

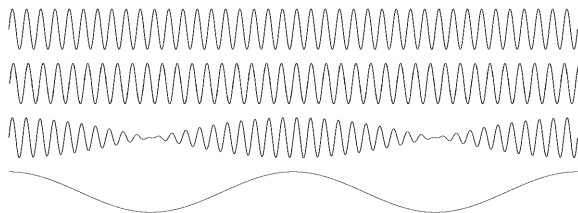
# Analogové elektronické nástroje

---

**E**lektronické nástroje generují zvukové kmity bez použití mechanických pohyblivých dílů, jejich generátory vytvářejí elektrické kmity pomocí vhodně zapojených elektrických obvodů. U analogových nástrojů jsou generované a dále zpracováváné spojitě elektrické kmity přímou analogií kmitů zvukových. Celá struktura analogového nástroje mnohdy bývá analogií uspořádání či funkce mechanické soustavy tvořící pomyslný mechanický nástroj.

První přístroj pro generování zvuku na čistě elektronickém principu, který by bylo možné označit za hudební nástroj, sestrojil roku 1899 britský fyzik William Du Bois Duddell (1872–1917). Při jeho konstrukci použil neobvyklý princip generování a vyzářování zvuku pomocí elektrického oblouku. Podobný nástroj postavil v roce 1911 také W. Burstyn. Další elektronické hudební nástroje již obsahovaly elektronkové oscilátory.

V roce 1901 kanadský vynálezce Reginald Aubrey Fessenden (1866–1932) zjistil, že interferencí dvou vysokofrekvenčních signálů s blízkými frekvencemi mohou vzniknout nízkofrekvenční zázněje. Tento jev použil při konstrukci telegrafního radiového přijímače, u kterého přijímaný signál před detekcí směřoval se signálem vnitřního oscilátoru. Nový přijímač dosahoval výrazně vyšší citlivosti než přijímače běžné konstrukce. Přístroj nazval heterodyn (hetero = jiný, dynamis = síla), protože při detekci signálu vysílače se využívá energie druhého oscilátoru.



Vznik záznějů při interferenci dvou signálů

Vzniku záznějů s frekvencí ve slyšitelné oblasti při interferenci signálů dvou oscilátorů si povšimli i další konstruktéři, např. Lee de Forest, Lev Těrmén, Maurice Martenot, Nicolas Obuchov nebo Armand Givelet, a využili

tento jev při konstrukci hudebních nástrojů. Frekvence záněže je rovna rozdílu frekvencí obou oscilátorů. Pokud je frekvence obou oscilátorů vysoká, stačí k velkému přeladění výsledného zvuku jen malá relativní změna frekvence jednoho z oscilátorů. U záněžových nástrojů lze proto snadno dosáhnout velkému frekvenčnímu rozsahu, nastávají však většinou obtížně odstranitelné problémy se stabilitou frekvencí vytvářených tónů, a tedy i s udržením přesného ladění. Novější nástroje proto používají stabilní oscilátory generující přímo signály s požadovanou frekvencí.

Ve 20. letech bylo vytvořeno mnoho monofonních nástrojů, z nichž některé, jako např. *Theremin*, *Martenotovy vlny* nebo *Trautonium*, se staly součástí instrumentáře evropské vážné hudby a bylo pro ně zkomponováno množství skladeb.

Na přelomu 20. a 30. let se objevily první použitelné polyfonní nástroje – elektronické varhany. V 40. letech se staly poměrně běžným nástrojem a v letech 50. se již jejich výrobě věnovalo velké množství firem.

Ve 30. a 40. letech zkonstruoval Harald Bode (1909–1987) několik nástrojů, které měly ve své době neobvykle velké zvukové možnosti a moderní koncepci. Jeho *Melochord* již obsahoval formantové filtry přeladitelné podle výšky hraných tónů, umožňoval regulaci rychlosti náběhu i doznění zvuku a zvuková barva jedné sekce mohla být ovládána sekcí druhou. V roce 1948 sestrojil Hugh Le Caine (1914–1977) nástroj s napětím řízenými obvody, který nazval *Electronic Sackbut*. Bodeho i Le Cainovy nástroje jsou považovány za přímé předchůdce syntetizérů vyráběných v následujících desetiletích.

V roce 1960 dokončil Harald Bode konstrukci svého modulárního systému pro zpracování zvuku. *Modular Sound Modification System* měl filtry, kruhové modulátory, sledovače frekvence a obálky, komparátory, frekvenční děliče, generátory obálky, napětím řízené zesilovače, směšovače a páskovou zpožďovací linku. V následujícím roce uveřejnil článek, ve kterém popsal základní koncepci syntetizéru sestaveného z mnoha miniaturních tranzistorových modulů. Bodeho modulární systém zřejmě ovlivnil Donalda Buchlu, Roberta Mooga a další konstruktéry modulárních syntetizérů z 60. let.

Na počátku 60. let navrhl Donald Buchla pro Tape Music Center v San Francisku modulární syntetizér s napětím řízenými bloky. První moduly vyrobil roku 1963. V roce 1964 zkonstruoval napětím řízený oscilátor a zesilovač také Robert Moog. Buchlovy a Moogovy modulární syntetizéry byly v 60. letech instalovány v mnoha experimentálních hudebních studiích a začaly se používat ve vážné i populární hudbě. V 70. letech započaly s výrobou modulárních systémů také firmy ARP, E $\mu$  (E-mu) a další výrobci.

Velké modulární systémy byly pro většinu hudebníků příliš drahé a komplikované. Jejich příprava vyžadovala mnoho času a úsilí, nebyly proto ani vhodné pro běžné koncertní použití. V 70. letech proto převládly menší, snáze ovladatelné a přenosné nástroje. Stolní syntetizér postavil již roku 1965

Paul Ketoff z italské pobočky firmy RCA, roku 1969 začala vyrábět stolní syntetizéry britská firma EMS. V následujícím roce zahájil hromadnou výrobu svého kompaktního, snadno přenosného syntetizéru Robert Moog. Jeho *Minimoog* měl pevně danou vnitřní strukturu, čímž byly omezeny zvukové možnosti, ale velmi se tím zjednodušilo jeho používání. Nástroj měl velký obchodní úspěch a s výrobou malých syntetizérů určených pro koncertní použití brzy začalo mnoho dalších firem.

Již v 50. letech vznikaly na universitách a v experimentálních studiích velké analogové systémy řízené nejprve mechanickými programovatelnými sekvencery a později číslicovými počítači. Komerčně dostupné digitálně řízené nástroje se objevily v letech 70., v první polovině následující dekády začaly vznikat hybridní analogově-digitální nástroje a v její druhé polovině se již objevily první nástroje plně digitální, které během několika let analogové nástroje prakticky vytlačily z trhu.

V posledních několika desítkách let došlo s rozvojem elektroniky k výraznému snížení ceny, rozšíření sortimentu a zlepšení parametrů elektronických součástek. To vedlo také k výraznému zvýšení počtu vyráběných typů elektronických hudebních nástrojů. Nové modely vznikají již po několika málo měsících, získat a utřídit informace o všech vyráběných nástrojích je proto prakticky nemožné. Do této knihy byly vybrány především nástroje významné svým technickým řešením, originalitou či výrazným rozšířením, nebo nástroje zajímavé a neobvyklé.

## Obvody elektronických nástrojů

Podobně jako nástroje mechanické, jsou i elektronické nástroje sestaveny z několika základních funkčních bloků. Základní obecné struktury mechanických nástrojů se nejvíce podobá struktura jednoduchých monofonních elektronických nástrojů se subtraktivní syntézou.



Struktura elektronického nástroje se subtraktivní syntézou

Vybuzení kmitů přivedením energie do mechanického generátoru odpovídá přivedení napájecího napětí do oscilátoru elektronického nebo uzavření jeho elektrického obvodu, které způsobí nasazení oscilací. Uzavření obvodu bývá u monofonních nástrojů realizováno připojením prvku určujícího frekvenci oscilací – odporu, kondenzátoru nebo cívky. Signál z oscilátoru je veden do rezonančního elektrického obvodu – filtru, modifikujícího

jeho spektrum obdobným způsobem jako rezonátor nástroje mechanického. Výstupní signál bývá dále zesilován a vyzařován reproduktorem. Pokud je generátor uváděn do činnosti spínáním obvodu, rozkmitá se obvykle velmi rychle a oscilace po rozpojení obvodu okamžitě zanikají. Tóny nástroje mají proto velmi ostré nasazení (Attack) i doznění (Release) a možnosti ovlivňování průběhu amplitudy generovaných tónů v čase jsou omezené.

Struktura elektronických nástrojů tohoto typu byla postupně modifikována, až se v 60. letech prakticky ustálila v podobě používané dosud u syntetizérů se subtraktivní syntézou. Jeden nebo několik oscilátorů, jejichž signály se směšují, vytvářejí základní signál, jehož spektrum upravují filtry a amplitudu zesilovače s říditelným zesílením. Obvody klaviatury generují řídicí signály pro oscilátory tak, aby byl signál potřebné frekvence generován i po uvolnění klávesy. Časový průběh amplitudy tónů určuje až řízený zesilovač zapojený v cestě signálu.




---

Struktura analogového syntetizéru se subtraktivní syntézou

Monofonní nástroje potřebují pro svou činnost alespoň jeden oscilátor, jehož frekvence je přeladována v potřebném rozsahu. Mnoho monofonních nástrojů obsahuje větší počet oscilátorů přeladovaných současně, jejichž výstupní signály se kombinují.

Multifonní nástroje obsahují několik přeladovaných oscilátorů, jejichž počet závisí na počtu současně znějících hlasů. Ač tyto nástroje mají omezený počet současně znějících hlasů, umožňují vícehlasou hru a bývají mnohdy označovány jako nástroje polyfonní. Toto zavedené označení se vyskytuje i na některých místech v této knize. Pokud by mohlo dojít k nejasnostem, je obvykle uveden skutečný počet hlasů nebo jsou nástroje s neomezenou polyfonií označeny jako plně polyfonní.

Počet potřebných současně generovaných tónů polyfonních nástrojů závisí na jejich rozsahu. V nejjednodušších případech mají nástroje pro každou klávesu jeden oscilátor. Varhany, u nichž při stisku jedné klávesy zní současně několik tónů s různou barvou v odlišných stopových výškách, mohou mít pro každou klávesu oscilátorů několik. Toto uspořádání odpovídá varhanám píšťalovým, u nichž při stisku jedné klávesy může znít větší počet píšťal. Počet oscilátorů u velkých nástrojů může dosahovat mnoha set až tisíců. Zvuk takových nástrojů je velmi bohatý, problémem bývá jejich složitost, velké rozměry, vysoká cena a obtíže při udržování přesného ladění celého nástroje. U většiny elektronických varhan bývá proto počet oscilátorů omezen. Některé nástroje využívají tytéž oscilátory v několika rejstřících v různých stopových výškách, podobně jako Hope-Jonesův systém Unit využívá vícenásobně píšťaly.

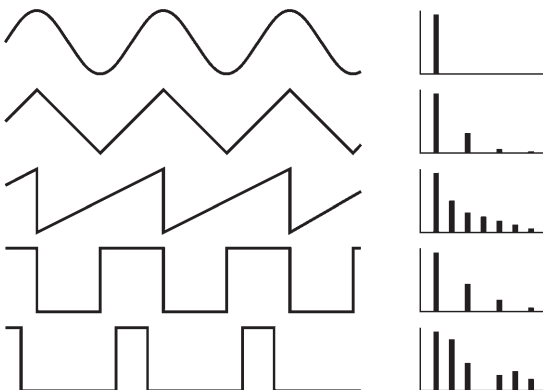
Výrazně snížit počet oscilátorů lze při použití oktávových děličů frekvence. V nástroji pak může být pouze 12 oscilátorů generujících tóny nejvyšší oktávy. Další tóny v nižších oktávových polohách produkuje 12 kaskád děličů frekvence s dělicím poměrem 1:2. Všechny signály z jedné kaskády jsou synchronní, poměr frekvencí oktáv je zcela přesný. Pro dosažení přesného ladění celého nástroje postačuje zajistit stabilitu frekvence dvanácti oscilátorů. Z důvodu naprosto přesné frekvence a stabilní fáze všech tónů v oktávových vzdálenostech splývají jejich spektra, tóny se spojují a oktávy znějí na polyfonních nástrojích s děliči „prázdňě“.

Číslicové integrované obvody umožnily efektivní konstrukci děličů se složitými dělicími poměry, pomocí nichž lze frekvence tónů nejvyšší oktávy odvodit od frekvence jediného referenčního oscilátoru. Nástroje s digitálně generovanou nejvyšší oktávou obsahují pouze jeden oscilátor určující ladění celého nástroje. Všechny potřebné signály vznikají ve frekvenčních děličích, poměry jejich frekvencí jsou proto zcela stabilní.

Ve funkci resonátoru klasických nástrojů jsou u nástrojů elektronických použity filtry ovlivňující spektrální složení procházejícího signálu. U nástrojů analogových jsou filtry rovněž analogové. Analogové filtry však obsahují i mnohé nástroje s číslicovými generátory. Realizace číslicových filtrů je výpočetně náročná, tyto filtry se proto objevily až u digitálních nástrojů s dostatečně výkonnými signálovými procesory. Většina ostatních obvodů elektronických nástrojů byla zpočátku realizována v analogové podobě, přechod na číslicovou realizaci však byl snadný. Nástroje kombinující analogové a číslicové generování a zpracování zvukového signálu jsou označovány jako nástroje hybridní.

## Oscilátory

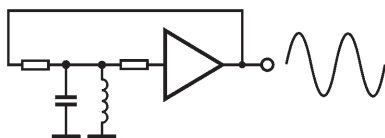
Základní kmitající signál analogický ke zvukovým vibracím mechanických nástrojů vytvářejí v nástrojích elektronických oscilátory či generátory. Převážná většina oscilátorů elektronických nástrojů produkuje periodické signály s poměrně jednoduchým průběhem, které jsou dále zpracovávány. Několik neobvyklejších tvarů kmitů a jim odpovídající frekvenční spektra jsou na následujícím obrázku.



Sinusový, trojúhelníkový, pilový, obdélníkový a pulsní průběh signálů a odpovídající spektra

Nejjednodušší signál má průběh **sinusový**. V jeho spektru nejsou kromě základní složky obsaženy žádné vyšší harmonické. Jeho filtrací proto nelze generovaný zvuk měnit. Signály se sinusovým průběhem se používají při aditivní syntéze, kdy je výsledný signál vytvářen sčítáním několika sinusových signálů s různými frekvencemi. Sinusovému signálu je blízký signál **trojúhelníkový**. V jeho spektru jsou jen liché harmonické složky a jejich amplituda rychle klesá. **Pilový** signál obsahuje ve spektru liché i sudé harmonické, jejichž amplitudy klesají úměrně jejich pořadovým číslování. Signál je harmonicky bohatý a často se používá jako základní signál pro další filtraci. Spektrum signálu s **obdélníkovým** průběhem závisí na jeho střídě. Pokud je střída 1:1, obsahuje signál pouze liché harmonické složky, podobně jako všechny signály s průběhem symetrickým podle vodorovné osy. Amplituda vyšších harmonických však klesá pomaleji než u signálu trojúhelníkového. Pokud se střída signálu odlišuje od hodnoty 1:1, objevují se v jeho spektru také sudé harmonické složky. Modulací šířky pulsů (PWM – Pulse Width Modulation) obdélníkového signálu vznikne signál s proměnným spektrem.

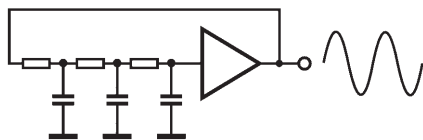
Oscilátory generující signál se sinusovým průběhem bývají nejčastěji tvořeny zesilovačem s kladnou zpětnou vazbou, která způsobuje rozkmitání celého obvodu. Ve zpětnovazebním obvodu je zařazen frekvenčně závislý blok, který zajišťuje požadovanou frekvenci oscilací. Tímto blokem může být LC člen tvořící pásmovou propust. Na její rezonanční frekvenci je zpětná vazba nejsilnější a na této frekvenci pak oscilátor kmitá. První **LC oscilátory** s elektronkami se objevily již na počátku 20. století, kdy se začaly používat v rozhlasových vysílačích a přijímačích, a postupně bylo vytvořeno mnoho variant jejich zapojení. LC oscilátory se brzy staly také součástí elektronických hudebních nástrojů.



Princip oscilátoru s paralelním LC článkem

Ve druhé polovině 20. století se začaly namísto elektronek v oscilátorech používat tranzistory. LC oscilátory mají dobrou frekvenční stabilitu, použité cívky jsou však rozměrné, výrobně náročné, a proto drahé.

Namísto LC obvodů bývají někdy v oscilátorech použity kaskády RC článků. Ty nemají rezonanční maximum, pro vytvoření oscilací se využívá jejich fázového posuvu. Ke vzniku oscilací dojde na frekvenci, při které má celá zpětnovazební smyčka fázový posuv  $2\pi$  ( $360^\circ$ ) a kdy dojde ke vzniku kladné zpětné vazby. **RC oscilátory** neobsahují cívky, jsou proto levné. Jejich nevýhodou je menší stabilita frekvence.



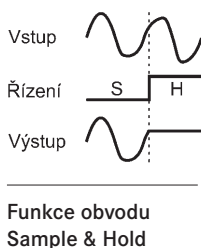
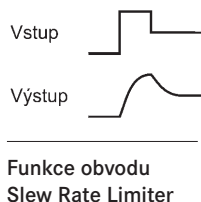
Princip oscilátoru s kaskádou RC článků

Pilové kmity lze nejnázne získat pomocí **relaxačního oscilátoru**. Jeho

### Obvody pro úpravu modulačních signálů

Součástí syntetizérů bývají i obvody pro úpravu modulačních signálů. Patří k nim např. **Slew Rate Limiter**, který omezuje rychlost změny přiváděného napětí. Jeho aplikací na ladicí napětí lze skokové změny vznikající při stisku kláves převést na změny pozvolné, a dosáhnout tak glissanda.

Další běžnou součástí syntetizérů bývá **vzorkovací obvod (Sample & Hold)** – S/H nebo S&H – který ve stavu Sample propouští přiváděný signál a ve stavu Hold pracuje jako analogová paměť, která na výstupu udržuje zaznamenané konstantní napětí. Periodickým vzorkováním přiváděného spojitého signálu lze vytvářet signál stupňovitý. Časté bývá vzorkování šumového signálu, při kterém vzniká náhodný stupňovitý signál vhodný pro zajímavé typy modulací.



## Singing Arc, Zpívající oblouk (1899)

V roce 1808 zjistil britský chemik Humphrey Davy, že mezi dvěma uhlíkovými elektrodami lze vytvořit elektrický oblouk, který spolu s rozžhaveným uhlíkem vyzařuje silné světlo. Jeho objev vedl k vytvoření obloukové lampy, která se přibližně od poloviny 19. století začala používat jako elektrický zdroj světla. Při provozu však vydávaly obloukové lampy nepříjemné rušivé zvuky. V roce 1899 byl britský fyzik William Du Bois Duddell (1872–1917) vyzván, aby se pokusil tyto zvuky odstranit. Při svých pokusech zjistil, že se zvuk mění s velikostí přiváděného napětí a že jeho frekvenci je možné ovlivňovat. Připojením klaviatury tento jev demonstroval. Tak vznikl první elektronický hudební nástroj – *Singing Arc* (*Zpívající oblouk*). Když Duddell předváděl *Singing Arc* v londýnském Institute of Electrical Engineers, ukázalo se, že tóny se stejnou frekvencí jako Duddellova lampa vydávají i ostatní obloukovky připojené ke stejnému elektrickému okruhu. Objevený způsob přenosu hudby po elektrickém vedení Duddell však dále nerozvíjel.

V roce 1902 objevil dánský inženýr Valdemar Poulsen (1869–1942) způsob generování elektrických vln vycházející z Duddellových principů. Připojením antény k obloukové lampě a vytvořením oscilací v oblasti frekvencí kolem 200 kHz zkonstruoval vysílač radiových vln. Svůj objev Poulsen patentoval roku 1903.



Oblouková lampa

*Zpívající oblouk* ke své činnosti nepotřeboval žádný zesilovač a jako reproduktor sloužil přímo elektrický výboj. Zvuku vznikajícího v elektrickém oblouku si v roce 1889 povšiml též Dr. Simon z Frankfurtu. Později vyzařování zvuku elektrickým výbojem využil Siegfried Klein při konstrukci plazmového reproduktoru, na nějž získal v roce 1946 patent 2,768,246. Od roku 1954 se plazmový výškový reproduktor prodával pod názvy Ionophone, Ionovac nebo Ionofane. V první polovině 80. let získal Klein patenty 4,306,120, 4,464,544 a 4,482,788 na další verze reproduktoru, mezi nimiž je i verze bez zvukovodu, s kruhovou vyzařovací charakteristikou. V roce 1993 se Kleinovi podařilo odstranit do té doby nezbytné elektronky a vytvořit plně polovodičovou verzi. Tu vyrábí německá společnost Magnat jako model MP-02.

## **Burstynův nástroj (1911)**

---

V roce 1911 postavil W. Burstyn nástroj, ve kterém použil zdokonalený princip vytvořený Williamem Duddellem. Elektrický oblouk v obvodu s kůželovitou cívkou, ve kterém vznikaly intenzivní vysokofrekvenční kmity, rozechvíval okolní vzduch, a fungoval tak jako reproduktor. Intenzitu vysokofrekvenčních kmitů modulovala druhá cívka, která ve spojení s kondenzátorem tvořila rezonanční obvod generátoru zvukových kmitů. Připojená klaviatura, která řídila jejich frekvenci, měla rozsah jedné oktávy. Přepínač ovládající indukčnost rezonančního obvodu sloužil pro oktávovou transpozici. Výšku hraných tónů bylo možné jemně měnit, a tím vytvářet čtvrttóny a další mikrointervaly.

## **Audion Piano (1915)**

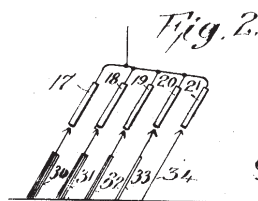
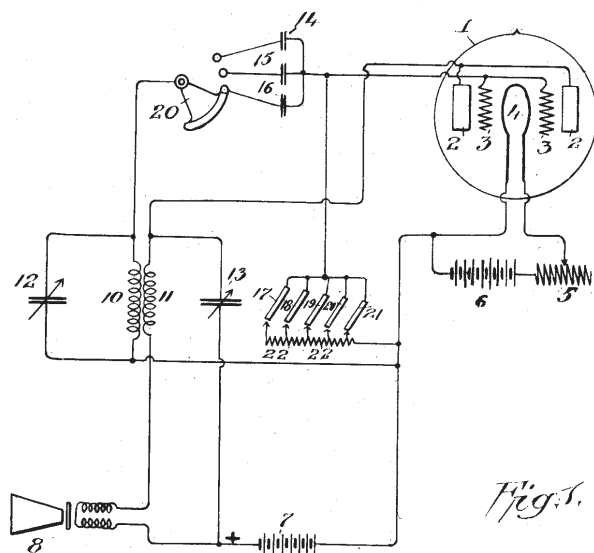
---

Americký vynálezce Lee de Forest (1873–1961), který v roce 1906 zkonstruoval první triodu, zjistil také, že frekvenci elektronkového oscilátoru lze snadno ovládat změnou kapacity nebo indukčnosti jeho rezonančního obvodu. S využitím tohoto principu se pokusil sestavit elektronkový hudební nástroj, který nazval *Audion Piano*. 24. dubna 1915 požádal o patent ve Spojených státech a 4. dubna 1916 ve Velké Británii. Britský patent 100358 získal 28. prosince 1916, americký patent 1,543,990 pak 30. června 1925. Stavbu svého nástroje však zřejmě nedokončil.

De Forestův nástroj byl multifonní. Obsahoval pro každou oktávu jeden triodový generátor, jehož frekvence se řídila pomocí klaviatury. To umožňovalo v každé oktávě hrát pouze jeden tón. Proto Lee de Forest uvažoval



o stavbě plně polyfonního nástroje, vybaveného samostatným generátorem pro každou klávesu. Zda se jej pokoušel realizovat není doloženo.



Oscilátor z patentu  
1,543,990)

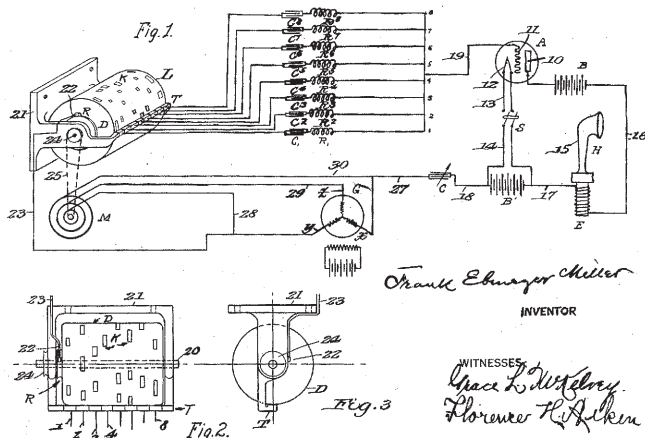
Inventor  
Lee de Forest  
by his Uly  
Lawrence E. Parby

Ve své autobiografii Lee de Forest o *Audion Pianu* píše, že „některé zvuky připomínají housle, cello, dřevěné dechové nástroje nebo trubku s dusítkem, jiné zvuky nepřipomínají nic z orchestru ani nic, co lidské uši doposud slyšely – jsou podobného druhu jako zvuky, které dnes často slyšíme v nervy trýznících maniakálních kakofoniích šílených swingbandů. Podle těchto zvuků říkám někdy svému novému nástroji *Squawk-a-phone*“.

## Electrical System For Producing Musical Tones (1915)

Americký ušní a krční lékař Frank Ebenezer Miller podal 18. března 1915 patentovou přihlášku na „Elektrický systém pro vytváření hudebních tónů“. Patent 1,376,288 získal 26. dubna 1921. Zdrojem kmitů byly sériové rezonanční LC obvody naladěné na požadované frekvence. Připojením napětí k rezonančním obvodům vznikaly tlumené kmitů, vedené do jednoduchého

elektronkového zesilovače s triodou a reprodukované telefonním sluchátkem. Vyrobený přístroj, připomínající psací stroj, měl 24 kláves a neumožňoval řídit hlasitost ani barvu zvuku.



Millerův patent  
1,376,288

## Optofonické piano (1916)

*Optofonické piano* vytvořil ruský futuristický malíř Vladimir Baranov-Rossine či Wladimir Baranoff-Rossině (1888–1944). Na svém nástroji začal pracovat v roce 1916 a zprvu jej používal při výstavách svých obrazů a na dalších akcích ruské umělecké avantgardy. V roce 1924 uspořádal spolu se svou ženou pro *Optofonické piano* dva koncerty. Jeden z nich proběhl v divadle Bolšoj teatr a druhý v Mejercholdově divadle. V roce 1925 emigroval Rossině do Paříže, kde pokračoval v pořádání výstav a koncertů.

*Optofonické piano* obsahovalo silný zdroj světla, soustavu čoček, hranolů, zrcadel a filtrů a několik otáčejících se skleněných disků o průměru 40 cm, na které Baranoff-Rossině namaloval barevné obrazce. Kombinace filtrů a disků se řídila pomocí klaviatury. Barevné kaleidoskopické obrazce vzniklé průchodem světla přes soustavu filtrů a disků se promítaly na stěny či strop. Bylo možné ovládat směr projekce, velikost, symetrii i intenzitu promítaných obrazců. Procházející světlo zároveň dopadalo na fotočlánek připojený k oscilátoru. Změny jasu procházejícího světla tak současně řídily frekvenci generovaného tónu.



Optofonické piano

## Theremin, Těrmenvox, Thereminvox, Etherphone, Aerophon (1920)

---

Lev Sergejevič Těrmen (1896–1993), známý později jako Leo Ssergejewitsch Thèrèmin, si při práci ve Fyzikálně technickém ústavu povšiml, že kapacita lidského těla může ovlivňovat frekvenci elektronkového oscilátoru. S využitím tohoto jevu zkonstruoval elektronický alarm detekující přiblížení osoby k anténě přístroje a následně na podobném principu sestrojil přístroj na měření tlaku a dielektrické konstanty plynů, u něhož použil akustickou indikaci. Změně měřené veličiny odpovídala změna výšky generovaného tónu. Při práci s přístrojem Těrmen zjistil, že pohybem ruky kolem přístroje může zahrát jednoduchou melodii. Pokračoval v experimentech a pro zvýšení citlivosti přístroje použil princip heterodynu vynalezený Reginaldem Fessendenem. Výsledný tón vznikl jako zázněj při interferenci dvou signálů s vysokou frekvencí generovaných dvěma elektronkovými oscilátory. Jeden z nich měl frekvenci pevně nastavenou na 150–300 kHz, frekvence druhého se měnila přibližováním ruky k připojené svislé anténě. Po smíchání signálů obou oscilátorů a detekci se objevil zázněj s frekvencí slyšitelného tónu.

Připojením zesilovače a reproduktoru vznikl monofonní hudební nástroj se zvukem připomínajícím smyčcové nástroje či lidský hlas, jehož výšku bylo možné ovládat bezkontaktně pohybem ruky v okolí antény. Pro řízení hlasitosti byl použit pedál a pro artikulaci tónu, odstranění glissandového přechodu mezi tóny a dosažení staccata sloužilo tlačítko přerušující zvuk nástroje.

Těrmen brzy doplnil druhou anténu pro řízení hlasitosti. Nástroj se tak stal zcela bezkontaktním a ovládal se pouze pohybem rukou v prostoru. Těrmen jej nazval *Etherphone* a v říjnu roku 1920 jej předvedl nejbližším spolupracovníkům. Nástroj byl umístěn v dřevěné skřínce na čtyřech vysokých nohách. Svislá prutová anténa sloužila pro řízení výšky, vodorovná anténa ve tvaru smyčky ovládala hlasitost. Rozsah tři až čtyři oktávy a výšková poloha *Etherphonu* odpovídaly violoncellu. Bývalý violoncellista Těrmen nastudoval několik skladeb ze svého cellového repertoáru a následující měsíc uspořádal první „koncert“ pro studenty a pracovníky ústavu.



Theremin s mechanickým ovládáním hlasitosti