

# Řízení technologických systémů v elektroenergetice

Ivan Petružela



## Řízení energetické soustavy

- **Vznik elektrizačních soustav**
- **Řízení technologických procesů v elektrizační soustavě**
- **Matematický popis řízení technologických procesů**
- **Kvalita řízení technologických procesů**
- **Definice kvality regulačního procesu**
- **Typy regulátorů**



## Vznik elektrizačních soustav

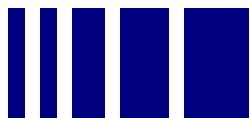
**1878 – Prvním využitím elektrické energie v českých zemích byla instalace šesti obloukových lamp pro osvětlení tkalcovny Inu v Moravské Třebové. Lampy s proudem 25 A napájelo dynamo systém Gramme.**

**Už v následujícím roce se však rozsvítila světla v továrně na kůže v Dřevěném Mlýně u Jihlavy a elektrizace dalších objektů na sebe nenechala dlouho čekat. Výrobní zdroje již nesloužily pouze jejich zřizovatelům, ale vyráběná elektřina byla rozváděna, většinou vrchním vedením různých napěťových soustav, dalším odběratelům.**

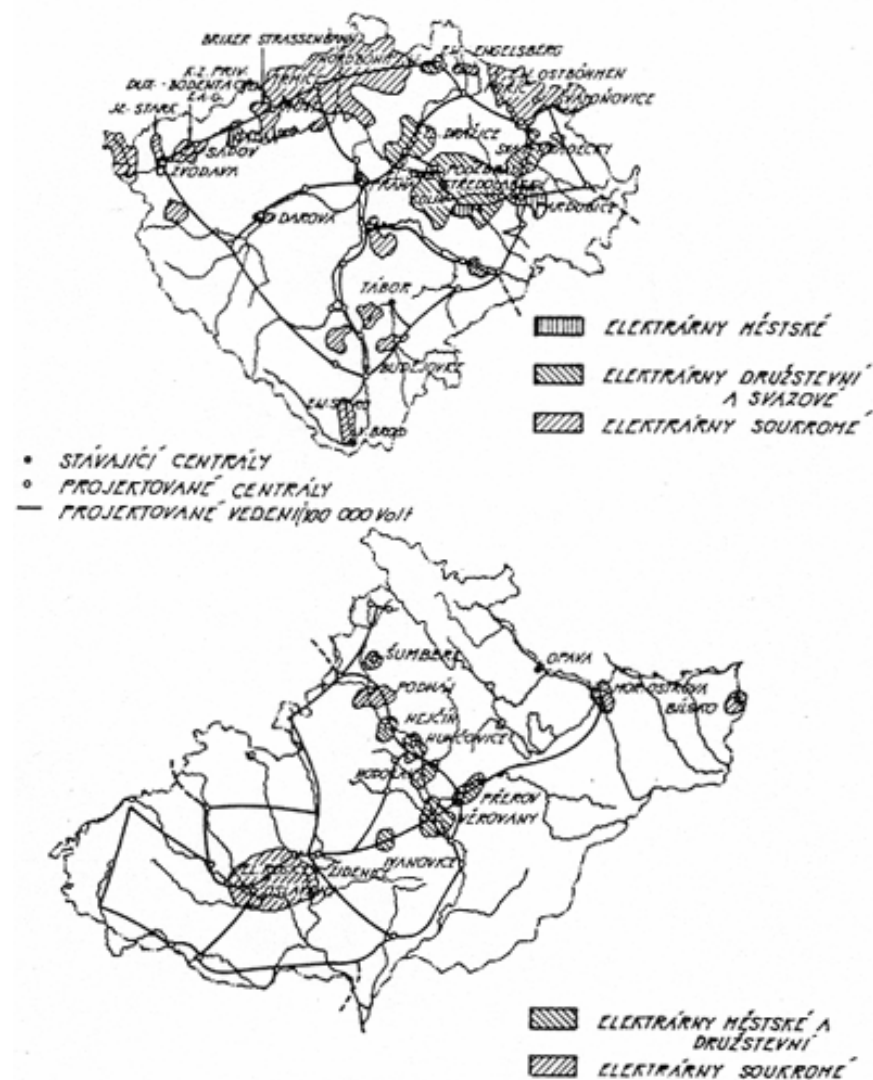
**Vznikaly tzv. Městské elektrárny, které se staly nejen výrobci, ale i distributory elektřiny. Městské elektrárny z počátku vyráběly energii především pro zajištění veřejného osvětlení. Na vzniklou elektrickou síť byly později postupně připojovány domácnosti. Zdrojem energie byla stejnosměrná dynamo poháněná parními nebo naftovými motory.**

**K monopolizaci přispěly i dobové technické možnosti použití střídavého proudu, jeho snadné transformace na libovolné napětí, a tím i možnost přenosu elektrické energie na podstatně větší vzdálenosti než umožňoval stejnosměrný proud.**

**1889 – Za první veřejnou elektrárnu v Čechách se považuje instalace dynamo v Žižkovské plynárně. Sloužilo zejména pro elektrické osvětlení.**



## Vznik elektrizačních soustav





## Vznik elektrizačních soustav

Výroba a zavádění elektrické energie do pražské aglomerace je bezprostředně spjata se jménem českého elektrotechnika a průmyslníka Františka Křižíka. Narodil se v roce 1847 v Plánicích u Klatov.

Po absolvování Českého učení technického nastoupil u rakouské dráhy. V roce 1883 osvětlovaly Křižíkovy elektrické obloukové lampy Staroměstské náměstí; zdrojem stejnosměrného proudu byla dynamo poháněná plynovou turbinou.

Příležitostí k dalšímu zavedení elektrické energie pro pohon dopravního prostředku se stala Zemská jubilejní výstava v roce 1891. Byla to první průmyslová výstava na evropském kontinentě. Patronát nad výstavou měl přímo císař, který při této příležitosti udělil Františku Křižíkovi koncesi pro stavbu a provoz elektrické dráhy.

Podle ní postavil Křižík první pokusnou elektrickou dráhu od horní stanice lanové dráhy na Letné, Ovineckou ulicí až k hornímu vchodu do Královské obory. Měřila 800 metrů; měla poprvé v Rakousko-Uhersku použitý kladkový sběrač proudu, elektromotor měl výkon osm koňských sil.

Elektrický proud k pohonu vozů a k elektrickému osvětlení Ovinecké ulice i Královské Obory dodávalo dynamo poháněné lokomobílou v dřevěném objektu budovy u stanice letenské lanové dráhy.



## Vznik elektrizačních soustav

Elektrinou v Praze se zabývala zvláštní komise pro elektrické dráhy při městské radě, která se v roce 1897 změnila na správní radu elektrických drah a vytvořila základ Elektrických podniků královského hlavního města Prahy - (EP).

Tato společnost do vínku dostala monopolní podnikání a provozování pražské dopravy, správu elektráren a rozvodu elektrické energie. Elektrické podniky měly v prvním roce své existence 6 administrativních zaměstnanců:

- vrchního inženýra elektrotechnika
- magistrátního sekretáře
- inženýra elektrotechnika
- inženýra pro stavbu drah
- expedienta
- sluhu

**1897 – Schválen projekt výstavby elektrárny v pražských Holešovicích už s třífázovými generátory (1900 – Zahájen provoz prvních generátorů)**

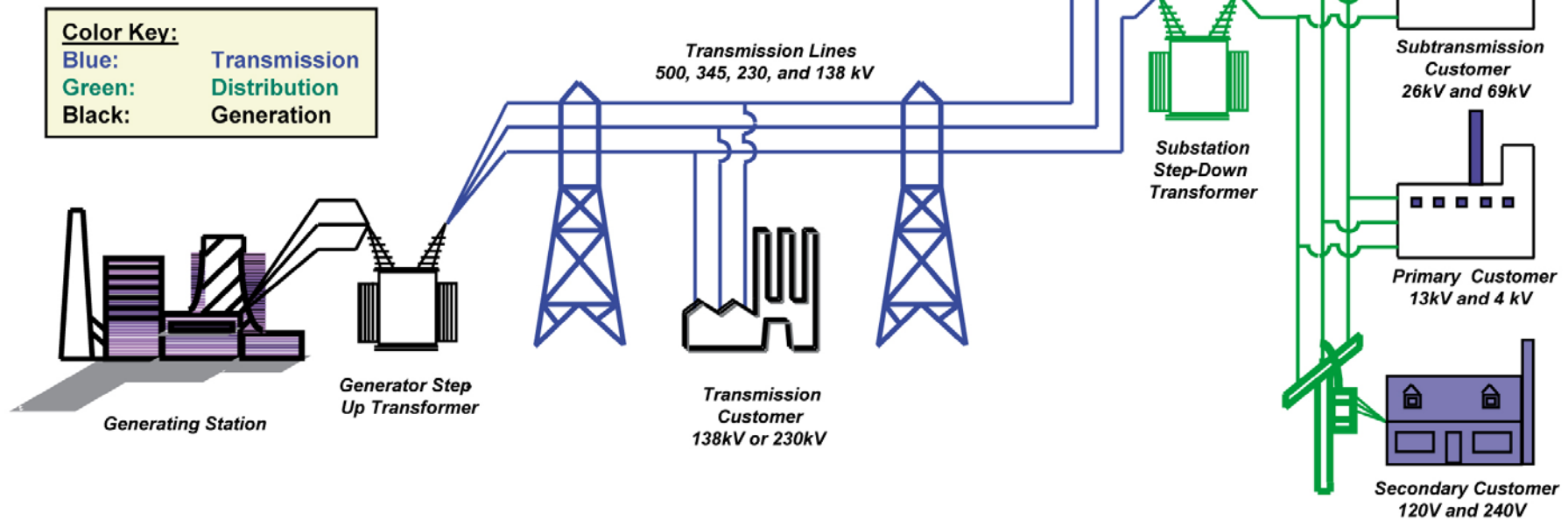
**1918 – Ve vznikající ČSR je elektrifikováno 11% měst a obcí s 34% obyvatel.**

**1919 – Vydán zákon č. 438/1919 Sb. "O státní podpoře při zahájení soustavné elektrizace". Normalizováno síťové napětí 3x380V / 220V, frekvence sítě 50 Hz, napětí primárních distribučních sítí 22 kV a 100 kV. ( 25 všeužitečných elektrárenských společností)**



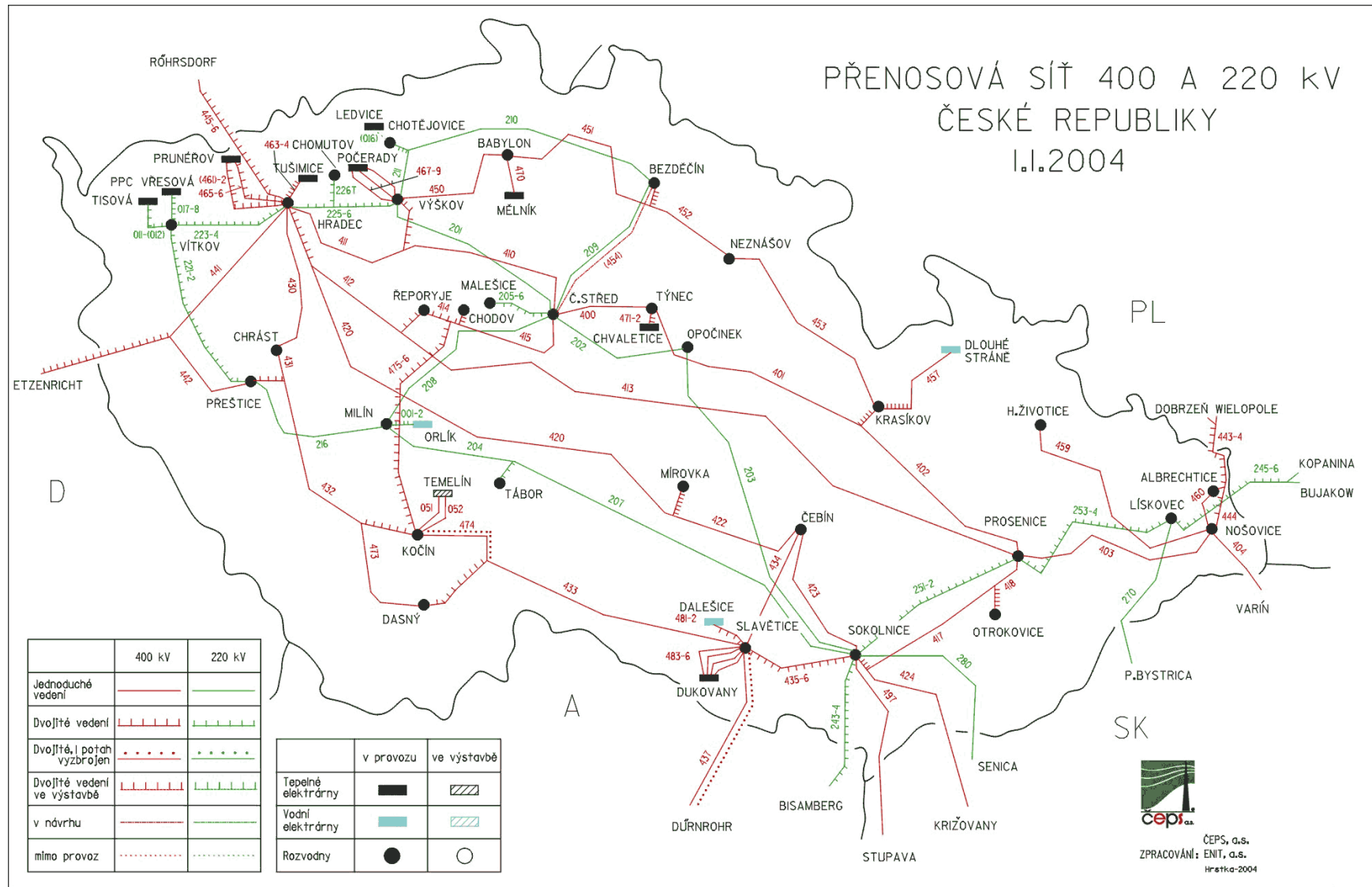
# Vznik elektrizačních soustav

## Basic Structure of the Electric System





# Vznik elektrizačních soustav







## **Elektrizační soustava**

**Elektrizační soustavu České republiky tvoří**

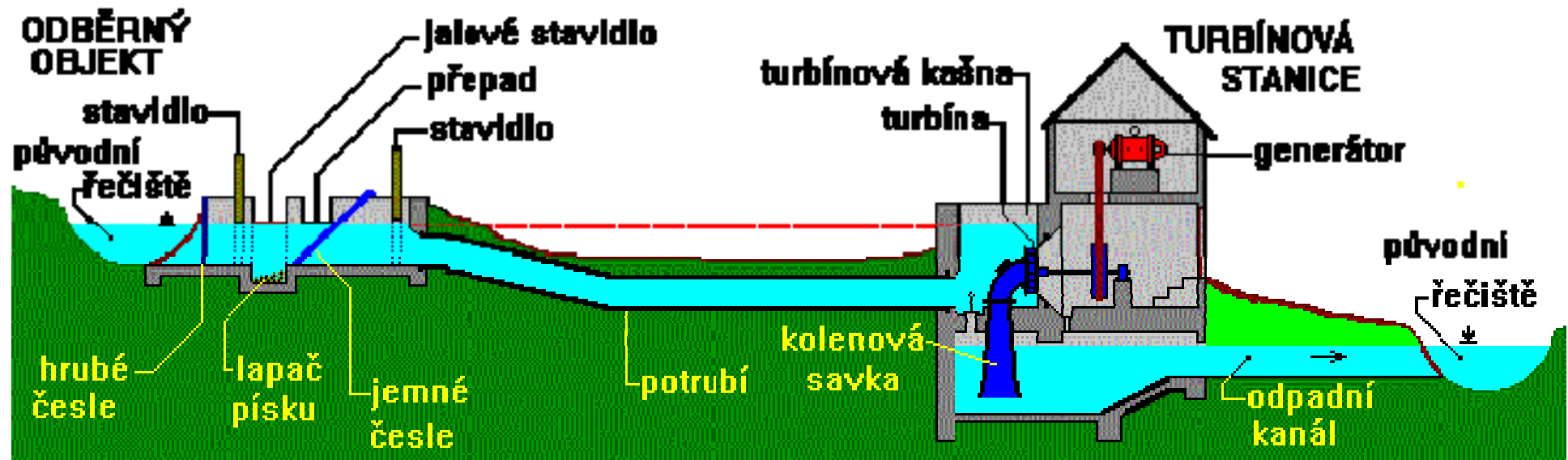
- **přenosová vedení o napětí 400 kV a 220 kV**
- **elektrárny a.s. ČEZ**
- **elektrárny ostatních výrobců**
- **distribuční rozvod po vedeních 110 kV a vedeních nižších napětí**
- **spotřebitelé elektrické energie**

**Elektrizační soustava je centrálně a jednotně řízený soubor paralelně pracujících elektráren, elektrických přenosových a rozvodných zařízení a elektrických spotřebičů se společnou výkonovou rezervou.**

**Jejím hlavním úkolem je spolehlivá dodávka dostatečného množství elektrické energie všem odběratelům v dohodnuté kvalitě, s minimálními náklady, při zaručené bezpečnosti práce.**

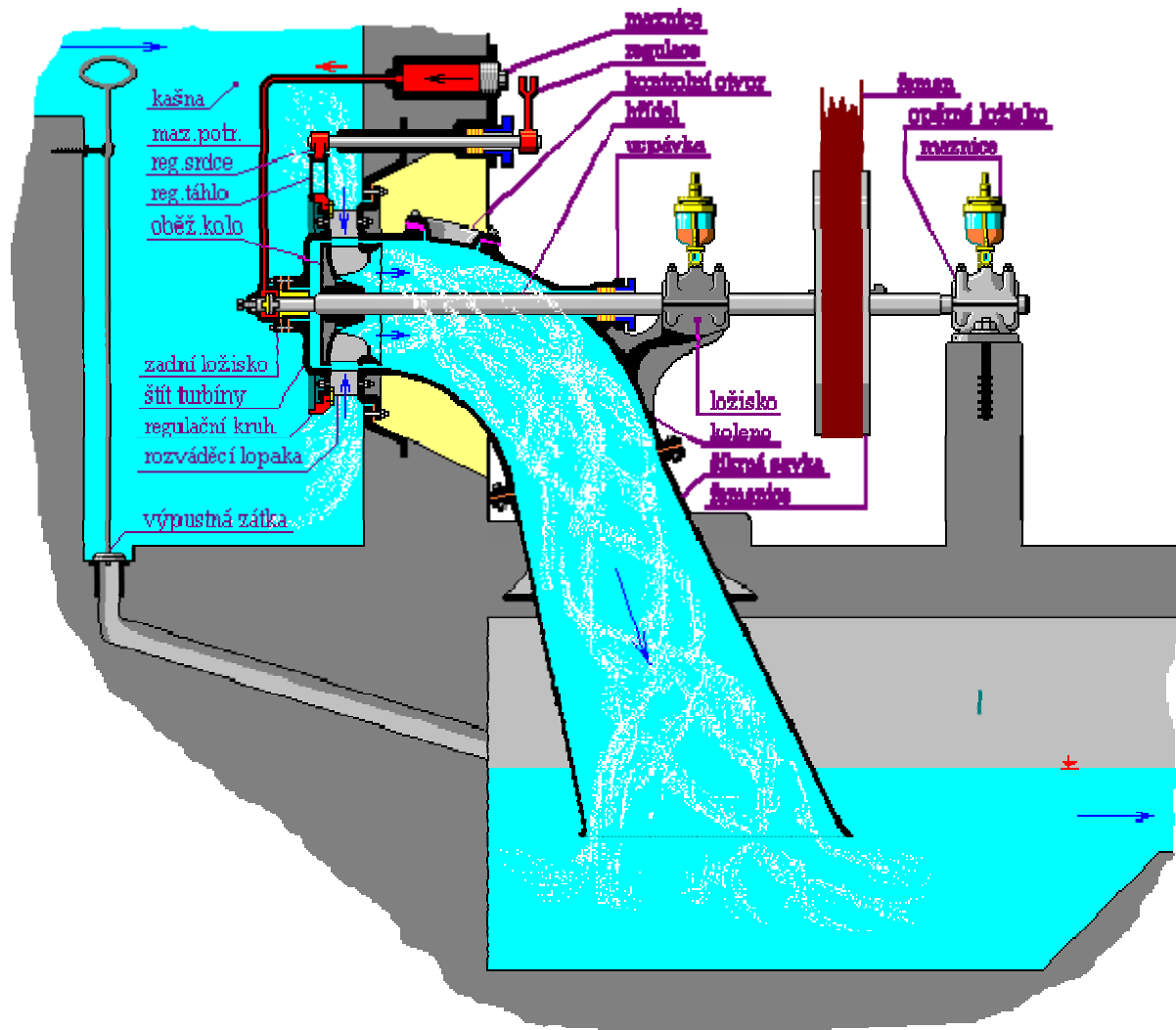


## Řízení technologických procesů





## Řízení technologických procesů





## Řízení technologických procesů

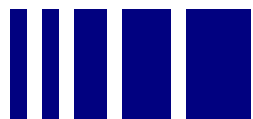
Řídicí systém umožňuje cílevědomě působit na řízený objekt tak, aby vždy bylo dosaženo požadovaného stavu technologického systému podle projektu, při splnění technických standardů a norem.

Optimalizace řízení umožňuje pomocí matematického vyjádření respektovat ekonomické, technické, fyzikální a jiné požadavky kladené na chování technologického systému.

Parametry jakosti řízení definuje zákazník. Zhotovitel řídicího systému musí prokázat zákazníkovi nejen funkčnost odpovídající projektu, ale hlavně jakost provedeného díla. Proto je nejvhodnější, když v průběhu tvorby řídicího systému je vzájemně odsouhlasena definice znaků jakosti řídicího systému, způsob a podmínky, za kterých má být požadovaná jakost docílena.

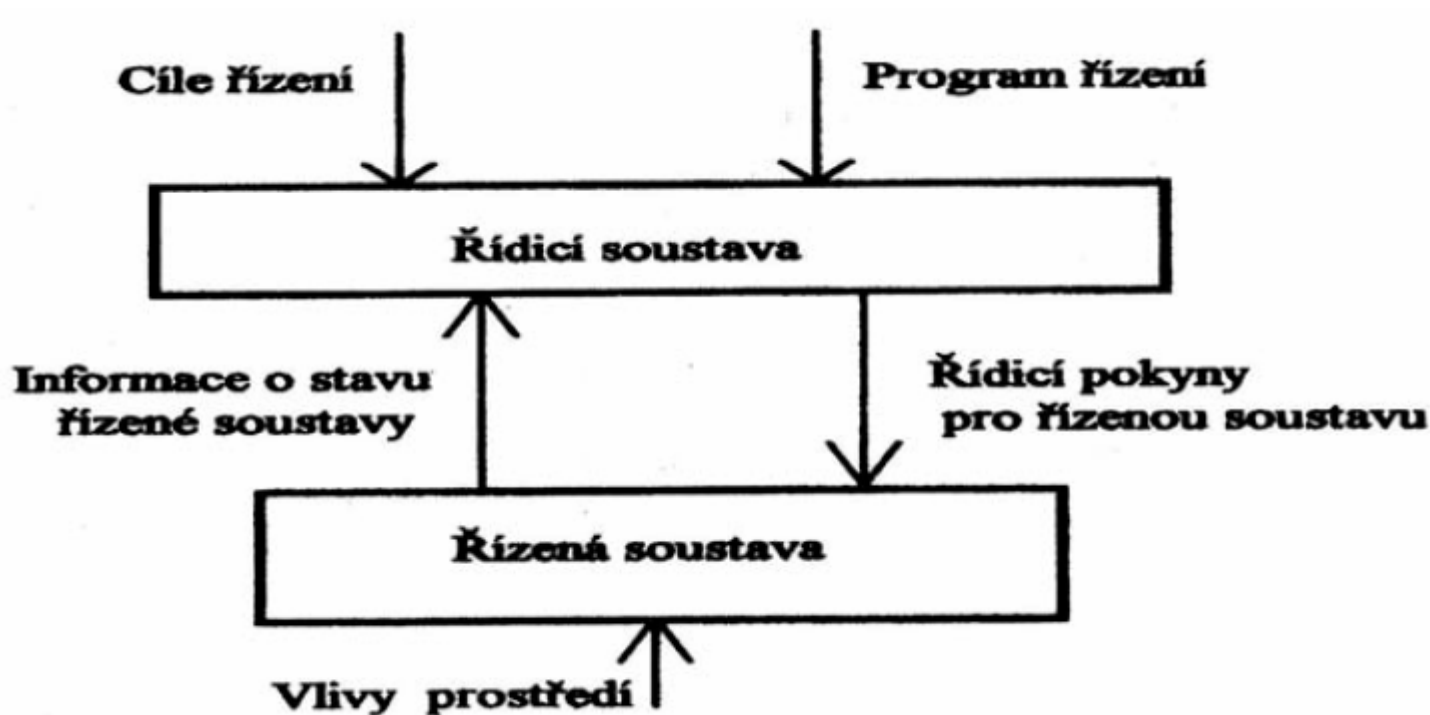
V praxi používaným způsobem hodnocení dynamických vlastností regulačních obvodů a plnění požadavků na jejich funkci je vyhodnocování kritérií jakosti regulace.

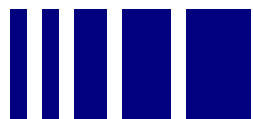
Tento postup posuzuje jakost regulace v časové oblasti podle tvaru odezvy na jednotkový impuls nebo jednotkový skok nebo pomocí integrálních kritérií nebo pomocí dalších speciálních funkcí.



## Řízení technologických procesů v elektrizační soustavě

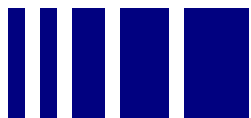
Od řídicího systému je požadováno plnění jednotlivých určitých úkolů buď úplně, anebo částečně jako podíl na úkolu sdíleném s jiným systémem nebo s personálem.



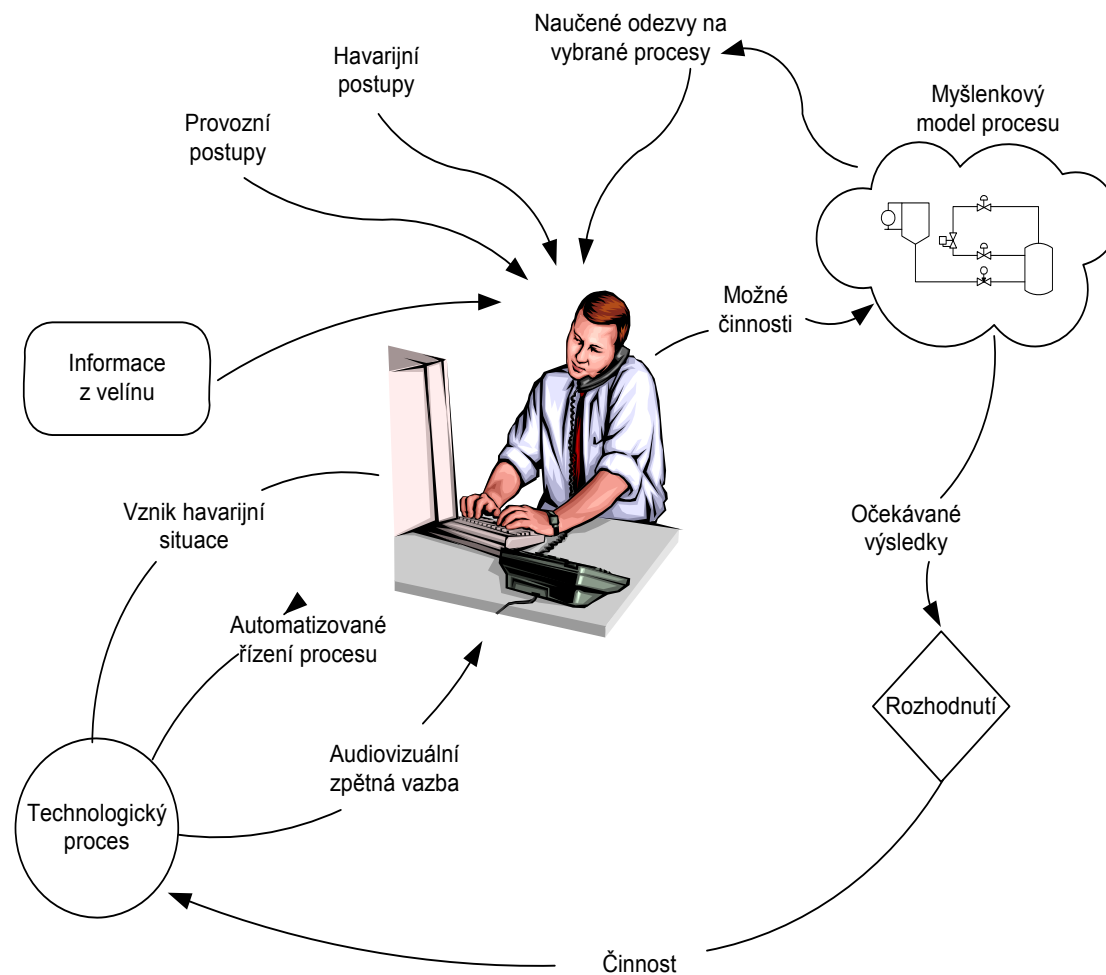


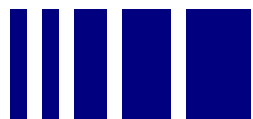
## Řízení technologických procesů v elektrizační soustavě





# Řízení technologických procesů v elektrizační soustavě





## Matematický popis řízení technologických procesů

Technologické systémy jsou složeny z řízeného objektu a z řídicího systému.

Řízeným objektem je většinou složitý nelineární systém, který

- je tvořen konečným počtem prvků,
- z nichž každý je jednoznačně popsán konečným počtem měřitelných veličin
- má vzájemné vazby mezi prvky jednoznačně formulovány

Dynamické vlastnosti řízeného objektu můžeme popsat pomocí diferenciálních rovnic, jejichž řešením je stavový vektor. Stavový vektor umožňuje pomocí minimálního počtu veličin určit stav systému v libovolném časovém okamžiku.

Řídicí systém musí udržovat určené fyzikální veličiny na předem určených hodnotách. V procesu regulace mění řídicí systém působením na akční veličiny stav technologického systému tak, aby bylo dosaženo žádaného stavu.



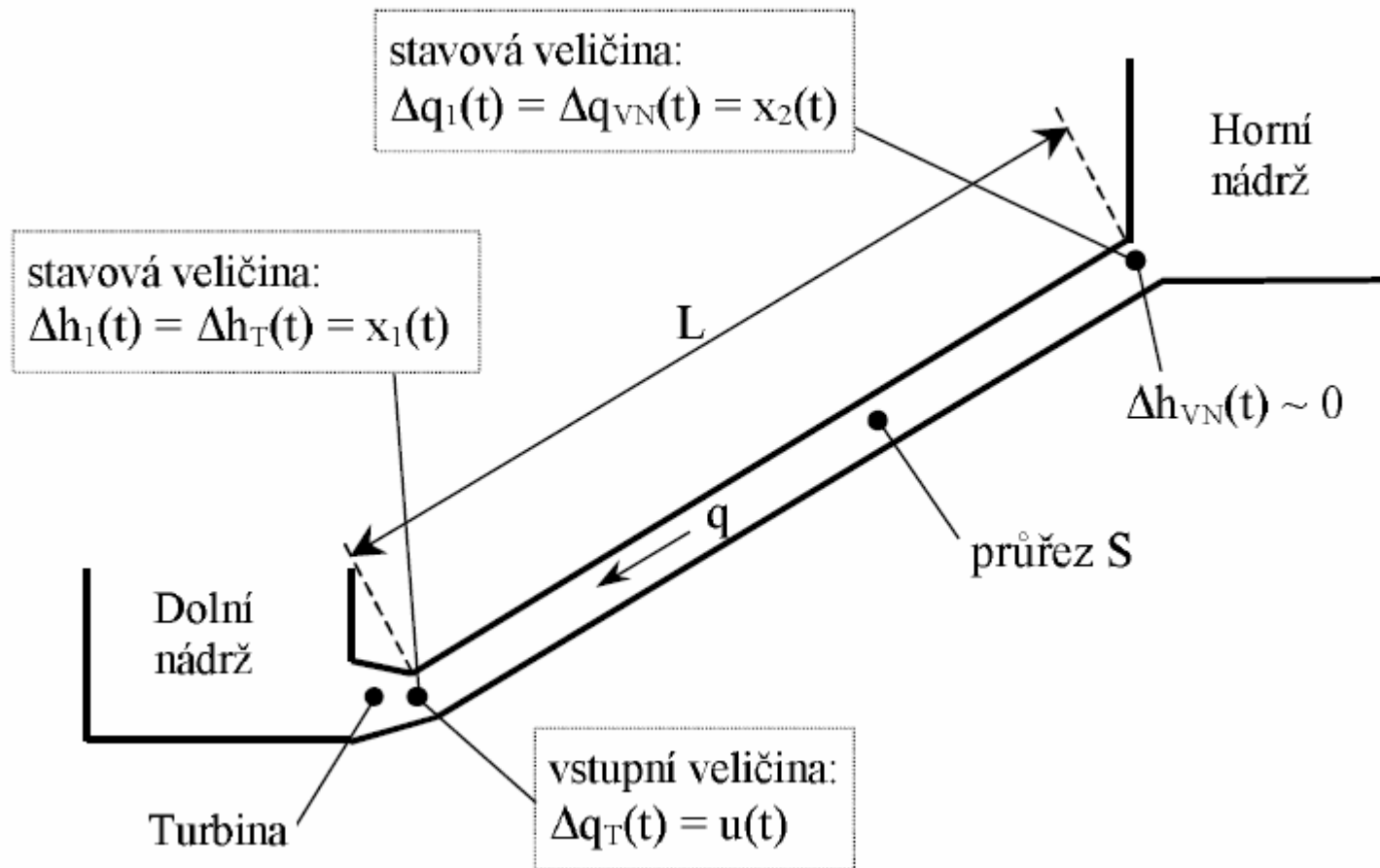


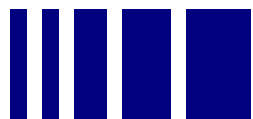
## Matematický popis řízení technologických procesů





## Matematický popis řízení technologických procesů





## Matematický popis řízení technologických procesů

Matematické řešení pak spočívá v řešení soustavy rovnic, jejichž vektorový zápis je následující

$$\dot{\vec{x}}(t) = \vec{f}[\vec{x}(t), \vec{v}(t), t] + G[\vec{x}(t), \vec{v}(t), t]\vec{u}(t)$$

$\dot{\vec{x}}(t)$	derivace vektoru stavových proměnných (změna stavu TP)
$\vec{x}(t)$	vektor stavových proměnných (stav TP)
$\vec{f}[\vec{x}(t), \vec{v}(t), t]$	vektorová funkce (popisující TP)
$\vec{v}(t)$	vektor poruchových proměnných (poruchy TP)
$G[\vec{x}(t), \vec{v}(t), t]$	matice funkcí (popisující řízení)
$\vec{u}(t)$	vektor řídicích proměnných (stav řízení)

Úloha řízení spočívá v nalezení  $G$  a  $u$  tak, aby provoz technologického systému splňoval všechny požadavky definované v zadání projektu.

Výše uvedený formalizovaný zápis není většinou u složitých technologických procesů možný. Stavové proměnné nejsou vždy jednoduše měřitelné a nemusí být výstupními veličinami systému.

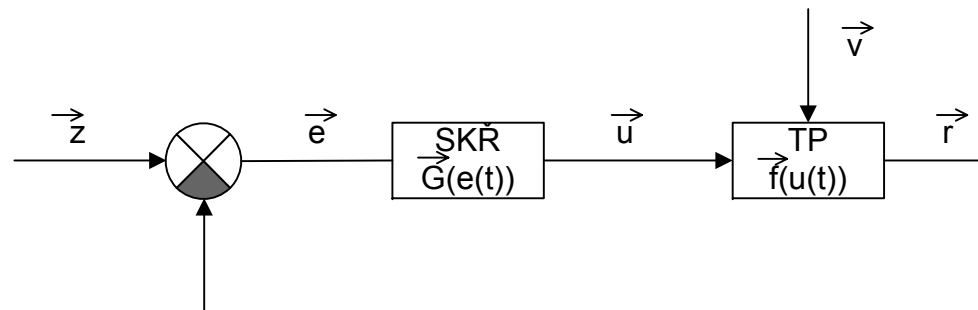


## Matematický popis řízení technologických procesů

Proto se volí soubor měřitelných veličin, které regulujeme tak, aby co nejdříve sledovaly žádané hodnoty. Vektor žádaných hodnot značíme  $\vec{z}(t)$ .

V průběhu regulace se pomocí čidel měří skutečná hodnota regulovaných veličin  $\vec{r}(t)$  a porovnává se žádanými.

Podle zjištěných odchylek, které jsou mírou jakosti regulace, zasahují jednotlivé regulátory  $\vec{u}(t)$  do procesu tak, aby odchylky byly minimální, resp. podle požadavků projektu. Vektor regulačních odchylek značíme  $\vec{e}(t)$ .



zjednodušení = nahrazení

stavového vektoru - vektorem regulovaných veličin  $\vec{r}(t)$

vektoru derivace stavových veličin - vektorem regulačních odchylek  $\vec{e}(t) = \vec{z}(t) - \vec{r}(t)$

$$\vec{r}(t) = \vec{f} \left[ G(\vec{z}(t) - \vec{r}(t)), \vec{v}(t) \right]$$



## Řízení technologických procesů

Vlastnosti řídicího systému mohou být uspořádány do několika hlavních kategorií:

~ **funkčnost**

Úroveň zajištění funkcí sledování a zpracování dat, např. regulace včetně vyšších stupňů řízení, optimalizační funkce, manažerské informační funkce atd.

~ **provozuschopnost**

Míra, ve které zajišťovaná funkce může být vykonávána za stanovených pracovních a okolních podmínek. Fyzikální míra provozuschopnosti musí být stanovena pro každou funkci a může zahrnovat přesnost, reprodukovatelnost, rychlost odezvy, rozlišovací schopnost atd.

~ **provozní stálost**

Míra, ve které je možno důvěřovat systému ve výkonu zamýšlených funkcí za stanovených pracovních a okolních podmínek.

~ **bezpečnost**

Míra, dle které systém svým působením nevyvolá možné nebezpečné podmínky ve svém okolí.

~ **ovlivňující podmínky**

Před posouzením vlastností systému je nezbytné stanovit podmínky, kterým systém má odolávat po dobu svého poslání.

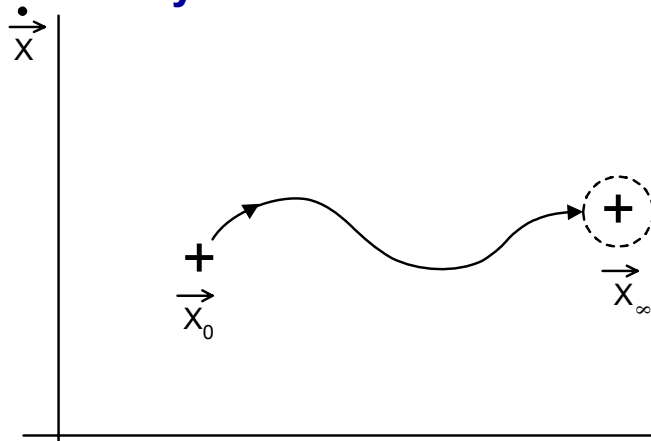


## Kvalita řízení technologických procesů

Obecně můžeme provádět hodnocení regulačních vlastností řídicích systémů v těchto stavech technologického systému

- ~ ustálený provoz v čase
- ~ přechodové stavy (změna technologického procesu ze stavu v čase  $t=t_0$  do stavu v čase  $t=$
- ~ dlouhodobý provoz (stálost výsledků opakujících se procesů - reprodukovatelnost regulačních procesů)

První dva stavy jsou spojeny s hodnocením dynamických vlastností systému při regulaci jako důsledek změny stavu technologického procesu, nebo v důsledku fluktuací měřených hodnot. Ve stavové rovině ji můžeme graficky znázornit jako trajektorii mezi dvěma body.





## Kvalita řízení technologických procesů

**Statická přenosová funkce - závislost hodnot výstupního signálu na hodnotách vstupního signálu nebo měřené veličiny, nebo na vstup přicházející fyzikální veličiny v ustáleném stavu.**

**Statická přenosová funkce se obecně určuje jako čára proložená průměrnými hodnotami výsledků pozorování v bodech měření.**

**Dynamická charakteristika - časová změna informačního parametru výstupního signálu v závislosti na předepsané časové změně informačního parametru vstupního signálu. Může být vyjádřena**

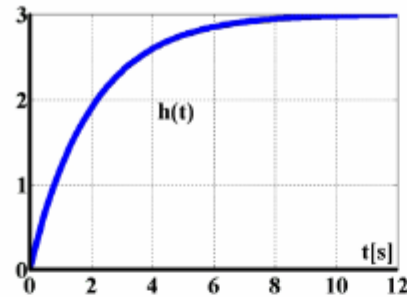
- 1. Přenosovou funkcí - poměrem Laplaceových obrazů výstupního signálu ke vstupnímu signálu při nulových počátečních podmínkách.**
- 2. Přechodovou funkcí - průběhem výstupního signálu v čase při skokové změně vstupního signálu.**
- 3. Impulsní přechodovou charakteristikou - průběhem výstupního signálu v čase při impulsním pravoúhlém signálu na vstupu.**
- 4. Frekvenční charakteristikou - popisem přenosového chování výrobku s lineární charakteristikou při sinusových vstupních signálech smluveného kmitočtu a po vymizení přechodových jevů funkcí.**



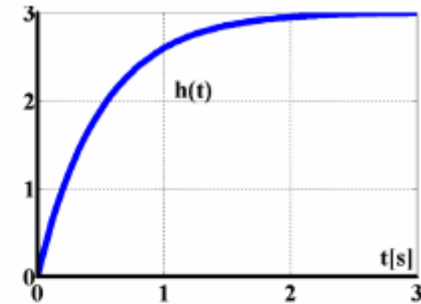


## Kvalita řízení technologických procesů

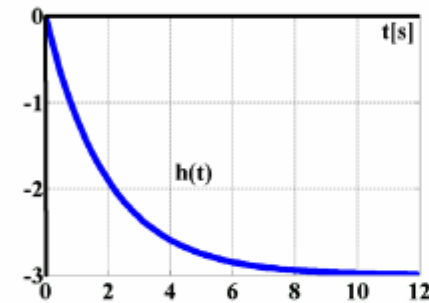
$$F_{yu}(s) = \frac{3}{2s+1}$$



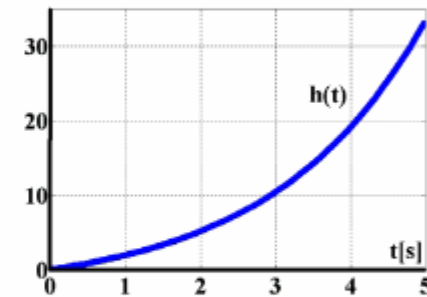
$$F_{yu}(s) = \frac{3}{0,5s+1}$$



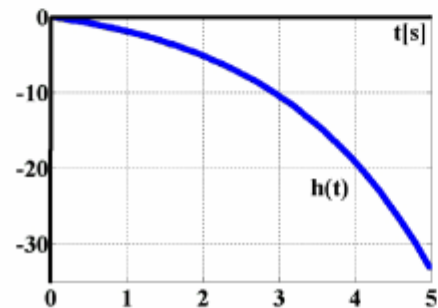
$$F_{yu}(s) = \frac{-3}{2s+1}$$



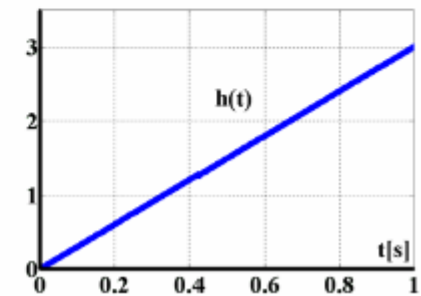
$$F_{yu}(s) = \frac{3}{2s-1}$$



$$F_{yu}(s) = \frac{3}{-2s+1}$$



$$F_{yu}(s) = \frac{3}{s}$$





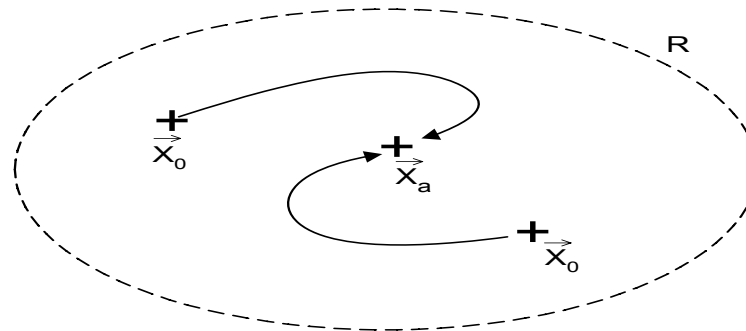


## Kvalita řízení technologických procesů

Základní podmínkou správné činnosti řízeného technologického procesu je jeho stabilita. Systém je v rovnovážném stavu, nemění-li se regulovaná veličina s časem.

Regulace je stabilní, když po vychýlení systému z rovnovážného stavu a odstranění příčiny vzruchu (který tuto odchylku způsobil) se systém během času vrátí zpět do původního rovnovážného stavu.

U nelineárních systémů je situace složitější a definuje se různými způsoby. Např. asymptotická stabilita znamená, že systém je na oblasti  $R$  stabilní, když každá fázová trajektorie mající počátek v oblasti  $R$  končí pro čas  $t = \infty$  v bodě  $x_a$





## Kvalita řízení technologických procesů

Zjednodušeně můžeme říci, že po odeznění přechodového děje se ustálí regulované veličiny uvnitř pásma definovaného projektem a nedochází ke změně vektoru řízení. Toto pásmo se nazývá přesnost regulace.

Podmínka stability je nutnou, nikoli však dostačující podmínkou správné funkce regulovaných systémů. Podstatné je chování systémů v přechodném stavu, které mohou mít nejrůznější charakter.

Systém se kontroluje především na odezvy poruch tvaru jednotkového skoku, neboť je to jeden z nejnejpříznivějších případů, které musí regulace zvládnout.

Nejpřesněji se obraz chování systému získá explicitním řešením soustavy diferenciálních rovnic. Vzhledem k obtížnosti přesné formalizace všech členů rovnic, je kvalita regulačního procesu definována většinou jako určité parametry přechodové charakteristiky.

Rozhodujícím hlediskem je způsob a rychlost dosažení nového požadovaného stavu systému.



## Definice kvality regulačního procesu

Nejčastěji je hodnoceno několik ukazatelů, které charakterizují kvalitu regulačních procesů. Jedná se o :

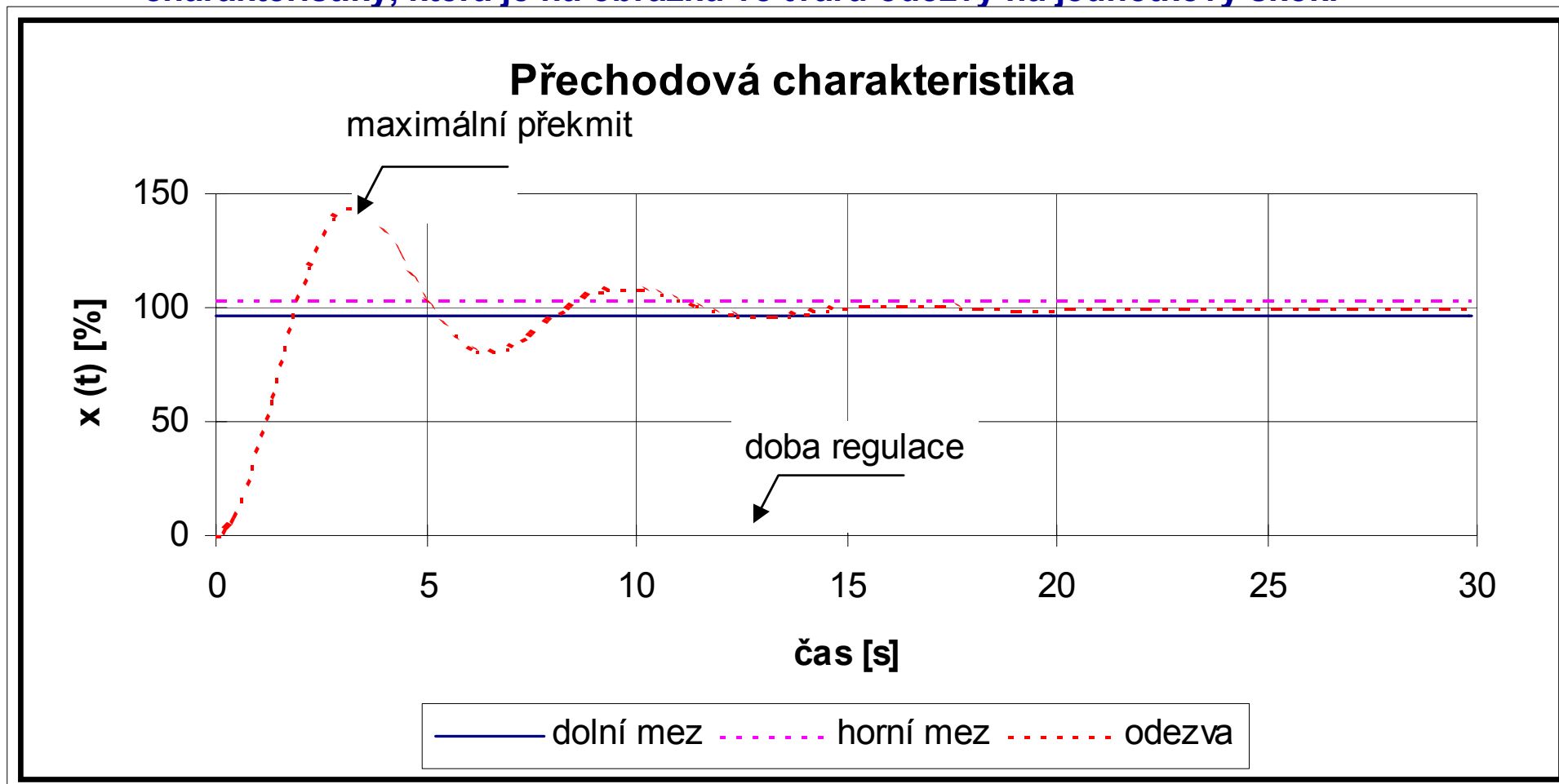
1. **přesnost regulace** - udává v jakých mezích udržuje regulační obvod regulovanou veličinu
2. **doba regulace (doba odezvy)** - je doba, která uplyne od počátku poruchy do okamžiku, kdy se regulované veličiny technologického procesu dostanou na žádané hodnoty s danou přesností
3. **maximální odchylka regulované veličiny (maximální překmit)** - je největší hodnota přeregulování v odezvě uzavřeného regulačního obvodu na skokovou změnu zadané veličiny
4. **počet přeregulování po dobu regulace** - je roven počtu extrémů (maxim, minim) po dobu regulace, jejichž hodnota leží vně pásma přesnosti regulace
5. **kvadratická regulační plocha** - je integrál definovaný vztahem

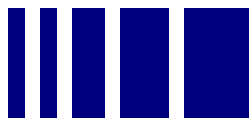
$$I = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 dt$$



## Definice kvality regulačního procesu

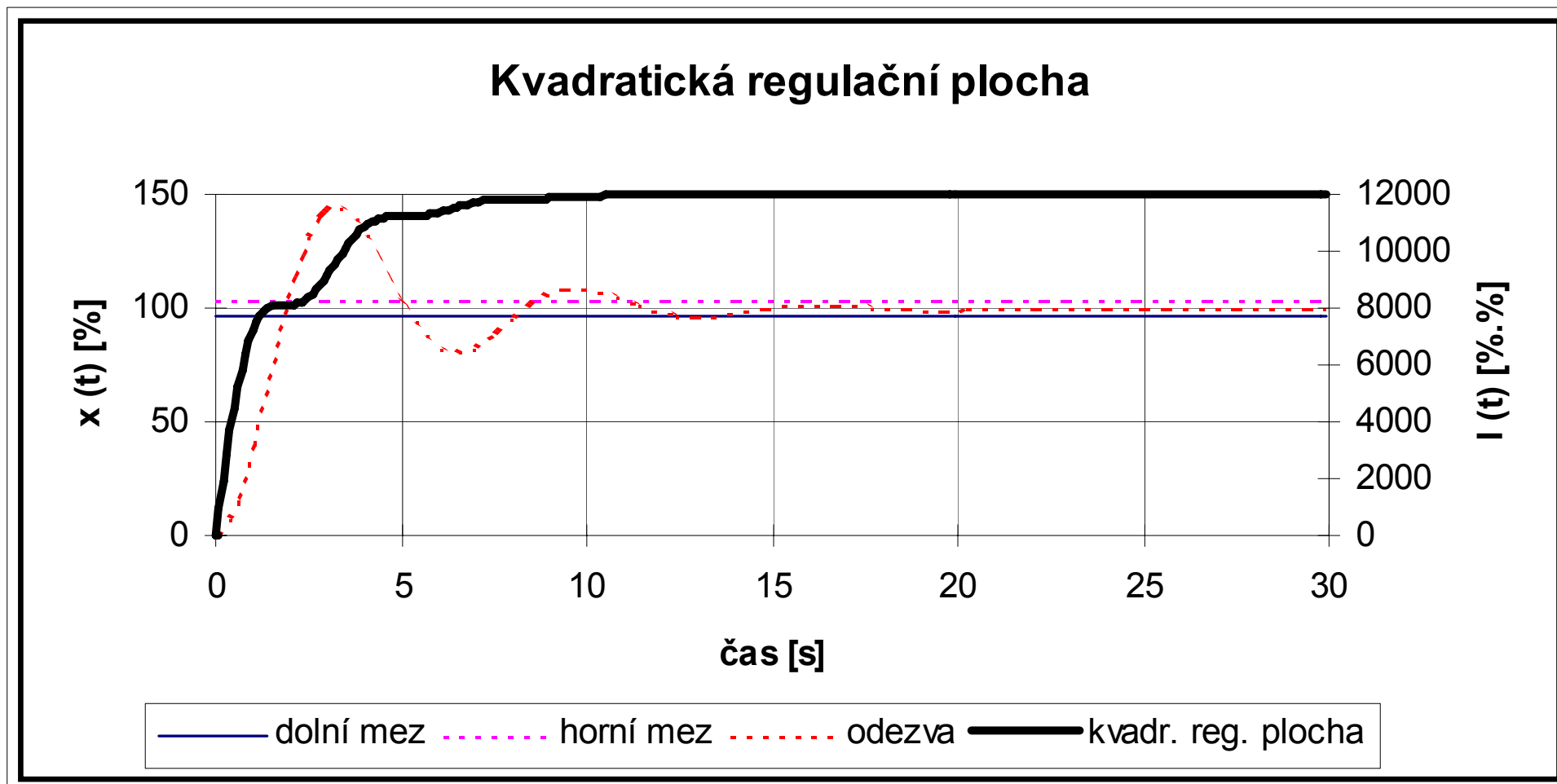
Význam výše popsaných pět parametrů je zřejmých z úplné dynamické charakteristiky, která je na obrázku ve tvaru odezvy na jednotkový skok.





## Definice kvality regulačního procesu

### Časový průběh velikosti kvadratické regulační plochy





## Základní typy regulátorů

Kvalitu regulace ovlivňujeme typy především použitých regulátorů

**Regulátory** dělíme na

proporcionální,

proporcionálně integrační,

proporcionálně derivační

proporcionálně integračně derivační

Označujeme je zkratkami P, PI, PD, PID



## Základní typy regulátorů

**Proporcionální regulátory :**

**Jsou to nejjednodušší regulátory, pracují jako zesilovač regulační odchylky, tedy**

$$u(t) = -K_p \cdot e(t)$$

**znaménko minus souvisí se zavedením regulační odchylky  $e(t) = z(t) - x(t)$   
Zesílení regulátoru  $K_p$  se velmi často udává pomocí statiky  $s = (1 / K_p) \cdot 100\%$ .  
Statika říká, jak se musí změnit regulovaná veličina, aby regulátor přestavil  
z nulové do nominální polohy.**

**K tomu, aby se v regulačním obvodu udržovala regulovaná veličina na žádané  
hodnotě  $z$ , musí být na vstupu regulátoru regulační odchylka  $e = 1/s_0$   
kde  $1/s_0$  je zesílení regulované soustavy. Říkáme, že regulační obvod pracuje  
s trvalou regulační odchylkou, pokud je regulovaná soustava statická.**

**V případě astatických soustav může být pro udržení regulované veličiny na  
žádané hodnotě nulová akční veličina, tedy proporcionální regulátor ve spojení  
s astatickou regulovanou soustavou pracuje bez trvalé regulační odchylky.**

**Přechodová charakteristika proporcionálního regulátoru - cvičení**



## Základní typy regulátorů

**Integrační regulátory :**

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot e(t)$$

**U tohoto regulátoru při skokové změně regulované veličiny  $x$  dojde k trvalé změně akční veličiny  $u$ . Tento regulátor je astatický, jeho výstupní signál se trvale mění s rychlostí úměrnou vstupnímu signálu.**

**K vyjádření velikosti integrační složky používáme integrační časovou konstantu  $T_i$ , definovanou jako dobu, po které odezva regulátoru na skokovou změnu dosáhne integrační složka stejné hodnoty jako složka proporcionální.**

**Přechodová charakteristika integračního regulátoru - cvičení**





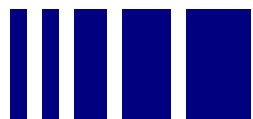
## Základní typy regulátorů

**Proporcionálně integračně-derivační regulátor :**

**Odstranění trvalé regulační odchylky a přitom dobré dynamické vlastnosti regulačního obvodu získáme použitím všech tří složek P, I, D. Velikost každé složky lze samostatně nastavovat, to znamená P-pásmo proporcionality, I-integrační časovou konstantu a D-derivační časovou konstantu. Pro kvantitativní vyjádření platí:**

- a) Zvětšení proporcionální složky dosáhneme zvětšením zesílení (snížením statiky).**
- b) Zvětšení rychlosti odezvy dosáhneme zmenšením integrační časové konstanty, většinou na úkor stability.**
- c) Zvýšením zesílení derivační složky zlepšíme odezvu v počátku přechodového procesu, většinou na úkor zesílené odezvy na šum.**

**V počátku přechodového děje převládá derivační složka regulátoru, s narůstajícím časem převládá integrační složka regulátoru.**



## Základní typy regulátorů

Analogová formulace PID regulátoru:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

**u(t) výstupní hodnota regulátoru (akční veličina)**

**K<sub>p</sub> proporcionální zesílení**

**T<sub>i</sub> integrační časová konstanta**

**K<sub>d</sub> zesílení derivační složky**

**e(t) regulační odchylka e(t)=z(t)-x(t)**

**z(t) žádaná hodnota (nastavená) regulované veličiny**

**x(t) aktuální měřená hodnota regulované veličiny.**



## Základní typy regulátorů

Digitální formulace PID odpovídá diskretizaci analogové rovnice:

$$u(t) = K_p \cdot e(i) + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{k=0}^i e(k) \cdot T + K_d \cdot \frac{e(i) - e(i-1)}{T}$$

**e(i)** regulační odchylka ve vzorkovacím intervalu

**e(i-1)** regulační odchylka v předchozím vzorkovacím intervalu

**T** vzorkovací interval

Zákmity na měřené veličině můžeme odstranit použitím vztahu

$e(i)+3 \cdot e(i-1)-3 \cdot e(i-2)-e(i-3))/6$  místo  $(e(i)-e(i-1))$

Velikost vzorkovací periody, tj. diskretizačního kroku souvisí s reálně dosažitelnou rychlostí změny akční veličiny. Další omezení vyplývá z výpočetních nároků regulace. Běžně používanou vzorkovací periodou (pro statické regulace) je čas okolo 50 ms.



## Základní typy regulátorů

**Pro regulaci v limitních a přechodových stavech je možné PID algoritmus v digitálních systémech snadno modifikovat.**

**Akční veličina může nabývat pouze omezených hodnot (dolní a horní limit), při dosažení limitu je nutno vypnout integrační člen, aby nenarůstala suma chyb a následný zásah nebyl příliš velký.**

**Horní a dolní limit akční veličiny, může být závislý regulované veličině.**

**Akční veličina může narůstat jenom omezenou rychlostí.**

**Realizace bezrázové přepínání = plynulý přechod při přepínání typu regulace nebo z ručního do automatického režimu apod.**

**Filtrace měřené veličiny, aby se rušení a jiné chyby na měřené veličině nepromítaly do výstupu regulátoru. Např. klouzavý průměr.**

**Většinou je cíl zpomalit vlastní regulační rovnici. Je třeba si uvědomit, že v analogovém regulátoru jsou různé tlumicí a filtrační členy plynoucí z jeho realizace naopak v číslicovém regulátoru se žádné tlumení nevyskytuje.**