

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz

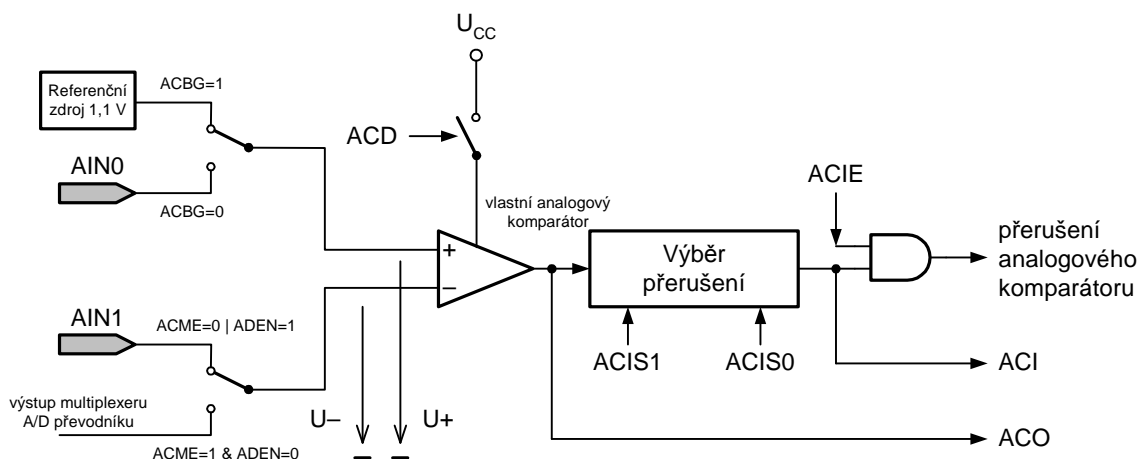


15 Analogový komparátor a jeho použití

Zabudovaný analogový komparátor umožňuje porovnávat hodnoty dvou vstupních napětí. Lze jej použít například pro realizaci regulačních úloh nebo měření fyzikálních veličin.

15.1 Popis analogového komparátoru

Schéma zapojení analogového komparátoru je uvedeno na obr. 15.1. Komparátor porovnává napětí vývodů neinvertujícího vstupu (+) a invertujícího vstupu (-).



Obr. 15.1 Schéma zapojení analogového komparátoru

Je-li $U_+ \leq U_-$, je výstup komparátoru v log. 0. Je-li $U_+ > U_-$, je výstup komparátoru v log. 1. Výstup komparátoru je představován bitem **ACO** z registru **ACSR**.

Neinvertující vstup je označen jako **AIN0** a odpovídá vývodu PB2, invertující vstup je označen jako **AIN1** a odpovídá vývodu PB3, viz obr. 1.1.

Výstup komparátoru lze, kromě čtení jeho log. hodnoty pomocí bitu **ACO**, použít pro generování zvláštního přerušení. Tento výstup lze také použít k záchytu stavu čítače/časovače 1 v jeho záchytném registru. Spouštěcí událost odpovídá náběžné nebo sestupné hraně výstupu komparátoru, spouštění je možné i při změně log. hodnoty výstupu komparátoru.

Registr ADCSRB

Funkci komparátoru ovlivňuje bit **ACME** z registru **ADCSRB**.

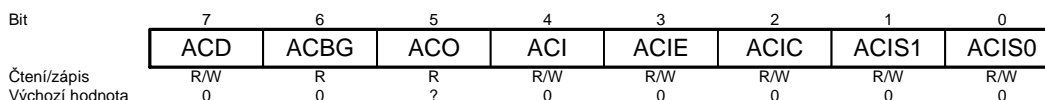
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Čtení/zápis	–	ACME	–	–	–	ADTS2	ADTS1	ADTS0
Výchozí hodnota	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 15.2 Registr **ADCSRB**

- **ACME – povolení multiplexeru pro analogový komparátor.** Je-li **ACME = 1** a současně je vypnut A/D převodník (bit **ADEN** z registru **ADCSRA** je vynulován), je na invertující vstup komparátoru napojen výstup multiplexeru A/D převodníku. Je-li **ACME = 0** je invertující vstup komparátoru připojen na vývod **AIN1**. Viz kapitolu 16.

Registr ACSR

Analogový komparátor je řízen registrem **ACSR**. Tento registr obsahuje jak řídicí bity, tak i stavové příznaky analogového komparátoru.



Obr. 15.3 Registr ACSR

- **ACD – odstavení analogového komparátoru.** Je-li **ACD = 1**, je odpojeno napájení pro analogový komparátor (viz obr. 15.1). To výrazně sníží spotřebu mikrokontroléru především v režimech spánku. Je-li **ACD = 0**, je napájení analogového komparátoru připojeno. Pokud má dojít ke změně stavu bitu **ACD**, je vhodné vynulovat bit **ACIE**. Jinak může dojít ke vzniku nežádoucího (falešného) přerušení.
- **ACBG – připojení zdroje referenčního napětí.** Pro **ACBG = 1**, je na neinvertující vstup analogového komparátoru připojen zabudovaný zdroj referenčního napětí. Pro **ACBG = 0**, je neinvertující vstup analogového komparátoru napojen na vývod **AIN0**.
- **ACO – výstup analogového komparátoru.** Tento bit je synchronizován a přímo napojen na výstup analogového komparátoru (viz obr. 15.1). Synchronizace způsobuje zpoždění 1 až 2 hodinové cykly.
- **ACI – příznak přerušení analogového komparátoru.** **ACI** je nastaven, když výstup analogového komparátoru způsobí spouštěcí událost definovanou bity **ACIS1**, **ACIS0** (viz tab. 15.2). Je-li **ACIE = 1** a současně **I = 1**, je povoleno přerušení od analogového komparátoru. Příznak **ACI** se hardwarově vynuluje vykonáním příslušné rutiny obsluhy přerušení. Příznak **ACI** lze nulovat i programově zápisem **1** do **ACI**.
- **ACIE – povolení přerušení analogového komparátoru.** Tento bit povoluje (**ACIE = 1**) nebo zakazuje (**ACIE = 0**) přerušení analogového komparátoru.
- **ACIC – povolení záchyty analogovým komparátorem.** Je-li **ACIC = 1**, je spouštěcí vstup záchytného registru čítače/časovače 1 připojen na výstup analogového komparátoru (viz obr. 15.5). Je-li **ACIC = 0**, spouštěcí vstup záchytného registru čítače/časovače 1 napojen na vnější vývod **ICP**. Z obr. 15.5 je zřejmé, že signál z výstupu komparátoru (**ACO**) prochází přes potlačovač šumu podobně, jako signál z vnějšího vývodu **ICP**. Pro generaci přerušení, které se má aktivovat záchytem pomocí analogového komparátoru, je nutno nastavit bit **ICIE1** v registru **TIMSK1**.
- **ACIS1, ACIS0 – výběr přerušení analogového komparátoru.** Tyto bity určují, která událost analogového komparátoru spouští jeho přerušení (viz tab. 15.2). Pokud má dojít ke změně bitů **ACIS1**, **ACIS0**, je vhodné vynulovat bit **ACIE**. Jinak může dojít ke vzniku nežádoucího (falešného) přerušení.

Tab 15.1 Význam bitů ACME, ADEN, MUX2 až MUX0

ACME	ADEN	MUX2	MUX1	MUX0	Invertující vstup analogového komparátoru
0	X	X	X	X	AIN1
1	1	X	X	X	AIN1
1	0	0	0	0	ADC0
1	0	0	0	1	ADC1
1	0	0	1	0	ADC2
1	0	0	1	1	ADC3
1	0	1	0	0	ADC4
1	0	1	0	1	ADC5
1	0	1	1	0	ADC6
1	0	1	1	1	ADC7

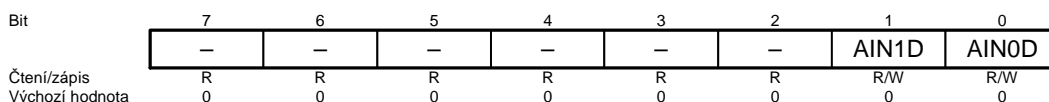
15. ANALOGOVÝ KOMPARÁTOR A JEHO POUŽITÍ

Tab 15.2 Význam bitů ACIS1, ACIS0

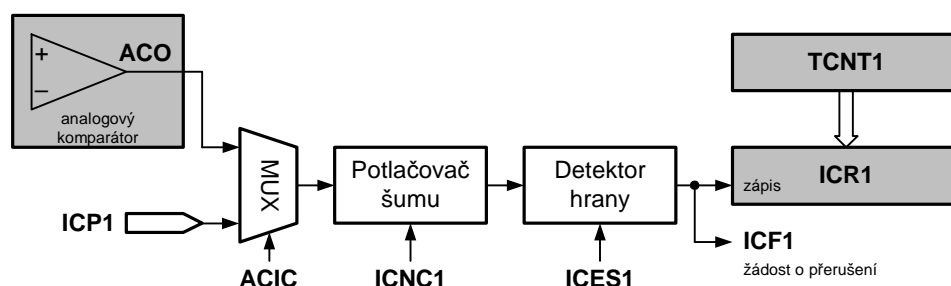
ACIS1	ACIS0	Režim přerušení
0	0	přerušení při změně stavu výstupu ACO (toggle)
0	1	vyhrazeno
1	0	přerušení při sestupné hraně výstupu ACO
1	1	přerušení při náběžné hraně výstupu ACO

Registr DIDR1:

- **AIN1D až AIN0D (odstavení digitálních vstupů)** – nastavením příslušného bitu odstavíme digitální vstupní buffer odpovídajícího vývodu analogového komparátoru. Tím se sníží spotřeba digitálního bufferu, protože tento nereaguje na pomalu se měnící na analogový signál.



Obr. 15.4 Registr DIDR1



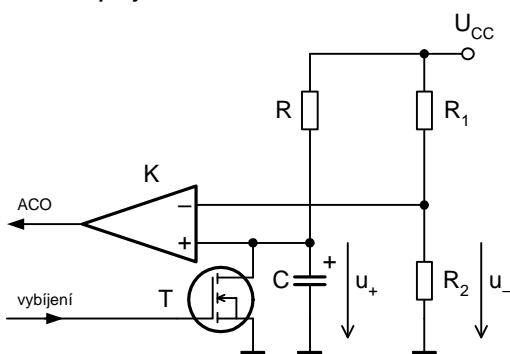
Obr. 15.5 Zapojení spouštěcího vstupu záchytného registru čítače/časovače 1

15.2 Praktické použití analogového komparátoru

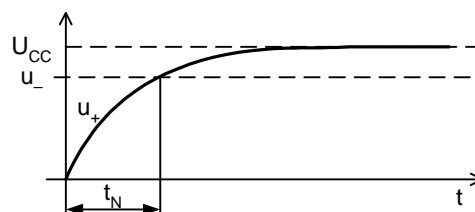
Analogový komparátor lze použít pro realizaci měření řady elektrických veličin (nebo obecně fyzikálních veličin, které se na elektrickou veličinu převedou).

Měření odporu nebo kapacity mezipřevodem na časový interval

Měření kapacity nebo odporu mezipřevodem na časový interval [6] je možné pomocí zapojení dle obr. 15.6.



Obr. 15.6 Ideové schéma zapojení pro měření kapacity nebo odporu komparátorem



Obr. 15.7 Časové průběhy napětí v obvodu

Pomocí signálu **vybíjení** nejdříve sepneme tranzistor **T**, který vybije kondenzátor **C** (ideálně bude mít nulové napětí). Následně vybíjení ukončíme a necháme kondenzátor **C** nabíjet přes rezistor **R**. Napětí kondenzátoru (což je zároveň

napětí neinvertujícího vstupu komparátoru) lze vyjádřit (viz obr. 15.7):

$$u_+(t) = U_{CC} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (15-1)$$

Program sleduje výstup komparátoru **ACO**. Na začátku nabíjení je tento signál v log. 0, neboť platí $u_+ < u_-$ (napětí z odporového děliče R_1, R_2 bude určitě vyšší než 0 V).

Jelikož se napětí kondenzátoru **C** stále zvyšuje, nastane po uplynutí doby t_N stav, kdy platí $u_+ > u_-$. Tehdy bude výstup komparátoru **ACO** v log. 1.

Změříme-li dobu trvání log. 0 na výstupu komparátoru od začátku nabíjení, určíme dobu nabíjení t_N . Tento časový interval je přímoúměrný součinu kapacity kondenzátoru C a odporu rezistoru R. Tento součin se označuje jako tzv. **časová konstanta**: $\tau = RC$.

Dosazením a úpravou vztahu (15-1) získáme vztah pro určení času, pro který dosáhne napětí kondenzátoru stejné hodnoty, jakou má dělič:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{CC} = U_{CC} \left(1 - e^{-\frac{t_N}{\tau}} \right) \Rightarrow e^{-\frac{t_N}{\tau}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Zlogaritmováním a drobnou úpravou vyjádříme:

$$t_N = \tau \cdot \ln \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad (15-2)$$

Ze vztahu (15-2) je tedy patrné, že doba nabíjení t_N je přímoúměrná časové konstantě τ a navíc ji ovlivňuje poměr odporů rezistorů R_1, R_2 .

Obvod dle obr. 15.6 tedy umožňuje měřit kapacitu nebo odpor. Pokud chceme měřit odpor, použijeme kondenzátor známé kapacity. Při měření kapacity použijeme rezistor známé hodnoty odporu.

Měření napětí mezipřevodem na časový interval

Při měření napětí mezipřevodem na časový interval lze vyjít ze vztahu (15-1). Je zřejmá závislost mezi napětím a časem nabíjení. Problém lze však spatřit ve skutečnosti, že tato závislost není lineární.

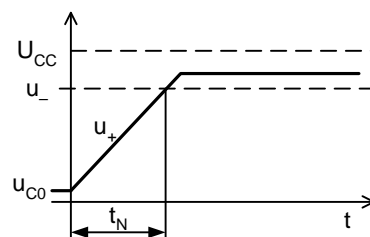
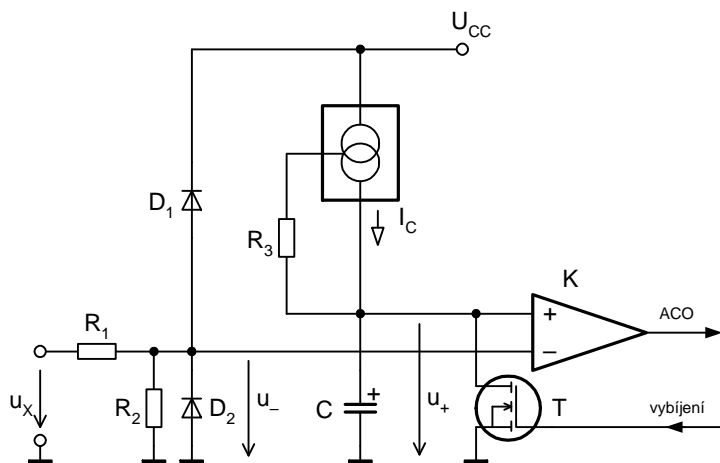
Možností, jak tento problém vyřešit, je nabíjet kondenzátor nikoli před rezistor, ale ze zdroje proudu. Vyjdeme-li ze základního vztahu mezi napětím a proudem kondenzátoru a dosadíme-li za proud konstantu (lze vytknout před integrál), dostaneme:

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\tau) \cdot d\tau \quad \text{tedy:} \quad u_C(t) = u_C(0) + I_C \frac{1}{C} \int_0^t d\tau$$

nakonec:

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{I_C}{C} \cdot t \quad (15-3)$$

Drobnou úpravou obvodu dle obr. 15.6 dostaneme výsledné zapojení dle obr. 15.8.



Obr. 15.8 Ideové schéma zapojení pro měření napětí komparátorem Obr. 15.9 Časové průběhy napětí v obvodu

V zapojení dle obr. 15.8 je kondenzátor nabíjen ze zdroje konstantního proudu realizovaného integrovaným zdrojem proudu **LM334** (I_C) a rezistorem R_3 (nastavuje velikost proudu) a tak napětí kondenzátoru C narůstá s časem lineárně.

Diody D_1 a D_2 chrání invertující vstup komparátoru před záporným nebo zvýšeným kladným vstupním napětím, R_1 a R_2 slouží jako odporový dělič pro nastavení měřicího rozsahu převodníku (dále omezují vstupní napětí pod hodnotu U_{CC} , protože zdroj proudu LM334 potřebuje určitou minimální napěťovou rezervu).

Pomocí signálu **vybíjení** sepneme tranzistor **T**, který vybije kondenzátor **C** (ideálně bude mít nulové napětí).

Následně vybíjení ukončíme a necháme kondenzátor **C** nabíjet přes zdroj proudu I_C . Napětí kondenzátoru (což je zároveň napětí neinvertujícího vstupu komparátoru) bude narůstat s časem lineárně (viz obr. 15.9).

Sledujeme výstup **ACO**. Na začátku nabíjení je tento signál v log. 0, neboť platí $u_+ < u_-$ (pokud bude měřené napětí nenulové).

Jelikož se napětí kondenzátoru **C** stále zvyšuje, nastane po uplynutí doby t_N stav, kdy platí $u_+ > u_-$. Tehdy bude výstup komparátoru **ACO** v log. 1.

Změříme-li dobu trvání log. 0 na výstupu komparátoru od začátku nabíjení, určíme dobu nabíjení t_N .

Dosazením a úpravou vztahu (15-3) získáme vztah pro určení času, pro který dosáhne napětí kondenzátoru stejné hodnoty, jakou má dělič:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_x = \frac{I_C}{C} \cdot t_N \Rightarrow t_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_x \cdot \frac{C}{I_C} \quad (15-4)$$

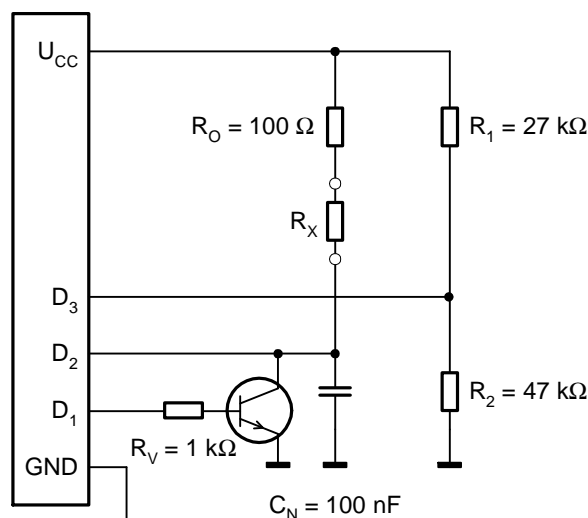
Ze vztahu (15-4) je tedy patrné, že doba nabíjení t_N je přímoúměrná vstupnímu napětí u_x . Doba nabíjení navíc ovlivňuje poměr odporů rezistorů R_1 , R_2 , kapacita kondenzátoru **C** a nepřímoúměrně závisí na velikosti nabíjecího proudu I_C .

15.3 Přípravek MACRX – měření odporu převodem na časový interval

Přípravek **MACRX** umožňuje měření odporu převodem na časový interval, je určen pro připojení na port B.

Odporový dělič $R_1 : R_2$ přivádí referenční napětí na vstup PB3 (AIN1) tedy na invertující vstup analogového komparátoru. Měřený rezistor R_X nabíjí kondenzátor

známé hodnoty C_N (R_O je ochranný rezistor), napětí kondenzátoru je přivedeno na vstup PB2 (AIN0) tedy na neinvertující vstup analogového komparátoru. Tranzistor slouží pro vybití kondenzátoru a je řízen bitem PB1.



Obr. 15.10 Schéma zapojení přípravku **MACRX**

Podklady pro výrobu přípravku **MACRX** nalezneme v příloze v kapitole A.12.

15.4 PROG_20 – použití záchytného registru a analog. komparátoru

Přípravek **MACRX** lze použít pro demonstraci použití analogového komparátoru i záchytného registru čítače/časovače 1.

Zadání PROG_20:

Vytvořte program, který měří elektrický odpor pomocí komparátoru a jednotky Input Capture 1.

Přípravek **MACRX** připojte na port **B**. Přípravek **MLCD** připojte na port **D**.

Po vytvoření projektu do něj vložíme dříve vytvořené soubory **MLCDFN.H** a **MLCDFN.C** z příkladu **PROG_06**. V konfiguračním dialogu projektu nastavíme kmitočet 20 MHz.

Pro přehlednější zápis zavedeme makra: **VYBIJENI** (odpovídá sepnutí vybíjecího tranzistoru připojeného na bit 1) a **NABIJENI** (odpovídá rozpojení vybíjecího tranzistoru).

Dále zavedeme konstanty pro konfiguraci čítače/časovače 1. Pro měření uvažujeme odpory cca do 200 kΩ, výpočtem lze odvodit, že je třeba zvolit děličku 1/8 (pro vyšší rychlost čítání dochází v průběhu měření k přetečení): **F0_P** (předdělička 1/8), **T1_START** (volba předděličky a záchyt na náběžnou hranu; komparátor se po nabití kondenzátoru na stejnou hodnotu, jakou má výstup odporového děliče, přeplojí z log. 0 do log. 1), **T1_STOP** (zastavení čítače).

Údaj zachycený v registru ICR1 odpovídá počtu načítaných impulzů. Kmitočet impulzů je dán hodinovým kmitočtem mikrokontroléru a zvolenou děličkou. Tedy odpovídající časový interval lze určit jako:

$$t = \text{pocet_impulzu} \cdot T_0 \cdot P \quad (15-5)$$

Kde t je časový interval, T_0 je perioda hodinového signálu mikrokontroléru (50 ns) a P je zvolená předdělička (64).

15. ANALOGOVÝ KOMPARÁTOR A JEHO POUŽITÍ

Ze vztahu (15-2) lze určit hodnotu τ a posléze i odpor měřeného rezistoru:

$$\tau = \frac{t}{\ln\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right)} \Rightarrow R_x = \frac{t}{\ln\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right)} \cdot C_N - R_0 \quad (15-6)$$

Odpory rezistorů R_1 a R_2 byly voleny tak, aby byl vztah co nejjednodušší. Po částečném dosazení dostaneme:

$$R_x = \frac{\text{pocet_impulzu} \cdot T_0 \cdot P}{\ln\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \cdot C_N} - R_0 \doteq \frac{\text{pocet_impulzu} \cdot T_0 \cdot P}{1,008 \cdot C_N} \quad (15-7)$$

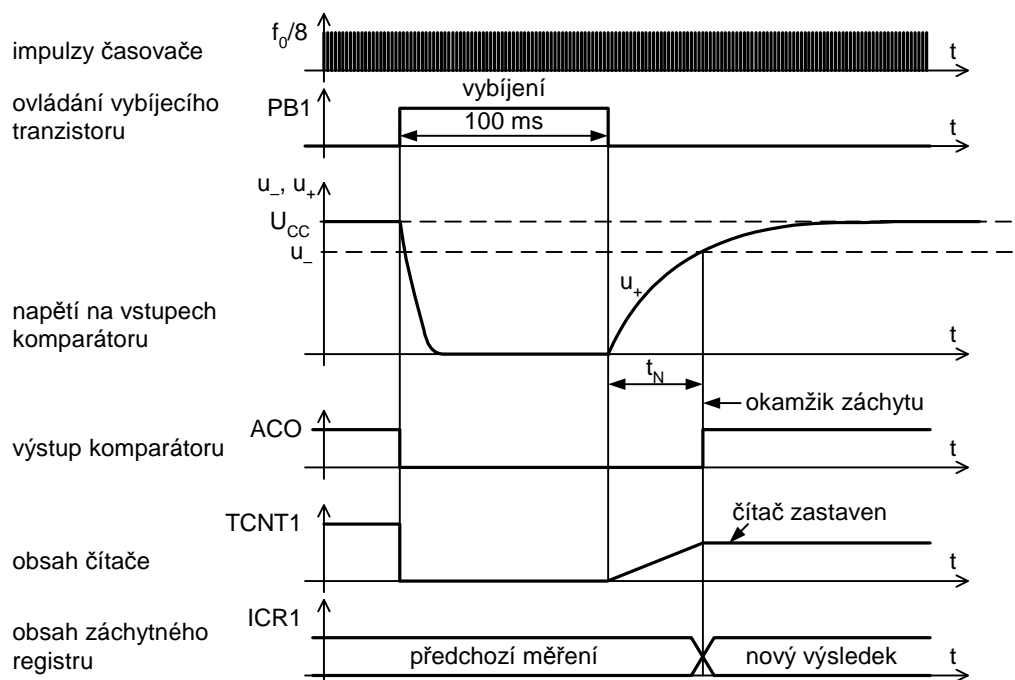
Po zavedení přepočecí konstanty K , lze vztah zapsat v jednodušší formě:

$$K = \frac{T_0 \cdot P}{1,008 \cdot C_N}, \quad R_x = K \cdot \text{pocet_impulzu} \quad (15-8)$$

Konstantu K definujeme v programu rovněž, pouze bylo zjištěno, že na použitém přípravku byla kapacita kondenzátor poněkud vyšší, zhruba 120 nF.

Inicializace spočívá v inicializaci přípravku **MLCD**, povolení výstupní funkce vývodu **PB1** (tento bit ovládá vybíjecí tranzistor), odstavení digitální funkce analogových vstupů **AIN0** a **AIN1** (pro snížení spotřeby) a povolení záchyty stavu čítače/časovače 1 přes výstup analogového komparátoru.

Průběh měření je pro lepší představu popsán i formou obr. 15.11.



Obr. 15.11 Časové průběhy signálů při měření

Nejdříve je vynulován čítač (čítač je pochopitelně v této chvíli zastaven). Následuje vybíjení kondenzátoru (sepnutím vybíjecího tranzistoru), na vybíjení je počítán čas 100 ms.

Poté se vybíjecí tranzistor rozpojí, takže se kondenzátor začne nabíjet. Vynulujeme příznaky záchyty a přetečení čítače/časovače (je to rozumné provést až

po vybíjecí fázi, neboť výstup komparátoru může vytvářet zákmity, které spustí falešný záchyt) a spustíme čítání.

Programová smyčka nyní čeká na záchyt nebo přetečení čítače/časovače 1. Sleduje tedy příznaky **ICF1** a **TOV1**. Pokud se jeden z nich nastaví, je měření ukončeno. Čítač je zastaven.

Nastavení příznaku **TOV1** znamená přetečení (měřený rezistor měl příliš velkou hodnotu odporu, nabíjení trvalo dlouho a čítač přetekl). Nastavení příznaku **ICF1** znamená úspěšný záchyt hodnoty při překlopení výstupu komparátoru do log. 1.

V případě, že čítač během měření nepřetekl, zobrazí se naměřená hodnota po přepočtu konstantou K. Výsledek se ještě vydělí tisícem pro převod na kilo Ohmy. Vyhýbáme se zbytečnému výpisu naměřené hodnoty v plovoucí řádové čárce.

Sekvence `\xf4` slouží pro zobrazení symbolu Ω , který je k dispozici v tabulce znaků LCD displeje (viz tab. 5.2).

PROG_20.C:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdio.h>

#include "MLCdfn.h"

//makra pro vybijeni a nabijeni kondenzatoru:
#define VYBIJENI PORTB=PORTB|(1<<PORTB1)
#define NABIJENI PORTB=PORTB&(~(1<<PORTB1))

//konstanty pro konfiguraci citace/casovace 1:
#define F0_P      0b010 //volba preddelicky
#define T1_START  F0_P|(1<<ICES1)
#define T1_STOP   0

//konstanta pro prepocet namereneho poctu cyklu na odpor:
#define K (8*50e-9/(120e-9*1.008))

int main(void)
{
    unsigned c; //pro ulozeni poctu nacistanych cyklu

    iniMLCD(); //inicializace LCD

    DDRB=(1<<1); //PB1 je vystup
    DIDR1=(1<<AIN1D)|(1<<AIN0D); //vypnuti dig. fce anal. vstupu

    ACSR=(1<<ACIC); //povoleni zachytu pres analogovy komparator

    while(1)
    {
        TCNT1=0; //nulovani citace

        VYBIJENI; //start vybijeni
        _delay_ms(100); //prodleva
        NABIJENI; //zacatek nabijeni
```

15. ANALOGOVÝ KOMPARÁTOR A JEHO POUŽITÍ

```
TIFR1=(1<<TOV1)|(1<<ICF1); //nul. priz. pretečení a zachytu
TCCR1B=T1_START; //preddelicka, zachyt pri nabezne hrane

//ceka na zachyt nebo pretečení:
while(!((TIFR1&(1<<ICF1))|| (TIFR1&(1<<TOV1))));

TCCR1B=T1_STOP; //zastaveni

c=ICR1; //cteni postu hodinovych cyklu

prikazMLCD(LCD_HOME); //presun kurzoru

if(TIFR1&(1<<TOV1)) //test pretečení
    printf_P(PSTR("preteklo"));
else
    //uspesne mereni:
    printf_P(PSTR("R=%03u k\xef4"),(unsigned)(c*K/1000));
}
}
```