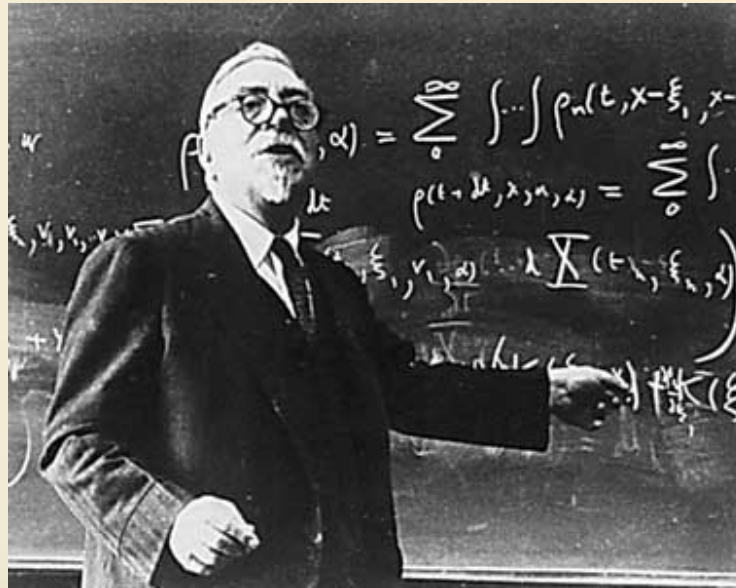


# Přednášky z lékařské biofyziky

Biofyzikální ústav Lékařské fakulty  
Masarykovy univerzity, Brno



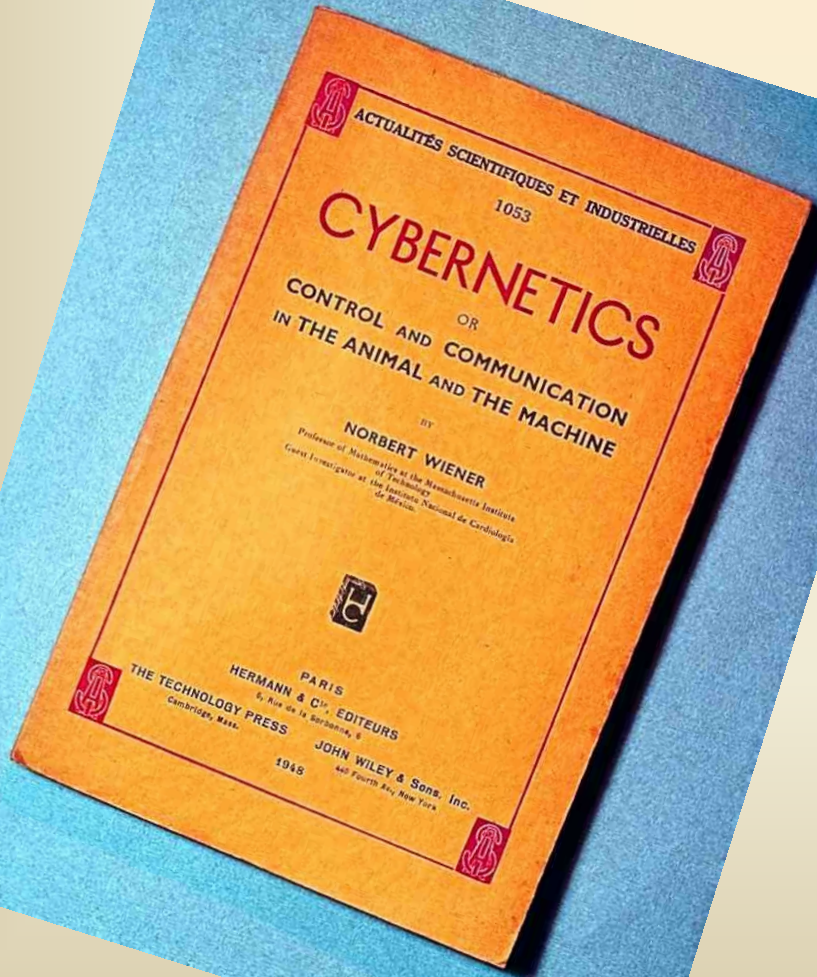
Norbert Wiener 26.11.1894 - 18.03.1964

## **Biokybernetika**

# Obsah přednášky

- Kybernetika
- Kybernetické systémy
- Zpětná vazba
- **Principy informační teorie**
- Informační systém
- Informační procesy v živém organismu
- Řízení a regulace
- Principy modelování

# Norbert Wiener



■ *N. Wiener:*

"Kybernetika neboli řízení a sdělování v živých organismech a strojích", (1948)

# Definice

- Kybernetika je matematická věda zabývající se obecnými zákonitostmi informačních a řídicích procesů v organizovaných systémech, vymezených na objektech technického, živého či společenského charakteru. Jsou to systémy, v nichž probíhají procesy řízení, regulace, přenosu a zpracování informace.
- **Systém** – množina prvků, mezi nimiž existují nějaké vztahy
- Pro jejich popis používáme modelování:
  - Zjednodušené vyjádření objektivní reality.
  - Model systému je třeba chápat jako množinu vztahů mezi jednotlivými prvky
  - Výběr modelu musí odpovídat specifickému cíli
  - Pro správné modelování systému je nutné znát jeho strukturu a funkci
- **Aplikovaná kybernetika** – modelování v konkrétních oblastech lidské činnosti, např. technická kybernetika, biokybernetika a společenská kybernetika. Modely mohou být:
  - Teoretické - matematický popis systémů
  - Experimentální - modelování a simulace

# Kybernetika a informatika

Není to úplně totéž! Kybernetiku lze dnes chápat jako širší teoretické pozadí informatiky a několika dalších oborů (ekonomiky, managementu, sociologie aj.)

# Biokybernetika a lékařská kybernetika

- **Hlavní cíl:** analýza a modelování regulačních a řídicích systémů živého organismu za fyziologických i patologických podmínek (patologický proces - narušení regulačních mechanismů)
- **Lékařská kybernetika specificky:**
  - aplikace kybernetiky a jejích technických prostředků na lidský organismus za fyziologických i patologických podmínek.
  - Podpora lékařského rozhodování při diagnostice i při plánování terapie
  - Využívání kybernetických principů při řízení zdravotnictví = zdravotnická kybernetika.

Pozor! Pod výrazem **bioinformatika** dnes rozumíme především matematický přístup ke analýze a modelování biopolymerů.

# Živé systémy jsou kybernetické systémy

- Základní vlastnost živých systémů z pohledu kybernetiky: mnohočetná interakce s okolím
- Vnější parametry (proměnné) ovlivňující systém = **vstup**
- Parametry (proměnné), jimiž systém působí na svoje okolí = **výstup**
- Vstupní proměnné musí být při popisu systému zvoleny za *nezávislé proměnné*.
- Výstupní proměnné závisejí na vstupních proměnných a vnitřních parametrech daného systému.
- Příklad: ucho

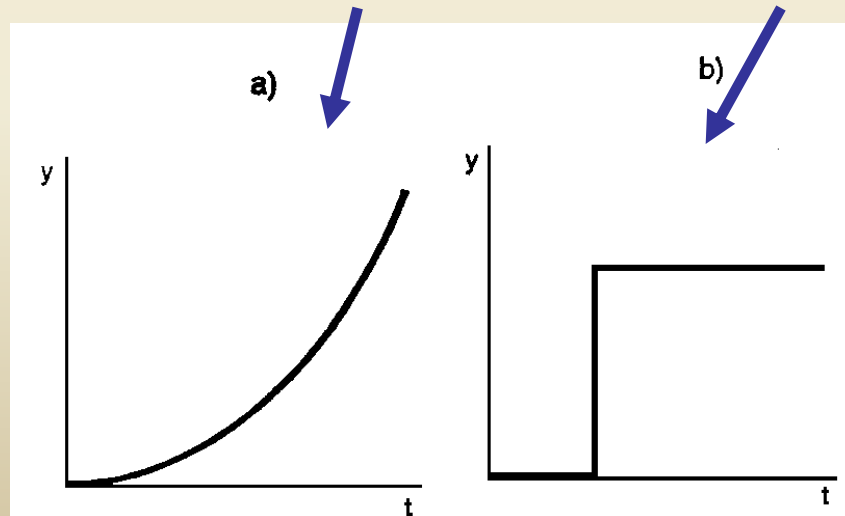
# Analýza a syntéza systému

- **Analýza systému** – známe strukturu – musíme určit chování
- **Syntéza systému** – struktura má být určena – chování je známé
- Černá skříňka – systém má neznámou strukturu i chování. **Identifikace** takového systému se provádí na základě zjišťování vztahu mezi vstupními a výstupními proměnnými.



# Transformace

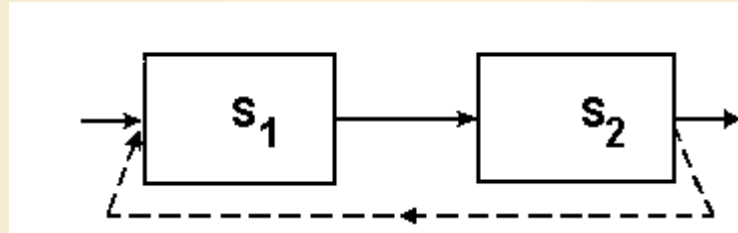
- **Transformace – závislost hodnot výstupní proměnné na hodnotách vstupní proměnné**
- **Můžeme rozlišit:**
  - **lineární systémy (přímka, ideální případ)**
  - **nelineární systémy**
- **Linearizace nelineárního systému – aproximace přímkou**
- **Časový průběh změn výstupní proměnné určuje chování systému – může být spojitě nebo nespojitě**



# Transformace

- Základní druhy transformací:
  - Zesílení nebo zeslabení vstupní proměnné
  - Její časové zpoždění
  - Provedení logické operace
  - Selektivní propustnost
  - Generování specifických časových průběhů aj. (též deformace vstupní proměnné)
- Se všemi těmito transformacemi se setkáváme u biologických systémů.
- Transformace nemusí být neměnná v čase. Dynamické systému jsou schopny adaptace a učení.

# Zpětná vazba



- **Zpětná vazba:** působení výstupní veličiny systému na vlastní vstup
- U **kladné zpětné vazby** působí odchylka výstupní veličiny tak, že veličina vstupní je trvale zesilována nebo zeslabována (kumulativní účinek - nežádoucí pro řízení dynamických systémů)
- U **záporné zpětné vazby** působí změna výstupní veličiny proti směru veličiny vstupní a tím změnu vstupní veličiny minimalizuje (účinek kompenzační - umožňuje regulaci). Základní mechanismus homeostázy.

# Principy teorie informace

## Náhodný jev

- **Informace**: jakýkoliv údaj o jevech a procesech probíhajících v systému i v jeho okolí. Informace vyjadřuje **vztah** mezi systémy i mezi prvky téhož systému.
- Jak budeme ale definovat „údaj“ – jako informaci?
- **Náhodný jev**: takový jev, který v daných časových a prostorových podmínkách může, ale také nemusí nastat

Četnost výskytu jevu  $F_A$ :

$$F_A = n/N$$

$n$  - počet případů, v nichž jev nastal

$N$  - celkový počet „pokusů“

# Pravděpodobnost a informační entropie

- **Pravděpodobnost**  $P(A)$  - střední hodnota četnosti dané události
- Pravděpodobnost může nabývat hodnot od 1 do 0 čili  $(1 > P(A) > 0)$
- Událost nemožná a jistá
- Pokus, jehož výsledkem může být hodnota  $A_1 \dots A_n$  se stejnou  $P(A)$ : S rostoucím  $n$  roste stupeň neurčitosti (daný počtem dílčích neurčitostí) - označuje se jako **informační entropie**
- $n$  vzájemně se vylučujících jevů s  $P(A_1), P(A_2) \dots P(A_n) \Rightarrow$  **stupeň neurčitosti**  $N_i$  jednoho možného výsledku je:
- $N_i = -P(A_j) \cdot \log_2 P(A_j)$
- Informační entropie celého pokusu: (součet dílčích neurčitostí)
- $H = \sum -P(A_j) \cdot \log_2 P(A_j)$

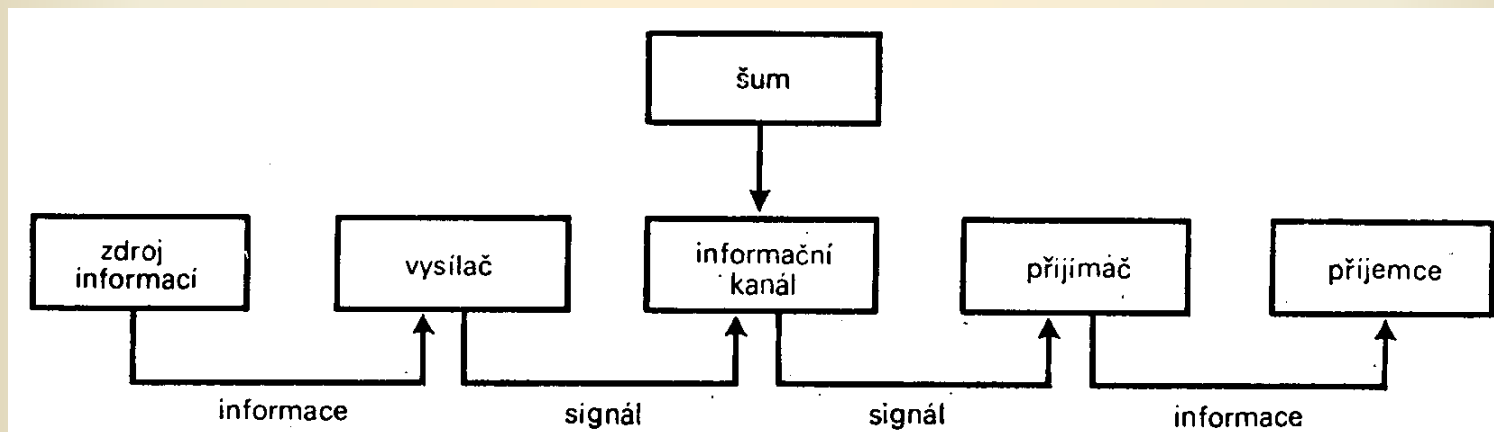
# Pravděpodobnost a informační entropie

- Intuitivně: nejistota může být odstraněna dodáním odpovídajícího množství informace
- Poslední výraz je tedy i mírou množství (objemu) informace.
- Informace zvyšuje uspořádanost systému!
- $P(A)$  velké - malé množství informace a naopak
- Pokus poskytuje dva alternativní výsledky se stejnými  $P(A) = 0,5 \Rightarrow$
- $H = - (0,5 \cdot \log_2 0,5 + 0,5 \cdot \log_2 0,5) = 1$
- 1 bit (*binary digit*)

# Informační systém

- **Tři části:**
  - zdroj informace
  - měnič-vysílač (kódování)
  - informační kanál (šum)
  - přijímač (dekódování)
  - příjemce informace
- Materiálním nosičem informace je **signál**.
- **Informační kanál** = prostředí, v němž se uskutečňuje předávání signálu
- **Symboly** - bezrozměrné veličiny kvalitativně zobrazující daný jev
- **Poloha** - prostorové a časové rozmístění symbolů v procesu kódování
- Elementární signál nese jeden bit informace
- Max. množství informace, které může informační kanál přenést za časovou jednotku = **kapacita informačního kanálu**

# Redundance



**Šum** = vlivy snižující původní množství přenášené informace nadbytečná informace eliminující šum - informace redundantní.

**Redundance**  $R$  je dána vzorcem:

$$R = 1 - H/H_{MAX} ,$$

kde  $H$  je množství informace skutečně přenesené a  $H_{MAX}$  je maximální množství informace, které může být přeneseno.

- Jazyky - redundance relat. vysoká (Č.J. asi 70 %),  
přírodovědné texty - nízká.



# Informační pochody v živém organismu

- Lidský organismus může *zpracovat* při optimální nabídce informací tok o průměrné hodnotě asi  $35 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Přenos a zpracování informace v živém organismu: **humorální** a **nervový**
- Tři úrovně:
  - základní biochemické reakce (řízení syntézy bílkovin – humorální mechanismus)
  - autonomní systémy (regulace např. srdeční činnosti - humorální i nervové mechanismy)
  - centrálním nervový systém

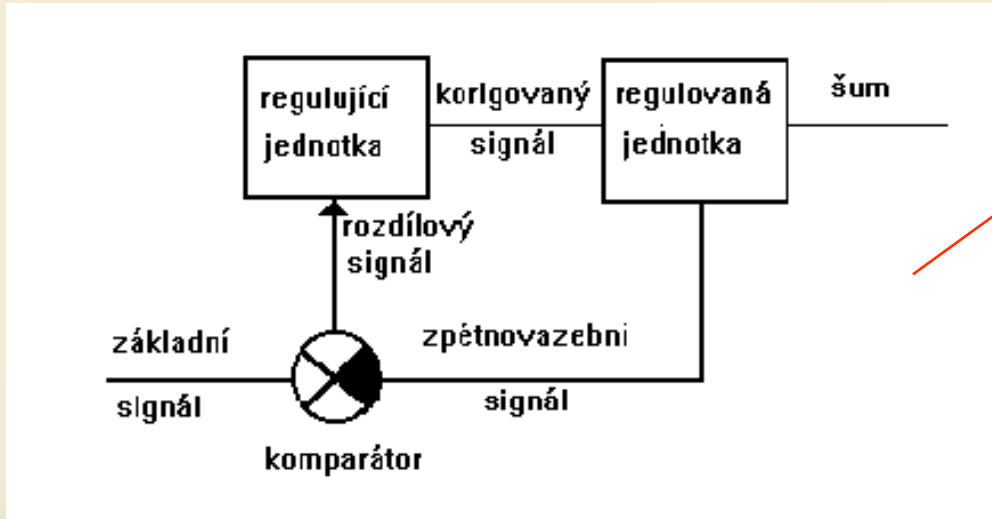
# Příklady informačních procesů v lidském organismu: oko

- CNS: Zpracování informace ve zrakovém analyzátoru, ve žluté skvrně je asi  $10^7$  receptorů, každý může rozlišit 120 úrovní intenzity světla, k čemuž je třeba 7 bitů informace. Oko dovede rozlišit řádově 10 obrazů/s, takže kapacita zrakového analyzátoru na úrovni sítnice je asi  $7 \cdot 10^8$  bit/s. Zrakový nerv obsahuje asi  $10^6$  nervových vláken. Každým může být převedeno asi 300 činnostních potenciálů za sekundu, takže kapacita *n. opticus* je asi  $3 \cdot 10^8$  bit/s. Ve srovnání s klasickým televizním kanálem ( $10^7$  bit/s) tato kapacita asi o řád vyšší.

# Příklady informačních procesů v lidském organismu: DNA

- DNA obsahuje čtyři dusíkaté báze: A, G, C a T. Kterýkoli nukleotid může obsahovat jen jednu z nich. Informace nesená jedním nukleotidem bude tedy 2 bity. DNA lidské spermie obsahuje  $10^9$  nukleotidů, čili informaci  $2 \cdot 10^9$  bitů.
- **Bílkovina:** 20 různých AK - informace nesená jednou AK je tedy přibližně 4 bity. Molekula bílkoviny obsahuje cca  $10^3$  AK zbytků, takže její inf. kapacita je cca  $4 \cdot 10^3$  bitů. Podíl celkové informace molekuly DNA a informace nesené bílkovinou určuje počet bílkovinných molekul schopných syntézy -  $5 \cdot 10^5$ .
- Předpoklad: 1 bílkovina = 1 enzym, 1 enzym kódován 1-ním genem  $\Rightarrow$  DNA chromozómů lidské spermie obsahuje (jde o limitní hodnotu) asi  $5 \cdot 10^5$  genů.

# Řízení a regulace



- Řízení - změny v chování systému vyvolané informací předanou tomuto systému z řídicí části.
- Podle složitosti procesu řízení:
  - systémy ovládané - bez zpětné vazby
  - regulované - se zpětnou vazbou.
- Regulace - proces minimalizace rozdílů mezi skutečnými hodnotami regulovaných veličin a jejich požadovanou hodnotou
- Regulace automatická - znaky:
  - Přímé spojení (inf. kanál) mezi částí řídicí a řízenou
  - Zpětná vazba (záporná, krátká nebo dlouhá) mezi řízenou a řídicí částí
  - Automatická přeměna informací přijímaných kanálem zpětné vazby v příkazy řízení

# Formy řízení v živých organismech:

- 1. Přímé řízení - příkazy řízení jsou z řídicí části předávány přímo části řízené.
- 2. Řízení s autonomní odezvou. Příkazy řízení jsou jen spouštěcím mechanismem pro přechod z jednoho stavu do druhého (humorální řízení).
- 3. Diferencované řízení - zahrnuje obě předešlé formy. Uskutečňuje se řídicím systémem se složitou zpětnovazební sítí (řízení CNS)

# Automaty

- Technická zařízení využívající principů řízení a kontroly a do určité míry schopná pracovat samostatně - **automaty**:
- 1. Bez zpětné vazby - provádějí jen programově řízený úkon, nemohou svoji činnost upravovat.
- 2. Se zpětnou vazbou - mají schopnost autoregulace, v určitých mezích udržují svoji funkci.
- 3. Schopné určitých logických operací, samočinné adaptace a učení. Mají-li vazbu s vnějším prostředním a jsou-li vybaveny manipulační schopností, nazýváme je **roboty**.
- V lékařství se automaty používají např. k automatické laboratorní analýze biochemických a hematologických veličin nebo k monitorování a analýze základních životních funkcí.

# Principy modelování

- Teoretický poznávací proces, jehož cílem je na základě zobrazení určité předlohy (originálu) poznání jejích vlastností. Záměru modelu je podřízen i způsob zobrazení.
- **Každý model je vždy zjednodušením skutečnosti.**
- Základ modelování: **abstrakce ztotožnění**. U předmětů bereme v úvahu jen ty vlastnosti, v nichž se shodují. Model dostatečně zobrazující vlastnosti originálu může být využit jako zdroj informací o něm samotném i o jeho interakcích.
- **Analogie** - strukturní nebo funkční podobnost mezi předměty, procesy a jevy. Strukturní analogie spočívá v částečné nebo úplné shodě struktury dvou systémů.
- **Analogie funkční** (důležitější) - shoda funkčních vlastností dvou systémů, přičemž povaha prvků obou systémů může být značně rozdílná (např. funkční analogie mezi přirozenou a umělou ledvinou).
- Zvláštním druhem analogie je **isomorfie** - uvažované systémy vyhovují stejnému matematickému popisu.

# Způsoby třídění modelů:

- **Formálně: reálné** (fyzikální, chemické) a **abstraktní** (matematické). Tyto lze dle obsahu náhodných prvků dělit na **stochastické** a **deterministické**.
- **Podle způsobu tvorby: induktivní** (z empiricky získaných informací) a **deduktivní** (na základě předpokládaných vztahů).
- **Podle účelu: deskriptivní**, sloužící k popisu vlastností originálu, a **explanatorní**, které slouží k ověření hypotéz.

Výběr modelovaných vlastností musí být **reprezentativní**. Vlastnosti, které model nezobrazuje, nesmí znemožnit vyvození obecných závěrů.



# Proces tvorby a použití modelu

- Pozorování určitého jevu
- Jeho experimentální ověření a, je-li to nutné, jeho kvantifikace
- Zhotovení modelu
- Jeho srovnání s výsledky experimentu
- **Simulace** = specifický druh modelování. Princip: Původní systém je nahrazen simulačním modelem. Je provedeno zpětné ověření znalostí získaných pomocí simulačního modelu se znalostmi získanými experimentem na původním systému. Simulace se zpravidla provádějí pomocí počítačů.
- Matematické modelování biologických a fyziologických procesů (stimulováno např. rozvojem radionuklidových metod – studuje se distribuce látek v organismu a jejich kinetika).

Autor:

**Vojtěch Mornstein**

Obsahová spolupráce:

Ivo Hrazdira, Carmel J. Caruana

Poslední revize: září 2024