

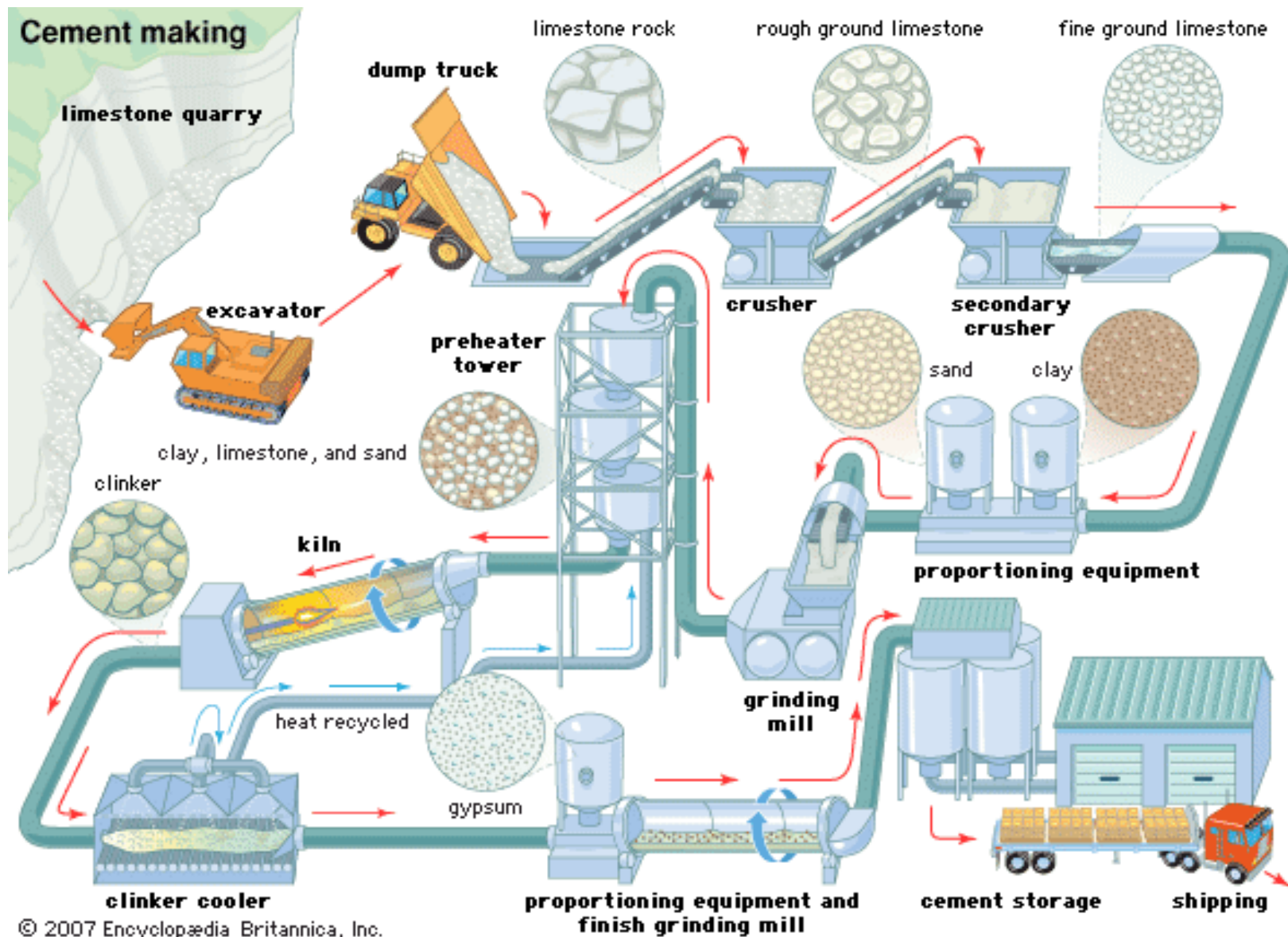
# **4 Fuzzy riadenie**

## **4.1 Fuzzy riadenie všeobecného typu**

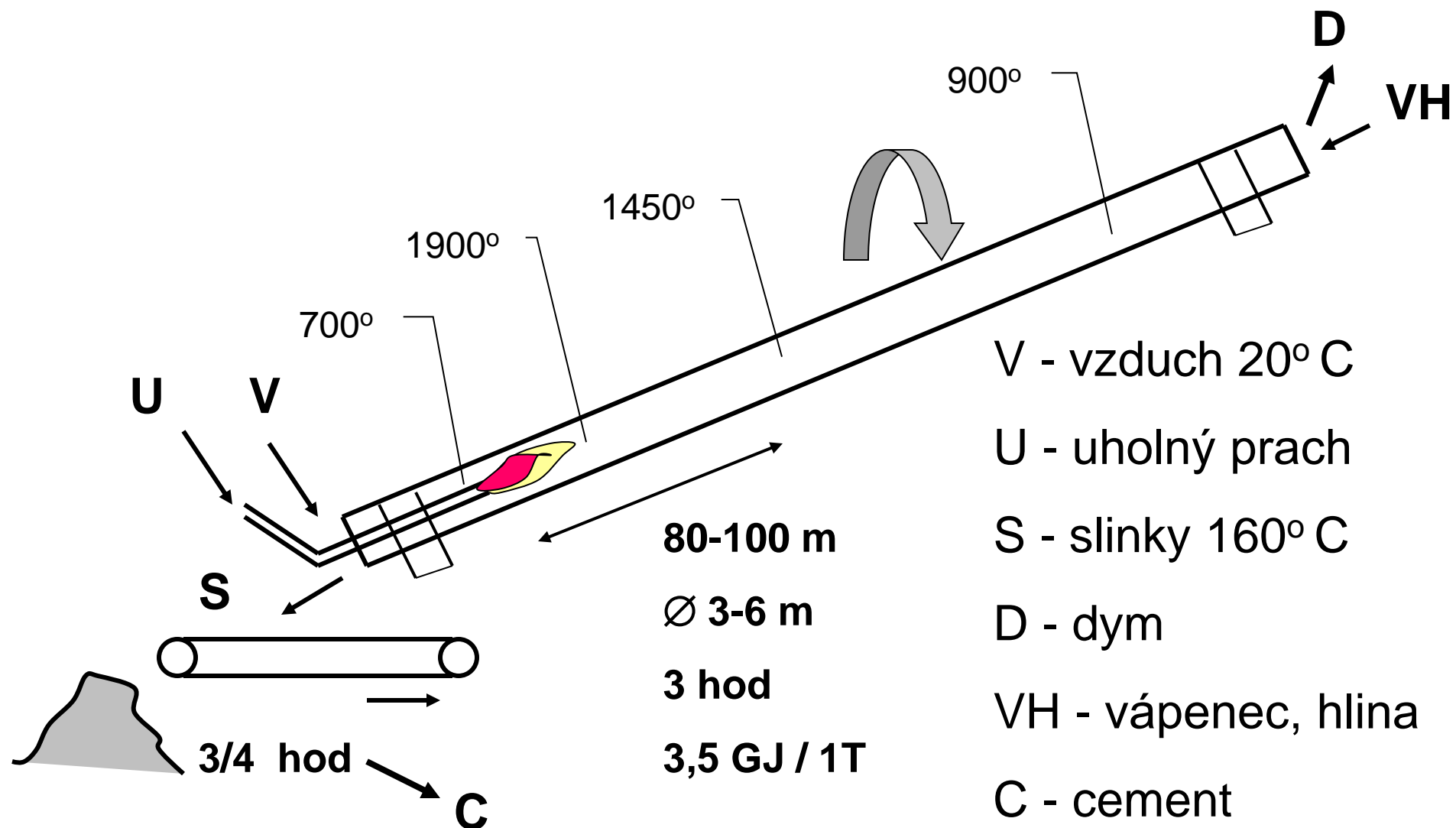
# Výroba cementu

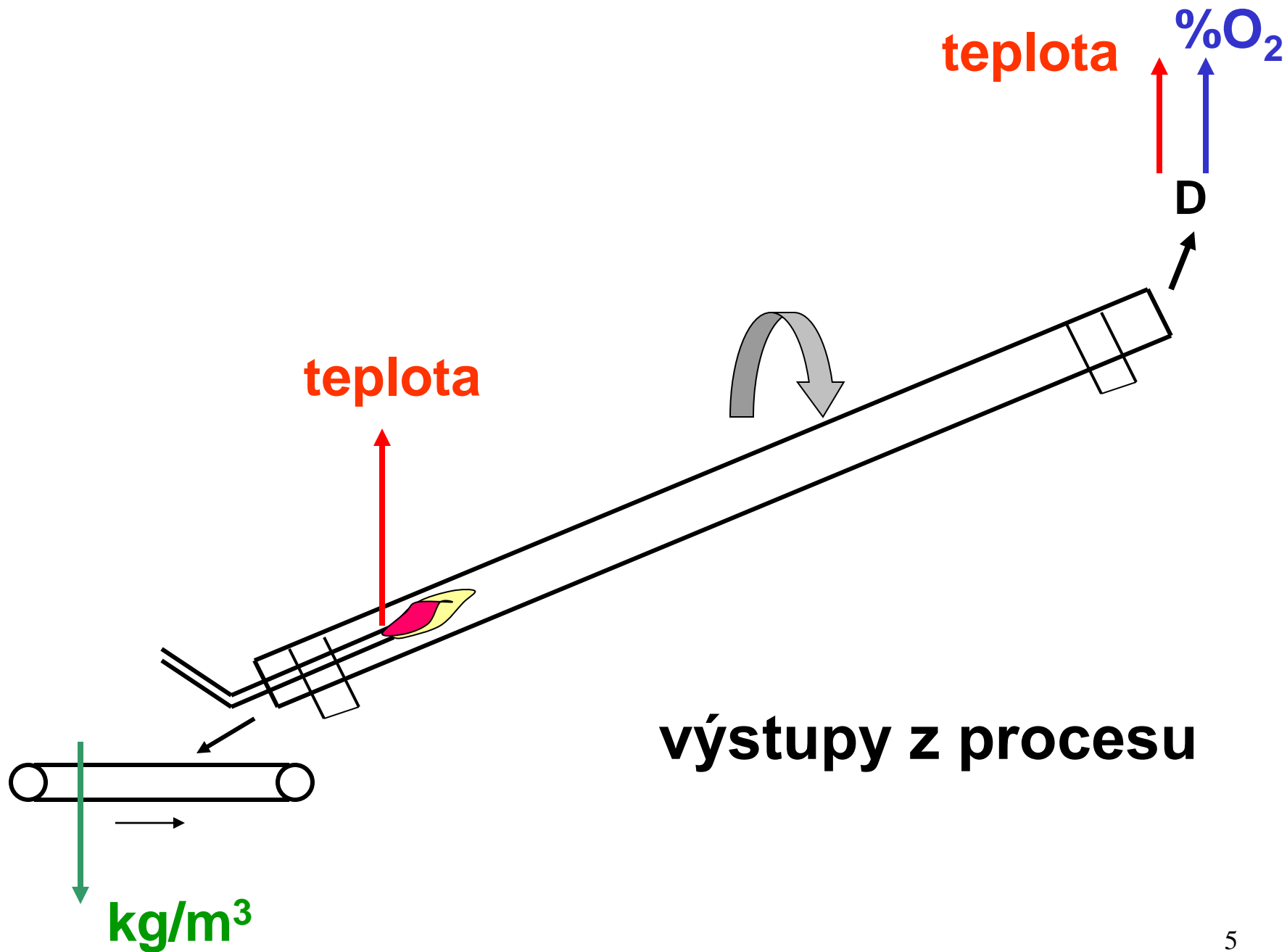


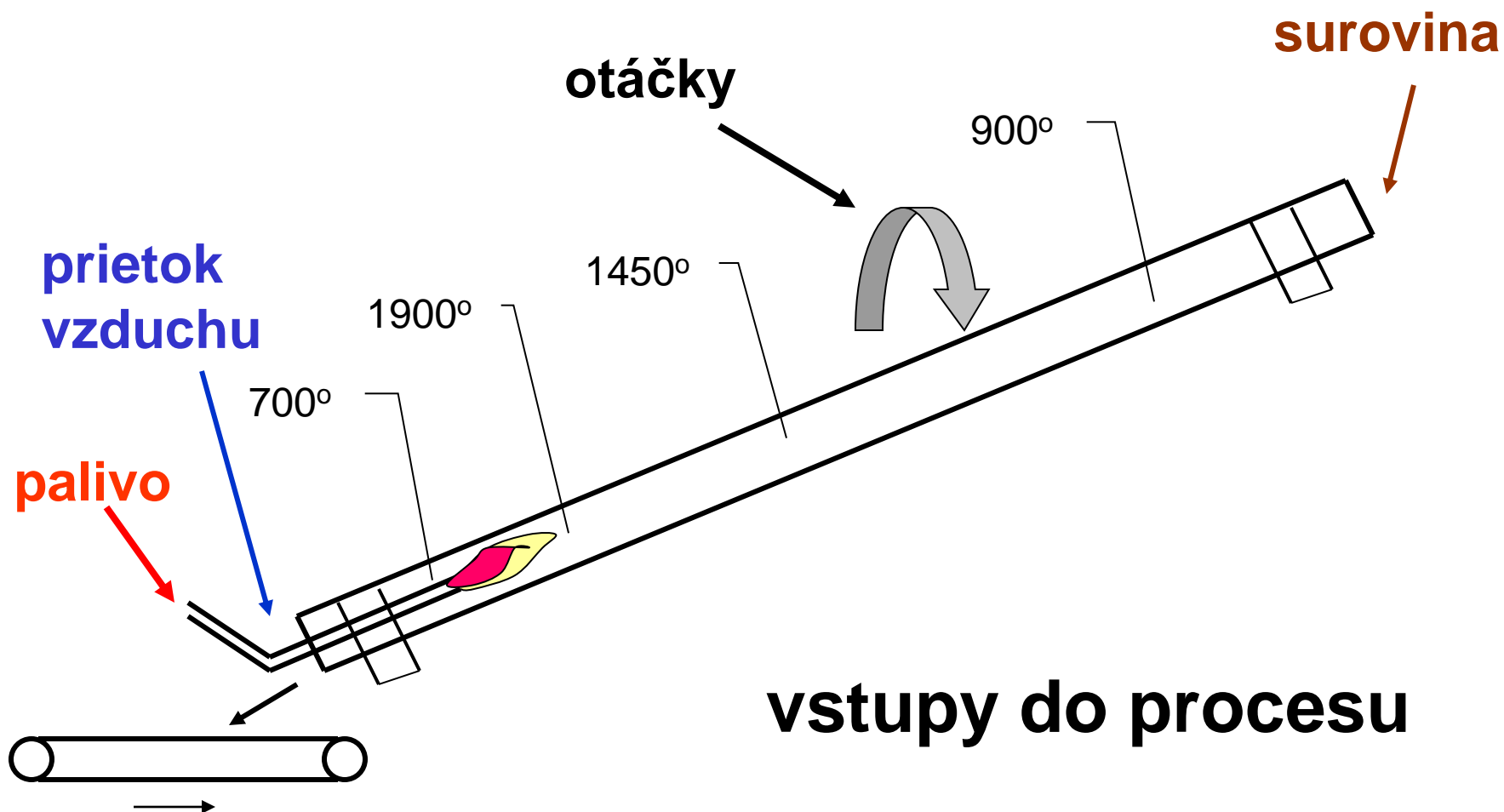
# Výroba cementu



# Riadenie cementárne







# Problémy pri riadení

- **nedostatočné teoretické znalosti dejov technol. procesu**
- **zle merateľné veličiny, veľké časové konštanty, veľké dopravné oneskorenie**
- **neexistencia exaktného matematického modelu**
- **z týchto dôvodov sa riadenie realizuje ručne na základe empirických informácií a skúseností**
- **každé aj malé zhoršenie kvality riadenia prináša straty energie alebo zhoršenie kvality produktu**

# Riadenie pomocou fuzzy logiky

- **verbálny model procesu vytvorený na základe skúseností technológov a dlhodobो získavaných dát - rekonštrukcia nemerateľných veličín**
- **verbálny model riadenia vytvorený na základe skúseností operátorov a technológov**
- **báza pravidiel riadenia bola upresňovaná pozorovaním činnosti skúsených operátorov a vyhodnocovaním procesných dát a akčných zásahov**
- **riadiaci systém je schopný nepretržite a neomylné realizovať “naučenú” riadiacu stratégiu, optimalizovať, rýchlo reagovať . . .**



## **Príklad pravidiel modelu cementárne :**

**Ak hnací moment je A a jeho zmena je B**

**a teplota výstupných plynov je C**

**potom zmena koncentrácie  $O_2$  je D**

**a zmena prietoku vzduchu je E**

*kde A,B,C,D,E ... P,Q,R sú fuzzy hodnoty  
(malý, stredný, veľký, veľmi veľký...)*

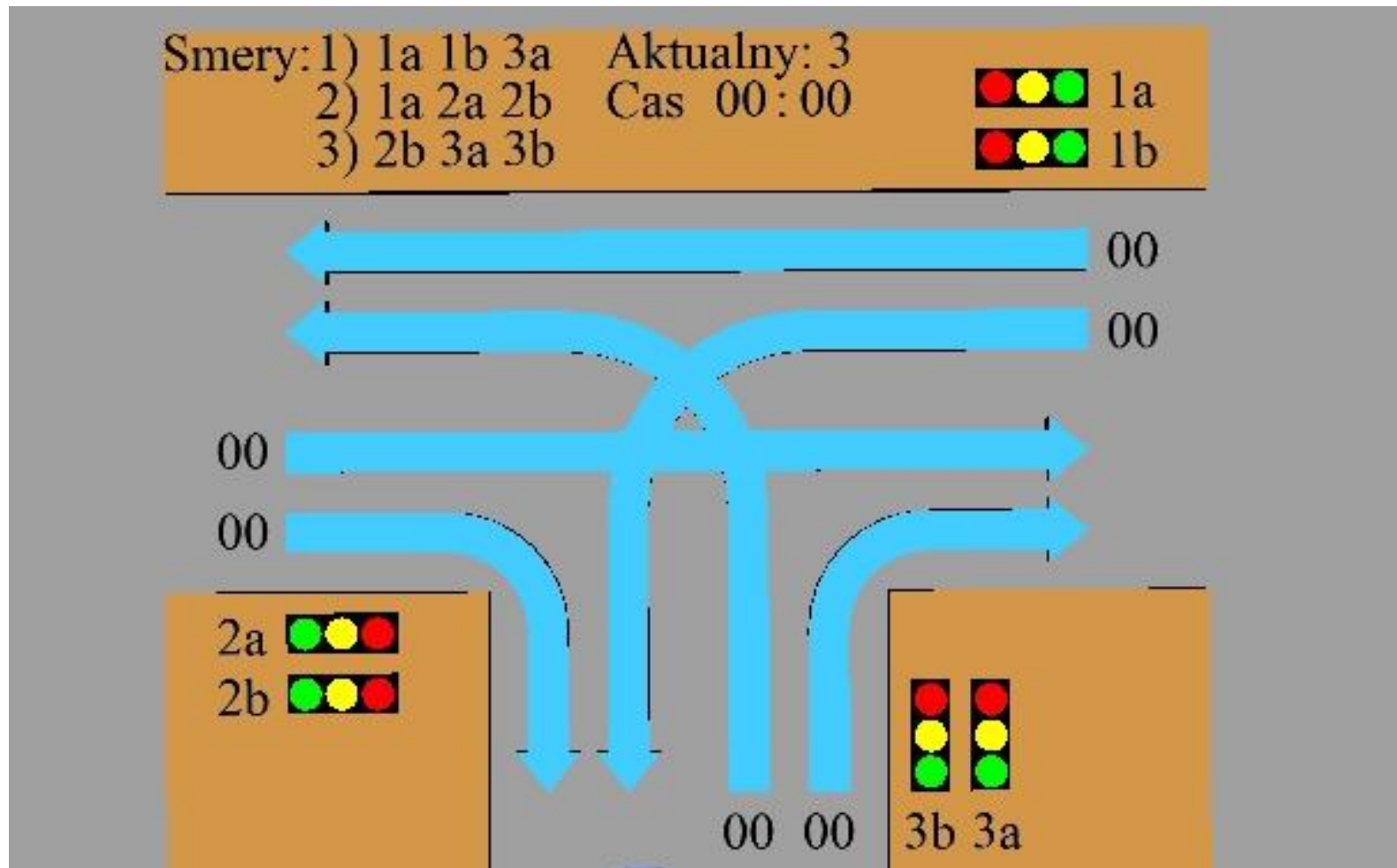
## **Príklad pravidiel riadenia :**

**Ak zmena koncentrácie  $O_2$  je P**

**a teplota v strednej zóne je Q**

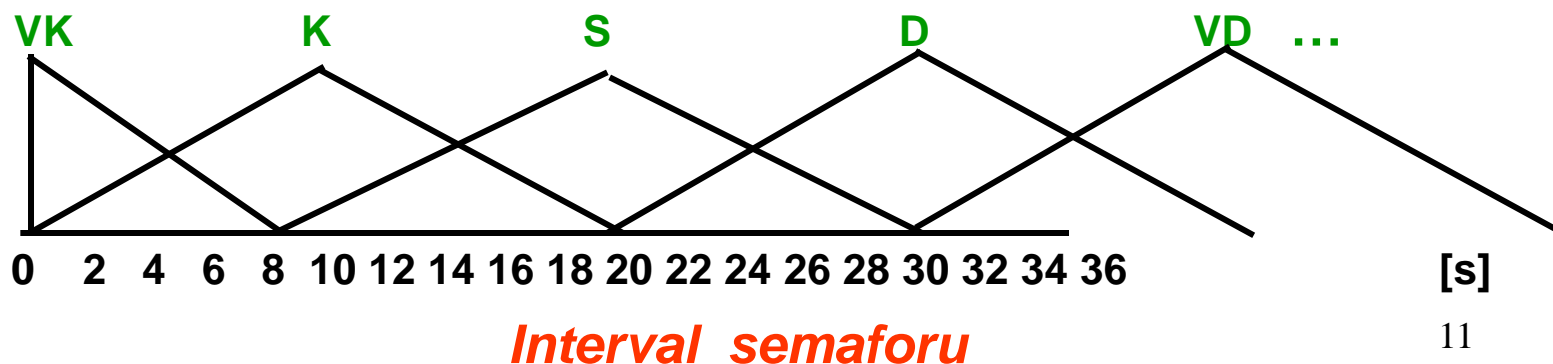
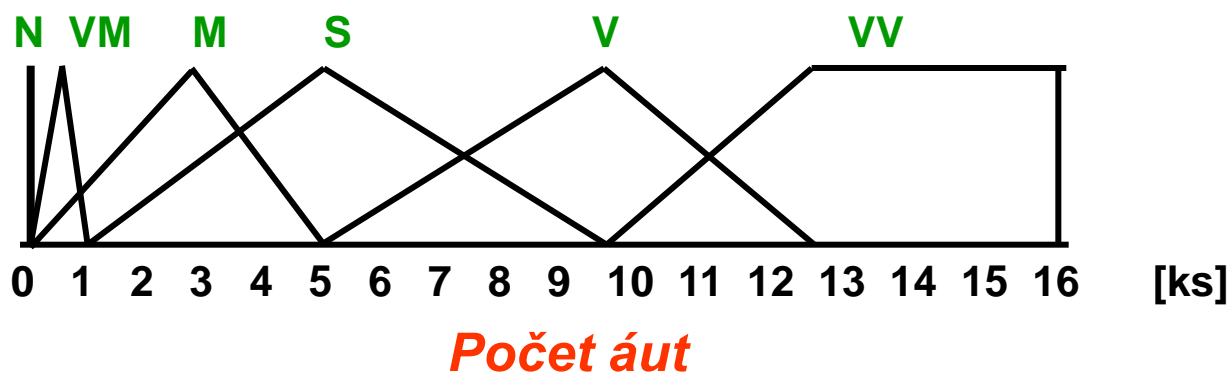
**potom zvýšenie hnacieho momentu je R**

# Riadenie križovatky

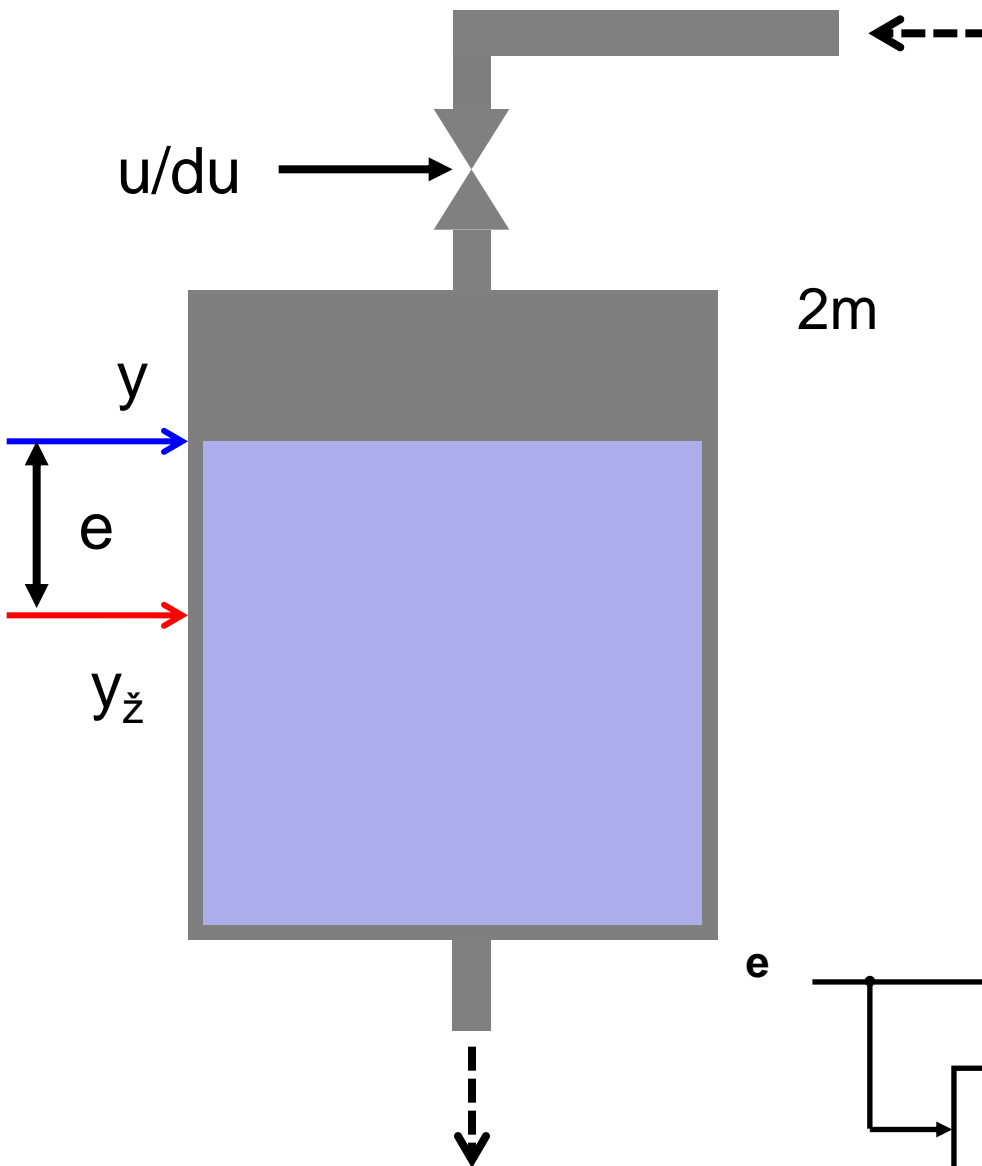


# Pravidlá riadenia križovatky (príklad)

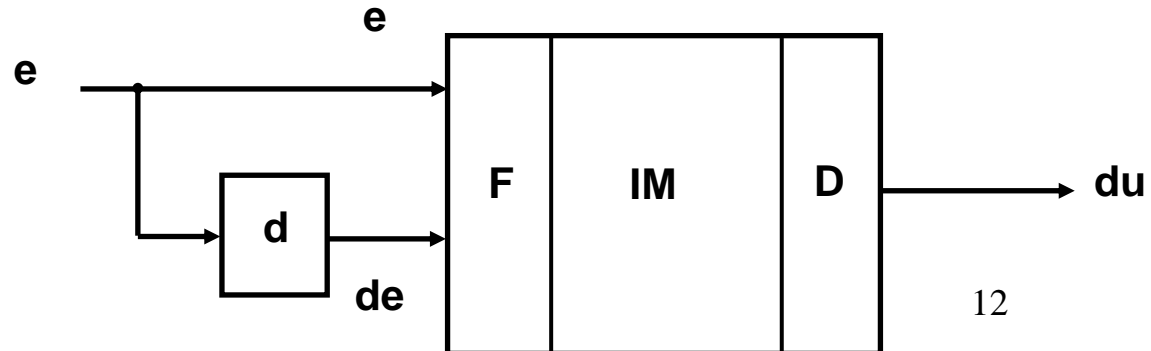
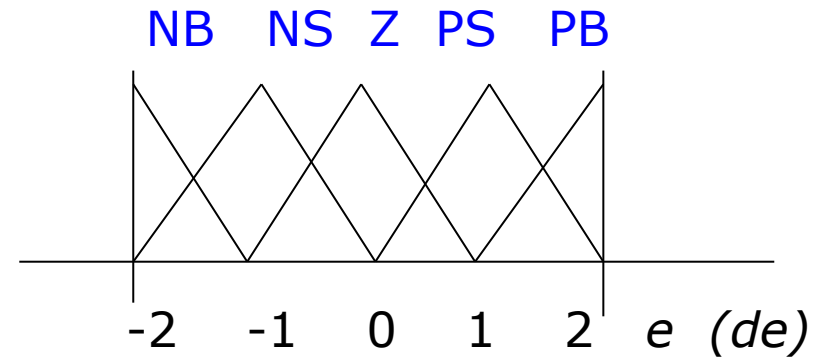
- Ak v smere 1a čaká veľmi veľa áut (VV)  
a v ostatných smeroch čaká málo alebo veľmi málo alebo  
nula áut (M alebo VM alebo N) - pusti smer 1a na stredne  
dlho (S)
- Ak v smere 1a nečaká VV áut ...
- a.t.d'. ...



# Regulácia výšky hladiny v nádrži



$$\begin{aligned} -2 < e < 2 \\ ? < de < ? \\ ? < du < ? \\ ? < u < ? \end{aligned}$$

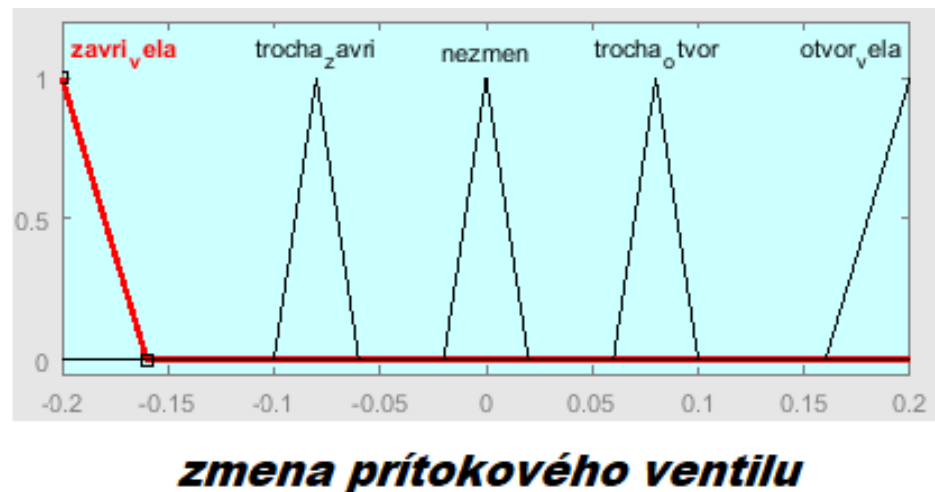


# Fuzzy regulátor výšky hladiny

vstupy



výstup



1. If (odchylka is vysoka) then (ventil is zavri\_vela) (1)
2. If (odchylka is trocha\_vysoka) then (ventil is trocha\_zavri) (1)
3. If (odchylka is dobra) then (ventil is nezmen) (1)
4. If (odchylka is trocha\_nizka) then (ventil is trocha\_otvor) (1)
5. If (odchylka is nizka) then (ventil is otvor\_vela) (1)

**báza pravidiel na jednoduché riadenie**

# Niektoré iné aplikácie fuzzy riadenia

- **Supervízorové riadenie čističiek vody**
- **Riadenie pohyblivého ramena raketoplánu**
- **Riadenie rakiet**
- **Riadenie Metra**
- **Riadenie biotechnologických procesov**
- **ABS**
- **Diagnostika porúch**
- **Spotrebná elektronika**
- **...**

## **4.2 Fuzzy PID regulátory**

# **Poznámky ku konvenčným PID regulátorom**



## PID regulátor

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

## Polohový PSD regulátor

$$u_k = K \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^{k-1} e_j + \frac{T_d}{T} \Delta e_k \right]$$

$$u_k = K \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^{k-1} e_j + \frac{T_d}{T} \Delta e_k \right]$$

$$u_{k-1} = K \left[ e_{k-1} + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^{k-2} e_j + \frac{T_d}{T} \Delta e_{k-1} \right]$$

odčítaním dostaneme

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} = K \left[ \Delta e_k + \frac{T}{T_i} e_{k-1} + \frac{T_d}{T} \Delta^2 e_k \right]$$

prírastok akčného zásahu za jednu periódu riadenia

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k = u_{k-1} + K \left[ \Delta e_k + \frac{T}{T_i} e_{k-1} + \frac{T_d}{T} \Delta^2 e_k \right]$$

### Prírastkový (rýchlostný) PSD regulátor

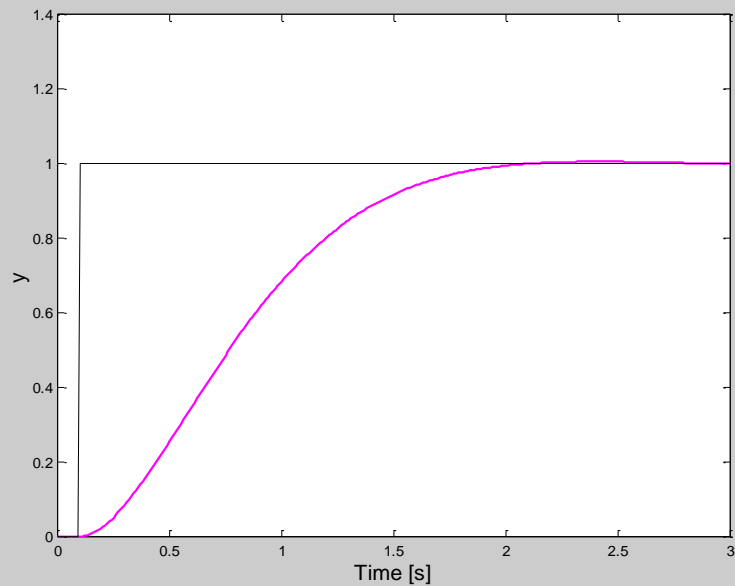
$$\Delta u = f(e, \Delta e, \Delta^2 e) ; u_k = u_{k-1} + \Delta u$$

$$u_k = K \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^{k-1} e_j + \frac{T_d}{T} \Delta e_k \right]$$

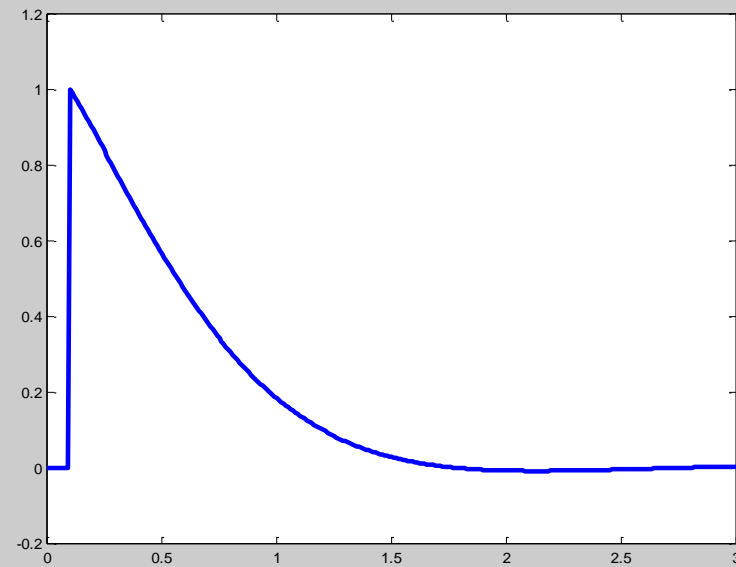
### Polohový PSD regulátor

$$u = f(e, \sum e, \Delta e)$$

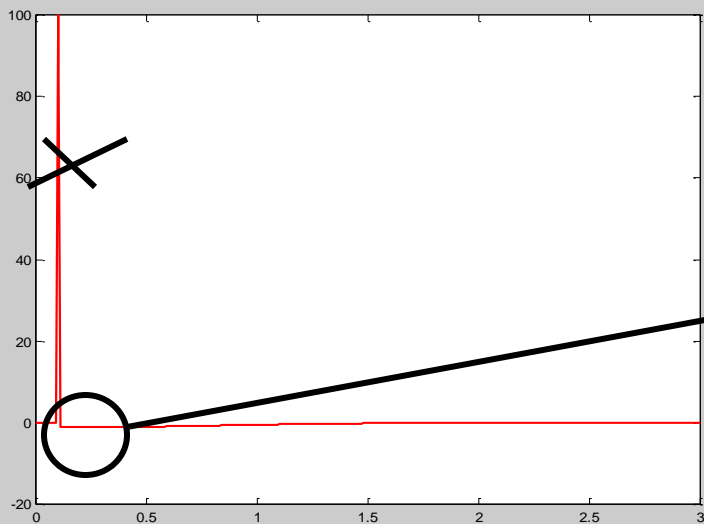
# **Modifikácia derivačného člena PID algoritmu**



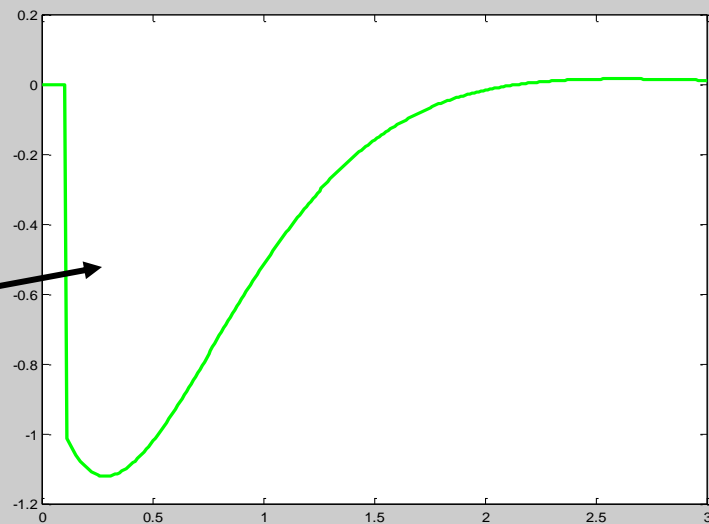
**$y(t)$  po skoku žiadanej hodnoty**



**$e(t)$  po skoku žiadanej hodnoty**



**$de/dt$**



**$- dy/dt$**

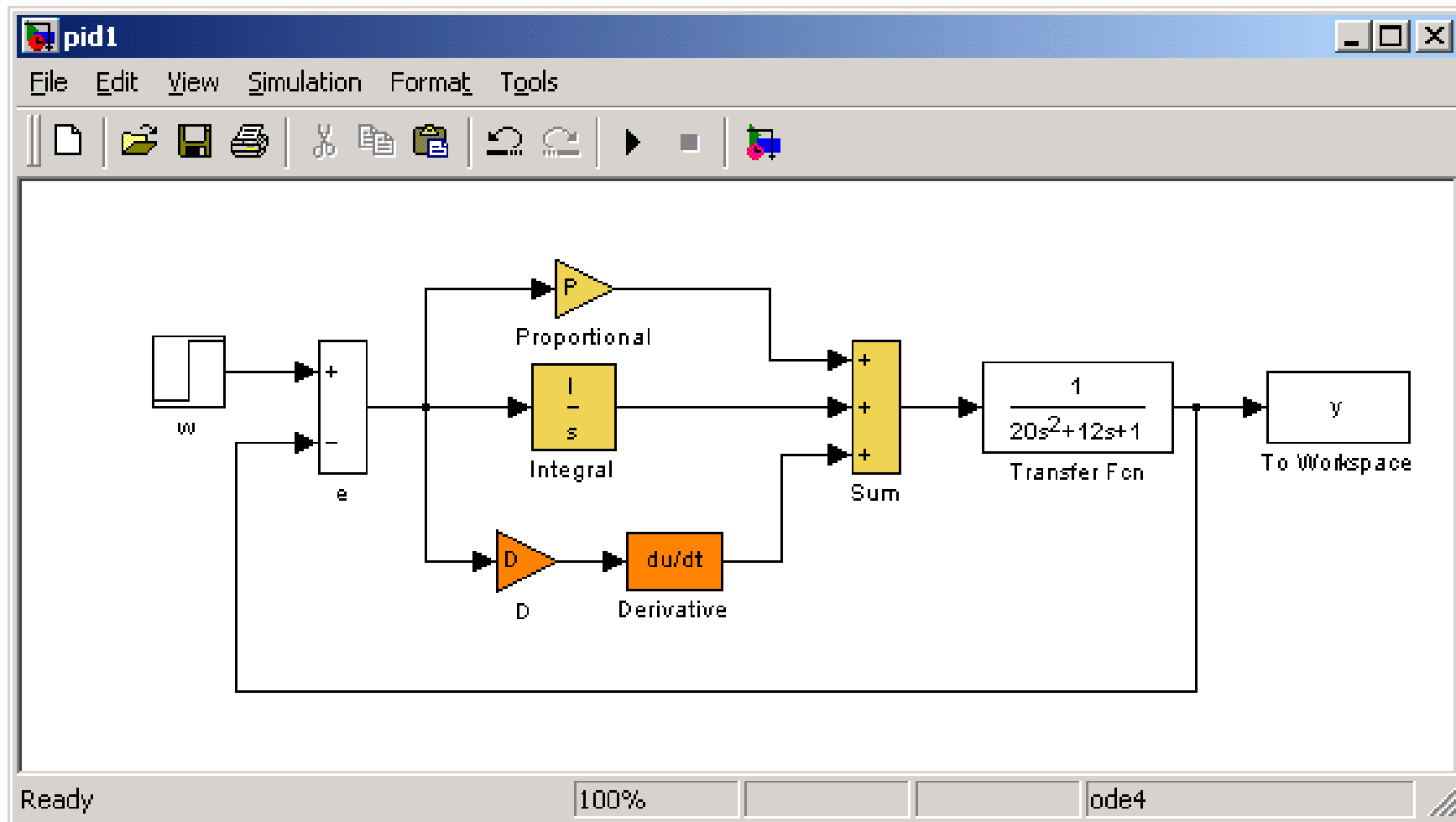
$$u_k = K \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^{k-1} e_j + \frac{T_d}{T} \Delta e_k \right] \quad \text{Klasický PSD}$$

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1} = (w - y_k) - (w - y_{k-1}) = y_{k-1} - y_k = -\Delta y_k$$

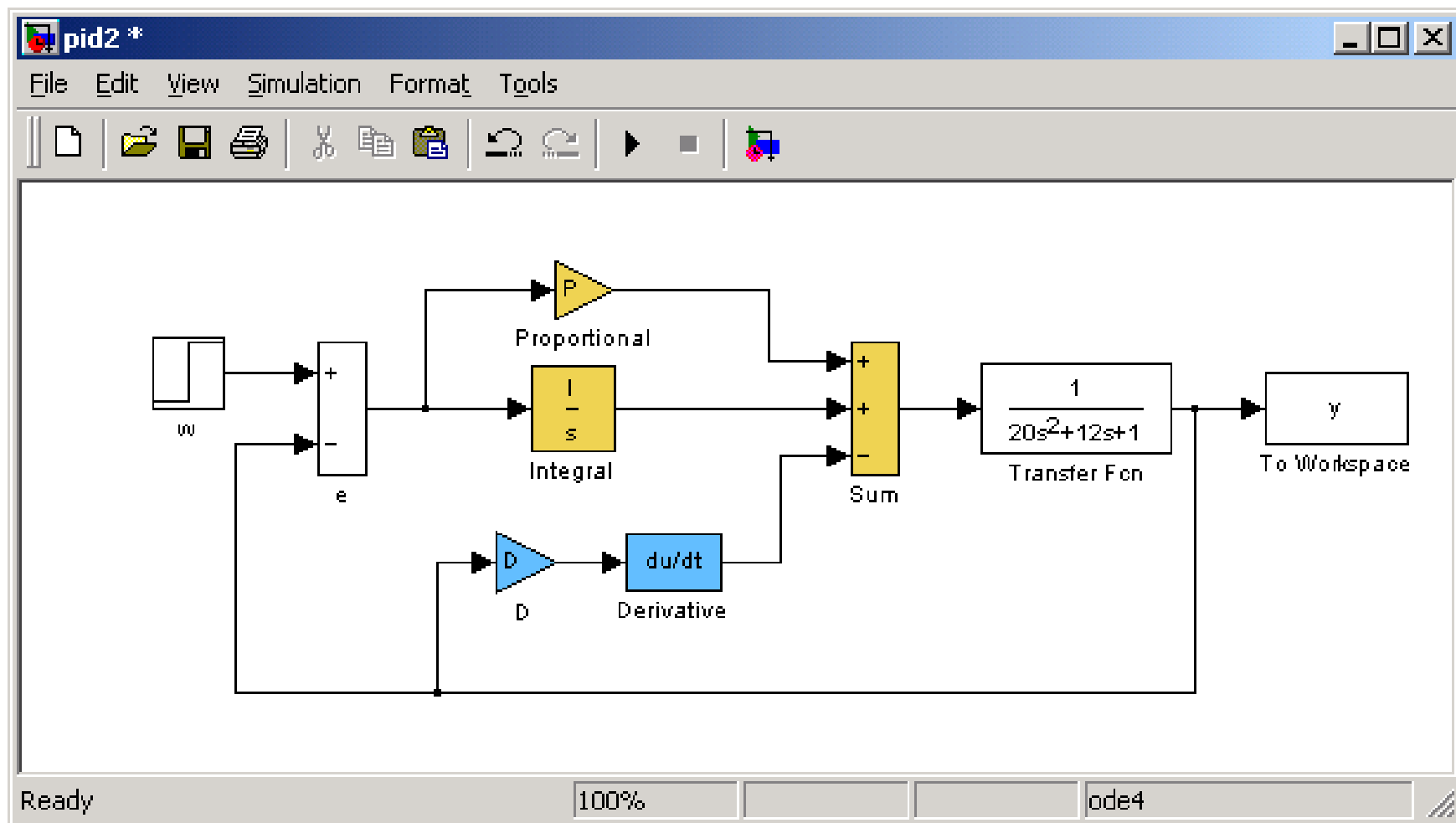
$$u_k = K \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^{k-1} e_j - \frac{T_d}{T} \Delta y_k \right] \quad \text{Upravený PSD}$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{-dy}{dt} \quad \text{pre spojitý prípad}$$

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \frac{dy(t)}{dt} \right] \quad \text{Upravený PID}$$



## Klasický PID



## Upravený PID

Analógia tohoto zapojenia sa doporučuje pri FUZZY regulátoroch



# Fuzzy - PID regulátory

# Vstupmi fuzzy PID regulátorov sú obyčajne

- $e(t), y(t), e_k, y_k$
- $de(t)/dt, -dy(t)/dt, \Delta e_k, -\Delta y_k$
- $d^2e(t)/dt^2, -d^2y(t)/dt^2, \Delta^2 e_k, \Delta^2 y_k$
- $\int e(t)dt, \Sigma e_k$

prípadne iné veličiny podľa typu aplikácie ako  
poruchy, žiadané hodnoty, pomocné informácie ...

# Výstupy fuzzy PID regulátorov sú vo forme

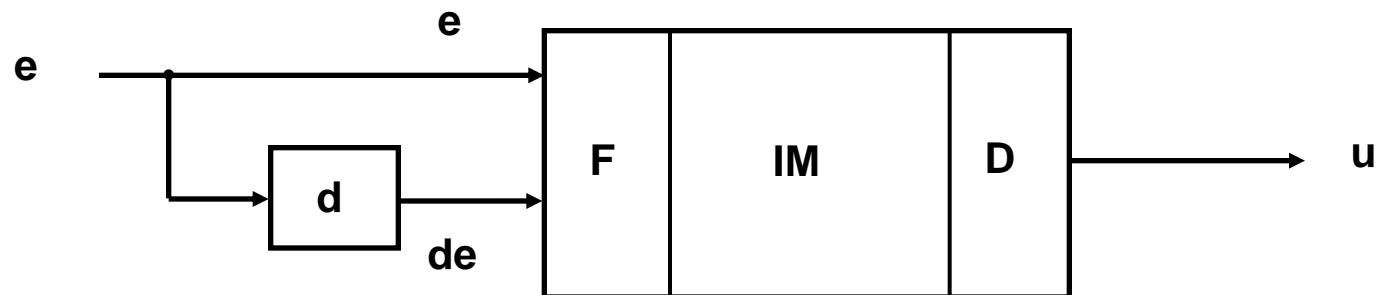
- absolútnej (polohovej): výstup z FS je priamo  $u(t)$  resp.  $u(k)$
- alebo prírastkovej (rýchlostnej): výstup z FS je

$$\frac{du(t)}{dt} \text{ resp. } \Delta u(k) \quad (du)$$

vstup do riadeného systému je  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$

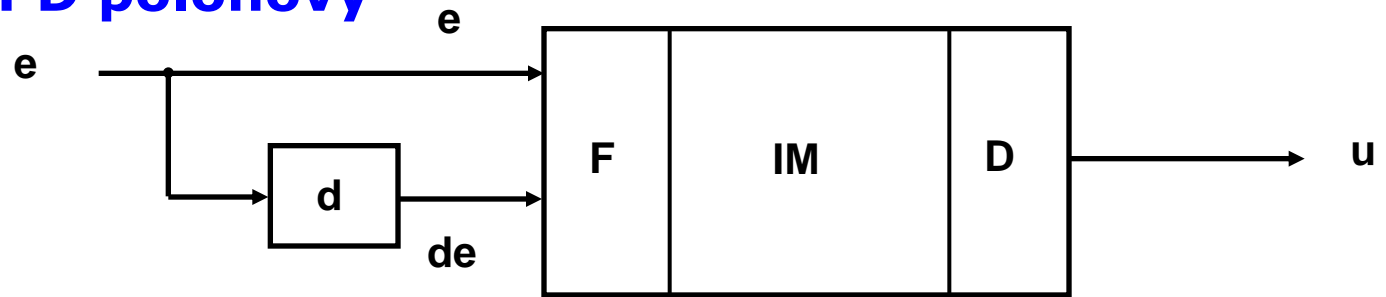
$$u(k) = \int \frac{du}{dt} dt$$

# Fuzzy PD polohový



**If  $e$  is A and  $de$  is B then  $u$  is C**

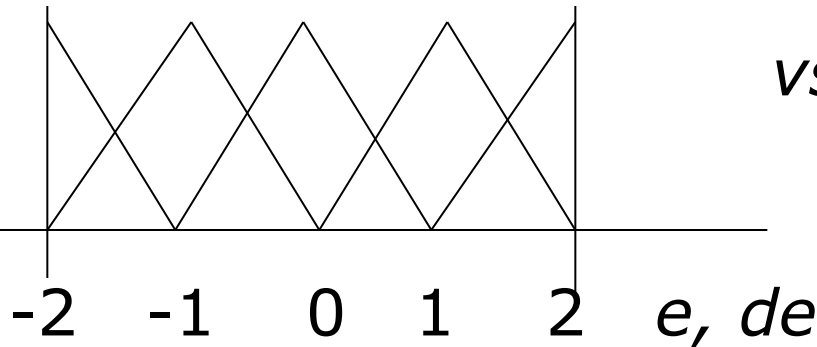
# Fuzzy PD polohový



If e is NS and de is PB then u is PS

NB NS Z PS PB

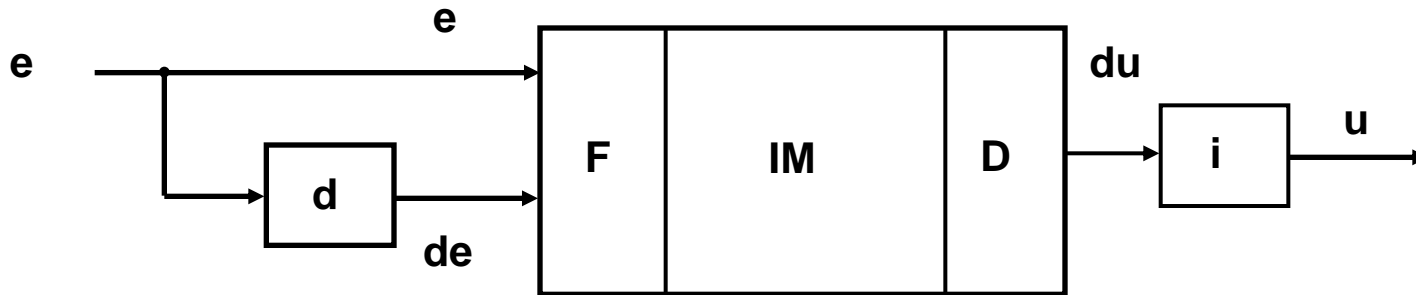
*vstupné f. prísl.*



de/e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

*báza pravidiel*

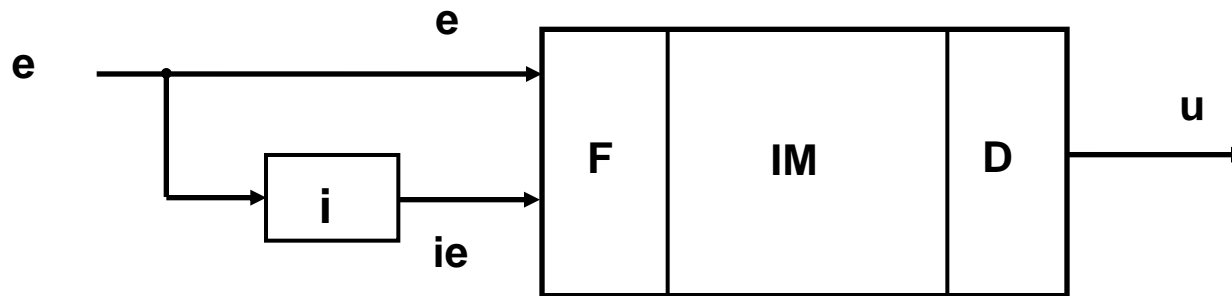
# Fuzzy PI rýchlostný



If  $e$  is  $A$  and  $de$  is  $B$  then  $du$  is  $C$

$$u(t) = \int du(t) dt \quad \text{resp.} \quad u(k) = u(k-1) + du(k)$$

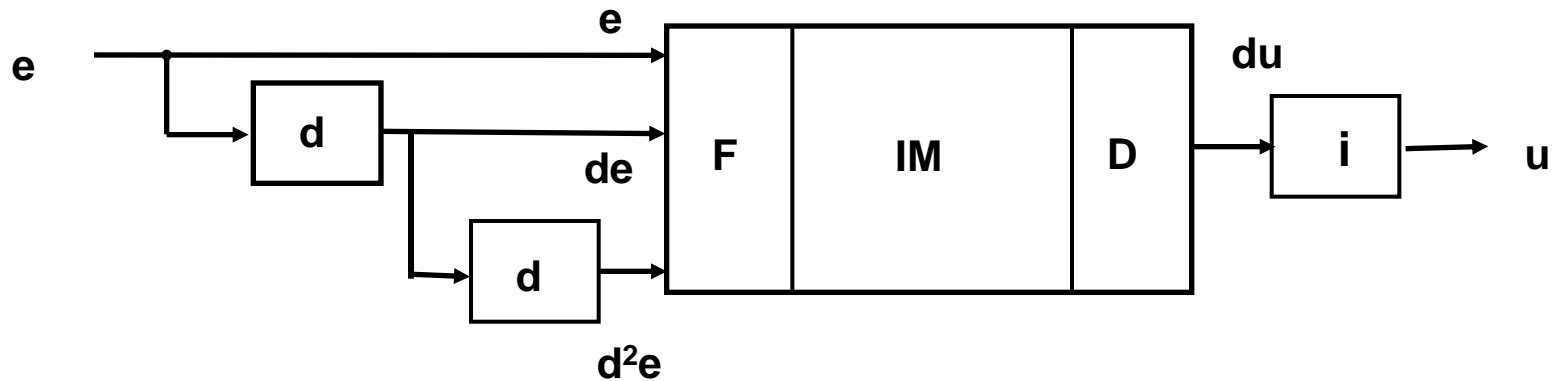
# Fuzzy PI polohový



**If  $e$  is A and  $ie$  is B then  $u$  is C**

$$ie = \int e(t) dt \quad \text{resp.} \quad ie = \sum e$$

# Fuzzy PID regulátor s 3-D bázou pravidiel



If  $e$  is  $A$  and  $de$  is  $B$  and  $d^2e$  is  $C$  then  $du$  is  $D$

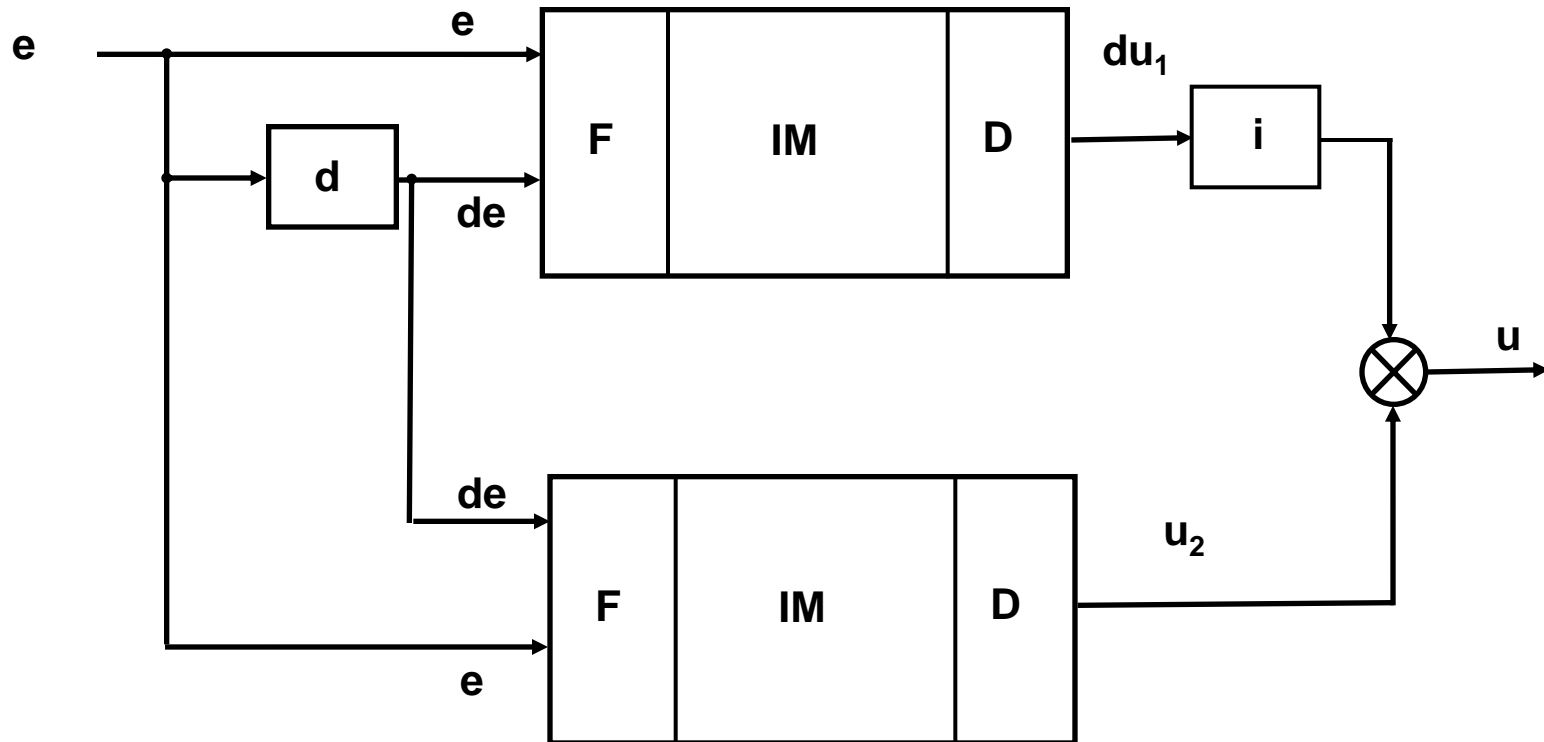
$de/e$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

$d^2e$

báza pravidiel :  $5 \times 5 \times 5 = 125$  pravidiel



# Fuzzy PI + fuzzy PD regulátor

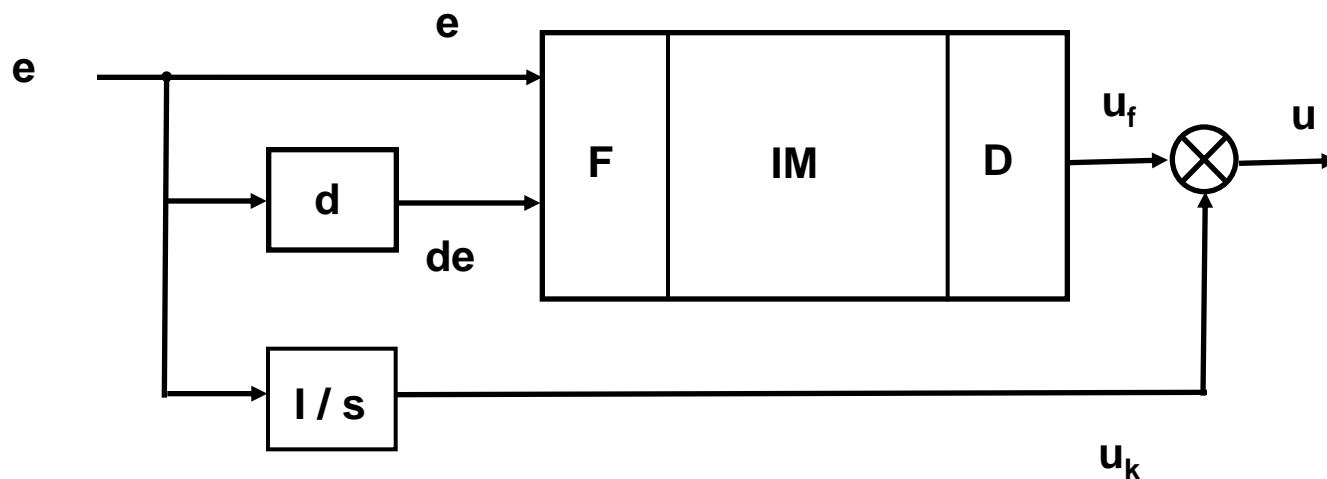


**If  $e$  is A and  $de$  is B then  $du_1$  is E**

**If  $e$  is C and  $de$  is D then  $u_2$  is F**

*báza pravidiel :  $5 \times 5 \times 2 = 50$  pravidiel*

# Fuzzy PD + klasický I regulátor



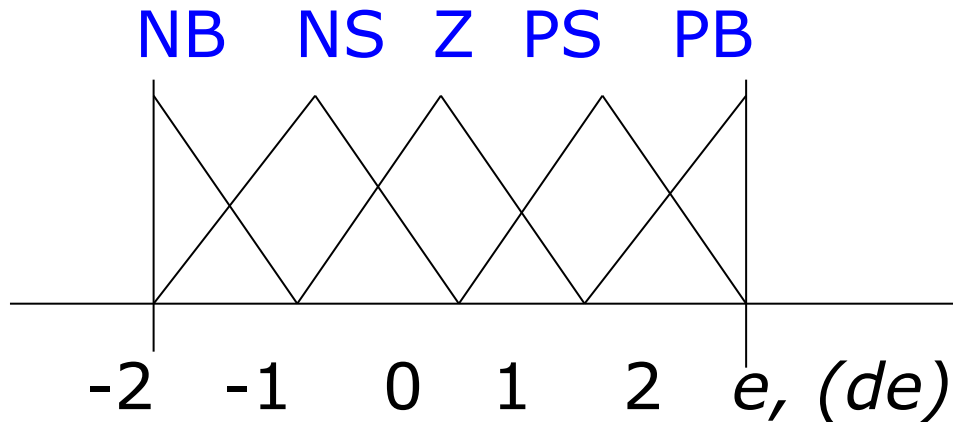
# Základné typy fuzzy - PID regulátorov

## zhrnutie

typ regulátora	vstupy	dim. BP	výstup	použitie
P	$e$	1	$u$	*
I - prírastkový	$e$	1	$du$	*
PD - polohový	$e, de$	2	$u$	**
PI - prírastkový	$e, de$	2	$du$	**
PI - polohový	$e, ie$	2	$u$	
PID - polohový	$e, ie, de$	3	$u$	
PID - prírastkový	$e, de, d^2e$	3	$du$	*
PD pol.+PI prír.	$e, de$	2	$u, du$	**
PD pol. + I klas.	$e, de$	2	$u$	**

# **Manuálny návrh fuzzy - PID regulátorov**

# Určenie rozsahu (univerza) lingvistických premenných



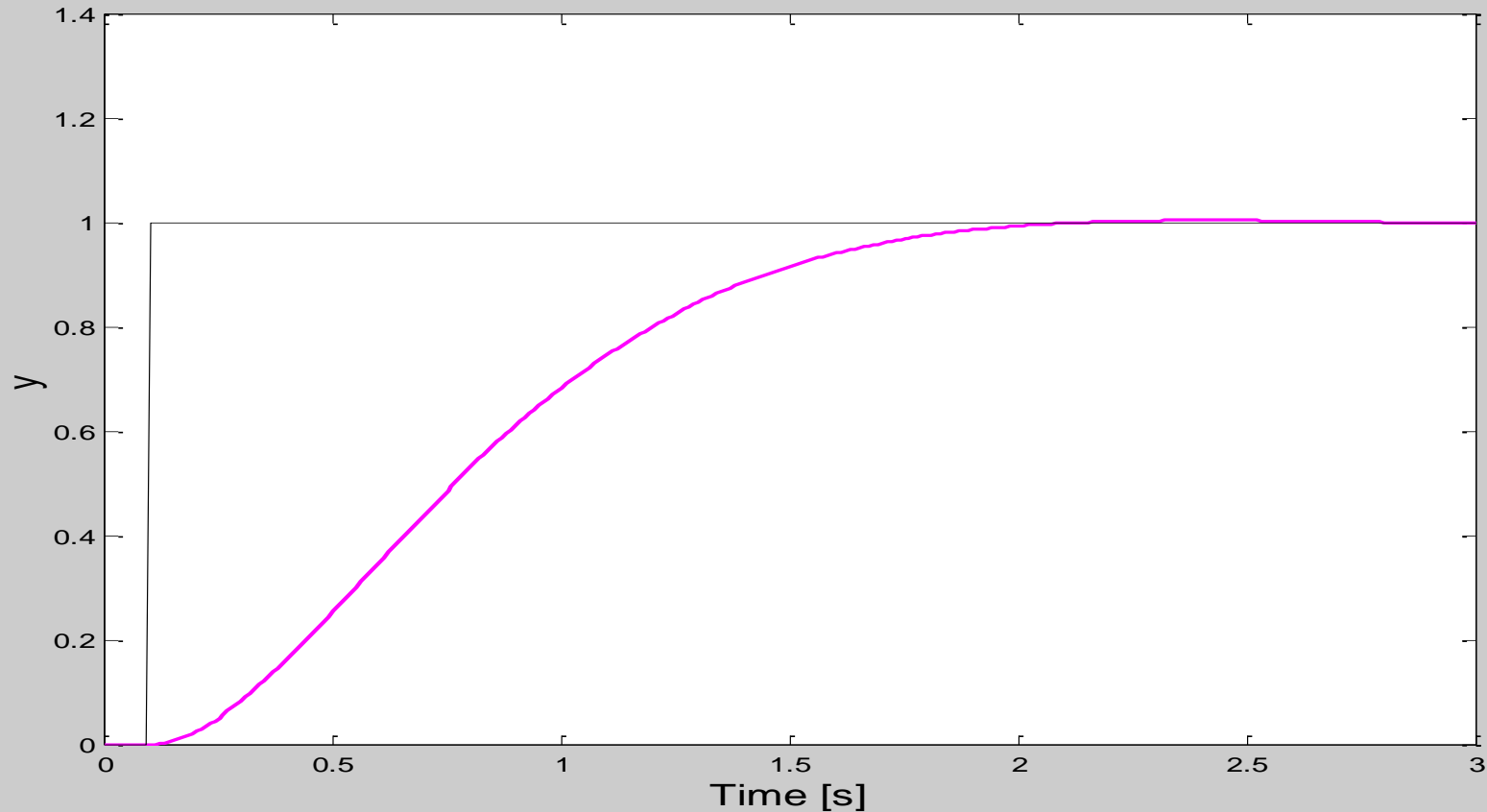
*vstupné/výstupné  
f. príslušnosti*

de/e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

*báza pravidiel*

# Určenie rozsahu $e(t)$

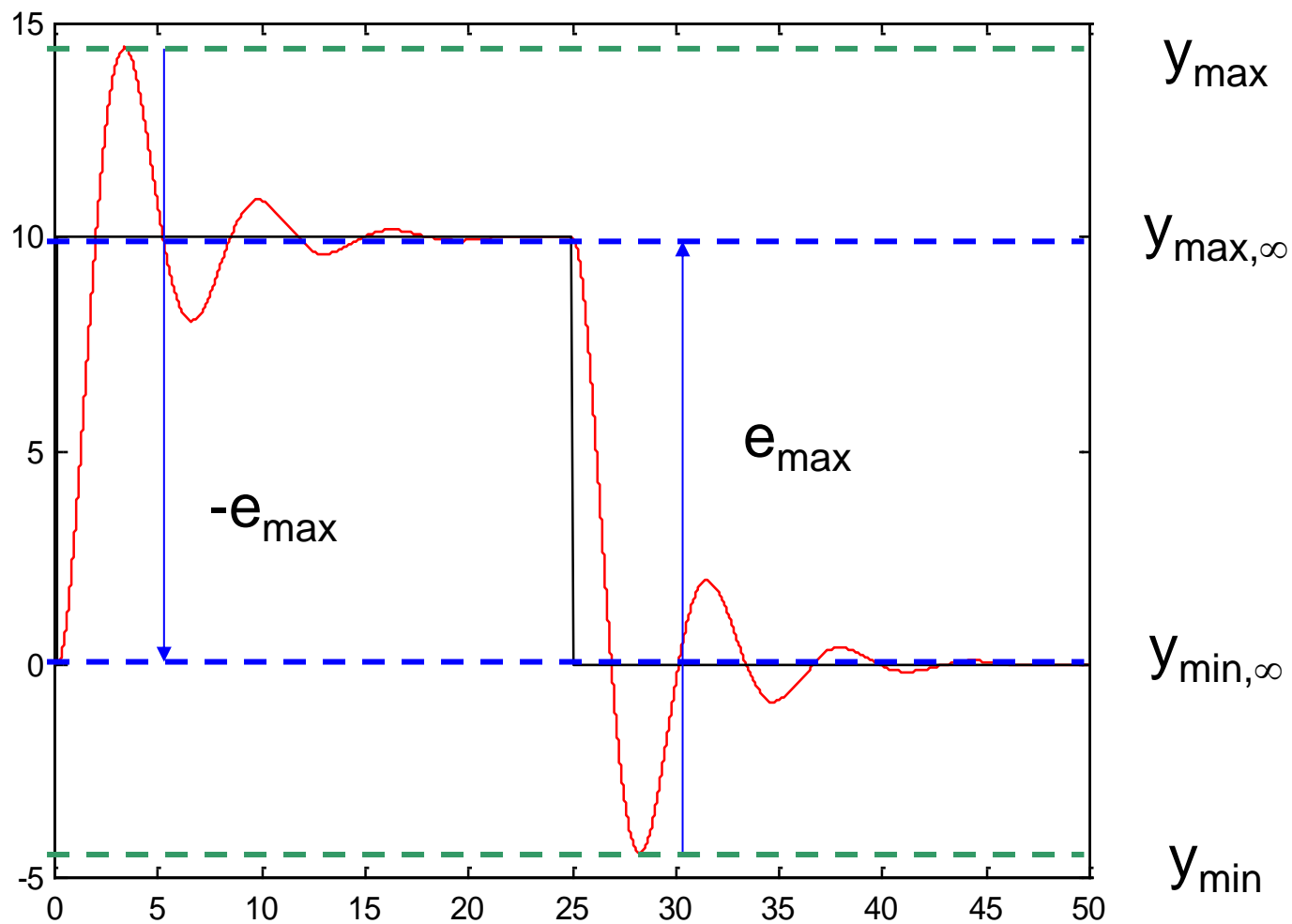
$e = w - y$



$$y \in (y_{min} ; y_{max}) \rightarrow e \in ( (y_{min}-y_{max}) ; (y_{max}-y_{min}) )$$

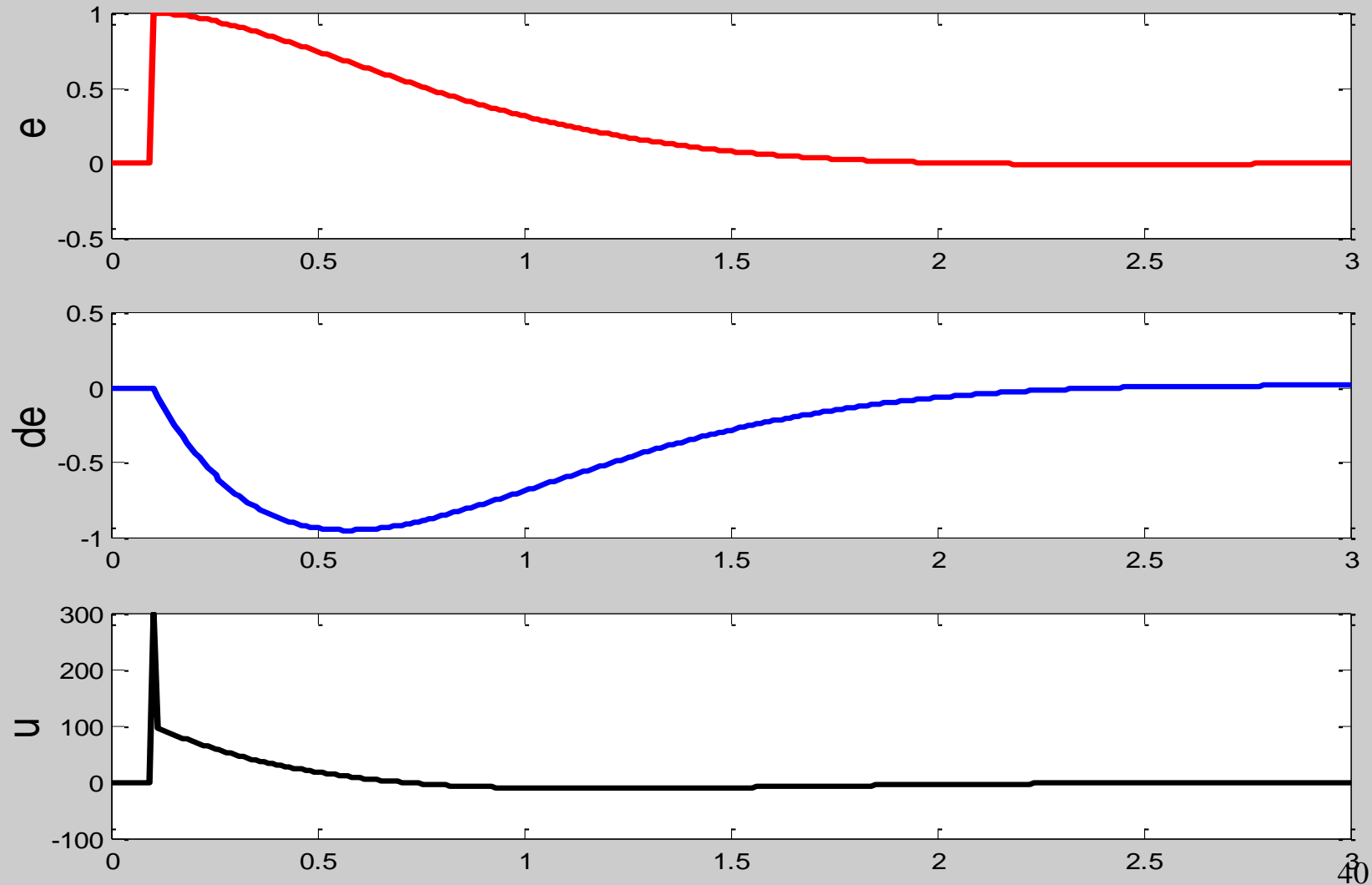
$$e \in ( -1 ; 1 )$$

## v prípade preregulovania



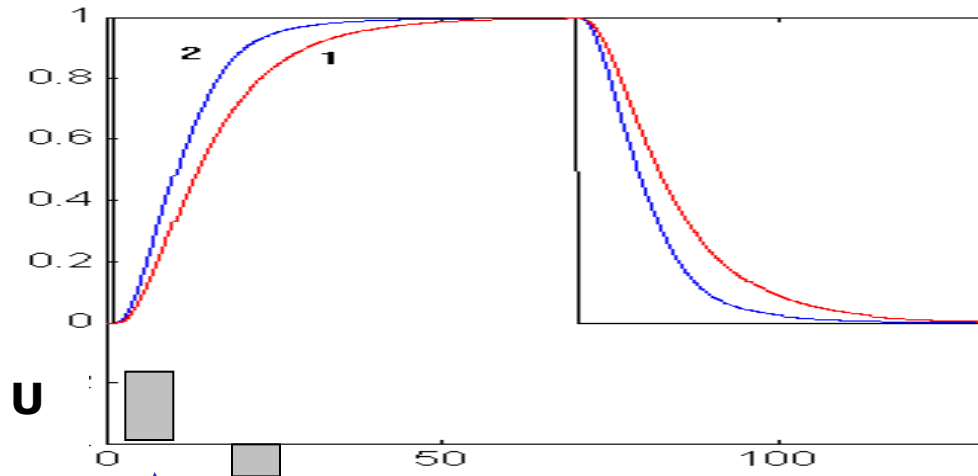
**Určenie rozsahu  $\dot{e}(t)$  ,  $d^2e(t)$  – z dynamiky systému (poruchy)**

**Určenie rozsahu  $u(t)$  – z iného regulátora, alebo kvalifikovaný odhad**





# Experimentálny spôsob tvorby bázy pravidiel

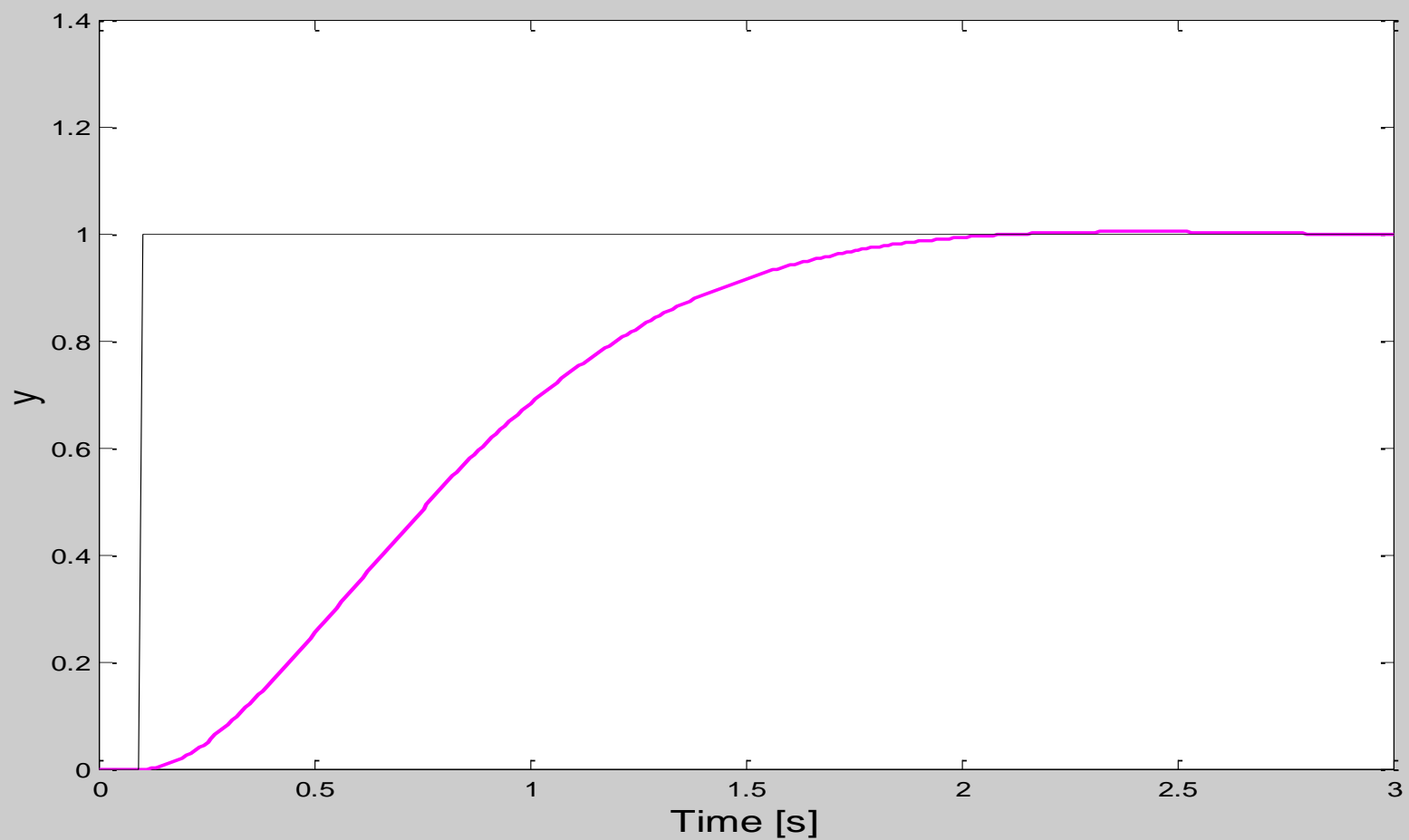


Ak  $e$  je kladná veľká a  $de$  je nulová potom  $u$  je kladné veľké  
(skok žiad.hod.  $\rightarrow$  prudké rozbehnutie systému)

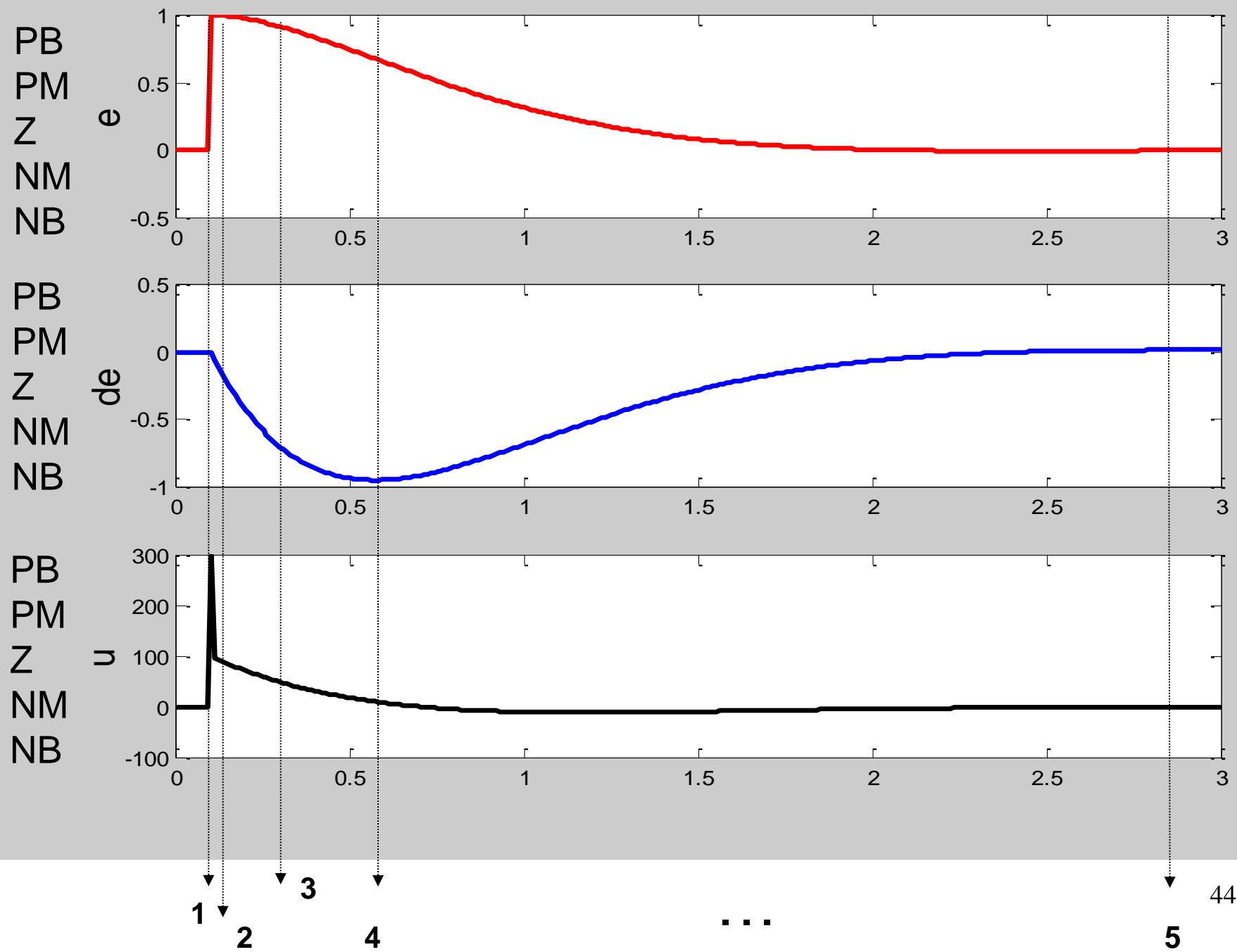
Ak  $e$  je kladná malá a  $de$  je záporná veľká potom  $u$  je záporné malé  
(prijazdenie aby nenastalo preregulovanie)

**a podobne aj v iných stavoch ...**

**„Napodobenie“  
iného typu regulátora**



**Regulačný priebeh iného typu regulátora**



1: ak e je PB a de je ZE u je PB (300)  
(skok žiadanej hodnoty, systém je ešte v klúde)

2: ak e je PB a de je NS u je PM (100)  
(systém sa rozbehol)

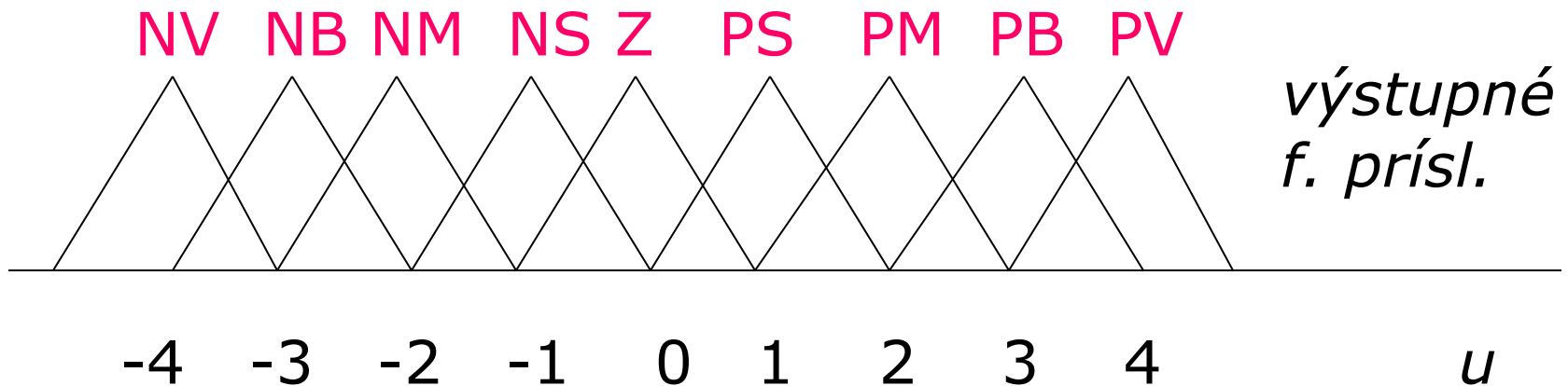
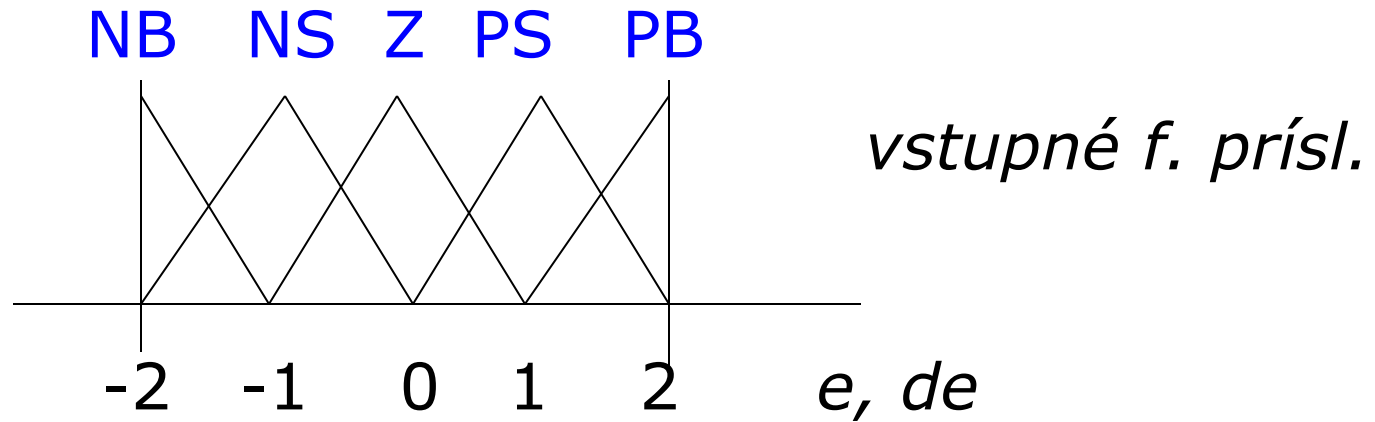
4: ak e je PM a de je NB u je PS (15)  
(maximálna rýchlosť)

5: ak e je ZE a de je ZE u je PVS (1)  
(ustálený stav)

. . .

# **Približný prepočet PID na fuzzy-PID regulátor**

Bez ujmy na všeobecnosti predpokladajme konkrétny prípad  
F-PD reg. (F-PI reg) :



PD reg:       **$u(t) = P \cdot e(t) + D \cdot de(t)$**     ( + I.ie(t) )

nech     $P = D = I = 1$

$$P.(-2)+D.(-2)=1.(-2)+1.(-2)=-4$$

**de**

	NB	NS	Z	PS	PB
NB	-4 <b>NV</b>	-3 <b>NB</b>	-2 <b>NM</b>	-1 <b>NS</b>	0 <b>Z</b>
NS	-3 <b>NB</b>	-2 <b>NM</b>	-1 <b>NS</b>	0 <b>Z</b>	1 <b>PS</b>
Z	-2 <b>NM</b>	-1 <b>NS</b>	0 <b>Z</b>	1 <b>PS</b>	2 <b>PM</b>
PS	-1 <b>NS</b>	0 <b>Z</b>	1 <b>PS</b>	2 <b>PM</b>	3 <b>PB</b>
PB	0 <b>Z</b>	1 <b>PS</b>	2 <b>PM</b>	3 <b>PB</b>	4 <b>PV</b>

**e**

**u**

„Kvázi-lineárna báza pravidiel“



## Príklad : F-PD regulátor

$$u(t) = P.e(t) + D.de(t) \quad P = 0,5 \ ; \ D = 0,2$$

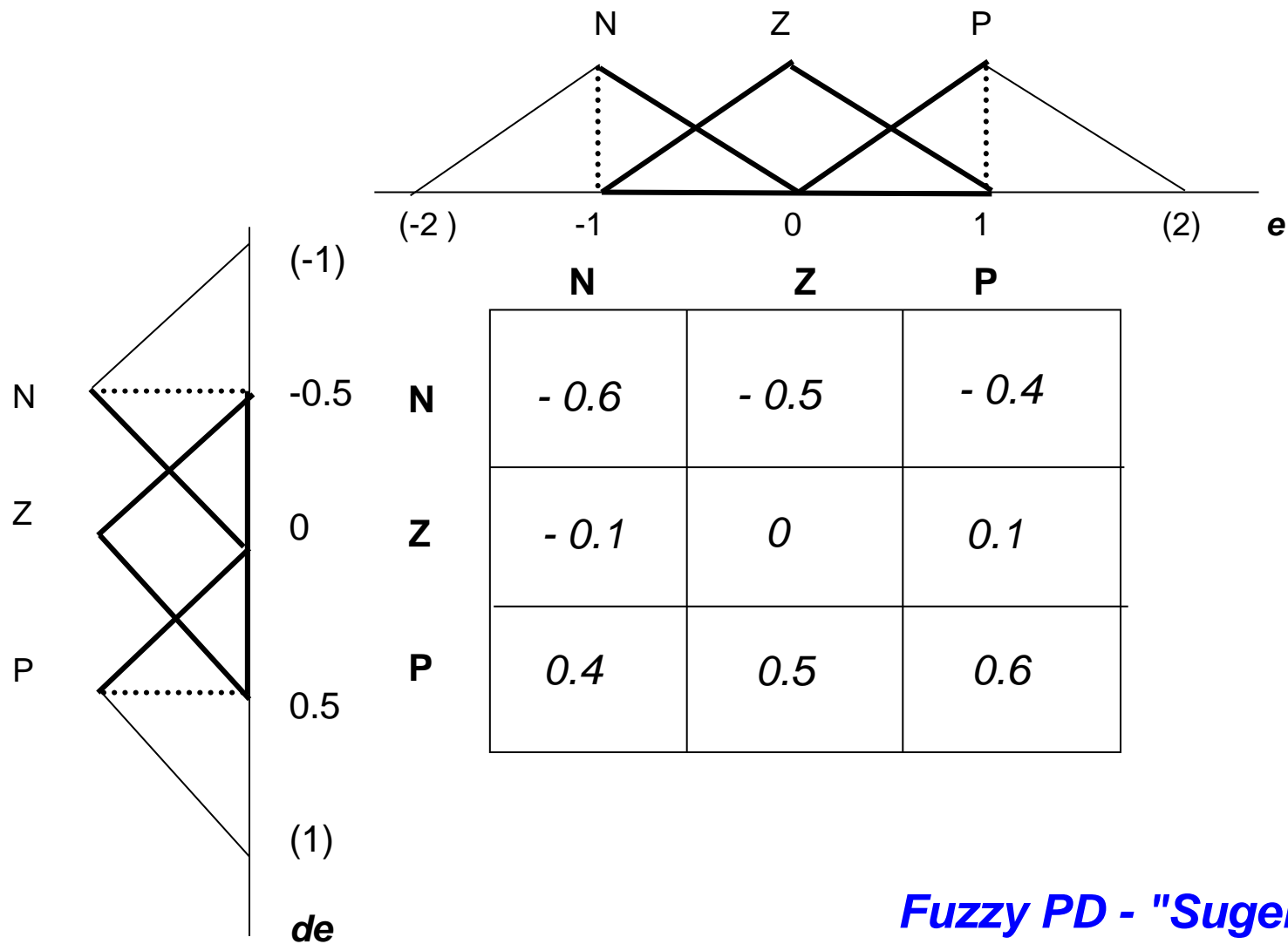
Nech

$$y \in (0 ; 1) \rightarrow e \in (-1 ; 1) ; de \in (-0,5 ; 0,5)$$

$$e = \{ N ; Z ; P \} = \{ -1 ; 0 ; 1 \}$$

$$de = \{ N ; Z ; P \} = \{ -0.5 ; 0 ; 0.5 \}$$

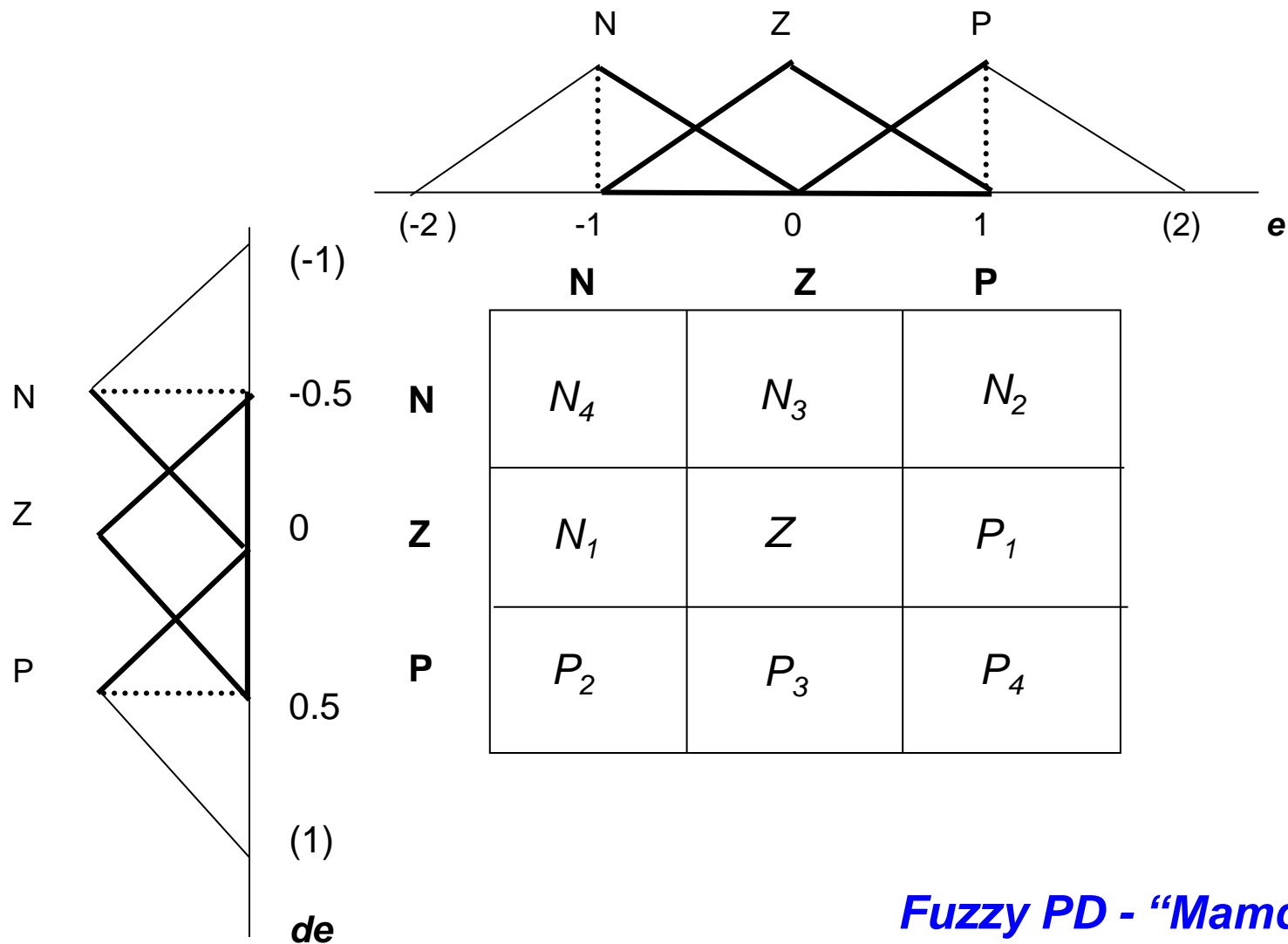
Predpokladajme trojuholníkové, symetrické a rovnomerne rozložené funkcie prísl.



**Fuzzy PD - "Sugeno"**

**FS Sugeno :** if  $x_1$  is  $A$  and  $x_2$  is  $B$  then  $u$  is  $c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2$   
if  $x_1$  is  $A$  and  $x_2$  is  $B$  then  $u$  is  $c$

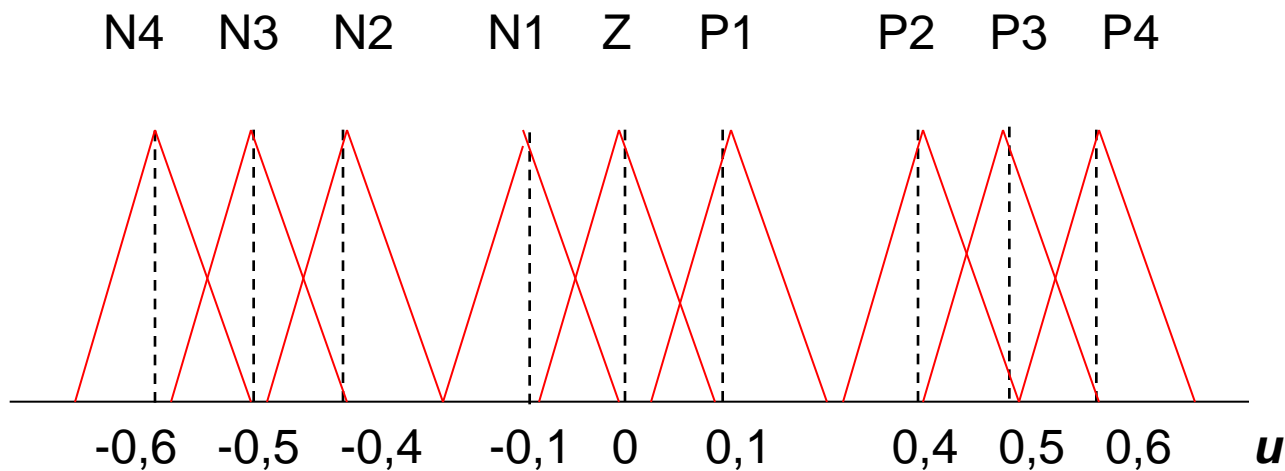
kde  $A, B$  sú fuzzy množiny a  $c_0, c_1, c_2, c$  sú konštanty.



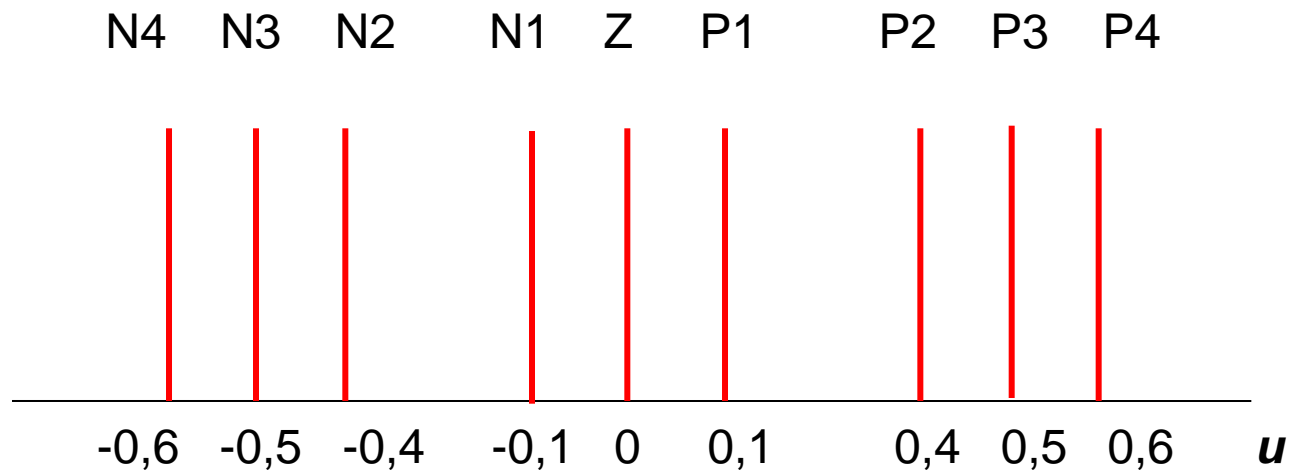
**Fuzzy PD - "Mamdani"**

**FS Mamdani :** if  $e$  is  $P$  and  $de$  is  $Z$  then  $u$  is  $P_1$   
 kde  $P_i, N_i$  a  $Z$  sú fuzzy množiny.

## výstupné funkcie príslušnosti - trojuholníkové



## výstupné funkcie príslušnosti - „singletony“



BP pre 7 vstupných fun. prísl. pre vstupy e a de :

<b>e / de</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
<b>NM</b>	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
<b>NS</b>	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
<b>ZE</b>	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
<b>PS</b>	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
<b>PM</b>	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
<b>PB</b>	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

*Tab.4 Kvázi-lineárna báza pravidiel  
s ohraňčením akčného zásahu*

N – negatívny  
P – pozitívny  
ZE – Zero (nula)

B – Big (veľký)  
M – Medium (stredný)  
S – Small (malý)

Báza pravidiel s ohraňčením výstupu

# Ladenie prvkov bázy pravidiel

de/e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

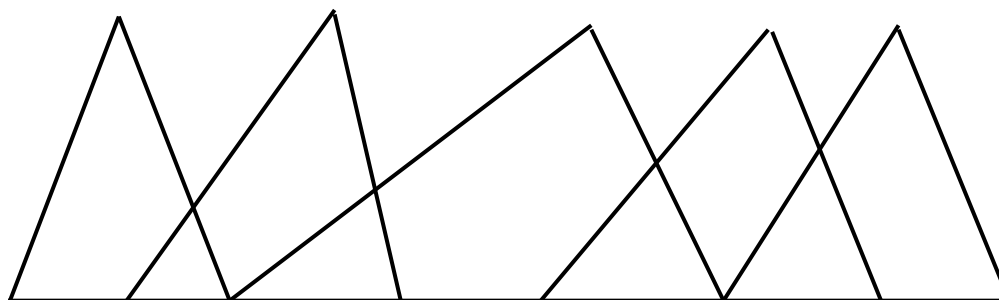
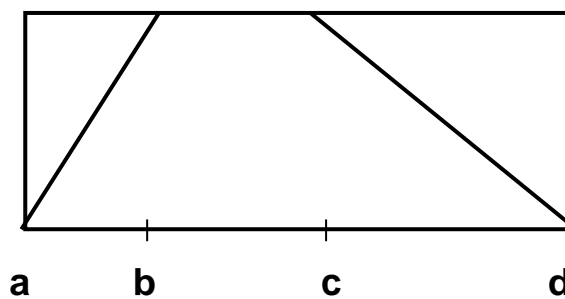
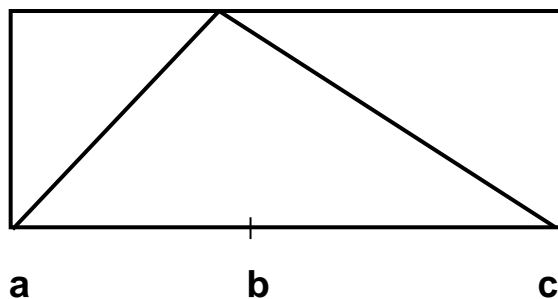
*Kvázi-lineárna báza pravidiel*

de/e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	ZE	ZE	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	ZE	ZE	PS	PB
PS	ZE	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PB	PB

*Nelineárna báza pravidiel (po aplikácii  
znalostí - nelinearity objektu riadenia)*

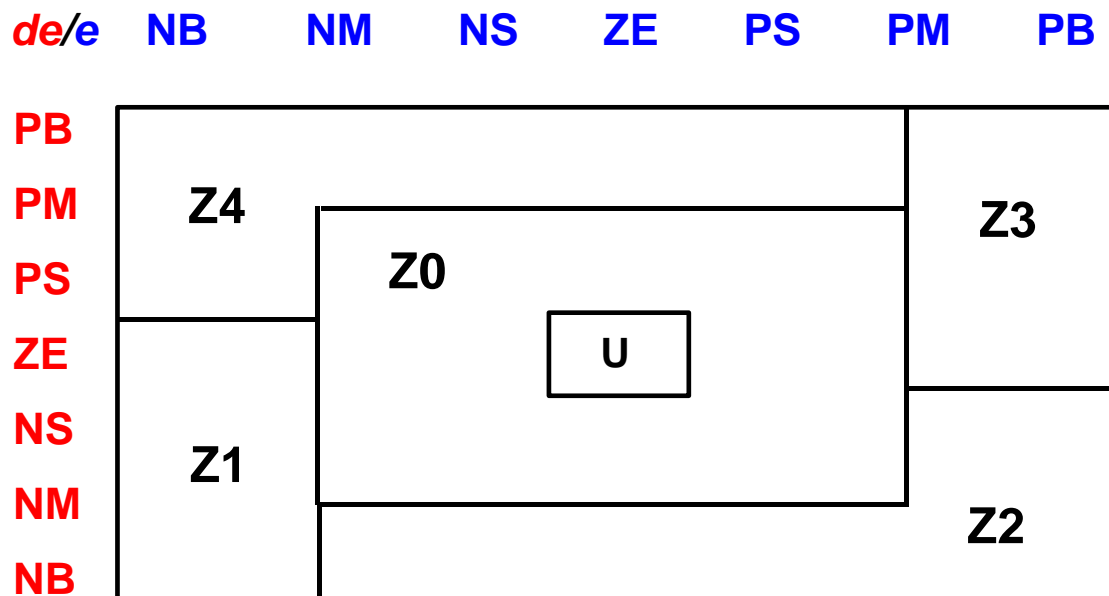


# Ladenie funkcií príslušností



**zmena typu, pridávanie/uberanie, naklápanie, presúvanie,  
rozťahovanie/zužovanie**

# Mapa sektorov bázy pravidiel



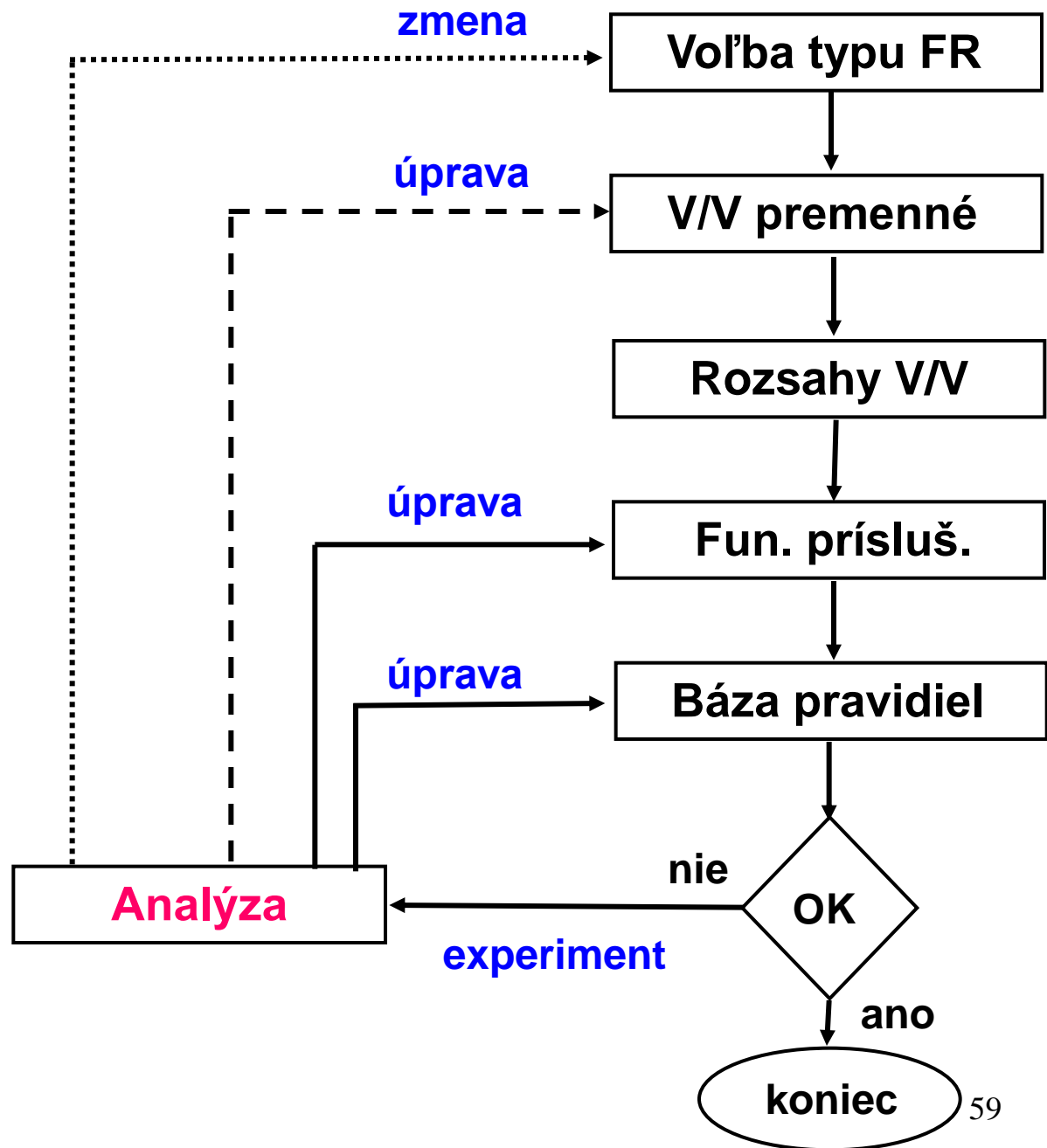
**U :** ustálený stav

**Zóna 0:** e aj *de* sú malé, systém je takmer stabilný, prvky tejto zóny tlmia systém okolo ustáleného stavu

**Zóna 1,3:** prvky tejto zóny môžu urýchľovať dynamiku regulačného obvodu

**Zóna 2,4:** prvky týchto zón sa pri bežných systémoch málo vyskytujú a málokrát sa používajú

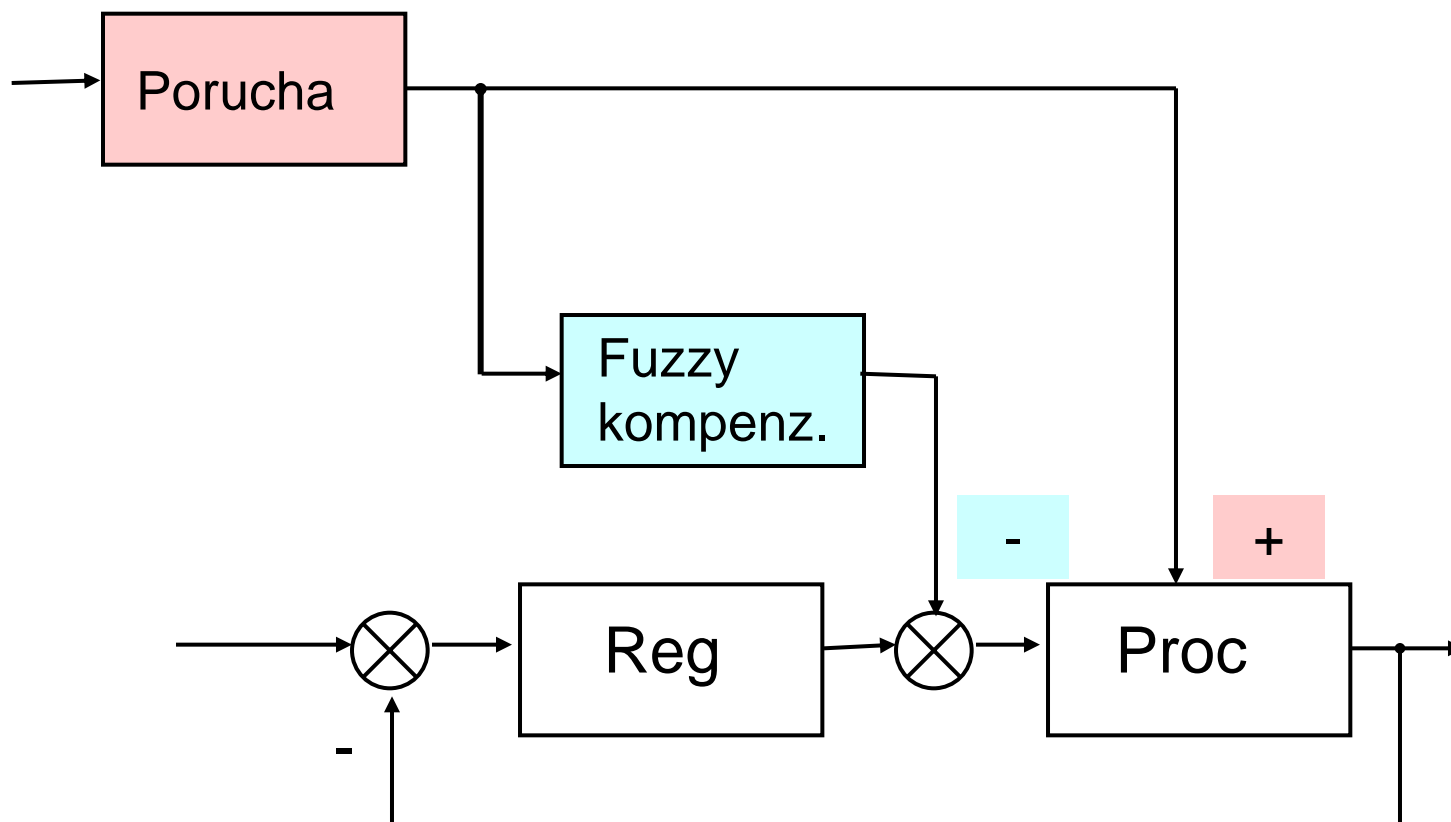
# Kroky návrhu FR



## **4.3 Fuzzy systém v inej funkcii v regulačnom obvode ako feedback regulátor**

- **Kompenzácia poruchových veličín**
- **Korekcia akčného zásahu iného regulátora**
- **Feed-forward regulátor**
- **Adaptačný mechanizmu pre konvenčný regulátor**
- **Iné ...**

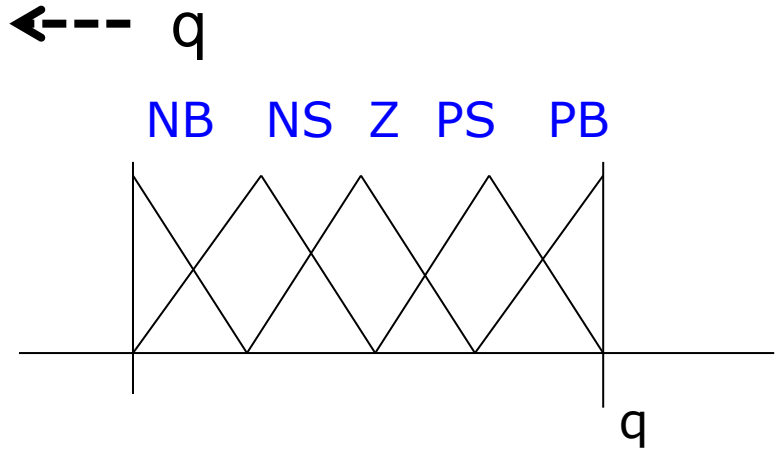
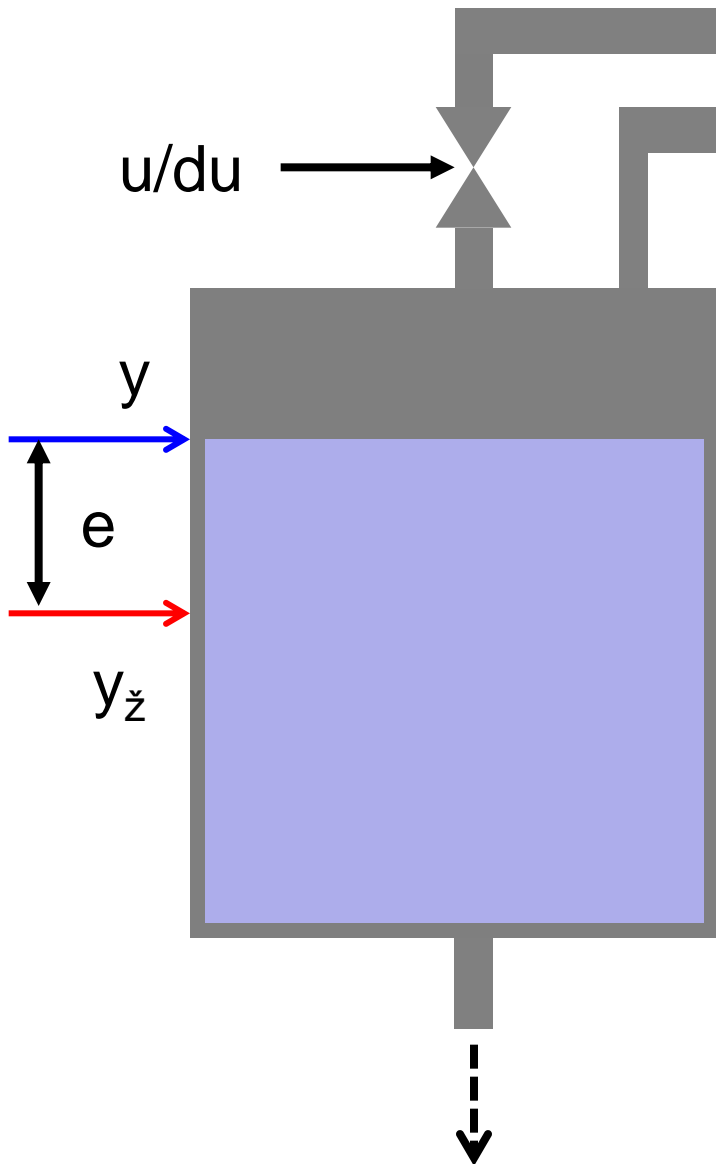
# Kompenzácia poruchovej veličiny



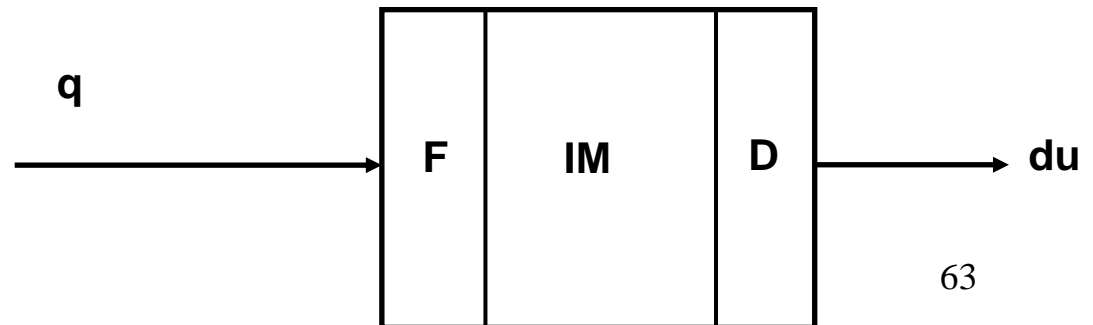
**Ak porucha je A potom kompenzácia je C**

**Ak porucha je A a zmena poruchy je B potom kompenzácia je C**

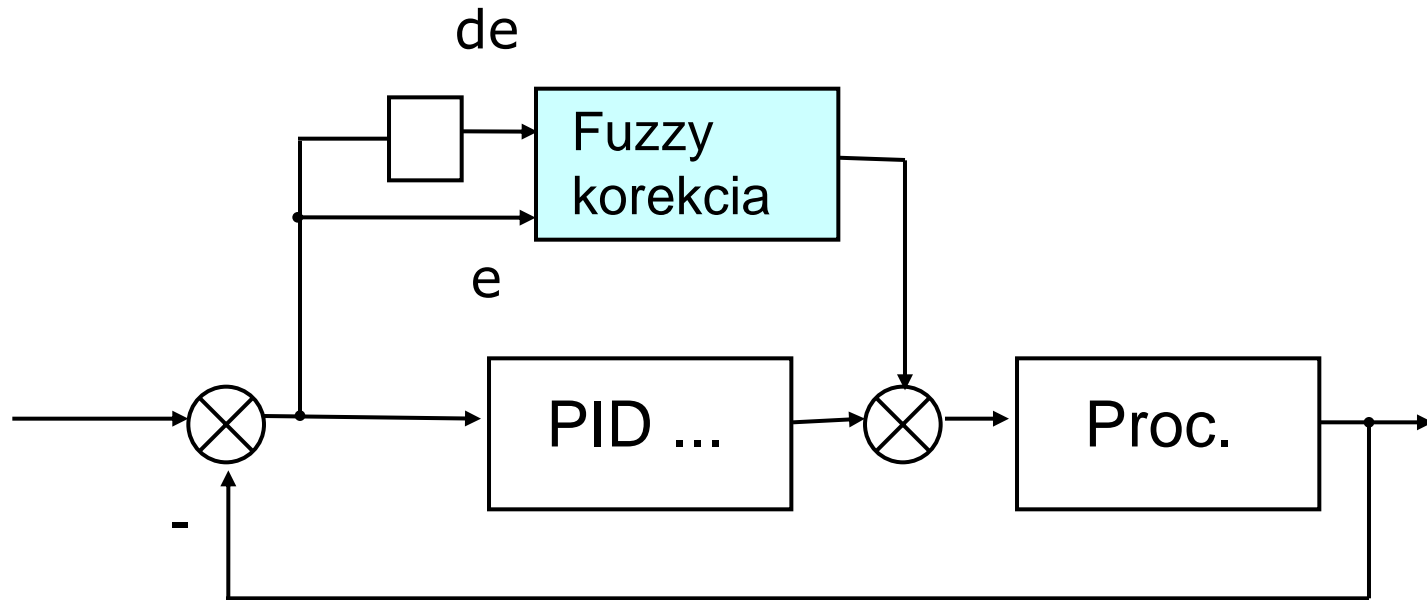
# Korekcia poruchového (parazitného) prítoku do nádrže



If  $q$  is PB then  $du$  is NB  
and' ...



# Korekcia akčného zásahu (klasického) regulátora



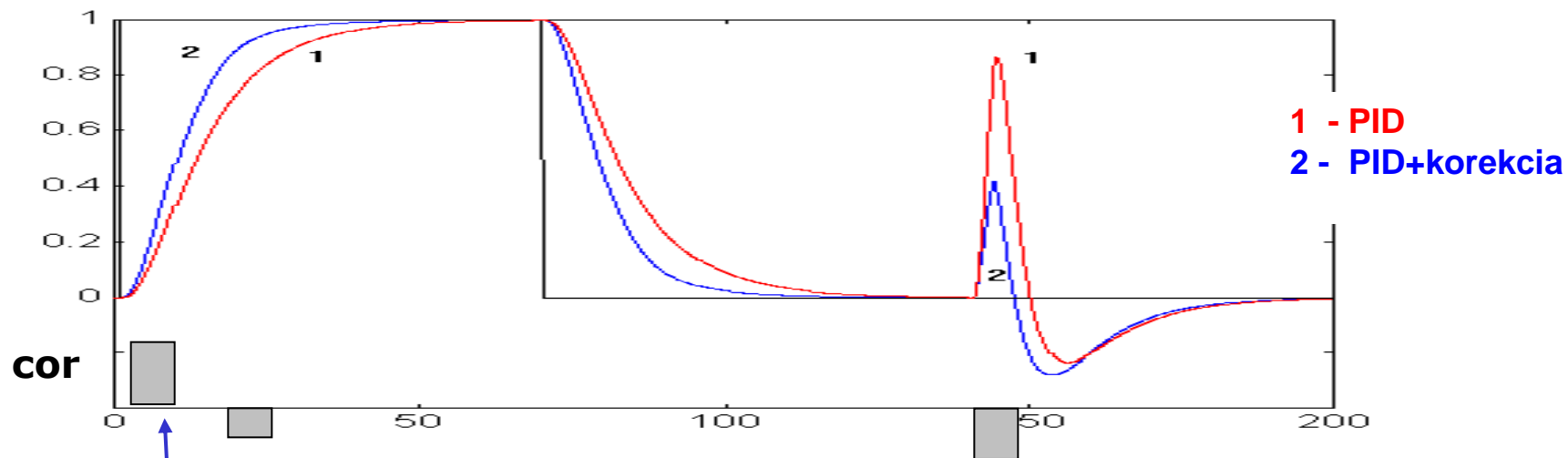
Ak  $e$  je A a  $de$  je B potom korekcia  $u$  je D

Ak  $e$  je A a  $de$  je B a  $dde$  je C potom korekcia  $u$  je D ...

**Význam:**

1. Potlačenie preregulovania
2. Skrátenie doby regulácie
3. Potlačenie porúch ...





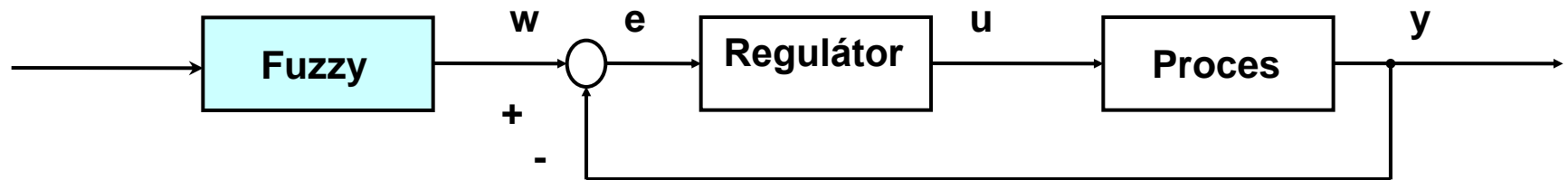
Ak  $e$  je veľká a  $de$  je nulová potom zväčši akčný zásah PID reg.  
(skok žiad.hod. → prudké rozbehnutie systému)

Ak  $e$  je malá a  $de$  je veľká potom zmenši akčný zásah PID reg.  
(pribrzdenie aby nenastalo preregulovanie)

Ak  $de$  je záporná a  $dde$  je záporná potom zväčši akčný zásah PID  
Ak  $de$  je kladná a  $dde$  je kladná potom zväčši akčný zásah PID  
(detekcia poruchy → potlačenie poruchy)

## Dopredný fuzzy korekčný člen

vstupy z  
procesu



## A mnohé iné aplikácie ...

Ked' máme k dispozícii znalosti formulovateľné rečou (lingvisticky).