# A6M33SSL: Statistika a spolehlivost v lékařství
# Teorie spolehlivosti

Vojta Vonásek
vonasek@labe.felk.cvut.cz

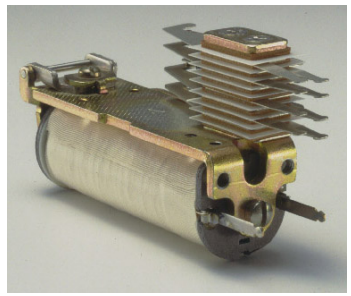
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

# Vícestavové prvky

- Prvky/soustavy mohou mít obecně více typů poruch
- Např. zářivka:
  - svítí (bezporuchový stav)
  - svítí ale se změněnou barevnou teplotou
  - svítí a občas blikne
  - svítí a "bzučí", . . .

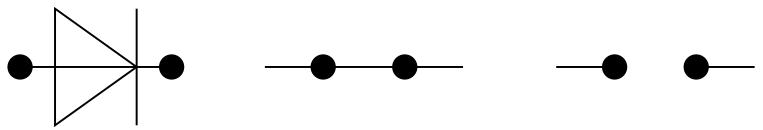
## Tří-stavové prvky:

- Dva typy poruch:
  - porucha "přerušením"("open mode failure")
  - porucha "zkratem"("close mode failure")
- Vhodné pro diody, tranzistory, ventily, relé obvody
- Three Miles Island: porucha ventilu v "otevřeném"stavu
- **Přidání redundantních prvků může snížit nebo i zvýšit spolehlivost soustavy**



# Tří-stavové prvky

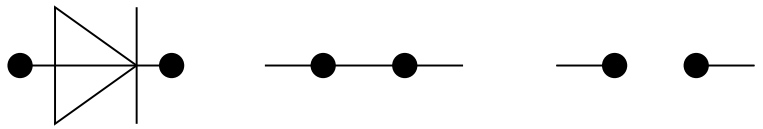
- Tři stavy: $x$ (funguje), $x_z$ (zkrat), $x_p$ (přerušení)
- $q_z = P(x_z)$ je pravděpodobnost, že je prvek ve stavu "zkrat"
- $q_p = P(x_p)$ je pravděpodobnost, že je prvek ve stavu "přerušení"
- $Q_z$ = pravděpodobnost, že je celá soustava "ve zkratu"
- $Q_p$ = pravděpodobnost, že je celá soustava "přerušená"



funguje zkrat přerušeno

# Tří-stavové prvky

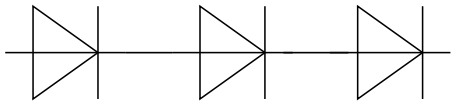
- Tři stavy: $x$ (funguje), $x_z$ (zkrat), $x_p$ (přerušení)
- $q_z = P(x_z)$ je pravděpodobnost, že je prvek ve stavu "zkrat"
- $q_p = P(x_p)$ je pravděpodobnost, že je prvek ve stavu "přerušení"
- $Q_z$ = pravděpodobnost, že je celá soustava "ve zkratu"
- $Q_p$ = pravděpodobnost, že je celá soustava "přerušená"



funguje zkrat přerušeno

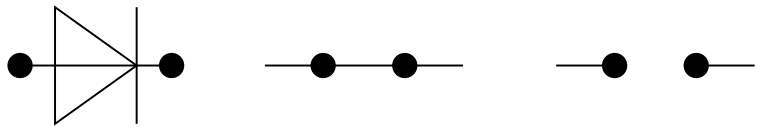
## Sériové zapojení

$$
\begin{aligned}
Q_z &= q_{1z} \cdot q_{2z} \cdots q_{nz} \\
Q_p &= 1 - (1 - q_{1p})(1 - q_{2p}) \cdots (1 - q_{np}) \\
R &= 1 - Q_z - Q_p \\
R &= \sum_{i=1}^{n} \binom{n}{i} r^i q_z^{n-i}
\end{aligned}
$$



# Tří-stavové prvky

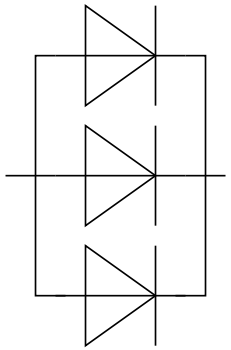
- Tři stavy: $x$ (funguje), $x_z$ (zkrat), $x_p$ (přerušení)
- $q_z = P(x_z)$ je pravděpodobnost, že je prvek ve stavu "zkrat"
- $q_p = P(x_p)$ je pravděpodobnost, že je prvek ve stavu "přerušení"
- $Q_z$ = pravděpodobnost, že je celá soustava "ve zkratu"
- $Q_p$ = pravděpodobnost, že je celá soustava "přerušená"



funguje zkrat přerušeno

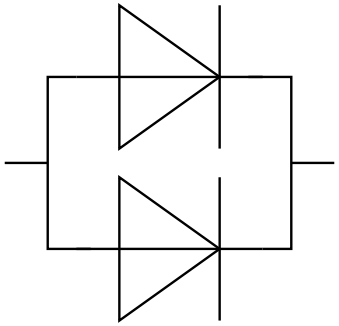
## Paralelní zapojení

$$
\begin{aligned}
Q_z &= 1 - (1 - q_{1z})(1 - q_{2z}) \cdots (1 - q_{nz}) \\
Q_p &= q_{1p} \cdot q_{2p} \cdots q_{np} \\
R &= 1 - Q_z - Q_p \\
R &= \sum_{i=1}^{n} \binom{n}{i} r^i q_p^{n-i}
\end{aligned}
$$



# Tří-stavové prvky: příklad

- Pravděpodobnost zkratu: $q_z = 0.6$
- Pravděpodobnost přerušení: $q_p = 0.2$
- Určete $R$, $Q_z$ a $Q_p$ soustavy.

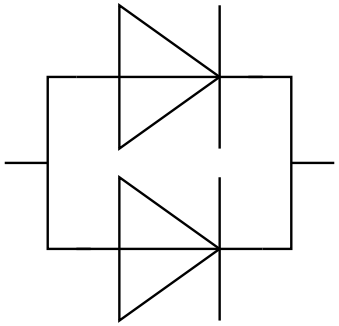


Pravděpodobnost bezporuchového stavu samotné diody je $R_d = 1 - q_z - q_p = 1 - 0.6 - 0.2 = 0.2$.

$$
\begin{aligned}
Q_z &= 1 - (1 - q_z)^2 = 1 - (1 - 0.6)^2 = 0.84 \\
Q_p &= q_p^2 = 0.2^2 = 0.04 \\
R &= 1 - Q_z - Q_p = 1 - 0.84 - 0.04 = 0.12
\end{aligned}
$$

# Tří-stavové prvky: příklad

- Pravděpodobnost zkratu: $q_z = 0.6$
- Pravděpodobnost přerušení: $q_p = 0.2$
- Určete $R$, $Q_z$ a $Q_p$ soustavy.



Pravděpodobnost bezporuchového stavu samotné diody je $R_d = 1 - q_z - q_p = 1 - 0.6 - 0.2 = 0.2$.

$$\begin{aligned} Q_z &= 1 - (1 - q_z)^2 = 1 - (1 - 0.6)^2 = 0.84 \\ Q_p &= q_p^2 = 0.2^2 = 0.04 \\ R &= 1 - Q_z - Q_p = 1 - 0.84 - 0.04 = 0.12 \end{aligned}$$

**Přidáním dalšího prvku paralelně došlo ke zhoršení spolehlivosti!**

# Tří-stavové prvky

- Přidáním prvků v sérii zvyšujeme pravděpodobnost přerušení
- Přidáním prvků paralelně zvyšujeme pravděpodobnost zkratu
- Jak zvolit počet prvků, aby byla pravděpodobnost bezporuchového provozu maximální?

## Sériové zapojení

$$n_0 = \frac{\log\left(\frac{q_p}{1-q_z}\right)}{\log\left(\frac{q_z}{1-q_p}\right)}$$

## Paralelní zapojení

$$n_0 = \frac{\log\left(\frac{q_z}{1-q_p}\right)}{\log\left(\frac{q_p}{1-q_z}\right)}$$

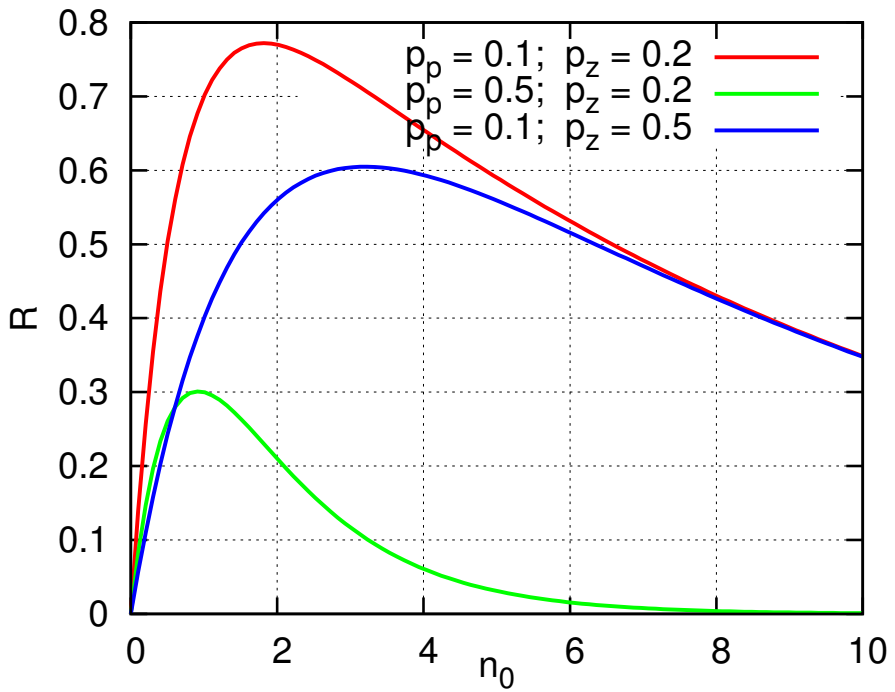
$$n = \begin{cases} \lfloor n_0 \rfloor + 1 & \text{když } n_0 \text{ není celé číslo} \\ n_0 \text{ nebo } n_0 + 1 & \text{pokud } n_0 \text{ je celé číslo} \end{cases}$$

# Tří-stavové prvky

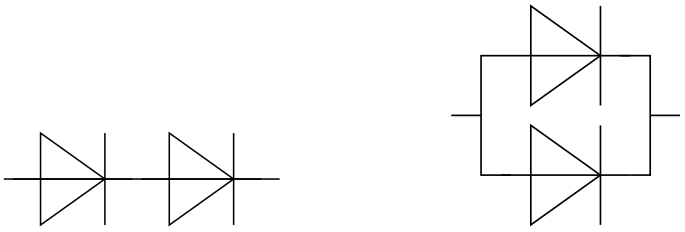
**Příklad:** Relé má pravděpodobnost přerušení $q_p = 0.1$ a zkratu $q_z = 0.2$. Kolik těchto prvků je třeba zapojit sériově, aby byla maximalizována $R$?

$$n_0 = \frac{\log\left(\frac{q_p}{1-q_z}\right)}{\log\left(\frac{q_z}{1-q_p}\right)} = \frac{\log\left(\frac{0.1}{1-0.2}\right)}{\log\left(\frac{0.2}{1-0.1}\right)} = 1.38$$

Optimální počet prvků je $n = \lfloor n_0 \rfloor + 1 = 2$.



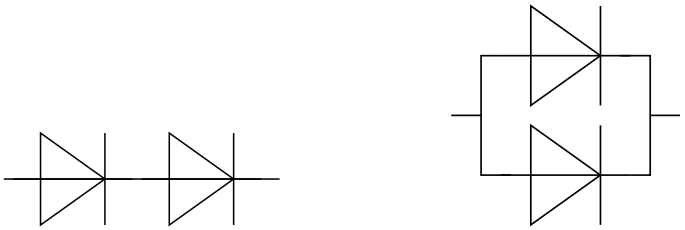
# Tří-stavové obvody: příklad



| | | Sériové | | | Paralelní | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $q_z$ | $q_p$ | $Q_z$ | $Q_p$ | $R$ | $Q_z$ | $Q_p$ | $R$ |
| 0.6 | 0.2 | 0.36 | 0.36 | 0.28 | 0.84 | 0.04 | 0.12 |
| 0.2 | 0.2 | 0.04 | 0.36 | 0.6 | 0.36 | 0.04 | 0.6 |
| 0.1 | 0.2 | 0.01 | 0.36 | 0.63 | 0.19 | 0.04 | 0.77 |

- Porucha zkratem nevadí v sériovém zapojení
- Porucha přerušením nevadí v paralelním zapojení

# Tří-stavové obvody: příklad



| | | Sériové | | | Paralelní | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $q_z$ | $q_p$ | $Q_z$ | $Q_p$ | $R$ | $Q_z$ | $Q_p$ | $R$ |
| 0.6 | 0.2 | 0.36 | 0.36 | 0.28 | 0.84 | 0.04 | 0.12 |
| 0.2 | 0.2 | 0.04 | 0.36 | 0.6 | 0.36 | 0.04 | 0.6 |
| 0.1 | 0.2 | 0.01 | 0.36 | 0.63 | 0.19 | 0.04 | 0.77 |

- Porucha zkratem nevadí v sériovém zapojení
- Porucha přerušením nevadí v paralelním zapojení

- Pokud převažují poruchy typu "zkrat", je lepší sériové zapojení
- Pokud převažuje porucha "přerušením", je lepší paralelní zapojení

# Zvýšení spolehlivosti systémů

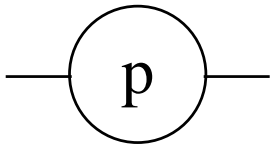
- Vstupem je požadovaná míra spolehlivosti po určenou dobu
- Volba lepších materiálů, technologie výroby, konstrukce . . .
- Použití prvků s vyšší spolehlivostí
- Volba zapojení komponent
- Zálohování (zvýšení redundance)
  - Stálé
  - Majoritní
  - S přepínáním

**Nelze dosáhnout absolutní spolehlivosti systému.**

# Stálé zálohování prvků

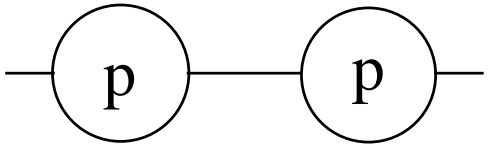
- Prvky v záloze jsou trvale zapnuty
- Náklady na běžící zálohu

Výchozí prvek



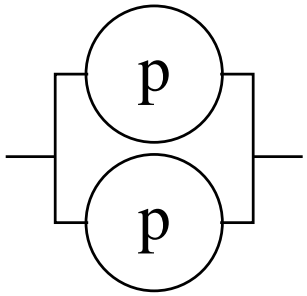

## Záloha v sérii

- Vhodná při častých poruchách typu "zkrat"
- Např. spínací obvody



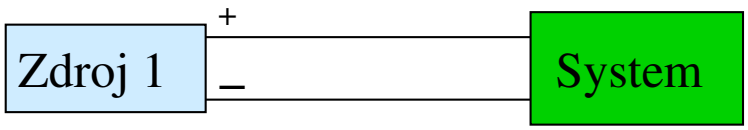

## Paralelní záloha

- Vhodná při častých poruchách typu "přerušení"
- Vhodné pro systémy, kdy lze připustit současný běh záloh (např. datové zálohy, poč. sítě)
- Nevhodné např. pro regulační obvody
- Někdy je nutné doplnit zálohovaný systém o další člen umožňující paralelní běh záloh



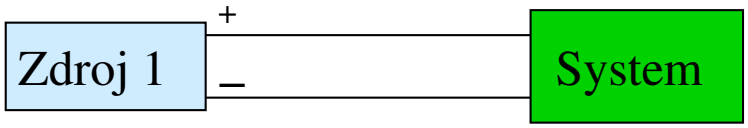
# Stálé zálohování soustav

- Výchozí systém

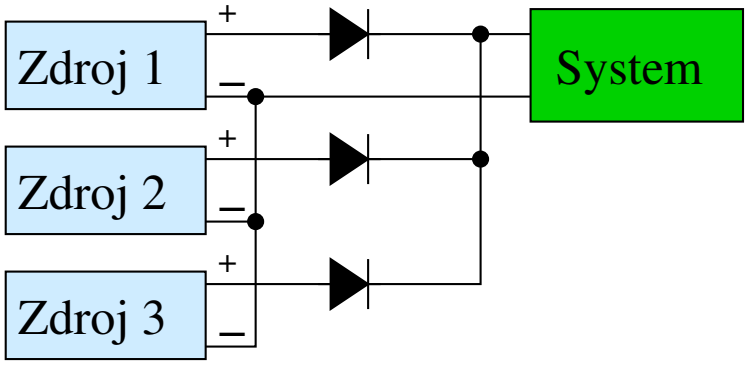


# Stálé zálohování soustav

- Výchozí systém

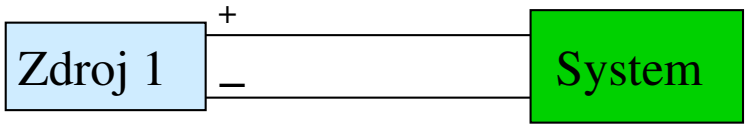



- Paralelní záloha napájení

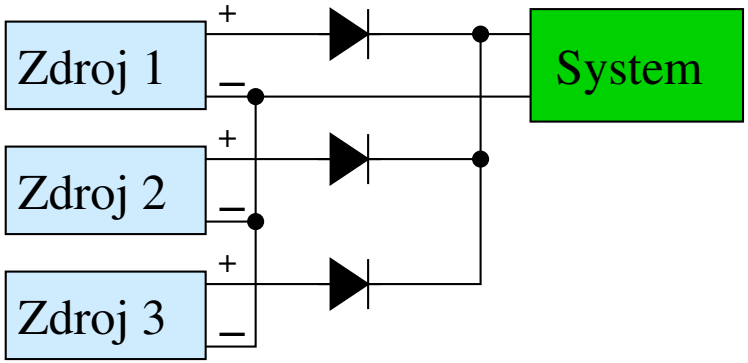


# Stálé zálohování soustav

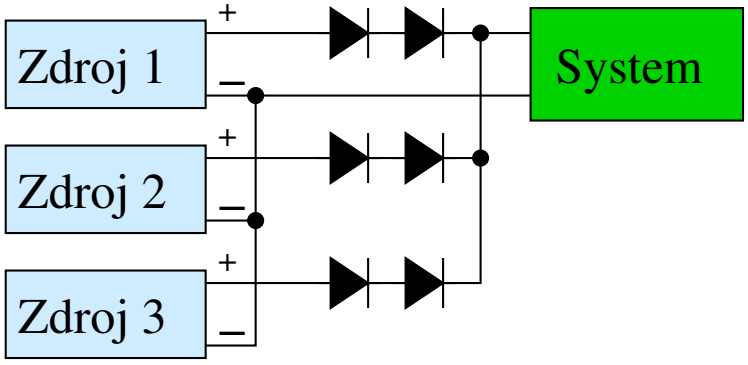
- Výchozí systém




- Paralelní záloha napájení

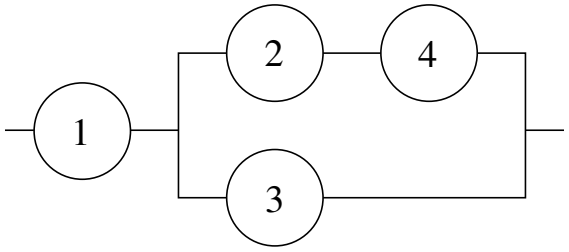



- Zvýšení odolnosti vůči poruchám diod



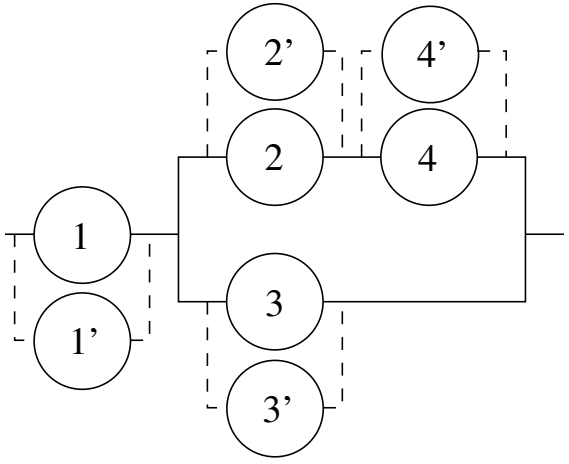
# Stálé zálohování soustav

## Výchozí systém



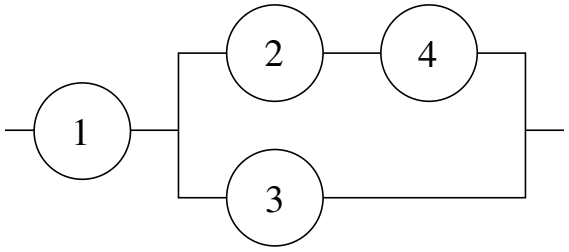

## Zálohování jednotlivých prvků

- Každý prvek je zálohován samostatně



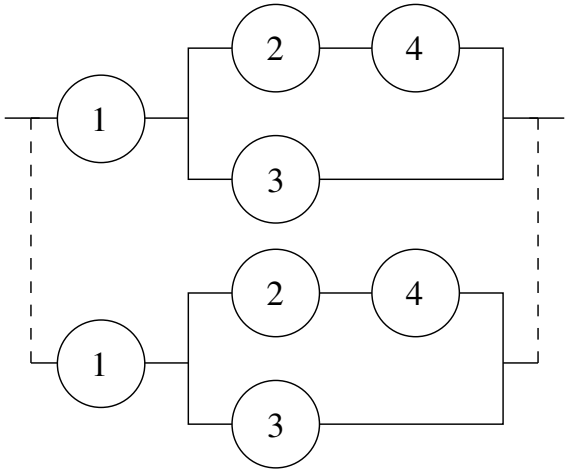
# Stálé zálohování soustav

## Výchozí systém




## Zálohování soustavy

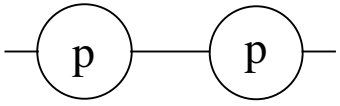
- Soustava se zálohuje jako celek



# Zálohování prvků nebo soustavy

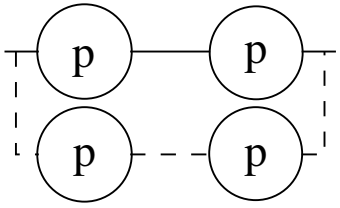
Je lepší zálohování "po prvcích"nebo "celé soustavy"(uvažujme stejné dvoustavové prvky)?

Původní systém: $R = p^2$



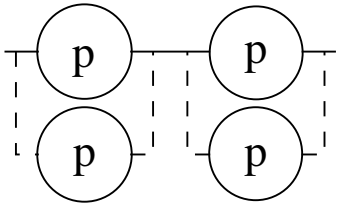

Záloha celé soustavy:

$$R_s = 1 - (1 - p^2)^2 = 2p^2 - p^4$$




Záloha po prvcích:

$$R_p = (2p - p^2)^2 = 4p^2 - 4p^3 + p^4$$



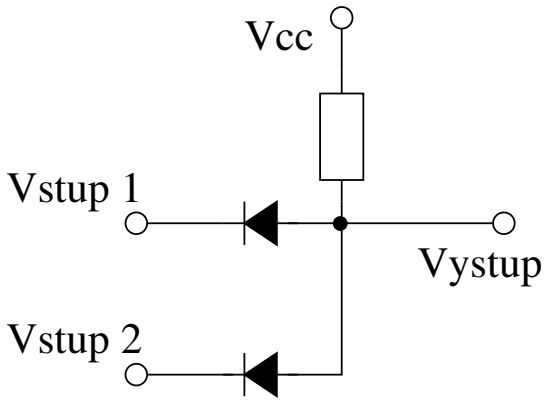

Porovnáním $R_p$ a $R_s$, např:

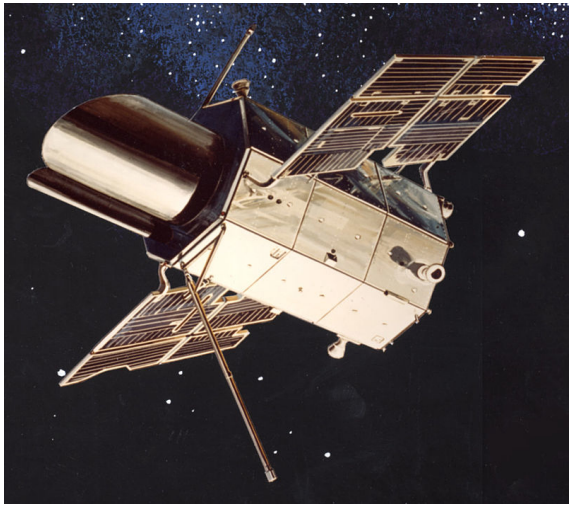
$$R_p - R_s = 2(p - 2p)^2$$

zjistíme, že záloha po prvcích je v tomto případě lepší. Toto lze zobecnit na $n$ dvoustavových stejných prvků, obecně to ale neplatí!

# Příklad paralelního zálohování

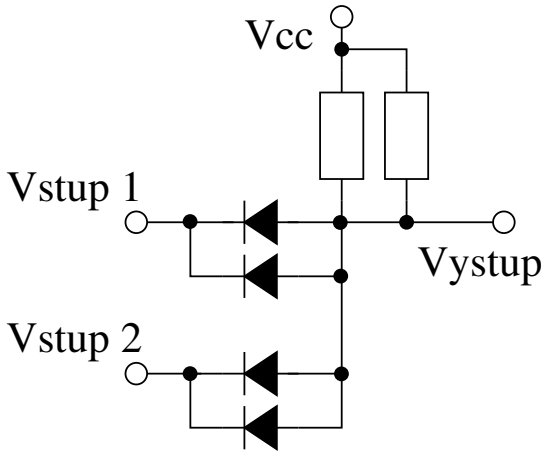
- Obvod realizuje operaci AND
- Možné poruchy: diody, rezistory
- Záloha použita např. v NASA Orbiting Astronomical Observatory

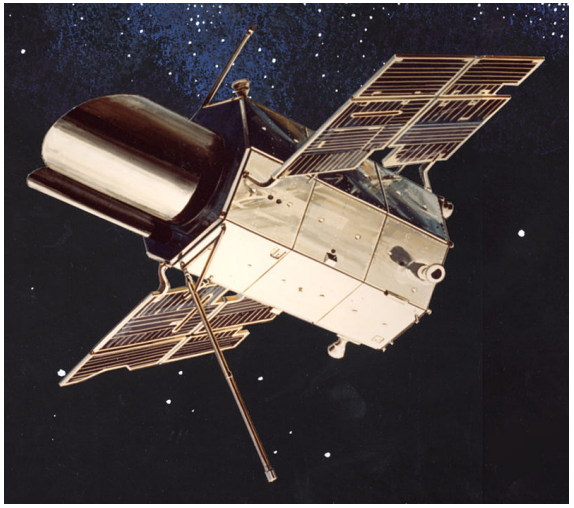


# Příklad paralelního zálohování

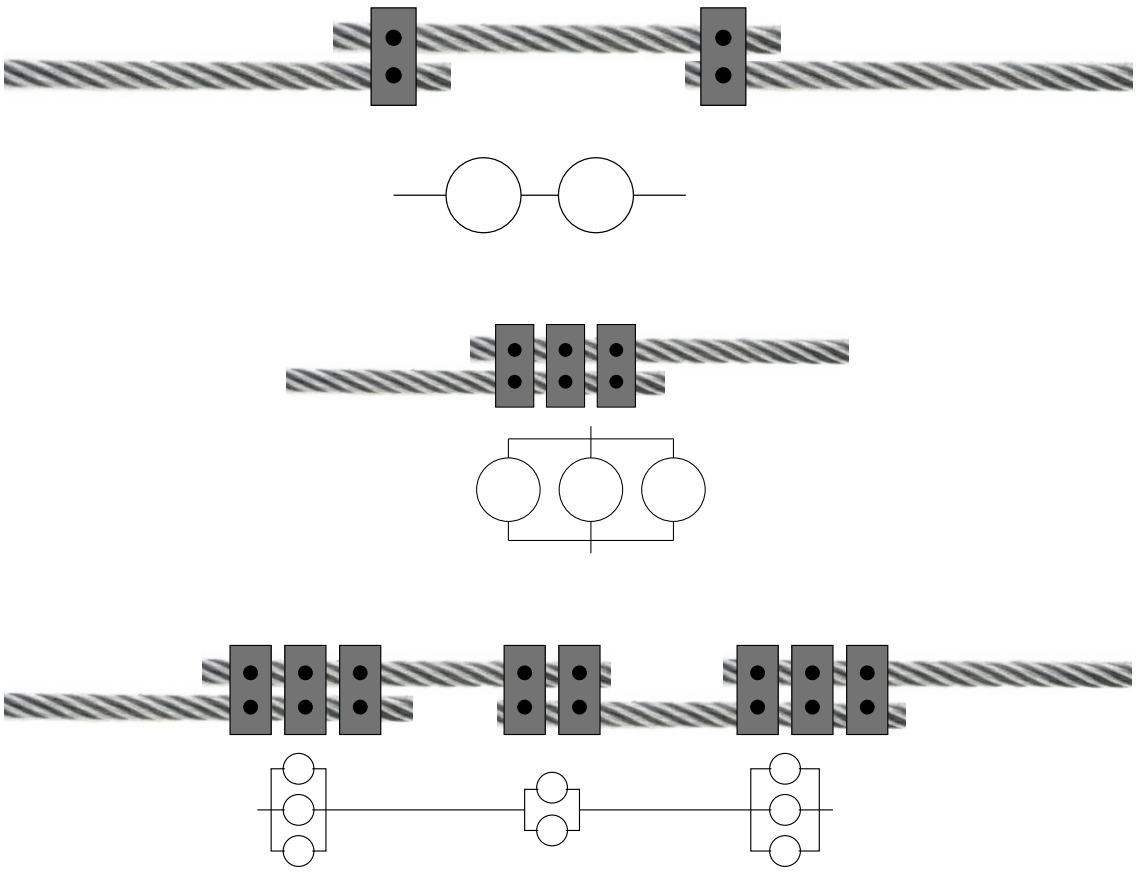
- Obvod realizuje operaci AND
- Možné poruchy: diody, rezistory
- Záloha použita např. v NASA Orbiting Astronomical Observatory



# Příklad paralelního zálohování

- Spojky lan
- Porucha spojky: spojení se přeruší
- Podobně u mostních konstrukcí



# AFR u HDD

Zdroj: `http://www.pcworld.com/article/3071180`

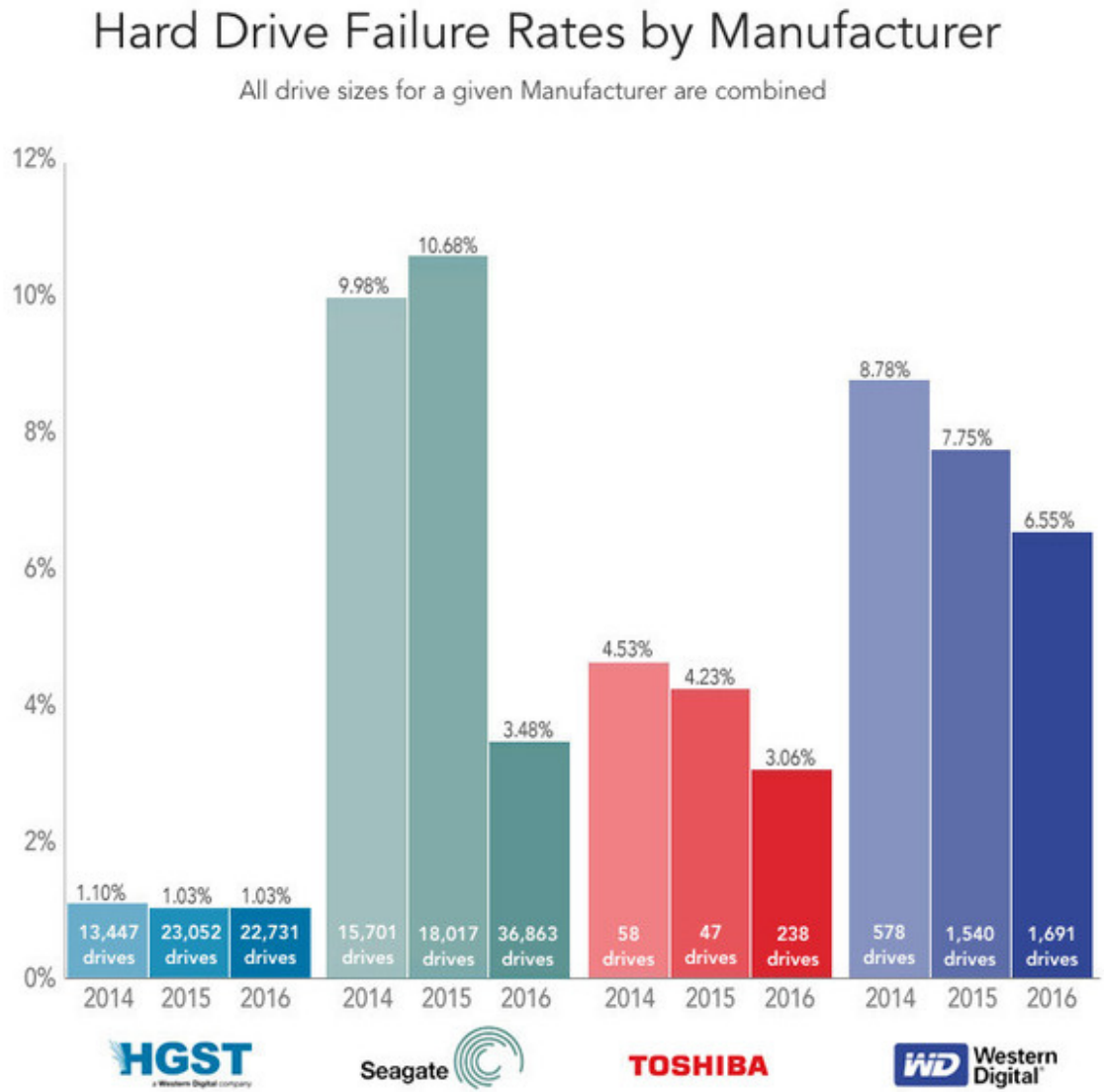
Hard Drive Failure Stats through 3/31/2016

Cumulative from 4/2013 through period indicated

| | | | 3/31/2014 (1 year) | | 3/31/2015 (2 years) | | 03/31/2016 (3 years) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MFG | Model | Drive Size | Drive Count | Annualized Failure Rate | Drive Count | Annualized Failure Rate | Drive Count | Annualized Failure Rate |
| HGST | HDS5C3030ALA630 | 3TB | 4,591 | 0.85% | 4,596 | 0.74% | 4,552 | 0.81% |
| HGST | HDS5C4040ALE630 | 4TB | 2,582 | 1.33% | 2,653 | 1.16% | 2,706 | 1.03% |
| HGST | HDS722020ALA330 | 2TB | 4,713 | 1.08% | 4,664 | 1.15% | 4,264 | 1.57% |
| HGST | HDS723030ALA640 | 3TB | 1,020 | 1.54% | 1,013 | 1.83% | 998 | 1.71% |
| HGST | HMS5C4040ALE640 | 4TB | 47 | 2.67% | 7,026 | 1.18% | 7,075 | 0.79% |
| HGST | HMS5C4040BLE640 | 4TB | 494 | 20.29% | 3,100 | 0.48% | 3,091 | 0.38% |
| HGST | HUH728080ALE600 | 8TB | — | — | — | — | 45 | 3.84% |
| Seagate | ST3000DM001 | 3TB | 4,074 | 13.92% | 485 | 28.26% | — | — |
| Seagate | ST31500341AS | 1.5TB | 404 | 22.27% | 259 | 24.12% | — | — |
| Seagate | ST31500541AS | 1.5TB | 1,746 | 9.87% | 1,485 | 10.18% | 45 | 10.12% |
| Seagate | ST32000542AS | 2TB | 211 | 8.03% | 81 | 9.93% | — | — |
| Seagate | ST33000651AS | 3TB | 287 | 6.53% | 234 | 5.27% | — | — |
| Seagate | ST4000DM000 | 4TB | 8,800 | 3.83% | 14,803 | 2.83% | 34,729 | 2.90% |
| Seagate | ST4000DX000 | 4TB | 179 | 0.75% | 175 | 1.61% | 207 | 2.95% |
| Seagate | ST6000DX000 | 6TB | — | — | 495 | 1.70% | 1,882 | 1.42% |
| Toshiba | DT01ACA300 | 3TB | 58 | 4.63% | 47 | 4.23% | 47 | 4.22% |
| Toshiba | MD04ABA400V | 4TB | — | — | — | — | 146 | 2.21% |
| Toshiba | MD04ABA500V | 5TB | — | — | — | — | 45 | 2.05% |

# AFR u HDD

Zdroj: `http://www.pcworld.com/article/3071180`



# Paralelní zálohování — RAID

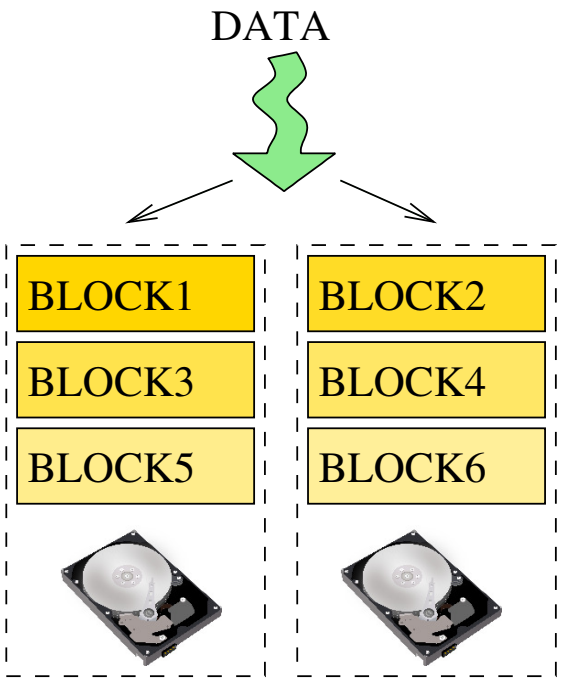
## RAID (Redundant Array of Independent Disks)

- Data se ukládají na více disků
- Časté použití na serverech
- Různé úrovně zabezpečení (zvýšení spolehlivosti)
- Nenahrazuje zálohování!

# Paralelní zálohování — RAID

## RAID 0

- Data se dělí rovnoměrně mezi disky
- Rychlejší čtení/zápis
- Data nelze obnovit při selhání jakéhokoliv disku
- Celková kapacita je součet kapacit jednotlivých disků
- Minimálně pro 2 HDD
- Použití: pro zvýčení rychlosti zápisu/čtení




## Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

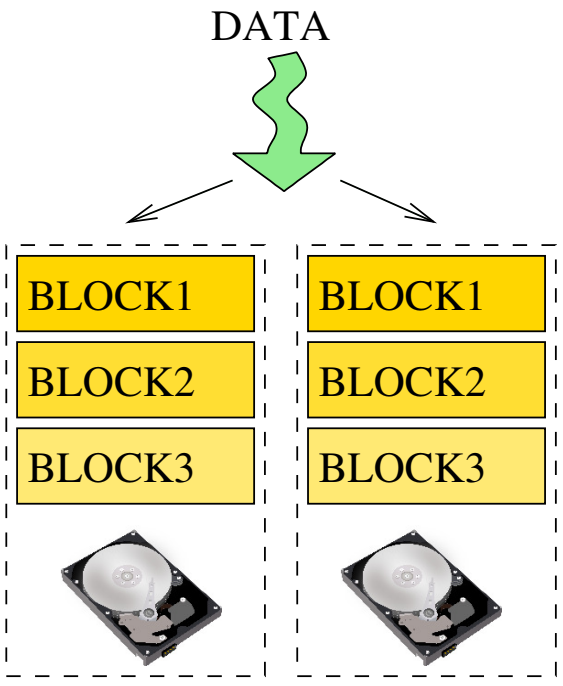
$$R = p^n$$

pro $n$ stejných disků, (sériové zapojení z hlediska spolehlivosti)

# Paralelní zálohování — RAID

## RAID 1

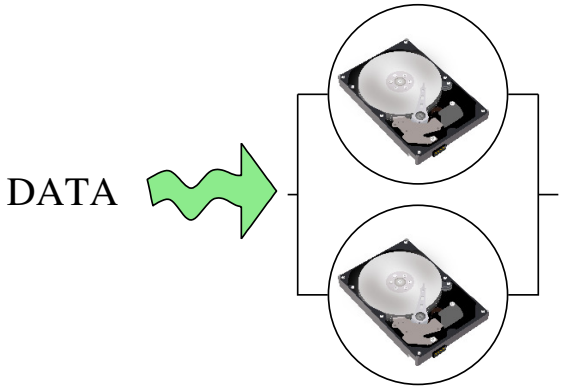
- Data se kopírují současně na všechny disky
- Rychlejší čtení (jakýkoliv disk může poskytnout data)
- Zápis je dán rychlostí HDD
- Data lze obnovit, pokud funguje alespoň 1 HDD
- Celková kapacita se nezvyšuje
- Minimálně pro 2 HDD




## Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

$$R = 1 - (1 - p)^n$$

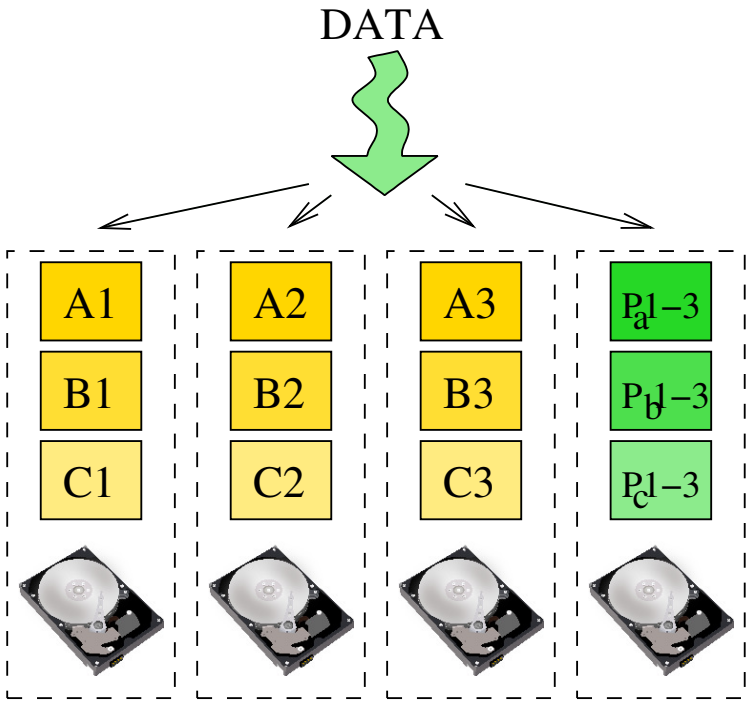
pro stejné disky, (paralelní zapojení z hlediska spolehlivosti)



# Paralelní zálohování — RAID

## RAID 3

- Data jsou rozdělena na disky, jeden disk obsahuje paritu
- Vhodné pro zápis dlouhých sekvencí (stream) dat
- Nevhodné pro obsluhu malých požadavků (malé soubory)
- Lze tolerovat chybu jednoho HDD
- Minimálně pro 3 HDD
- Kritická je porucha při obnovování dat




## Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

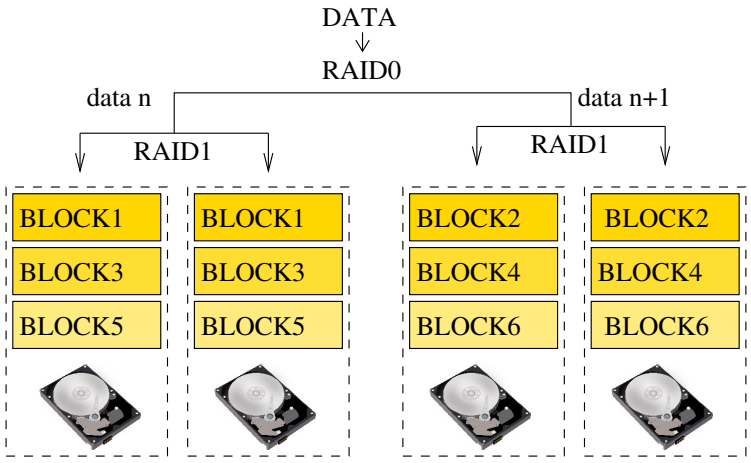
$$R = np^{n-1}(1-p) + p^n$$

pro stejné disky, (systém "n-1"z "n")

# Paralelní zálohování — RAID

## RAID 1+0

- Kombinace RAID 1 a RAID 0
- Data nejdříve dělena jako v RAID 0
- Data jsou dále organizována v RAID 1




## Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

$$R = (2p - p^2)^2$$

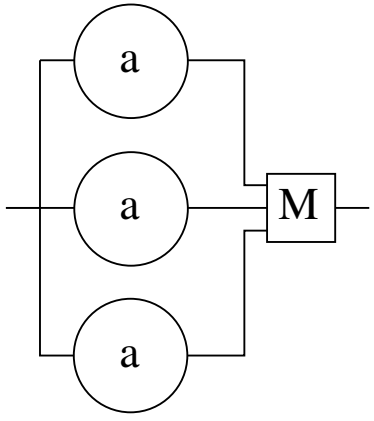
pro stejné disky

# Paralelní zálohování — RAID

- Existuje mnoho úrovní RAID (0,1,2,3,4,5,6, kombinované)
- Volba podle požadavků na rychlost zápisu a čtení, počtu dostupných disků
- Vyžaduje speciální HW (řadiče)
- HDD se často nakupují "společně"
- Nejsou nezávislé, podléhají stejným vlivům (např. teplota)
- Admini preferují nákup různých disků

# Zálohování majoritou

- $n$ systémů běží současně
- Bere se ten výstup, který má majorita systémů
- $n$ liché
- Vhodné pro digitální systémy
- Předpoklad: fungující majorizační člen
- Jen pro systémy, kde lze určit majoritu
- Typicky pro "digitální"systémy
- Zálohy běží $\rightarrow$ spotřeba, náklady, údržba




## Použití:

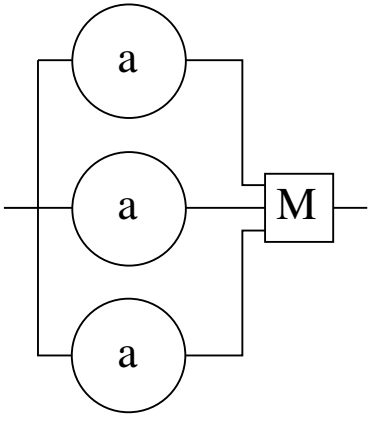
- integrované obvody
- ECC pamětí
- Výpočty ve vesmíru (např. na satelitech)
- Komunikace, např. protokol FlexRay (automobilový průmysl)
- První použití Maj. systémů v čs. počítači SAPO (1957–1960)

# Zálohování majoritou

- Prvky fungují s pravděpodobností $p$
- Uvažujme soustavu s $n = 3$ prvky.
- Pro správnou funkčnost jsou třeba alespoň $2$ prvky

Pravděpodobnost, že funguje právě $m$ prvků:

$$P_m = \binom{n}{m} p^m (1-p)^{n-m}$$




**Spolehlivost majoritního zálohování:**

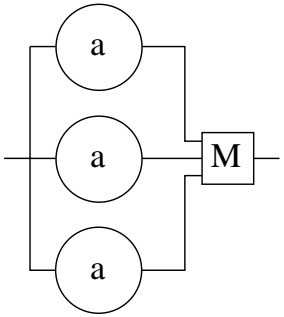
$$R = \sum_{m=2}^{n} \binom{n}{m} p^m (1-p)^{n-m} = P_2 + P_3$$

$$R = 3p^2(1-p) + p^3$$

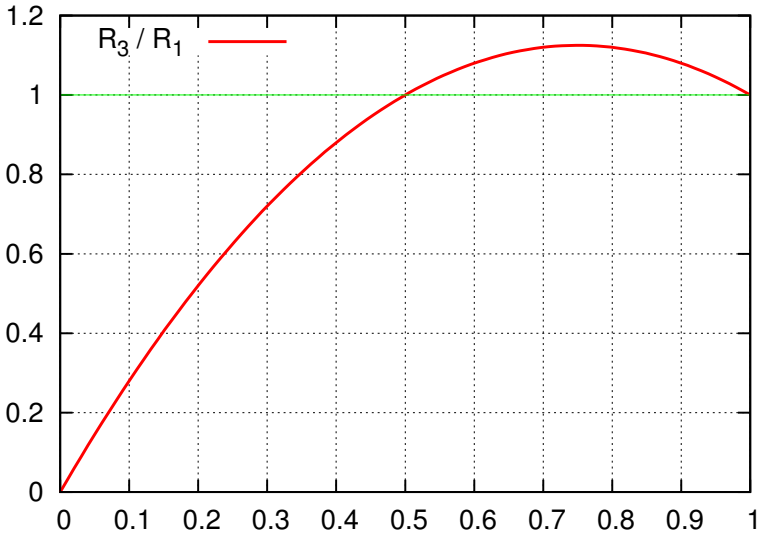
# Spolehlivost majoritního zálohování

- Systém se třemi prvky
- Spolehlivost 1 prvku je $p$
- Alespoň $2$ musí fungovat

$$R_3 = 3p^2(1-p) + p^3$$




Porovnání spolehlivost oproti nezálohovanému prvku: $R_3/p$ :

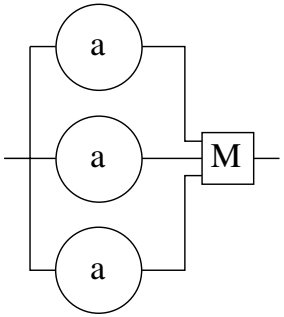



Poměr $R_3/p > 1$ pokud $p > 0.5$.

# Spolehlivost majoritního zálohování

- Systém se třemi prvky
- Spolehlivost 1 prvku je $p$
- Alespoň $2$ musí fungovat

$$R_3 = 3p^2(1-p) + p^3$$




**Majoritní zálohování zlepšuje spolehlivost pokud $p$ každého prvku je $p > 0.5$.**

Obecně volíme lichý počet členů, tj. $2n+1$. Spolehlivost pak je:

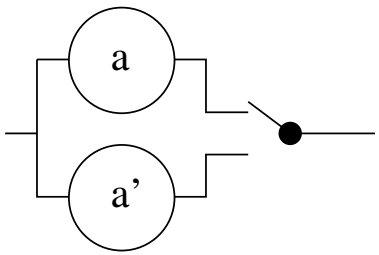
$$R = \sum_{m=n+1}^{2n+1} \binom{2n+1}{m} p^m (1-p)^{2n+1-m}$$

Pokud uvažujeme poruchu majorizačního členu (jeho spolehlivost je $R'$):

$$R = R \cdot R'$$

# Zálohování přepínáním

- Též záloha s okamžitou obnovou
- Při poruše prvke se přepne na prvek v záloze
- Předpokládáme, že prvek v záloze nestárne



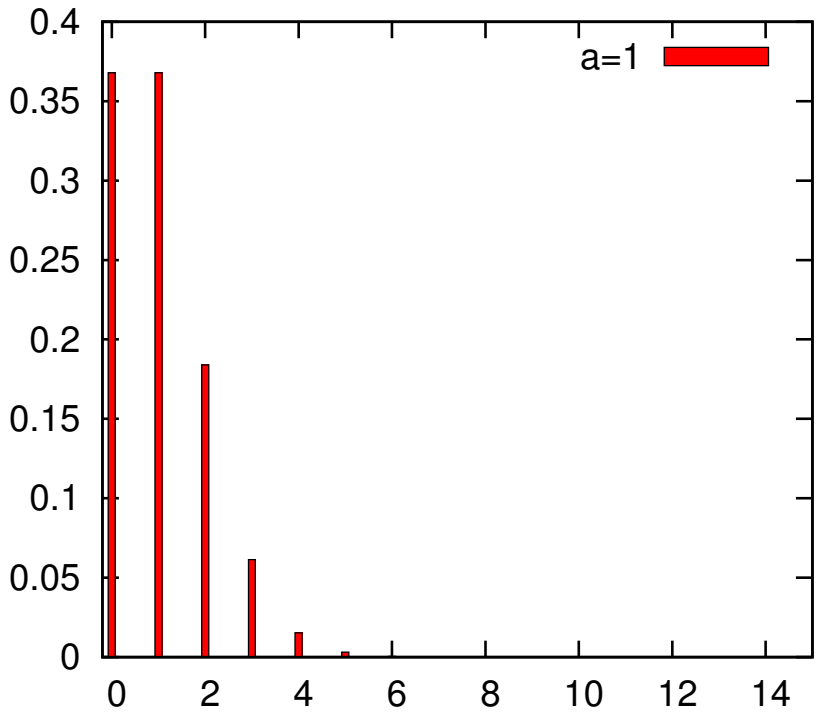

- Vyžaduje (včas) rozpoznat chybu
- Vyžaduje spolehlivý přepínač
- Prvek v záloze nemusí běžet (ale musí se rychle zapnout)
- Pravděpodobnost poruchy lze modelovat Poissonovým rozdělením

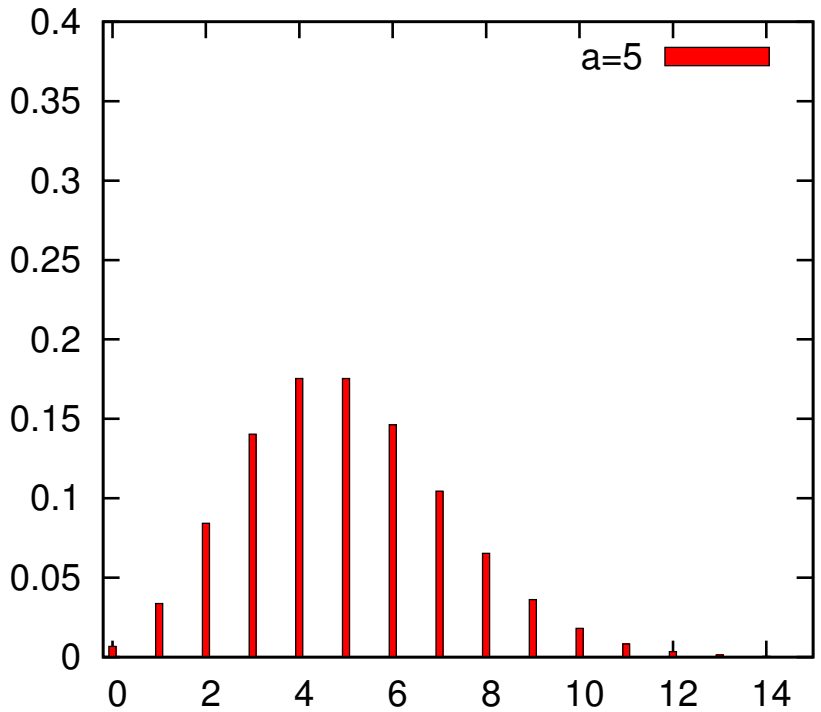
# Poissonovo rozdělení

- Pro vyhodnocení pravděpodobnosti počtu jevů v určitém intervalu (intervaly času, délky, km, apod)
- Předpokládejme, že v jednom itervalu se průměrně děje $a$ událostí

**Pravděpodobnost výskytu $x$ událostí je:**

$$P(X = x) = \frac{a^x}{x!} \mathrm{e}^{-a}$$



# Poissonovo rozdělení

- Pro vyhodnocení pravděpodobnosti počtu jevů v určitém intervalu (intervaly času, délky, km, apod)
- Předpokládejme, že v jednom itervalu se průměrně děje $a$ událostí

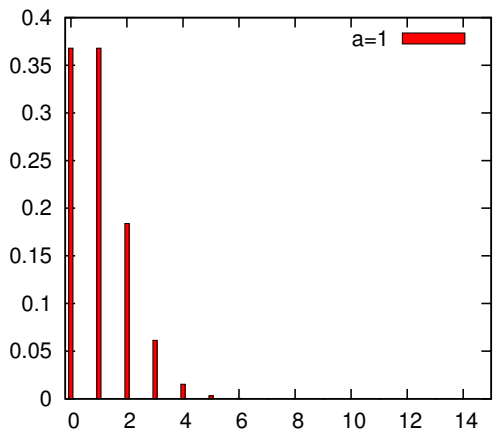
**Pravděpodobnost výskytu $x$ událostí je:**

$$P(X = x) = \frac{a^x}{x!}\mathrm{e}^{-a}$$

**Příklad:** Ve serverovně se každý měsíc porouchá v průměru 1 HDD. Jaká je pravděpodobnost, že se porouchají tři disky?

$$a = 1$$

$$P(X = 3) = \frac{a^3}{3!}\mathrm{e}^{-a} = 0.061$$



# Poissonovo rozdělení

- Pro vyhodnocení pravděpodobnosti počtu jevů v určitém intervalu (intervaly času, délky, km, apod)
- Předpokládejme, že v jednom itervalu se průměrně děje $a$ událostí

**Pravděpodobnost výskytu $x$ událostí je:**

$$P(X = x) = \frac{a^x}{x!}\mathrm{e}^{-a}$$

Ve spolehlivosti $a = \lambda t$, kde $\lambda$ je intenzita poruch

$$P_x(t) = \frac{(\lambda t)^x}{x!}\mathrm{e}^{-\lambda t}$$

- intenzita poruch je konstantní $\lambda \rightarrow$ pouze pro normální období života prvku

# Poissonovo rozdělení — příklad

- Průměrný počet poruch na tažném lanu je 0.05 za rok
- Vypočetěte pravděpodobnost $0, 1, 2, \ldots$ poruch během 20 let

$$P_x(t) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} \mathrm{e}^{-\lambda t}$$

Intenzita poruch je $\lambda = 0.05/\text{rok}$.

$$P_0(20) = \frac{(0.05 \cdot 20)^0}{0!} \mathrm{e}^{-0.05 \cdot 20} = \mathrm{e}^{-1} = 0.367$$

$$P_1(20) = \frac{(0.05 \cdot 20)^1}{1!} \mathrm{e}^{-0.05 \cdot 20} = 0.367$$

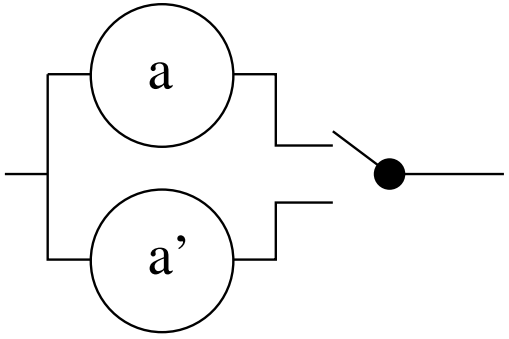
$$P_2(20) = \frac{(0.05 \cdot 20)^2}{2!} \mathrm{e}^{-0.05 \cdot 20} = 0.183$$

$$P_3(20) = \frac{(0.05 \cdot 20)^3}{3!} \mathrm{e}^{-0.05 \cdot 20} = 0.061$$

# Zálohování přepínáním

## Předpoklady

- Poruchy prvků v záloze nejsou závislé na běžícím prvku
- Prvky jsou stejné a mají konstantní intenzitu poruch $\lambda$
- Přepínací (a měřící) prvek je 100% spolehlivý




Systém se dvěma prvky (tj. jeden je v záloze) je funkční, pokud nastane max. 1 porucha:

$$P_0(t) = \frac{(\lambda t)^0}{0!}\mathrm{e}^{-\lambda t} = \mathrm{e}^{-\lambda t} \qquad P_1(t) = \frac{(\lambda t)^1}{1!}\mathrm{e}^{-\lambda t} = \lambda t \mathrm{e}^{-\lambda t}$$

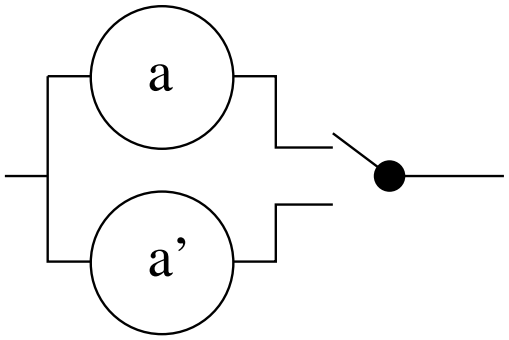
Pravděpodobnost, že tento systém běží je:

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}(1 + \lambda t)$$

# Zálohování přepínáním

**Předpoklady**

- Poruchy prvků v záloze nejsou závislé na běžícím prvku
- Prvky jsou stejné a mají konstantní intenzitu poruch $\lambda$
- Přepínací (a měřící) prvek je 100% spolehlivý



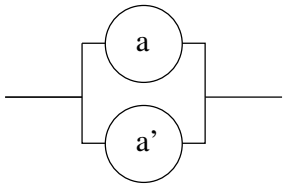

**Obecně** Systém s $n$ **prvky v záloze** může vykázat max. $n$ poruch

$$R(t) = \sum_{x=0}^{n} P_x(t) = \sum_{x=0}^{n} \frac{(\lambda t)^x}{x!} \mathrm{e}^{-\lambda t}$$

$$T_s = \sum_{i=1}^{n+1} MTBF_i$$

# Porovnání paralelní zálohy a zálohy s přepínáním

## Paralelní záloha

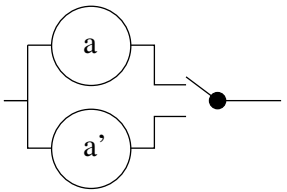



- Záložní prvky trvale v provozu (stárnou)
- Výstupy záloh se nesmí rušit
- Záloha je okamžitá
- Není třeba detekovat poruchu

$$R(t) = 2\mathrm{e}^{-\lambda t} - \mathrm{e}^{-2\lambda t}$$

$$T_s = \frac{3}{2\lambda}$$

## Záloha s přepínáním




- Prvek v záloze je vypnut (nestárne)
- Přepínání není nekonečně krátké
- Přepínání může selhat

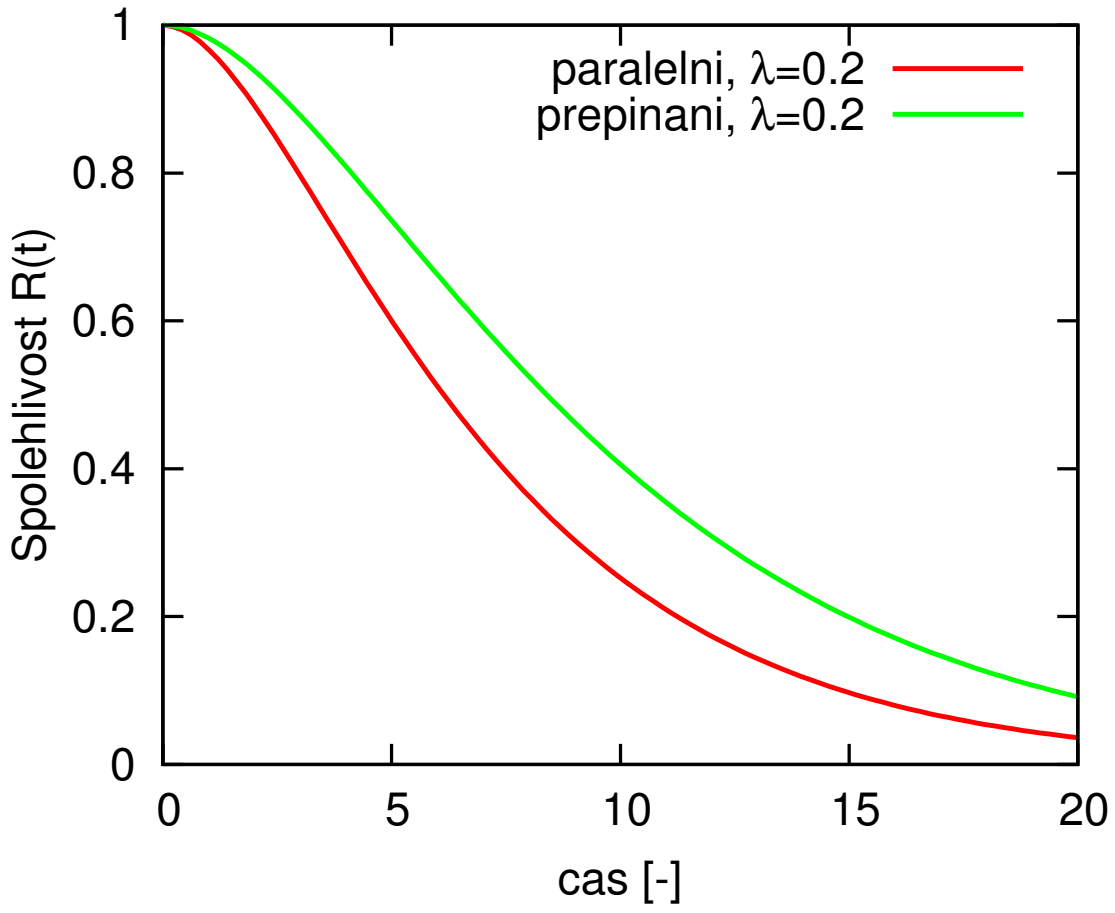
$$R(t) = \mathrm{e}^{\lambda t}(1 + \lambda t)$$

$$T_s = \frac{2}{\lambda}$$

**Paralelní zálohování je horší než záloha s přepínáním**

# Porovnání paralelní zálohy a zálohy s přepínáním

Pro $n = 2$ prvky, $\lambda = 0.2$



# Porovnání paralelní zálohy a zálohy s přepínáním

Pro $n$ prvků, $\lambda = 0.2$