

Historie kybernetiky a umělé inteligence

02. Vývoj kybernetiky v USA

Miloš Železný

Katedra kybernetiky
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni

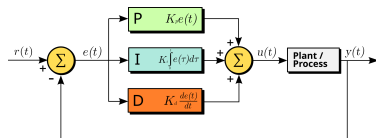
22. září 2025



Nicolas Minorsky II

PID regulátor

- ▶ PID regulátor je mechanismus zajišťující zpětnou vazbu v průmyslových řídicích systémech
- ▶ PID regulátor počítá odchylku mezi nastavenou a skutečně naměřenou hodnotou a z ní vypočítává akční zásah
- ▶ jeho základní myšlenkou je použití 3 složek - proporcionální (P), integrační (I) a derivační (D)



Další předválečný vývoj

Harold Hazen, MIT (1901–1980)

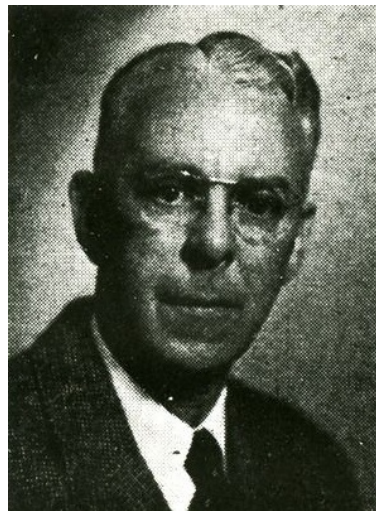
- ▶ sjednocení teorie řízení a zavedení moderní terminologie
- ▶ přesun důrazu z řízení ustáleného stavu na dynamické řízení
- ▶ koncepce servomechanismu jako zesilovače – převádí nízkoenergetický signál (např. z gyrokompasu) na vysokoenergetický akční výstup (např. otočení kormidlem)
- ▶ ukazuje se, že pro využití této koncepce je nutný další rozvoj např. matematického modelování a také první výpočetní techniky



Harold Black

Harold Stephen Black (1898–1983)

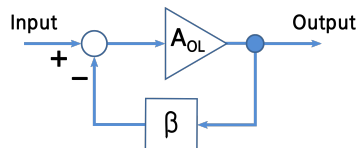
- ▶ americký inženýr, pracoval v Bell Labs v letech 1925–1963
- ▶ původně přišel s konceptem zesilovače s dopřednou vazbou
- ▶ zesilovač generoval i signál svého vlastního zeslení a ten se pak na výstupu odečítal od výstupního signálu
- ▶ tento v zásadě správný koncept však fungoval pouze v laboratorních podmínkách, pro praxi byl komplikovaný a vyžadoval složité seřizování



Harold Black II

Návrh zesilovače se zpětnou vazbou

- ▶ je považován za průlomový,
- ▶ řeší nelinearitu zesilovačů,
- ▶ celkové zesílení je sice sníženo, ale významně je sníženo zkreslení,
- ▶ při sériovém zapojení se zesílení násobí, ale zkreslení pouze sčítá,
- ▶ tento vynález umožnil telefonické spojení na velké vzdálenosti.



Harry Nyquist

Harry Nyquist (1889–1976)

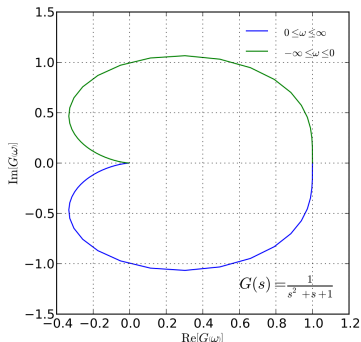
- ▶ původem švédský vědec
- ▶ Blackův kolega z Bell Labs



Harry Nyquist II

Nyquistovo kritérium stability

- ▶ Nyquist pomohl Blackovi vyřešit problém se stabilitou jeho zpětnovazebního zesilovače pomocí analýzy ve frekvenční oblasti
- ▶ dodnes je v teorii řízení pro vyšetření stability systému využíváno *Nyquistovo kritérium stability* založené na inspekci *Nyquistovy křivky*
- ▶ Nyquistova křivka vykresluje frekvenční charakteristiku systému v komplexní rovině. Křivka je parametrizovaná frekvencí $j\omega$ a zobrazuje zesílení jako absolutní hodnotu a fázový posuv jako úhel.



Henryk Bode

Henryk Wade Bode (1905–1982)

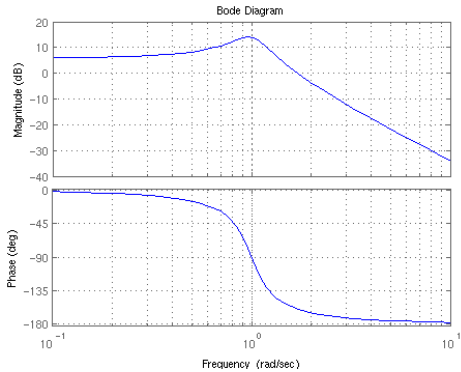
- ▶ americký inženýr a vynálezce holandského původu
- ▶ také kolega z Bell Labs
- ▶ v roce 1938 vyvinul amplitudový a fázový diagram, který byl později nazván po něm – Bodeho diagramy
- ▶ za války pracoval v NDRC na vývoji protiletadlových systémů válce spolu s Wernherem von Braunem byli členy NACA (předchůdce NASA) a podíleli se na vývoji balistických raket



Henryk Bode II

Bodeho diagramy

- ▶ Bodeho diagramy popisují frekvenční odezvu systému
- ▶ technicky jde o amplitudovou a fázovou logaritmickou frekvenční charakteristiku
- ▶ tyto diagramy se používají pro identifikaci systému a pro návrh stabilního systému splňujícího předem definované parametry.



AT&T – telefonní síť a monopol

- ▶ **AT&T (American Telephone and Telegraph)** byla založena v roce **1885**.
- ▶ Hlavním cílem bylo vybudování celonárodní telefonní sítě v USA.
- ▶ Firma vytvořila tzv. *Bell System* – rozsáhlou a vertikálně integrovanou strukturu.
- ▶ Od roku **1924** se vedly právní spory ohledně **monopolního postavení**.
- ▶ Tyto spory vyústily v roce **1982** v rozdělení společnosti tzv. antitrustovým rozhodnutím.

Založení Bellových laboratoří (Bell Labs)

- ▶ Bellovy laboratoře byly založeny v roce **1925** jako výzkumná jednotka AT&T.
- ▶ Převzaly technický výzkum od firmy **Western Electric**.
- ▶ Vlastnictví bylo rozděleno:
 - ▶ **50 % AT&T**
 - ▶ **50 % Western Electric**
- ▶ Cílem bylo centralizovat výzkum a vývoj pro celý Bell System.

Bell Labs – počátky a vývoj (do 2. sv. války)

- ▶ **1925** – založení Bell Labs (AT&T + Western Electric)
- ▶ **1926** – synchronní zvuková stopa pro filmy
- ▶ **1927** – přenos televizního signálu z Washingtonu do New Yorku
- ▶ **1928** – Blackův zesilovač se zpětnou vazbou
- ▶ **1931–32** – stereofonní záznam hudby (Filadelfský orchestr)
- ▶ **1932** – Nyquistovo stabilitní kritérium
- ▶ **1937** – vocoder a voder (kompresce řeči, syntéza řeči)
- ▶ **1943** – první funkční fotovoltaická buňka



National Defense Research Committee (NDRC)

- ▶ Založena v **červnu 1940** na návrh Vannevara Bushe
- ▶ Cílem bylo řídit a financovat **strategický výzkum pro obranu USA**
- ▶ Členové: Bush, James B. Conant (prezident Harvardu), Karl T. Compton (MIT), Frank B. Jewett (Bell Labs), a další
- ▶ Rozhodovali **o tom, co se bude (a nebude)** ve válečném období zkoumat
- ▶ Finančně podporovali projekty např. v oblasti radaru, šifrování, chemických zbraní a později i atomové bomby (skrže OSRD)
- ▶ Citace Bushe z pamětí:
„Byli tací, kteří protestovali, že založení NDRC byl fígl, jímž se malá skupinka vědců a inženýrů jednajících mimo zavedené kanály zmocnila pravomocí a peněz k programu vývoje nových zbraní. A v podstatě přesně takhle to bylo.“

Organizační struktura NDRC

National Defense Research Committee (NDRC)

NDRC byla rozdělena do 5 hlavních divizí:

- ▶ **A. Výzbroj a obrnění**
- ▶ **B. Bomby, paliva, plyny a chemie**
 - ▶ zahrnovala i **Manhattan Project** – vývoj atomové bomby
- ▶ **C. Komunikace a přeprava**
- ▶ **D. Detekce, řízení, nástroje**
 - ▶ **D-1** – detekce a radar
 - ▶ **D-2** – řízení střelby (vedoucí: **Warren Weaver**)
 - ▶ zde působil také **Norbert Wiener** (teorie řízení)
 - ▶ spolupráce s **Claude Shannonem** (v rámci Bell Labs)
 - ▶ **D-3** – měřicí nástroje
 - ▶ **D-4** – infračervené záření a tepelné vyzařování
- ▶ **E. Patenty a vynálezy**



Office of Scientific Research and Development (OSRD)

- ▶ Založen v roce **1941**, navázal na činnost NDRC.
- ▶ Vedoucí osobností zůstal **Vannevar Bush**.
- ▶ Spadal přímo pod prezidenta Roosevelta – zajištěn vysoký vliv a přístup k financím.
- ▶ Hlavní úkoly:
 - ▶ koordinace vědeckého výzkumu pro potřeby obrany,
 - ▶ převod poznatků do praktických technologií pro armádu.
- ▶ Klíčové projekty:
 - ▶ vývoj **radaru**, sonarových zařízení, balistických výpočtů,
 - ▶ vývoj a hromadná výroba **penicilinu**,
 - ▶ řízení projektu **Manhattan** (vývoj atomové bomby).
- ▶ OSRD hrála zásadní roli v propojení vědy a vojenské strategie během druhé světové války.



Vannevar Bush

Vannevar Bush (1890–1974)

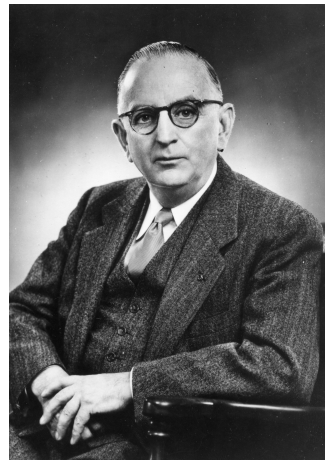
- ▶ Profesor na MIT, školitel H. Hazena a **Claude Shannona**
- ▶ Spolu s Hazenem vyvinul v letech 1928–1931 **mechanický diferenciální analyzátor**:
 - ▶ analogový počítač pro řešení diferenciálních rovnic pomocí integrování,
 - ▶ při každé změně úlohy bylo nutné zařízení mechanicky přenastavit.
- ▶ **1935** – tzv. *Rockefellerův analyzátor*.
 - ▶ automatické přenastavování pomocí servomechanismů a relé.
- ▶ **1936** – na práci byl najat mladý Claude Shannon.
- ▶ **1938** – Bush odchází z MIT do vedení **Carnegie Institution of Washington**.



Warren Weaver

Warren Weaver (1894–1978)

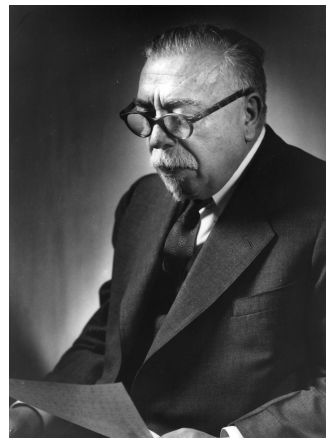
- ▶ Původně stavební inženýr, později pomocný profesor matematiky, matematický fyzik a vědecký manažer a vizionář.
- ▶ Vedl divizi D-2 NDRC (řízení střelby).
- ▶ Po válce se stal ředitelem vědeckého výzkumu ve **Rockefellerově nadaci**.
- ▶ Propagátor interdisciplinárního výzkumu a propojení humanitních a přírodních věd.
- ▶ Spoluautor s C. Shannonem knihy „*The Mathematical Theory of Communication*“ (1949)
 - ▶ doplnil Shannonovu technickou práci o úvod a výklad dopadů na jazyk, psychologii, kulturu.



Norbert Wiener

Norbert Wiener (1894–1964)

- ▶ V průběhu 1. sv. války učil filozofii na Harvardu, pracoval jako inženýr u GE (General Electric) a byl i novinářem
- ▶ Matematický génius, profesor na MIT, filozof (krátce ovšem studoval i zoologii).
- ▶ Za války působil v rámci NDRC (divize D-2).
- ▶ Spolupráce s inženýrem J. Bigelowem vedla k rozvoji myšlenek automatického řízení.
- ▶ **1948** – vydal knihu „*Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*“
 - ▶ položil základy kybernetiky jako interdisciplinární vědy.
- ▶ Zabýval se také neurovědami, biologií, etikou vědy a společenskými dopady techniky.



Weaver vs. Wiener

Konflikt mezi teorií a aplikací

- ▶ **Norbert Wiener** – brilantní matematik, který v rámci NDRC (divize D-2) vyvíjel **statistické metody predikce a vyhlazování** pro řízení **protiletectvé dělostřelecké palby**.
- ▶ Jeho práce byla teoreticky významná, ale obtížně implementovatelná v praxi – chyběla mu schopnost převést výsledky do **technicky funkčního zařízení**.
- ▶ **Warren Weaver**, vedoucí divize D-2, uznával Wienerův přínos, ale:
 - ▶ kritizoval jeho *nepraktický přístup*, nedůslednost v dokumentaci a neochotu spolupracovat s inženýry,
 - ▶ vnímal ho jako nespolehlivého v rámci přísně řízeného vojenského výzkumu.
- ▶ Výsledkem bylo, že Wienerův projekt byl ze strany NDRC **předčasně ukončen**, ačkoliv jeho myšlenky později významně ovlivnily vznik kybernetiky.

Macy Conferences: vývoj témat a přístupů

Proměna témat

- ▶ Název série se měnil:
 - ▶ *Teleological Mechanisms and Circular Causal Systems*
 - ▶ *Cybernetics: Circular Causal and Feedback Mechanisms*
- ▶ Poslední setkání: **Princeton, duben 1953**

Význam

- ▶ Položení základů oboru **kybernetika**
- ▶ Společná platforma pro diskusi o **zpětné vazbě, učení, řízení, mozku, stroji**
- ▶ Impuls pro vznik umělé inteligence, kognitivní vědy a systémového myšlení



Významné osobnosti Macy Conferences

- ▶ **Warren McCulloch** – předseda, neurovědec
- ▶ **Norbert Wiener** – otec kybernetiky
- ▶ **John von Neumann** – teorie her, výpočetní modely
- ▶ **Gregory Bateson** – antropologie, komunikace
- ▶ **Margaret Mead** – kulturní antropologie
- ▶ **Heinz von Foerster, Lawrence Frank, Arturo Rosenblueth, aj.**

Hlavní přínosy Macy Conferences

- ▶ Vznik formální **kybernetiky** jako interdisciplinárního oboru
- ▶ Rozvoj konceptu **zpětné vazby** v biologii, psychologii, technice
- ▶ Diskuse o **umělých neurálních sítích** (McCulloch Pitts)
- ▶ Vývoj raných idejí **umělé inteligence**
- ▶ Spolupráce mezi vědami: biologie, sociologie, technika, filozofie

1. Macy konference – březen 1946

- ▶ Název: *Feedback Mechanisms and Circular Causal Systems*
- ▶ Zaměření na živé systémy a společenské systémy
- ▶ Cíl: hledat obecné principy organizace, regulace, učení
- ▶ Silná biologická a neurologická orientace
- ▶ Účast: McCulloch, Mead, Wiener, von Neumann, Pitts, aj.



Vybraná témata a přednášky

- ▶ **Norbert Wiener:** matematické modely zpětné vazby
- ▶ **McCulloch Pitts:** neuron jako logická jednotka
- ▶ **Bateson Mead:** komunikace a učení u lidí a zvířat
- ▶ **von Neumann:** modely výpočetních strojů a automatů



Odkaz Macy Conferences

- ▶ Z Macy konferencí vycházejí:
 - ▶ **Kybernetika**
 - ▶ **Umělá inteligence**
 - ▶ **Kognitivní vědy**
 - ▶ **Teorie systémů a informace**
- ▶ Příklad úspěšné interdisciplinární spolupráce
- ▶ Inspirace pro moderní výzkum a technologii

Julian Bigelow

Julian Bigelow (1913–2003)

- ▶ americký inženýr, během války blízký spolupracovník N. Wienera
- ▶ řízení střelby, protiletadlové zbraně, Wienerův filtr
- ▶ v roce 1946 na Wienerovo doporučení stává spolupracovníkem J. von Neumanna a je hlavním konstruktérem jednoho z prvních číslicových počítačů zvaného IAS machine nebo též MANIAC



Arturo Rosenblueth

Arturo Rosenblueth (1900–1970)

- ▶ mexický lékař a fyziolog
- ▶ spolu s Wienerem a Bigelowem autor článku *Behavior, Purpose and Teleology (Chování, účel a teleologie)*
- ▶ účelové aktivní chování může být rozděleno do dvou tříd: *zpětnovazební* (či *teleologické*) a *ne-zpětnovazební* (či *neteleologické*); veškeré účelové chování může být chápáno jako vyžadující negativní zpětnou vazbu



Warren McCulloch

Warren Sturgis McCulloch (1898—1969)

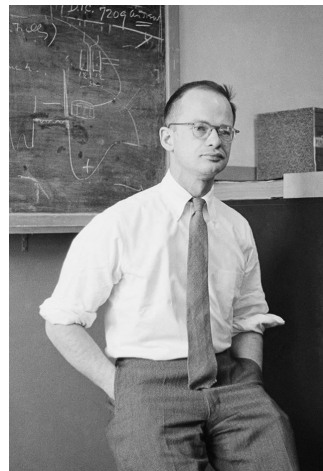
- ▶ americký neurofyziolog
- ▶ od roku 1941 profesorem psychiatrie v Chicagu
- ▶ předsedal sérii Macy konferencí



Walter Pitts

Walter Pitts (1923–1969)

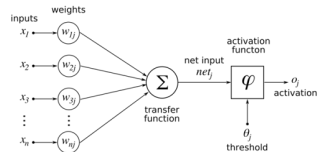
- ▶ americký logik
- ▶ pracoval v oblasti počítačích neurověd
- ▶ jako dítě studoval matematiku a logiku samostudiem a také jazyky (latinu a řečtinu)
- ▶ je známo, že ve 12 strávil 3 dny čtením *Principia Mathematica* v knihovně; poté napsal Bertrandu Russelovi (jednomu z autorů), jaké vidí problémy v první polovině prvního svazku a dostal nabídku studovat v Cambridge ve věku 12 let, kterou v tu dobu nevyužil



Model neuronu

McCullochův a Pittsův model neuronu

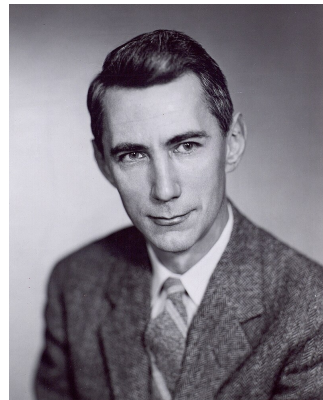
- ▶ založený na podobnosti se skutečným neuronem
- ▶ používá váhy jednotlivých vstupů – tyto jsou předmětem trénování
- ▶ je základem pro moderní neuronové sítě



Claude Shannon

Claude Shannon (1916–2001)

- ▶ Americký elektroinženýr, matematik a kryptograf
- ▶ Roku 1936 nastupuje na MIT jako magisterský student k V. Bushovi a začíná spolupracovat na diferenciálním analyzátoru
- ▶ Obhájí diplomovou práci *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*
 - ▶ v této práci ukazuje, že pomocí Booleovy algebry lze zjednodušit návrh spínacích obvodů používaných v telefonní síti
 - ▶ zapojení reléových obvodů lze využít k řešení problémů formulovaných v Booleově algebře



Claude Shannon II

Claude Shannon za 2. světové války

- ▶ tato práce, která v podstatě položila základy vývoje číslicových počítačů, je považována za *pravděpodobně nejdůležitější, a také nejznámější, diplomovou práci 20. století*
- ▶ matematické principy využití v diplomové práci pak ve své disertační práci aplikuje i na populační genetiku
 - ▶ 1940 – *An Algebra for Theoretical Genetics*
- ▶ ve stejném roce nastupuje na Institute for Advanced Study (IAS) v Princetonu, kde se setkává s J. von Neumannem, ale také A. Einsteinem a K. Gödelem

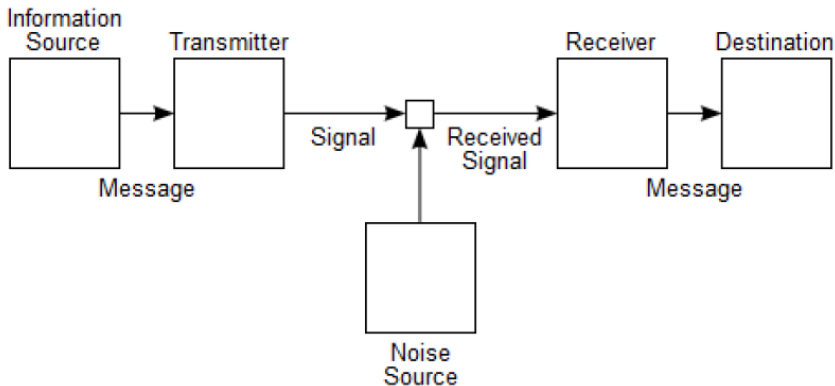
Claude Shannon III

Claude Shannon za 2. světové války

- ▶ 1941 – Shannon nastupuje do Bell Labs a pracuje v rámci kontraktu s NDRC (sekce D-2) na řízení střelby a kryptografických úlohách
- ▶ 1943 -- v průběhu 2 měsíců na začátku tohoto roku se opakovaně setkává s britským matematikem a kryptoanalytikem Alanem Turingem a diskutují spolu svoji myšlenky
- ▶ 1945 – technická zpráva pro NDRC – část věnovaná problému *vyhlazování* dat pro řízení střelby napsaná Shannonem a jeho kolegy z Bell Labs používá s analogií s komunikačními systémy ve kterých je také třeba „oddělit užitečný signál od rušivého šumu“ – základ pro pozdější koncept teorie informace

Teorie informace

- ▶ **1948 – Claude Shannon:** článek *A Mathematical Theory of Communication*
- ▶ Vznik kvantitativní teorie informace – přenos zpráv nezávisle na jejich významu



▶ **Klíčové pojmy:**

- ▶ *Informační entropie* – míra neurčitosti/variability zdroje
- ▶ *Redundance* – nadbytečnost zvyšující odolnost vůči chybám

