжахливішим з усіх можливих зізнань\*.

Діставши від опонента якесь дражливе викличне запитання, Бранденбург зупинявся, примружувався, а потім піддавав це критичне зауваження гострому науковому спростуванню. У разі незгоди його голос ставав майже нечутним, а, відповідаючи, він був обережний до крайнощів, намагаючись ніколи не висловлювати жодного твердження без опертя на фактичні дані. Виступаючи в конференц-залі перед комітетом зі своїм кінцевим запереченням, він вимовляв слово «мрз» пошепки.

Поразка завжди буває гіркою, але ця була особливо прикрою, бо, пропрацювавши тринадцять років, Бранденбург зумів вирішити одну з великих, доти не розв'язаних проблем у галузі цифрового звукозапису. Історія дослідження, яке взяв і відкинув комітет, на-

---

\* Усі цитати належать колегам Бранденбурга з Інституту Фраунгофера. Остання — Зайцеру.

лічувала вже декілька десятиріч, бо про щось на зразок формату мр3 інженери теоретизували, ще починаючи від кінця 1970-х років. Тепер із цього каламутного наукового болота виринуло дещо прекрасне, вишуканий продукт довгої дослідницької історії, що охопила три покоління вчених. Тож не хвилюватися в цьому залі могли хіба декілька босів.

Старт на цьому шляху дав Бранденбургові «хрещений батько» його докторської дисертації — голомозий гучногосий інженер-комп'ютерник на ім'я Дітер Зайцер. Та й сам Зайцер був, своєю чергою, багато чим зобов'язаний колишньому науковому керівникові власної дисертації: то був навіжений дослідник Ебергард Цвіккер, який став батьком грохи темної дисципліни, так званої «психоакустики» — наукового дослідження сприймання людиною звуку. Зайцер був колишній Цвіккерів протеже, його піддослідний акустичний «кролик», і, найголовніше, його безжалний опонент\*. Упродовж майже цілого десятиріччя ці двоє зустрічалися щоробочого дня після обіду, аби пограти в настільний теніс. Протягом односторонньої гри Цвіккер натаскував свого учня в порогових кривих людського сприймання\*\*, поціляючи йому в голову пінг-понговими кульками. Головне Цвіккерове відкриття, здобуте шляхом кількадесятирічного досліджування реальних піддослідних учасників експериментів, полягало в тому, що людське вухо працює зовсім не так, як мікрофон. На відміну від мікрофона, вухо — це адаптивний орган, природним добором призначений для того, щоб: 1) чути й інтерпретувати людське мовлення; а також 2) бути системою раннього попередження про величезних м'ясоїдних тварин.

Вухо працює добре лише настільки, наскільки це потрібно, щоб досягти саме цих цілей, і не більше. Тож воно отримало у спадок певні анатомічні вади, і Цвіккеріві дослідження виявили несподівано великі масштаби слухових помилок. Наприклад, кожна людина здатна розрізнити два тони, узяті водночас на відстані півто-

\* Слід зазначити, що Цвіккер також мав учителя: ним був його співавтор Ріхард Фельдткеллер. — Прим. перекл.

\*\* Детальну інформацію див. у книжці: Eberhard Zwicker and Richard Feldtkeller. The Ear as a Communication Receiver. — Acoustical Society of America, 1999.

нового чи більшого звуковисотного інтервалу, проте Цвіккер виявив, що, переміщаючи тони за музичною висотою ближче один до одного, можна обдурити слух, примусивши його почути нібито тільки один тон. Цей ефект особливо дієвий, коли нижчий тон голосніший, ніж вищий. Аналогічно будь-який слухач розрізнить два клацання, якщо друге клацне за півсекунди після першого, але Цвіккер зауважив, що, скорочуючи цей часовий інтервал до кількох мілісекунд, можна обдурити вухо так, щоб воно поєднувало два клацання в одне. І в цьому випадку важить порівнянне збільшення гучності: що голоснішим є одне з клацань, то виразнішим буде ефект. Сукупна дія цього «психоакустичного маскування» означає, що слухова реальність, як її чують люди, є радше фікцією — чимось, схожим на вигадку.

Із часом Зайцер почав перегравати свого шефа. Цвіккер був анатом, а його ідеї були продуктами аналогової епохи. Натомість Зайцер був науковцем у галузі точних наук і комп'ютерної інформатики, він передбачав майбутню еру цифровізації. Зокрема він здогадувався, що використання питомих вад людського вуха, які досліджував Цвіккер, здатне уможливити високоточний запис музики за допомогою дуже малих обсягів інформації. Завдяки цьому унікальному прогнозу, він угледів незвичайну перспективу. Коли 1982 року відбувся дебют компакт-дисків, інженерна спільнота святкувала їхню появу як одне з найважливіших досягнень в історії звукозапису. Зайцер, практично сам-один, розглядав цей факт як кумедне й непомірне надуживання. Там, де комерційна реклама обіцяла «Ідеальний Звук Назавжди»\*, Зайцер побачив максималістське сховище непотрібної інформації, більша частина якої ігнорується людським вухом. Він знав, що більшу частину інформації на компакт-диску можна відкинути — бо слухова система людини вже робить це сама.

Того самого року Зайцер подав заявку на патент цифрового музичного програвача. Фактично, він запропонував елегантнішу мо-

---

\* Рекламний слоган компанії «Philips» на її демонстраційному компакт-диску 1982 року був: «Чистий, Досконалий Звук Назавжди». Цей диск містив записи Елтона Джона та гуртів «Dire Straits» і «Dutch Swing College Band».

дель дистрибуції, за якою споживачі мали телефоном з'єднуватися з централізованим комп'ютерним сервером, а потім за допомогою допоміжної цифрової клавіатури замовляти музику, яка надходила б до них новими цифровими телефонними лініями, які Німеччина якраз починала встановлювати. Замість штампувати мільйони компакт-дисків, укладати їх у конверти, а потім розповсюджувати через магазини, будь-яку інформацію можна було б захвати в одній електронній базі даних і діставати її звідти в разі потреби. Передплатне обслуговування такого типу могло б оминати різноманітні вади й неефективність фізичної дистрибуції, підключаючи стереосистему безпосередньо до телефона.

Заявку на патент було відхилено. Перші цифрові телефонні лінії були примітивні, і величезна кількість акустичної інформації, розміщена на компакт-диску, ніколи не змогла б утиснутися в настільки вузький канал. Аби Зайцера схема запрацювала, файли на диску мали скоротитися до однієї дванадцятої їхнього початкового обсягу\*, але жоден відомий спосіб стискання даних і близько не міг сягнути цього рівня. Протягом кількох років Зайцер бився з патентним експертом, посилаючись на важливість Цвіккеревих результатів, але без фактичної реалізації ситуація була безнадійною. Зрештою, він відкликав свою заявку.

Однак Зайцер не полишив своєї ідеї. Якщо Цвіккер уже закартографував обмеження людського вуха, то залишалося кількісно визначити ці обмеження математичними методами. Сам Зайцер аж ніяк не був здатен вирішити цю проблему, але в цьому він не відрізнявся від решти дослідників, які безуспішно намагалися зробити це. Проте він скерував і надихнув власного протеже до

---

\* Цифрова інформація зберігається за допомогою одиниць двійкової системи, що можуть набувати значення або цифри нуль (0), або цифри один (1): кожне таке окреме значення зветься «бітом». Бітрейт аудіокомпакт-диска, тобто швидкість передавання бітів з аудіокомпакт-диска або на нього, дорівнює 1 411,2 кілобіт на секунду (кбіт/с) — інакше кажучи, збереження однієї секунди стереозвучання потребує 1 411 200 бітів. Перші цифрові телефонні лінії в Німеччині передавали інформацію зі швидкістю 128 кбіт/с — тобто вони могли передавати 128 тисяч біт на секунду. Таким чином, бітрейт аудіо-компакт-диска був у 11,025 раза більшим, ніж потужність каналу передавання даних. Як консервативний інженер, Зайцер округлив це число в більший бік до дванадцяти.

розв'язування цієї складної проблеми: цим протече був молодий студент електричної інженерії Карлгайнц Бранденбург, один з найвидатніших розумників, які коли-небудь траплялися в Зайцеровому житті.

Подумки Бранденбург нерідко питав сам себе, чи Зайцер за ціле десятиріччя грав в настільний теніс з ексцентричним отологом-експериментатором, бува, не з'їхав з глузду. У цифрову епоху інформація зберігається у двійкових одиницях, що дорівнюють нулю або одиниці, — так званих «бітах», і метою стискання є використання якнайменшого числа цих бітів. Для зберігання однієї секунди стереозвучання акустичний компакт-диск використовує понад 1,4 мільйона бітів. Зайцер хотів ту саму секунду зберегти з допомогою 128 тисяч бітів.

Спершу ця мета здавалася Бранденбургові абсолютним безглуздом — це все одно що намагатися сконструювати автомобіль, маючи бюджет у дві сотні доларів. Утім, водночас він уважав її гідною метою для власних амбіцій. Наступні три роки він пропрацював над цією проблемою, аж раптом на початку 1986 року йому в око впав ніколи раніше не зачеплений напрямок досліджень. Назвавши це осяяння «аналізом через синтез», наступні кілька тижнів він майже не спав, створюючи набір математичних інструкцій про те, який чином розподіляти ці дорогоцінні біти.

Він розпочав з подрібнювання звучання. За допомогою «смплера» він розділив вхідний звук на частки секунди. Потім, використовуючи набір, або банк, фільтрів, він додатково відсортував звучання по різних ділянках частотного діапазону (набір фільтрів розділяє звучання у спосіб, аналогічний тому, як призма розбиває світло). Результатом була часово-частотна координатна сітка, що складалася з мікроскопічних фрагментів звучання, відсортованих по вузьких частотних смугах, — акустична версія пікселів.

Далі Бранденбург спромігся «навчити» комп'ютер спрощувати ці звукові «пікселі», використовуючи чотири психоакустичні трюки Цвіккера.

Перше. Цвіккер довів, що людський слух краще сприймає певний діапазон звукових частот, який приблизно відповідає звуковому діапазону людських голосів. За його межами, у вищому й ниж-



чому регістрах, слухове сприймання гіршає, особливо у вищому регістрі. Це означає, що по крайніх ділянках звукового спектра можна обмежитися меншою кількістю бітів.

Друге. Цвіккер показав, що тони, близькі за музичною висотою, як правило, нівелюють один одного. Зокрема нижчі тони покривають вищі, тож, якщо оцифровується музика, зінструментована шляхом дублювання, наприклад, якщо віолончель дублює скрипку в нижчій октаві, то на скрипку можна віддати меншу кількість бітів.

Третє. Цвіккер довів, що слухова система гамує шум після гучного клацання чи удару. Тож якщо оцифровується музика, у якій, скажімо, щотакту б'ють у тарілки, то на перші кілька мілісекунд після удару можна віддати меншу кількість бітів.

Четверте — і це може особливо здивувати — Цвіккер продемонстрував, що слухова система гамує шум також *перед* гучним клацанням. Це відбувається тому, що вухо потребує кілька мілісекунд для опрацювання звукової інформації, сприйнятої органом слуху, але це опрацювання може бути перерване раптовою появою гучнішого шуму. Тож, повертаючись до прикладу ударів у тарілки, меншу кількість бітів можна призначити також кільком мілісекундам безпосередньо перед ударом.

Спіраючись на досвід кількох десятиріч емпіричних досліджень слуху, Бранденбург спромігся «наказувати» бітам, куди вони мають іти. Утім, це був лише перший крок. Головним досягненням Бранденбурга було те, що він з'ясував, що цей процес може бути ітеративним, «раз-у-разним», тобто його можна повторювати багато разів. Інакше кажучи, можна взяти результат алгоритмового розподілу бітів інформації, завантажити його для нового алгоритмового розподілу й запустити процес знову. І це можна робити стільки разів, скільки хочеться, щоразу зменшуючи кількість витрачених бітів. У результаті обсяг інформації в акустичному файлі скорочується настільки, наскільки вам треба. Ясна річ, якість звучання після цього гіршає — власне, вона гіршає з кожним наступним запуском алгоритму так само, як це відбувається під час копіювання копії або перезапису касети в четвертому поколінні. Насправді, якщо запустити цей процес мільйон разів, у кінцевому підсумку буде отримано не більше, ніж один біт. Проте якщо відшукати правильний

баланс, можна водночас і стиснути звукову інформацію, і зберегти високу точність, використовуючи лише ті біти, що, як вам відомо, насправді чує людське вухо.

Звичайно, не в усіх музичних творах використовується дуже складна інструментація. Концерт для скрипки з оркестром може мати всілякі психоакустичні надмірності, яких немає у творі на скрипку соло. Якщо немає ні ударів у тарілки, ні маскуванню скрипки віолончеллю, ні звукової інформації у високому регістрі, усього того, що можна було б піддати спрощуванню, то залишаються лише самі чисті тони, і тут уже ніде сховатися. Що мав Бранденбург робити далі? Він зумів зменшити кількість бітів, отриманих від його методу стискання, завдяки другому, зовсім інакшому методу.

Цей метод, названий «Гаффмановим кодуванням», ще 1950 року розробив американський комп'ютерний учений-новатор Дейвід Гаффман у Массачусетському технологічному інституті. Працюючи на світанку інформаційної ери, Гаффман зауважив, що, бажаючи заощадити біти інформації, треба шукати так звані патерни, або шаблони, бо шаблони, за визначенням, повторюються. Це означає, що замість знову й знову віддавати біти на якийсь звуковий шаблон щоразу, коли він трапляється, слід віддати їх на нього один раз, а потім за потреби просто посилатися на той самий шаблон. Адже, з погляду теорії інформації, у скрипковому соло немає нічого, крім вібрації струн, яка складається з передбачувано повторюваних звукових шаблонів, що лунають у повітрі.

Ці два методи ідеально доповнюють один одного: алгоритм Бранденбурга пасує до складного шуму, компоненти якого підлягають взаємному маскуванню; метод Гаффмана підходить до чистих, простих тонів. Сукупний результат об'єднав результати багатьох десятиріч досліджень у галузі фізичної акустики й людської анатомії з основними принципами теорії інформації та складної вищої математики. Під середину 1986 року Бранденбург уже написав елементарну комп'ютерну програму, яка забезпечувала робочу демонстрацію цього підходу. У його кар'єрі це було особливе досягнення: перевіреним методом для зберігання акустичної інформації в обсягу, достатньому для режиму найсуворішої економії бітів. У той час йому виповнився тридцять один рік.