

# Mikro počítačové Systémy MIPS

Distribučované vnorené počítačové systémy  
Distributed Embedded Computer System  
(Microcontrollers)

## Prednáška 11. Mikro počítačové riadenie sústavy 1. rádu.

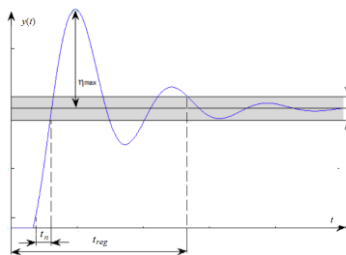
„Matlab Simulink“

Podstatnú časť **výkonnej** elektroniky áut možno charakterizovať slovami: „VYPNI / ZAPNI“

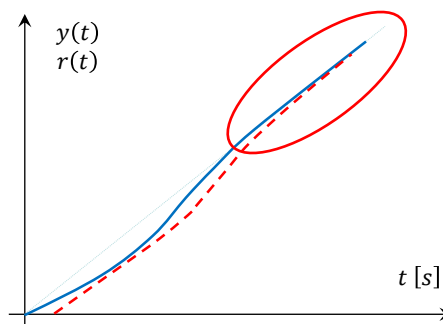
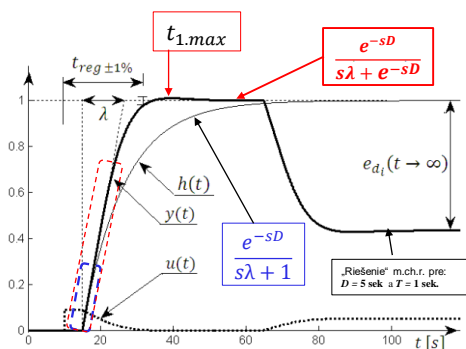
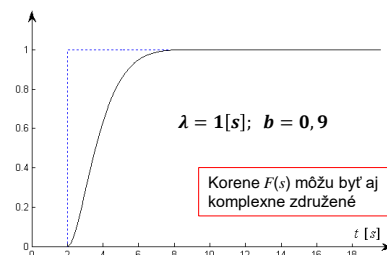
Aplikujeme len to čo vieme - poznáme.  
Všetko so všetkým súvisí: ROBUSTNOSŤ.

1

Ako by mal vyzerat' priebeh regulačného pochodu?



$$F(s) = \frac{1}{(s\lambda)^2 + 2bs\lambda + 1}$$



2



Cieľom syntézy regulačného obvodu:

Požadujem nulový vplyv akéhokoľvek vonkajšieho vstupného signálu na regulačnú odchýlku, a to aj vtedy, keď regulačná odchýlka neexistuje.

$$\text{MIMO: } S_C(s): U(s) = M^{-1}(s)F(s)(I - F(s))^{-1}E(s) - V(s)Y(s)$$

$M(s)$  - matica požadovaných vlastností regulovaného systému  $S(s)$ .

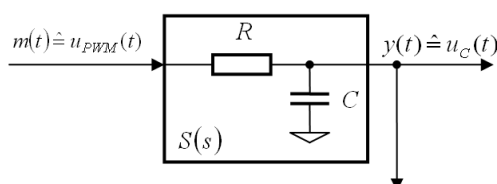
$F(s)$  - matica požadovaného správania sa regulovaného systému, ako celku.

$V(s)$  - matica spätných väzieb.

$$\text{SISO: } S_C(s): U(s) = \frac{F(s)}{1-F(s)} \frac{1}{M(s)} E(s) - V(s)Y(s)$$

3

Mikropočítačové riadenie sústavy 1. rádu.



$$R = 10 \text{ k}\Omega \text{ a } C = 50 \text{ }\mu\text{F} \quad S(s) = \frac{K}{1+sT} = \frac{1}{1+0.5s}$$

$$T = R \cdot C = 10 \text{ k}\Omega \cdot 50 \text{ }\mu\text{F} = 50 \cdot 10^{-2} \text{ [s]} = 0.5 \text{ [s]}$$

$$K = 1 \text{ [-]}$$

Cieľ: navrhnuť a realizovať PS regulátor, tak aby bolo zvlnenie menšie ako rozlíšenie A/D prevodníka.  
Použiť celočíselnú aritmetiku.

$$m(t) = m_0 + K_R \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$

$$PS_S : m(nT_v) = m_p(nT_v) + m_s(nT_v) + m_0$$

$$m_p(nT_v) = K_R e(nT_v)$$

$$m_s(nT_v) = m_s((n-1)T_v) + K_R \frac{T_v}{T_I} e((n-1)T_v)$$

$$e(nT_v) = w_z(nT_v) - y(nT_v)$$

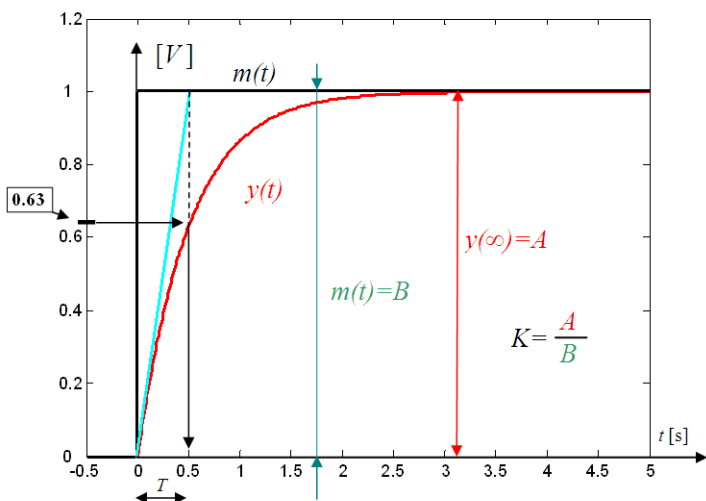
$m_0$  – posunutie akč. zásahu

$T_v$  – perióda vzorkovania

?? ? ? ? ? ?  
Koľko krát za sekundu zbehnú algoritmus  
PS regulátora na:  
UNO, MEGA, DUE?  
?? ? ? ? ? ?

4

Identifikácia parametrov regulovanej sústavy:



$m(t)$  – analógová veličina

$$S(s) = \frac{K}{1 + sT}$$

$$K = \frac{A}{B} = \frac{1[V]}{1[V]} = 1[-]$$

$$T \doteq 0.5[s]$$

5

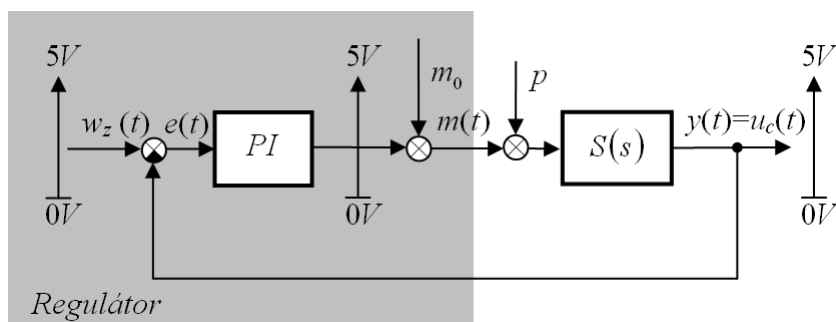
Výpočet spojitého PI regulátora:

Želaná dynamika systému:  $T_w = 0.5 [s]$ .

Metódou **ID** určíme:

- štruktúru:  $PI(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$ ;  $m(t) = m_0 + K_R(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau)$

- parametre regulátora:  $K_R = 1[-]$  a  $T_I = 0.5 [s]$



6

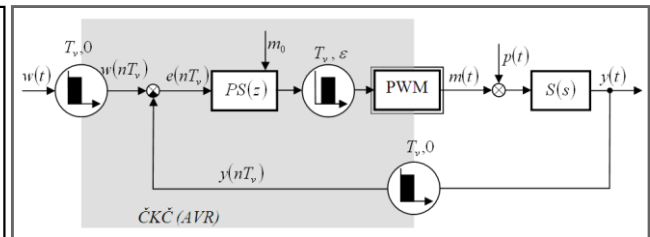
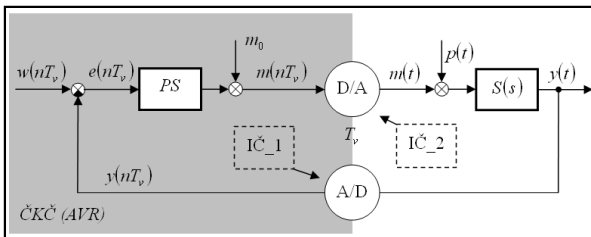
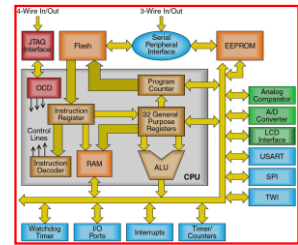
Prepočet spojitého PI regulátora na diskretný PS regulátor:

$$PS_S : m(nT_v) = m_p(nT_v) + m_s(nT_v) + m_0$$

$$e(nT_v) = w_z(nT_v) - y(nT_v); m_p(nT_v) = K_R e(nT_v)$$

$$m_s(nT_v) = m_s((n-1)T_v) + K_R \frac{T_v}{T_I} e((n-1)T_v)$$

Dvakrát  $T_v$



7

Výpočet periódy vzorkovania:

**Nemôžeme presnejšie regulovať ako meriame.**

Predpokladáme použitie 10 bitového prevodníka a  $U_{REF} = 5.000$  [V].

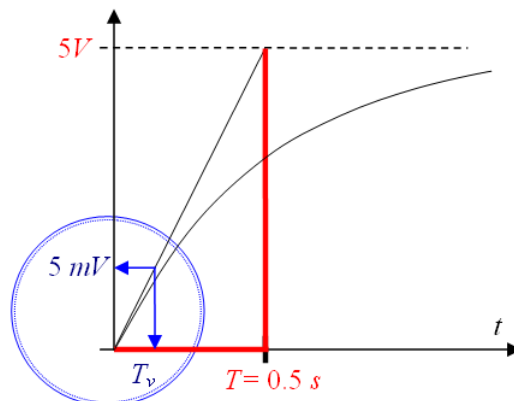
$$1 \text{ bit, LSB, odpovedá } \frac{5V}{1024} = 4.88 [mV] \doteq 5 [mV]$$

Určenie najmenej hodnoty periódy vzorkovania:

Stačí riešiť trojčlenku:

$$\frac{T_v}{T} = \frac{5 mV}{5 V}$$

$$T_v = 0.5 [s] * \frac{5 [mV]}{5 [V]} = 500 [\mu s]$$



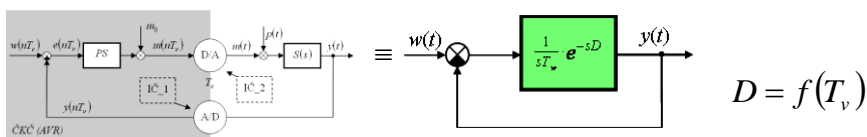
8

Výpočet periódy vzorkovania:

Môžeme použiť:

- Shannon - Kotelnikov teorém:  $T_v < \frac{\pi}{2} [s] \doteq 1.57 [s]$
- $\frac{1}{6} \div \frac{1}{10}$  najväčšej časovej konštanty:  $T_v \in \langle 83 [ms] \div 50 [ms] \rangle$
- Metóda bulharskej konštanty. Rule of thumb.
- Riešenie „malej“ charakteristickej rovnice ( $sT_w + e^{-sD} = 0$ )

dobře regulovaného číslicového regulačného obvodu pomocou MHR.



9

Výpočet periódy vzorkovania (d):

Predpokladajme:

- želaná dynamika riadenia  $T_w = T$ .
- relatívne posunutie akčného zásahu  $\varepsilon = 1$ .
- PS regulátor navrhne tak (prepočítame PI na PS), aby bola perióda vzorkovania

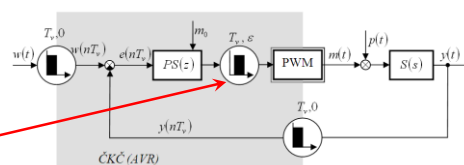
$$T_v^{(<) } = 0.22 T_w.$$

Potom:

- bude prechodný proces odpovedať **vlastnej sústave 2. rádu** s prerégulovaním menším ako 1%. Doba regulácie bude  $t_{reg} \doteq 2.84 T_w + \varepsilon_v T_v$  (+ vzorkovanie nemusí byť synchronné so vznikom skoku riadenia).

Pre  $T = 0.5 [s]$  je  $T_v \leq 0.22 T_w = 0.22 \cdot 0.5 = 0.11 [s]$

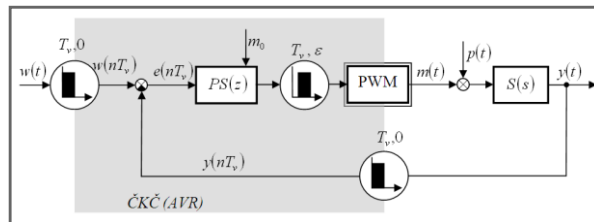
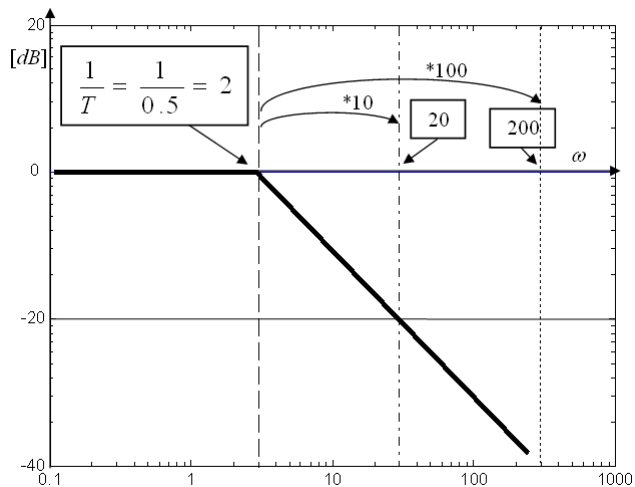
Ak bude relatívne posunutie akčného zásahu  $\varepsilon = 0$ , bude prechodný proces odpovedať sústave 1. rádu, a BUDE TRVAŤ DLHŠIE



10

PWM vo funkcii D/A prevodníka:

Určenie periódy opakovania PWM bloku pomocou ALF charakteristík.



Nech  $\omega_{op} = 200 \text{ [rad s}^{-1}\text{]}$   
potom  $T_{op} \approx 30 \text{ [ms]}$

Amplitúda 1. harmonickej  
signálu  $u_c(t)$  je  $31 \text{ [mV]}$  a  
3. harmonickej je  $3.5 \text{ [mV]}$ .

$31 \text{ [mV]} \gg \text{„LSB“}$

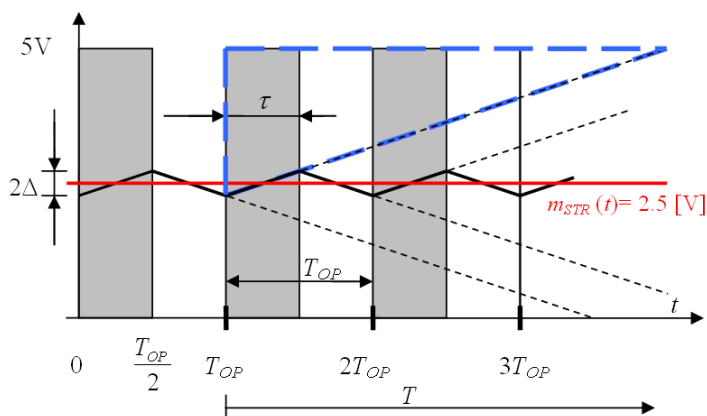
⇒

**NEVYHOVUJE**

11

PWM vo funkcii D/A prevodníka:

Určenie periódy opakovania PWM bloku pomocou maximálneho zvlnenia regulovanej veličiny:



Chceme zvlnenie menšie ako

$$LSB/2 = 2.5 \text{ [mV]}$$

Stačí riešiť trojčlenku.

Riešením „“

$$\frac{2,5 \text{ [V]} + \frac{LSB}{2}}{LSB} = \frac{T}{T_{OP}/2}$$

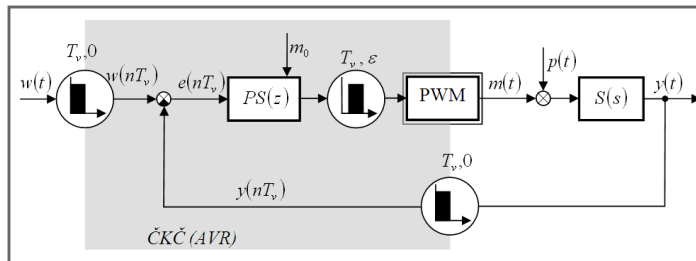
je  $T_{OP} \doteq 2 \text{ [ms]}$

12

## RC člen, regulácia napätia na kondenzátore.

Úlohy:

1. Identifikujte parametre regulovanej sústavy – RC člen. Rezistor  $10\text{ k}\Omega$  a kondenzátor  $47\text{ uF}$ . Doplníte, dokreslite do prechodovej charakteristiky teoretický priebeh (použite identifikované parametre  $K$  a  $T$ ).
2. Pre RC člen ( $10\text{ k}\Omega$  a  $47\text{ uF}$ ) Navrhnete P regulátor. Akčný zásah PWM signál. Navrhnete parametre PWM signálu (frekvenciu opakovania). Navrhnete P (zosilnenie 1, 2 a 3) regulátor a vypočítajte trvalú regulačnú odchýlku pre  $w_{\text{zel}} = \text{xxxV}$ . Výsledky porovnajete s nameranými. Ako sa mení dynamika uzatvoreného regulačného obvodu?
3. Pripojte záťaž RC regulovanej sústavy. Paralelne k C pripojte rezistor cca  $20 - 30\text{ k}\Omega$ . P zložka regulátora opäť 1, 2 a 3. Zistíte ako sa mení veľkosť trvalej regulačnej odchýlky a dynamika pri poruche.
4. Bonus. Doplníte program regulátora o I zložku a navrhnete parametre regulátora.
  - Použite celočíselnú aritmetiku. Vysvetlite prečo vznikne trvalá regulačná odchýlka aj pre PI regulátor.
  - Upravte I zložku regulátora, tak aby bola trvalá regulačná odchýlka nulová.



13

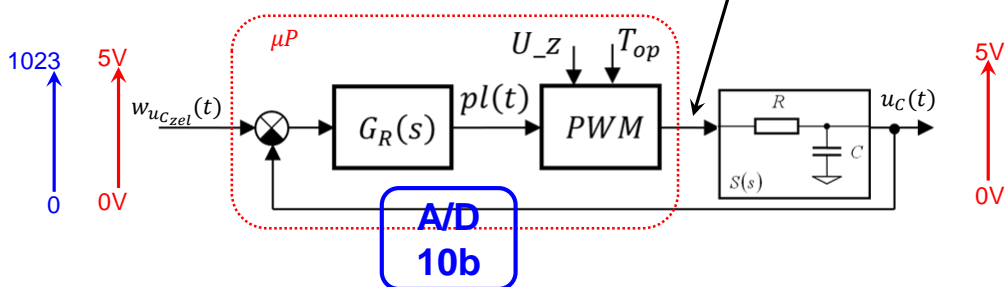
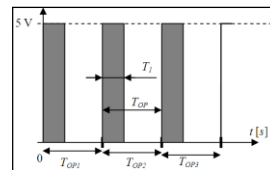
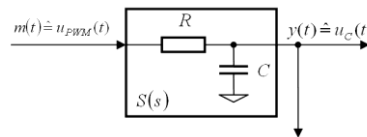
Opakovanie:

PWM signál - ( $pl, T_{op}$ ).

Akčný zásah  $m(t) = pl(t)$  realizujeme ako PWM signál.

Predstavte si, že ho realizujete pomocou baterky (5V) a prepínača/vypínača, relé, ...

Dokážete nakresliť schému zapojenia „generátora“ PWM signáli pomocou „spínačov“?



14

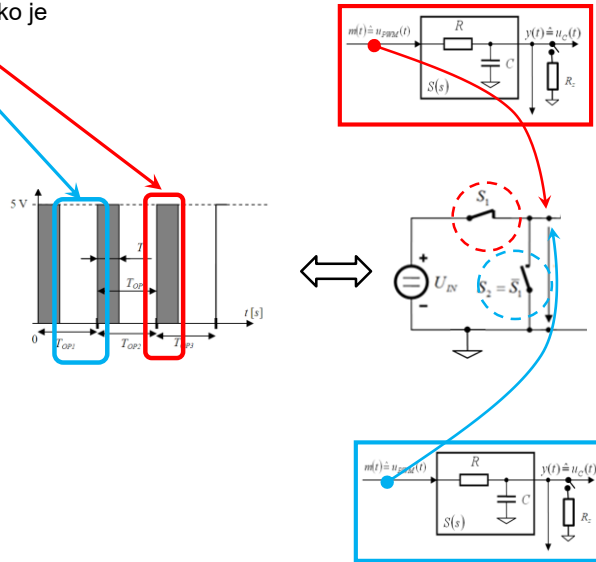
PWM signal je charakterizovaný pojmami ako  $(pl, T_{op})$

Prakticky nikto nerieši ako je

- realizovaná log. 1
- realizovaná log. 0

Prečo?

Je to dôležité?



15

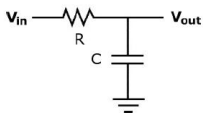


Fig. 2. RC circuit

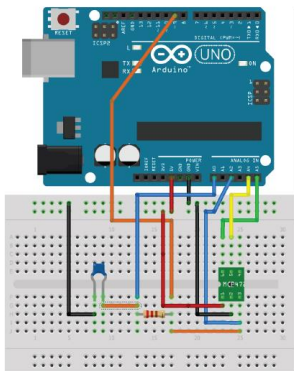


Fig. 3. RC circuit with Arduino and D/A converter in Fritzing

Preprints of the 16th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems High Tatras, Slovakia, October 29-31, 2019

### Arduino Support for Personalized Learning of Control Theory Basics \*

Pavol Bisták \*

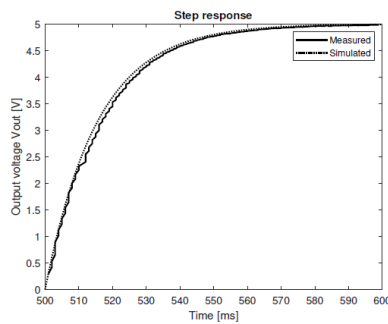


Fig. 8. Step responses of RC circuit

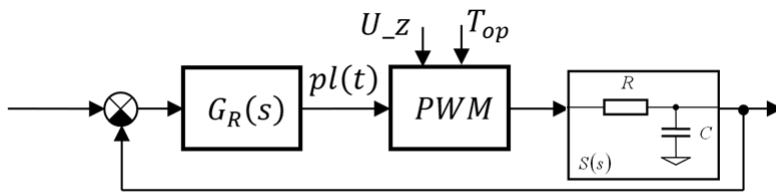
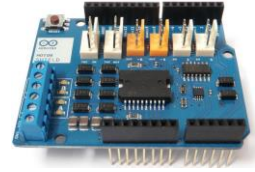
[http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Activities\\_RCcircuitA](http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Activities_RCcircuitA)

16



## ARDUINO: PWM

BOARD	PWM PINS	PWM FREQUENCY
Uno, Nano, Mini	3, 5, 6, 9, 10, 11	490 Hz (pins 5 and 6: 980 Hz)
Mega	2 - 13, 44 - 46	490 Hz (pins 4 and 13: 980 Hz)
Zero *	3 - 13, A0 (14), A1 (15)	732 Hz
Due **	2-13	1000 Hz



17

Prechodová charakteristika. Meranie parametrov K, T.  $S(s) = \frac{K}{1 + sT}$

A0

D5

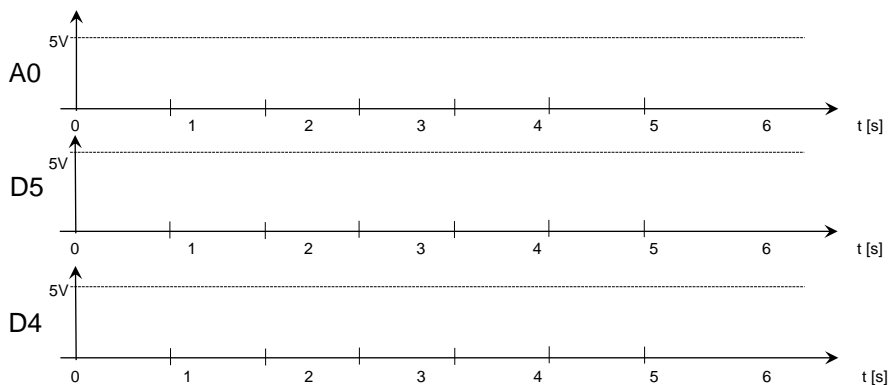
D4

GND

Teoretické hodnoty:

$$K = 1[-]$$

$$T = 10k\Omega * 470\mu F = 470 [ms]$$



18

Prechodová charakteristika. Meranie parametrov K, T.

$$S(s) = \frac{K}{1 + sT}$$

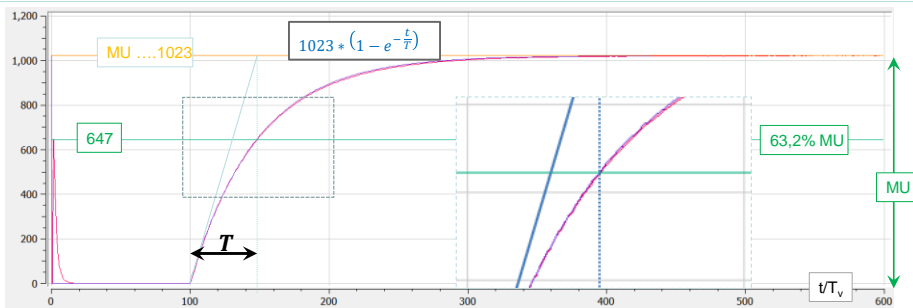
A0

$$K = \frac{5V}{5V} = \frac{1023}{1023} = 1[-]$$

D5

$$T = 48,5 * 10ms = 485[ms]$$

D4



19

Prechodová charakteristika. Meranie parametrov K, T.

$$S(s) = \frac{K}{1 + sT}$$

A0

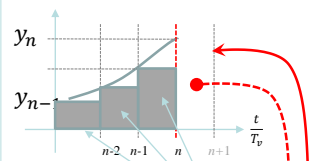
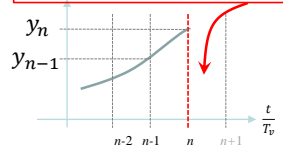
D5

D4

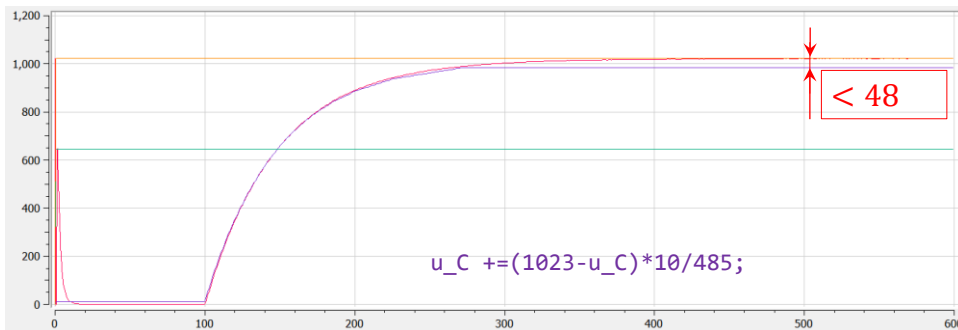
Existuje OP a tzv. Ruská škola,

kde platí:  $s \equiv \frac{d}{dt}$

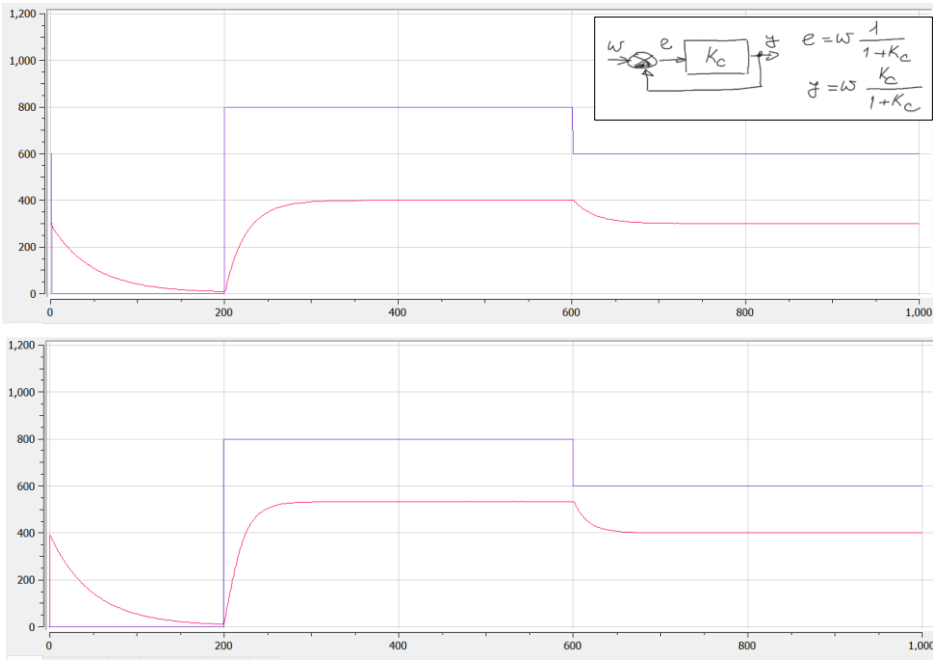
$$s y = \frac{dy(t)}{dt} \equiv \frac{y_n - y_{n-1}}{T_v}$$



$$\frac{1}{s} y = \int ( ) dt \equiv S_{sta} + (y_n * T_v)$$

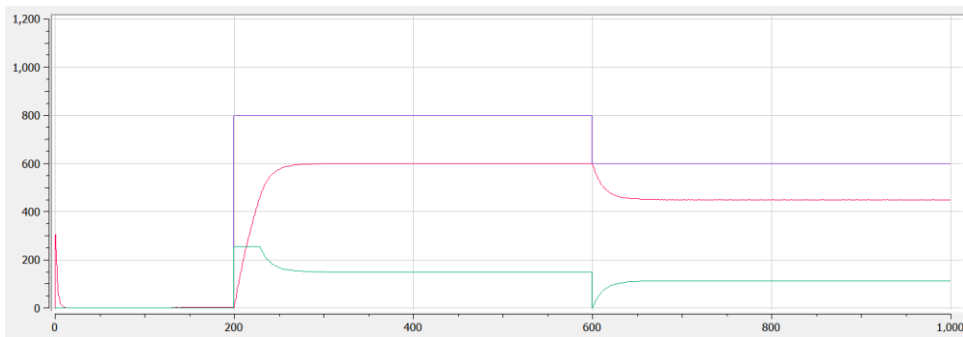
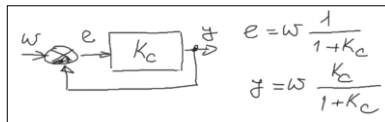


20



21

- A0
- D5
- D4
- GND



22

```
int main(void){
adc_init();

ini_TC2(); // Tv_zaklad = 2ms
ini_PWM(); // Ini PWM
/* Konfiguracia UART:Tr */
ini_USART0(MYUBRR); // 115200Bd

sei(); // Enable interrupts in general

sprintf(Riadok, "P reg. RC clen\r" ); //
zob_text_UART(Riadok);
// na zaciatku vybijem kondenzator
set_bit(DDRD, pinB); // output
clear_bit(PORTD, pinB); // LOW
while (1) {
...
}
}
```

```
void adc_init(void){
ADMUX = (0<<REFS1)|(1<<REFS0);
// AVCC - nastavenie zdroja ref. napatia

ADCSRA = (1<<ADEN) // "zapnutie" ADC
|(1<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
// nastavenie preddelica
// fADC = 125kHz
// trvanie jedneho prevodu cca 0,1ms
// zarovnanie doprava
ADMUX = (ADMUX & 0xF8); // nastavenie kanalu AD0
ADCSRA |= (1<<ADSC)|(1<<ADIF);
// spustenie prevodu, povolenie prerusenja od AD
}

ISR(ADC_vect){
// precitanie AD prevodu kanal 0;
y_C = ADC; // precitanie AD0
}
```

```
uint16_t adc_read(uint8_t a_pin){
a_pin &= 0x07;
ADMUX = (ADMUX & 0xF8)|a_pin;
ADCSRA |= (1<<ADSC); // spustenie prevodu
// pockam na dokoncenie prevodu
while(ADCSRA & (1<<ADSC));
return (ADC);
}
```

```
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{ // tato slucka sa vykona kazde 2,0ms
OCR2A = OCR2A_f_opak_TC2;
set_bit(ADCSRA, ADSC);
// spustenie dalsieho prevodu ADSC = TRUE
if (!poc_Tv){
flag_Tv = 1; // priznak vypoctu PI reg.
poc_time++;
poc_Tv = con_Tv;
}
else poc_Tv--;
}
```

```
void ini_TC2(void){
// Nastavenie TC2
// COM2A[1:0] COM2B[1:0] WGM2[1:0]
TCCR2A = 0b0000011; // OC2B PWM mod = 7
// WGM02 CS0[2:0]
TCCR2B = 0b0001101; // fosc/128
OCR2A = OCR2A_f_opak_TC2;
// nastavenie frekvencie opakovania na 2ms
TIMSK2 = (1<<TOIE2);
// Enable interrupts @ overflow TC2 MOD 7
}
```

23

```
void P_reg(void){
e_reg = w_zel - y_C;
if (e_reg < 0){e_reg = 0;}
u_reg = (e_reg*K_P)>>2;
if (u_reg>255)u_reg = 255;
OCR0B = u_reg ;
}
```

```
void Vypis(void){
sprintf(Riadok, "%d,%d,%d\r\n", y_C, w_zel, u_reg );
zob_text_UART(Riadok);
}
```

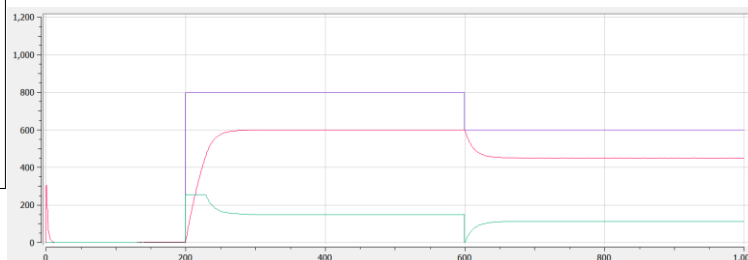
```
while (1) {
if (poc_time<1000){
if (poc_time<200) w_zel = 0; else w_zel=800;
if (poc_time>600)w_zel = 600;
if (poc_time == 100 ){ // 1. sekunda 100*10ms
clear_bit(DDRD, pinB); // input, "odstranim skrat"
}
if(flag_Tv){ flag_Tv = 0;
P_reg();
Vypis();
}
}
}
```

A0

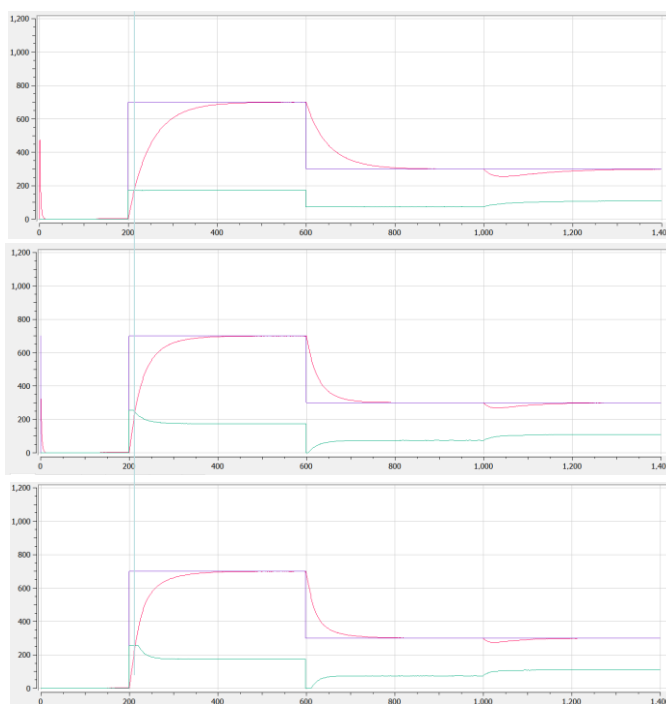
D5

D4

GND



24



Nesmieme zabudnúť na ARW.

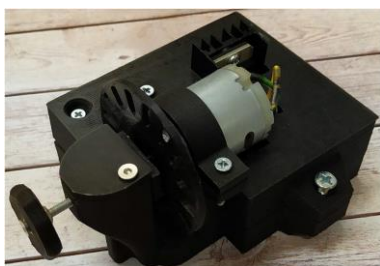
25

Regulácia otáčok je tiež sústava 1. rádu:

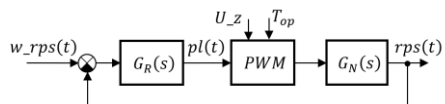
$$G_N(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sD}(rps)$$

Našiel som dve podobne riešené úlohy.

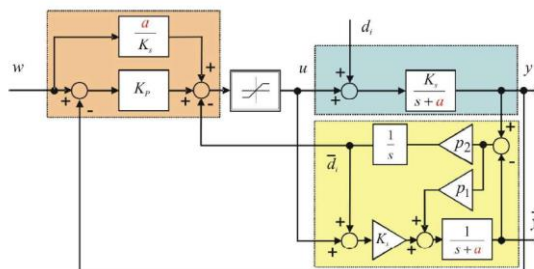
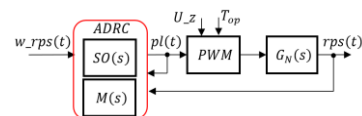
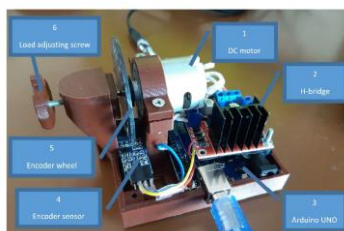
1. Riešenie – PI (PS) regulátor.



$$G_R(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \Leftrightarrow G_R(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$



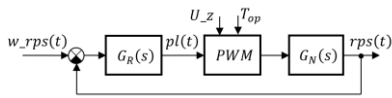
2. Riešenie – ADRC regulátor.



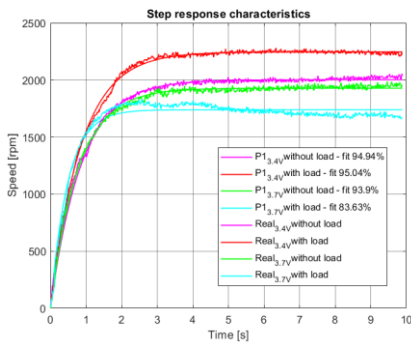
26

1. Riešenie – PI (PS) regulátor.

$$G_R(s) = K_P + \frac{K_I}{s}$$

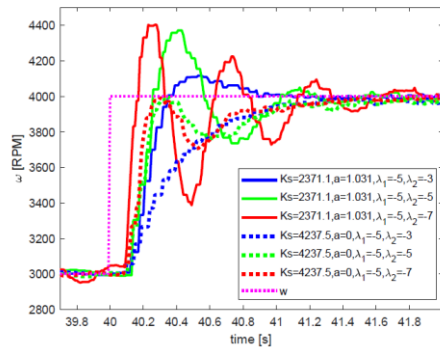
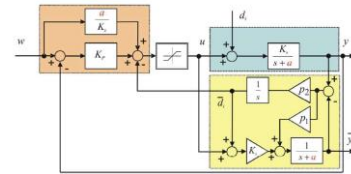


$$G_N(s) = \frac{1908}{0.87493s + 1} \doteq \frac{1900}{0.9s + 1}$$

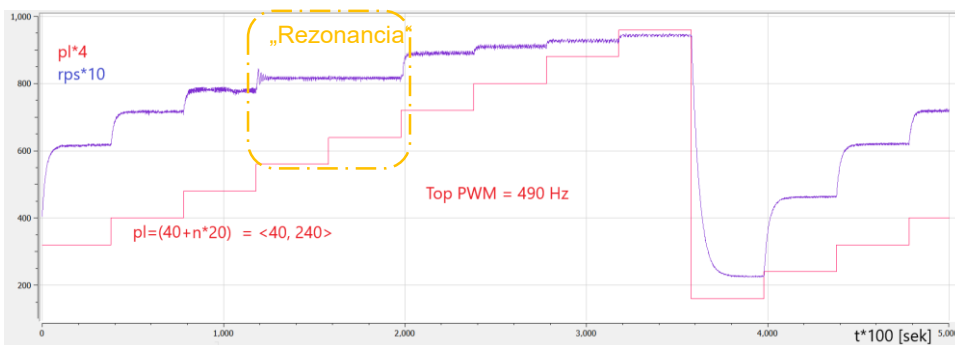
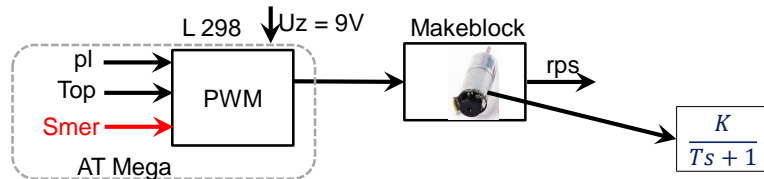


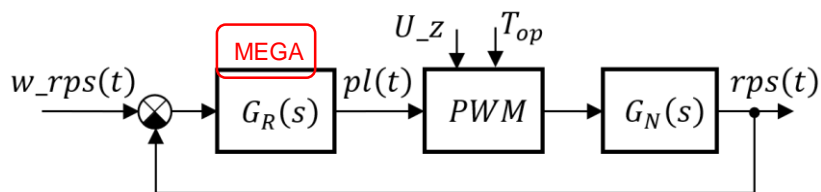
2. Riešenie – ADRC regulátor.

$$G_N(s) = \frac{2371.1}{s + 1.031} \doteq \frac{2300}{1.0s + 1}$$



Našiel som motor (niekoľko) s podobnými vlastnosťami.



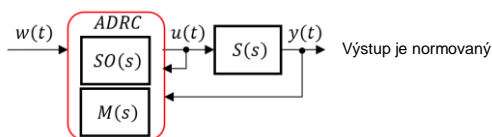


29

## ADRC (teória):

Požadovaná dynamika:

$$M(s) = f(\lambda s) = \frac{1}{\lambda s + 1}; \lambda = 0,2 \text{ sek}$$



Stabilný systém:

$$S(+) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0};$$

$$b_0 = 1,1;$$

$$a_1 = 0,15; a_0 = 1$$

Nestabilný systém:

$$S(-) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0};$$

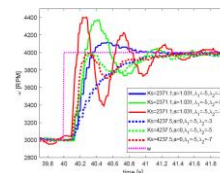
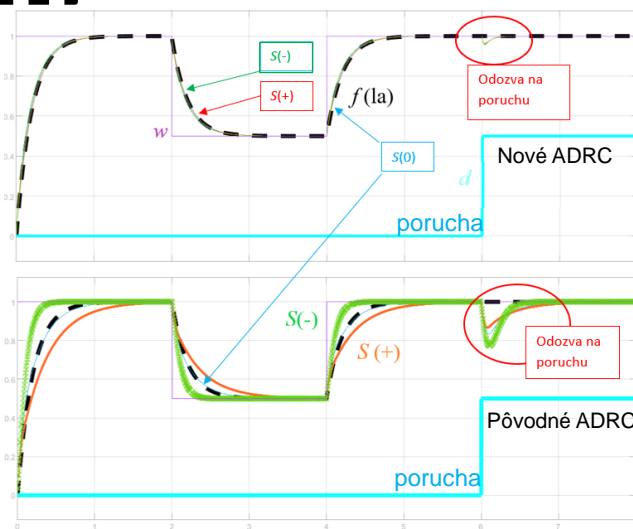
$$b_0 = 1,1;$$

$$a_1 = 0,15; a_0 = -1$$

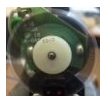
Integračný systém:

$$S(0) = \frac{b_0}{a_1 s} = \frac{1}{T_{1/0} s};$$

$$b_0 = 1,1; a_1 = 0,15$$



30



$$G_N(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sD}; D = 0.01 \text{ sek}$$

$$M(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}; \lambda = 0.1 \text{ sek}$$

