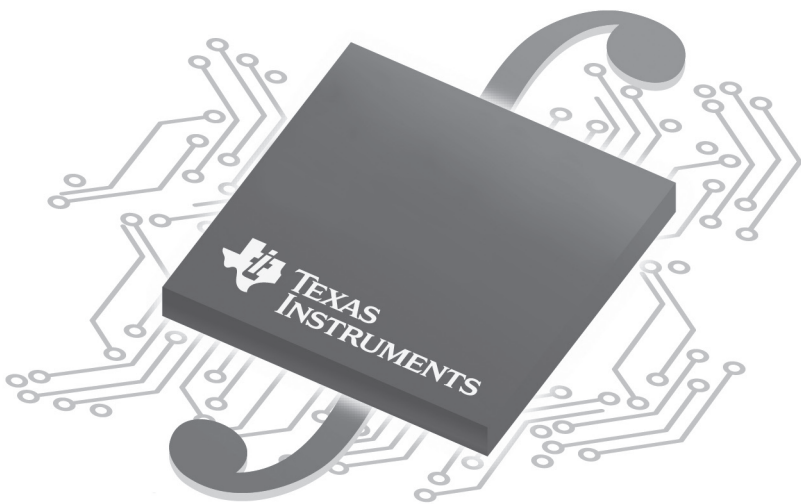




Historia przetworników

Walt Kester



Ten rozdział powstał w wyniku inspiracji sposobem przedstawienia przez Walta Junga historii wzmacniaczy operacyjnych w pierwszym rozdziale jego książki *Op Amp Applications* [1]. Jego metoda polega na powoływaniu się na setki artykułów, patentów itd., które potraktowane jako całość malują fascynujący obraz rozwoju wzmacniacza operacyjnego – od wczesnej koncepcji Harolda Blacka wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym po nowoczesne, scalone wzmacniacze operacyjne wysokiej jakości.

Podjęliśmy próbę zrealizowania tego samego pomysłu jeśli chodzi o historię przetworników danych. Podsumowując zakres dokonanego wysiłku – i uwzględniając nieco chaotyczny i nieciągły rozwój przetworników danych – okazuje się, że stanęliśmy w obliczu trudnego wyzwania związanego ze zorganizowaniem materiału. W efekcie, zamiast umieścić cały materiał historyczny w jednym rozdziale zdecydowaliśmy rozproszyć jego część po całej książce. I tak na przykład, większość informacji historycznych dotyczących architektury przetworników umieszczono w rozdziale 3 (*Architektura przetworników*), wraz z opisami architektury poszczególnych przetworników. Podobnie, rozdział 4 (*Technologia przetworników*) obejmuje większość kluczowych wydarzeń związanych z rozwojem procesów technologicznych stosowanych do wytwarzania przetworników. Rozdział 5 (*Testowanie przetworników*) porusza kilka zasadniczych zagadnień historycznych dotyczących testowania przetworników.

W związku z naszymi staraniami by każdy rozdział stanowił – maksymalnie na ile jest to możliwe – samodzielną całość, niektóre informacje historyczne powtarzają się w różnych miejscach. Chcemy, by Czytelnik był świadomy, że jest to nasze działanie celowe, a nie brak staranności podczas edycji książki.

1.1. Wczesna historia

Trudno jest dokładnie ustalić kiedy wykonano pierwszy przetwornik danych lub jaką miał postać. Najwcześniej zarejestrowany binarny przetwornik C/A znany autorom tej książki nie jest w ogóle urządzeniem elektronicznym, ale hydraulicznym. Turcja, wówczas jako imperium otomańskie, miała kłopoty z systemem publicznych wodociągów. W celu pomiaru wody budowano skomplikowane systemy. Jeden z nich, pokazany na **rysunku 1.1**, pochodzi z XVIII wieku. Przykładem rzeczywistej tamy, w której wykorzystano ten system jest zaporą Mahmuda II zbudowana na początku XIX wieku niedaleko Istanbuhu i opisana w [2].

System pomiarowy wykorzystywał zbiorniki (na rysunkach opisane jako *zbiornik opadowy*) utrzymujące stałą głębokość (odpowiadającą potencjałowi odniesienia) za pomocą przelewów spływowych, przez które woda tylko co ciekła (ten przepływ musiał być wystarczający by wypływała słoma). Jest to zilustrowane na rysunku 1.1A. Wypływ wody ze zbiornika opadowego jest sterowany poprzez otwierane i zamykane, binarnie ważone dysze zanurzone 96 mm pod powierzchnią wody. Dysze zasilają *zbiornik pośredni* tak, jak to pokazano na rysunku 1.1B. Rozmiary dysz odpowiadają przepływowi kolejnych potęg 2 odniesionych do przepływu podstawowego zwanego 1 lüle (= 36 l/min, czyli 52 m³/dzień). Poszczególne dysze nosiły swoje indywidualne nazwy. I tak:

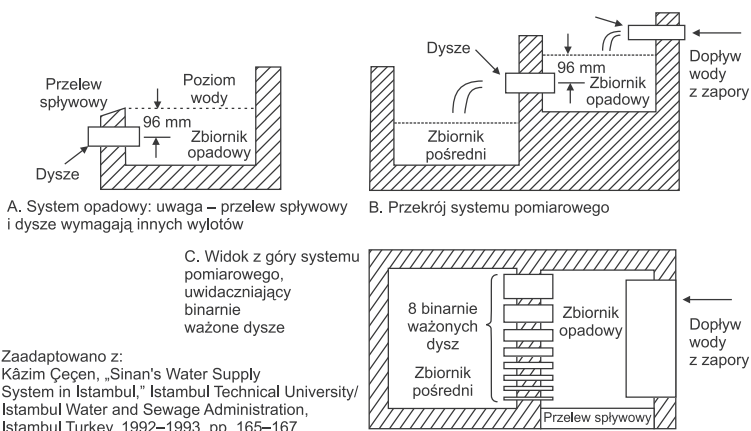
dysza 8-lüle to „sekizli lüle”,

dysza 4-lüle to „dörtlü lüle”,
 dysza $1/4$ -lüle to „kamuş”,
 dysza $1/8$ -lüle to „masura”,
 dysza $1/32$ -lüle to „çuvaldiz”.

Szczegóły systemu pomiarowego są pokazane na rysunku 1.1C. Funkcjonalnie jest to 8-bitowy przetwornik C/A z ręcznie (bez wątplenia nie elektronicznie) nastawianym sygnałem wejściowym i „mokrym” wyjściem i być może jest to najstarszy na świecie konwerter cyfrowo-analogowy. Prawdopodobnie istnieją inne przykłady wczesnych przetworników informacji, ale teraz skupimy już swoją uwagę na tych, które są wykonane bardziej nam znaną techniką elektroniczną.

Prawdopodobnie największą siłą napędową rozwoju elektronicznych przetworników danych w ostatnich latach jest komunikacja. Telegraf doprowadził do wynalezienia telefonu i w konsekwencji do utworzenia Bell System. Rozpowszechnienie telegrafu i telefonu oraz gwałtowny wzrost zapotrzebowania na większą wydajność łączy doprowadziły do konieczności zastosowania multipleksowania i stworzenia więcej niż jednego kanału w pojedynczej parze przewodów miedzianych. Podczas gdy multipleksowanie z podziałem czasu TDM (*time division multiplexing*) osiągnęło pewien poziom popularności, to zwielokrotnienie przez podział częstotliwości FDM (*frequency division multiplexing*) wykorzystujące rozmaite systemy z falą nośną odniosło o wiele większy sukces i jest szeroko stosowane. Jednakże dopiero modulacja impulsowa-kodowa PCM (*pulse code modulation*) spopularyzowała przetworniki danych i by zrozumieć ich ewolucję zaczniemy właśnie od tego miejsca.

Materiał przedstawiony w następnych częściach wybrano z wielu źródeł, ale klasyczna książka K.W. Cattermole’a z roku 1966, *Principles of Pulse Code Modulation* (Zasady modulacji kodowo-impulsowej) [3] jest najbardziej wyróżniającym się źródłem informacji historycznych na temat zarówno PCM, jak i przetworników danych. Poza przedstawieniem materiału historycznego, książka znakomicie omawia teorię próbkowania, architekturę przetworników i wiele innych zagadnień związanych z tematem. Obszerny wykaz literatury wskazuje ważne publikacje i patenty kryjące się za głównymi opracowaniami. Oprócz książki Cattermole’a polecamy



Rys. 1.1. Dawny, XVIII-wieczny system pomiaru wody wykorzystujący system dwójkowy

Czytelnikom znakomitą serię książek wydanych przez Bell System pod tytułem *A History of Engineering and Science in the Bell System* (Historia techniki i nauki w Bell System) [4], [5], [6], [7], [8]. Te książki Bell System są również świetnym materiałem wprowadzającym w całą dziedzinę komunikacji.

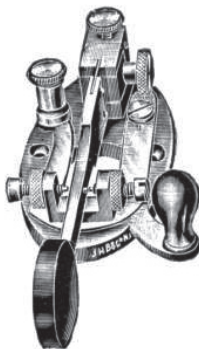
Wczesne lata: od telegrafu do telefonu

Jak podaje Cattermole [3], najwcześniejsze pomysły na telegraf elektryczny pochodzą z roku 1753, ale najbardziej realne opracowanie pojawiło się w latach ok. 1825–1875. Zostały wtedy zgłębione rozmaite idee systemów liczbowych dwójkowych i trójkowych, kody o długości zmieniającej się odwrotnie proporcjonalnie do prawdopodobieństwa wystąpienia (Schilling, 1825), refleksyjny kod dwójkowy (Elisha Graya, 1878 – obecnie zwany kodem Greya), kody łańcuchowe (Baudot, 1882). Wraz z rozwojem telegrafu pojawiła się potrzeba zwiększenia wydajności łączy i multipleksowania więcej niż jednego sygnału w pojedynczej parze przewodów. Na **rysunku 1.2** pokazano typowy klucz telegraficzny i wymieniono kilka faktów z historii telegrafu.

Wynalezienie przez Aleksandra Grahama Bella telefonu w roku 1875 [9], [10] było prawdopodobnie najbardziej znaczącym wydarzeniem w całej historii komunikacji. Ciekawostką jest, że Bell faktycznie eksperymentował z telegraficznym systemem multipleksowania (Bell nazywał to telegrafem *harmonicznym*) i wówczas to uświadomił sobie możliwość transmisji samego głosu jako sygnału analogowego.

Na **rysunku 1.3** pokazano schemat stanowiący fragment oryginalnego patentu Bella, który przedstawia jego podstawową ideę telefonu. Fale dźwiękowe docierają do nadajnika *A* i wprawiają w vibracje membranę *a*. Vibracje *a* powodują vibracje zwory *c*, które – za pomocą elektromagnesu *b* – indukują prąd w przewodzie *e*. Prąd w przewodzie *e* wytwarza odpowiadające mu fluktuacje pola magnetycznego elektromagnesu *f*, a to w efekcie wywołuje drgania membrany odbiorczej *i*.

Upowszechnienie telefonu spowodowało ogromną potrzebę zwiększenia wydajności łączy poprzez multipleksowanie. Warto tu zaznaczyć, że badania nad zastosowaniem multipleksowania w telegrafii doprowadziły do powstania początków teorii informacji. Multipleksowanie z podziałem czasu (TDM) w zastosowaniu do telegrafii wymyślono już w 1853 roku przez mało znanego wynalazcę amerykańskiego M. B. Farmera, natomiast J.M.E. Baudot zastosował je praktycznie w roku 1875



- Pomysł telegrafu: rok 1753
- Zasadniczy rozwój telegrafu: lata 1825 - 1875
- Rozwój różnych kodów dwójkowych
- Eksperymenty ze zwielokrotnianiem w celu zwiększenia przepustowości kanału
- Wynalezienie telefonu: A.G. Bell rok 1875, gdy pracował nad projektem zwielokrotniania w telegrafii
- Rozwój:
 - Telegrafu: Technika cyfrowa
 - Telefonu: Technika analogowa
 - Zwielokrotnianie przez podział częstotliwości (FDM): Technika analogowa
 - Modulacja impulsowo-kodowa (PCM): Powrót do techniki cyfrowej

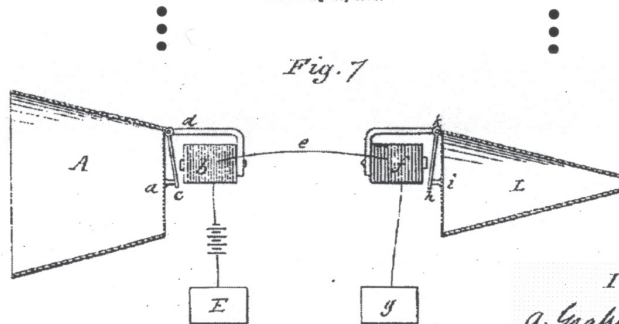
Rys. 1.2. Telegraf

UNITED STATES PATENT OFFICE.

ALEXANDER GRAHAM BELL, OF SALEM, MASSACHUSETTS.

IMPROVEMENT IN TELEGRAPHY.

Specification forming part of Letters Patent No. 174,465, dated March 7, 1876; application filed February 14, 1876.



Wypis z: U.S. Patent 174,465,
Filed February 14, 1876, Issued March 7, 1876

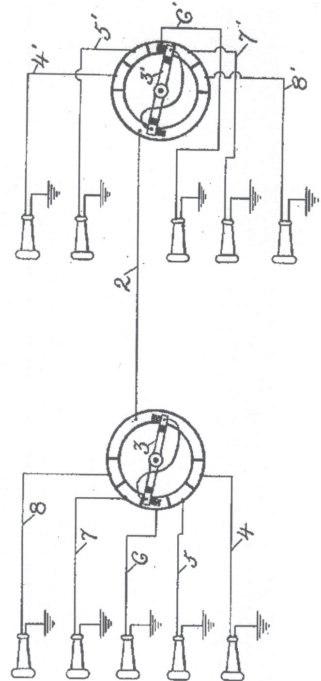
Inventor:
A. Graham Bell
by atty. Fowler Bailey

1.3. Telefon

wykorzystując w tym celu obracające się mechaniczne komutatory jako multiplekser.

W patencie z roku 1903 [11] Willard M. Miner opisuje eksperymenty wykorzystujące tego typu elektromechaniczne wirujące komutatory do multipleksowania kilku analogowych rozmów telefonicznych z wykorzystaniem jednej pary przewodów tak, jak to pokazano na **rysunku 1.4**. Cytując fragment patentu widzimy, że autor określił, iż każdy kanał musi być próbkowany:

„... z częstotliwością lub szybkością aproksymującą częstotliwość lub średnią częstotliwość mniej lub bardziej złożonych wibracji, które są charakterystyczne dla głosu lub wyartykułowanej mowy, ..., wynoszącą 4320 cykli na sekundę, przy której to częstości, jak to zbadałem, głos wraz z tembrem i cechami indywidualnymi może być z powodzeniem odtworzony w urządzeniu odbiorczym. ... Osiągnąłem również sukces w uzyskaniu czegoś co można uznać za wynik komercyjny stosując szybkość kluczkowania zaledwie 3500 cykli na sekundę, odpowiadającą praktycznie najwyższemu tonowi charakteryzującemu dźwięki samogłoski.”



Rys. 1.4. Jedna z pierwszych prac powołujących się na kryterium określające szybkość próbkowania

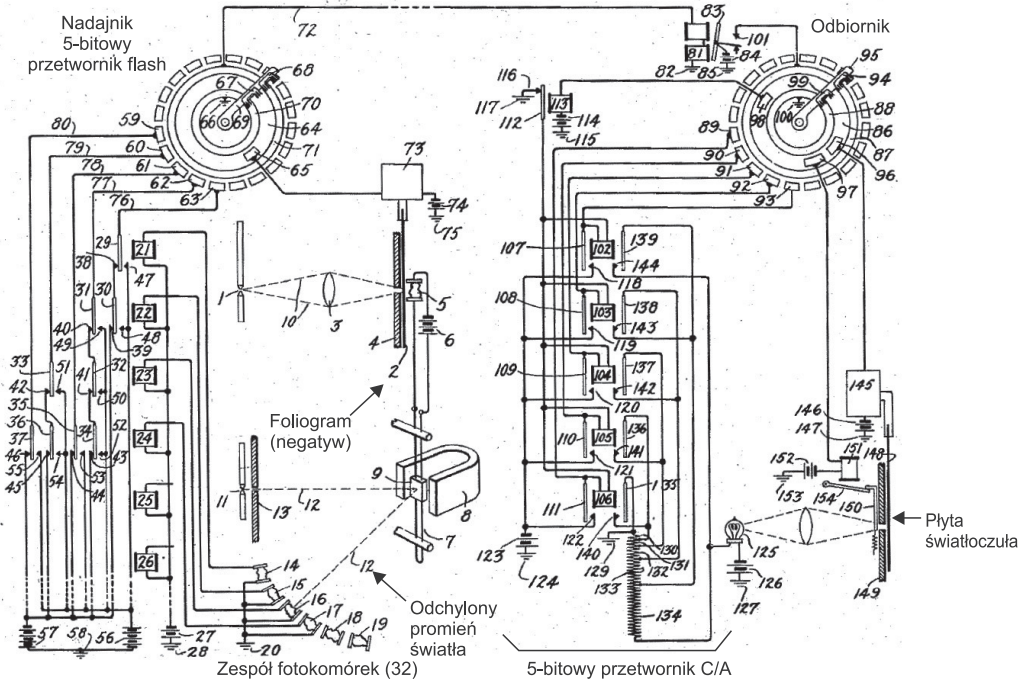
Przy wyższych częstotliwościach próbkowania Miner nie stwierdził poprawy jakości mowy, prawdopodobnie z powodu różnych artefaktów i błędów w swoim, w gruncie rzeczy, topornym systemie.

Miner nie miał następców kontynuujących jego prace nad próbkowaniem i TDM. Przyczyną prawdopodobnie był brak właściwych elementów elektronicznych, które uczyniłyby te techniki praktycznymi. Z kolei, jak pojawiły się odpowiednie elementy elektroniczne, to ustaloną pozycję miała już technika FDM.

Wynalezienie PCM

Idea modulacji impulsowo-kodowej pojawiła się po raz pierwszy we względnie słabo znanym patencie przyznanym w roku 1921 Paulowi M. Raineyowi z firmy Western Electric [12]. W tym patencie podany jest opis metody transmisji faksymiliów w zakodowanej formie za pośrednictwem linii telegraficznej i z zastosowaniem 5-bitowej PCM. Na **rysunku 1.5** przedstawiono schemat pochodzący z tego patentu (dodatkowe opisy dodano dla zwiększenia klarowności).

Reiner zaproponował by promień światła był skupiony na foliogramie zawierającym materiał jaki ma być przesłany. Za foliogramem jest umieszczona fotokomórka, która zbiera światło i wytwarza prąd proporcjonalny do natężenia światła. Ten prąd płynie przez galwanometr, który porusza drugim strumieniem światła. Ten drugi strumień światła, w zależności od wychylenia galwanometru, aktywuje jedną z 32 oddzielnych fotokomórek. Wyjście każdej fotokomórki steruje odpowiadającym jej przekaźnikiem. Wyjścia przekaźników są połączone w taki sposób by generować



Rys. 1.5. Pierwszy opis PCM: Paul M. Rainey, *Facimile Telegraph System* patent USA 1608527, zgłoszony 20 czerwca 1921 r., wydany 30 listopada 1926 r.

5-bitowy kod odpowiadający położeniu oświetlonej (m -tej) fotokomórki. Kod cyfrowy jest więc generowany na podstawie zasady „ m -ta z 32” podobnej do tej, jaką stosuje się w przetwornikach równoległych *flash*. Sygnał wyjściowy tego prostego elektro-optomechanicznego przetwornika A/C typu *flash* jest następnie nadawany szeregowo za pomocą wirującego elektromechanicznego komutatora zwanego dystrybutorem¹.

Dane szeregowe są przesyłane, odbierane i zamieniane na postać równoległą przy użyciu drugiego dystrybutora i zestawu przekaźników. Odebrany kod określa kombinację przekaźników, które zostają pobudzone. Wyjścia przekaźników są dołączone do odpowiednich odczepów rezystora połączonego szeregowo z lampą odbiorczą. Prąd płynący przez lampę odbiorczą zmienia się więc w zależności od odebranego kodu. To z kolei powoduje, że intensywność światła lampy zmienia się proporcjonalnie do przesłanego kodu i w ten sposób dokonuje się konwersja analogowo-cyfrowa. Światło generowane przez lampę odbiorczą pada na światłoczułą płytę odbiorczą i wytwarza na jej powierzchni obraz oryginalny w postaci kwantowanej. Patent Raineya zawiera kilka ważnych koncepcji: kwantyzację za pomocą przetwornika A/C typu *flash*, szeregową transmisję danych i rekonstrukcję skwantowanych danych za pomocą przetwornika C/A. Stanowi to podstawę techniki PCM. Jednakże jego wynalazek w owym czasie nie wywołał dużego zainteresowanie i, tak naprawdę, został zapomniany przez inżynierów Bell System. Jego patent odkryto wiele lat później, już po zarejestrowaniu sporej liczby innych patentów dotyczących PCM.

Podstawy matematyczne PCM

W połowie lat 20 XX wieku, Harry Nyquist studiował teorię sygnałów w systemach telegraficznych mając na celu znalezienie maksymalnej szybkości przesyłania sygnału przez kanał o danym paśmie. Otrzymane przez niego wyniki są streszczone w dwóch klasycznych artykułach opublikowanych w latach 1924 [13] i 1928 [14].

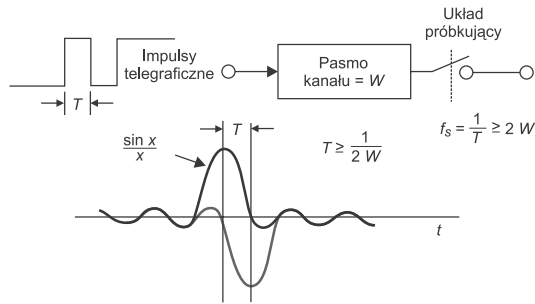
W modelu systemu telegraficznego zdefiniował on swój sygnał jako:

$$s(t) = \sum_k a_k f(t - kT) \quad (1.1)$$

W tym równaniu $f(t)$ oznacza podstawowy kształt impulsu, a_k jest amplitudą k -tego impulsu, a T odstępem czasu między impulsami. Telegrafia stałoprądowa odpowiada temu modelowi, o ile założy się, że $f(t)$ opisuje impuls prostokątny o czasie trwania T , a a_k jest równe 0 lub 1. Ten prosty model jest przedstawiony na **rysunku 1.6**. Widmo sygnału jest ograniczone przez kanał transmisyjny do częstotliwości równej W .

Efektom przeprowadzonej analizy jest stwierdzenie, że częstość impulsów ($1/T$) nie powinna być zwiększana ponad $2W$ impulsów na sekundę. Inny sposób wysłowienia tej konkluzji brzmi: *jeżeli stosuje się próbkowanie chwilowe sygnału w regularnych odstępach czasu z częstotliwością przynajmniej dwa razy większą od największej mającej znaczenie składowej widma sygnału, to próbki zawierają całą informację*

¹ Liczba fotokomórek i przekaźników pokazana na rysunku 1.5 nie odpowiada liczbie wymienionej w tekście. Należy więc domniemywać, że na rysunku przedstawiono schemat uproszczony [przyp. tłum.].



- Przez kanał o szerokości pasma W można transmitować do $2W$ impulsów na sekundę.
- Jeżeli sygnał podlega próbkowaniu chwilowemu ze stałą częstotliwością przynajmniej dwukrotnie większą od największej częstotliwości składowej tego sygnału, to próbki zawierają całą informację o sygnale oryginalnym.

Rys. 1.6. Klasyczne twierdzenie Harry'ego Nyquista: 1924 r.

o oryginalnym sygnale. Wynika to z rysunku 1.6, jeżeli każdy przefiltrowany impuls prostokątny jest reprezentowany przez odpowiedź $\frac{\sin x}{x}$. Idealna odpowiedź filtra dolnoprzepustowego o paśmie W w dziedzinie czasu² przyjmuje postać typu $\frac{\sin x}{x}$ i ma zera w odstępach czasu $\frac{1}{2W}$. Jeśli zatem przebieg wyjściowy jest próbkowany w chwilach pokazanych na rysunku, to nie wystąpi żadna interferencja od sąsiednich impulsów, pod warunkiem, że $T \geq \frac{1}{2W}$ (lub stosując częściej stosowany zapis, gdy: $f_s \geq 2W$) i w takiej sytuacji amplituda poszczególnych impulsów może być jednoznacznie odtwarzana.

- Eksperymenty ze zwielokrotnianiem takie, jak Williarda Minera, „Multiplex Telephony”, U.S. Patent 745,734, filed February 26, 1903, issued December 1, 1903.
- H. Nyquist, „Certain Factors Affecting Telegraph Speed”, Bell System Technical Journal, Vol. 3, April 1924, pp. 324–346.
- H. Nyquist, „Certain Topics in Telegraph Transmission Theory”, A.I.E.E. Transactions, Vol. 47, April 1928, pp. 617–644.
- R.V.L. Hartley, „Transmission of Information”, Bell System Technical Journal, Vol. 7, July 1928, pp. 535–563.

• Uwaga: Klasyczną pracę Shannona napisano w roku 1948, długo po wynalezieniu PCM:

- C.E. Shannon, „A Mathematical Theory of Communication”, Bell System Technical Journal, Vol. 27, July 1948, pp. 379–423, and October 1948, pp. 623–656.
- W.R. Bennett, „Spectra of Quantized Signals”, Bell System Technical Journal, Vol. 27, July 1948, pp. 446–471.
- B.M. Oliver, J.R. Pierce, C.E. Shannon, „The Philosophy of PCM”, IRE Proceedings, Vol. 36, November 1948, pp. 1324–1331.

Rys. 1.7. Matematyczne podstawy PCM

² Dokładnie mówiąc odpowiedź impulsowa filtra idealnego o prostokątnej charakterystyce amplitudowej (i częstotliwości granicznej W) oraz liniowej charakterystyce fazowej (i stałym opóźnieniu τ) ma postać $\frac{\sin W(t-\tau)}{\pi(t-\tau)}$, a więc (z dokładnością do stałego czynnika) jest równa właśnie $\frac{\sin x}{x}$.

Oprócz nieco ogólnego artykułu Hartleya z roku 1928 [5], nie pojawiły się żadne inne znaczące publikacje na temat próbkowania aż do roku 1948, kiedy to klasyczne prace Shannona, Benneta i Oliviera [16], [17], [18], [19] już na zawsze dały solidne podwaliny teorii PCM. Lista tych klasycznych prac jest podana na rysunku 1.7.

Patenty PCM Aleca Harley'a Reevesa

Aż do roku 1937 zwielokrotnienie przez podział częstotliwości (FDM) bazujące na technice lamp próżniowych było szeroko stosowane w przemyśle telefonicznym w łączach dalekosiężnych. Jednakże szумы i zniekształcenia były czynnikiem ograniczającym zwiększanie wydajności tych systemów. Mimo, że w łączach mikrofalowych dostępne stały się szersze pasma, to dodatkowe szумы i zniekształcenia utrudniały stosowanie tam techniki FDM.

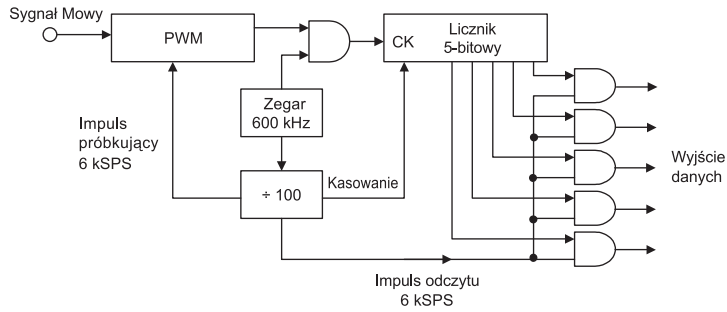
Na początku swojej kariery, w latach 20 XX wieku, Alec Harley Reeves studiował technikę przetwarzania sygnału analogowego na czas za pomocą modulacji czasowo-impulsowej PTM (*pulse time modulation*). Faktycznie był jednym z pierwszych, który zastosował liczniki do dokładnego wyznaczania czasu. W licznikach wykorzystywał przerzutniki bistabilne wynalezione kilka lat wcześniej przez Ecclesa i Jordana. W technice PTM amplituda impulsów jest stała, a informacja analogowa jest zawarta w czasie wystąpienia impulsu. Ta technika zapewniała lepszą odporność na szумы i zakłócenia niż zwykła transmisja analogowa, ale Reeves znajdował się o krok od wynalezienia systemu, który całkowicie zrewolucjonizował przyszły rozwój łączności.

Istniejąca silna potrzeba systemu o podobnej odporności na szумы i zakłócenia jaką wykazywał system telegraficzny, doprowadziła do (ponownego) wynalezienia przez Reevesa modulacji impulsowo-kodowej PCM. Stało się to w roku 1937, gdy Reeves był zatrudniony w paryskim laboratorium należącym do International Telephone and Telegraph Corporation. Pierwszy patent Reevesa dotyczący PCM został zgłoszony we Francji, ale niemal natychmiast pojawiły się podobne patenty w Wielkiej Brytanii i Stanach Zjednoczonych. Wszystkie jako wynalazcę wymieniały Reevesa [20]. Te patenty były bardzo wszechstronne i omawiały daleko idące zagadnienia:

1. Ogólną zasadę kwantyzacji i kodowania,
2. Dobór rozdzielczości do szumów i pasma medium transmisyjnego,
3. Transmisję sygnałów cyfrowych szeregową, równoległą i z wykorzystaniem modulowanej nośnej,
4. Opartą o liczniki realizację wymaganych 5-bitowych przetworników A/C i C/A.

Przeciwie niż w pierwszym patencie Raineya z roku 1926, Reeves w swoich projektach wykorzystał w pełni zalety istniejącej technologii lamp próżniowych.

Przetworniki A/C i C/A opracowane przez Reevesa zasługują na dalszą dyskusję ponieważ są to pierwsze w pełni elektroniczne przetworniki danych opisane w literaturze. Technika przetwarzania A/C (**rysunek 1.8**) zasadniczo wykorzystuje impuls próbkujący, który pobiera próbkę sygnału analogowego, ustawia przerzutnik RS i startuje narastanie napięcia liniowego. Napięcie liniowe jest porównywane z napięciem wejściowym i kiedy nastąpi ich zrównanie zostaje wygenerowany impuls kasujący przerzutnik RS. Sygnał wyjściowy przerzutnika RS jest zatem impul-

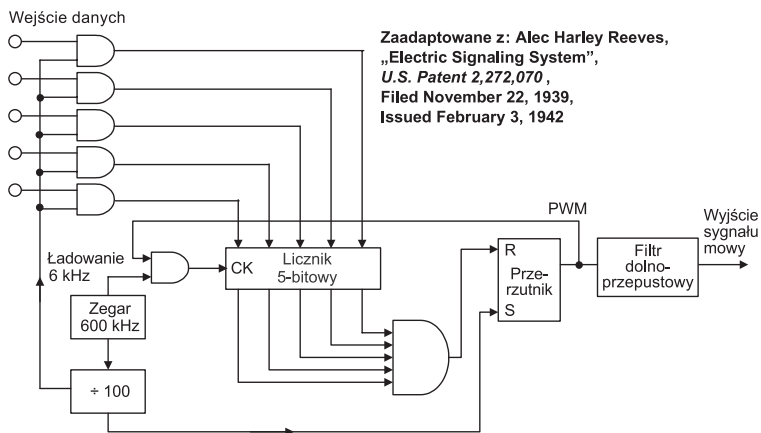


Zaadaptowano z: Alec Harley Reeves, „Electric Signaling System”,
U.S. Patent 2,272,070, Filed November 22, 1939, Issued February 3, 1942

Rys. 1.8. 5-bitowy zliczający przetwornik A/C A.H. Reevesa

sem o czasie trwania proporcjonalnym do wartości sygnału analogowego w chwili próbkowania. Ten impuls o modulowanej szerokości PWM (*pulse width modulation*) steruje bramkowanym generatorem. Liczba impulsów wyjściowych bramkowanego generatora reprezentuje zatem skwantowaną wartość sygnału analogowego. Ciąg tych impulsów jest łatwo przetworzyć na liczbę dwójkową podając je na wejście licznika. W systemie Reevesa zastosowano zegar główny o częstotliwości 600 kHz i dzielnik 100:1 generujący impulsy próbkujące z częstotliwością 6 kHz. System wykorzystuje 5-bitowy licznik i 31 impulsów (z całkowitej liczby 100 występujących pomiędzy impulsami próbkującymi) odpowiada pełnej skali sygnału.

W przetworniku C/A zastosowano podobny licznik i zegar tak, jak to pokazano na **rysunku 1.9**. Odebrany kod dwójkowy jest najpierw ładowany do licznika z jednoczesnym kasowaniem przerzutnika RS. Następnie, poprzez podanie impulsów zegarowych, zostaje uruchomiony licznik, który zaczyna zliczać w górę. Kiedy licznik przepelnia się i osiąga stan 00000, wtedy sygnał zegarowy jest odłączany i zostaje ustawiony przerzutnik RS. Liczba impulsów zliczona przez licznik dekodujący stanowi uzupełnienie odebranej wartości cyfrowej. Sygnałem wyjściowym przerzutnika RS jest impuls PWM reprezentujący uzupełnienie wejściowego słowa cyfrowego. Reeves zastosował prosty filtr dolnoprzepustowy do wydobywania sygnału



Zaadaptowane z: Alec Harley Reeves,
„Electric Signaling System”,
U.S. Patent 2,272,070,
Filed November 22, 1939,
Issued February 3, 1942

Rys. 1.9. 5-bitowy zliczający przetwornik C/A A.H. Reevesa

analogowego z impulsu PWM. Odwrócenie fazy jakie zachodzi w przetworniku C/A jest łatwo skorygować albo układami logicznymi albo we wzmacniaczu znajdującym dalej w torze sygnałowym.

Patenty Reevesa dotyczyły wszystkich zasadniczych aspektów PCM: próbkowania, kwantowania, kodowania cyfrowych próbek w formacie szeregowym, równoległym i zmodulowanym fazowo oraz innych metod transmisyjnych. Po stronie odbiorczej Reeves zaproponował odpowiednie dekodery do rekonstrukcji oryginalnego sygnału analogowego. Warto tu zaznaczyć, że mimo dużego znaczenia swojej pracy, po opublikowaniu patentów Reeves przesunął swoje zainteresowanie w stronę radiowej transmisji mowy na falach krótkich z zastosowaniem modulacji amplitudy impulsów, modulacji czasu trwania impulsów i modulacji położenia impulsów i nie kontynuował zainteresowania techniką PCM.

PCM i Bell System: lata II wojny światowej i powojenne do 1948 roku

W ramach porozumienia licencyjnego z International Telephone and Telegraph Corporation, inżynierowie Bell Telephone Laboratories dokonali przeglądu opracowań Reevesa i rozpoczęli własne prace rozwojowe techniki PCM. Rozpoczęte ok. 1940 roku i podczas II wojny światowej prace dotyczyły systemów utajniania przekazów mowy, w których technika PCM stała się obowiązkowa.

Wysoce utajniony „Projekt-X” mający na celu opracowanie systemu szyfrowania mowy wystartował w Bell Labs w roku 1940 i jest szczegółowo opisany w [6] (str. 296...317). Wykorzystano w nim złożoną technikę bazującą na technologii lamp próżniowych, która była zastosowana do wcześniejszych opracowań „wokodera”, techniki PCM i unikalnej metody szyfrującej z użyciem nagrań fonograficznych zawierających elektroniczny „klucz” do kodu. Ten system opracowano w Bell Labs i wdrożono do produkcji w Western Electric pod koniec roku 1942. Do kwietnia 1943 roku kilka terminali było ukończonych i zainstalowanych w Waszyngtonie, Londynie i północnej Afryce. Krótco potem dodatkowe terminale zainstalowano w Paryżu, Australii i na Filipinach.

Aż do końca wojny kilka różnych zespołów w Bell Labs pracowało nad PCM; jednakże wyniki ich prac, ze względu na utajnienie, opublikowano dopiero kilka lat później. Prace H.S. Blacka, J.O. Edsona i W.M. Goodalla opublikowano w latach 1947–1948 [21], [22] i [23]. Główny nacisk ich badań był położony na systemy szyfrowania mowy oparte na technice PCM i osiągnęli w tym zakresie wiele znaczących wyników. Edson i Black opracowali system PCM z kwantyzacją sygnału mowy z rozdzielczością 5 bitów, próbkowaniem z częstością 8 kSPS (kilo próbek na sekundę) i zastosowaniem kompensacyjnego przetwornika A/C [21] i [22]. W swojej klasycznej pracy, W.M. Goodall opisał eksperymentalny system PCM działający na podobnej zasadzie [23].

Niektóre ze znaczących opracowań, które pojawiły się w wyniku tych prac to: kompensacyjny przetwornik A/C, elektronopromieniowa lampa kodująca, dekodek Shannona-Racka, logarytmiczny rozkład poziomów kodowania (kompansja) oraz praktyczna uzasadnienie, że PCM jest wykonalna. Te wyniki są szczególnie elegancko podsumowane w artykule L.A. Meachama i E. Petersona z roku 1948 opi-

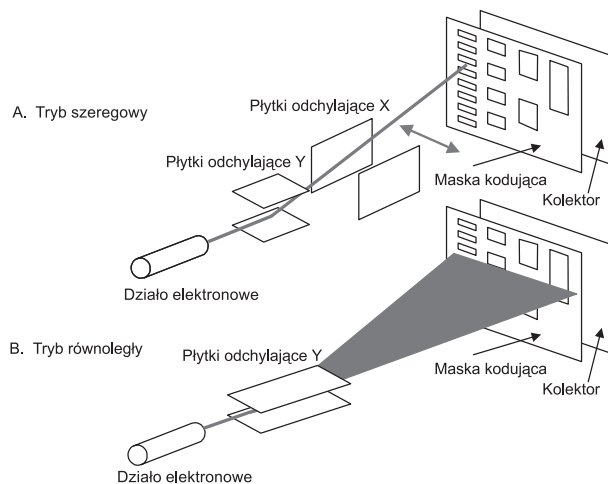
- „Projekt-X” system PCM utajniania mowy, lata 1940–1943.
 - 5-bit, 8 kSPS kompensacyjny przetwornik A/C
 - Logarytmiczna kwantyzacja mowy (kompansja)
 - Elektronopromieniowa lampa kodująca, 7-bit, 100 kSPS
 - Dekoder Shannona-Racka (C/A)
 - Udana demonstracja eksperymentalnych terminali PCM
 - Teoretyczna praca dotycząca PCM rozwinięta i opublikowana przez Shannona
- Wynalezienie tranzystora germanowego: 1947 r.

Rys. 1.10. Prace nad PCM w Bell Laboratories: lata II wojny światowej i powojenne do 1948 r.

sującym 24-kanałowy system PCM [24]. Podsumowanie prac dotyczących PCM i wykonanych w Bell Labs do roku 1948 przedstawiono na **rysunku 1.10**.

Znaczącym osiągnięciem w technologii przetwarzania A/C w omawianym okresie jest elektronopromieniowa lampa kodująca pokazana na **rysunku 1.11**. Ta lampa, opisana w pracy R.W. Searsa [25] była w stanie dokonywać próbkowania z częstotścią 96 kSPS i 7-bitową rozdzielczością. Podstawowa koncepcja kodera elektronopromieniowego jest przedstawiona na rysunku 1.11 na przykładzie urządzenia 4-bitowego. Pierwsze lampy pracowały w trybie szeregowym (rysunek 1.11A). Sygnał analogowy jest najpierw podawany do układu PP (próbkująco-pamiętającego) i w trakcie cyklu pamiętania wiązka elektronów przemiała ekran lampy poziomo. Pionowe odchylenie w trakcie pojedynczego, poziomego ruchu wiązki odpowiada wartości sygnału analogowego na wyjściu układu PP. Maską kodującą jest tak wykonana, by w zależności od wychylenia pionowego uzyskać właściwy kod dwójkowy. Kod jest rejestrowany przez kolektor, a bity są generowane w postaci szeregowej. W miarę upływu czasu, w kolejnych lampach stosowano wachlarzowato ukształtowaną wiązkę elektronów (rysunek 1.11B), co tworzyło pierwszy elektroniczny przetwornik *flash* formujący równoległe słowo wyjściowe.

We wczesnych lampach kodujących stosowano binarne maski kodujące, które powodowały powstawanie dużych błędów, gdy wiązka elektronów obejmowała dwa sąsiednie kody i oba podświetlała. Sposób w jaki powstawał ten błąd jest zilustrowany na **rysunku 1.12A**, gdzie pozioma linia reprezentuje wiązkę przemiającą punkt

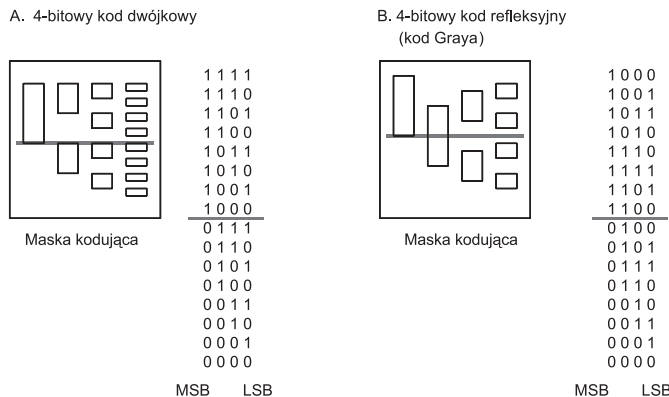


Rys. 1.11. Koder elektronopromieniowy

przejściowy środka skali (przejście między kodami 0111 i 1000). Przykładowo, błędne wyświetlenie najbardziej znaczącego bitu (MSB) powoduje błąd równy $\frac{1}{2}$ skali. Te błędy były minimalizowane poprzez umieszczanie precyzyjnych, poziomych przewodów korygujących wzdłuż granic między poszczególnymi kodami. Jeżeli wiązka wpadła początkowo na jeden z takich przewodów, to do napięcia odchylającego dodawano niewielkie napięcie korygujące, które przesuwało wiązkę poza obszar przejściowy między sąsiednimi kodami.

Błędy związane z binarnymi maskami kodującymi wyeliminowano przez zastosowanie masek kodujących z kodem Graya pokazanych na **rysunku 1.12B**. Ten kod był początkowo nazywany refleksyjnym kodem binarnym i został wynaleziony przez Elisha Graya w roku 1878, a następnie wynaleziony ponownie przez Franka Graya w roku 1949 [26]. Kod Graya ma tę własność, że sąsiednie wartości kodu różnią się tylko jedną cyfrą. W związku z tym, jeżeli podczas kodowania przetwarzanej wartości wystąpi niepewność co do ostatecznej wartości słowa wyjściowego, to po przetworzeniu tej wartości na kod dwójkowy błąd wyniesie tylko najmniej znaczący bit (LSB). W przypadku gdy przetwarzana wartość leży w połowie skali, zmianie ulega tylko MSB. Interującym faktem jest, że podobne zjawisko może wystąpić we współczesnych przetwornikach *flash* zawierających komparatory, na skutek metastabilności komparatorów. W przypadku małego przesterowania istnieje skończone prawdopodobieństwo, że komparator wygeneruje złą decyzję na swoim wyjściu wyposażonym w przerzutnik typu zatrask, co w sumie wywoła ten sam efekt jaki powstałby w przypadku zastosowania zwykłego dekodowania za pomocą naturalnego kodu dwójkowego. W wielu przypadkach kod Graya lub kod pseudo-Graya stosuje się do dekodowania sygnałów z zespołu komparatorów zanim w stopniu końcowym nastąpi ostateczna konwersja na naturalny kod dwójkowy (por. opisy architektury podane w rozdziale 3).

Mimo wielu problemów mechanicznych i elektrycznych związanych ze zbieżnością wiązki elektronów, technologia lamp kodujących osiągnęła swój szczyt w połowie lat 60 XX wieku, kiedy pojawił się eksperymentalny 9-bitowy koder pracujący z szybkością 12 MSPS [12]. Krótco potem jednakże postępy w rozwoju półprzewodnikowych przetworników A/C szybko sprawiły, że technologia lamp kodujących stała się przestarzała.



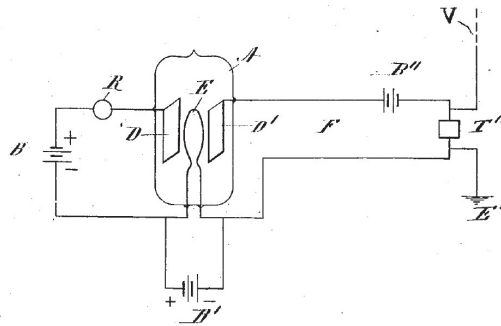
Rys. 1.12. Maska kodująca kodera elektronopromieniowego dla kodu dwójkowego i Graya

Wzmacniacze operacyjne i regeneratory telegraficzne: od lamp próżniowych do półprzewodników

Pomijając wczesne, bardzo nieefektywne wzmacniacze elektromechaniczne [5], rozwój wzmacniaczy elektronicznych rozpoczął się wraz z wynalezieniem w roku 1906 przez Lee de Foresta lampy próżniowej [28] i [29]. Na **rysunku 1.13** przedstawiono schemat pochodzący z oryginalnego patentu de Foresta.

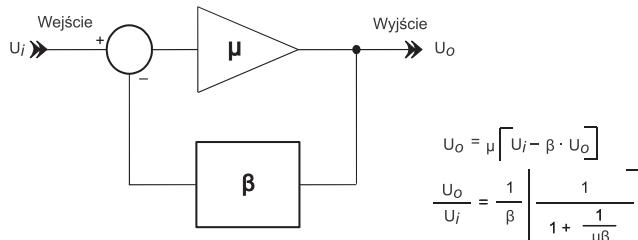
Do roku 1914 wzmacniacze na lampach próżniowych weszły do użytku w instalacjach telefonicznych. Począwszy od tych wczesnych układów lampowych, wzmacniacze elektroniczne zawsze miały istotny wpływ na rozwój przetworników danych. Kluczowym momentem rozwoju tej technologii było wynalezienie przez Harolda S. Blacka w roku 1927 wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym [30], [31] i [32]. Rozwój układów wzmacniających był kontynuowany w latach II wojny światowej, przy czym wielki udział w tym rozwoju miały Bell Labs. (Pełna historia rozwoju wzmacniaczy operacyjnych jest podana w [1]). Na **rysunku 1.14** przedstawiono schemat z późniejszego artykułu Blacka opisującego wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym.

Wynalezienie tranzystora germanowego w roku 1947 [33], [34] i [35], było przełomowe dla rozwoju PCM i wszystkich innych systemów elektronicznych. By PCM stało się praktyczne, należało w regularnych odstępach toru przesyłowego umieszczać regeneratory. Regeneratory lampowe odniosły pewien sukces i były używane w telegrafii i transmisji mowy przez pewien okres przed opracowaniem tranzystora, ale cechowała je marna niezawodność. Dopiero opracowanie przez L.R. Wrathalla



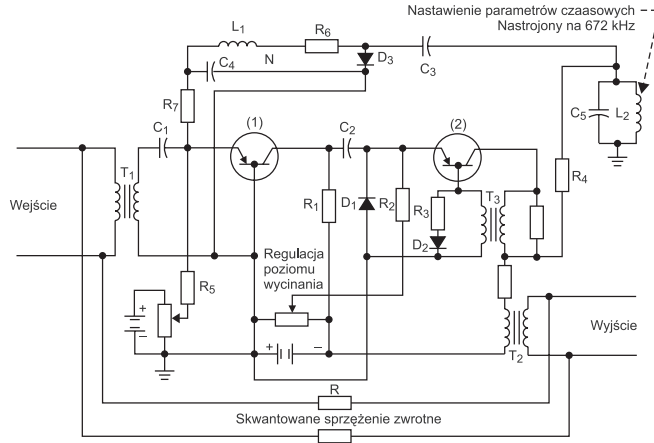
Wypis z: Lee De Forest, „Device for Amplifying Feeble Electrical Currents”, U.S. Patent 841,387, Filed October 25, 1906, Issued January 15, 1907

Rys. 1.13. Wynalezienie lampy próżniowej: 1906 r.



Harold S. Black, *Stabilized Feedback Amplifiers*, „Bell System Technical Journal”, Vol. 13, No. 1, January 1934

Rys. 1.14. Wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym Harolda Blacka – rok 1927



L.R. Wrathall, *Transistorized Binary Pulse Regenerator*, „Bell System Technical Journal”, Vol. 35, September 1956, pp. 1059–1084

Rys. 1.15. Półprzewodnikowy regeneratory PCM L.R. Wrathalla: 1956 r.

w roku 1956 regeneratory półprzewodnikowego wprowadziło rozwój systemów PCM w fazę dojrzałości [36]. Te regeneratory zademonstrowano w eksperymentalnym systemie kablowym, gdzie były rozmieszczone co 2,3 mili w przypadku kabla AWG-19 i co 0,56 mili w przypadku kabla AWG-32³. Schemat elektryczny regeneratory Wrathalla jest przedstawiony na **rysunku 1.15**.

W regeneratory Wrathalla użyto tranzystorów germanowych opracowanych w Bell Labs i produkowanych przez Western Electric. Tranzystory krzemowe wynalazł w roku 1954 Gordon Teal z Texas Instruments i osiągnęły sukces komercyjny ze względu na lepsze właściwości termiczne i niezawodność. Wreszcie wynalezienie układu scalonego w roku 1958 [37], [38], a następnie opracowanie w roku 1959 procesu planarnego [39] utworzyły odskocznię dla przyszłego rozwoju PCM. Te kluczowe opracowania w dziedzinie półprzewodników są podsumowane na **rysunku 1.16** i głębiej przedyskutowane w rozdziale 4 tej książki.

Wraz z opracowaniem regeneratory Wrathalla stało się jasne w roku 1956, że PCM może być efektywnie stosowana do zwiększenia liczby kanałów rozmównych na istniejących parach przewodów miedzianych. Była to szczególnie atrakcyjna możliwość na terenie miast, gdzie wiele korytek kablowych było całkowicie zapełnionych przewodami. W celu poprawienia odpowiedzi w paśmie akustycznym wiele z tych

- Wynalezienie tranzystora (germanowego) w Bell Labs: John Bardeen, Walter Brattain i William Shockley w roku 1947.
- Tranzystor krzemowy: Gordon Teal, Texas Instruments, rok 1954.
- Narodziny układu scalonego:
 - Jack Kilby, Texas Instruments, rok 1958 (zastosował przewody do wykonania połączeń).
 - Robert Noyce, Fairchild Semiconductor, rok 1959 (zastosował metalizację do wykonania połączeń).
- Proces planarny: Jean Hoerni, Fairchild Semiconductor, rok 1959.

Rys. 1.16. Kluczowe osiągnięcia na drodze rozwoju półprzewodników: lata 1947–1959

³ AWG (*American Wire Gauge*) – amerykański system oznaczania średnic drutu, stosowany dla drutów nieżelaznych. AWG-19 – 0,91186 mm; AWG-32 – 0,2032 mm. 1 mila to 1,609344 km [przyp. tłum.].

par przewodów było obciążonych cewkami umieszczonymi co 1,8 km. Naturalnym pomysłem było więc rozważenie zastąpienia tych obciążających cewek przez półprzewodnikowe regeneratory i zwiększenie przepustowości za pomocą PCM z 1 do 24 kanałów.

Z podanych tu powodów w Bell Labs podjęto decyzję opracowania systemu nośnego PCM i prototypowy, 24-kanałowy system został zaprojektowany i przetestowany w latach 1958 i 1959 na trasie między Summit w New Jersey i South Orange również w New Jersey. Ten system nazwany systemem nośnym T-1 transmitował 24 kanały rozmówne za pomocą ciągu impulsów o częstotliwości 1,544 MHz przy zastosowaniu kodu dwójkowego. W systemie zastosowano 7-bitowe kodowanie logarytmiczne z 26 dB kompensacją. Nieco później system rozszerzono do kodowania 8-bitowego. Półprzewodnikowe regeneratory były rozmieszczone w odstępach co 1,8 km, co odpowiadało pozycji cewek obciążających. Pierwsze robocze łącze T-1 uruchomiono w 1962, a do roku 1984 sieć łączy T-1 w Stanach Zjednoczonych przekroczyła 200 milionów km.