

# Obsah Předmětu

1. Rozdělení senzorů, Rozhraní senzorů, Architektury řídicích systémů
2. Rozlišení, přesnost, chyby, Šum, Stabilita, Filtrování, Rychlost, Vzorkování, Linearizace
3. Regulační smyčka (otevřená, uzavřená), Typy systémů, Příklady
4. P,I,D regulátory, Softwarová implementace, Stabilita řízení, Problematika dopravního zpoždění, Vzdálené řízení
5. Číslicová filtrace signálu, Redukce šumu, Algoritmy filtrace
6. Fyzické senzory. Dvoustavové, Analogové, Časové.
7. Periferie v mikrokontrolérech pro připojení senzorů
8. Senzory a protokoly s lokální sběrnici (I2C/SPI/UART/1wire)
9. Připojení průmyslových senzorů, Průmyslové sběrnice (RS485,CAN, Ethernet, ..) a protokoly
10. Bezdrátové senzory, sensorové sítě. Napájení senzorů, spotřeba.
11. Uživatelský interface - Dotykové senzory, displeje, kamery, klávesnice
12. Relé, motory, Serva
13. Spojení informací ze senzorů, Bezpečnost senzorů

## Literatura

Základní: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Steven W. Smith, Second Edition, California Technical Publishing , 1999, ISBN 0-9660176-7-6, ISBN 0-9660176-4-1, ISBN 0-9660176-6-8.

Základní: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, Jacob Fraden, Fifth Edition, Springer 2015, ISBN 3319193031, 9783319193038

Doporučená: [Ambardar, Ashok. \*Digital signal processing : a modern introduction\*. Toronto : Thomson, 2007. ISBN 0-534-40509-6.](#)

Doporučená: [Jan, Jiří. \*Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů. 2., upr. a rozš. vyd. V Brně : VUTIUM, 2002. ISBN 80-214-1558-4.\*](#)

Doporučená: [Davídek, Vratislav; Sovka, Pavel. \*Číslicové zpracování signálů a implementace. 1. vyd. Praha : ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01530-0.\*](#)

Doporučená: Sanjit K. Mitra. *Digital Signal Processing. A Computer-Based Approach*. McGraw-Hill, 2002. ISBN 978-0071226073.

Doporučená: [Orfanidis, Sophocles J. \*Introduction to signal processing\*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1996. ISBN 0-13-209172-0.](#)

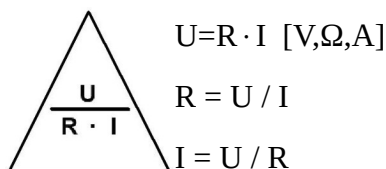
# 0. Elektronika

## Napětí, Proud. Ohmův zákon

Napětí a proud jsou základní fyzikální veličiny a běžně se značí písmeny U a I a jejich jednotky jsou V (volt) a A (ampér).

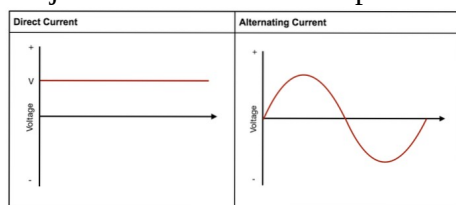
Obě jsou na sobě závislé. Proud nemůže existovat bez napětí. (analogie voda: napětí-rozdíl hladin, proud-průtok vody). K vyjádření vztahu mezi napětím a proudem používáme spojení elektrický odpor, značíme jej písmenem R a jeho fyzikální jednotka je  $\Omega$

Vztah mezi proudem, napětím a elektrickým odporem lze zapsat následujícím způsobem:


$$U = R \cdot I \quad [V, \Omega, A]$$
$$R = U / I$$
$$I = U / R$$

Výkon lze zapsat jako  $P = U \cdot I$  [W], Práce pak  $W = U \cdot I \cdot t$  [J, Ws]

Stejnoseměrné – střídavé napětí.



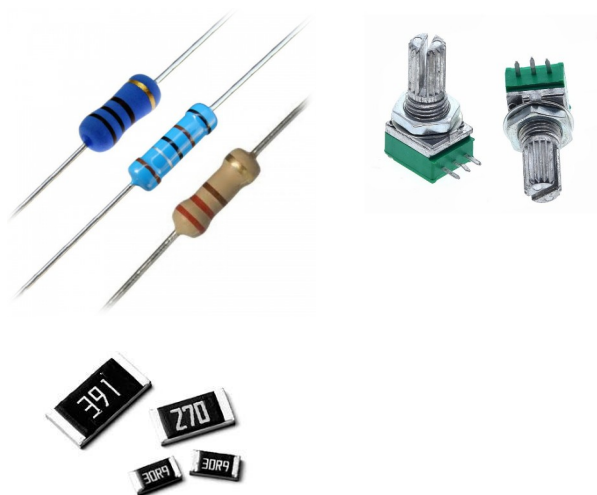
## Elektronické součástky

### Rezistor (Odpor)

Rezistor je pasivní (dvouvývodová) elektrotechnická součástka projevující se v elektrickém obvodu v ideálním případě jedinou vlastností – elektrickým odporem (jednotka Ohm, značka  $\Omega$ ). Důvodem pro zařazení rezistoru do obvodu je obvykle snížení velikosti elektrického proudu nebo získání určitého úbytku napětí. Pokud rezistorem prochází vyšší proudy pak je třeba vzít do úvahy i jeho dovolený ztátový výkon který bývá úměrný velikosti.

### Značky:

	Rezistor	: jeho odpor je pevně stanoven
	NTC-termistor	: jeho odpor zahříváním klesá
	PTC-termistor	: jeho odpor v určitém rozpětí teplot s teplotou roste
	Varistor	: jeho odpor s rostoucím napětím klesá
	Magnetorezistor	: jeho odpor roste s vzrůstajícím mag. polem
	Fotoodpor	: jeho odpor s rostoucím osvětlením klesá
	Potenciometr	: jeho odpor lze nastavit ovládacím prvkem
	Trimr	: jeho odpor lze nastavit nástrojem



Rezistory se rozlišují podle konstrukce, podle velikosti odporu a dovoleného zatížení(!). Podle odporového materiálu lze rozlišit např. drátové rezistory, vrstevné rezistory a uhlíkové rezistory. (vzájemně se pak liší např. stabilitou (např. teplotní), parazitními vlastnostmi (např. indukčnost)) Rezistory, jejichž odpor lze měnit, se nazývají reostaty, potenciometry nebo trimry.




Typický rozsah odporu u běžných malých rezistorů je 10 $\Omega$ -10M $\Omega$  a ztrátový výkon 0.1-1W. Vyrábí se v přesnostních řadách tak aby logaritmicky pokrývali celý rozsah (řada E6,E12,E24,...)

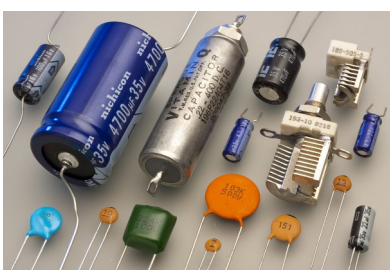
- Sériové spojení:  $R_1+R_2$  [Ohm]
- Paralelní spojení odporů:  $R_1 \parallel R_2$ ,  $R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ ,  $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$
- Rozdělení napětí, proudu, výkonu při sériovém a paralelním zapojení

### Kondenzátor

Kondenzátor je elektrický prvek, který slouží k ukládání elektrického náboje a energie v elektrickém poli. Skládá se ze dvou vodičů (elektrod) oddělených dielektrikem. V ideálním případě má jedinou vlastnost – Kapacitu [F]. Pro běžné typy je 1F příliš velká jednotka a běžný rozsah kapacit je 1pF-1000 $\mu$ F . Konstrukce kondenzátoru obvykle nutí vzít do úvahy další parametry jako je maximální dovolené napětí (typicky 5-50V), případně ERS (ekvivalentní sériový odpor) a závislost kapacity (na teplotě, napájecím napětí atp).

Pro menší kapacity (do řádu  $\mu$ F) jsou kondenzátory obvykle nepolarizované, pro vyšší kapacity se používají kondenzátory elektrolytické kde izolantem je speciální roztok – elektrolyt. Tyto kondenzátory mají danou polaritu kterou je třeba dodržet.

	všeobecná značka
	elektrolitický kondenzátor
	ladící kondenzátor
	dolaďovací kondenzátor - trimr



## [\(130\) Capacitor and SMD Capacitor Codes Explained with Examples - YouTube](#)

Sériové spojení kondenzátorů:  $C1 \parallel C2$ ,  $C1 \cdot C2 / (C1 + C2)$ ,  $1/C = 1/C1 + 1/C2$

Paralelní spojení:  $C1 + C2$  [F]

Rozdělení napětí, proudu, výkonu při sériovém a paralelním zapojení – pozor na přechodové děje

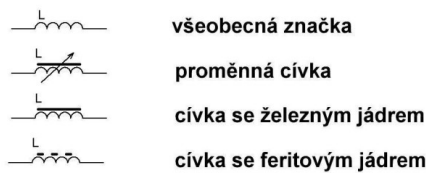
Impedance (=ekvivalentní odpor)  $X = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$  pro různé frekvence – snižuje se s frekvencí

Přechodová charakteritika

Energie kondenzátoru  $E = 0.5 \cdot C \cdot U^2$  [J]

## Cívka

Cívka je pasivní elektronický součástkový prvek, který se používá k ukládání energie v magnetickém poli. Cívka se skládá z drátu nebo vodiče navinutého na dutou trubku nebo jiný materiál. Když se přivádí elektrický proud do cívky, vytváří se magnetické pole kolem ní. Cívky se používají v mnoha elektronických zařízeních jako např. zdroje, reproduktory, elektromotory, transformátory a mnoho dalších.



Sériové spojení:  $L1 + L2$  [H]

Paralelní spojení:  $L1 \parallel L2$ ,  $L1 \cdot L2 / (L1 + L2)$ ,  $1/L = 1/L1 + 1/L2$

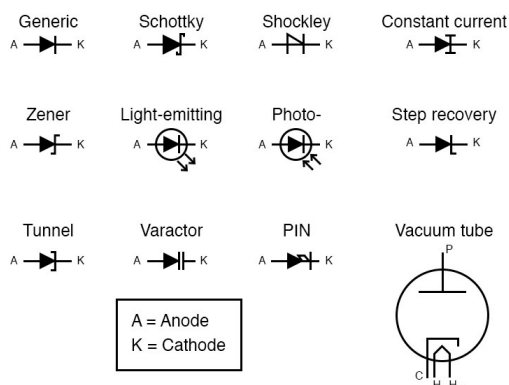
Impedance (=ekvivalentní odpor)  $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$  pro různé frekvence – zvyšuje se s frekvencí

Přechodová charakteritika

Energie cívky:  $0.5 \cdot L \cdot I^2$  [J]

## Dioda

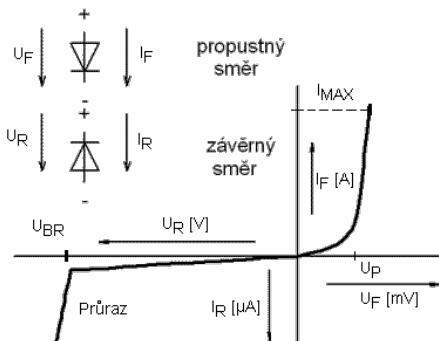
Dioda je aktivní polovodičová součástka (přechod PN) se dvěma elektrodami, označovanými jako anoda a katoda. Dioda se vyznačuje velmi odlišným tvarem voltampérové charakteristiky v závislosti na polaritě přiloženého napětí. Pokud je na diodu přiloženo závěrné napětí (napětí v opačném směru), tak dioda prakticky nevodí proud. Pokud je na diodu přiloženo kladné napětí (napětí v propustném směru), tak dioda vodí proud.





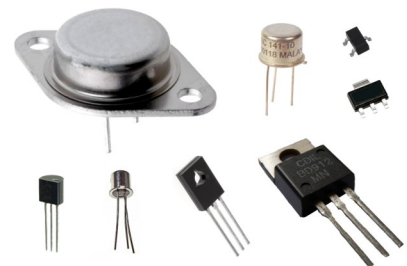
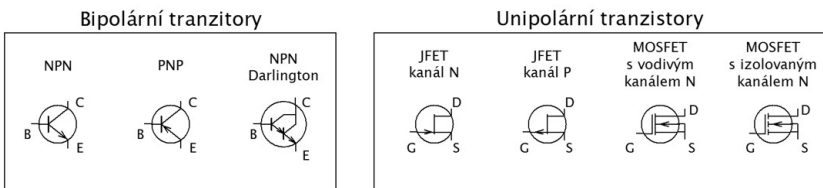
## Tranzistor

Tranzistor je polovodičová součástka, která se skládá ze tří vrstev polovodiče (tří elektrod) – kde lze



průtok mezi krajními elektrodami řídit prostřední elektrodou. Tranzistory se dělí na bipolární a unipolární podle toho, zda se na zesilování podílí oba typy nosičů nábojů (vodivostní elektrony a díry), nebo jen jeden typ nosičů. Bipolární tranzistor se skládá ze dvou PN přechodů - Tyto vrstvy jsou označovány jako Emitor, Báze a Kolektor – a podle jejich pořadí rozlišujeme tranzistoru NPN nebo PNP.

Unipolární tranzistor se skládá z jednoho polovodičového materiálu, je řízen napětím a elektrody se označují jako Source, Gate, Drain. Podle typu polovodiče pak rozlišujeme tranzistory s N-kanálem a P-kanálem.



Tranzistor lze použít jako zesilovač signálu a nebo ve spínacím režimu (stav zavřeno/otevřeno) který se používá v logických obvodech.

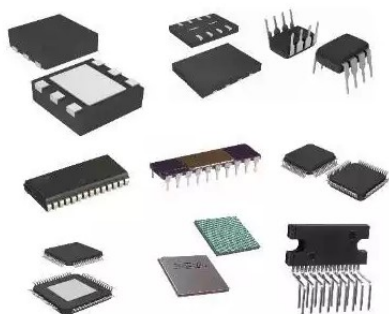
## Integrované obvody

Obvody vyšší integrace, obsahující složitější struktury ze základních součástek.

Lze rozdělit na číslicové (digitální) a analogové, případně hybridní.

Příkladem číslicových součástek jsou procesory, programovatelné obvody, logická hradla, atd.

Příkladem analogových integrovaných obvodů jsou operační zesilovaže, obvody spínaných zdrojů, budiče sběrnic atd.



## Měřicí přístroje

### Multimetr

Multimetr je (typicky menší přenosný) elektronický měřicí přístroj, který v sobě kombinuje několik funkcí jako například ampérmetr, voltmetr a ohmmetr. Jednotlivé měřicí funkce jsou na multimetru zpravidla rozděleny do několika měřicích rozsahů proto, aby bylo dosaženo relativně širokého měřicího rozsahu, vysokého rozlišení se zachováním vysoké přesnosti měření.

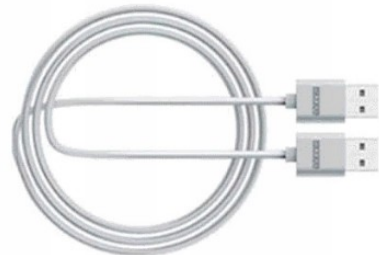
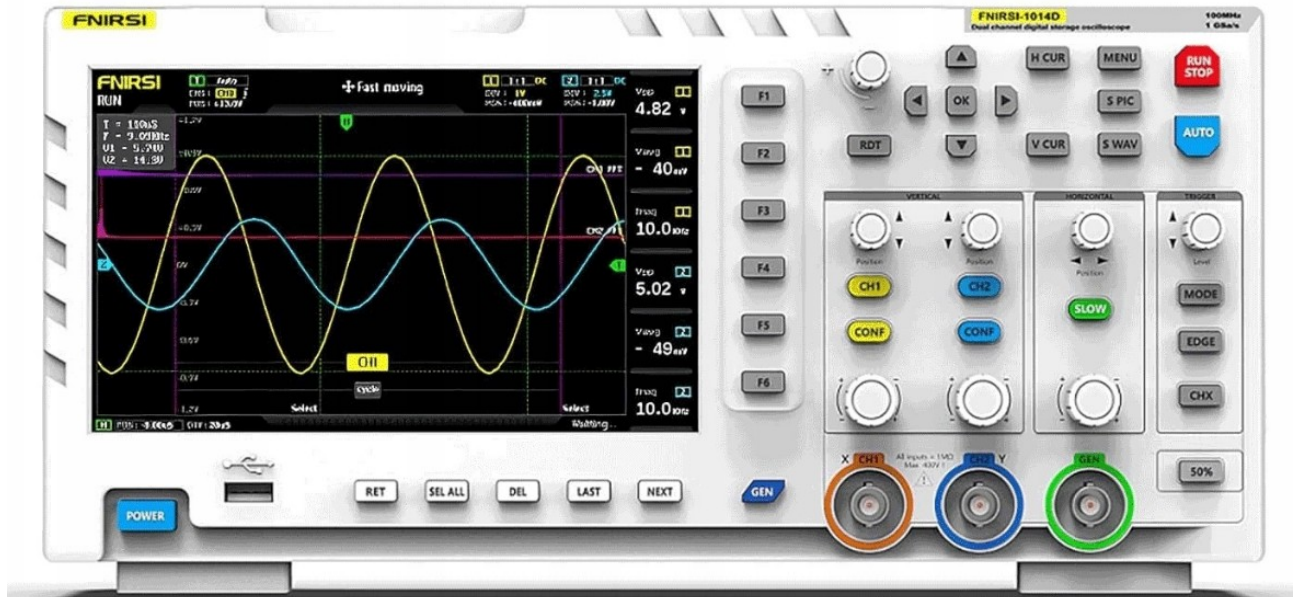




Problematika/limity měření dc, ac (true RMC) a obecných signálů.

## Osciloskop

Osciloskop je elektronický měřicí přístroj s obrazovkou vykreslující časový průběh měřeného (typicky napěťového) signálu.



Časový průběh je obvykle vykreslován od nějakého spouštěcího bodu (trigger) který je uživatelsky definovatelný (úroveň napětí, směr/hrana signálu, doba trvání atp) a umožňuje tak získat pohled na signál v bodě zájmu.

## Napájení Zařízení

Napětí / proud (vnitřní odpor, kapacita (v případě akumulátorů/baterií))

T.Mainzer, SES



Typicky používáme zdroje s konstantním napětím – a je limitováno kolik jsou schopny dodat proudu (tj. Výkon). Nejpoužívanější zdroje:

Síť nn (power line/grid) – 230V st (střídavých, = ac = alternating current)

Baterie (primární články) 9V, 1.5V (AA,AAA), 3V CR2032 ss (stejnoseměrných, = dc = direct current)

Akumulátory – NiCd, NiMh (1.2V), Li-ion, Li-pol (cca 4.2V) ss, autobaterie 12V (lead-acid) ss

Pro získání jiného napětí používáme transformátory (pro ac) nebo měniče/stabilizátory (pro dc)

Transformátor - přenáší střídavou složku el.energie pomocí el.mag. indukce – napětí je při převodu možné případně zvyšovat i snižovat (poměr závitů)

Stabilizátor – lineární napěťový regulátor. z vyššího (stejnoseměrného) napětí dělá nižší, napětí je snižováno „pálením“ energie (nízká účinnosti pro větší rozdíl napětí), nízký šum

Měnič (dcdc měnič) – je elektronické zařízení určené pro změnu velikosti stejnosměrného napětí nebo proudu - pro spínání se používají tranzistory a diody, jako zásobníky energie při převodu se používají cívky a kondenzátory. Dle konstrukce je možné napětí zvyšovat či snižovat:

Buck měnič: Snižuje vstupní napětí na nižší výstupní napětí.

Boost měnič: Zvyšuje vstupní napětí na vyšší výstupní napětí.

Buck-Boost měnič: Může buď zvyšovat, nebo snižovat vstupní napětí v závislosti na potřebě.

Konverze ac → dc – usměrňovač. (dioda, (diodový) můstek)

Konverze dc → ac – střídač (aktivní el.obvod, používaný v dcdc měničích)

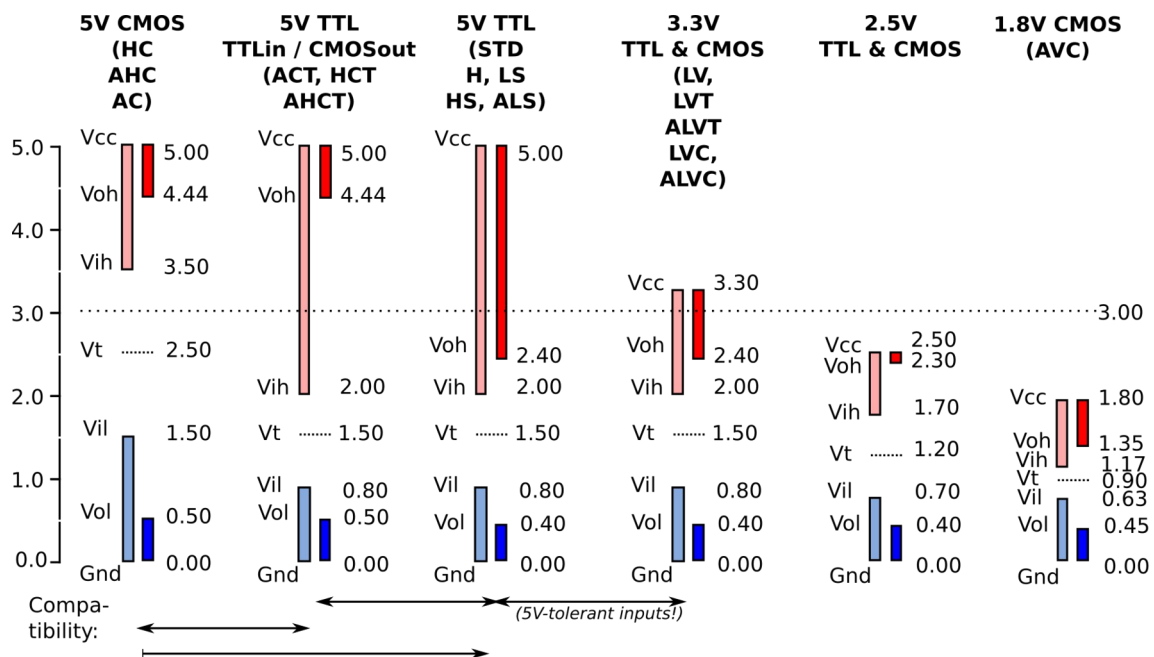
Pro vývoj se používají tzv. laboratorní zdroje – zdroje s nastavitelnými parametry, režimy (CV=constant voltage, CC=constant current) a ochranami (OVP (overvoltage protection), OCP (over current protection))



## Datové (logické) signály

Logické úrovně 0/1 - odpovídající napěťové úrovně – pro digitální vstup/výstup. většina obvodů je nyní technologie CMOS.

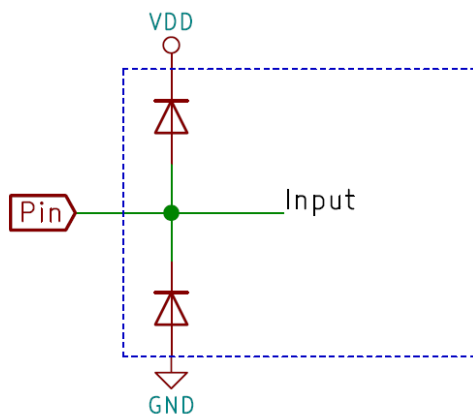
Na výstupu je nižší povolený rozsah než na vstupu (aby bylo zajištěno spolehlivé propojení – rušení, ztráty na vedení)



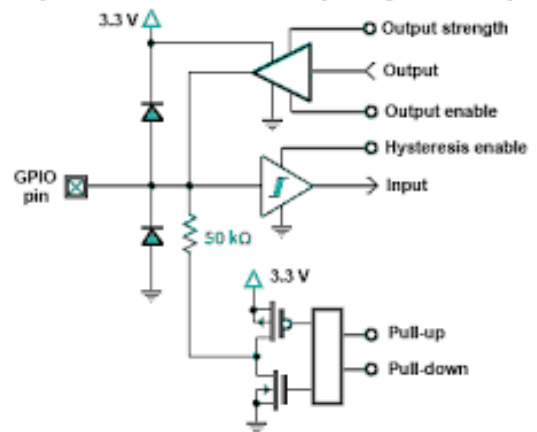
Data source: EETimes, A brief recap of popular logic standards (Mark Pearson, Maxim).

## Ochrany vstupů log.obvodů

Input protection circuitry of a CMOS IC



Equivalent Circuit for Raspberry Pi GPIO pins



- napětí mimo rozsah je odváděno (interními) diodami (ale diody mají omezenou zatížitelnost!), tedy v případě potřeby je nutné ochranu řešit externě (např. transily)

- pozn. Existuje i provedení kde vstup je speciálně uzpůsoben a horní ochranná dioda je nahrazena zenerovou diodou, takže vstupem může být i vyšší napětí než je pracovní logika obvodu. Tyto vstupy jsou pak označovány např. jako „5V tolerant“ (typicky u 3.3V logiky).

## Co se stane nedodržíte-li stanovená napětí

([Magic smoke - Wikipedia](#) ;-)

([Electronics massively overloaded - YouTube](#))

# 1. Přehled

## Řídicí systém

Systém - Propojení elementů a zařízení plnící stanovený účel

Řídicí systém – Systém (Propojení elementů) poskytující danou odezvu na vstup

Vstupy/řídicí vstupy – Systém – výstupy

Řízení

– způsob jak dosáhnout toho aby se systém choval jak je požadováno

- manuální
- automatické
- (poloautomatické)

## Architektury řídicích systémů

### - lokální

Sensorový/řídicí signál a regulátor je na stejném místě

### - centralizovaná

Regulátor je jinde (centrála) než sensorový/řídicí signál.

### - distribuovaná

Regulace je rozdělena na centrální a lokální část.

## Rozdělení senzorů

### Sensor

- registruje měřenou veličinu
- není ovlivňován neměřenými veličinami (pro ideální sensor)
- neovlivňuje měřenou veličinu (pro ideální sensor)
- sensorový signál - sensor převádí údaj o velikosti měřené veličiny na jiný - např. **elektrický (sběrnicev)**, ... ,mechanický (tlak), barva).

Sensorový Elektrický signál lze rozdělit na:

- nepřímý (změna el.vlastností (změna odporu, Kapacity, indukčnosti)
- přímý elektrický (napětí, proud)
- vysokoúrovňový (info o měřené veličině je přenášena přes kód pomocí nějakého typu sběrnice)

Příklady senzorů: teplota, tlak, rychlost, průtok, hladina, pH, vlhkost, koncentrace látek (plynů), napětí, proud. Odpor, kapacita, frekvence, ...

### Napájení sensoru (sensor powering)

Pasivní sensor – energie je brána z vnějšího zdroje (napájení) (pozn. ideální sensor neovlivňuje)

Aktivní sensor – energie je brána z měřeného vstupu – aktivní sensor se chová jako zdroj energie (=není napájeno). (např. termočlánek, piezosensor)

(!pozor - definice aktivní/pasivní se často používá i v obráceném smyslu – ve smyslu nutnosti napájení – pak je logika opačná)

### **Přizpůsobení/úprava signálu (signal conditioning)**

Signál → Sensor → Přizpůsobení → cílové zařízení

- Zesilovač (Amplifier) – DC vazba, AC vazba, diferenciální vstup
- Operátor – sčítač, odčítač, násobič, dělič, integrátor, diferenciátor
- Modulátor/demodulátor – PWM, Detekce Amplitudy, Detekce fáze, ..
- Filtr – low/high pass, Band pass. Band reject (=Notch)

Úprava signálu může být řešena analogově i digitálně.

### **Úroveň zpracování údaje**

- přímý (přímý měřený údaj, napr. analogový)
- částečně-převedený (údaj převedený do quazi-digitálního formátu, např pwm)
- převedený (údaj převedený do digitálního/sběrnicevého formátu)
- zpracovaný (údaj převedený, filtrovaný)
- inteligentní (údaj převedený, filtrovaný + lokální korekce chyb z doplňkových sensorů)
- inteligentní síť (údaj je skládán ze sensorové sítě)

### **Rozhraní sensorů (sensor interface)**

- Dvoustavové
- Třístavové – dva stavy + **detekce chyby**
- N-stavové – n-úrovni, n-vodičů
- Analogové (typický příklad standardu je rozhraní 0-20mA, 4-20mA)
- Časové, Frekvenční, Střída(PWM) (tkzvn. Quazi-digitální interface)
- Digitální (paralelní, sériové)
- Digitální sběrnicevé (napr. I2C,RS485,...)

### **Aktuátor („mover“)**

Komponenta vykonávající činnost/pohyb (např. motor, servo, ventil, ..)

- řídicí signál (**elektrický (sběrnicevý)**, pneumatický, fluidní, ..)
- zdroj energie (elektrická, pneumatická, hydraulická, ...)

### **Typy aktuátorů**

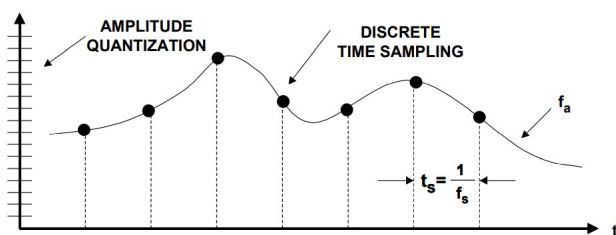
- **Hydraulický**
- **Pneumatický**
- **Elektrický**

## 2. Rozlišení, přesnost, chyby, Šum, Stabilita, Filtrování, Rychlost, Vzorkování, Linearizace

### Popis sensoru

- Rozsah (range) - min,max
- Převodová funkce (transfer function) – lineární, loaritmická, exponenciální, nelineární ...
- Citlivost (sensitivity)
- Hystereze (hysteresis)
- Šum (noise)
- Stabilita (stability) – krátkodobá (short-term), dlouhodobá (long-term)
- Vzorkování (sampling) – ( bodové, integrační )
- Rozlišení (resolution)
- Přesnost (precision)

### Vzorkování – ADC převodníky



Rozlišení (resolution) – typ. n-bits, vzorkovací rychlost (sampling rate) – typ.  $T_s[\text{us}], f_s[\text{Hz}]$

kvantizace – amplitudová, časová

### Typy ADC

ADC TYPE	PROS	CONS	MAX RESOLUTION	MAX SAMPLE RATE	MAIN APPLICATIONS
Successive Approximation (SAR)	Good speed/resolution ratio	No inherent anti-aliasing protection	18 bits	10 MHz	Data Acquisition
Delta-sigma ( $\Delta\Sigma$ )	High dynamic performance, inherent anti-aliasing protection	Hysteresis on unnatural signals	32 bits	1 MHz	Data Acquisition, Noise & Vibration, Audio
Dual Slope	Accurate, inexpensive	Low speed	20 bits	100 Hz	Voltmeters
Pipelined	Very fast	Limited resolution	16 bits	1 GHz	Oscilloscopes
Flash	Fastest	Low bit resolution	12 bits	10 GHz	Oscilloscopes

- Dual slope (Integrační) (Slow)

Integrační ADC je pomalejší, ale přesný typ ADC. Používá integrační techniku, kde vstupní napětí je integrováno po určitou dobu a poté porovnáno s referenčním napětím. Vhodný pro aplikace, kde je důležitá přesnost a nízký šum (např. měření napětí v multimetrech). Není závislý na přesnosti použitého kondenzátoru a odporu.

Blokové schéma: Integrátor: Integruje vstupní napětí po určitou dobu. Komparátor: Porovnáva integrované napětí s referenčním napětím. Čítač: Měří čas potřebný k dosažení referenčního napětí.

Výhody: Vysoká přesnost. Nízký šum.

Nevýhody: Pomalá rychlost převodu.

### - Delta-sigma ( $\Delta\Sigma$ )

Měřené napětí je převedeno na digitální sekvenci bitů. Obecně je pomalejší (lze volit přenos vs rychlost) ale může dosáhnout velké přesnosti. Není moc vhodný pro aplikace kde je měřené napětí multiplexováno.

### - Instantaneous/SAR ADC (Fast)

Instantaneous ADC (např. Successive Approximation ADC - SAR ADC) je rychlejší typ ADC. Používá postupnou aproximaci k nalezení digitální hodnoty, která nejlépe odpovídá vstupnímu napětí. Vhodný pro aplikace, kde je důležitá rychlost a střední přesnost (např. audio zařízení, senzory).

Blokové schéma: Vzorkovací a udržovací obvod (Sample and Hold): Vzorkuje vstupní napětí a udržuje jej po dobu převodu. SAR (Successive Approximation Register): Postupně aproximuje vstupní napětí. DAC (Digital-to-Analog Converter): Generuje analogové napětí pro porovnání s vstupním napětím. Komparátor: Porovnáva vstupní napětí s napětím z DAC.

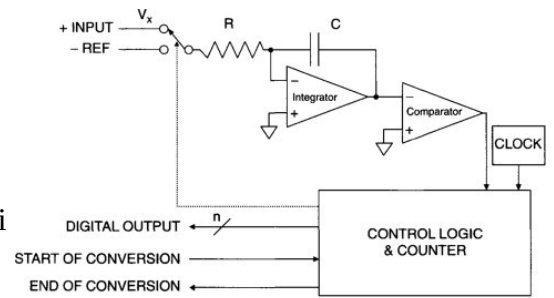
Výhody: Rychlost převodu. Střední přesnost.

Nevýhody: Vyšší šum než u integračních ADC.

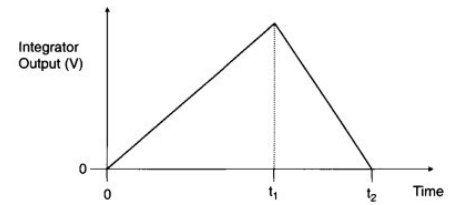
### - Incremental ADC (Faster)

Incremental ADC je rychlejší než SAR ADC a používá techniku inkrementálního převodu. Vhodný pro aplikace, kde je důležitá rychlost a střední přesnost (např. řízení motorů, průmyslová automatizace). Hrubým přiblížením se jedná o kombinaci SAR a sigma-delta převodníku.

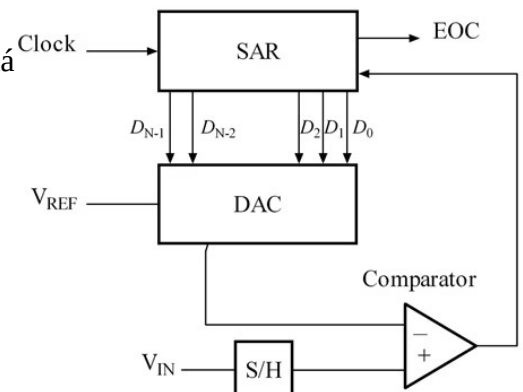
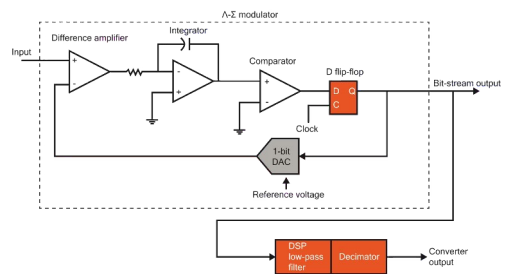
Blokové schéma: Vzorkovací a udržovací obvod (Sample and Hold): Vzorkuje vstupní napětí a udržuje jej po dobu převodu. Inkrementální převodník: Používá inkrementální techniku k převodu analogového napětí na digitální hodnotu. Komparátor: Porovnáva vstupní napětí s referenčním napětím.



(a) Block Diagram



(b) Typical Conversion Sequence





Výhody: Rychlá rychlost převodu. Střední přesnost.

Nevýhody: Vyšší složitost než SAR ADC.

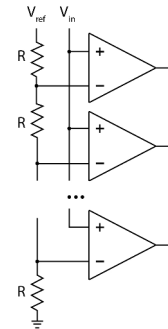
#### - Pipelined ADC (fast)

Zřetězené ADC převodníky (typ. Flash) kde každý převádí jen z omezenou přesností. Hrubý výsledek převodu je odečten (DAC + OA) a veden do další části k dalšímu ADC.

#### - Flash ADC (Fastest)

Flash ADC je nejrychlejší typ ADC. Používá paralelní komparátory k okamžitému převodu analogového napětí na digitální hodnotu. Vhodný pro aplikace, kde je důležitá extrémní rychlost (např. vysokorychlostní komunikace, osciloskopy).

Blokové schéma: Předzesilovač: Zesiluje vstupní napětí. Paralelní komparátory: Každý komparátor porovnává vstupní napětí s jiným referenčním napětím. Prioritní kodér: Převádí výstupy komparátorů na binární kód.



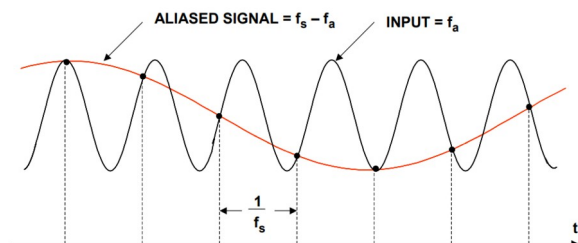
Výhody: Extrémně rychlá rychlost převodu. Vhodný pro vysokorychlostní aplikace.

Nevýhody: Vysoká spotřeba energie. Vyšší složitost a cena.

### Vzorkování – potíže

#### - Nyquist teorém, aliasing

- signál se spektrem  $f_a$  musí být vzorkován rychlostí  $f_s > 2 \cdot f_a$



- pokud  $f_s < 2 \cdot f_a$  nastává aliasing (viz obr)

#### - Šum (Noise)

Šum je náhodný signál – náhodná variabilita v signálu - který ovlivňuje jeho kvalitu/přesnost.

Existují časté typy šumů:

Bílý šum - náhodný signál, který má konstantní spektrální hustotu výkonu v celém frekvenčním rozsahu. Jinými slovy, obsahuje všechny frekvence se stejnou intenzitou.

Růžový šum - také známý jako  $1/f$  šum, má spektrální hustotu výkonu, která klesá s frekvencí. To znamená, že nižší frekvence (šumu) mají vyšší intenzitu než vyšší frekvence. Růžový šum je často používán při testování audio zařízení.

Gaussovský šum - je statistický šum, který má normální (Gaussovo) rozdělení amplitud. Je často používán jako model pro šum v digitálních komunikačních systémech.

Impulzní šum - se skládá z krátkých, náhlých impulsů různé intenzity. Často se vyskytuje v elektrických obvodech kvůli rušení.

Tepelný šum (Johnsonův-Nyquistův) - je generován náhodným pohybem elektronů v vodičích a součástkách kvůli jejich tepelné energii. Tento šum je přítomen ve všech elektronických zařízeních a je nezávislý na frekvenci (e.g. spektrálně se jedná o bílý šum)

Dále existují definice pro Hnědý, modrý, Fialový šum.

## Vzorkování – chyby, šum

Code errors – non-monotonic, missing code, wide code - viz obr.

DC offset error - absolutní chyba/posuv – viz obr.

DC gain error - chyba zesílení/nasobitele - viz obr.

Signal to Noise Ratio (SNR) – poměr signál šum, v [dB]

$$SNR[dB]=10 \cdot \log(P_{\text{signal}}[W]/P_{\text{noise}}[W]) ,$$

tj. 10dB=pomer signál:šum 10:1

tj. 20dB=pomer signál:šum 100:1, atd.

Total Harmonic distortion (THD) - celkové harmonické zkreslení [%]. Je to měřítko zkreslení signálu způsobené (harmonickými) složkami, které nejsou v původním signálu – poměr efektivních hodnot (napětí).  $THD = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots} / V_1 * 100\%$ .

Integral non-linearity (INL) - ntegrační nelinearita.

maximální odchylka skutečné přenosové funkce od ideální (typicky lineární) přenosové funkce. Udává se obvykle v jednotkách LSB (Least Significant Bit, nejméně významný bit) nebo v procentech z plné škály. Nižší hodnota INL znamená menší nelinearitu a vyšší přesnost převodníku.

Obvykle se uvádí jako absolutní hodnota (u když odchylka může být kladná i záporná)

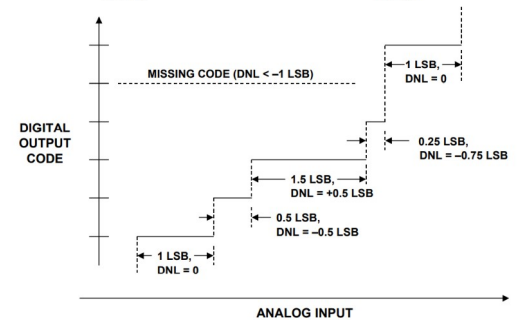
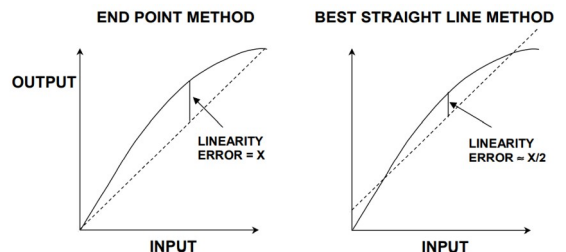
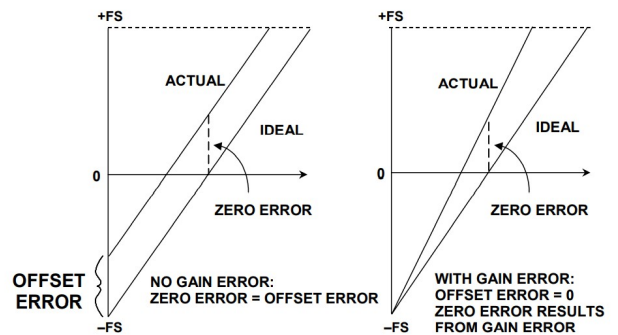
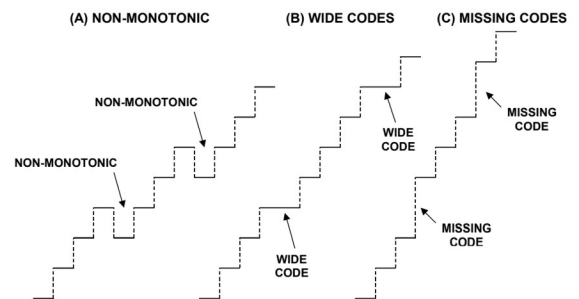
Differential nonlinearity (DLN) - diferenciální nelinearita ukazuje, jak rovnoměrně jsou jednotlivé kroky odstupňovány. je definována jako rozdíl mezi velikostí skutečného kroku a ideálního kroku, a často se udává v jednotkách LSB. Ideální DLN by byla nula, což by znamenalo, že všechny kroky jsou přesně stejné.

## Linearizace

- **jednobodová** (typ. offset nebo gain)

- **dvoubodová** (typ. offset + gain)

$$y=(x-x_0)/(x_1-x_0)*(y_1-y_0)$$



- **vícebodová** (tabulka)

- po částech lineární → tabulka (vyhledání v tabulce) + aproximace (interpolace, extrapolace)

- přesnost?

- proložení fce → tabulka + aproximace (interpolace, extrapolace)

- **fukční**

měření je principiálně nelineární, je dána závislost  $y=f(x)$

- závislost fixní či s parametry (=nutno kalibrovat)

### Aproximace interpolačním polynomem (Interpolace)

Chceme aproximovat fci/křivku která je dána svými hodnotami v několika bodech a to tak že fce má těmito danými body procházet. Aproximace pak slouží k odhadu hodnot v ostatních bodech.

Máme li zadány hodnoty fce  $f$  v  $n+1$  různých bodech tak existuje právě jeden polynom  $n$ -tého stupně který je interpolačním polynomem pro zadanou fci.

Existuje několik mat.postupů určení ale všechny vedou na stejný výsledek – např. Langrangeův inter.polynom, Newtonův interpolační polynom a další.

Langrangeovy polynomy jsou takové které v jednom z uzlových bodů ( $x_i$ ) interpolace mají hodnotu  $f(x_i)=1$  a v ostatních 0.

Lze je zapsat ve tvaru:

$$l_i(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

Výsledný aproximační polynom je pak ve tvaru

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \cdot l_i(x)$$

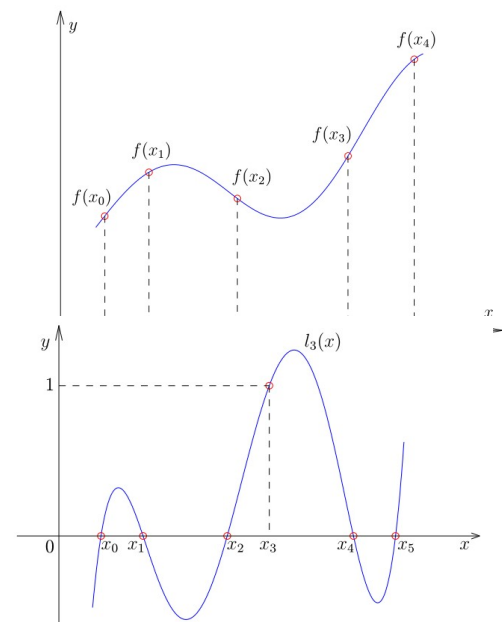
pozn.  $L_n(x)$  = lagrangeův polynom řádu  $n$ ,  $f(x_i)$  = hodnota fce v bodě  $x_i$  (z tabulky),  $l_i$  = lagrangeův polynom (mající hodnotu 1 v bodě  $x_i$ )

### Příklad (Langrangeův interpolační polynom):

Mějme fci danou následující tabulkou a určíme její Langrangerův interpolační polynom a hodntu fce v bodu  $x=2$ .

$$L_2(x) = f(x_0) \cdot l_0(x) + f(x_1) \cdot l_1(x) + f(x_2) \cdot l_2(x)$$

Jednotlivé lagrangeovy polynomy:



$i$	0	1	2
$x_i$	0	1	3
$f(x_i)$	1	2	0

$$l_0(x) = \frac{(x-1)(x-3)}{(0-1)(0-3)} = \frac{1}{3}(x-1)(x-3)$$

$$l_1(x) = \frac{(x-0)(x-3)}{(1-0)(1-3)} = -\frac{1}{2}x(x-3)$$

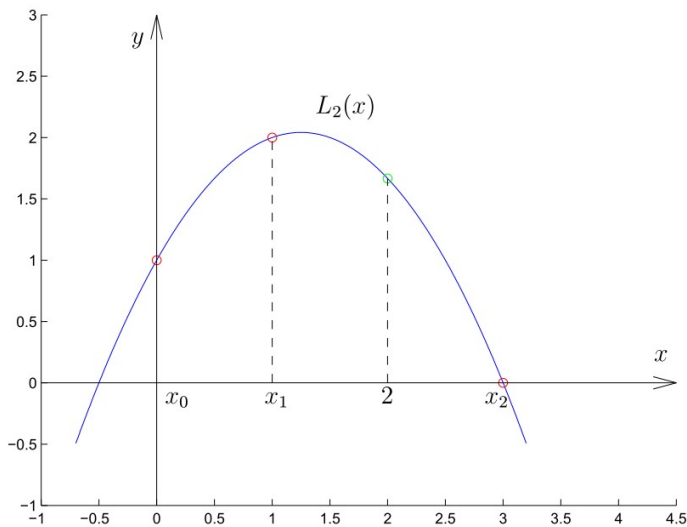
$$l_2(x) = \frac{(x-0)(x-1)}{(3-0)(3-1)} = \frac{1}{6}x(x-1)$$

Po dosazení:

Hodnota fce v bodě  $x=2$ : 
$$L_2(x) = 1 \cdot \left(\frac{1}{3}(x-1)(x-3)\right) + 2 \cdot \left(-\frac{1}{2}x(x-3)\right) + 0 \cdot \left(\frac{1}{6}x(x-1)\right) =$$

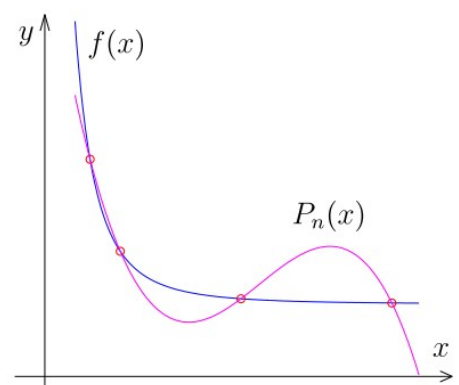
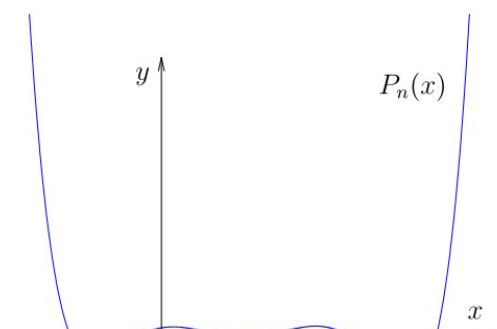
$$= \frac{1}{3}(x^2 - 4x + 3) - (x^2 - 3x) = -\frac{2}{3}x^2 + \frac{5}{3}x + 1$$

$$L_2(2) = -\frac{2}{3} \cdot 2^2 + \frac{5}{3} \cdot 2 + 1 = \frac{-8 + 10 + 3}{3} = \frac{5}{3}$$



### Aproximace iterpoláčním polynomem – poznámky k použitelnosti

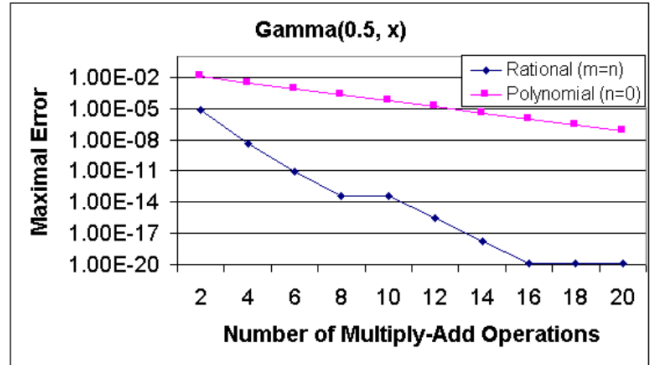
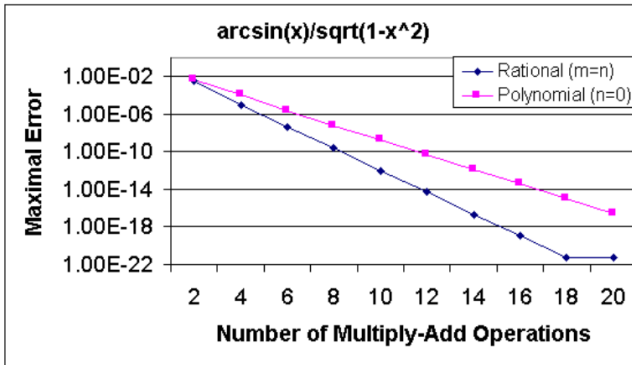
- Aproximace polynomy není obecně vhodné pro extrapolaci mimo rozsah zadaných hodnot (zejména pro vyšší řády polynomu)
- Obecně je třeba být obezřetný při použití vysokého stupně polynomu, kde ani interpolace uvnitř rozsahu nemusí dávat očekávané výsledku z důvodů „oscilace“ (má tendenci nastávat zejména pro ekvidistantní uzly + vlivem nepřesnosti vstupních dat) – tyto oscilace lze ovlivnit vhodnou volbou uzlů.
- Interpolace polynomy není vhodná pro asymptotické fce (blížící se konstantě)



## Polynomiální vs Racionální aproximace

$$f(x) \approx \frac{\dots a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0}{\dots b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0} \quad \text{OR} \quad \dots c_3x^3 + c_2x^2 + c_1x + c_0$$

"Rational Approximation"                      "Polynomial Approximation"



### Výpočet polynomu – poznámky

Vyhodnocení polynomu  $a+b*x+c*x^2+d*x^3$ , pro  $x:<0;1>$

(obecně, pro spec.případy nemusí být vždy pravda)

nikdy:  $a + b*x + c*POW(x,2) + d*POW(x,3)$

trochu lépe:  $a + b*x + c*x*x + d*x*x*x$

lépe:  $d*x*x*x + c*x*x + b*x + a$  (sčítáme od menších čísel)

správně:  $((d*x+c)*x+b)*x+a$

(=Hornerovo schema, výpočetně efektivnější (zejména s FMA = Fused multiply-add instrukce), a přesnější)

### Paralelizace (Estrinův algoritmus)

vyhodnocení polynomu:  $a+b*x+c*x^2+d*x^3+\dots+h*x^7$

krok1 (vše paralelně):  $X2=x*x$ ,  $W=hx+g$ ,  $E=fx+e$ ,  $R=dx+c$ ,  $T=bx+a$

krok2:  $X4=X2*X2(=x^4)$ ,  $U=W*X2+E (=hx^3+gx^2+fx+e)$ ,  $I=R*X2+T (=dx^3+cx^2+bx+a)$

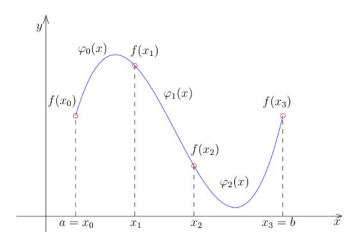
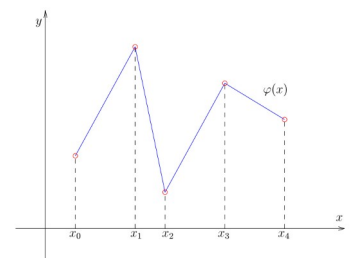
krok3:  $result = U*X4+I$

pozn. tedy složitost  $\log(n)$

### Interpolace spline funkcemi

Je interpolace jednoduchými funkcemi mezi zadanými body. Nejjednodušší spline funkcí je tzv. lineární spline funkce; jde vlastně o lomenou čáru spojující zadané interpolované body.

Nejvíce používanou je tzv. kubická spline interpolace - fce  $f$  je po částech aproximována polynomy 3.stupně (volba vyššího stupně již nepřináší lepší



výsledky). Pro uzové body pak platí že v daných bodech mají obě splineové fce stejnou hodnotu a spojité první a druhé derivace.

Jednotlivé funkce  $\varphi_i(x)$  (na každém intervalu  $\langle x_i, x_{i+1} \rangle$  jde o jinou funkci) mají tvar:

$$\varphi_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + \frac{c_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x - x_i)^3$$

Musí platit: ( $\varphi \in \mathbb{C}^2(\langle a, b \rangle)$  a podmínky interpolace)

- 1)  $\left. \begin{array}{l} \varphi_0(x_1) = \varphi_1(x_1) \\ \varphi_1(x_2) = \varphi_2(x_2) \end{array} \right\}$  spojitost funkce  $\varphi$
- 2)  $\left. \begin{array}{l} \varphi'_0(x_1) = \varphi'_1(x_1) \\ \varphi'_1(x_2) = \varphi'_2(x_2) \end{array} \right\}$  spojitost 1. derivace funkce  $\varphi$
- 3)  $\left. \begin{array}{l} \varphi''_0(x_1) = \varphi''_1(x_1) \\ \varphi''_1(x_2) = \varphi''_2(x_2) \end{array} \right\}$  spojitost 2. derivace funkce  $\varphi$
- 4)  $\left. \begin{array}{l} \varphi_0(x_0) = f(x_0) \\ \varphi_1(x_1) = f(x_1) \\ \varphi_2(x_2) = f(x_2) \\ \varphi_2(x_3) = f(x_3) \end{array} \right\}$  interpolační podmínky

Aby bylo řešení jednoznačné je třeba k výše uvedenému (10 rovnic) nutno ještě doplnit okrajové podmínky (+2 rovnice). Typicky se doplňuje jedna z níže uvedených:

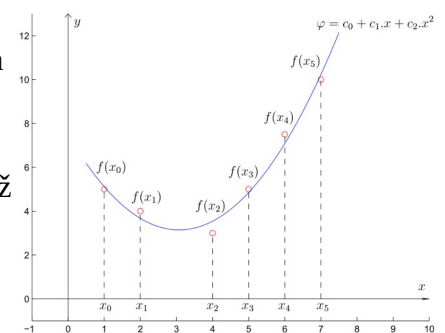
- 5) a)  $\varphi'(a) = f'(a), \varphi'(b) = f'(b)$  ... podmínky tečen
- b)  $\varphi'(a) = \varphi'(b), \varphi''(a) = \varphi''(b)$  ... podmínky periodicity
- c)  $\varphi''(a) = 0, \varphi''(b) = 0$  ... tzv. přirozené podmínky

Podmínky 1-5 představují soustavu lineárních algebraických rovnic (s řádkou maticí). Jejím vyřešením určíme koeficienty  $a_i, b_i, c_i, d_i$ . tj. Aproximační splineové fce.

## L2 aproximace

Chceme aproximovat fci která je dána svými hodnotami v několika bodech a to tak že chceme minimalizovat odchylku fce od naměřených dat (nejčastěji se používá kvadratická odchylka → metoda nejmenších čtverců). Vhodné např. pro případy kdy jsou vstupní hodnoty zatížené chybou (typicky výsledky měření). Řád aproximační fce je často << než počet dat.

(dále používanou je minimalizace maximální odchyky - minimax)



## Příklad

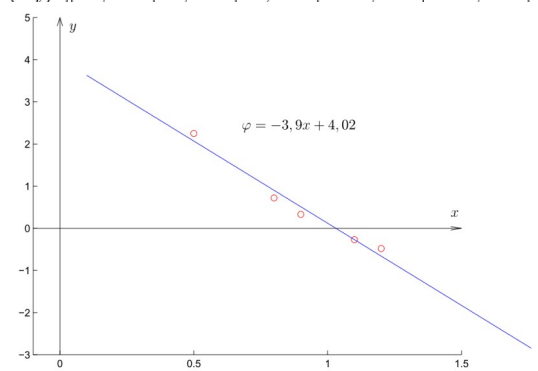
Tabulkou jsou dány naměřené hodnoty fce f. O fci f přepokládáme že je lineární, tj. Budeme ji aproximovat lineární funkcí metodou nejmenších čtverců.

$x_i$	0,5	0,8	0,9	1,1	1,2
$f(x_i)$	2,25	0,72	0,33	-0,27	-0,48

Tedy:

$$c_1 x_i + c_0 = f(x_i)$$

T.Mainzer, SES





$$\begin{bmatrix} 0,5 & 1 \\ 0,8 & 1 \\ 0,9 & 1 \\ 1,1 & 1 \\ 1,2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,25 \\ 0,72 \\ 0,33 \\ -0,27 \\ -0,48 \end{bmatrix} \Leftrightarrow Q \cdot c = f$$

Získanou soustavu řešíme ve smyslu metody nejm.čtverců:

$$Q^T Q c = Q^T f$$

poznámky:

- Tuto metodu lze zobecnit i pro spojitě fce, kde místo součtu (kvadratických) odchylek figuruje integrál (kvadrátu) rozdílu fcí (dané fce a hledané aproximace).
- Soustavu bazových fcí je vhodné volit dle předpokládaného tvaru řešení – bazové polynomy by měli být ortogonální (jinými používanými jsou např. Čebyševovy polynomy)
- přesnost aproximace silně závisí na aproximované fci. Viz tabulka počtu významných bitů pro různé fce a řády aproximačního polynomu. (aproximováno metodou minimalizace max.odchylky)

### 3. Regulační smyčka (otevřená, uzavřená, zpětná vazba), Typy systémů, Příklady

Systém a řízení – spojité vs diskrétní, dynamické vs statické

Regulační smyčka – otevřená (bez zpětné vazby) vs uzavřená (se zpětnou vazbou):

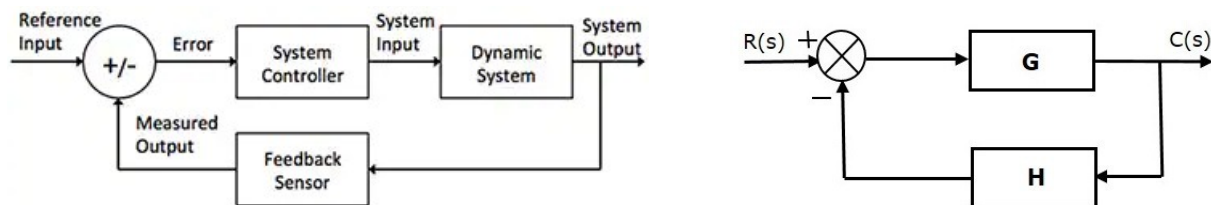
(open loop vs closed loop)

**otevřená:** požadovaný vstup/hodnota – řízení – výstup (do systému)

(např. Řízení semaforů, pračka, 3D tisk)

užívá se v případech kdy není třeba zpětná vazba či není možné provádět měření

**uzavřená:** požadovaný vstup/hodnota – chyba (rozdíl mezi požadovanou a zjištěnou hodnotou) – řízení – výstup (do systému) – řízený systém – sensor hodnoty (zpětná vazba)



(např. Topení, lednice)

(pozn. Speciální případ je manuální řízení kdy je zpětnou vazbu zajišťuje uživatel, např. vysoušeč vlasů)

Příklad: řízení teploty místnosti - otevřená smyčka: topení stále zapnuté, uzavřená smyčka: teplotní sensor, zapínající a vypínající topení (např. termoventil)

matematický popis systému:

$G$  = přenos otevřeného systému

$H$  = přenos zpětné vazby

pak  $T$  (přenosová fce odezvy celého systému) =  $G/(1+GH)$

Vliv zpětné vazby na stabilitu: je-li  $GH=-1$  pak se systém stává nestabilním

popis systému: lineární dif. rovnice, Laplaceova transformace, přechodová či impulsní charakteristika/fce, frekvenční přenos

#### Typy řízení

- Stabilizace – regulace na konstantní úroveň  $R(s)=\text{konstanta}$
- Programová regulace – požadovaná hodnota se mění v čase (typicky dle stanoveného programu)
- optimální regulace – hledá se optimum více proměnných
- adaptivní regulace – regulátor se přizpůsobuje změnám v soustavě

**Soustava nultého řádu** (proporcionální, bez setrvačnosti)

$$a_0 y(t) = b_0 u(t)$$

$$G(p) = Y(p) / U(p) = b_0/a_0 = k \quad \dots \text{ k je zesílení soustavy (koeficient přenosu)}$$

Příklad: el.obvod s odporem

### Soustava prvního řádu

$$a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 u(t)$$

$$G(p) = Y(p) / U(p) = b_0 / (a_1 p + a_0) = k / (T p + 1)$$

kde  $k=b_0/a_0$  je zesílení. A  $T= a_1/a_0$  je časová konstanta

Příklad: el.obvod s odporem a kapacitou, přímý ohřev, tlakování nádoby

### Soustava druhého řádu

$$a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 u(t)$$

$$G(p) = Y(p) / U(p) = b_0 / (a_2 p^2 + a_1 p + a_0) = k / (T_2 p^2 + T_1 p + 1)$$

kde  $k$  je zesílení,  $T_1, T_2$  jsou časové konstanty.

O průběhu přechodové charakteristiky rozhoduje rozložení pólů a nul v komplexní rovině. Póly systému získáme řešením charakteristické rovnice (kvadratického trojčlenu ve jmenovateli přenosu).

$$P_1, P_2 = -T_1/2 T_2 \pm \sqrt{(T_1/2 T_2)^2 - 1/ T_2}$$

Je-li diskriminant  $D$  (člen v odmocnině)

pro  $D < 0$  : (tj. komplexní kořeny) je soustava / přenosová charakteristika kmitavá (lze vypočítat periodu kmitání a útlum)

pro  $D = 0$  na mezi periodicity

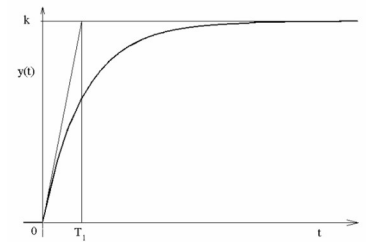
pro  $D > 0$  (reálné kořeny) – charakteristika nekmitavá (aperiodická)

Příklad aperiodických/nekmitavých - tepelné výměníky, soustavy složené z členů 1.řádu

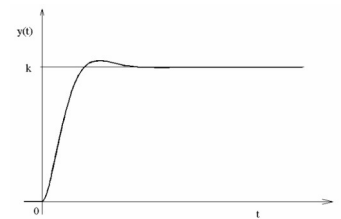
Příklad periodických/kmitavých – elektrické obvodu RCL (oscilátory), soustavy s pružinami



Přechodová charakteristika soustavy 0. řádu



Přechodová charakteristika soustavy 1. řádu



Přechodová charakteristika kmitavé soustavy 2. řádu

# 4. P,I,D regulatory, Softwarová implementace, Stabilita řízení, Problematika dopravního zpoždění, Vzdálené řízení

## Hystereze

(pozn: hystereze může být vlastnost některých sensorů i aktuátorů – kde je to obvykle je jev nechtěný. Vyjimka typicky nastává v okamžiku kdy sensor přímo řídí akční člen (např. bimetalový spínač), kde pak hystereze zvyšuje životnost systému – viz dále, kde se již zabýváme hysterezí na straně řízení akčního členu)

Důležitost hystereze (u on/off řízení)

(např. čerpadlo při růstu hladiny, regulace teploty atd)

Někdy lze „fyzikální“ hysterezi nahradit časovou – slouží pro odstranění kmitání

SW realizace časové hystereze na výstupu:

//rr=požadovaný výstup,r=akt.výstup,T=aktuální čas, T0=čas posl.změny, dT=časová hystereze

```
if (rr!=r) if ((T-T0)>dT) { r=rr;T0=T;}
```

SW realizace fyzikální hystereze na analogovém vstupu:

i=(reálný) vstup, r=výstup, L = spodní limit, H=horní limit (H-L = hystereze)

```
if (r==0) if (i>H) r=1;
```

```
if (r==1) if (i<L) r=0;
```

Dvoustavový řídicí výstup často potřebuje hysterezi.

Příklad/Algoritmus pro regulaci teploty, s hysterezí 1st (+/-0.5st)

T=měřená teplota, W=požadovaná teplota, E=rozdíl, H=řídicí výstup s hysterezí (digitální 0/1)

E=W-T;

```
if (E>0.5) H=1;
```

```
if (E< -0.5) H=0;
```

## Řídicí smyčka (obecné SW řešení)

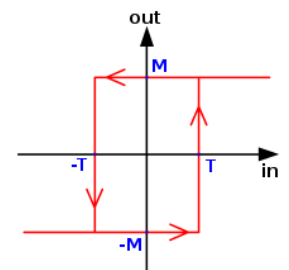
Vnější (téměř) vždy ve stylu: while(1) ...

Uvnitř nedávat nikdy smyčku s podmínkou bez možnosti ukončení, tj. např.

```
while(podm) { ... kod ....; }
```

```
while(1) { ... if (podm) break; ... }
```

kde podmínka typicky souvisí s nějakou periférií, např. čekání na příjem znaku, čekání signál koncového spínače.



Vždy je třeba počítat se situací že (vnější) podmínka nemusí nastat (např. nepřijde znak, nesečne koncový spínač) – a program nesmí kvůli této situaci „zamrznout“

Řešení1:

```
while((podm)&&(timer<xxx)) ... timer++...;
```

tj. Omezení max. doby smyčky (timer ve smyčce a nebo externí časovač)

(=pokud znak nepřijde do x ms pokračuj)

Řešení2:

```
if (state==0)&&(podm)) state=1;
```

```
if (state==1) { ... }
```

Převod smyčky na stavový automat.

Řešení3:

použít procesy, přerušení ...úprava smyčky na event-driven řešení

(=vlastní process pro čtení znaku nebo čtení znaků v přerušení a zápis do bufferu, který je pak zpracováván v hlavní smyčce)

Obdobně - řešení časování v hlavní smyčce:

```
delay(xxx); ...akce...
```

nepoužívat! nevýhody: nelze rozšířit/upravit program tak aby při delay dělal něco dalšího.

(vyjimka - při použití procesů může být delay() použito. pozor na přesnost časování)

Řešení (přiblížení):

```
if (( time() - last_time ) >= xxx ) { last_time = time(); ...akce...}
```

Nevýhody?:

nepřesné časování:

a/ rozdíl časů může být > xxx → druhé/další volání nebude v čase  $2*(N*)xxx$  ale později

Řešení (přiblížení):

```
if (( time() - last_time ) >= xxx ) { last_time = time() + xxx; ...akce...}
```

Nevýhody?:

b/ time() je tam  $2*$  a pokaždé může vrátit jiný čas

Řešení (přiblížení):

```
t=time(); if (( t - last_time ) >= xxx ) { last_time = t + xxx; ...akce... }
```

Nevýhody?:

c/ v případě problémů s časováním (externí nebo doba trvání „akce“ - může nastat případ že t-last\_time >> xxx.

Řešení:

```
t=time(); if (( t - last_time ) >= xxx )  
{ if (( t - last_time ) >= N*xxx ) last_time = t; else last_time = t + xxx; ...akce... }
```

Nevýhody (všech uvedených řešení): časování není zcela přesné a ekvidistantní. Je-li toto třeba nutno použít přerušení.

## PID regulátor

P .. proporcionální složka

I .. Integrovaná složka

D .. Derivační složka

dále: W=požadované hodnota, E=chyba, I=vstupní hodnota, O=výstupní hodnota (řízení) (skládá se z Op,Oi,Od), Rp,Ri,Rd=konstanty/nastavení regulátoru

volba Rp,Ri,Rd vychází ze znalosti soustavy. Nelze čekat kvalitní regulaci jejich náhodnou volbou.

Algoritmus:

$E=W-I$  //e>0 je li aktuální hodnota pod požadovanou

$O_p = E \cdot R_p$  //tj. Proporcionální Čím větší odchylka tím větší výstup

$O_i = O_i + E \cdot R_i$  //tj. Integrovaná složka, dohánějící nedostačné zesílení

$O_d = dE/dt \cdot R_d$  //tj. Derivační složka reagující na rychlé změny

$O = O_p + O_i + O_d$

Pozor na stabilitu (příliš velké zesílení) – diskutujte vliv jednotlivých složek

Pozor - implementace derivační složky bude složitější a závislá na časových konstantách systému (např.  $O_d = ((E[t] - E[t-d])/d) \cdot R_d$ )

Omezení rozsahu O: dané fyzikálním omezením řízení, omezeno např. 0-1

Toto omezení je třeba aplikovat na jednotlivé složky složky, zejména Oi, které by jinak mohlo jít k nekonečnu v případě že systém není schopen dosáhnout žádané hodnoty.

if (Op<0) Op=0; if (Op>1) Op=1;

if (Op+Oi)>1 Oi=1-Op; if (Op+Oi)<0 Oi=0-Op;

//diskuse proč omezovat oi



$O = O_p + O_i + O_d$ ;

if ( $O < 0$ )  $O = 0$ ; if ( $O > 1$ )  $O = 1$ ;

## Dopravní zpoždění, vzdálené řízení

Dopravní zpoždění ( $T_d$ ) – když mezi měřením a regulačním zásahem do systému uběhne nezanedbatelný čas (nezanedbatelný = dáno rychlostí systému) – tj. v okamžiku zásahu už může být v jiném stavu, což samozřejmě má (negativní) vliv na kvalitu regulace.

Příklad: regulace topení

Čím větší  $T_d$  čím obtížnější udržet stabilitu systému.

(někdy může pomoci přidat složku  $D$ , jakožto „predikční“ složku)

Vzdálené řízení = vložení  $T_d$  do systému (→ v případě problémů možná/nutná konverze na distribuované řízení)

## Poznámky k C low-level programování, přenositelnosti, rychlosti

### Velikost a typ proměnných

int, short, long? - může být různá velikost v závislosti na architektuře (typicky 1-8byte)

char? - norma nedefinuje signed / unsigned je nutno vždy specifikovat

řešení: #include <stdint.h> uint8\_t / int8\_t / uint16\_t / ...

### Volatile

Specifikátor Volatile – přístup k proměnné která může být modifikovatelné jiným procesem, typicky přerušení, překladač neoptimalizuje přístup

např. volatile uint16\_t flag; //přepokládejme že se může změnit v interruptu

while(flag==0); //bez volatile bude flag načtený jen jednou a běh by pokračoval nebo se zacyklil

!pozor - volatile nechrání před neatomičností operací (typicky vícebytové proměnné, struktury)

a=flag; b=flag; //!a se může lišit od b

flag1=flag; //!v případě 8bit mcu je to neatomická operace a Hi a Lo byte mohou nesouviset

atomičnost lze v jednoduchých případech řešit zakázáním přerušení (procesu/přerušení, který modifikuje flag)

tedy něco jako: disable\_interrupt(); a=flag; b=flag; enable\_interrupt();

obecně je atomičnost nutné řešit kritickou sekcí (mutex = mutual exclusion)

```
#include <pthread.h>
```

```
pthread_mutex_t lock; //lock (global variable)
```

```
pthread_mutex_init(&lock, NULL); //lock ini in code
```

```
pthread_mutex_lock(&lock); //using lock in code - start critical section
//práce s flag
pthread_mutex_unlock(&lock); //stop critical section
pthread_mutex_destroy(&lock); //lock deini at code end
```

!pro multicore mcu (s cache) může být synchronizace mezi jednotlivými core složitější a nemusí existovat funkční synchronizační primitivum typu mutexu a je třeba komunikovat přes zprávy (stream buffer, message buffer)

## Rozsah proměnných

```
//example - Counting 1:
```

```
a=0; while(1) a+=1;
```

Co udělá program pro int a; Co pro float a? (vývoj a v čase)

```
//loop čítající 7..0
```

```
uint8_t q;
```

```
q=7; while(q-->=0) {..do something..}
```

```
//!q nikdy nebude záporné
```

```
//časovač - 100 časových jednotek od události v lasttime
```

```
timer++;
```

```
if ((timer-lasttime)>100) {...do something..} //!pozor na přetečení timer
```

Matematické operace a rozsah proměnných

Chování Operace  $a\%b$  (**modulo**) je implementačně závislé pro záporná čísla (a nebo b)

```
-4%3 = ? // možnosti: 1 -1 2 -2
```

Jazyk C z definice nemá možnost detekovat **přetečení** int operací (např.  $a+b$  mimo rozsah)

(relativně náročné) řešení1:

```
#include <stdint.h>
```

```
int16_t add_and_saturate(int16_t x, int16_t y)
```

```
{
    int32_t z = (int32_t)x + y;
    if (z > INT16_MAX) { z = INT16_MAX; }
    else if (z < INT16_MIN) { z = INT16_MIN; }
    return (int16_t)z;
}
```

(relativně náročné) řešení2 neuvžívající vyšší datové typy:

```

int16_t add_and_saturate(int16_t x, int16_t y)
{
    int16_t z = x+y;
    if ((y > 0) && (x > (INT16_MAX - y))) {    z = INT16_MAX; }
    else if ((y < 0) && (x < (INT16_MIN - y))) {    z = INT16_MIN; }
    return z;
}

```

Operace **posuvu**  $a \ll b$  je nedefinována pro případy  $b < 0$ , tj. Pozor je li  $b$  výsledkem nějaké operace a je signed. Operace posuvu nemusí být také definována pro posun větší než rozsah proměnné (e.g. `uint32_t << 64`)

Přístup (tj. i čtení) na nedefinovaný **pointer** včetně NULL(!) má nedefinovaný výsledek (včetně možného pádu aplikace;-)

## Zarovnání proměnných

zarovnaný vs nezarovnaný přístup – nelze/lze – i když lze tak dopad na rychlost

//přístup ke strukturám:

```
typedef struct mystruct {
```

```
    uint8_t cmd;
```

```
    uint32_t data;
```

```
} mystruct
```

--může být veliká 5B, ale také 8B (zarovnání po cmd)

--rozdíly dle pořadí členů struktury

->pozor při tvoření unionu či přístupu přes přetypování/pointery

## Byte manipulation

```
uint8_t b[4];
```

```
uint32_t i;
```

Převod/mapování  $i \rightarrow b$ ,  $b \rightarrow i$

Pointers? Unions? Obecně ne. (endianita, zarovnání)

„Matematicky“? Lze. ( $i = b[0] + b[1] * 256 + b[2] * 65536 + b[3] * 16777216$ )

Ale nelze dokonale přenositelné mapování na stejnou oblast paměti

Překladače se mohou snažit pomoci, ale nemusí být stoprocentní, je třeba ověřit.

## **Funkce přístupující k perifériím** (a obecně s „vedlejšími efekty“)

```
char serial_read(void); //read 1byte from serial port
x = 256*serial_read()+serial_read(); //read 16bit number from serial port (!?)
//!nezaručené pořadí volání – není zřejmý jaký znak bude hi a jaký low
//!nezaručené znaménko u „char“ (256*-1 + -1 nemusí být ok)
x = 256*(unsigned char)serial_read();x+=(unsigned char)serial_read();
```

## **Použití maker**

```
např. #define GETPORTBIT PORTA&0x01 //port bit to test
if (GETPORTBIT==0) ..... //!pozor
#define GETPORTBIT (PORTA&0x01) //solution
if (a&b==0) ... //!casta chyba, == ma vyssi prioritu

napr: WORD2BYTEARRAY(a,w) a[0]=w;a[1]=w/256; //makro
WORD2BYTEARRAY(a,getvalue());
//!dvounásobné volání getValue(). Řešení:
uint16_t w=getvalue(); WORD2BYTEARRAY(a,w);
WORD2BYTEARRAY(a,serial_read());
//!dvounásobné volání fce – přečte (chybně) postupně dva (různé) znaky
```

## **Mix C a C++, linker**

V případě soubor \*.cpp je třeba C funkce někdy „zabalit“ do

```
extern "C" void SysTick_Handler()
{ ... }
```

(C a C++ mají při překladu jinou jmennou konvenci a linker nemusí rozpoznat např. že se jedná o obsluhu přerušování)

## **Urychlování – větvení programu**

```
if (cmd==0x00) ..dělej něco...
if (cmd==0x01) ..dělej něco jiného...
if (cmd==0x05) ..dělej další věc...
...atd...
```

**možnost1:**

```
switch(cmd)
{
  case 0x00: .... break;
  case 0x01: .... break;
  ...atd....
```

**možnost2:**

```
if (cmd<0x5)
  if (cmd<0x1) .....dělej něco...
  else ..dělej něco jiného...
else ..dělej další věc...
(půlení intervalu, složitost log(n))
```

**možnost3:**

```
void cmd0(void) { .... delej neco ... } //definice kodu pro zpracovani cmd==0x00
void cmd1(void) { .... delej neco jineho ... } //definice kodu pro zpracovani cmd==0x01
typedef void (*Tfcmd)(void); //type Tfcmd = pointer command processing function
Tfcmd fcmd[16]= {cmd0, cmd1, cmdx, cmdx, cmd5, .... } //ukazatele na zpracovávající fce
---
fcmd[cmd](); //kod
```

**Speed-up**

repeat function (fix params instead call params)

use tables

# 5. Číslicová filtrace signálu, Redukce šumu, Algoritmy filtrace

Filtr

- analogový (aktivní, pasivní), **číslicový** (s nekonečnou odezvou IIR, s konečnou odezvou FIR)
- lineární, nelineární

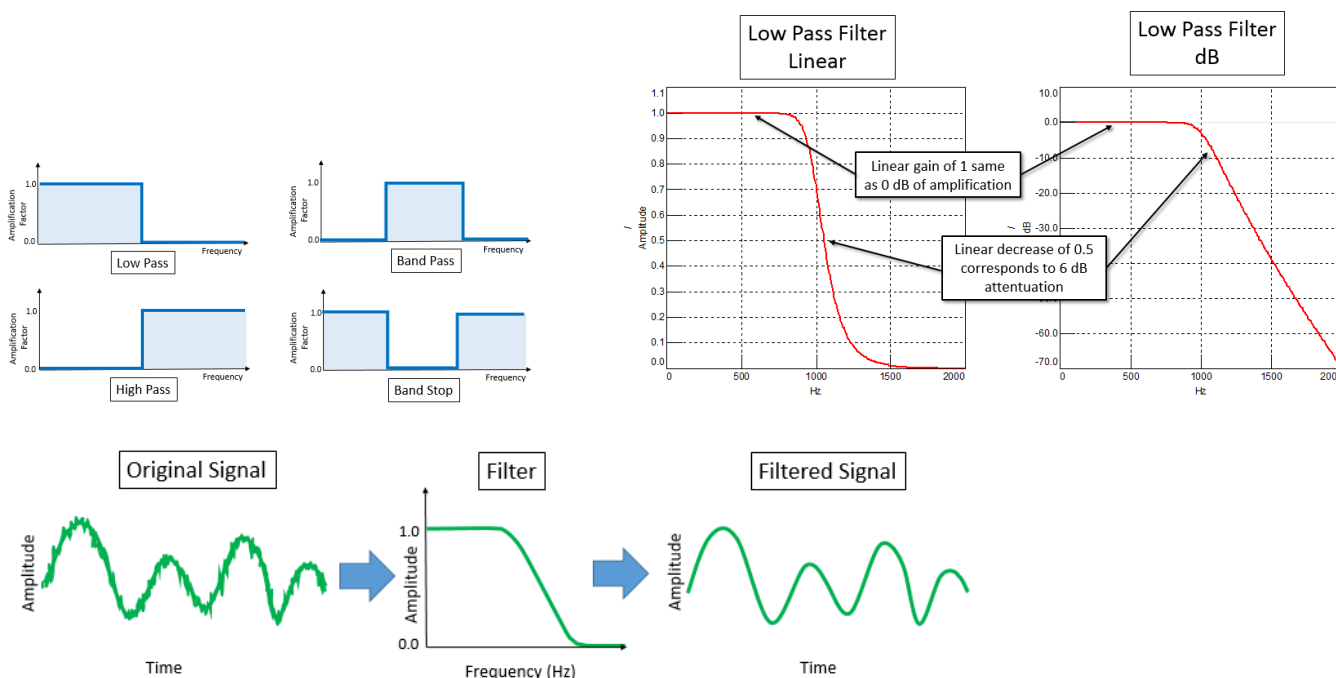
Cíle filtrace

- zesílit či „očistit“ signál, upravit pro další zpracování či zobrazení

Frekvenční charakteristika filtru (dolní/horní/pásmová propust/útlum)

Obecně všechny metody filtrace způsobují zpoždění (fitrovaného signálu za skutečným)!

Frekvenční odezva / časová odezva:



## Základní algoritmy filtrace

### Průměr / Klouzávý průměr (Simple Moving Average)

(lineární. FIR)

```
for(q=0;q<N;q++) s=s+dat[q];
```

```
res=s/N;
```

efektivnější realizace:

Přijde další dato....

- typicky kruhový buffer pro uložení (není třeba posouvat pole)

- nepočítáme celý průměr ale jen odečteme posl.hodnotu a přičteme nově příchozí

## Základní filtr

(lineární, IIR)

$$D_{out} = D_{in} \cdot (1-f) + D_{out-1} \cdot f \quad (f \text{ je v rozsahu } <0;1>)$$

- pomalá reakce na skokové změny vs přílišná reakce na špičky

- filtr s  $f = 0.8, 0.9, 0.95, 0.98, 0.99, 0.995$  má vždy přibližně dvojnásobnou čas.konstantu.

## Špičkový filtr

(nelineární, FIR)

funkce median - odfiltruje odlehlé hodnoty

Obvykle jen na několik hodnot (3 či 5).

Pro více hodnot nezapomenout na efektivitu. Quicksort  $O(n \cdot \log(n))$  → Quickselect  $O(2n)$  (průměrně) → ...

## Časový špičkový filtr

(nelineární)

Na digitální signál, filtruje krátké špičky v digitálním signálu

$i$ =(reálný) vstup,  $r$ =výstup,  $T_0$  = časový limit pro low,  $T_1$ =limit pro H,  $t$ =čas

$t++$ ;

if ( $r==0$ ) if ( $i==0$ )  $t=0$ ; else if ( $t>T_1$ )  $r=1$ ;

if ( $r==1$ ) if ( $i==1$ )  $t=0$ ; else if ( $t>T_0$ )  $r=0$ ;

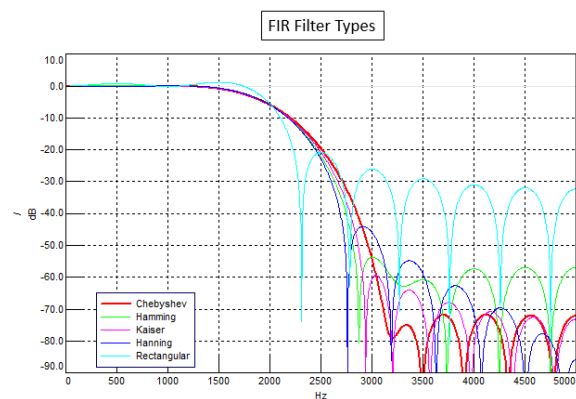
## FIR filtr

Nerekurzivní algoritmus. Konečná odezva.

$$y(n) = \sum_{k=0}^q b_k x(n - k)$$

Výhody: jednodušší návrh. Stabilita, definované zpoždění, lineární fáze/zpoždění

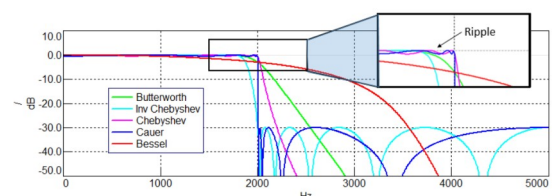
Nevýhody: vyšší výpočetní (a paměťové) nároky při realizaci (runtime), vyšší zpoždění, nemají analogový ekvivalent



## IIR filtr

Rekurzivní algoritmus. Nekonečná odezva.

Method	Pass Band	Transition Width	Stop Band
Butterworth	Flat	Wide	Monotonic
Inv Chebyshev	Flat	Narrow	Ripple
Chebyshev	Ripple	Narrow	Monotonic
Cauer	Ripple	Narrowest	Ripple
Bessel	Sloping	Very Wide	Sloping



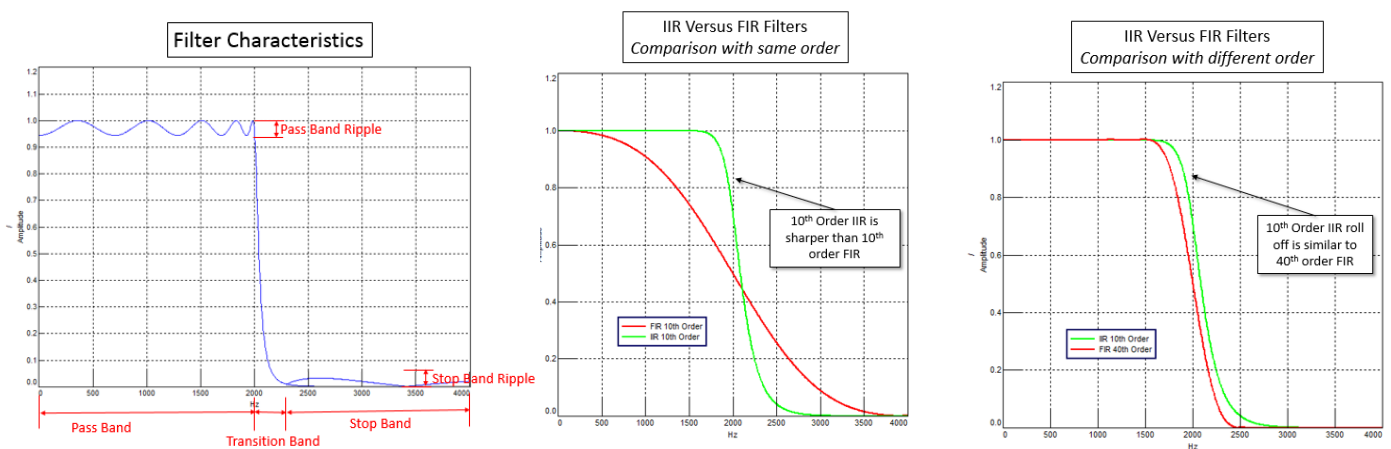
$$y(n) = \sum_{k=0}^q b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^p a_k y(n-k)$$

Výhody: nižší výpočetní nároky, menší zpoždění

Nevýhody: složitější návrh, problém stability (přenos aritmetiky), nelineární změna fáze, nelineární zpoždění (obvykle největší v přechodové oblasti)

pozn. IIR prvního řádu je vždy stabilní. Výše už nemusí. Kritériem stability lze posoudit z umístění pólů - Póly IIR filtru musí ležet uvnitř jednotkového kruhu v komplexní rovině, aby byl filtr stabilní. To znamená, že absolutní hodnota každého pólu musí být menší než 1. I matematicky stabilní filtr může být nestabilním kvůli nepřesnostem ve výpočtu (přesnost zobrazení čísel v mcu)

### Srovnání FIR vs IIR:



### Převod na dvoustavovou hodnotu

Převod spojitého/vícestavového signálu na dvoustavovou hodnotu (ne/ano).

#### Prahování

Prostá rozhodovací úroveň

If (signal>treshold) then log1 else log0

Problém – hodnoty blízko rozhodovací úrovně – zákmity

#### Prahování s hysterezí (Schmitt trigger)

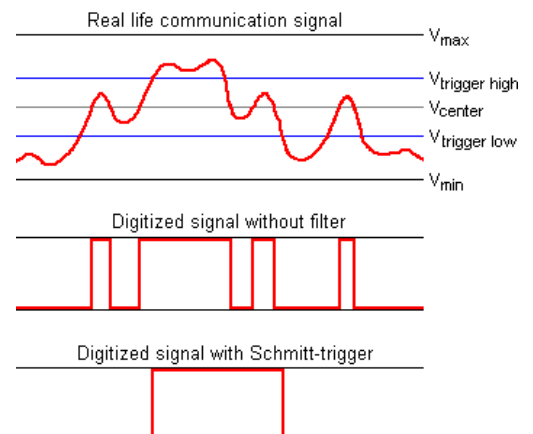
Dvě rozhodovací úrovně – jistá log1 – treshold1 a jistá log0 – treshold0.

Hystereze – rozdíl treshold1-treshold0 (platí že treshold1>=treshold0)

if signal>=treshold1 then log1

else if signal<treshold0 then log0

else “stav nezměněn”





## **Prahování s hysterezí a filtrací**

Dvě rozhodovací úrovně a plus časová složka kdy je spolehlivě  $\log_0/1 - \text{time}_0/\text{time}_1$ .

## 6. Fyzické sensory

- aktivní/pasívní, kontaktní/bezkontaktní/invazivní, dle druhu měřené veličiny (elektrické – napětí, proud, odpor. Neelektrické – mechanické (poloha, úhel, výška, rychlost, zrychlení, tlak, síla, otáčky), magnetické, optické, tepelné, akustické, chemické, pneumatické, nukleární, biologické, ...), dle principu činnosti (mechanické, odporové, kapacitní, indukční, optické, zvukové, radiové, magnetické, termoelektrické, piezoelektrické, ...), spojité/nespojité, lineární/nelineární, analogové/číslíkové, absolutní/diferenční(rozdílové)

### Čidla polohy

- kontaktní/bezkontaktní

#### Spínače, výpínače, přepínače (switch)

- dvoustavové, mechanický kontakt

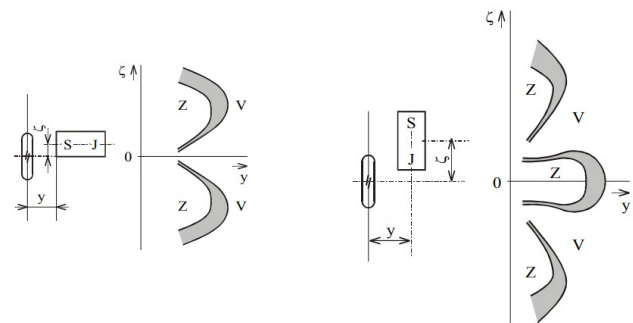
- AC/DC, max.napětí (odlišné pro AC/DC), max.proud, minimální proud, počet cyklů

- zákmity při spínání, rozepínání

- patří sem i **magnetická čidla** (jazýčkový kontakt / reed contact)

magneticky měkké kontakty spínané externím mag.polem (magnetem), NO/NC (normally open, normally closed), hystereze, vícenásobné zóny sepnutí.

Použití: měření otáček (bicykl), průtokoměry, dveřní spínače

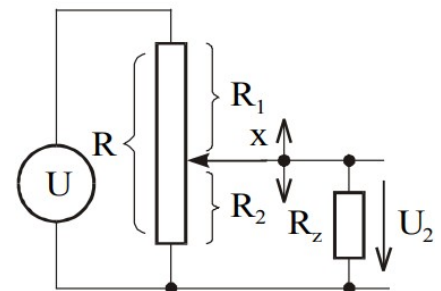


#### Potenciometr (rotace, poloha)

- rotační (rotační víceotáčkový), lineární (v mech.smyslu)

- změna odporu (lineární. logaritmická)

- mechanický kontakt! (velmi vhodné ošetřit proti zákmitům při změně hodnoty, omezená linearita dráhy, omezená, časově proměnná kvalita kontaktu, omezená zatížitelnost.



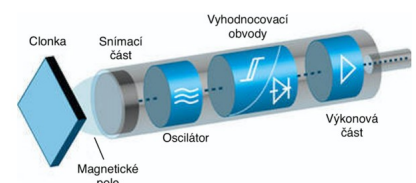
#### Hall sensor

Provedení dvoustavové i spojité (magnetický sensor, zesilovač, elektronický spínač/konvertor) - lze užít jako sensor přiblížení, detektor pohybu, detektor proudu. Hodnoty spínacích polí se typicky pohybují v rozmezí 1 až 10 mT.

Pozor, obvykle mají nezanedbatelnou teplotní závislost.

#### Magnetorezistor (AMR)

Provedení dvoustavové i spojité. změna odporu (řádově %) úměrná mag.poli ( $\mu\text{T}$  až  $\text{mT}$ ) nezávisle na jeho polaritě



## Indukční sensor

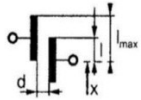
Aktivní sensor, typicky dvoustavový, s oscilátorem rozlad'ovaným přiblížením kovového materiálu.

## Kapacitní sensory bezkontaktní

obdoba indukčních sensorů, RC oscilátor kde kapacita je ovlivňována z vnějšku – možno užít i pro nekovové předměty. Náchylnější na rušení elektromagnetickým polem, nižší citlivost

## Kapacitní sensor

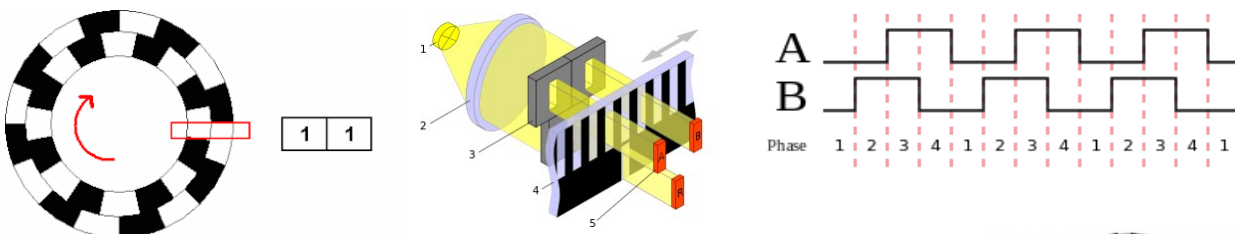
Provedení dvoustavové i spojitě, kondenzátor s elektrodami (typicky jedna posuvná a překrývající druhou) – změna polohy tedy implikuje změnu kapacity, použitelné pro um až mm.



## Optické sensory

**Optické závory** – dvoustavové provedení - IR sensor, laser sensor, optický sensor – detekce paprsku, přerušeni paprsku v různých spektrech. Měřící rozsah od 0.1mm do 100m.

**Inkrementální (kvadrurní) sensor** posuvu/rotace – kombinace optických závor a dvou o 90st posunutých mechanických clon pro rozlišení rychlosti a směru pohybu.

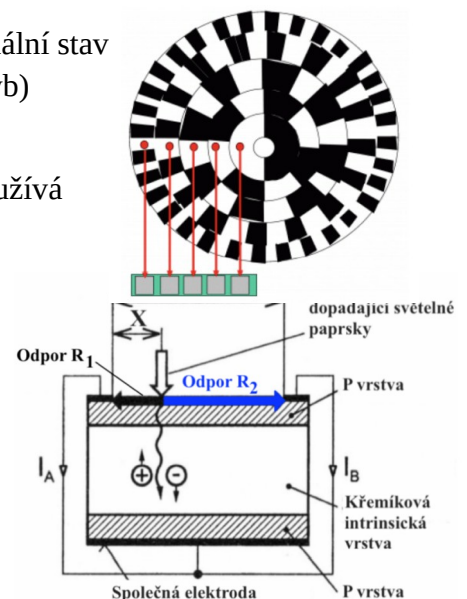


Detekční algoritmus – stavový automat – přechází stav (2b) + aktuální stav beze změny, pohyb vpřed, pohyb vzad, chyba (= příliš rychlý pohyb)

**Absolutní optoelektrický sensor** - kombinace optických závor a mechanických clon kódujících polohu. Pro kódování se nejčastěji užívá Grayův kód (změna o 1bit).

**PSD sensor** (Position Sensitive Detectors) - Speciální typ PIN fotodiody určující pozici (presnosti um) dopadajícího paprsku na rezistivní fotocitlivou plochu. Varianty 1D i 2D. Použití pro měření pohybu, pozice, úhlů, kvality potvrchu.

**Optoelektronický sensor s triangulací** - Sensory pracují s odraženým paprskem. Vyhodnocuje se úhel/pozice dopadu vysílaného a zpět odraženého paprsku což je funkce vzdálenosti objektu.



**TOF sensor** (Time of Flight) – vyhodnocuje se dobu letu vyslaného a odraženého paprsku která je úměrná vzdálenosti.

## Ultrazvukový sensor

Senzor měří čas, od vyslání ultrazvukového impulzu do doby, kdy se impulz odrazil od cílového objektu. Obvyklý rozsah je 10cm-10m.

Vliv teploty a tlaku na rychlost šíření vln. Rozptyl/útlum/odrazy vln.

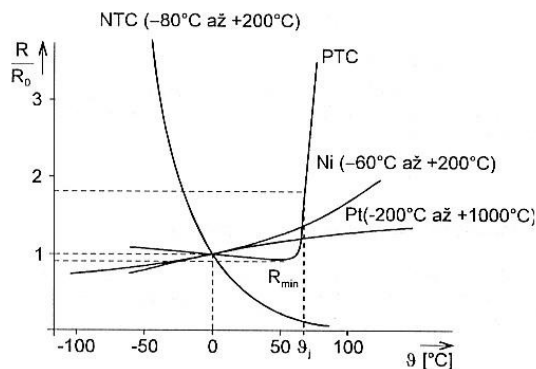
## Čidla teploty

- kontaktní/bezkontaktní

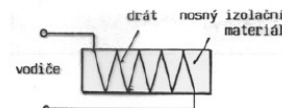
!pozor na vlastní oteplení sensorů při měření

### kovové odporové

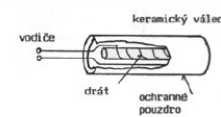
změna odporu vodiče s teplotou. Výhody: velký teplotní rozsah, linearita, časová stálost. Nevýhody: malá citlivost (malá změna rozsahu), pomalejší reakce na změnu. Jako materiál se využívá platina (typ.rozsah -200 až 1000st.C. Závislost odporu na teplotě  $T$  :  $R = R_0 * ( 1 + 3,908.10^{-3} T - 0,5802.10^{-6} T^2$ , typ. Čidlo pt100 kde  $R_0=100R$ ), nikl, měď a další slitiny.



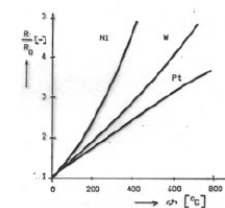
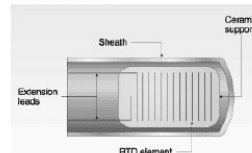
#### • spirálové vinutí



#### • vinutí v keramickém pouzdře



#### • tenký film



### Polovodičové odporové

Termistor/NTC, pozistor/PTC, monokrystalické/CMOS. změna odporu s teplotou vlivem závislosti koncentrace volných nosičů náboje na teplotě. Výhody: velká citlivost. Nevýhody: horší stabilita a větší šum, malý teplotní rozsah, nelinearita. Typický rozsah NTC je -50 až 150st.C, ale spec.provedením lze i mnohem větší. PTC se často používají jako dvoustavové sensory v rozsahu 60-180st.C. kvůli ostrému zlomu v charakteristice.

### Polovodičové PN sensory

funkce je založena na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Teplotní koeficient je záporný a dle struktury přechodu je pohybuje v rozmezí -2,5 až 2 mV/K. Typický měřicí rozsah je -50-125st.C. Výhody: linearita, snadná integrace. Nevýhoda: bez kalibrace omezená přesnost

### Termoelektrické sensory / termočlánky

Fuknce založena na tzv. Seebeckovu jevu (přeměna tepelné energie na elektrickou spojením dvou vodičů z různých materiálů v jednom bodě, přičemž na volných koncích vzniká (slabé) elektrické napětí). Typický měřicí rozsah: - 200 až 3 500 °C. Termočlánky se rozdělují podle druhu spojených kovů do kategorií T/J/E/K/N/S/R/B. Výhody: lineární (ne zcela a vždy) charakteristiky, velký teplotní rozsah, malé rozměry sond (< 1mm). Nevýhody: malá citlivost (malé hodnoty výstupního napětí), složitější správné připojení k měřicí jednotce pro eliminaci vlivu rušení (okolní teploty na měření).

Označení termočlánku	Původní označení	Měřicí rozsah [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700

### **Krystalový sensor**

využívá se teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu (převod teploty na frekvenci). Typický měřicí rozsah: od -80 °C až +250 °C a rozlišovací schopnost až 10e-4 °C. Výhody: velké rozlišení. Nevýhody: horší stabilita, citlivost na rušení.

### **Sensor s optickým vláknem**

Různé principy (ovlivnění optických ztrát teplem (vlákna a nebo vloženého materiálu), excitace fosforové vrstvy paprskem kdy rychlost odpovědi je funkcí teploty). Výhody: vysoký rozsah teplot (do 1500st.C), vhodné do nebezpečných prostor (např. Výbušné, snadno vznětlivé), odolnost proti elmag.rušení.

### **Infračervené čidlo (IR)**

Bezkontaktní měření. Všechny objekty vyzařují teplo ve formě IR záření. Množství je úměrné teplotě ale je ovlivněno emisivitou povrchu + odrazivostí povrchu (odráží teplo z okolí). Sensory mají obvykle daný zorný úhel (1 až 100st). Problematické měření s odrazivých povrchů (sklo, lesklé kovy)

Infračervené kamera – pole infračervených čidel. Speciální čočky.

# 7. Periferie v mikrokontrolerech pro připojení senzorů

## Peripheral Interface

Tři základní způsoby komunikace s periférií

- Pooling – dotazující. blokující čas procesoru
- Interrupt – Periferie pro požadavku na pozornost (např. příjem dat, chyba, stanovený vzor, úroveň atp) vyvolá přerušeni. Ale nemusí být nutně po jednom znaku (může být interní bufffer periférie, liší se procesor od procesoru)
- DMA – periférie předává data přes DMA řadič kterým jsou rovnou ukládány do paměti. Volitelně interrupt po dokončení/v polovině atp.

Příklad jednotlivých přístupů (pseudokód) prezentovaný na úloze výstupu signálu o frekvenci 10kHz.

### Pooling

```
p0 = Pin(0, Pin.OUT);
While(True):
    p0.on() # set pin to 1
    delayus(50) #50us pause
    p0.off() # set pin to 0
    delayus(50)
```

### Interrupt

```
pout=0;
p0=Pin(0, Pin.OUT, value=p0)
timer1_set(50)
def timer1():
    p0.value(p0)
    p0=1-p0 #change 0<->1
```

### DMA

```
p0 = Pin(0, Pin.OUT);
po=[0, 1]
dma_settimer(50);
dma_pinout(pout, 2, restart)
;
```

Jednoduchost, bez vazby na periférie procesoru

Kód je spuštěn jen při požadavku Po spuštění pracuje sám buď bez potřeby procesorového času nebo s blokovým zpracováním dat

Plně vytěžuje procesor, nemusí být zajištěno přesné časování, obtížná modifikace kódu

Dochází k přerušeni hlavního kódu, je třeba řešit přístup k datům (synchronizaci)

Nehodí se pro komplexní úlohy, např. kde neznáme délku dat

## GPIO

GPIO = General purpose input-output.

Vstup: Floating, With pull-up/down. Napěťové úrovně. Hystereze (ST = Schmith trigger).

Výstup: Dvoustavový. Push-pull (PP) / OpenCollector OpenDrain (OC). Napěťové úrovně. Maximální proud. Rychlost.

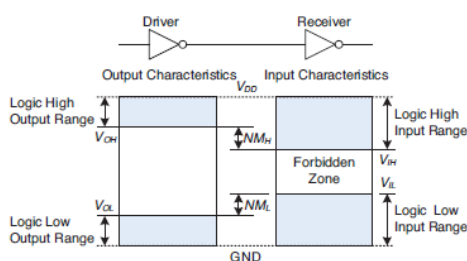
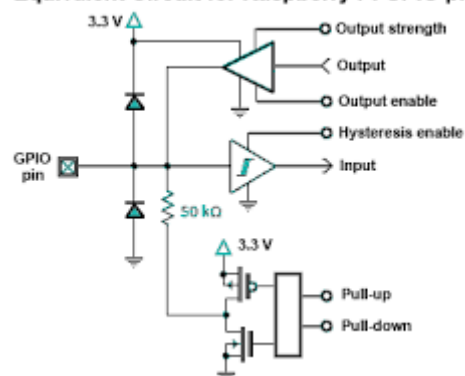
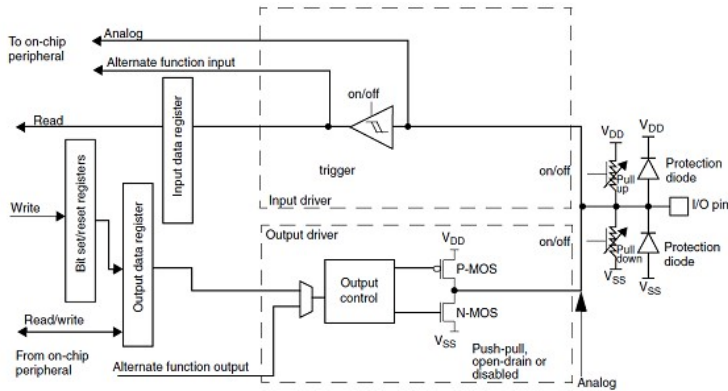


Figure 1.23 Logic levels and noise margins

Equivalent Circuit for Raspberry Pi GPIO pins





Port bit configuration table

Configuration mode	CNF1	CNF0	MODE1	MODE0	PxODR register
General purpose output	Push-pull	0	0	01	0 or 1
	Open-drain	0	1	10	0 or 1
Alternate Function output	Push-pull	1	0	11	don't care
	Open-drain	1	1		don't care
Input	Analog	0	0		don't care
	Input floating	0	1	00	don't care
	Input pull-down	1	0		0
	Input pull-up	1	1		1

Output MODE bits

MODE[1:0]	Meaning
00	Reserved
01	Max. output speed 10 MHz
10	Max. output speed 2 MHz
11	Max. output speed 50 MHz

## GPIO jako výstup – připojení periférií

Log. úroveň 0/1 → odpovídající napětí, ale omezený proud (typicky třeba max. 4,10,20mA)

Co lze například připojit? (kromě vstupů dalších logických obvodů)

### LED dioda

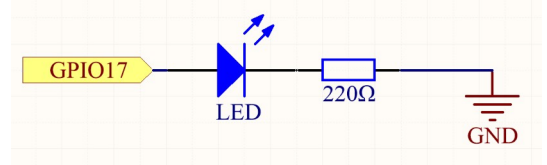
LED diody využívají PN přechod k emitování světla (elektroluminiscence). Řízení LED viz její VA charakteristika. Svítivost je (přibližně, v jistém rozsahu) úměrná příkonu (proudu).

Pozor - nepřipojovat bez omezujícího odporu.

$$R = (U_n - U_r) / I$$

( $U$  = výstupní napětí gpio,  $U_r$  = napětí diody,  $I$  = požadovaný proud/svítivost, typicky 2 až 20mA dle typu diody).

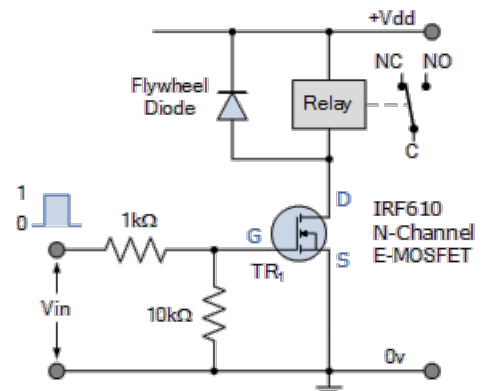
Pozor, pro 3.3V už některé diody nemusí mít dostatečně nízké  $U_r$  (modré, bílé) aby byli přímo připojitelné na gpio s dostatečným jasem. Pozor na maximální výstupní proud pinu (nepřekročit).



### Relé

Mechanický spínací prvek, cívka (elektromagnet) → magneticky ovládaný spínač/přepínač – poskytuje galvanické oddělení, může spínat vyšší proudy/napětí.

Cívka relé potřebuje k sepnutí obvykle vyšší proud a napětí než poskytne GPIO, takže je nutné spínat relé přes pomocný prvek, typicky tranzistor.

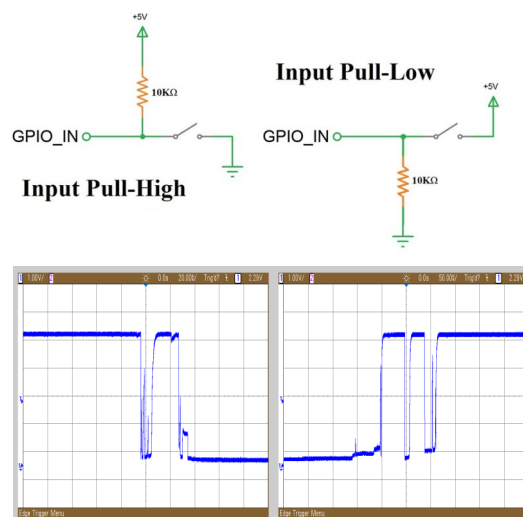


## GPIO jako vstup – připojení periférií

Detekce vstupního napětí v daných intervalech (log. 0/1). může sloužit jako vstup z dalších logických systémů, jako dvou stavový vstup (např. vstup z PIR detektoru (detekce pohybu osob))

Použití jako vstupu z **tlačítek/spínačů** – viz obrázek – jedna úroveň signálu je definována externím (nebo vnitřním pullup/down) odporem, druhá úroveň vznikne stisknutím tlačítka.

Pozor při stisku tlačítka (mechanický prvek) dochází k okamžiku stisku/puštění/přepnutí k zákmitu signálu – viz obr. To je třeba programově ošetřit. (tyto jevy jsou typicky <1ms)

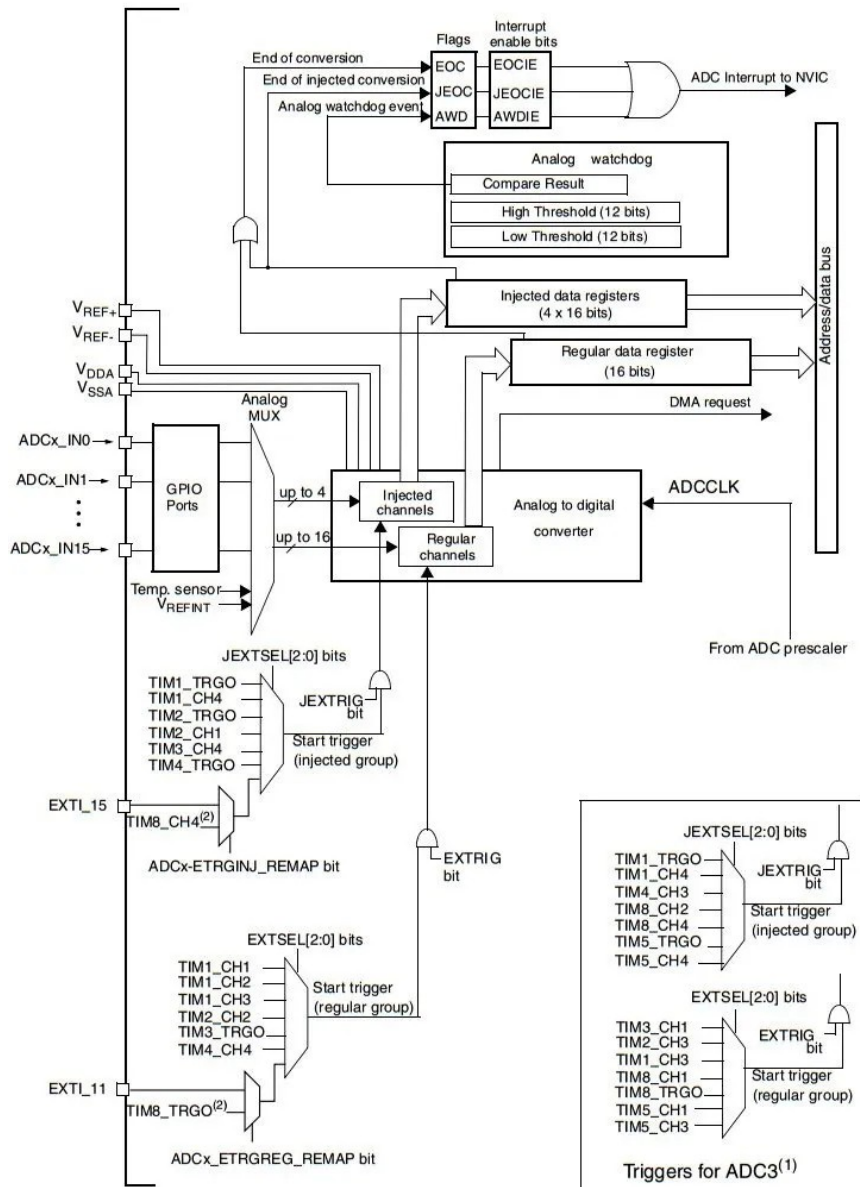


## ADC

ADC (analog-digital converter) – je obvod převádějící vstupní analogovou hodnotu na digitální – číselnou které je uměrná vstupní analogové hodnotě - typicky vstupnímu napětí. Vstupy do adc jsou typicky připojeny na vstupní piny, ale AD převodník může dále mít speciální interní vstupy jako je teplota, napětí záložní baterie, referenční napětí, vstup z interního operačního zesilovače atp.



## Single ADC block diagram



ADC vstupy – mají definovaný napěťový rozsah, mohou být jednoduché (Single edge) nebo diferenciální (Differential) (tj. vyhodnocuje/převádí se rozdíl napětí mezi dvěma vstupy). Mohou mít na vstupu zesilovač (OpAmp, někdy programovatelný). Obvykle bývá na vstupu Multiplexer - tj. analogové vstupy se postupně připojují na převodník, nechtou se najednou. To může být někdy na závadu, takže některé microcontrolery mají více převodníků a pak je možné číst více vstupů najednou / synchronně).

Z elektrického hlediska se referenční napětí pro převodník může odvozovat od napájení, od interní reference nebo od externích vstupů  $V_{ref+}/V_{ref-}$  ( $V_{DDA}, V_{SSA}$ ). Na vstupu adc je typicky Sample&Hold obvod – u připojeného vstupu je třeba dodržet minimální vstupní impedanci (input source resistance).

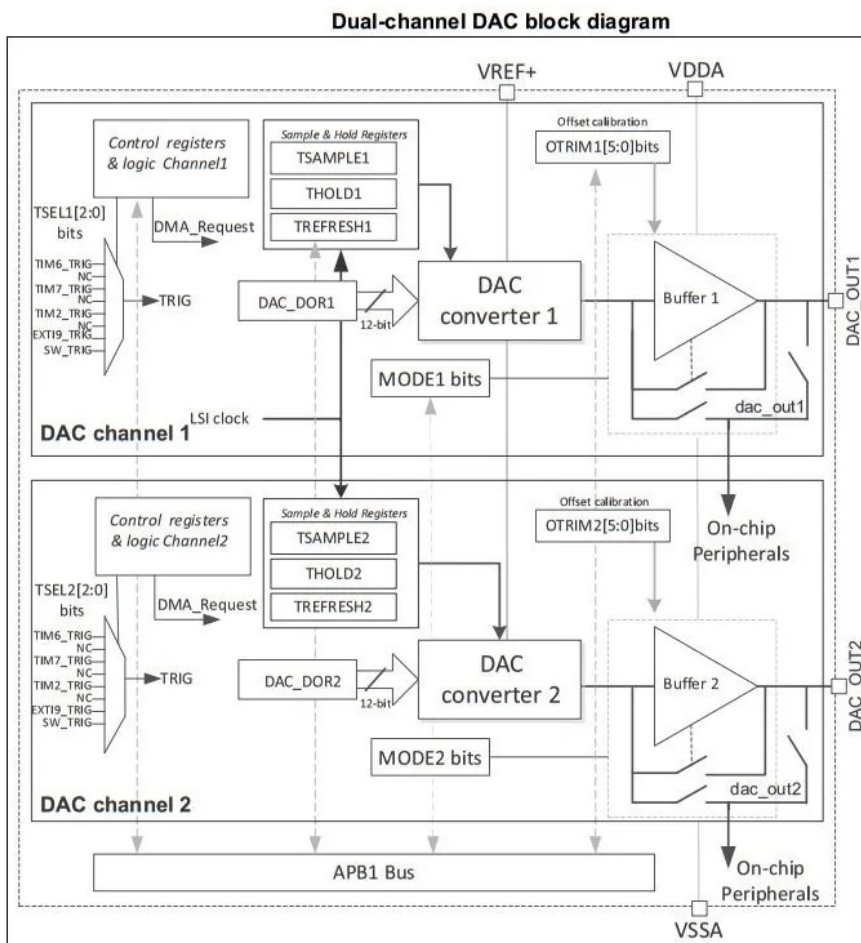
Časování převodu adc je typicky odvozeno od interních hodin procesoru, nebo od speciálního interního volně běžícího časovače (nižší spotřeba, nižší přesnost časování – možnost běhu při sleep

režimu). Konverzi je možné zahájit SW (single conversion, scan conversion, autorepeat) ale také pomocí externího vstupu (trigger).

Konverze může být jednoduchá/jednokanálová (single conversion) nebo vícekanálová (N-kanálů postupně, scan) a nebo průběžná (continuous) kdy po dokončení jedné sekvence převodu se automaticky opět nastartuje.

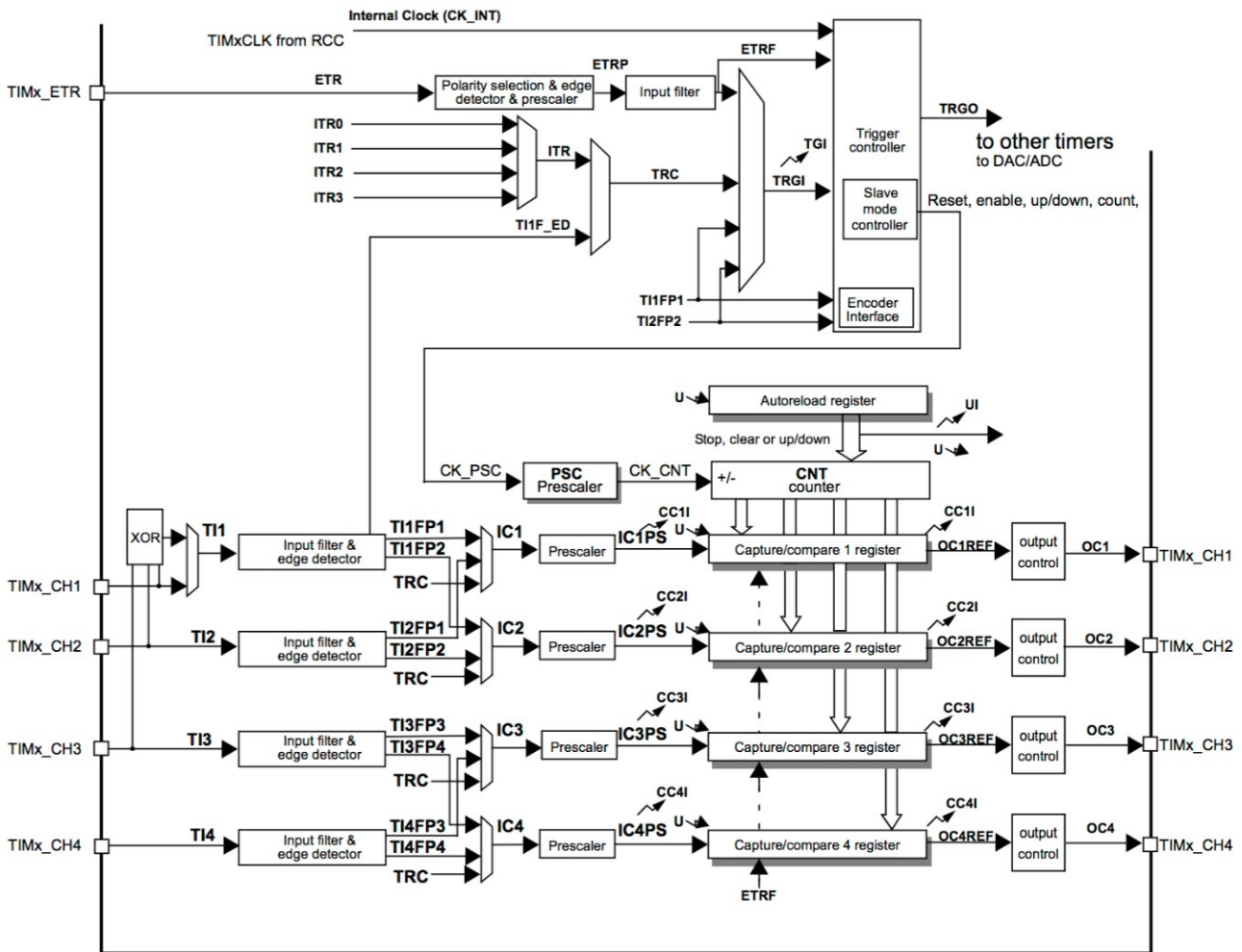
## DAC

DAC (digital-analog converter) – Obvod konvertující číselnou hodnotu v interním registru na analogový, typicky napěťový signál. Výstup DAC je možné typicky připojit na výstupní pin. Někdy je ho též možné interně propojit s interním komparátorem nebo Operačním zesilovačem (OpAmp) na jehož druhý vstup je přivedena Analogový hodnota ze vstupního pinu.



DAC output: output pin, internal OpAmp, internal comparator

## Timers (Counters, PWM)



(Timer mode / Input mode, Catch mode / PWM mode)

Časovače/Čítače mohou být realizovány SW nebo HW. Slouží pro přesné časování událostí, odměřování času, pro čítání událostí, nebo pro generování (přesně časovaného) signálu.

### Timer mode

Čítač slouží pro měření času nebo pro generování přerušení – buď po daném čase nebo periodicky se opakujícího.

### Input mode, Catch mode

Vstup časovače je spojen s externím vstupem – umožňuje buď přímé (po)čítání vnějšího signálu a nebo odměřování času na jeho základě.

### PWM mode

Čítač je nastaven do módu generování pwm signálu – perioda(frekvence) výstupního signálu je typicky fixní a měníme střídu signálu (tj. místo překlopení výstupu uvnitř periody pomocí změny komparačního registru).

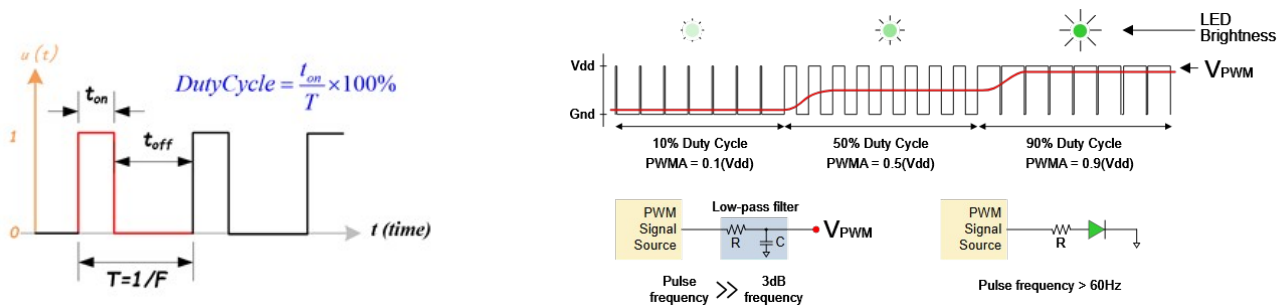
Klíčové parametry, které definují PWM signál, jsou

– perioda [s] (frekvence [Hz] = 1/perioda)

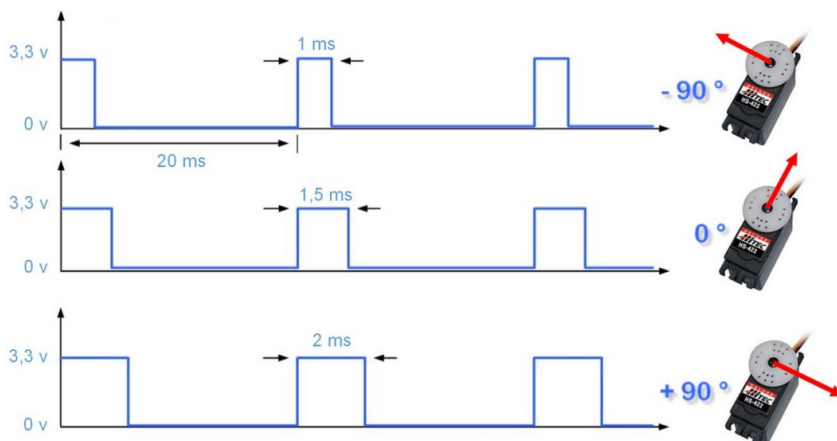
- střída (duty cycle) což je poměr doby, kdy je signál v zapnutém stavu, k celkové době jednoho cyklu. Vyjadřuje se obvykle v procentech, tj. například 25% střída znamená, že signál je zapnutý čtvrtinu času a vypnutý tři čtvrtiny

- amplituda - hodnota napětí nebo proudu, kterou signál dosahuje v zapnutém stavu

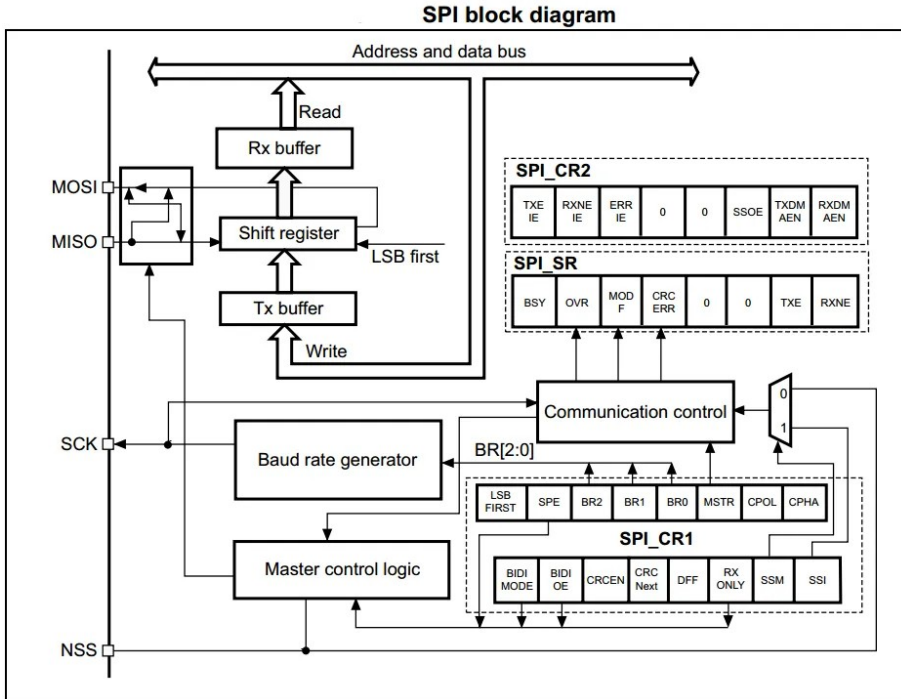
Pomocí PWM lze řídit výkon dodávaný do elektrické zátěže pomocí digitálního signálu, což může sloužit například pro regulaci jasu LED nebo rychlosti motoru, případně jako náhrada DAC.



Výhoda PWM oproti DAC může být ve vyšší odolnosti proti rušení (digitální vs analogový signál). Existuje řada zařízení jejichž funkci lze externě ovládat pomocí PWM signálu. Jedním příkladem jsou serva, kdy běžná serva lze ovládat PWM signálem o frekvenci 50Hz (tj. Perioda 20ms) a střídou v rozsahu 5-10% (tj. Aktivní signál 1 až 2ms = poloha  $-90^\circ$  až  $90^\circ$ ).



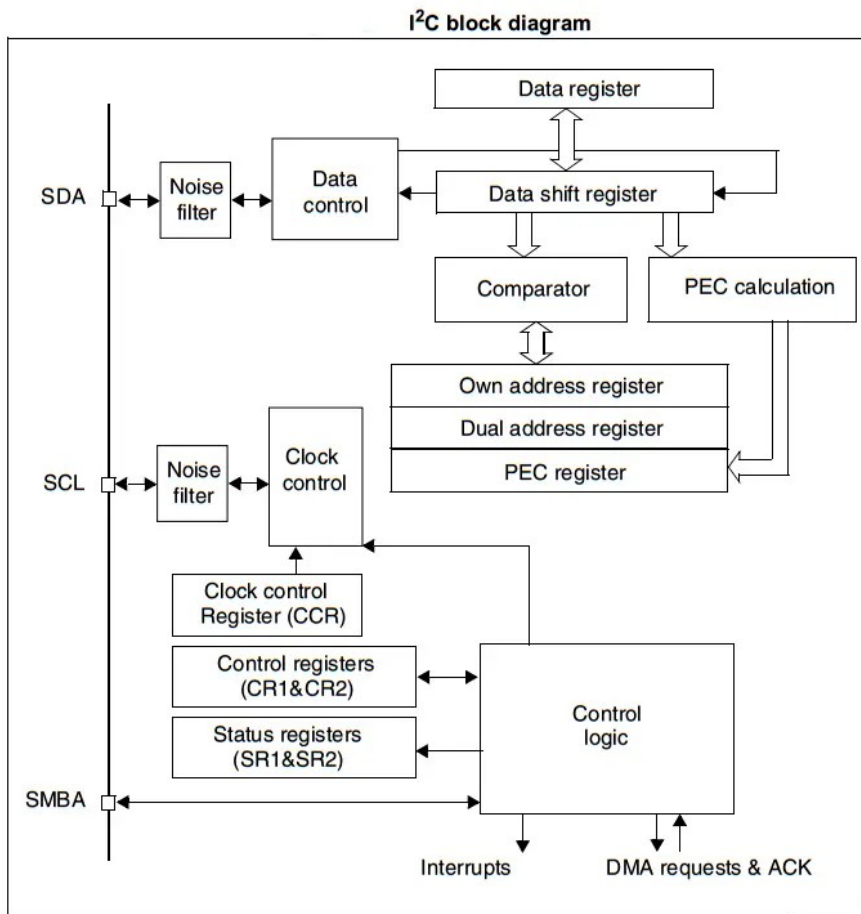
## SPI (QSPI)



SPI (Serial peripheral interface) – synchronní sériové rozhraní, SCK, MOSI, MISO (=SDO, SDI), NSS(=SCE)

QSPI – (quad SPI) – spi se 4 bitovou datovou komunikací (např. komunikace s uSD kartou)

## I2C



Synchroni sériová komunikace, (multi)master-slave

komunikační módy: slave / master receiver / transmitter, 7/10bit address, někdy generování CRC

Rychlost: 100kbps – 400kbps – 1 Mbps – 3.4 Mbps

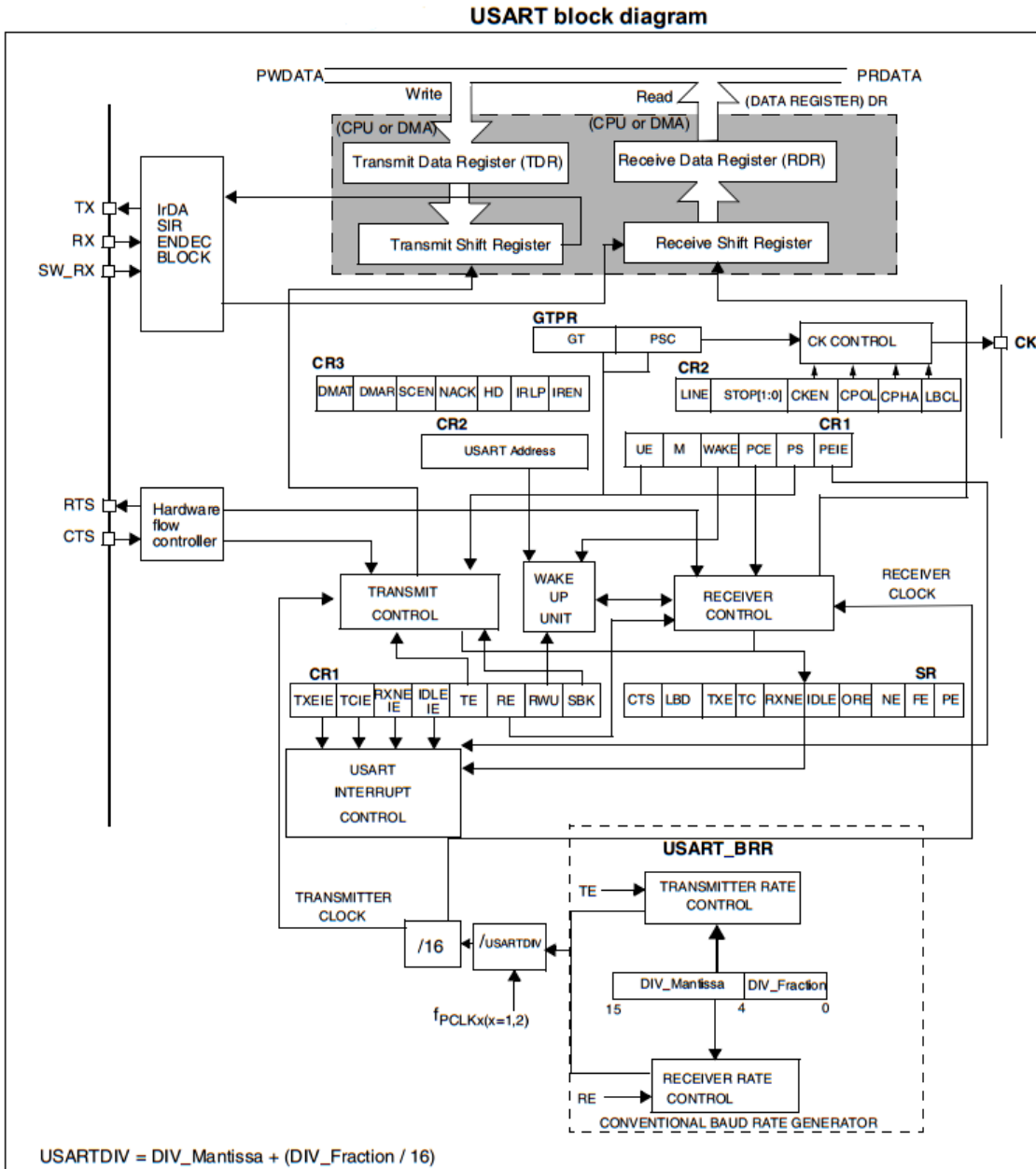
Interrupt – Adres received (valid adres), Data received, Data transmitted, Error

Errors – Bus Error (start/stop na špatném místě), ACK (není ACK), Stretch error (někdo „natahuje“ hodiny)

DMA – Data Rx,Tx

(!relativně často u mcu HW implementační chyby ve slave komunikaci)

# UARTs (USARTs)



Asynchronous Rx/Tx communication.

Data Format: 7/8/9 bits, Parity (none, odd, even), Stopbits (1, 1.5, 2), Signal inversion

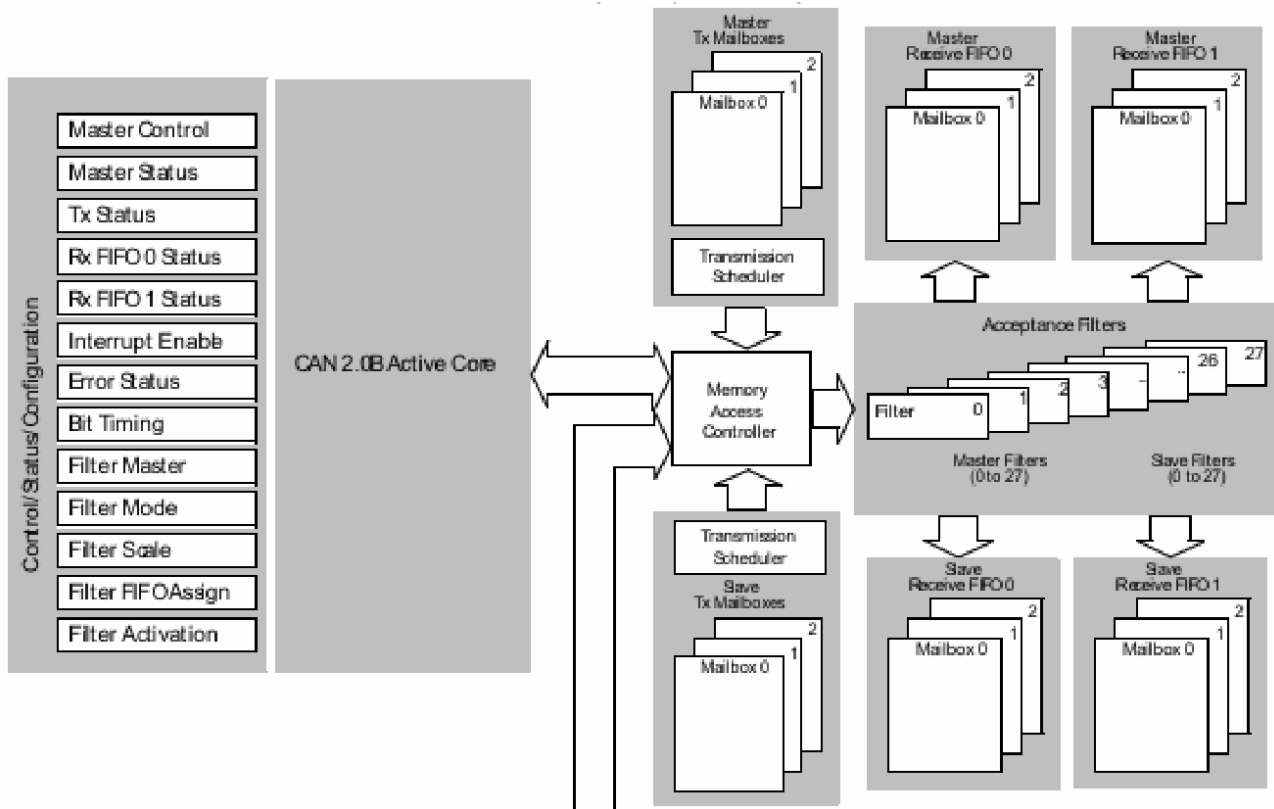
Flow control: none, RTS/CTS, RS485 mode (RTS pro řízení směru), Half-duplex mode. AutoBaudRate, break, někdy automatické generování CRC

Interrupt: Transmit buffer free (!není dokončeno vysílání), Transmit completed, Received char, Error detection, Break detection

DMA: Tx, Rx queue

Errors: Overrun (sw nestihl přijmout data), Noise (chybé časování/přechod bitu, šum), Frame error (chyba ve stop bitu), Parity error (chyba parity)

## CAN bus



Relativně složitá periférie – paketový přenos, časování, vícenásobné vysílací a přijímací fronty, filtry na vstupní zprávy, DMA



# Průmyslové PLC

Programovatelný logický automat (PLC = programmable logic controller) je v zásadě průmyslový počítač uzpůsobený a používaný pro automatizaci průmyslových procesů v reálném čase.

Tomu je uzpůsoben styl programování i typ vstupů/výstupů.

Mezi výrobce PLC patří např. Siemens, Rockwell, Omron, Schneider Electric, ... - Obvykle nejsou výrobky vzájemně kompatibilní.



## Programování PLC

Programy často nejsou mezi jednotlivými výrobci (a někdy ani modely jednoho výrobce) přímo přenosné.

Pro programování PLC se používají (ne všechny PLC podporují všechny možnosti) a je možné je případně kombinovat následující přístupy:

**Jazyk strukturovaného textu (ST)** - programovací jazyk na vysoké úrovni abstrakce, který se velmi podobá programování v běžných programovacích jazycích (Pascal) nebo je z nich přímo odvozen.

Příklad: program řídí hladinu tekutiny v nádrži pomocí dvou hladinových spínačů

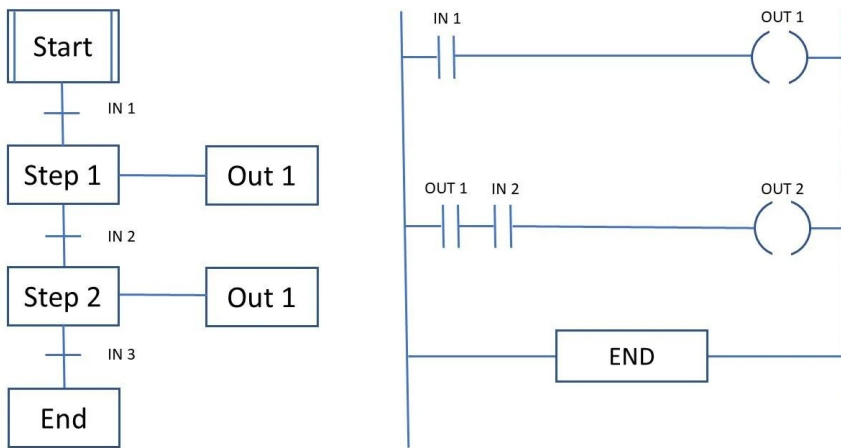
```
PROGRAM LevelControl
VAR
    LevelHigh : BOOL; (* Vstupní hladinový spínač *)
    LevelLow : BOOL; (* Vstupní hladinový spínač *)
    InletValve : BOOL; (* Výstupní hladinový spínač *)
    OutletValve : BOOL; (* Výstupní hladinový spínač *)
END_VAR

IF LevelLow THEN
    InletValve := TRUE;
    OutletValve := FALSE;
ELSIF LevelHigh THEN
    InletValve := FALSE;
    OutletValve := TRUE;
ELSE
    InletValve := FALSE;
    OutletValve := FALSE;
END_IF;
```

**Jazyk funkčního blokového schématu (FBD)** - Je (obvykle) grafické znázornění logických funkcí (AND, NAND, OR, NOR, atd. - ale i vyskoúrovňové bloky) . Popisuje funkci mezi vstupními a výstupními proměnnými.

**Sekvenční funkční diagram (SFC)** - vývojový/stavový diagram vašeho programu / algoritmu. Obvykle grafický programovací jazyk Definuje kroky a návaznosti, kterými se váš program pohybuje.

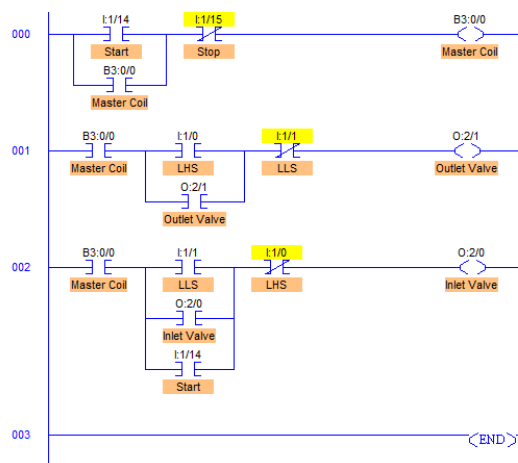
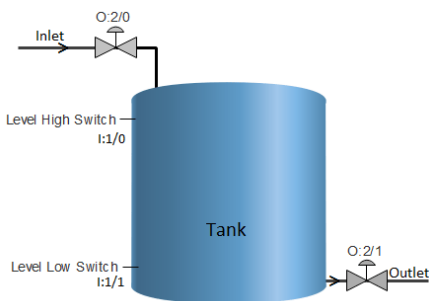
Příklad SFC diagramu a ekvivalentního ladder diagramu



**Jazyk seznamu instrukcí (IL)** - mnemotechnický kód a seznam příkazů. Textový programovací jazyk, který se podobá assembleru. Méně používaný, ale užitečný pro specifické úlohy na nízké úrovni.

**Jazyk příčkového diagramu (LD)** - nejpoužívanější programovací jazyk PLC. Má napodobovat mechanické relé v panelu, které programovatelný automat nahrazuje. Má dvě svislé kolejnice a řadu horizontálních příček mezi nimi. Ovladače většinou skenují zleva doprava a shora dolů. Výstup jednoho stupně je k dispozici pro další příčku.

Příklad: Když hladina dosáhne nízké úrovně (sensor LLS), odtok (Outlet) je zablokován a přítok (Inlet) je povolen, dokud není dosaženo vysoké úrovně (sensor LHS). Když je detekována vysoká úroveň, odtok je povolen a přítok je zablokován. Vše řízeno tlačítkem start a stop.



## 8. Sensory a protokoly s lokální sběrnici (I2C/SPI/UART/1wire)

	RS232	RS485	CANbus	I2C	SPI	1wire	USB	
<b>Norma</b>	EIA-232	EIA-485	ISO 11898	Philips		maxim.com	usb.org	
<b>Typ komunikace</b>	p2p	m-point s/m-master	m-point	m-point s/m-master	m-point S-master	M-point s-master	P2p (m-point) s-master	p=point s=single m=multi
<b>Duplex?</b>	duplex	half	half	half	duplex	half	half	
<b>Datových vodičů typ.značení</b>	2 (++) RX/TX	2 A/B	2 H/L	2 SCL/SDA	3 (+1n) SCK/SDO/SDI (+CE)	1	2 D+/D-	
<b>Napětí</b>	+/- 5-15V	+/-2V diff	2.5V diff	*L, OC (1.8-5V)	*L (1.8-5V)	*L, OC (3-5V)	3.3V; 400mV diff	
<b>Max.zařízení</b>	2	32 (256)	*C	*C	*C	*C	127	
<b>Kom.rychlost vzdálenost</b>	kb-100kb m-10m	Kb-Mb m-1000m	Kb-Mb m-1000m	100kb(std)-3.4Mb(hs) [<m]	10Mb [<m]	16k (std) (160k od) m-100m	1.5,12; (LS/FS) 480Mb (HS) 5m	
<b>Přenos</b>	async	async	async	sync	sync	async	async	
<b>Jednotka přenosu</b>	Byte	byte	Paket: adresa a 0-8B	byte	Byte/word	byte	Paket 8-256B frame 1ms/125us	
<b>adresace</b>	-	*P	11b,29b	7,10bitů	Vodičem CE	64bitů	-	
<b>zabezpečení</b>	(parita)	(parita)	CRC16	-	-	CRC8	CRC16	
<b>Fyz.odolnost</b>	Zkrat, (napětí) rušení	Zkrat, napětí rušení	Zkrat, napětí rušení	Zkrat	není	zkrat	Není rušení	

\*C – limitováno kapacitou sběrnice a bit.rychlostí

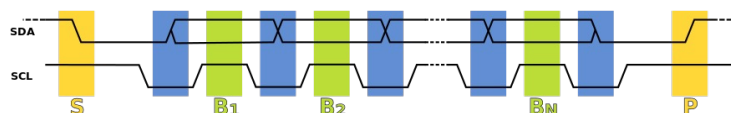
\*L – Úroveň dána připojenými log.obody, typ. 1.8,2.5,3.3,5V. OC=otevřený kolektor

\*P – závislé na protokolu vyšší vrstvy

### I<sup>2</sup>C (IIC)

I2C (Inter-Integrated Circuit) je synchronní sběrnice typu multimaster, původně vyvinutá firmou philips pro připojení nízkorychlostních periférií na desce. (z licenčních důvodů ji někteří výrobci označují i jinak, např. TWI)

Komunikace probíhá pomocí dvou vodičů - hodinový signál SCL (Synchronous Clock) a datový vodič



SDA (Synchronous Data). Sběňuje je typu OC (Open Collector), tj. Log.1 zajišťuje pull-up rezistor, log.0 je pak řízena aktivně obvody. Při probíhající přenosu jsou na SDA vysílány jednotlivé datové bity přičemž platí pravidlo, že logická úroveň na SDA se smí měnit pouze je-li SCL v úrovni L. Toto pravidlo je porušeno ve dvou speciálních případech. A to při vysílání podmínek START a STOP, které se používají k zahájení komunikace a k ukončení přenosu. Každému přenosu tedy předchází vyslání podmínky START (S). Potom je vysílána 7 bitová (10bitová) adresa příjemce a jeden bit R/W, který indikuje požadovanou operaci (čtení/zápis). Další bit ACK je vysílán s úrovní H a je určen k potvrzení přijímací stanice o připravenosti přijímat/vysílat. Dále jsou přenášena data ve směru určeném předchozím bitem R/W. Každý byte je následován jedním bitem ACK. Po ukončení přenosu je vyslána podmínka STOP (P).

Pro řízení komunikace se na I<sup>2</sup>C používá metoda s detekcí kolize. Každá ze stanic může zahájit vysílání, je-li předtím sběrnice v klidovém stavu. Během vysílání musí neustále porovnávat vysílané bity se skutečným stavem SDA. Je-li zjištěn rozdíl mezi očekávaným a skutečným stavem linky SDA, je to indikace kolize mezi několika stanicemi. Vzhledem k charakteru sběrnice (otevřené kolektory) může k této situaci dojít, pokud určitá stanice vysílá úroveň H, zatímco jiná stanice vysílá úroveň L. Stanice, která na lince zjistí úroveň L zatímco sama vysílá H musí vysílání okamžitě ukončit .

Každá stanice připojená na I<sup>2</sup>C má přidělenou 7 bitovou adresu. Po zachycení podmínky START porovnávají všechny obvody svou adresu s adresou, která je vysílána na sběrnici. Zjistí-li některý z obvodů shodu, je vysílání určeno právě jemu a musí přijetí adresy potvrdit bitem ACK. Potom přijímá nebo vysílá další data. Několik adres je na I<sup>2</sup>C vyhrazeno pro speciální účely. Například adresa 0000000 je určena pro vysílání broadcast, adresa 11110XX pro 10 bitovou adresaci.

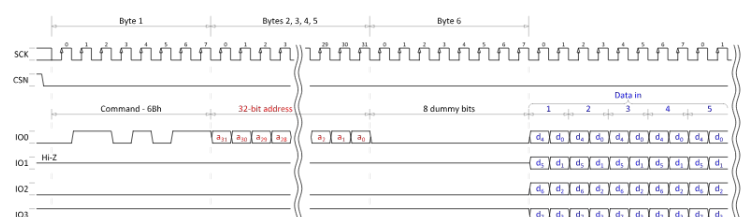
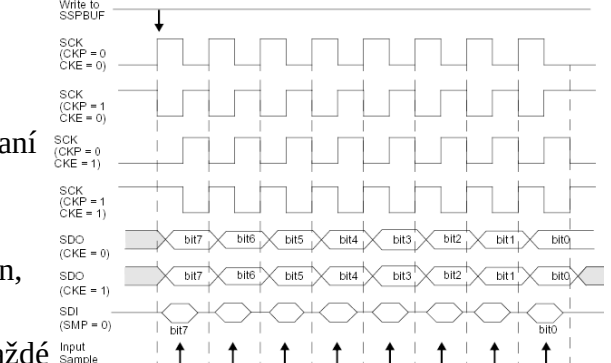
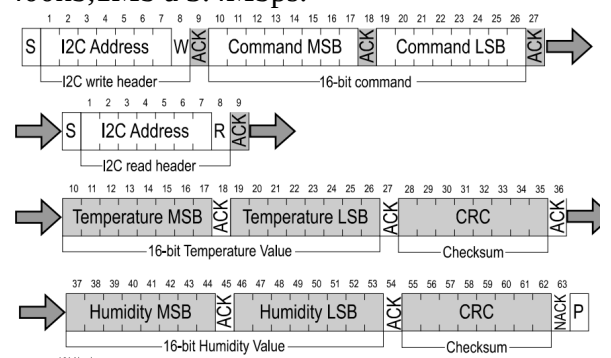
Standardní rychlost je 100kbps, dalšími podporovanými je 400kb, 1Mb a 3.4Mbps.

Reálné použití:

- pozor na počet zařízení, délku sběrnice/rychlost, pull-up odpory
- více stejných sensorů → konflikt adres
- existují i2c oddělovače
- pro vyšší rychlosti se používají i (polo-)aktivní budiče (ne jen pull-up)

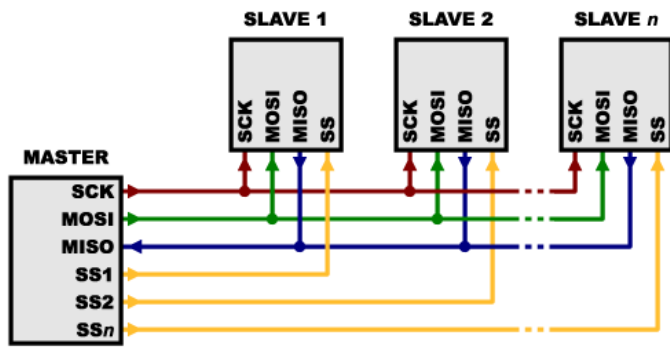
## SPI (QSPI)

SPI (*Serial Peripheral Interface*) je sériové periferní rozhraní typu master-slave. Pro komunikaci slouží tři vodiče SCK (hodinový signál), SDO (data output, někdy též MOSI – master out, slave in), SDI (data input, též MISO – master in, slave out). K „adresaci“/výběru zařízení se kterým bude master komunikovat slouží dedikovaný signál SCE (pro každé zařízení – tímto signálem se také defnuje počátek a konec komunikace.

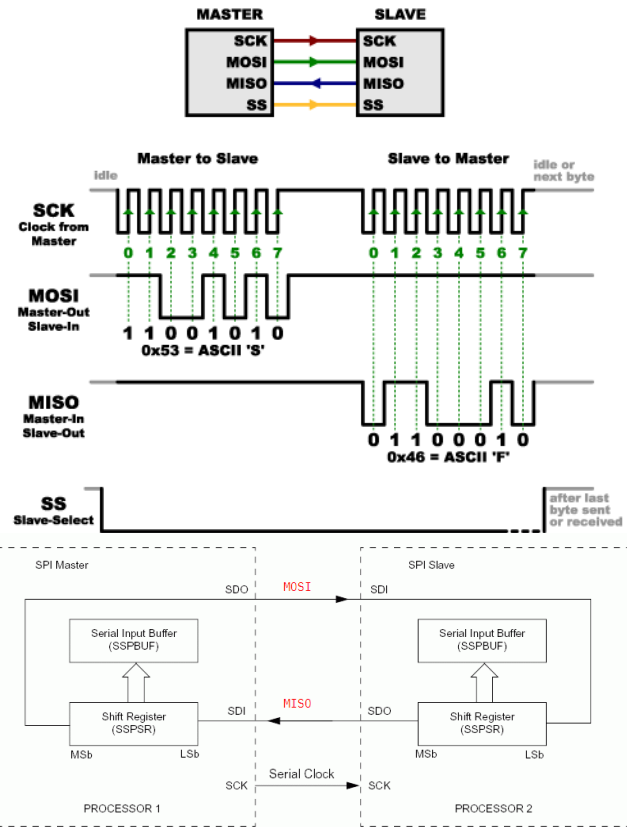
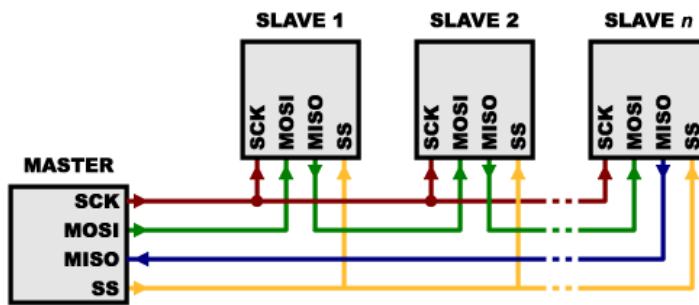


Implementačně je sběrnice SPI velmi jednoduchá.

Pro více slave jednotek se používá typicky toto zapojení:



Ale ve spec. případech (nutná i podpora na straně slavů) lze použít zřetězení



Reálné použití - pozor na generování signálu CS je li komunikace řešena jako neblokující (interrupt/dma)

## 1wire

1-Wire je sběrnice navržená firmou Dallas pro komunikaci zařízení nízkou datovou rychlostí po jednom vodiči (+zem) (někdy lze i +vcc). Zařízení s sobě obsahují kondenzátor pro uchování napájení během komunikace. Komunikace je master-slave, sběrnice je typu otevřený kolektor.

Každé vyrobené 1-Wire zařízení má unikátní 48bitový ID kód (+8b typ zařízení +8b CRC = 64b)

Komunikace začíná resetovacím pulsem 480 $\mu$ s, který posílá master. Po té co master uvolní sběrnici se jakýkoliv přítomný slave ukáže pomocí impulsu - podrží sběrnici na nule po dobu nejméně 60  $\mu$ s.

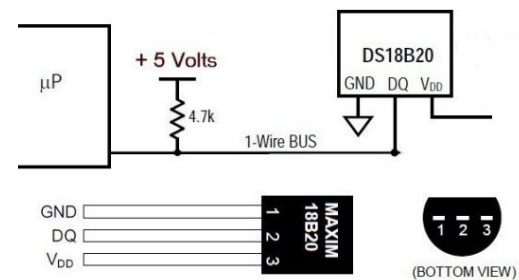
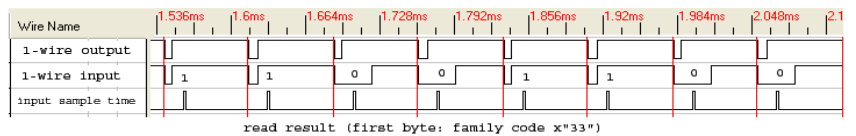
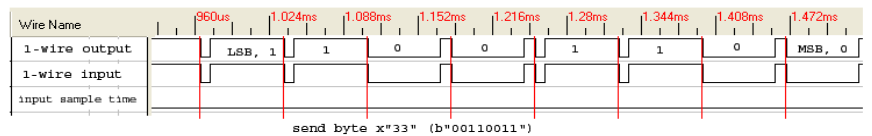
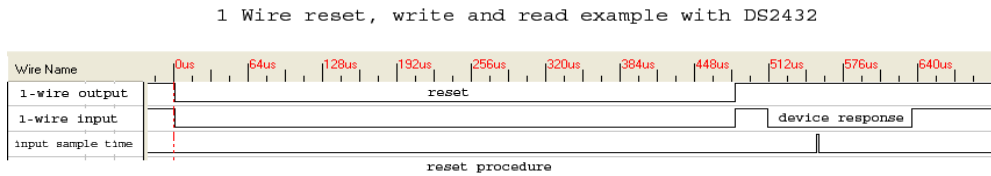
Pro poslání "1", master vyšle krátký (1-15  $\mu$ s) puls. Pro poslání "0", master vyšle 60  $\mu$ s puls. Cca 30 $\mu$ s po startu slave čte sběrnici.

Při čtení vyšle master krátký (1-15  $\mu$ s) puls. Pokud vysílací podřízená jednotka chce poslat

"1", nedělá nic. Pokud vysílací slave chce poslat "0", stáhne sběrnici na nulu po dobu 60  $\mu$ s.

Základní sekvence je reset puls následovaný 8 bity příkazu a potom odesílaná, nebo přijímaná data ve skupinách 8 bitů.

Je-li na sběrnici více zařízení je možno zjistit jejich adresy (prohledávání pomocí příkazy search – a detekcí kolizí)



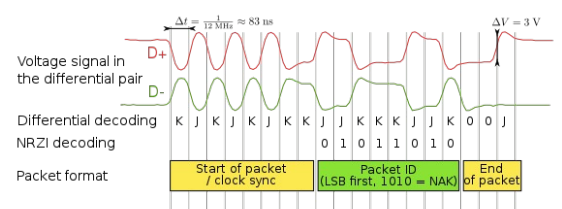
Reálné použití

- obvykle není specializované periférie. Lze vhodně „zneužít“ uart i spi.

## USB

Universal Serial Bus (USB) je univerzální sériová sběrnice snačící se jednotně nahradit různé dříve existující standardy připojení (RS232, par.port, PS/2, Gameport) pro běžné druhy periférií (tiskárny, klávesnice, myši, modemy) ale i připojit další periférie

T.Mainzer, SES



(kamety, paměti flash, HD, optické mechaniky atd). USB je point-to-point spojení, master-slave (host-device). Více zařízení je možno připojit přes HUB (rozbočovač) – stromové větvení (až 5 úrovní). USB je značně komplexní protokol.

Data jsou přenášena poloduplexně, diferenciálním párem D+/D- s definovanou impedancí bez zakončení. pro LS/FS (low/full speed – 1,5,12Mb) je úroveň signálu cca 3.3V, pro HS (hi speed – 480Mb) cca 400mV

Komunikační protokol pracuje na principu paketového přenosu – kdy s pomocí malých bloků údajů je schopen současně řešit více požadavků a přenosů.

# 9. Připojení průmyslových senzorů, Průmyslové sběrnice (RS485,CAN, Ethernet, ..) a protokoly

## RS232 (uart)

RS232 je rozhraní pro přenos informací - přenos probíhá asynchronně, duplexně, pomocí pevně nastavené přenosové rychlosti a synchronizace sestupnou hranou startovacího bitu, na napěťové úrovních +/- 5-15V

RS 232 používá dvě napěťové úrovně. Log. 1 je indikována zápornou úrovní, zatímco logická 0 je přenášena kladnou úrovní výstupních vodičů. Signály jsou odolné proti zkratu.

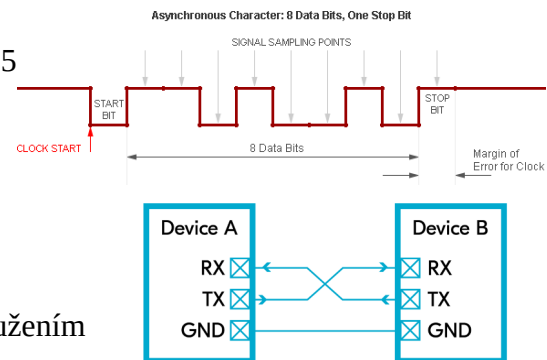
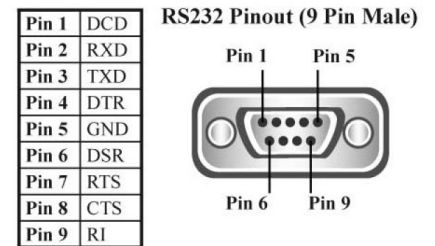
Kromě dat. Vodič RX/TX norma zahrnuje i "handshakové" signály k řízení přenosu (RTS/CTS, ...)

Přenos probíhá asynchronně: 1 start bit, N-dat.bitů (typicky 8), volitelně parita, a 1-2 stop bity.

Periférie v procesorech implementují tento standard do univerzální periférie uart (universal asynchronous seriál), případně usart (přidává synchronní variantu) – s běžnými napěťovými úrovní na výstupu – kde pro připojení ke sběrnici dle standardu RS232 (či RS422/RS485 – viz dále) je třeba ještě připojit driver (integrováný obvod který mimo jiné převádí napěťové úrovně signálu)

Úroveň	Vysílač	Přijímač
Log. L	+5 V to +15 V	+3 V to +25 V
Log. H	-5 V to -15 V	-3 V to -25 V
Nedefinovaný	-3 V to +3 V	

**RS232**

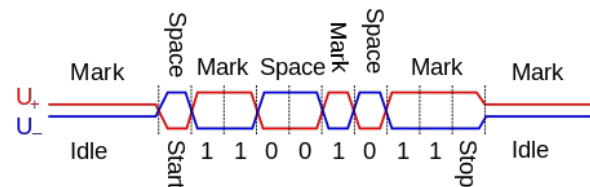


## RS485 (RS422, RS232)

RS485 je standard sériové komunikace definovaný v roce 1983 sdružením EIA. Používá se především v průmyslovém prostředí – jedná se o dvouvodičový poloduplexního vícebodový sériového spoj. Norma definuje až 32zařízení (při použití spec.budících obvodů lze více) a max.vzdálenost 1200m. Rychlost až 10Mbps na krátké vzdálenosti (do 10m). Vedené má definované zakončovací odpory 110R (zabránění odrazům). Logické úrovně (nebo stavy) jsou reprezentovány rozdílovým napětím mezi oběma vodiči (diff. Signál) . Vodiče se označují A/B (někdy +/-) - v klid.stavu by na A mělo být menší napětí než na B. Vysílač by měl na výstupu při logické 1 (klidový stav linky) generovat na vodiči A napětí -2 V, na vodiči B +2 V, při logické 0 by měl na vodiči A generovat +2 V, na vodiči B -2 V. Přijímač vyhodnocuje rozdíl A-B od 200mV.

Obdobně jako u RS232 přenos probíhá asynchronně: 1 start bit, Ndat.bitů (typ.8), volitelně parita, 1-2 stop bity.

RS485 – poloduplexní přenos  
RS422 – plně-duplexní přenos



- typicky paketová komunikace. Určení konce paketu – spec.znak (textova komunikace), pauza v komunikaci.

Typické provedení - Interrupt/DMA – příjem/vysílání dat (po byte, příp.indikace konce) – buffer. Hlavní smyčka – určení konce paketu jeho zpracování.



## MODbus

- fyzická vrstva RS485/422, linková vrstava – master-slave (1 master, N-slave), aplikační vrstva - modbus
- dvě varianty: RTU, ASCII
- adresa slave 1-247 (0 pro broadcast, 248-255 rezervováno)
- unicast (master to 1 slave) - slave odpovídá, broadcast (master to all slaves) – bez odpovídání
- !slave musí reagovat do určité doby (což omezuje použití různých převodníků USB-RS485)

## Ethernet

Ethernet je název souhrnu technologií pro počítačové sítě (LAN, MAN) z větší části standardizovaných v IEEE 802. Síť Ethernet realizují fyzickou a linkovou vrstvu referenčního modelu OSI, takže je možné po nich provozovat jeden nebo více protokolů síťové vrstvy – ale nejčastěji se používá IPv4/IPv6.

Na fyzické vrstvě ethernet nejčastěji používají ethernetový kabel kategorie 5e, 6 nebo 7 používající čtyři páry kroucených měděných vodičů. Kabely jsou **UTP** (Unshielded Twisted Pair) a nebo **STP** (Shielded Twisted Pair) ke snížení rušení. Ethernet zahrnuje standardy 10Base-T, 100Base-TX, 1000Base-T a 10GBase-T. Nejčastěji používaným konektorem pro měděné kabely je **RJ45**. (Pro vysokorychlostní a dlouhé vzdálenosti se používají optické kabely, s konektory typu LC, SC, ST).

Na Linkové vrstvě se k řízení přístupu k přenosovému médium (MAC - Media Access Control) používá metoda CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Zařízení naslouchají, zda je médium volné, než začnou přenášet data. Pokud dojde ke kolizi, zařízení čekají náhodný časový interval, než se pokusí znovu přenést data. Ethernetová linková vrstva zahrnuje i metody pro detekci a opravu chyb, jako je CRC (Cyclic Redundancy Check), které zajišťují integritu přenášených dat.

V Eth sítích kromě koncových zařízení můžeme nalézt Huby (zastaralé), Switche a na vyšších úrovních ISO modelu Routery sloužící k propojení síťových prvků

## PoE

PoE (Power over Ethernet) je napájení po datovém síťovém kabelu, bez nutnosti přivést napájecí napětí k přístroji dalším samostatným kabelem.

Výhody: méně kabeláže a zásuvek, zjednodušení zapojení, zajištění zálohovaného napájení i při výpadku napájecí sítě (centrální zdroj PoE napájen zálohovaně (z UPS)), umožnění jednodušší dálkový restart pomocí nanapájeného přístroje na konci kabelu vypnutím a zapnutím napájení.

Omezení: jen omezené výkony a vzdálenosti (eth kabel má vodiče jen malého průřezu – proudové omezení, napěťový úbytek)

Pasívní PoE - čistě dodává napájení po nevyužitých vodičích

Aktivní PoE - dle IEEE 802.3af (a následné normy), zahrnuje vyjednávání o napájení. Používá se napětí 48 V, max. proudový odběr jednoho přístroje je 350 mA. Definuje napájení i pro 1Gb ethernet (kde nejsou volné páry) pomocí fantomového napájení (AC složka (data) je přenášena po stejných vodičích jako DC složka (napájení))

Typické užití – webové kamery, Wifi access pointy, IP telefony, průmyslové sensorové sítě

## Foundation Fieldbus

Otevřená architektura pro digitální sériovou komunikaci v oblasti automatizace. Tento systém byl vyvinut společností FieldComm Group a je široce používán v různých průmyslových odvětvích, jako je rafinérie, petrochemie, výroba energie.

Existují dvě hlavní implementace:

Fieldbus H1 (31.25 kbit/s) - komunikace přes kroucený pár, často používaná pro jiskrově bezpečná (intrinsic safety) zařízení.

Fieldbus HSE (High-Speed Ethernet, 100/1000 Mbit/s).

## HART (Highway Addressable Remote Transmitter)

HART Protocol (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) je digitální komunikační protokol široce používaný v průmyslové automatizaci. Je to hybridní analogově-digitální protokol, který umožňuje komunikaci mezi inteligentními políчковými zařízeními a hostovými systémy přes tradiční 4-20 mA analogové řetězce. HART Protocol podporuje i obousměrnou komunikaci.

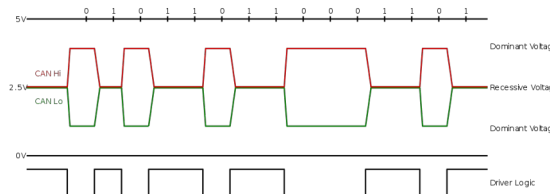
HART Protocol používá techniku FSK (Frequency Shift Keying) k přenosu digitálních signálů na analogových řetězcích. Digitální signály jsou přenášeny pomocí dvou frekvencí (1,200 Hz a 2,200 Hz), které představují bity 1 a 0. Může být použit v různých konfiguracích, včetně bodového spojení (point-to-point) a více-dropového (multi-point) spojení (multi-drop – až 15 zařízení sdílí linku)

## CAN bus (Controller Area Network)

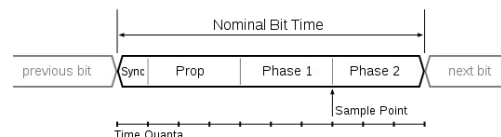
CAN (Controller Area Network) je sběrnice vyvinutá firmou Bosch. Elektrické parametry fyzického přenosu jsou specifikované normou ISO 11898. Maximální teoretická rychlost přenosu na sběrnici je 1 Mbs/40m. CAN je využívána např. pro vnitřní komunikační síť senzorů a funkčních jednotek v automobilu.

Data se odesílají v rámcích, každý rámeček může obsahovat 0-8 datových byte. Každý rámeček obsahuje identifikátor/adresa (11b pro CAN2.A, 29b pro CAN2.B) který definuje obsah přenášené zprávy a zároveň i prioritu zprávy při pokusu o její odeslání na sběrnici. Při vysílání adresy dochází k arbitráži mezi zařízeními a zařízení s nevyšší prioritou bude vysílat svoji zprávu (→ Každé zařízení musí mít unikátní identifikátor(y)). zpráva je doplněna zabezpečením CRC. Jedna zpráva může být přijata několika zařízeními.

Logické úrovně (nebo stavy) jsou reprezentovány rozdílovým napětím mezi oběma vodiči CANH/CANL (diff. Signál). CAN rozlišuje bity dominantní (dominant) a ustupující (recessive) bity. - dominantní bit je logická 0 (aktivně řízen napětím vysílače) a ustupující je logická 1 (pasivně vybitá do zdroje přes rezistor). Stav nečinnosti je reprezentován ústupovou úrovní, tím pádem logickou 1. Pokud jeden uzel vysílá dominantní bit a další uzel vysílá ustupující bit, naskytla se zde kolize a větší prioritu má dominantní bit (tímto je také zajišťována arbitrace)



Příklad      Start      ID Bits      ...zbytek paketu..

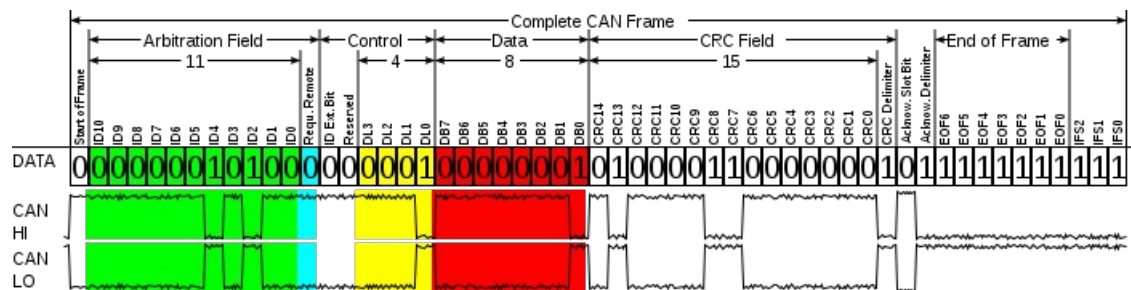


Arbitrace	Bit	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Node X	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Node Y	0	0	0	1	0	0	0	1	Stopped Transmitting			
CAN Data	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1

Přenos ve všech uzlech je synchronizován, interně se přeno každého bitu skládá z několika fází (synchronizace, propagace, fáze1 ,fáze2).

Norma rovněž definuje bit ACK (potvrzení příjmu) a chování budiče který při poruše buzení (trvalý výstup) se automaticky odpojí od sběrnice.

Struktura CAN packetu:



## CANopen

Protokol postavený nad sběrnici CANbus cílený na průmyslovou regulaci a sběr dat. CANopen je standardizován organizací CAN in Automation (CiA) a je definován v různých specifikacích, jako je CiA 301 pro základní profil a CiA 401 pro I/O moduly atd.

Podporuje síťové služby jako je síťový management (NMT), časová synchronizace (SYNC), chybové hlášení (EMERGENCY) a přenos řídicích dat (PDO). Každé zařízení má objektový slovník, který obsahuje parametry konfigurace a data o stavu zařízení. Tento slovník je přístupný prostřednictvím Service Data Objects (SDO)

## SAE J1939

Protokol postavený nad sběrnici CANbus cílený pro komunikaci v průmyslových vozidlech, jako jsou nákladní automobily a autobusy.

Většina zpráv je šířena jako broadcast, což znamená, že jsou přenášeny na celou síť bez specifického cíle. Zprávy obsahují hlavičku a data, kde hlavička obsahuje PGN a SPN (Suspect Parameter Number), což identifikuje typ přenášných dat. Standardní rychlost komunikace je 250 kbit/s, ale může být také 500 kbit/s

## LON (Local operation network) (LonWorks)

Otevřený standard pro síťové platformy (vyvinut firmou Echelon Corporation). Je standardizován jako ISO/IEC 14908 a ANSI/CEA-709.1-B.

LON je kompatibilní s různými médii, jako jsou kroucené páry, optické kabely a bezdrátové připojení. Podporuje různé síťové služby, jako je síťový management, časová synchronizace a přenos řídicích dat. Každé zařízení má objektový slovník, který obsahuje parametry konfigurace a data o stavu zařízení.

LON se používá k automatizaci funkcí v budovách, jako jsou osvětlení, HVAC systémy (Heating,

Ventilation, and Air Conditioning), bezpečnostní systémy a mnoho dalších. Používá se také v průmyslových aplikacích.

### **BACNet (Building Automation Control Network)**

BACnet (Building Automation and Control network) je komunikační protokol navržený pro automatizaci a řízení budov. Standardizován je jako ASHRAE/ANSI Standard 135 a ISO 16484-5. BACnet umožňuje různým zařízením v budovách, jako jsou systémy HVAC, osvětlení, detekce požárů a zabezpečovací systémy, komunikovat a sdílet informace.

BACnet pracuje na linkové vrstvě ISO/OSI modelu. Je kompatibilní s různými fyzickými médii, jako jsou Ethernet, RS-485, ZigBee a dalšími. Protokol definuje standardní typy objektů, jako jsou binární a analogové vstupy a výstupy, textové řetězce a další. Zahrnuje služby pro objevování zařízení (Who-Is, I-Am, Who-Has).

### **EHS (European Home System) / KNX (Konnex)**

komunikační protokol zaměřený na řízení a komunikaci domácích zařízení pomocí **Power Line Communication** (PLC).

Byl vyvinut Evropskou asociací domácích systémů (EHSA), nově je součástí standardu KNX.

**KNX** je otevřený standard pro automatizaci a řízení budov, který je schválen jako ISO/IEC 14543-3, CENELEC EN 50090 a ANSI/ASHRAE 135. KNX je kompatibilní s různými komunikačními médii, jako jsou kroucená dvojlinka, komunikace přes elektrickou síť (Power-line Communications), bezdrátové sítě (KNX-RF) a IP sítě (KNXnet/IP).

### **M-Bus (Meter Bus)**

- určena zejména pro dálkové odečty spotřeby. Popsán v EN 13757.

- Master-Slave. Master zajišťuje napájení a komunikuje změnou napětí (26/24V), slave má def. odběr a komunikuje změnou proudu (1.5mA, +11-20mA). Asynchronní komunikace 300-9600bps pro 1000m-300m. Až 250 stanic.

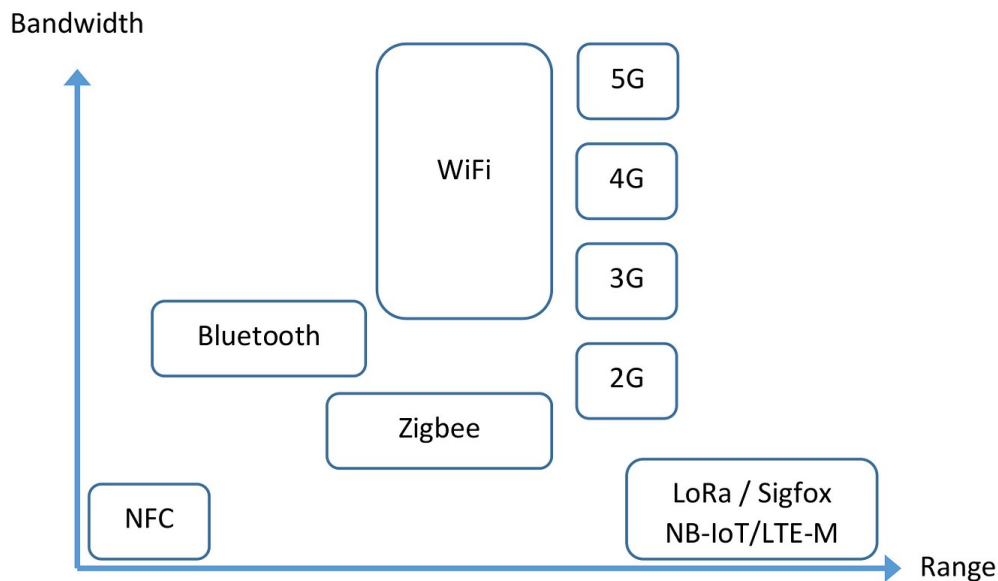
Existuje i wireless verze.

# 10. Bezdrátové senzory, senzorové sítě. Napájení senzorů, spotřeba.

## Bezdrátové protokoly/moduly

- Standalone moduly vs MCU integrated (Wifi,bluetooth)
- Wi-Fi
- Bluetooth (BLE)
- Zigbee
- Wireless Fieldbus
- Lora,Lorawan
- SigFox

<b>Technology</b>	<b>Topology</b>	<b>Frequency</b>	<b>Speed</b>	<b>Range</b>	<b>Power</b>	<b>Cost</b>
<b>GSM based</b>	star/cellular	700MHz-5GHz	Up ~10Mps	~km	high/medium	high
<b>Wifi</b>	Star (tree,p2p)	2.4G, 5GHz	Up ~100Mbps	100m	high/medim	low
<b>Bluetooth/ BLE</b>	Star,p2p	2.4G	~1Mbps	10/100m	low	low
<b>Zigbee</b>	Strt,mesh	2.4G	250kbps	100m	low	medium
<b>Z-Wave</b>	mesh	Sub GHz	40kbps	30m	low	medium
<b>Lora</b>	mesh	Sub GHz	<50kbps	~km	low	medium
<b>SigFox</b>	(star)	Sub GHz	<1kbps	~km	low	medium



	WiFi	Bluetooth	ZigBee	6LOWPAN	WIMAX	Zwave	4G	LoRa
Network	LAN	PAN	LAN	LAN	MAN	LAN	MAN	LAN
Topology	Star	Star	Mesh, Star, Tree	Mesh, Star	Mesh	Mesh	Mesh	Star & Star of Star
Power	Low-High	Low	Very Low	Very Low	High	Very Low	High	Very Low
Data rate	up to 1.3 Gbps	2.1 mbps	250 kbps	200 kbps	11-100 mbs	40kbs	up to 1 Gbps	0.3 kbps to 100 kbps
Range	up to 100 m	< 100 m	10 - 20 m	10 - 20 m	50km	30m	where signal reach	3-5 km Urban area
Application	Any device with cellular connectivity capability	Network for data exchange headset	Sensor networks Industrial automation	Sensor networks Industrial automation	Metro area broad band internet connection	Residential lighting & automation	Use in wifi, ADSL, broad basnd, digital TV& Radio	Smart City
Network size	Medium	Small	Very large	Very large	large	large	Very large	Medium large

pozn. PAN,LAN,MAN = personal,local,metropolite area network

## Bluetooth

Bluetooth (BT) je bezdrátová technologie, která umožňuje propojení různých elektronických zařízení na krátkou vzdálenost. Je standardizováno pod IEEE 802.15.1 a spadá do kategorie osobních počítačových sítí (PAN).

Bluetooth Low Energy (BLE) je specifická verze Bluetooth technologie, která je optimalizována pro nízkou spotřebu energie a je ideální pro aplikace, kde je důležitá dlouhá životnost baterie

Využívá rádiové vlny v pásmu 2,4 GHz, které je rozděleno na 79 kanálů, každý o šířce 1 MHz. Používá různé modulační techniky, jako je GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) pro základní rychlosti a DQPSK pro vyšší rychlosti

Typický dosah Bluetooth je od 1 do 100 metrů, v závislosti na třídě zařízení. Bluetooth je navrženo tak, aby mělo nízkou spotřebu energie, což je ideální pro mobilní zařízení. Rychlost přenosu dat se liší podle verze Bluetooth. Například verze 5.0 umožňuje rychlost až 2 Mbps.

Bluetooth je zpětně kompatibilní, což znamená, že novější verze mohou komunikovat se staršími verzemi (nekompatibilita BT – BLE, zařízení nemusí podporovat obě).

BLE podporuje několik topologií, které umožňují flexibilní a efektivní komunikaci mezi zařízeními:

-Point-to-Point: Nejčastější topologie, kde jedno centrální zařízení (central / **master**) komunikuje s jedním nebo více periferními zařízeními (periphery / **slave**), počet slave bývá omezen.

-Broadcasting: Zařízení vysílá data, která mohou být přijímána více zařízeními, aniž by bylo navázáno spojení.

-Mesh Networking (nové, od V5, BLE): Umožňuje vytvoření sítě, kde každé zařízení může komunikovat s více dalšími zařízeními, což je ideální pro aplikace jako chytré domácnosti a průmyslové automatizace.

## Zigbee

Zigbee je ideální pro aplikace jako chytré domácnosti, průmyslové automatizace a zdravotnické zařízení, kde je klíčová nízká spotřeba energie a spolehlivá komunikace na kratší vzdálenosti.

Zigbee pracuje v nelicencovaném pásmu 2,4 GHz, ale také v pásmech 868 MHz (Evropa) a 915 MHz (Severní Amerika). Používá modulační techniky jako je DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) pro zajištění spolehlivého přenosu dat. Zigbee je založeno na standardu IEEE 802.15.4, který definuje fyzickou vrstvu a vrstvu řízení přístupu k médiu (MAC) pro nízkorychlostní bezdrátové osobní síť (WPAN).

Zigbee zahrnuje bezpečnostní mechanismy jako je 128bitové šifrování AES pro zajištění bezpečnosti přenášených dat.

Zigbee je navrženo pro aplikace s nízkou spotřebou energie, což umožňuje dlouhou životnost baterie.

Typický dosah Zigbee je od 10 do 100 metrů, v závislosti na prostředí a výkonu zařízení. Zigbee podporuje rychlosti přenosu dat až 250 kbps.

Zigbee podporuje mesh topologii, což znamená, že zařízení mohou přenášet data přes další zařízení, čímž se zvyšuje dosah a spolehlivost sítí

Ve srovnání s BLE - Obě technologie jsou navrženy pro nízkou spotřebu energie, ale Zigbee je často preferováno pro aplikace s velmi dlouhou životností baterie. Podpora mesh topologii je zde od počátku (k BLE přidáváno), což obecně umožňuje větší pokrytí a spolehlivost sítí ve srovnání s BLE.

Typy zařízení u Zigbee:

- Koordinátor (**Coordinator**) - centrální prvek Zigbee sítě. Je zodpovědný za inicializaci a správu celé sítě. Koordinátor vytváří síť, přiděluje adresy novým zařízením a zajišťuje bezpečnostní klíče pro šifrování komunikace. Koordinátor může komunikovat se všemi zařízeními v síti a často funguje jako brána mezi Zigbee sítí a dalšími sítěmi, například internetem.

- Koncové zařízení (**End Device**) - je obvykle jednoduché zařízení s nízkou spotřebou energie, které komunikuje pouze s jedním routerem nebo koordinátorem. Koncová zařízení mohou být např. senzory, spínače nebo jiné jednoduché zařízení, které sbírají data nebo vykonávají jednoduché úkoly. Koncová zařízení neprovádějí směrování dat pro jiná zařízení, což znamená, že nemohou přenášet data mezi jinými zařízeními v síti.

- **Router** - pomáhají rozšiřovat dosah sítě a směrovat data mezi zařízeními. (pozn. jedno zařízení může mít více funkcí, tedy např. end device+router, router+koordinátor.

## Wifi

Wi-Fi je bezdrátová síťová technologie, která umožňuje zařízením komunikovat přes bezdrátový signál – wifi (dle verze) pracuje v několika frekvenčních pásmech, nejčastěji 2,4 GHz a 5 GHz (Wifi 5), nebo 6 GHz (Wi-Fi 6E). Wi-Fi je založeno na standardech IEEE 802.11, které definují různé verze, jako jsou 802.11a/b/g/n/ac/ax3. Rychlost přenosu dat se liší podle verze standardu, například Wi-Fi 6 (802.11ax) může dosáhnout rychlosti až 9,6 Gbps. Dosah Wi-Fi signálu závisí na prostředí a výkonu zařízení, obvykle se pohybuje od 20 do 100 metrů. Wi-Fi používá různé modulační techniky, jako je OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) a DSSS (Direct Sequence Spread). Frekvenční pásma jsou rozdělena na kanály, například pásmo 2,4 GHz má 14 kanálů, každý o šířce 22 MHz.

Wi-Fi zahrnuje různé bezpečnostní protokoly, jako je WPA2 a WPA3, které zajišťují šifrování a ochranu dat před neoprávněným přístupem.

Wi-Fi sítě mohou být konfigurovány v různých topologiích, jako je infrastruktura (přístupový bod (**access point**) a klienti (**client**) – nečastější řešení) nebo ad-hoc (přímá komunikace mezi zařízeními).

Wi-Fi je široce používáno pro domácí i komerční účely, umožňuje snadné připojení k internetu a sdílení dat mezi zařízeními bez potřeby kabelů.

## LoRa

LoRa (Long Range) je bezdrátová komunikační technologie navržená pro dlouhý dosah a nízkou spotřebu energie. LoRa umožňuje komunikaci na vzdálenosti až několik kilometrů, v závislosti na prostředí a podmínkách. Technologie je optimalizována pro nízkou spotřebu energie, což umožňuje dlouhou životnost baterií v zařízeních. LoRa využívá modulaci s rozprostřeným spektrem (Chirp Spread Spectrum, CSS), která je velmi odolná proti rušení a umožňuje spolehlivý přenos dat i v rušeném prostředí. LoRa používá CSS, kde se frekvence signálu lineárně mění v čase (chirp-up a chirp-down). Tato modulace je odolná vůči Dopplerovu jevu a umožňuje dekódování signálu i při nízkém poměru signálu k šumu (SNR). LoRa pracuje v nelicencovaných pásmech, jako jsou 433 MHz, 868 MHz (Evropa) a 915 MHz (Severní Amerika). Typické šířky pásma jsou 125 kHz, 250 kHz a 500 kHz, což umožňuje flexibilní nastavení podle požadavků aplikace. LoRa umožňuje nastavení různých hodnot SF (spread factor), které ovlivňují dosah a rychlost přenosu dat. Vyšší SF zvyšuje dosah, ale snižuje rychlost přenosu. LoRa používá dopřednou korekci chyb (Forward Error Correction, FEC), která zvyšuje spolehlivost přenosu dat. Rychlosti přenosu jsou (dle SF a šířky pásma) v rozsahu 0.3 až 50 kbps (kbit per sec – kilobitů za sekundu) – tedy relativně pomalé.

LoRa technologie má stanovená omezení na poměr vysílání a ticha, což je důležité pro dodržování regulačních požadavků a zajištění efektivního využití spektra. Duty Cycle – je procento času,



během kterého zařízení může vysílat v daném časovém intervalu. V Evropě, kde LoRa pracuje v pásmu 868 MHz, je duty cycle omezen na 1 % nebo 0,1 % v závislosti na konkrétním kanálu. Toto omezení znamená, že zařízení může vysílat pouze po omezenou dobu a musí zůstat tiché po zbytek času. Například při 1% duty cycle může zařízení vysílat maximálně 36 sekund za hodinu.

Listen Before Talk (LBT) - Některé regiony vyžadují, aby zařízení před vysíláním zkontrolovalo, zda je kanál volný. Pokud je kanál obsazen, zařízení musí počkat, než začne vysílat. Tento mechanismus pomáhá minimalizovat rušení mezi zařízeními a zajišťuje spravedlivé využití spektra.

LoRa/LoRaWAN jsou ideální pro aplikace, kde je potřeba dlouhý dosah, nízká spotřeba energie a spolehlivý přenos dat, jako jsou chytré města, průmyslové monitorování a zemědělství.

Typickými příklady použití jsou senzory, které odesílají data pouze občas (např. jednou za hodinu), mohou snadno dodržovat omezení duty cycle, nebo zařízení pro monitorování prostředí nebo infrastruktury, která potřebují pravidelně odesílat malé množství dat.

## **Sigfox**

Sigfox (podobně jako LoRa) spadá do kategorie nízkoenergetických širokopásmových sítí (LPWAN) a jsou navrženy pro podobné aplikace v oblasti IoT.

Sigfox: Používá ultra-úzkopásmovou (UNB) modulaci, která umožňuje velmi úzké kanály (200 Hz), což zvyšuje odolnost proti rušení a umožňuje dlouhý dosah. Pracuje v nelicencovaných pásmech, jako jsou 868 MHz (Evropa) a 902 MHz (Severní Amerika). Podporuje rychlosti přenosu dat až 100 bps (tedy velmi pomalé). Používá hvězdicovou topologii, kde zařízení komunikují přímo s centrálními základnovými stanicemi. Omezuje počet zpráv na 140 denně, každá zpráva může mít až 12 bajtů

## **GSM**

GSM (Global System for Mobile communications) je standard pro mobilní komunikaci, který byl původně vyvinut pro druhou generaci (2G) mobilních sítí. GSM používá digitální přenos hlasu a dat, což zvyšuje kvalitu a bezpečnost komunikace.

GSM pracuje v různých frekvenčních pásmech (v různých sátech se mírně liší) – např. 900/1800MHz v Evropě a 850/1900 MHz v Severní Americe. GSM používá kombinaci frekvenčního dělení (FDMA) a časového dělení (TDMA) pro efektivní využití spektra.

Původní GSM podporuje rychlosti přenosu dat až 9.6 kbps pomocí CSD (circuits switched data). CSD je vhodné pro aplikace, které vyžadují stabilní a nepřerušovaný přenos dat, jako je fax nebo dial-up internet.

High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD) - zvyšuje rychlost přenosu dat až na 57.6 kbps kombinací více časových slotů

GPRS (General Packet Radio Service) – pak umožňuje rychlosti přenosu dat od 56 kbps do 114 kbps. Používá paketový přenos dat, což umožňuje efektivnější využití spektra. GPRS je někdy označováno jako 2.5G technologie, protože poskytuje vyšší rychlosti než původní GSM.

EDGE - EDGE zvyšuje rychlosti přenosu dat až na 384 kbps<sup>2</sup>. EDGE je vylepšení GPRS, které používá sofistikovanější metody modulace pro zvýšení rychlosti přenosu dat. EDGE je považováno za 2.75G technologii a poskytuje téměř 3G rychlosti pro aplikace, které vyžadují vyšší přenosové rychlosti.

3G (Třetí generace) - přinesla významné zlepšení oproti 2G a 2.5G technologiím, jako jsou GPRS a EDGE. 3G sítě podporují rychlosti přenosu dat od 144 kbps až po několik Mbps, v závislosti na konkrétní technologii a podmínkách. 3G zahrnuje různé technologie, jako jsou UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) a CDMA2000. UMTS používá W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) pro přenos dat.

4G (Čtvrtá generace) - 4G sítě mohou dosahovat rychlostí až 100 Mbps pro mobilní uživatele a až 1 Gbps pro stacionární uživatele. 4G zahrnuje technologie jako LTE (Long Term Evolution) a WiMAX. LTE je nejrozšířenější a používá OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pro efektivní přenos dat. 4G umožňuje vysokorychlostní internet, HD videohovory, online hraní a další náročné aplikace.

5G (Pátá generace) - přináší další zlepšení v rychlosti, latenci a kapacitě. 5G sítě mohou dosahovat teoretických rychlostí až 20 Gbps, což je výrazně více než u 4G. 5G využívá nové technologie, jako je mmWave (millimeter wave) pro vyšší frekvence, MIMO (Multiple Input Multiple Output) pro zvýšení kapacity a beamforming pro lepší pokrytí.

Architektura GSM sítě:

- Mobilní stanice (MS) - Mobilní telefony a další zařízení, která komunikují s GSM sítí.
- Bázové stanice (BTS) - Zařízení, která zajišťují bezdrátovou komunikaci mezi mobilními stanicemi a sítí
- Řídicí stanice bázových stanic (BSC) - Spravuje více BTS a zajišťuje přepínání a řízení zdrojů.
- Mobilní přepínací centrum (MSC) - Hlavní prvek sítě, který zajišťuje přepínání hovorů a správu připojení.

## Spotřeba

### Ztráty

**Parazitní kapacity** (interní (hradla, spoje) i externí (vodiče))

$$E_{cap} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (\text{nabíjení par.kapacit})$$

uvnitř IC par.kapacity navíc mírně rostou s napětím (růst velikosti hradel)

### Short circuit current

Spínání komplementárních tranzistorů

### Leakage (static)

závěrný proud diodami – výrazně se také mění se s teplotou (vyšší teplota, vyšší svod)

tranzistor subthreshold leakage - zvyšuje se se snižujícím napájením

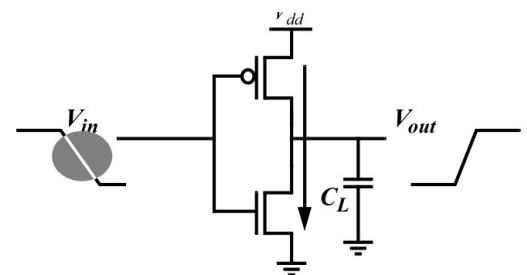
nanostucture leakage

### Makrostruktury (>=IC):

W/MHz

Pull-up/down

neošetřené vstupy



LDO, spínané zdroje

## Software/Hardware (mikrokontrolery, procesory)

**Sleep režimy** (terminologie je různá)

Omezení Frekvence mcu, perifériím, odepínání napájení mcu, perifériím, odepínání napájení pamětem

Vzbuzení procesoru – událostí (periférie), rychlost vzbuzení (!náběh krystalu)

RTC – hodiny reálného času – možnost bateriového napájení, krystal 32kHz, možnost vzbuzení procesoru

Mode		Consumption	Wakeup	Periphery
Run	Normal	Vysoká (>>10mA)-		Všechny (volitelně)
Run (Low Power)	Běh na nízké frekvenci	Střední (1-10mA) -		Všechny (volitelně), omezení dané frekvencí
Sleep	Mcu stop, periférie běh	Střední (1-10mA)	Periférie, [us]	Všechny (volitelně)
Sleep low power	Mcu stop, periférie běh na nízké	Nízká (1mA)	Periférie, [>us]	Omezení dané frekvencí
Stop	Mcu + periférie stop, paměť zachována	Nižší (<1mA)	Změna GPIO někdy ADC, [ms], [>ms]	Jen konkrétní typicky bezestavové jednoduché periférie, RTC
Standby	Stop, odpojení od napájení, paměť nezachována nebo malá část	Velmi nízká (uA)	[>ms-s]	RTC, Vnější signál

## Zdroje hodin (procesoru, mikrokontroleru)

- krystal/interní osc., HS/LS/PLL, spotřeba, náběh

## Low power SW

- interrupt driven, DMA

- rychle a s velkým odběrem vs pomalu s malým odběrem

## Zdroje energie

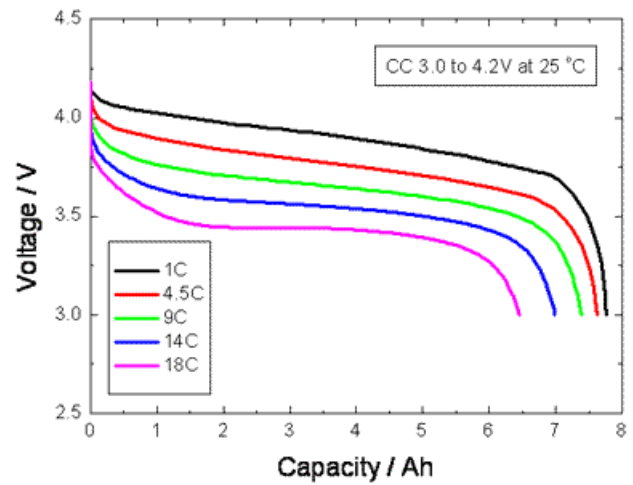
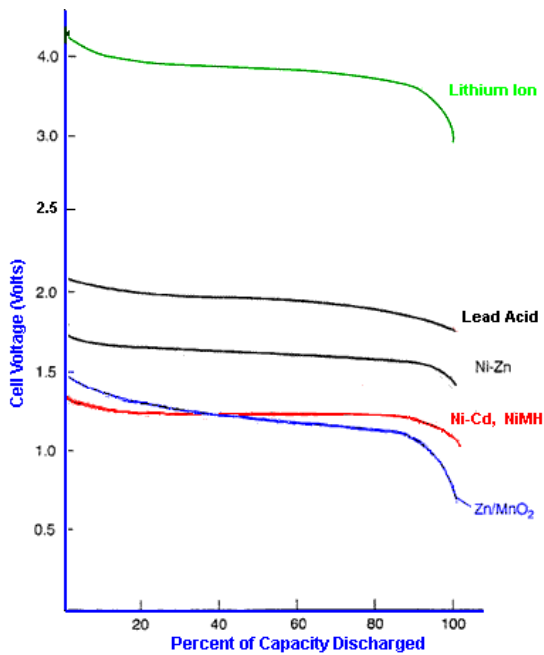
Statické parametry – Kapacita, Napětí, proud, kapacita/kg

- Primární články, akumulátory, kondenzátory

Dynamické parametry – počet cyklů, teplota, spičky ve spotřebě

	Napětí	Nabíjení	Vybíjení	Životnost	Hustota energie [Wh/kg]	Op. parametry	Pozn.
Kondenzátor	[V]-[100V]	[ps]-[ms]	[ps]-[ms] lin./exp. vybíjení	>100k cyklů	<0.05	-20-100°C	

<b>SuperCap</b>	[V]	[ms]-[s]	[ms]-[s]	>100k cyklů	<5	-40-80°C	
<b>Lead-Acid (olověné)</b>	2V	2.4 / 2.25V pomalé [hr]	1.75V 5C / 0.2C	~250 cyklů	50	-20-50°C	
<b>NiCd</b>	1.2	<0°C velmi opatrně	1C / 20C plochá křivka	~1000 cyklů	80	-20-65°C	
<b>NiMh</b>	1.2	< 0°C velmi opatrně	0.5C / 10C	~500 cyklů	120	-20-65°C	
<b>Li-ion</b>	3.6,3.7	4.2V < 0°C nelze	10C / 30C	~1000 cyklů	200	-20-60°C	
<b>Lithiové (primární)</b>	3V typ. (ale i 1.5V)	-	-	-	300	-30-60°C	CR2032
<b>Alkaline (primární)</b>	1.5V	-	-	-	100	-20-55°C	



**Table 1: Characteristics of commonly used rechargeable batteries.** The figures are based on average ratings of commercial batteries at time of

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion <sup>1</sup>		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life <sup>2</sup> (80% DoD)	200–300	1,000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time <sup>4</sup>	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V <sup>6</sup>	1.2V <sup>6</sup>	3.6V <sup>7</sup>	3.7V <sup>7</sup>	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C <sup>8</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C <sup>9</sup> (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months <sup>10</sup> (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory <sup>11</sup>		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency <sup>12</sup>	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High <sup>13</sup>		

publication. Specialty batteries with above-average ratings are excluded.

1. Combining cobalt, nickel, manganese and aluminum raises energy density up to 250Wh/kg.
2. Cycle life is based on the depth of discharge (DoD). Shallow DoD prolongs cycle life.
3. Cycle life is based on battery receiving regular maintenance to prevent [memory](#).
4. Ultra-fast charge batteries are made for a special purpose. (See [BU-401a: Fast and Ultra-fast Chargers](#))
5. [Self-discharge](#) is highest immediately after charge. NiCd loses 10% in the first 24 hours, then declines to 10% every 30 days. High temperature and age increase self-discharge.
6. 1.25V is traditional; 1.20V is more common. (See [BU-303: Confusion with Voltages](#)).
7. Manufacturers may rate voltage higher because of low internal resistance (marketing).
8. Capable of high current pulses; needs time to recuperate.
9. Do not charge Li-ion below freezing. (See [BU-410: Charging at High and Low Temperatures](#).)
10. Maintenance may be in the form of equalizing or topping charge\* to prevent sulfation.
11. Protection circuit cuts off below about 2.20V and above 4.30V on most Li-ion; different voltage settings apply for lithium-iron-phosphate.
12. Coulombic efficiency is higher with quicker charge (in part due to self-discharge error).
13. Li-ion may have lower cost-per-cycle than lead acid.

## Ultra low power design with microcontroller

- Může systém běžet desetiletí s knoflíkové (CR2032) baterie. Výrobci procesorů uvádějí ze ano. Ale ... je tu pár háčeků

### Chemie Baterie

Výrobci baterií negarantují životnost >10let (!)

Typická CR2032 má cca >200mAh. Ale

- vybíjecí proud – není příliš velký (20mA). S větším proudem klesá dosažitelná kapacita
- Odpor zdroje – se snižující kapacitou se zvyšuje, tj. Snižuje se max.proud

### Sleep Current procesoru má omezený vliv

spotřeba za 1 rok (běh 20mA):

Sleep ratio \ sleep current	10uA	1uA	0.1uA	0.01uA
99% (600ms/min běh)	1752+86.7	1752+8.67	1752+0.867	1752+0.0867
99.9% (60ms/min run)	175.2+87.5	175.2+8.75	175.2+0.875	175.2+0.0875
99.99% (6ms/min run)	17.52+87.6	17.52+8.76	17.52+0.876	17.52+0.0876
99.999% (0.6ms/min run)	1.752+87.6	1.752+8.76	1.752+0.876	1.752+0.0876

v tab. Je spotřeba běhu+sleepu v mAh za rok.

Zelené jsou případy kdy zvládne běžet cca 10let

- do cca 2.5uA sleep current nelze dosáhnout desetiletou životnost
- pod 99.99% spánku nelze dosáhnout desetiletou životnost - důraz na krátký běh

### Sleep current procesoru se mění s teplotou

Teplota	20	60	80	125	
Sleep Current	0.01	0.05	1	10	

### Leaks (ztráty)

Blokovací kondenzátory – tantal napr. 20UF – 20uA

proč je dávat – předepisuje výrobce procesoru – tedy je nutný pečlivý výběr.

Také pozor že leak kondenzátoru je fčí teploty

### Potřeba většího proudu

CR2032 dá desítky mA – ale často je špičkově třeba více (RF obvody (bluetooth), běh procesoru) – Přidat kapacitor pro překlenutí.

Pokud uvažujeme časy 1ms-10ms, proudy 10-30mA potřebujeme kondenzátor stovky a tisíce [uF]

-> máme Problém ze ztrátami a nebo (použijeme li extra kvalitní komponenty) s cenou a velikostí.

### **Rychlý běh**

Spotřeba procesorů je typicky  $I=I_0+dI*f$  (základ + lineární fce s frekvencí)

Tedy je vhodnější je pustit co nejrychleji a pak zase rychle uspat – energeticky je to výhodnější.  
Ale:

- je-li omezen proud zdroje (CR2032) je lepší běžet pomaleji
- je-li algoritmus dán např. dobou reakce čidla pak je třeba se přizpůsobit – běh/sunutí/běh/ vs pomalý běh může být nevýhodné (start oscilátoru)

### **Watchdog and Brown-out periférie**

Brown-out obvod hlídá podpětí procesoru. Ale:

- obyčklá specifikace je “široká“ (napr. 2.05-2.35V) v případě že chceme jít na limit možností procesoru (2V)
- spotřeba brown-out periférie nebývá zanedbatelná (třeba 1uA)

Watch-dog hlídá běh programu jestli se „nezacyklil“ nebo „neztratil“. Ale

- spotřeba watchdog periférie nebývá zanedbatelná (třeba 1uA, často uváděná jen jako typická)
- často je vhodnější použít externí specializované obvody

### **Ochrana proti přepólování napájení**

- Dioda není vhodná ;-)- úbytek na diodě a ten je ještě fci teploty a proudu
- mechanická ochrana (uživatel nemůže vložit opačně) nebo FET-diodou

# 11. Uživatelský interface (UI), Human Machine Interface (HMI)

Klávesnice, Dotykové senzory, displeje, kamery, ..

## Klávesnice

### Tlačítková

- jednotlivá tlačítka.
- interval sběru dat ~10ms, ošetřit zákmity (debouncing)

### Maticová

- tlačítka do matice
- N\*M kláves (N výstupu, M-vstupů)
- pozor na současný stisk 3 kláves (fantomové klávesy)
- M-vstupů lze (někdy) nahradit analogovým vstupem

## Dotykové senzory

### Mechanické

Základní problematika viz Klávesnice

### Kapacitní

Sensor detekuje změnu kapacity způsobenou přítomností vodivého objektu (prst) v blízkosti snímače. Samotný snímač tedy může být (elektricky) izolovaný (IP67).

Různé filtrování detekce (problémy se stabilitou, hysterezí), pozor na nesprávnou detekci, typicky jsou problematické např. kapky vody.

### Optické

Pro detekci dotyku je používáno světlo (IR).

Přímo – přerušení paprsku, nebo nepřímá - změna vlastností odrazu paprsku na rozhraní materiálu při dotyku.

## Kontrolky (optická indikace)

### Mechanické

- mechanické indikátory, často přepínané cívkami (viz relé).

### Žárovky

- vyšší spotřeba, je třeba spínací prvek (relé, tranzistor)

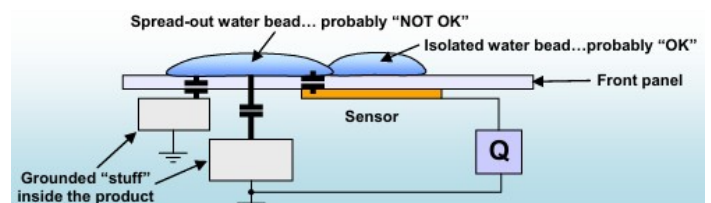
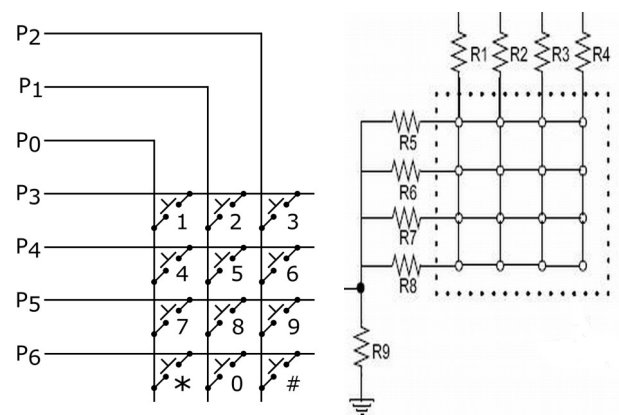
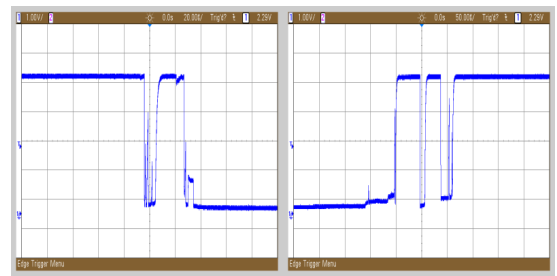
### LED

LED diody využívají PN přechod k emitování světla (elektroluminiscence).

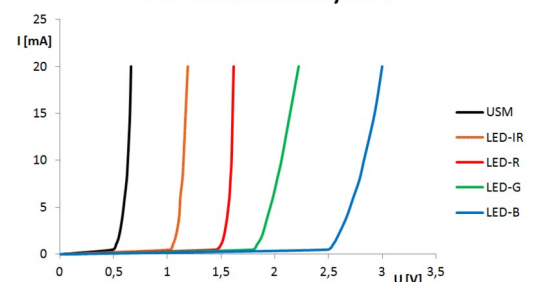
Řízení LED viz její VA charakteristika.

$$R = (U_n - U_r) / I$$

T.Mainzer, SES



A-V charakteristiky diod



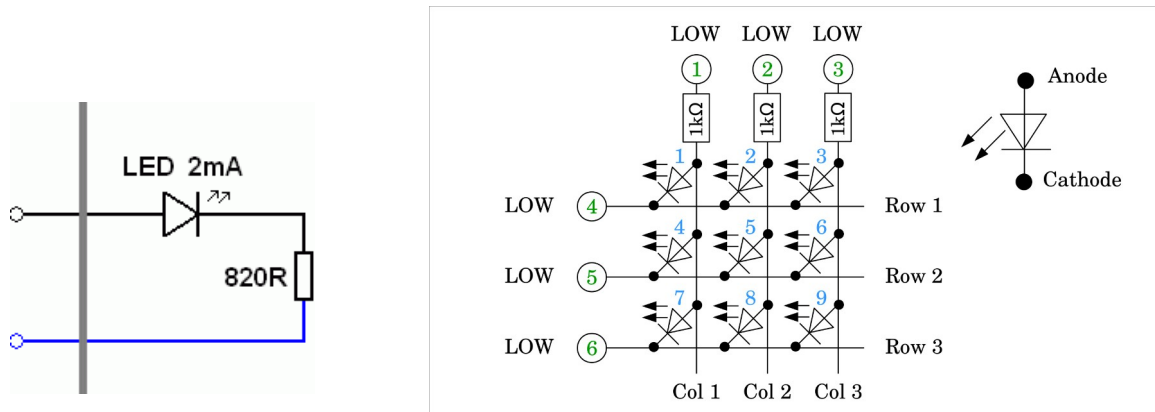


Svítivost je (přibližně) úměrná příkonu (proudu). Lze použít přímé proudové řízení. Ale častěji se používá PWM.

Pozor na jas (energii, svítivost) vs citlivost oka (která je logaritmická. Aproximačně platí

$E=S^{2.5}$  ( $E$ =energie(elektrická),  $S$ =citlivost oka), tj. Pro dvojnásobný/poloviční jas (tak jak je vnímán okem) potřebujete 565% / 18% energie – tj. vysoké rozlišení pwm při regulaci ve větším rozsahu.

Pro více LED: Multiplexování (viz obr). Umožňuje ovládat více LED pomocí méně vodičů. Pozor na max.proud LED.



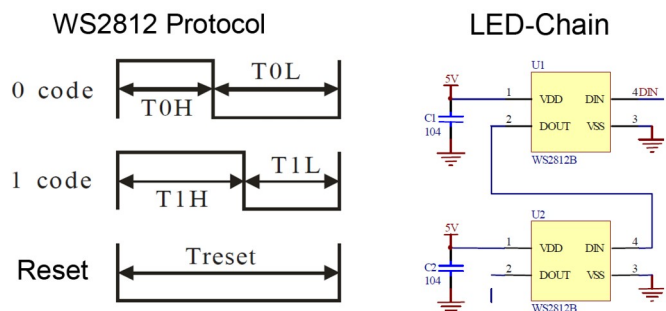
## LED (multicolor)

Vícebarevné diody s vyvedeným jedním společným vývodem (společná anoda nebo katoda) a samostatným ovládáním barev (typicky RGB). Případně pro dvoubarevné diody – dvě antiparalelně zapojené diody v jednom pouzdře.

## LED (adresovatelné)

Obvykle spojeny do řetězce (daisy chain), kde pomocí sériového protokolu jsou postupně plněny hodnoty RGB jednotlivých diod.

Relativně vysoké nároky na časování (časy jsou na úrovni [us]). V Daisy chain konfiguraci porucha diody v řetězci vede k nefunkčnosti následných diod.



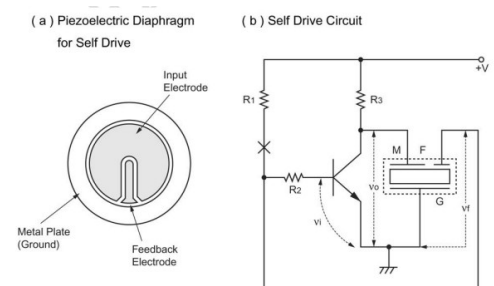
## Zvukové indikátory

### Piezo siréna

Užívá piezoelektrického jevu – mechanická změna aplikováním řídicího napětí

Optimalizované pro jednu ideální rezonanční frekvenci (nejvyšší účinnost/hlasitost)

Řízení buď log.signálem (0/1) a nebo příslušnou frekvencí.



Užití: alarm, potvrzení voleb, zvuky při stisku kláves.

## Piezo reproduktor

Řízení analogovým signálem.

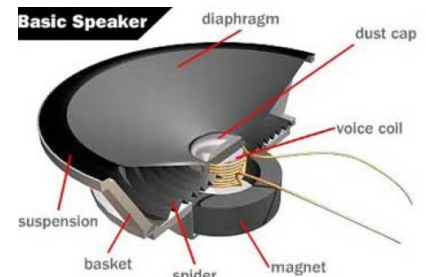
## Reproduktor

Reproduktor (speaker) funguje jako měnič elektrických signálů na akustické signály (=elektro-akustické měniče). Rozlišujeme několik základních typů reproduktorů, které se liší principy, na jakých fungují při přeměně elektrické energie v mechanickou energii.

Elektrodynamické reproduktory – nejběžnější typ, kmitající cívka v magnetickém poli.

Elektrostatické reproduktory - velkoplošné, tenké průhledné membrány s vodivou vrstvou, která je umístěna mezi dvěma elektrodami.

Piezoelektrické – viz piezo reproduktor



## Displeje

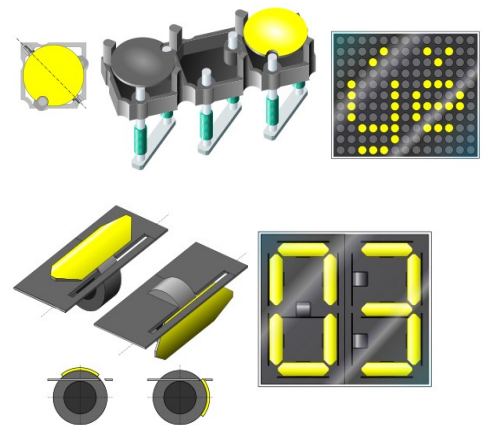
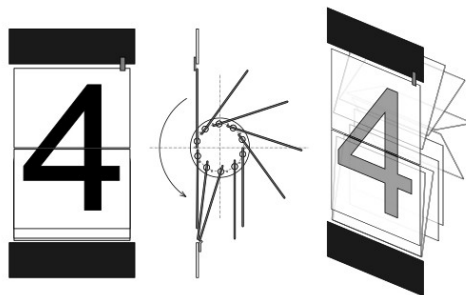
### Elektro-Mechanické

Základní ovládání viz kap. Relé (cívka), Servo, Motor

Elektromechanický dělený překlápěcí displej (split flap)

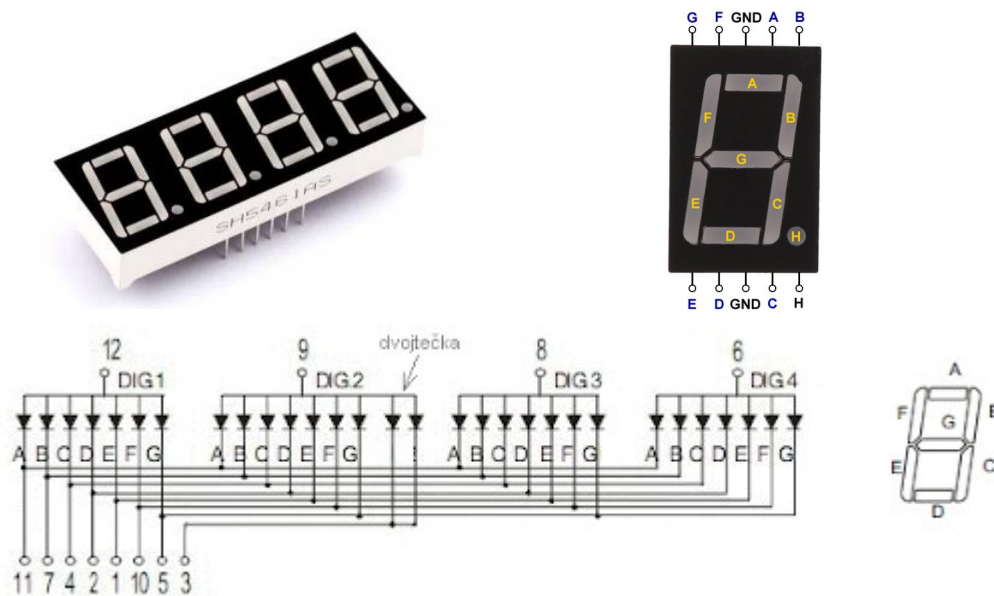
Matickový elektromechanický terčikový displej (flop dot, flip disc)

Segmentový elektromechanický displej (vane segment)



### Sedmisegmentové

Obvykle diody tvarové do symbolů(segmentů) s vyvedením jedním společným a N-samostatných vyvodů pro každý segment - základní ovládání viz. LED



Složitější řízení - Multiplex.

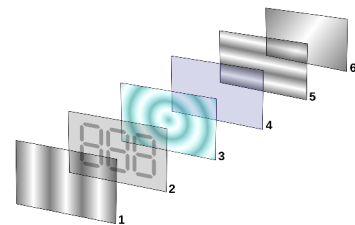
Specializované obvody (napr. MAX7219, TM1637, ...) - obsahují vlastní logiku multiplexu a někdy i proudového řízení, procesor přes sériovou sběrnici jen posílá data průpadně nastavuje další chování.

### LCD

Využívá průchodu světla přes polarizované/nepolarizované tekuté krystaly. Polarizace se provádí elektrickým napětím – mezi dvěma průhlednými (na sklo napařenými) elektrodami.

Reflexivní (reflexní) – jako zdroj světla využívají okolní osvětlení (odrážené od zrcadla na konci displaye)

Transmisivní (transmisní) – aktivní zdroj světla je umístěn za displayem (podsvětlení)

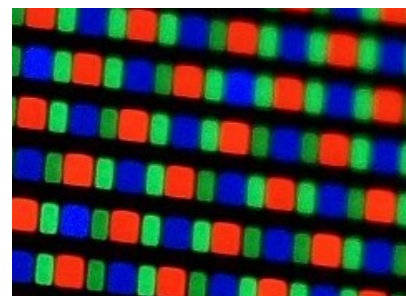


### TFT

Barevné LCD - využívá navíc barevnou masku bodů k dosažení efektu barevného obrázku (RGB)

### OLED

Plosné displaye. OLED displeje využívají organické materiály, které emitují světlo, když jsou excitovány elektrickým proudem.



(AMOLED - způsob řízení OLED kdy každý bod má svůj spínací transistor a kondenzátor)

(problém s „vypalováním“)

## e-ink

E-ink využívá mikrokapsle s bílými částicemi a tmavým inkoustem, které se pod vlivem elektrického náboje otáčejí a zobrazují bílou nebo černou barvu (šedou. + další barvy – např.červená).

Nízká spotřeba (jen při překreslování), složité řízení (zejména barevné displaye), pomalé překreslování.

## Display Interface

VGA – (Video Graphics Array): kombinace analogových signálů (RGB) a řídicích synchronizačních pulsů. nepřenáší audio.

DVI (Digital Visual Interface): Přechodné rozhraní mezi analogovým a digitálním přenosem (obsahuje v sobě analogovou a digitální přenosovou specifikaci DVI-I = DVI-A + DVI-D ). nepřenáší audio.

DisplayPort – Používá diferenciální signalizaci s více páry vodičů. Podporuje vysoké rozlišení až 8K, více displejů z jednoho portu, a různé audio formáty. Má zpětně kompatibilní režim pro DVI a HDMI pomocí adaptérů.

HDMI (High-Definition Multimedia Interface) - používá TMDS (Transition-Minimized Differential Signaling) pro přenos audio a video signálů. Obsahuje také data kanál (DDC) pro komunikaci mezi zdrojem a displejem. Komunikační možnosti: Podporuje vysoké rozlišení až 8K, různé audio formáty včetně Dolby TrueHD a DTS-HD Master Audio. Obsahuje také kanál pro ethernet a zpětný audio kanál (ARC).

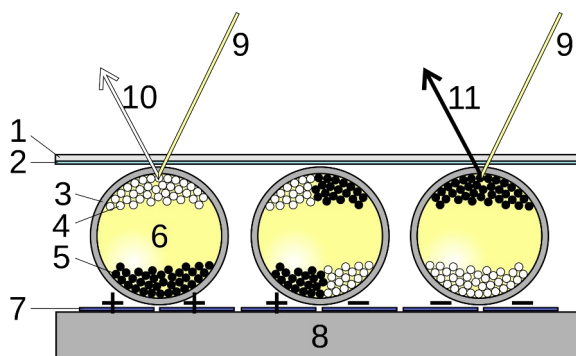
Thunderbolt - Kombinuje DisplayPort a PCI Express v jednom rozhraní a podporuje vysokorychlostní přenos dat.

LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) - diferenciální signály. Často se používá v notebookových obrazovkách a vnitřních displejích pro přenos obrazu. Podporuje nižší spotřebu energie a vyšší rychlosti přenosu. Interní rozhraní různých TFT displayů.

DPI (Parallel, RGB) - signal PCLK (clock) a synchronní paralelní data (8-24bitů) + pomocné synchronizační signály VSYNC a HSYNC (vertikální – obrázky a horizontální – řádky). Interní rozhraní různých TFT displayů.

DSI (Display Serial Interface) - Používá diferenciální signalizaci pro vysokorychlostní přenos dat po sériové sběrnici. Obsahuje jeden vysokorychlostní hodinový vodič a jeden nebo více datových vodičů. Interní rozhraní různých TFT displayů.

Pozn. Pro integrované zobrazovací bloky se pak dále používají existující obecná rozhraní – usb, ethernet, nebo i can-bus, rs485.



## **Kamery**

### **Analogové**

### **Digitální**

## **Kamerový interface**

Parallel (DPI)– signal PCLK (clock) a synchnonní paralelní data (typ.8-12bitů) + pomocné synchronizační signály VSYNC a HSYNC (vertikální – obrazy a horizontální – řádky). Používáno pro jednoduché kamerové snímače.

LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) - Často se používá v automobilových kamerových systémech a jiných vestavěných aplikacích, kde je důležitá nízká spotřeba energie a odolnost vůči rušení a jednodušší implementace (oproti CSI-2)

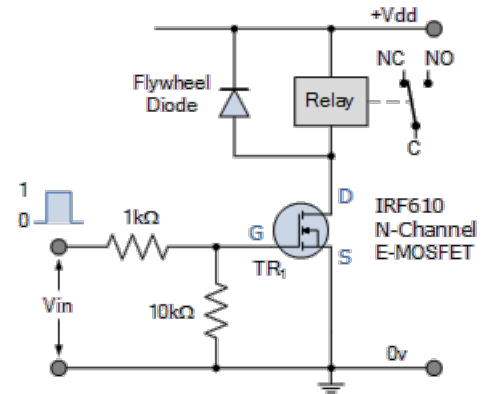
(MIPI) CSI-2 (Camera Serial Interface) - používá diferenciální vedení a podporuje dvě fyzické vrstvy: D-PHY a C-PHY. D-PHY používá jeden hodinový vodič a jeden nebo více datových vodičů (až 4). C-PHY používá trojice vodičů (triplet. až 3 triplety) pro přenos dat. Podpora low power mode, virtuálních kanálů (přenos více datových typů z jednoho nebo více snímačů), podpora komprese DPCM . Používáno používáno v mobilních zařízeních, tabletech, automobilových systémech atd.

HD-SDI a CoaXPress – oba standardy používají koaxiální kabely pro přenos nekomprimovaného videa, až 12Gbps. Výhodou je nízká latence, odolnost proto rušení, umožnění delších přenosových vzdáleností.

# 12. Aktuátory - Relé, motory, Serva

## Relé

- monostabilní (běžné), bistabilní (dva stabilní stavy, bez spotřeby energie v ustáleném stavu)
- spínací, rozpínací kontakty – spínání AC/DC, proud kontakty (! DC vs AC, odporová vs indukční zátěž)
- reléová logika – AND/OR, ladder diagram
- spínání relé, ochrany



## Motory

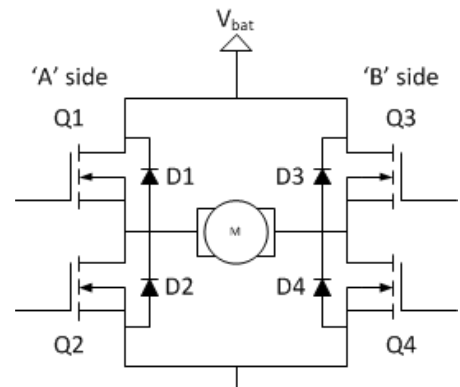
### DC motory

Komutátorové / kartáčové. Levné. Nižší životnost.

Řízení: pro jednosměrný pohyb – spínací prvek (relé, transistor).

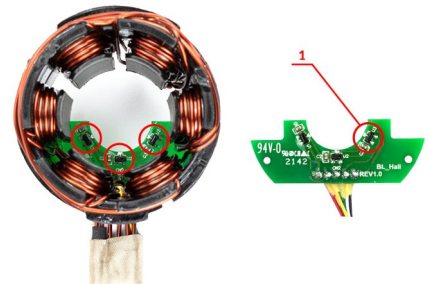
Pro obousměrný pohyb – H-bridge. často integrovaný. Diskuse řízení (q1-q4) - vlevo/vpravo/brzda/volno

Řízení rychlosti – obvykle použito pwm. Ovykle nelze řídit v plném rozsahu (od nulových otáček)



### BDCM (Brushless DC Motor)

Elektronicky komutovaný motor - synchronní stejnosměrný motor, který místo komutátoru používá střídač vytvářející pulzy do cívek statoru tak, aby se motor otáčel (vytváří točivé magnetické pole). Rotor je tvořen permanentními magnety. Složitější řízení (ovládáním lze přirovnat ke krokovým motorům se zpětnou vazbou), kdy pole je nutné řídit synchronně s polohou rotoru.. Vyšší životnost. Zpětná vazba je nejčastěji dělána hallovými (magnetickými) sondami (viz. obr) a nebo pomocí tkzvn. Back-EMF – měřením/detekcí zpětné indukce od rotoru do ovládacích cívek.



### Krokové motory

Bipolární řízení. Velký kroutící moment při nízkých rychlostech. Nízká účinnost, nízká akcelerace. (často bez zpětné vazby, riziko ztráty kroku)

Nájezdové/dojezdové rampy.

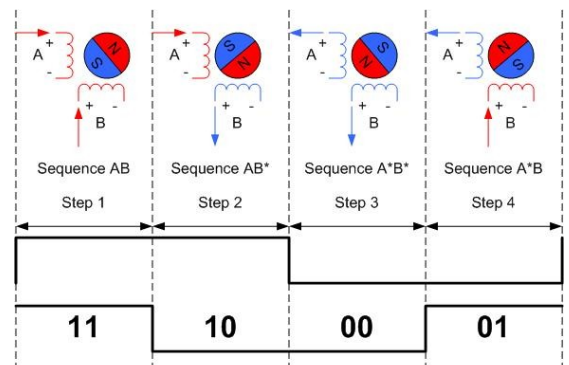
Krokování vs mikrokrokování.

### AC motory (230/400V)

Dvoufázové, třífázové (hvězda/trojuhelník)

Ovládání jednoduché – stykače (pro 1f i 3f motory)

Ovládání složitější – frekvenční měnič (je-li třeba řídit/měnit rychlost otáčení, moment, rozběh).





Obvykle pro 3f motory (měnič může mít 1f i 3f vstup), zátěž lineární (zvyš.otáček nevede k nárustu záteže, např. Obráběcí stroje)/kvadratická(zvyš.otáček vede k růstu záteže, např. Čerpadla), řízení lineární, kvadratické, vektorové, vektorové se zpětnou otáčkovou vazbou,..

## Serva

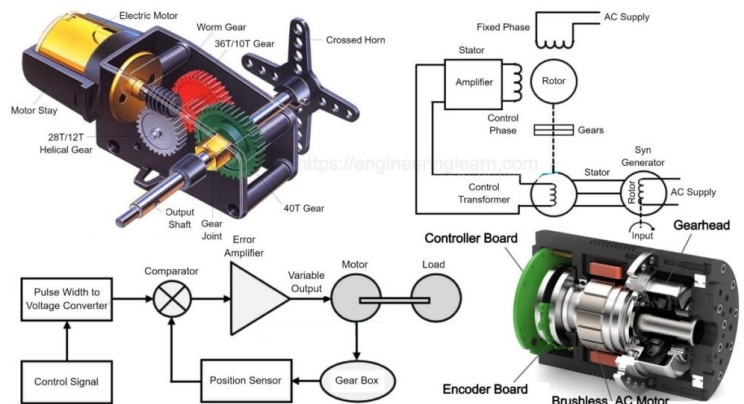
Spojení motoru + sensoru (polohy) + zpětné vazby (regulátoru)

Motor – viz Motory

Sensor polohy – různé typy (viz Sensory polohy), nejjednodušší/nejlevnější potenciometr.

Řízení: „analogové“ = pwm (1-2ms/20ms typ)

Digitální – zahrnuje různé protokoly, není jednotný standard



## Ventily

Mechanicky různé typy zařízení ovlivňující průchod fyzikálního media (plyn, kapalina) – kulový, sedlový, šoupátko, pístový, klapka.

Magnetické on/off - cívka (magnetický obvod) ovládá stavy otevřeno/zavřeno.

Termoventil – teplota je převáděna na mechanický pohyb (zavírání). (automatické řízení, nebo vnějším topným elementem možno zavírat)

Servoventily - otevírání/zavírání ventilu je řízeno servem.

## DAC převodníky

DAC (Digital-to-Analog Converter) převodníky jsou zařízení, která převádějí digitální signály na analogové – typicky napětí nebo proud. Mohou sloužit jako první člen v řízení výstupních periférií. Vzorkování (dig.signálu) – kvantizace – Rekonstrukce

Vlastnosti DAC převodníků:

Rozlišení - Udává počet bitů použitých k reprezentaci každého vzorku

Vzorkovací frekvence- počet vzorků za sekundu. Vyšší vzorkovací frekvence umožňuje přesnější rekonstrukci původního signálu.

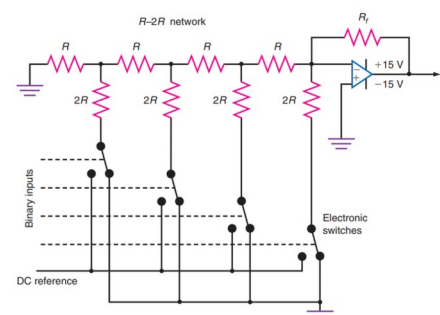
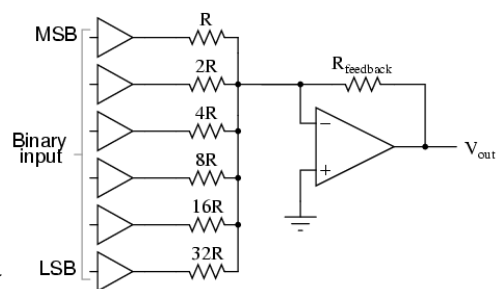
Přesnost – přesnost převodu digitální hodnoty na odpovídající analogové hodnoty. (offset, gain, nelinearita – viz ADC převodníky).

Šum a zkreslení – viz ADC převodníky

Princip – sčítání napěťových příspěvků v jednotlivých bitových řádech – obtížně dosažitelná absolutní přesnost (R,2R,4R,8R,...)

- lépe jako žebříkové schéma (jen R a 2R)

6-bit binary-weighted DAC



# 13. Spojení informací ze senzorů, Bezpečnost senzorů a řídicích aplikací

## Spojení senzorů (sensor fusion)

Sensor fusion je technika, která kombinuje data z více senzorů, aby vytvořila přesnější a spolehlivější pochopení okolního prostředí, než jakého by bylo možné dosáhnout pomocí jednotlivých senzorů. Sensor fusion hraje klíčovou roli v aplikacích umělé inteligence, robotice a ovládání autonomních, až po chytrá města a internet věcí (IoT).

Proč?

Zvýšená přesnost - Redukce chyb a šumu v datech z různých senzorů vede ke zvýšené přesnosti rozhodování a celkovému výkonu systému.

Robustnost - Kombinace dat z více senzorů kompenzuje omezení nebo selhání jednotlivých senzorů, což zajišťuje, že systém zůstane funkční a spolehlivý i v náročných podmínkách.

Rozšířený rozsah - Sensorová fúze poskytuje komplexnější pohled na okolí, což je zvláště cenné v aplikacích, které vyžadují podrobné pochopení prostředí.

Klíčové principy:

Asociace dat - Určuje, která data z různých senzorů odpovídají stejným objektům nebo událostem v reálném světě.

Odhad stavu - Proces odhadu skutečného stavu systému nebo prostředí na základě dostupných sensorových dat, přičemž se bere v úvahu šum a nejistoty.

Kalibrace senzorů - Úprava sensorových měření, aby byla konzistentní a mohla být účinně kombinována.

Techniky (provedení):

Centralizovaná fúze - Všechna data senzorů jsou odesílána do centrální jednotky, která je kombinuje a provádí potřebné výpočty.

Distribuovaná fúze - Proces fúze je rozdělen mezi více uzlů nebo jednotek, z nichž každý zpracovává data z části senzorů a následně je kombinuje s ostatními.

Hybridní fúze - Kombinuje prvky centralizované a distribuované fúze, kdy některé zpracování probíhá lokálně na úrovni senzorů a vyšší úroveň fúze se odehrává na centrální jednotce

Algoritmy:

Kalmanův filtr - algoritmus, který poskytuje optimální odhad stavu (lineárního) dynamického systému na základě šumových a nejistých měření

Filtr částic - Algoritmus používaný pro odhad stavu nelineárních a negaussovských systémů, který reprezentuje pravděpodobnostní rozdělení stavu pomocí sad vážených částic.

Bayesovské sítě - Nástroj pro reprezentaci a vyhodnocování pravděpodobnostních vztahů mezi proměnnými v systému.

Neuronové sítě – umožňují kombinovat jednotlivé vstupy do jednoho výstupu

Omezení:

Výpočetní složitost - Zpracování a integrace dat z více senzorů je náročné na výpočetní zdroje.

Kvalita dat - Kombinace dat různých senzorů může být ovlivněna šumem, selháním senzorů nebo okolními podmínkami.



## Prostředky pro bezpečnost (safety) v MCU

Safety vs Security

### Brownout detektor

- zajišťuje definovaný reset procesoru při poklesu napětí.
- může být nevýhodné zejména u low power aplikací (spotřeba, rozptyl parametrů)

### Watchdog

#### jednoduchý

- „volně“ běžící čítač, podosažení určitého bodu resetuje procesor
- nastavitelná doba běhu (rozsah typicky 0.1ms-100s, v závislosti na aplikaci)
- reset watchdogu provádí kód programu a znamená znovuspuštění běhu
- pozor na umístění resetovacího bodu watchdogu

#### okénkový (window)

- reset watchdogu je možný jen v časovém okně od X do Y. Při pokusu o reset jindy dochází k resetu procesoru

### Výjimky MCU

- např. Bus fault, memory manage fault, hard fault - vznikají chybou v programu a/nebo nevhodným souběhem procesů → nutno ošetřit (default většiny IDE je nekonečná smyčka)

## Prostředky pro bezpečnost (security) v MCU

### Flash protection

- proti vyčtení aktuálního kódu, proti zapsání neautorizovaného kódu

nejčastěji tyto základní úrovně

- zakázání debug interface
- Programovatelné pojistky proti vyčtení paměti (nebo části) – jejich smazání je možné jen se smazáním dané paměti.
- zakázání čtení/přeprogramování flash (externí / interní)

### Security peripherals

- unique ROM id, secure flash for id/info store
- random number generator
- crypto algorithm support periphery, e.g. SHA, AES (128, 192, 256bit)
- tamper detection unit

## Bezpečnostní (Safety) Normy

AEC\_Q101 ([http://www.aecouncil.com/Documents/AEC\\_Q101\\_Rev\\_C1\\_Complete.pdf](http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q101_Rev_C1_Complete.pdf))

- automotive norma pro (tepelné/mechanické) namáhání (cyklování) el.součástí

## ISO26262, ASIL, ASPICE ISO IEC 15504, (AUTOSAR pro ECU)

ISO 26262 je mezinárodní standard pro funkční bezpečnost elektrických a elektronických systémů v silničních vozidlech. Zaměřuje na bezpečnostní (safety) aspekty během celého životního cyklu automobilových elektronických a elektrických systémů

ASIL (Automotive Safety Integrity Level) - je klasifikační schéma rizik definované standardem ISO 26262. Definuje požadavky na bezpečnost - pomáhá určit bezpečnostní požadavky potřebné k dosažení souladu s ISO 26262. Existují čtyři úrovně ASIL: ASIL A, ASIL B, ASIL C a ASIL D, přičemž ASIL D představuje nejvyšší. ASIL je stanoven na základě analýzy rizik potenciálního nebezpečí, která zohledňuje závažnost, expozici a kontrolovatelnost daného scénáře

ASPICE (Automotive SPICE) - (Software Process Improvement and Capability dEtermination) je sada technických standardů pro hodnocení procesů vývoje softwaru a souvisejících obchodních funkcí v automobilovém průmyslu. Zajišťuje, že procesy vývoje softwaru (např. pro automobilové ECU) jsou efektivní, kvalitní a schopné splnit požadavky definované normou ISO 26262

ASPICE je založen na standardu ISO/IEC 15504, který byl původně odvozen od standardu ISO/IEC 12207 a modelů zralosti jako Bootstrap, Trillium a Capability Maturity Model (CMM). ASPICE se zaměřuje na zlepšování procesů a určování schopností organizací při dodávání softwarových produktů, systémů a IT služeb

AUTOSAR - Poskytuje standardizovanou softwarovou architekturu pro vývoj automobilových ECU, která podporuje splnění bezpečnostních požadavků ASIL.

## Safety Integrity Level (SIL)

SIL je standard používaný pro zajištění funkční bezpečnosti systémů v různých průmyslových odvětvích, například v chemickém, ropném a plynárenském průmyslu (vs ASIL který je specializován na automotive). SIL je definován normou IEC 61508. Tento standard klasifikuje bezpečnostní systémy na čtyři úrovně podle pravděpodobnosti selhání a míry potřebné ochrany před riziky. SIL1-4 (ASIL,BSIL,..). Úroveň se vždy vztahuje k funkci omezení rizika. Úroveň integrity bezpečnosti – a tedy i konstatování, že „daný obvod snižuje stávající riziko n-krát“ – lze přiřadit pouze celému systému obnovení bezpečného stavu v případě selhání.

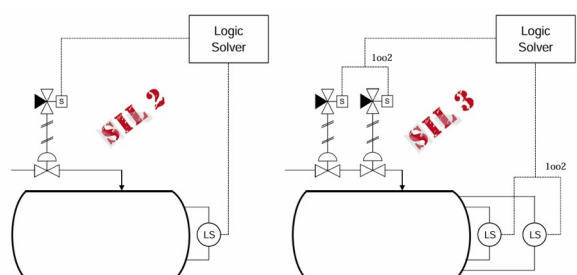
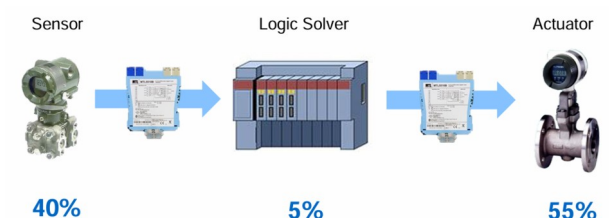
Úrovně SIL

SIL 1 - Nejnižší úroveň integrity. Vhodná pro aplikace s menšími riziky a menšími nároky na bezpečnostní systémy. Pravděpodobnost selhání:  $10^{-1}$  až  $10^{-2}$  (Pravděpodobnost, že bezpečnostní funkce (SIF) splní požadované snížení rizik)

Použití: Například v průmyslových aplikacích, kde případné selhání nemá katastrofické následky.

SIL 2 - Střední úroveň integrity. Používá se pro systémy, kde je mírné až střední riziko selhání.

Pravděpodobnost selhání:  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$ . Použití: Například v chemických továrnách a systémech



kontroly procesů.

SIL 3 - Vysoká úroveň integrity. Vhodná pro aplikace s vysokými riziky, kde je potřeba zvýšené míry ochrany. Pravděpodobnost selhání:  $10^{-3}$  až  $10^{-4}$ . Použití: Například v ropném a plynárenském průmyslu, kde by selhání mohlo vést k vážným následkům.

SIL 4 - Nejvyšší úroveň integrity. Používá se pro aplikace s velmi vysokými riziky, kde jsou požadavky na bezpečnost kritické. Pravděpodobnost selhání:  $10^{-4}$  až  $10^{-5}$ . Použití: Například v jaderné energetice nebo v jiných aplikacích, kde by selhání mělo katastrofální následky.

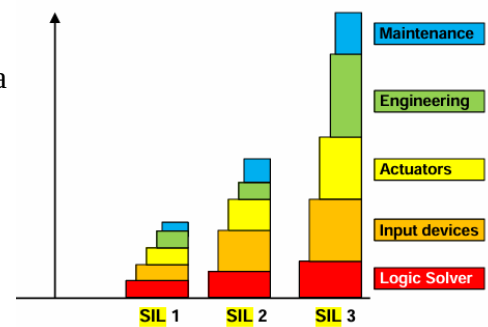
### Klíčové aspekty SIL

Posouzení rizik - Určuje, jaké úrovně SIL je třeba dosáhnout na základě analýzy rizik a jejich důsledků - Rozsah škod (S) (Jak závažné jsou předvídatelné následky?), Pravděpodobnost přítomnosti (F) (Jak často a jak dlouho se lidé zdržují v nebezpečné zóně?), Eliminace/prevence nebezpečí (P) (Mohu události zabránit nebo ji omezit?), Pravděpodobnost výskytu (W) (Jak často musím očekávat nehodu?)

Opatření na zvýšení bezpečnosti - Opatření jako redundantní systémy, zvýšené testování a monitorování pro dosažení požadované úrovně bezpečnosti.

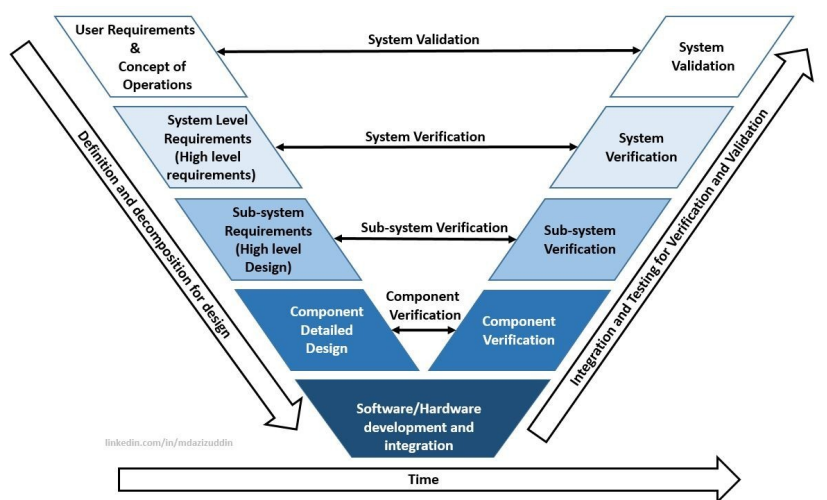
Ověření a validace - Procesy ověřování a validace, které zajišťují, že systém splňuje specifikované požadavky na bezpečnost. Sem patří i opakované periodické kontroly zařízení a jeho bezpečnosti.

Až do SIL2 si výrobci hodnotí svá zařízení sami. (v případě SIL1 posuzuje techniku nezávislá osoba, v případě klasifikace SIL2 je to nezávislé oddělení). Od SIL 3 musí být každé zařízení, které používáte v bezpečnostním obvodu, certifikováno nezávislou institucí v souladu s normou IEC 61508 (Například v česku a Německu jsou to organizace TÜV nebo Exida)



### V-model (diagram) – development/validation

V-model je grafické znázornění životního cyklu vývoje systémů. Tento model se často používá v softwarovém inženýrství a projektovém managementu. V-model je pojmenován podle svého tvaru, který připomíná písmeno "V". Levá strana "V" představuje fáze verifikace, zatímco pravá strana "V" představuje fáze validace. V-model je vhodný pro projekty, kde jsou požadavky a funkčnost systému dobře definovány od začátku. Je také užitečný při práci s většími týmy, kde je důležitá koordinace mezi vývojáři a testery.



Výhody V-modelu - Jasná struktura (Každá fáze vývoje má odpovídající fázi testování), Snadná sledovatelnost (Umožňuje snadné sledování pokroku a identifikaci problémů), Zajištění kvality (Důraz na testování v každé fázi zajišťuje vysokou kvalitu výsledného produktu)

## Testovací prostředí

SIL (software in the loop), HIL (hardware in the loop)

**SIL** je metoda testování a validace softwaru v simulačním prostředí (které simuluje i hardware). Tento přístup umožňuje rychle a nákladově efektivně odhalit chyby a zlepšit kvalitu kódu. SIL testování se obvykle provádí v raných fázích vývoje softwaru, zatímco složitější a nákladnější HIL testování se provádí v pozdějších fázích.

Výhody SIL - Nákladová efektivita, Rychlost (Testování v simulačním prostředí může být rychlejší než v reálném čase), Flexibilita a opakovatelnost, Oddělení vývoje softwaru od hardwaru.

**HIL** je technika, při které je vestavěný systém umístěn do testovacího procesu, který simuluje provoz produktu v reálných podmínkách. Tento přístup umožňuje testování a návrh iterací, jako by zařízení fungovalo v terénu vedle dalších komponent

Výhody HIL - Realistické testování (HIL testování umožňuje simulovat reálné podmínky a scénáře, což zvyšuje kvalitu testování), Bezpečnost (Umožňuje testování v bezpečném prostředí, kde ale lze kontrolovat a simulovat nebezpečné podmínky), Škálovatelnost (HIL testování umožňuje testování širokého spektra scénářů bez rizika pro fyzický systém)

## Typy testů

- functional
- robustness
- performance
- resource (%zatížení, využití paměti)
- safety (prioritní)
- interface

## Metody návrhu/realizace testů

(Cílem technik je obvykle stanovit testovací protokoly a snížit počet testovacích případů, které je třeba provést, aniž by byla ohrožena účinnost testování)

Black-box testing - Testování bez znalosti vnitřní struktury nebo implementace systému. Zaměřuje se na vstupy a očekávané výstupy.

White-box testing - Testování s plnou znalostí vnitřní struktury nebo implementace systému. Zaměřuje se na testování kódu a logiky.

Boundary value analysis - Testování hranic vstupních hodnot a jejich kombinací (s předpokladem že zde je největší pravděpodobnost chyby)

Equivalence partitioning - Rozdělení vstupních dat do ekvivalentních tříd a testování reprezentativních hodnot z každé třídy.

- Requirement-based - testování na základě specifikovaných požadavků. Testovací případy jsou vytvářeny tak, aby ověřovaly, zda systém splňuje všechny definované požadavky

- Experience-based test design technique (error gisting) - Testovací případy jsou vytvořeny tak, aby se zaměřily na oblasti, kde je pravděpodobnost výskytu chyb vysoká. Testy vytvořeny na základě zkušeností testerů

- Fault injection - metoda, při které jsou do systému záměrně vkládány chyby, aby se simulovaly různé chybové scénáře. Cílem je zjistit, jak systém reaguje na chyby a ověřit jeho robustnost a

odolnost vůči selháním.

- Control-flow-based test - Tento přístup analyzuje tok řízení v programu a vytváří testovací případy, které pokrývají různé cesty, větve a smyčky v kódu. Cílem je zajistit, že všechny části kódu byly testovány a fungují správně.
- Causal chain analysis - metoda, která se zaměřuje na identifikaci příčin a následků v systému. Tato technika analyzuje, jak jednotlivé prvky systému ovlivňují ostatní a jak mohou vést k chybám nebo selháním. Cílem je identifikovat a eliminovat potenciální příčiny problémů.
- Interface analysis - se zaměřuje na testování rozhraní mezi různými komponentami systému

Testovací metody

- manual
- automatic

pozn. napr. Pro STM32: <https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-stl.html>

# Cvičení, Semestrální práce

příklady na cvičení a podklady pro tvorbu semestrální práce.

## Zjištění parametrů sensoru (cvičení, semestrální práce)

Vyhledejte v datasheetu základní informace o sensoru (měřená jednotka, rozsah, rychlost měření, komunikační rozhraní, napájení, spotřeba, přesnost, teplotní závislost)

MCP1700 - <https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP1700-Data-Sheet-20001826F.pdf>

LIS331DLH - <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/lis331dlh-954899.pdf>

VEML7700 - [https://cz.mouser.com/datasheet/2/427/VISH\\_S\\_A0012091125\\_1-2572303.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/427/VISH_S_A0012091125_1-2572303.pdf)

PT100 - <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.530-148.1.pdf>

MCP3201 - <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21290F.pdf>

## Měření na na sensoru (cvičení)

LED dioda – měření VA charakteristiky → implikace pro zapojení k mikrokontroleru (výpočet odporu, napěťové omezení) – práce se zdrojem a multimetrem

MCP1700 – měření napětí (výstup sensoru) a proudu (spotřeba sensoru) → diskuse přesnosti a ovlivnění měřeného obvodu

měření baterií/akumulátorů – napětí, proud, vnitřní odpor, kapacita

Měření na sběrnicích – osciloskop → co lze zjistit (rychlost, náběžné/doběžné hrany, odrazy na vedení)

## Výběr sensoru (cvičení, semestrální práce)

Vyberte vhodný sensor pro danou úlohu. Diskutujte možnosti, parametry a kritéria výběru.

- měření teploty těla
- měření výšky hladiny
- měření proudu
- měření úhlu natočení
- měření otáček
- detekce pohybu
- měření hmotnosti

## Algoritmy zpracování signálu (cvičení, semestrální práce)

Pro výše uvedené úlohy („výběr sensoru“) diskutujte algoritmy vhodné pro zpracování signálu vybraného sensoru. Věnujte též pozornost ošetření různých chybových stavů a případnému předzpracování.

### **Navrhněte filtr vhodný pro ... (cvičení, semestrální práce)**

- měření teploty místnosti – sensor má analogové rozhraní a je veden souběžně se silovým vedením a teprve po té je digitalizován
- měření dechu osoby – sensor měří mikropohyby vzniklé dýcháním
- pro příjem signálu HDO (signál hromadného dálkové ovládání v síti nn)

### **Navrhněte algoritmus vhodný pro filtraci dat (cvičení, semestrální práce)**

- data1.txt (otáčky motoru)
- data2.txt (teplota)
- data3.txt (rychlost automobilu)
- data4.txt (napětí baterie)

### **Periférie procesoru (semestrální práce)**

Diskutujte použití periférií MCU pro dané úlohy. Naprogramujte.

- měření frekvence (gpio,interrupt on change,timer/counter,pll)
- IRC sensor (gpio,interrupt on change,timer/counter)
- příjem signálu HDO (gpio,interrupt,adc)
- generování pwm signálu (gpio,timer)
- generování signálu pro krokový motor (gpio,timer)
- generování zvuku (gpio,timer,dac,spi)
- dekódování maticové telefonní klávesnice (gpio, timer)

### **Regulace (semestrální práce)**

- program pro regulaci konstantních otáček ss motoru – zpětná vazba magnetický spínač
- program pro regulaci teploty – teplotní sensor + topný element – udržování konstantní teploty
- sledování zdroje světla – servo + 2 světlocitlivé elementy – servo se otáčí za zdrojem světla
- servo – čtení potenciometru, nájezd na pozici, zpětné čtení potenciometrem

### **Identifikace signálu (cvičení)**

identifikace vodiče / sběrnice – voltmetrem/osciloskopem

