



# Dimenzování moderních telekomunikačních sítí

Ing. Petr Hampl, Ph.D.

e-mail: [petr.hampl@fel.cvut.cz](mailto:petr.hampl@fel.cvut.cz)

**České vysoké učení technické v Praze**  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra telekomunikační techniky



## Obsah

- Proč se zabývat dimenzováním?
- Dimenzování sítí s přepojováním okruhů:
  - model OS,
  - charakter vstupního toku,
  - Erlangův model.
- Dimenzování služeb v IP síti:
  - nástin problémů souvisejících s dimenzováním,
  - zobecněný Erlangův model,
  - analýza procesu přidělování přenosové kapacity,
  - příklad dimenzování:
    - bez rezervace,
    - s rezervací.



## Proč se zabývat dimenzováním?

- Nutnost dodržet potřebné parametry jakosti obsluhy (GoS – Grade of Service), v požadovaných mezích tak, aby byly splněny požadavky na kvalitu provozované služby (QoS – Quality of Service).
- Obecný přehled sledovaných parametru lze nalézt v doporučení ITU-T E.802, např.:
  - doba sestavení spojení,
  - zpoždění,
  - počet poruch na přípojku,
  - počet reklamací,
  - doba vyřízení stížnosti,
  - ...



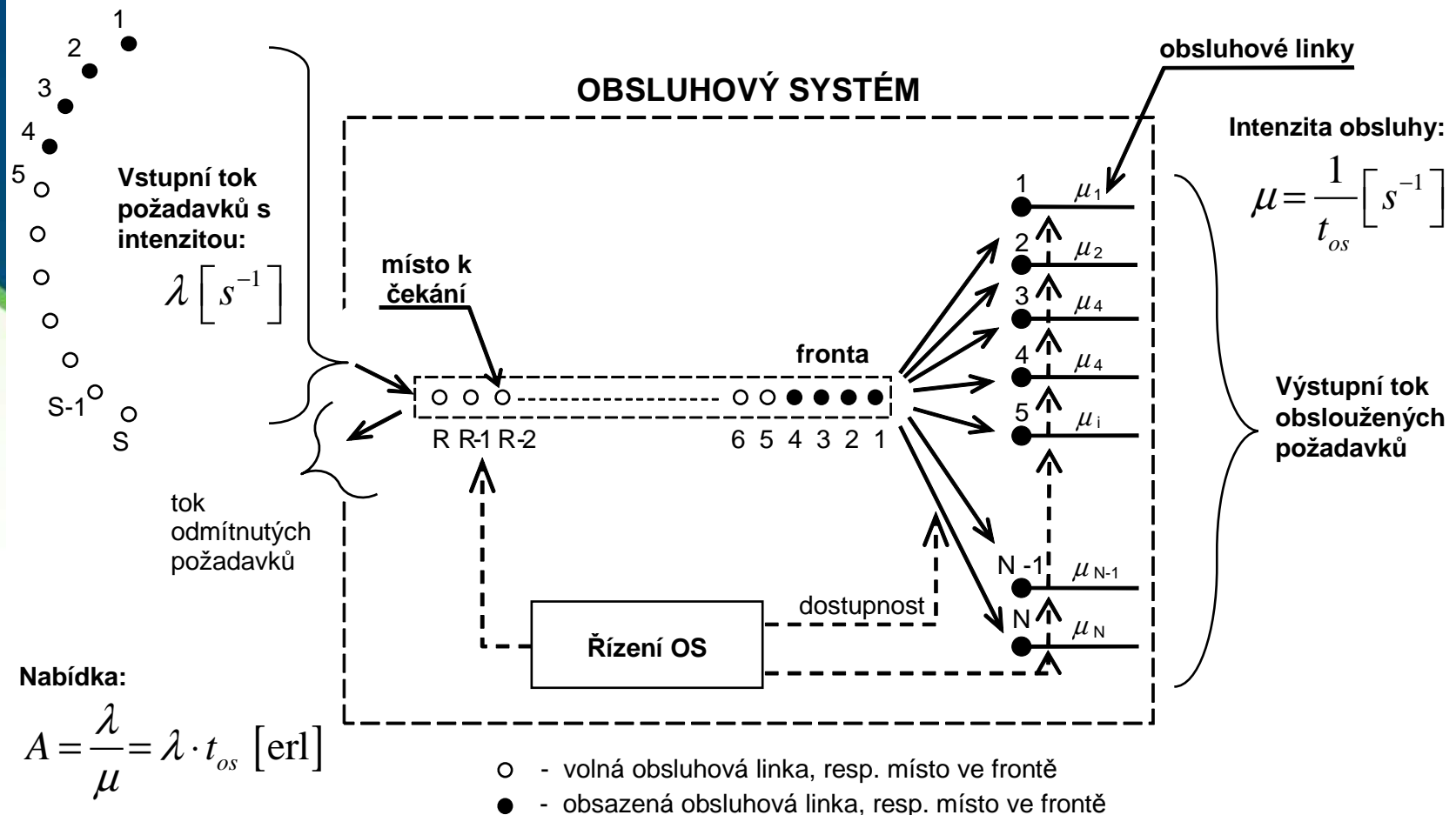
# Dimenzování sítí s přepojováním okruhů



# Model obsluhového systému

- Při dimenzování se vychází z klasické teorie provozního zatížení s následujícím uspořádáním modelu obsluhového systému:

zdroje



Nabídka:

$$A = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot t_{os} \text{ [erl]}$$



## Klíčové předpoklady použití

- Na vstupu systému je homogenní poissonovský tok:
  - tj. požadavky přicházejí individuálně, náhodně a vzájemně nezávisle;
  - pravděpodobnost příchodu  $k$  požadavků v intervalu délky  $T$  je dána Poissonovým rozložením:

$$P_k(T) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}; k = 0, 1, \dots$$

- rozložení intervalů mezi příchody je dáno distribuční funkcí:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; t \geq 0 \\ = 0; \quad t < 0$$

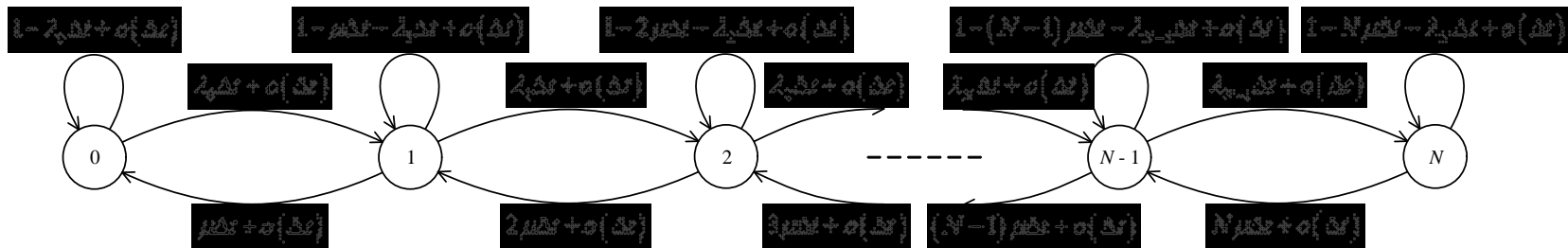
- s touto myšlenkou přišel již v roce 1909 Agner Krarup Erlang:  
"The Theory of Probabilities and Telephone Conversations,,.





## Erlangův model systému se ztrátou $M/M/N/0$ :

- Stavový diagram modelu:



- Pravděpodobnost ztráty volání svazku je dána prvním Erlangovým vztahem  $B$ -formula - publikován roku 1917:

$$B = P_N = \frac{A^N}{\sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}} = E_{1,N}(A)$$

-Vzhledem k předpokladu pevné kapacity přenosového kanálu má model v IP sítích omezené použití.



## Dimenzování sítí s přepojováním okruhů

- Proces dimenzování spočívá ve stanovení :
  - potřebného počtu okruhů  $N$ ,
  - nebo kapacity fronty  $R$ , počtu agentů  $S$  v případě call centra, tak, aby byly splněny požadavky na jakost obsluhy, např.:
  - pravděpodobnost ztráty  $B$  příchozího volání (dimenzování svazků):  
zpravidla  $B \leq 1 \%$ ;
  - pravděpodobnost čekání na operátora  $P\{ W \leq t \}$ :  
$$P\{ W \leq 30 \text{ s} \} = 0,8.$$
  - doba zdržení v systému,
  - .....
- Předpokládá se, že existuje **pouze jeden** typ služby s požadavky jenž obsadí kapacitu jednoho kanálu v systému po celou dobu obsluhy, např.:
- 64 kbit/s u systému PCM,
- 33,854 kbit/s (jeden Time Slot) u systému GSM,
- .....



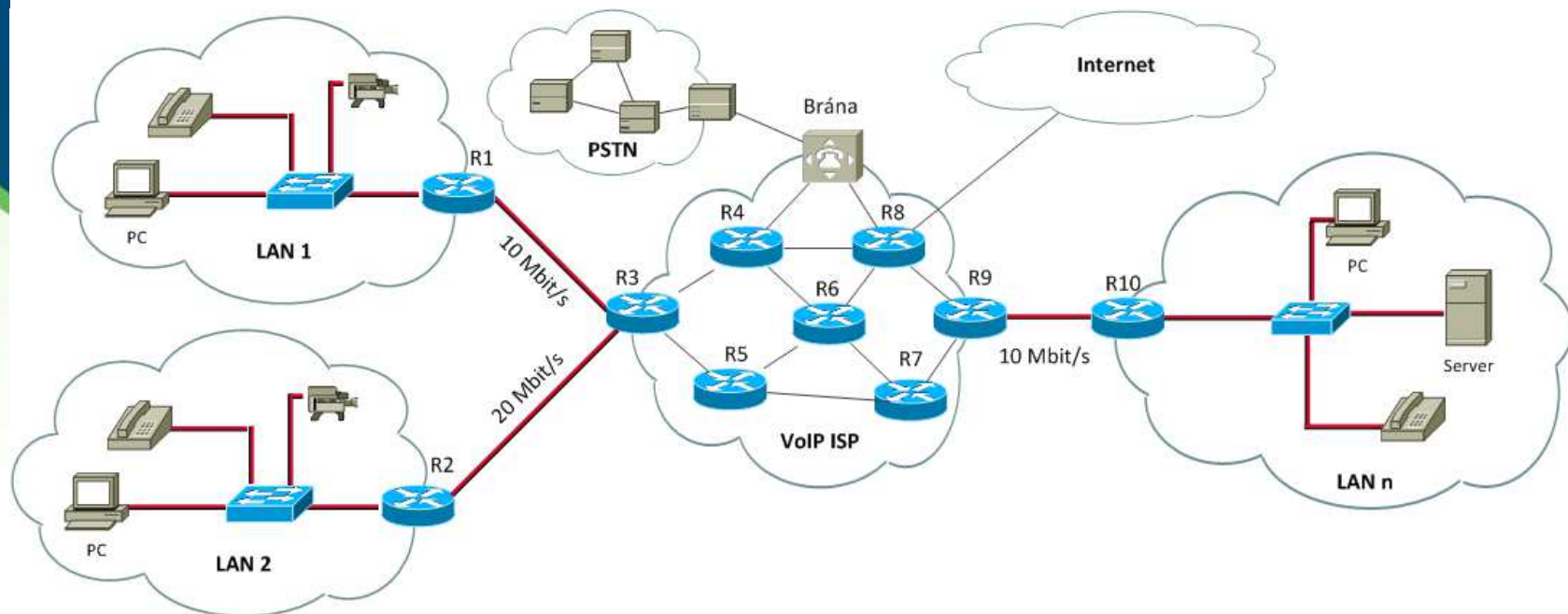


# Dimenzování služeb v IP síti



## Dimenzování služeb v IP síti

- Charakter chování zákazníků užívajících konverzační služby typu VoIP, videotelefonie, ... zůstává „téměř“ stejný, v závislosti na typu služby se mění pouze parametry.
- Dochází však ke změně přenosové technologie (protokol IP).



- Koexistence služeb konverzačních a interaktivních. Pro jejich vzájemné oddělení se užívá klasifikace do různých tříd.



## Toky v IP sítích

- Typy služeb a jim odpovídající toky v síti:
  - konverzační (realtime) hlas, video, SSH, telnet ...
  - video na požádání (Video on Demand - VoD)
  - mission-critical aplikace (databázové systémy, ...)
  - data směrovacích protokolů (OSPF, BGP, RIP, ...)
  - data managementu sítě (SNMP, ...)
  - ostatní (bulk transfer, best-effort)
  - nežádoucí provoz (scavenger: less-than-best-effort)
- Rozdílné požadavky na:
  - přenosovou rychlost,
  - zpoždění, rozptyl zpoždění,
  - ztrátu paketů,
  - zabezpečení,
  - .....



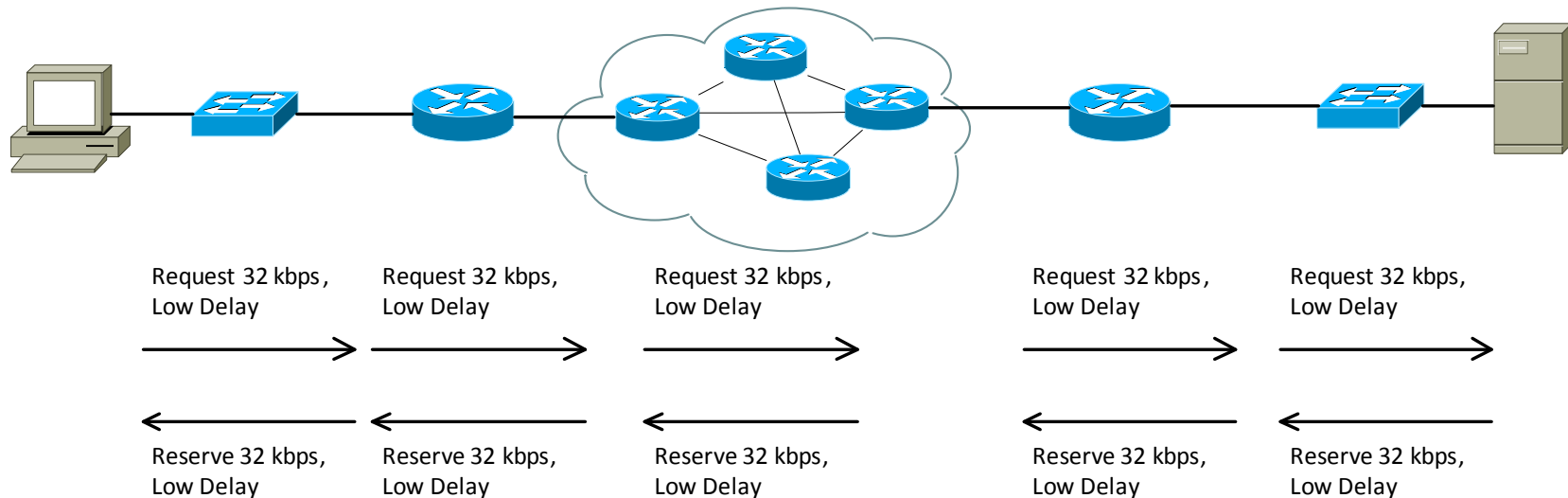
## Dostupné modely QoS v IP sítích

- Best-Effort Service
  - síť negarantuje doručení do cílového uzlu sítě, není zaručena žádná úroveň kvality služeb
- Integrated Services (IntServ) RFC 1633
  - využívá Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - RFC 2205
  - obtížně aplikovatelné na rozlehlé sítě (musí podporovat **všechny** uzly sítě)
  - detailní nastavení QoS pro každou službu (End-to-End)
- Differentiated Services (DiffServ) RFC 2474
  - pakety jednotlivých služeb jsou roztríděny (klasifikovány) do různých tříd, v každém uzlu sítě jsou stanovena pravidla jak s danou třídou naložit (Per-Hop Behaviours - PHBs)
  - využívá pole Differentiated Services Code Point (DSCP) v záhlaví IP paketů
  - aplikovatelné na rozlehlé sítě (Internet)



## Integrated Services (IntServ)

- IntServ model vyžaduje:
  - možnost rezervace přenosových prostředků a možnost omezení intenzity jednotlivých služeb (Admission Control)

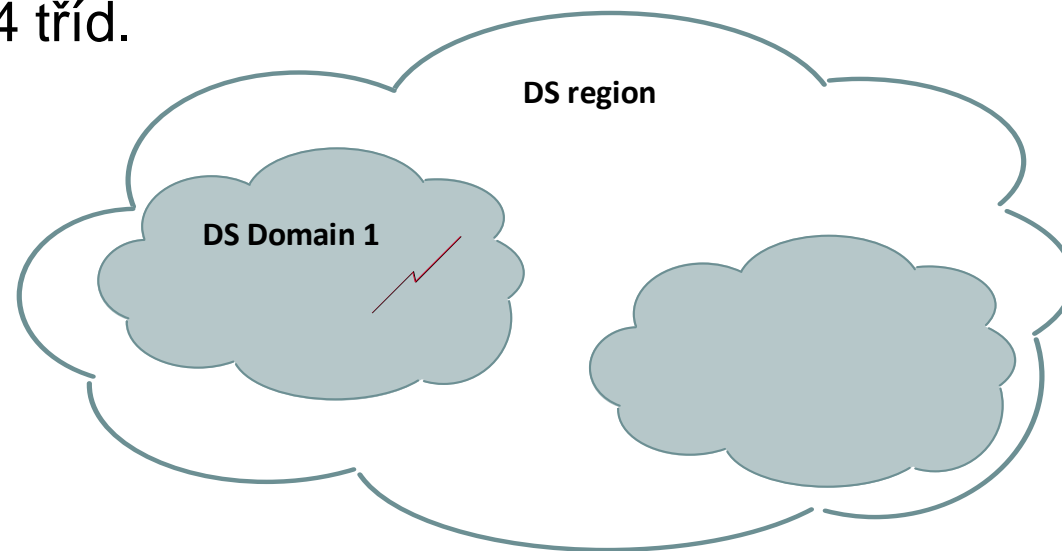


- Každý směrovač musí udržovat řídicí informace o všech spojeních  $\Rightarrow$  neaplikovatelné na rozlehlé sítě



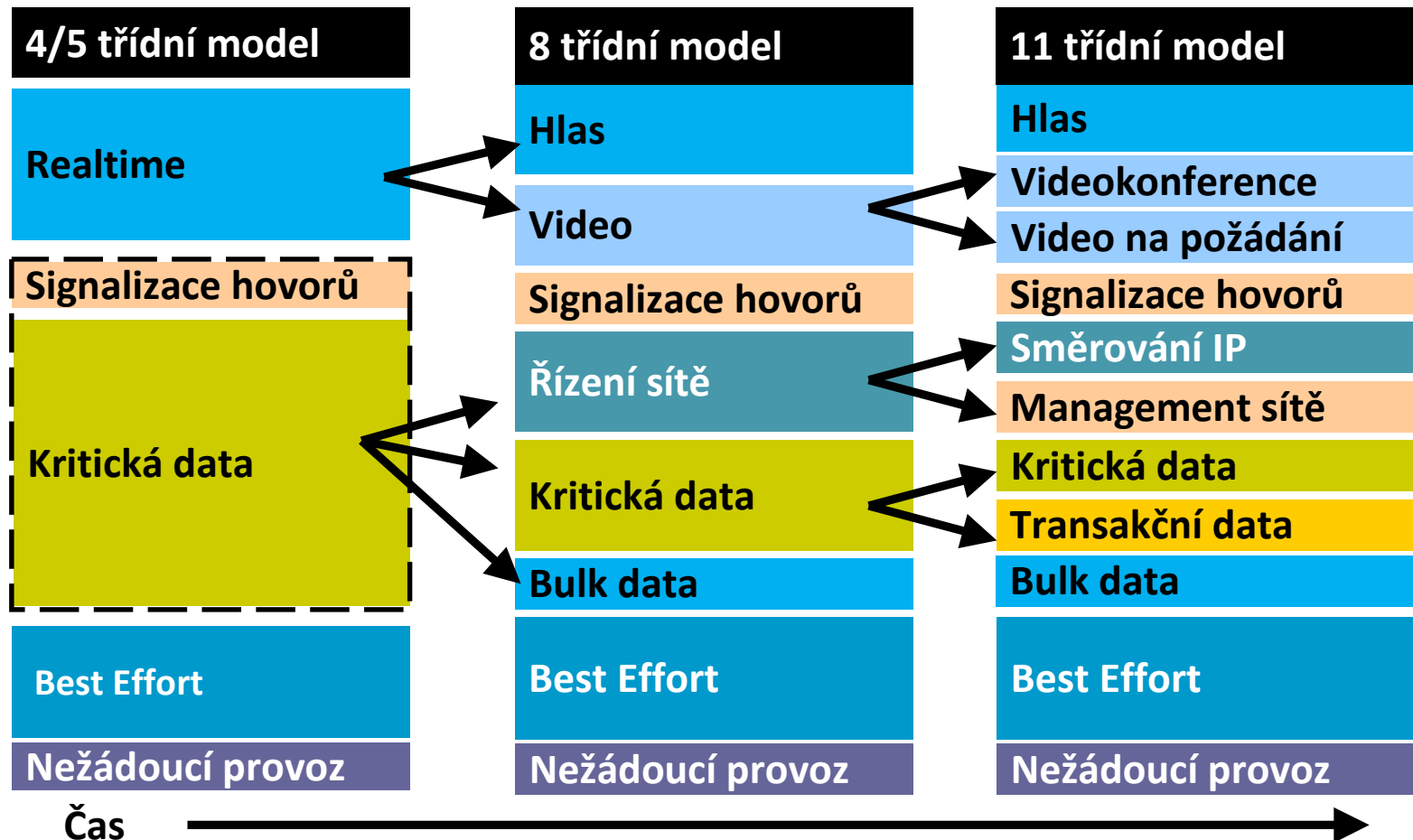
## Differentiated Services

- Značkování se provádí na 3. vrstvě OSI modelu - záhlaví IP paketu, (záhlaví 2. vrstvy je nevhodné, mění se na každé trase)
- Paket může být mezi jednotlivými sítěmi (DS doménami) přeznačkován.
- Pro značkování bylo modifikováno záhlaví ToS protokolu IP: šestibitové pole DSCP-Differentiated Services Code Point,  $2^6 = 64$  tříd.





# Který model klasifikace zvolit?





## Problémy které je nutné při dimenzování řešit?

- **Nedostatečná přen. rychlost:** vede k zhoršení parametrů (narůstající zpoždění, ztráta, ...)
- **Celková doba přenosu sítí:** pakety prochází mnoha síťovými prvky (směrovače, prepínače, ...), kde dochází k jejich zdržení.
- **Rozptyl doby zdržení (jitter):** doba zdržení kolísá v závislosti na aktuálním stavu (zatížení) jednotlivých rozhraní a síťových prvků.
- **Ztráta paketů:** V případě, že intenzita příchozích paketů přesáhne dostupnou kapacitu odchozího rozhraní dochází ke ztrátě paketů.





## Přenosová rychlost a odhad jejího výpočtu

$$v_p [kbit/s] = \frac{\text{velikost paketu [bytů]} \times 8}{1000} \times \text{intenzita paketů} \left[ \frac{\text{paket}}{s} \right]$$

- Velikost paketu:
  - **užitečná data v jednom paketu [bytů]** (dáno použitým kodekem),
  - **L2 záhlaví** (Ethernet: 18 bytů, FrameRelay: 6 bytů),
  - **L3 záhlaví** (IPv4 20 bytes),
  - **další záhlaví** (UDP, RTP, IPsec, MPLS značka ....),
- Příklad: kodek G.729, **L2(ethernet)**, **≥L3 (IPv4,UDP,RTP)**
  - Velikost paketu=**20+18+40**=78 bytů.
  - Intenzita odesílaných paketů = 1 / (20 ms) = 50 paketů/s.

$$v_p [kbit/s] = \frac{78 [bytů] \times 8}{1000} \times 50 [paketů/s] = 31,2 kbit/s$$



## Parametry některých kodeků

| Kodek     | Algoritmus | MIPS | CBR [kbit/s] | NEB [kbit/s] | MOS  |
|-----------|------------|------|--------------|--------------|------|
| G.711     | PCM        |      | 64           | 87,2         | 4,1  |
| G.726     | ADPCM      | 1    | 32           | 55,2         | 3,85 |
| G.728     | LD-CELP    | 30   | 16           | 31,5         | 3,61 |
| GSM 06.10 | RPE-LP     | 10   | 13           |              | 3,5  |
| G.729A    | CS-ACELP   | 11   | 8            |              | 3,7  |
| G.729     | CS-ACELP   | 20   | 8            | 31,2         | 3,92 |
| G.723.1   | MP-MLQ     | 16   | 6.3          | 21,9         | 3,9  |
| G.723.1   | ACELP      | 20   | 5.3          | 20,8         | 3,65 |

MIPS - Million Instructions Per Second (závislé na architektuře procesoru),

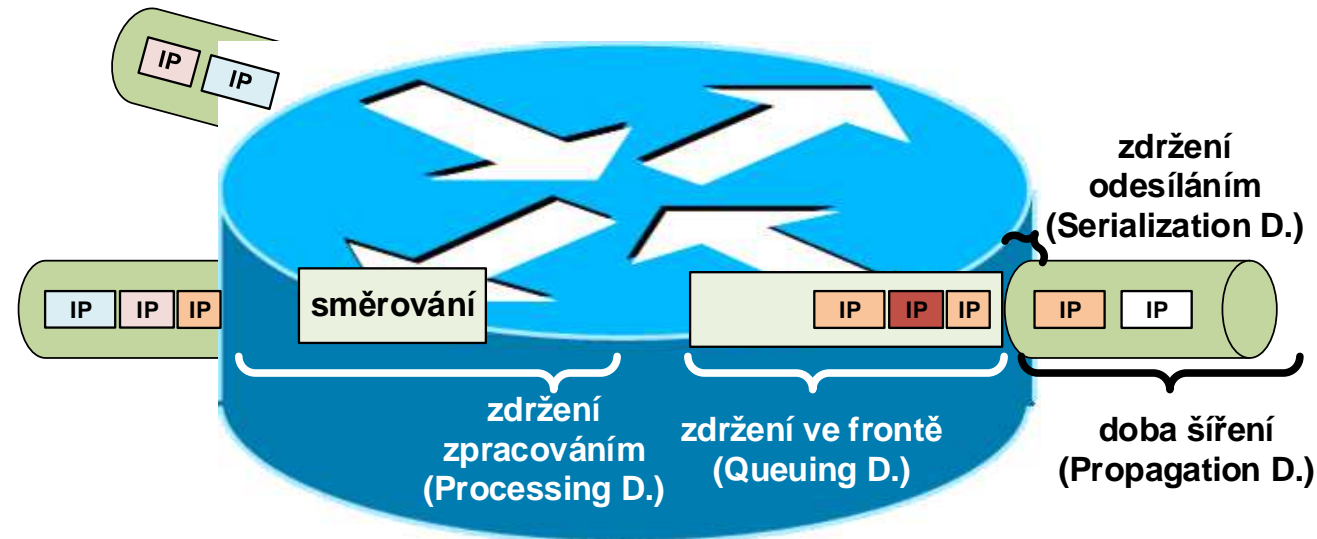
CBR - Codec Bit Rate,

NEB - Nominal Ethernet Bandwidth

MOS- Mean Opinion Score



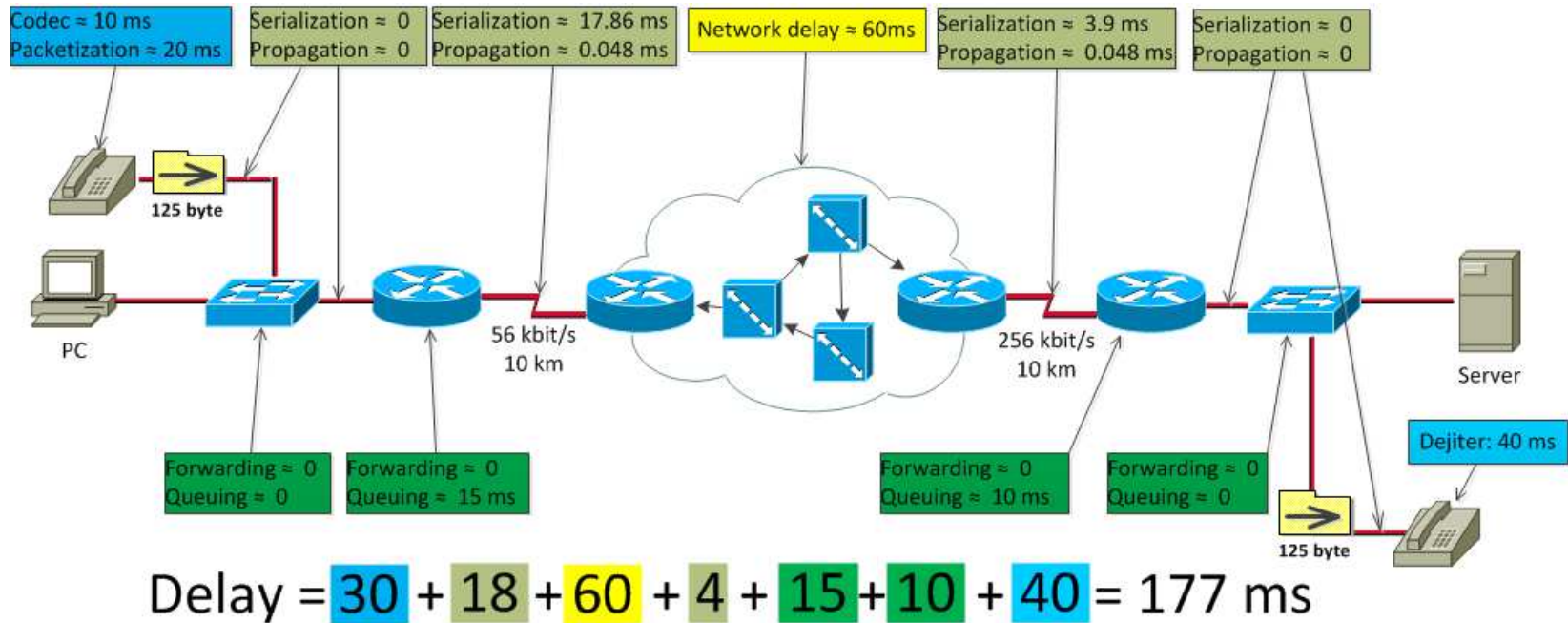
## Zpoždění v IP síti



- **Proměnné – dáno síťovým prvkem (směrovač, přepínač)**
  - **Zdržení zpracování (Processing delay):** Čas potřebný pro analýzu jednotlivých záhlaví a přesun ze zásobníku (paměti) vstupního rozhraní do zásobníku výstupního rozhraní.
  - **Zdržení ve frontě (Queuing delay):** Zpoždění způsobené čekáním paketu určité priority.
- **Fixní – dáno přenosovým médii (ethernet, sériové rozhraní, DSL, ....)**
  - **Serializační zpoždění (Serialization delay):** Čas potřebný pro odeslání bitové posloupnosti (například ethernetového rámce) na fyzické rozhraní o dané přenosové rychlosti.
  - **Doba šíření signálu přenosovým médii (Propagation delay)**



# Celková doba přenosu IP sítí

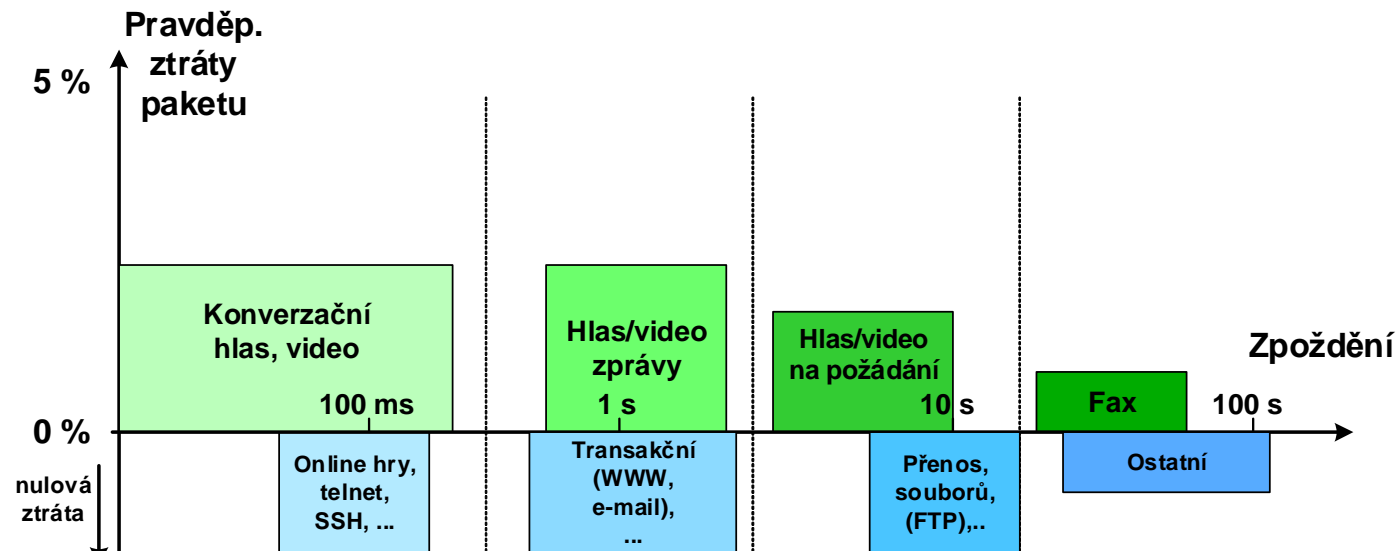


- **Zpoždění konec-konec (End-to-End)** - součet všech zpoždění.  
(zdržení zpracování + zdržení ve frontě) + (serializační zpoždění + doba šíření)
- **Rozptyl celkové doby zpoždění (End-to-end).**



## Orientační hodnoty zpoždění a ztráty paketů

- Z pohledu standardizačních institucí (ITU-T, IETF, 3GPP, ...) jednotlivé služby většinou dělí do následujících kategorií:
  - Konverzační (conversational): přenos multimediálních toků v reálném čase (videotelefon, iptelefon, SSH, telnet...);
  - Proudová (streaming): přenos multimediálních toků v reálném čase (video na požádání, iVysílání, YouTube,...);
  - Interaktivní (interactive): WWW, e-mail, přenos souborů, ...
  - Ostatní (background): e-mail, přenos souborů na pozadí, ...



ITU-T G.1010 – požadavky QoS z pohledu uživatele



# Jak minimalizovat zpoždění a jeho rozptyl?

- **Zvýšením přenosových rychlostí jednotlivých rozhraní:**
  - nejjednodušší
  - nákladné
  - minimalizuje se serializační zpoždění
- **Prioritizací vybraných toků:**
  - U upřednostňovaných služeb (hlas, video, SSH, telnet ) se situace zlepšší na úkor ostatních služeb (HTTP, FTP, Bittorrent, .....)
- **Kompresí záhlaví druhé nebo třetí vrstvy:**
  - vhodné použít pro „malé“ pakety nebo rámce  $\Rightarrow$  vyšší efektivita
  - u rozhraní s nízkou přenosovou rychlostí výrazně klesne serializační zpoždění
  - vznikne nový typ zpoždění způsobený vlastní kompresí a dekompresí

např.: cRTP (RFC2508) 40 bytů  $\rightarrow$  3-5 bytů
- **Fragmentací s prokládáním (zavedením priorit)**
  - sníží se efektivita přenosu

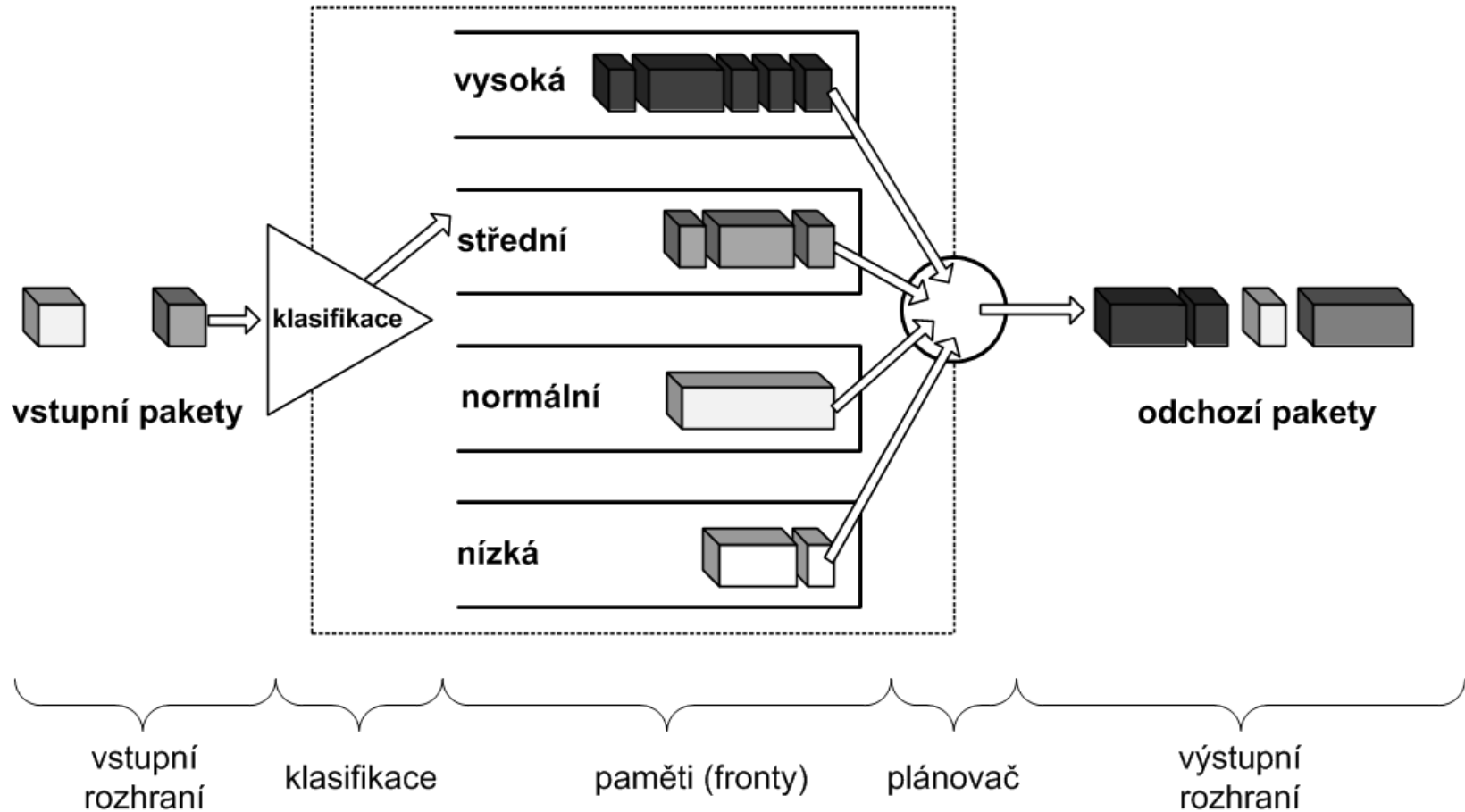


## Zavedení systému s prioritami

- Požadavky na systém obsluhující služby konverzačního charakteru:
  - systém s prioritami (garance zpoždění prioritní třídy),
  - rezervace přenosové rychlosti toku nejvyšší priority z celkové přenosové rychlosti rozhraní (tj. ochrana ostatních služeb).
- Technické prostředky - směrovače umožňují zavést následující režimy fronty:
  - First In – First Out (FIFO),
  - **Priority Queuing (PQ)**,
  - Custom Queuing (CQ),
  - Weighted Fair Queuing (WFQ),
  - Class-Based Weighted Fair Queuing (CBWFQ),
  - **Low Latency Queuing (LLQ)**.



# Priority Queuing





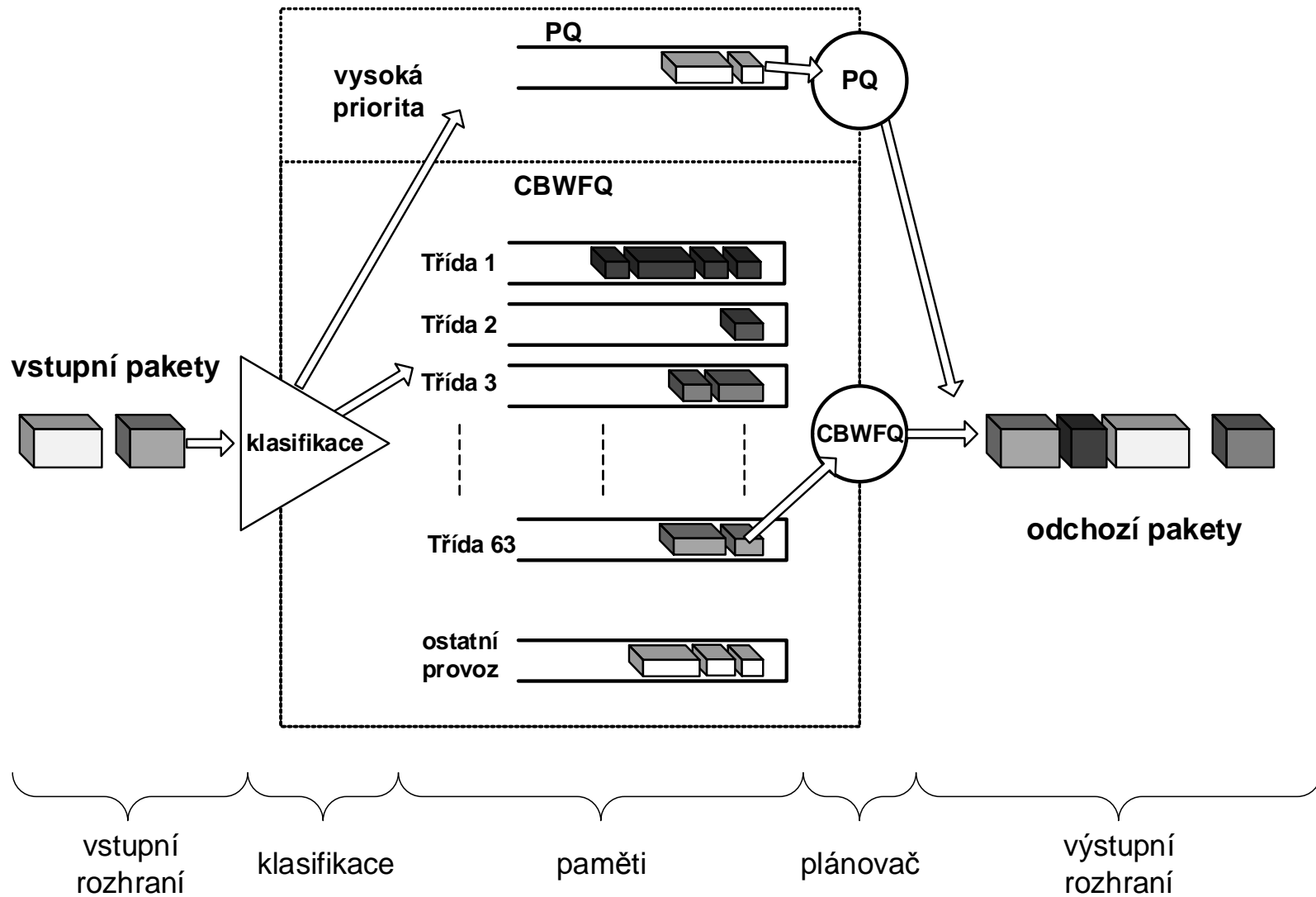


## Priority Queuing

- čtyři prioritní třídy: vysoká (high), střední (medium), normální (normal), a nízká (low)
- pakety zařazené do třídy s vyšší prioritou mají vždy přednost před pakety z třídy s nižší prioritou
- pakety s nejvyšší (high) prioritou mají vždy přednost => mohou získat 100% přenosové kapacity, minimalizuje se zpoždění i rozptyl na úkor ostatních.



# Low Latency Queuing



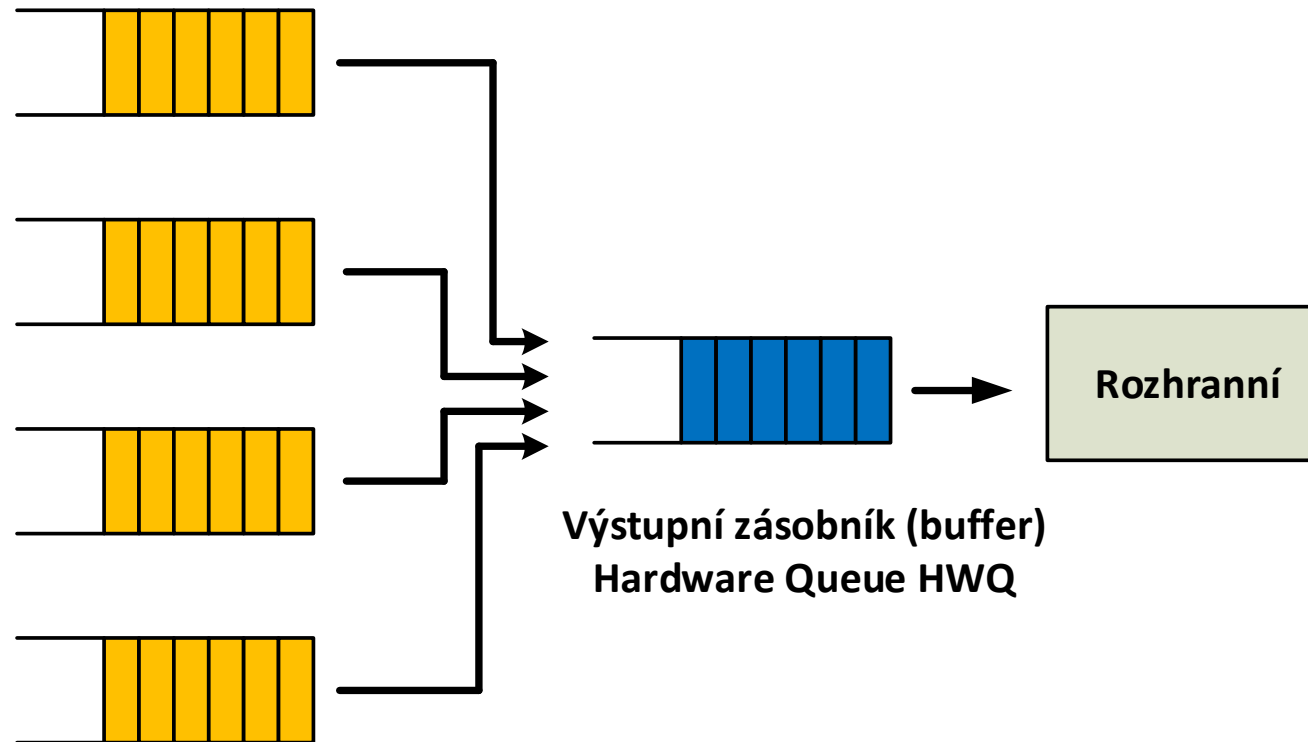


## Low Latency Queuing (LLQ)

- Model CBWFQ - Class-Based Weighted Fair Queueing rozšířen o priority (PQ).
- Prioritním třídám je garantováno:
  - minimální zdržení paketů;
  - maximální dovolená přenosová rychlost;
- V případě překročení garantované přenosové rychlosti dochází ke ztrátě nadbytečných paketů i u prioritní třídy.



## Hardwarová a softwarová paměť



Softwarové řazení  
Software Queue SWQ

Výstupní zásobník (buffer)  
Hardware Queue HWQ

- Po aktivaci SWQ se automaticky sníží kapacita HWQ na 2-3 pakety



## Roztyl zpoždění (doby přenosu sítí)

- Pakety multimediálních toků vstupují do sítě většinou v pravidelných intervalech.
- V cílovém uzlu sítě však mohou být přijaty:
  - s různým zpožděním ( v důsledku rozdílné cesty sítí),
  - v různém pořadí,
  - vícekrát,
  - nebo vůbec (protokol IP negarantuje doručení – best-effort).
- Rozptyl zpoždění (jitter) popisuje nepravidelnost těchto příchodů.
- Síťová infrastruktura by měla zajistit:
  - spolehlivé doručování paketů s garantovanými hodnotami jejich zpoždění a rozptylu.

Výše uvedený požadavek je **obtížně** splnitelný, pokud dochází vlivem přetížení k přeplnění vyrovnávacích pamětí směrovačů!

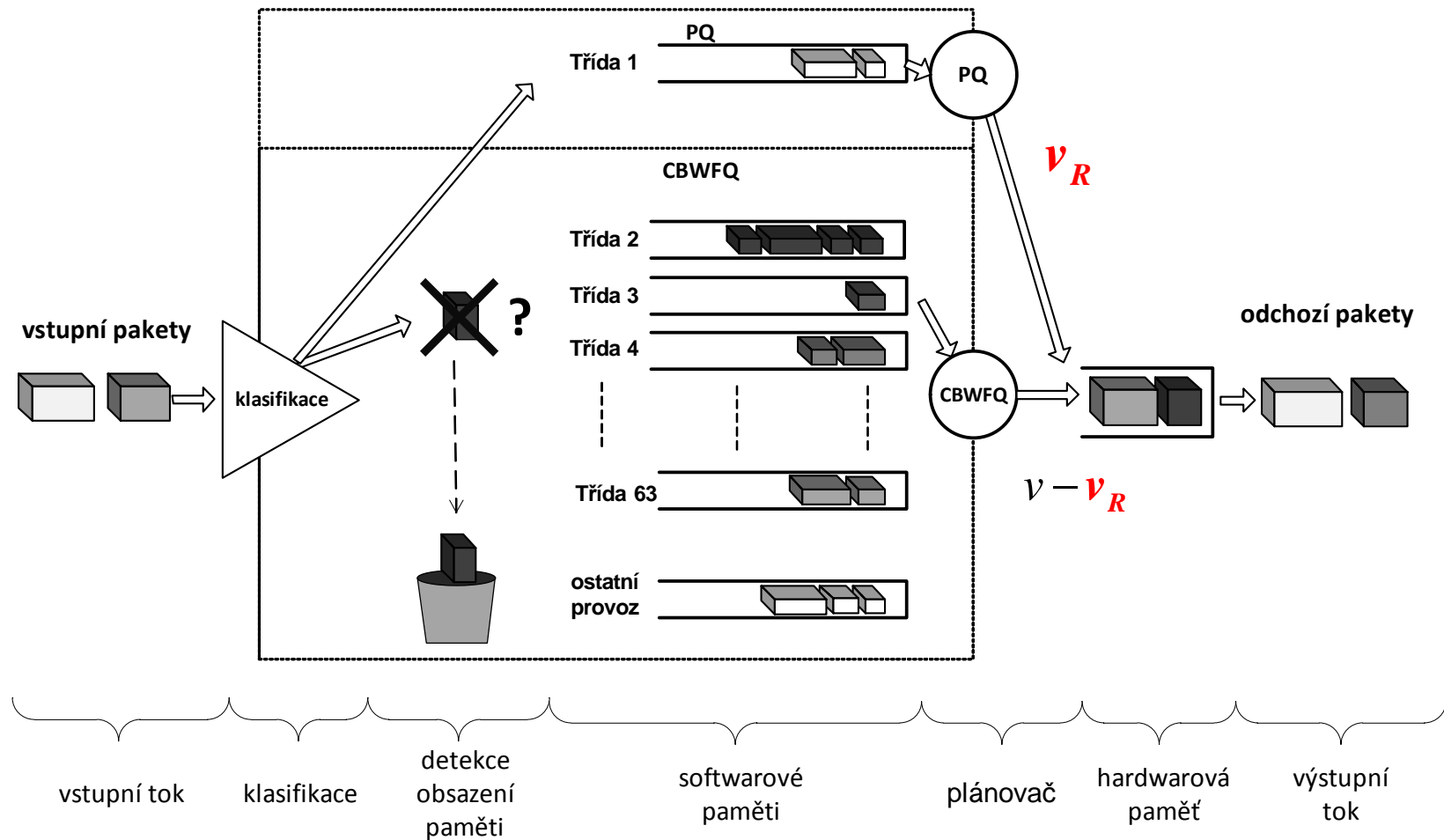


## Stanovení přenosové rychlosti

- Snaha odhadnout potřebnou přenosovou rychlost  $v_R$ , kterou je nutné rezervovat pro skupinu  $Q$  konverzačních služeb, vychází z těchto předpokladů:
  - vstupní toky požadavků jednotlivých služeb lze aproximovat poissonovským tokem s intenzitou  $\lambda_q$  příchozích požadavků;
  - každé jednotlivé spojení  $q$ -tého toku využije z celkové dostupné kapacity  $v_R$  na rozhraní přenosovou rychlost  $v_q$ .
- V případě splnění výše uvedených předpokladů lze pro dimenzování užít **zobecněný Erlangův model**:
  - matematický model systému s čekáním (na třetí vrstvě modelu OSI) pak aproximujeme pro potřeby dimenzování modelem systému se ztrátou.

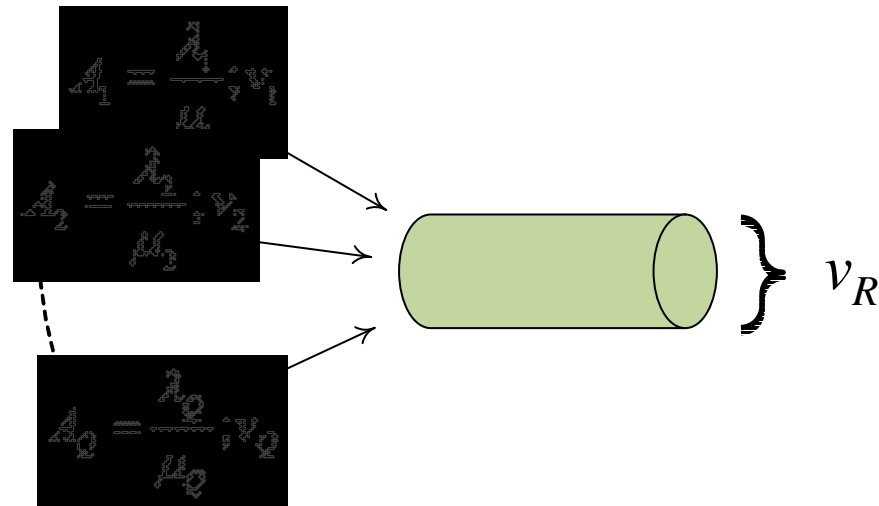


# Příklad: systém Low Latency Queuing (LLQ)





## Zobecněný Erlangův model pro $Q$ toků:



- Vstupní tok tvoří  $Q$  různých služeb, každá s:
  - nabízeným zatížením:

$$A_q = \frac{\lambda_q}{\mu_q} = \lambda_q t_{os} \text{ [erl]}; \quad q = 1, 2, \dots, Q$$

kde  $\lambda_q$  je intenzita příchozích požadavků  $q$ -té služby [ $s^{-1}$ ]

a  $\mu_q = 1 / t_{os}$  je intenzita obsluhy  $q$ -té služby [ $s^{-1}$ ]

- přenosovou rychlostí pro jedno spojení:

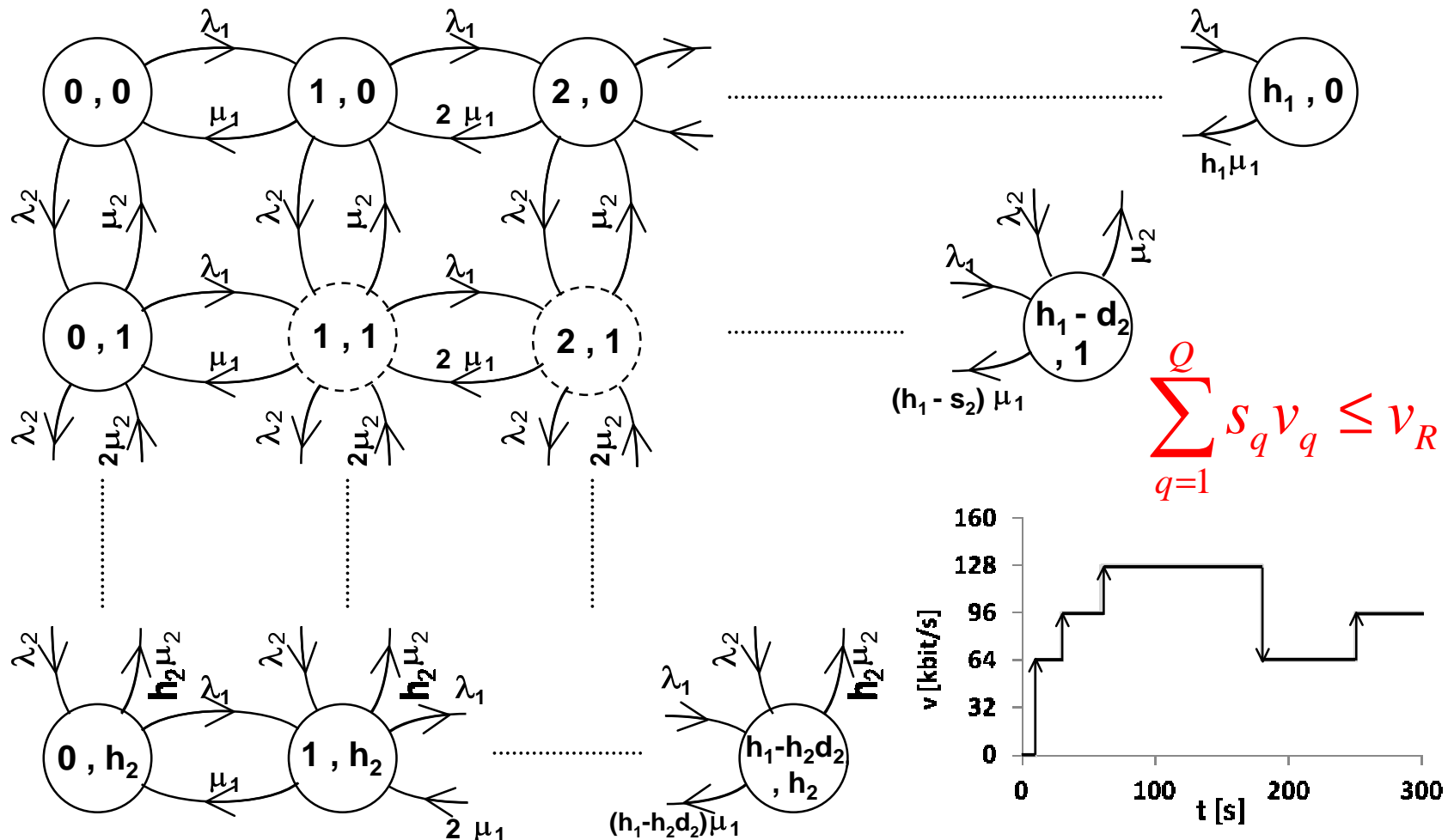
$$v_q \text{ [kbit/s]}; \quad q = 1, 2, \dots, Q$$





# Přidělování přenosové kapacity

- stav systému:  $(s_1, s_2)$  - počet požadavků z jednotlivých toků v syst.





## Zobecněný Erlangův model pro $Q$ toků:

- stacionární pravděpodobnosti stavů systému:

$$P(s_1, K, s_Q) = \frac{A_1^{s_1}}{s_1!} \cdot K \cdot \frac{A_Q^{s_Q}}{s_Q!} \cdot P(0, K, 0)$$

- kde pravděpodobnost, že je systém prázdný je dána:

$$P(0, K, 0) = \left[ \sum_{0 \leq s_1 v_1 + K + s_Q v_Q \leq v_R} \frac{A_1^{s_1}}{s_1!} \cdot K \cdot \frac{A_Q^{s_Q}}{s_Q!} \right]^{-1}$$

- pravděpodobnost ztráty  $q$ -tého toku:

$$B_q = \sum_{v_1 s_1 + \dots + v_Q s_Q > v_R - v_q} P(s_1, \dots, s_Q)$$

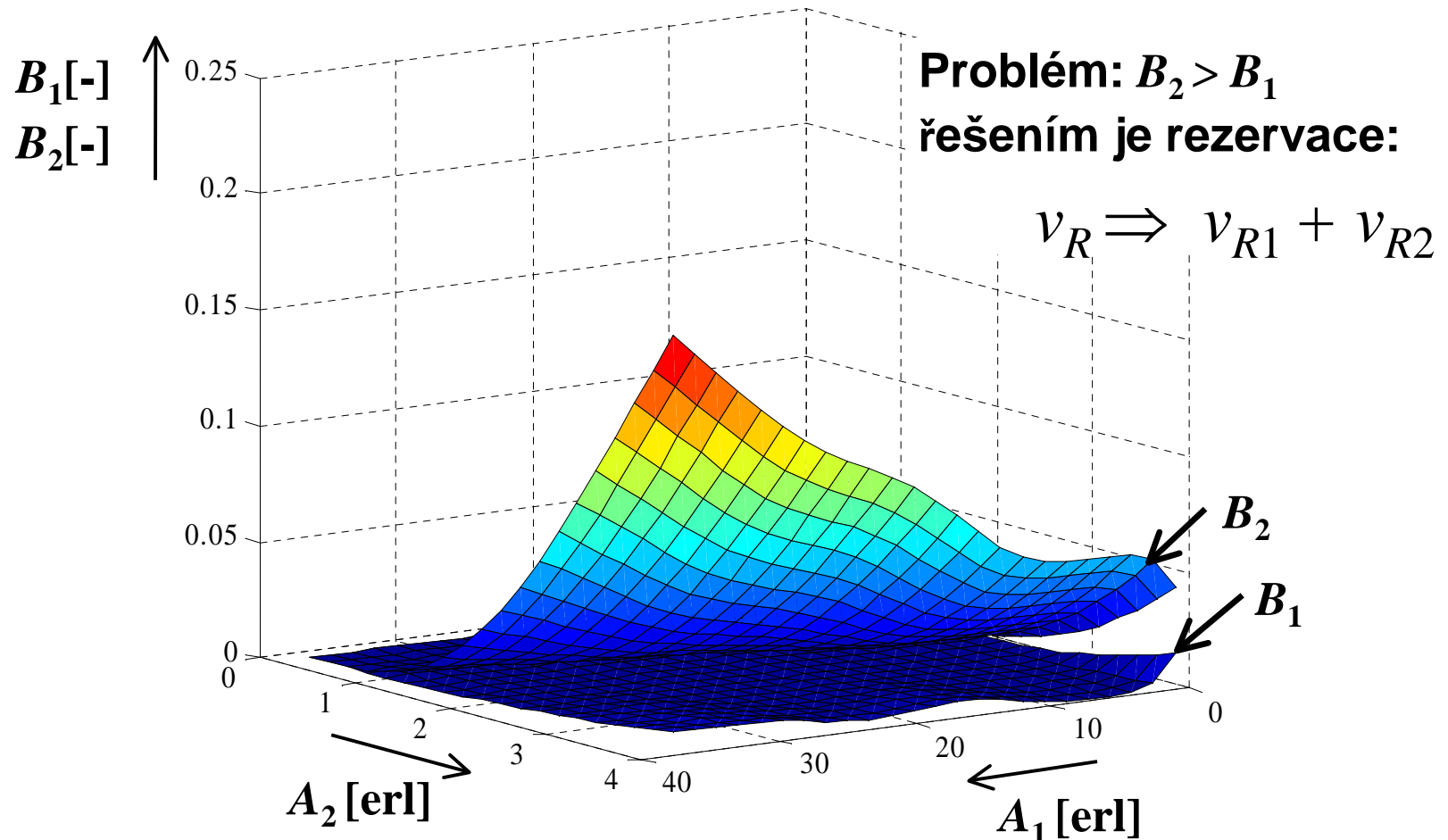
- střední hodnota pravděpodobnosti ztráty všech toků:

$$B_S = \frac{\sum_{q=1}^Q A_q B_q v_q}{\sum_{q=1}^Q A_q v_q}$$



## Příklad:

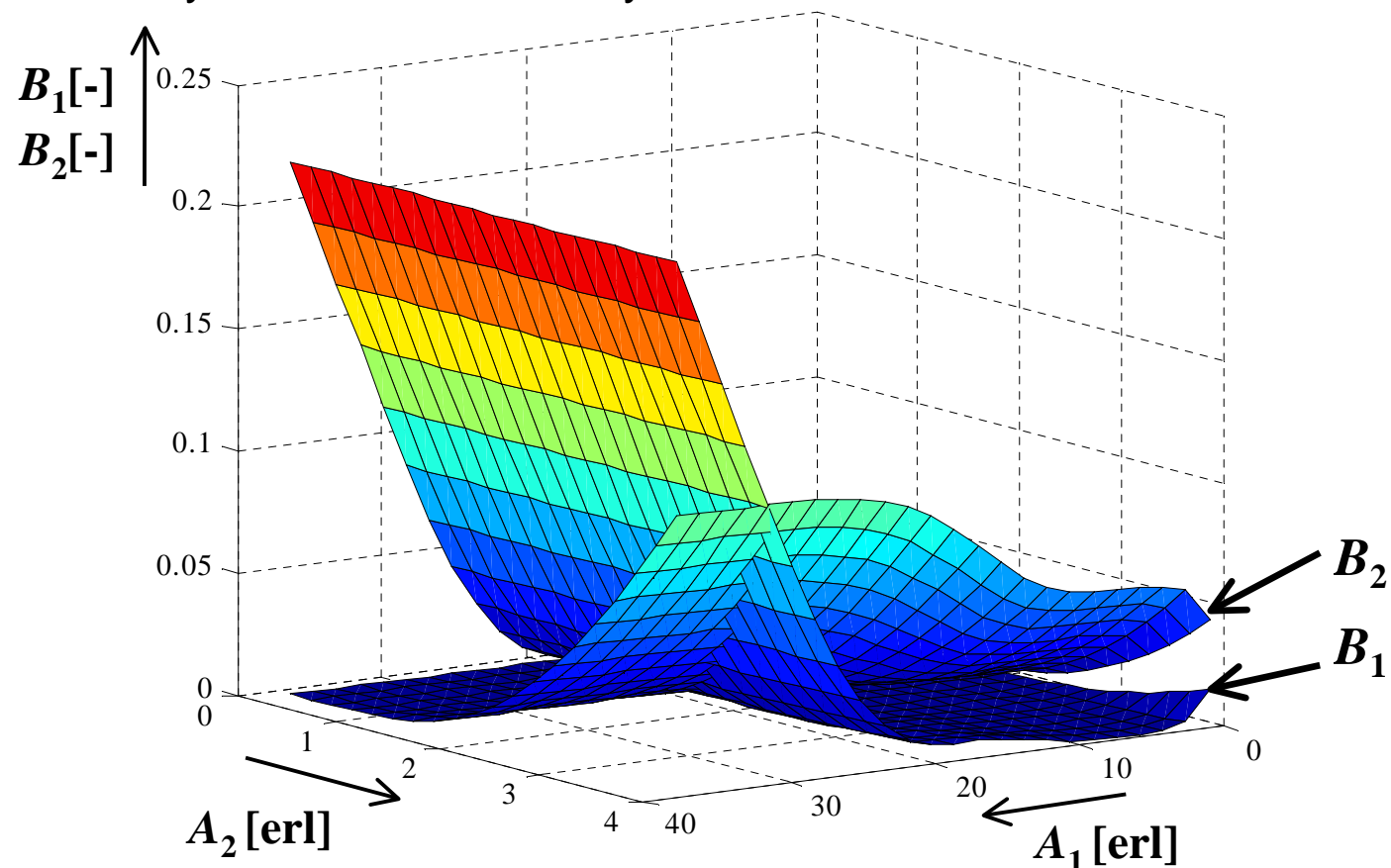
- model  $M_1+M_2/M_1+M_2/v_R/0$ ; dvě služby:
  - VoIP; jedno spojení  $v_1 = 32$  kbit/s,
  - videotelefon; jedno spojení  $v_2 = 512$  kbit/s,





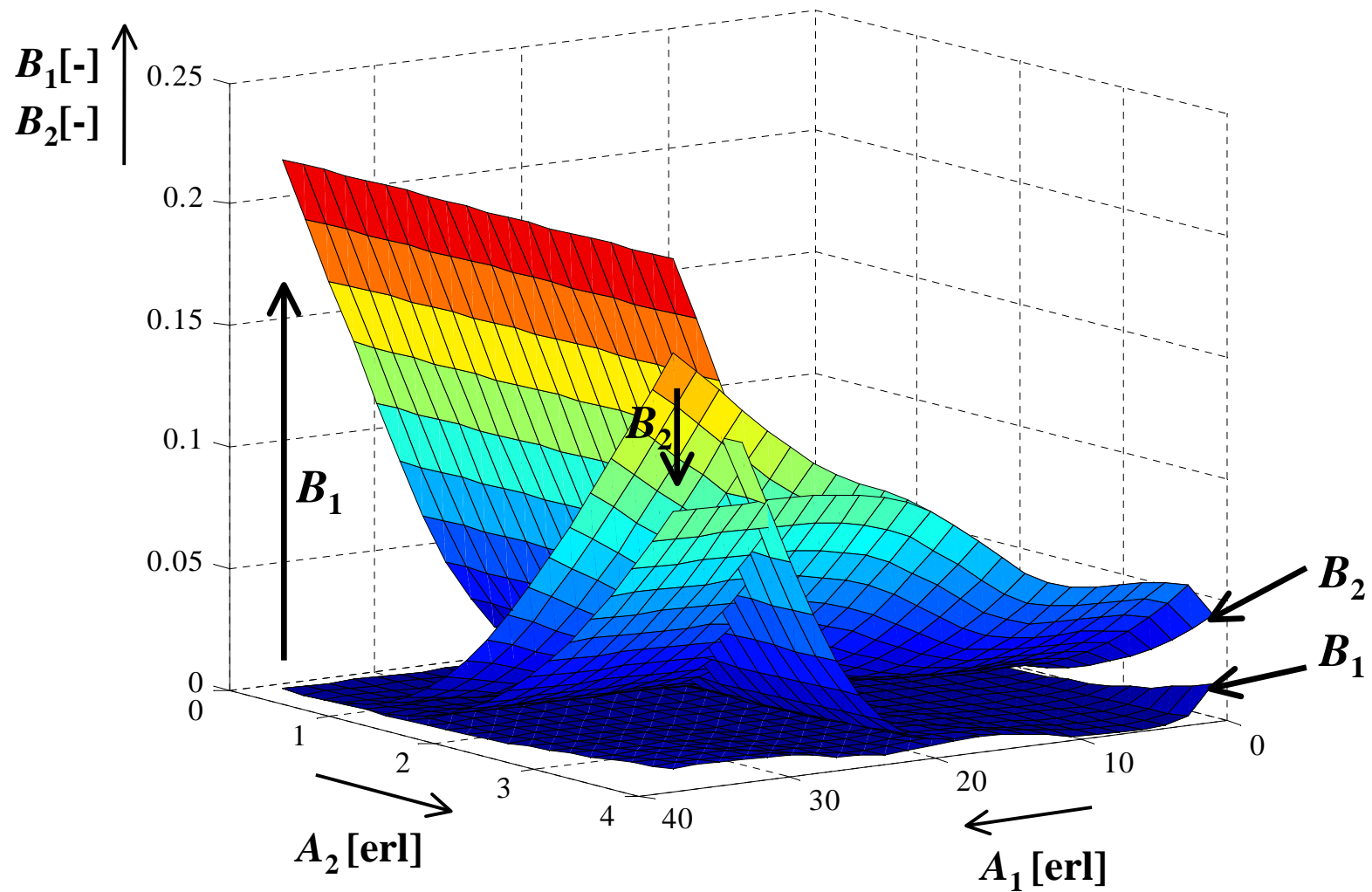
## Příklad: systém s rezervací

- model  $M_1+M_2/M_1+M_2/v_{R1} +v_{R2}/0$ ; dvě služby:
  - VoIP; jedno spojení  $v_1 = 32$  kbit/s,  $v_{R1} = 1024$  kbit/s max. 34 hovorů
  - videotelefon; jedno spojení  $v_2 = 512$  kbit/s ,  $v_{R2} = 4096$  kbit/s teoreticky max. 4 video hovory současně





## Příklad: oba modely současně





## Příklady dimenzování (výsledky simulací)

| $A_1$ [erl] | $A_2$ [erl] | $\nu_{R1}$ [Mbit/s] | $\nu_{R2}$ [Mbit/s] | distribuce        | $B_1$ [-]      | $B_2$ [-]      |
|-------------|-------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------|----------------|
| 30          | 5           | 1,312               | 6,72                | $H_2, c_v = 3$    | 0,0441 ± 0,9 % | 0,0288 ± 1,8 % |
|             |             |                     |                     | $M, c_v = 1$      | 0,0108         | 0,0100         |
|             |             |                     |                     | $E_2, c_v = 0,71$ | 0,0047 ± 0,8 % | 0,0032 ± 1,7 % |
|             |             |                     |                     | $D, c_v = 0$      | 0,0010 ± 1,7 % | 0,0002 ± 5,2 % |
| 60          | 10          | 2,368               | 11,088              | $H_2, c_v = 3$    | 0,0472 ± 0,8 % | 0,0326 ± 1,5 % |
|             |             |                     |                     | $M, c_v = 1$      | 0,0108         | 0,0103         |
|             |             |                     |                     | $E_2, c_v = 0,71$ | 0,0054 ± 1,0 % | 0,0040 ± 1,7 % |
|             |             |                     |                     | $D, c_v = 0$      | 0,0014 ± 2,0 % | 0,0005 ± 4,6 % |
| 90          | 15          | 3,392               | 15,232              | $H_2, c_v = 3$    | 0,0484 ± 0,8 % | 0,3509 ± 1,0 % |
|             |             |                     |                     | $M, c_v = 1$      | 0,0109         | 0,0100         |
|             |             |                     |                     | $E_2, c_v = 0,71$ | 0,0057 ± 1,0 % | 0,0040 ± 2,0 % |
|             |             |                     |                     | $D, c_v = 0$      | 0,0017 ± 1,6 % | 0,0007 ± 3,8 % |
| 120         | 20          | 4,416               | 19,136              | $H_2, c_v = 3$    | 0,0465 ± 0,7 % | 0,0393 ± 1,1 % |
|             |             |                     |                     | $M, c_v = 1$      | 0,0103         | 0,0108         |
|             |             |                     |                     | $E_2, c_v = 0,71$ | 0,0056 ± 1,5 % | 0,0048 ± 2,2 % |
|             |             |                     |                     | $D, c_v = 0$      | 0,0018 ± 2,2 % | 0,0008 ± 4,0 % |

Poznámka: distribuce vyjadřuje různé rozložení intervalů mezi příchody ( $H_2$ - hyperexponenciální,  $M$  - exponenciální,  $E_2$  - Erlangovo 2 řádu;  $D$ -deterministické);  $c_v$ - je variační koeficient.



## Závěr

- Reálné systémy jsou natolik složité, že je nelze komplexně analyticky popsat.
- Model byl zvolen z důvodů odhadu přenosové rychlosti pro jednotlivé služby.
- Charakter toků služeb nemusí vždy odpovídat předpokladům klasické teorie (poissonovský vstupní tok, exponenciální rozložení doby obsluhy,...).
- Doby zpoždění je nutné pro odhadnuté přenosové rychlosti získat měřením nebo simulací reálného modelu.
- Lze předpokládat, že uvedené modely (obzvláště pak model s rezervací) budou nabývat na význam v souvislosti s rozvojem nových sítí, například LTE.



## Literatura

- M. Stasiak, M. Glabowski, A. Wisniewski, P. Zwierzykowski. *Modeling and dimensioning of mobile networks: from GSM to LTE*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2011, xxiii, 315 p. ISBN 978-047-0665-862.
- D. Gross, C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*. 3rd edition. New York : Wiley-Interscience, 1998. 464 p. ISBN 0-471-17083-6.
- W. Odom, M. J. Cavanaugh. *Cisco QOS exam certification guide: CCVP self-study*. 2nd ed. Indianapolis: Cisco Press, 2005, 730 p. ISBN 15-872-0124-0.
- A. Ranjbar. *CCNP ONT: official exam certification guide*. Indianapolis: Cisco Press, 2007, 373 p. ISBN 978-1-58720-176-9.
- Cisco IOS Quality of Service Solutions Configuration Guide  
[http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12\\_2/qos/configuration/guide/fqos\\_c.html](http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_2/qos/configuration/guide/fqos_c.html)
- Internetworking Technology Handbook (Cisco) - Quality of Service  
[http://docwiki.cisco.com/wiki/Quality\\_of\\_Service\\_Networking](http://docwiki.cisco.com/wiki/Quality_of_Service_Networking)





**Děkuji za pozornost**