



Praha 1. ledna 2023

Čj. ČTÚ-55 278/2022-622

Český telekomunikační úřad (dále jen „Úřad“) v rámci svých kompetencí provádí měření a vyhodnocování datových parametrů sítí elektronických komunikací. Vyhodnocování dopadu kapacity sítí elektronických komunikací na výkon služeb přístupu k internetu je specifikováno v metodickém postupu

Metodika pro vyhodnocování dopadu kapacity sítí elektronických komunikací na výkon služeb přístupu k internetu, verze 1.0, který je zveřejněn a je ze strany ČTÚ uplatňován v rámci své kontrolní činnosti.

Vyhodnocování dopadu kapacity sítí elektronických komunikací, a to konkrétně v segmentu distribuční nebo přípojné sítě elektronických komunikací, na výkon služeb přístupu k internetu vychází z teorie hromadné obsluhy s předpokladem, že elementární vstupní datový tok požadavků na hromadnou obsluhu je stacionární, regulární a z hlediska přírůstků nezávislý.

I. Úvod

Účelem tohoto dokumentu (dále jen „Metodika“) je popsat a sjednotit postup pro vyhodnocování dopadu kapacity sítí elektronických komunikací, a to konkrétně v segmentu distribuční nebo přípojné sítě elektronických komunikací, na výkon služeb přístupu k internetu, respektive dopadu na skutečně dosahovanou rychlost (dále jen „SDR“). Metodika navazuje na metodické postupy Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací (dále jen „Metodika pro měření“) a Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací, přičemž respektuje všeobecné oprávnění č. VO-S/1/08.2020-9, kterým se stanoví podmínky k poskytování služeb elektronických komunikací. Metodika je v souladu s BEREC Pokyny BoR (22) 81: *Implementation of the Open Internet Regulation* a svojí podstatou vychází z teorie hromadné obsluhy s obecným předpokladem, že elementární vstupní tok požadavků tvoří Poissonův proces (ze kterého vychází Erlangovy rovnice). Elementární vstupní tok, v případě sítí elektronických komunikací se jedná o datový tok, lze obecně charakterizovat v podobě vstupních datových požadavků, které splňují následující vlastnosti, tedy:

- *stacionárnost*: počet datových toků (koncových bodů sítě; dále jen „NTP“), které přicházejí k systému hromadné obsluhy za čas Δt závisí pouze na délce tohoto intervalu a nezávisí na jeho poloze na časové ose,
- *regulárnost*: pravděpodobnost výskytu více než jednoho datového toku v dostatečně malém intervalu délky Δt je zanedbatelně malá,
- *nezávislost přírůstků*: počet datových toků, které se vyskytnou v jednom časovém intervalu, nezávisí na počtu datových toků v jiných intervalech.

II. Teorie hromadné obsluhy

Vzhledem ke stacionárnosti Poissonova procesu počet datových toků¹ nezávisí na čase t_0 , ale závisí pouze na délce uvažovaného časového intervalu Δt . Pokud $p_k(t)$ označuje pravděpodobnost, že v čase t je v síti elektronických komunikací (dále jen „sít“) k datových toků, regulárnost Poissonova procesu určuje pravděpodobnost, že v čase bude v síti, ať už se jedná o distribuční nebo přípojnu síť, k datových toků, která je současně rovna pravděpodobnosti toho, že v čase t bylo v síti $(k - 1)$ datových toků a během časového intervalu Δt vstoupil do sítě jeden datový tok s pravděpodobností $\lambda\Delta t$, respektive v čase t bylo v síti k datových toků a během časového intervalu Δt s pravděpodobností $(1 - \lambda\Delta t)$ do sítě žádný nový datový tok nevstoupil. Bude proto platit následující vztah:

$$p_k(t + \Delta t) = p_{k-1}(t) \cdot \lambda\Delta t + p_k(t) \cdot (1 - \lambda\Delta t); k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Pravděpodobnost, že v čase $(t + \Delta t)$ v síti není žádný datový tok, je dána pravděpodobností, že tam žádný datový tok nebyl a ani během časového intervalu Δt žádný nevstoupil, tedy:

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t) \cdot (1 - \lambda\Delta t). \quad (2)$$

Rovnici (1) lze jednoduchým způsobem upravit do podoby rovnice (3), stejně tak rovnici (2) lze upravit do podoby rovnice (4):

$$\frac{p_k(t+\Delta t)-p_k(t)}{\Delta t} = \lambda p_{k-1}(t) - \lambda p_k(t); k = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

$$\frac{p_0(t+\Delta t)-p_0(t)}{\Delta t} = -\lambda p_0(t). \quad (4)$$

V případě, pokud se bude časový interval Δt limitně blížit 0, tedy $\Delta t \rightarrow 0$, budou se levé strany rovnice (3) a rovnice (4) rovnat derivaci funkcí $p_k(t)$ a $p_0(t)$ v čase t , respektive $p_k'(t)$ a $p_0'(t)$, zatímco na pravé strany rovnice (3) a rovnice (4) nemá limitní přechod vliv. Lze tedy zapsat:

$$p_k'(t) = \lambda p_{k-1}(t) - \lambda p_k(t); k = 1, 2, \dots, \lambda > 0, t > 0 \quad (5)$$

$$p_0'(t) = -\lambda p_0(t). \quad (6)$$

Rovnice (5) a (6) představují soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu. Pro jejich vyřešení je nutné znát počáteční vstupní podmínky. V čase $t = 0$ se však žádné datové toky v síti ještě nenachází a tedy platí:

$$p_k(0) = 0; k = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

$$p_0(0) = 1. \quad (8)$$

Řešením soustavy diferenciálních rovnic (5) a (6) s počátečními podmínkami definovanými v podobě (7) a (8) je funkce:

$$p_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}; k = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0, t > 0, \quad (9)$$

kteřá představuje pravděpodobnost, že za čas t přijde k systému s hromadnou obsluhou k datových toků (NTP). Elementární vstupní datový tok odpovídá tedy náhodné veličině, která má Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti s parametrem λt . Střední hodnotou náhodné veličiny je tedy λt a speciálně v čase $t = 1$ je střední hodnotou náhodné veličiny průměrný počet NTP, které generují datový tok přicházející k systému hromadné obsluhy za jednotku času, roven parametru λ . Parametrem λ se označuje střední intenzita vstupu, a vyjadřuje tedy průměrný počet datových toků (NTP), které vstoupily do systému hromadné obsluhy za jednotku času.

¹ V rámci Metodiky označuje pojem „datový tok“ soubor všech přenosů dat (informací) různého charakteru a různého počtu TCP spojení, které souvisí s jedním NTP v daném čase. Je obecným předpokladem, že jeden NTP odpovídá jedné disponibilní přípojce nebo přístupu nezávisle na DeP.

Funkci (9) můžeme pro speciální případ, kdy $t = 1$, přepsat do podoby:

$$p_k(1) = \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda}; k = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0. \quad (10)$$

Pokud ve funkci (9) budeme uvažovat další speciální případ, kdy $k = 0$, zjistíme, že mezery mezi příchody jednotlivých průměrných počtů datových toků (NTP) k systému hromadné obsluhy podléhají exponenciálnímu rozdělení. Bude v tomto případě platit pravděpodobnost, že po vstupu jednoho průměrného počtu datového toku (NTP) žádný další požadavek po celou dobu intervalu t do systému hromadné obsluhy nevstoupil, která je rovna $p_0(t)$, přičemž lze funkci (9) upravit do podoby rovnice:

$$P(T > t) = p_0(t) = e^{-\lambda t}; \lambda > 0, t > 0, \quad (11)$$

na základě které dostaneme známou distribuční funkci $F(t)$ exponenciálního rozdělení:

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) = 1 - e^{-\lambda t}; \lambda > 0, t > 0. \quad (12)$$

III. Dopad kapacity sítě

Kapacita sítě, ať už se jedná o přípojnou síť (*backhaul network*) nebo síť distribuční (*distribution network*), významným způsobem ovlivňuje výkon poskytovaných služeb přístupu k internetu. Nedostatečná kapacita sítě způsobí nárůst (zhoršení) hodnot QoS parametrů, které spadají do souboru rozšířených datových parametrů dle Metodiky pro měření², resp. zpoždění rámců (paketů) FTD, kolísání zpoždění rámců (paketů) IFDV a ztrátovost rámců (paketů) FLR, a to včetně chybovosti paketů IPER. Protože výkon služeb přístupu k internetu je charakterizován hodnotou SDR, kterou si je možné představit jako přenosovou rychlost odpovídající transportní vrstvě modelu ISO/OSI (L 4) při využívání spojově orientovaného protokolu TCP, resp. objem přenesených užitečných dat za daný časový interval, způsobuje právě spojová orientovanost TCP protokolu, resp. autoregulační algoritmus *TCP Congestion Control*, v závislosti na nárůstu hodnot QoS parametrů pokles výsledné hodnoty SDR za sledovaný časový interval. Výslednou hodnotu SDR v konkrétním NTP (v závislosti na DeP) lze stanovit prostřednictvím měřicího procesu specifikovaného v Metodice pro měření², nicméně pro globální posouzení dopadu kapacity sítě v závislosti počtu NTP na výsledný pokles výkonu služeb přístupu k internetu (SDR) je nutné použít tuto Metodiku, která je koncipována navíc tak, aby ji bylo možné využít i pro aktivační, projektovou nebo podobnou činnost.

Koncoví uživatelé využívají službu přístupu k internetu náhodně a nezávisle na základě stejné pravděpodobnosti. Pravděpodobnost, že koncoví uživatelé budou využívat službu přístupu k internetu ve stejnou dobu, má Poissonovo rozdělení. Je předpokladem, že počet koncových uživatelů, generující datový tok v čase t , koresponduje s počtem NTP¹ a tento počet se označuje obecně jako N . Pravděpodobnost, že do systému s hromadnou obsluhou vstupuje počet N datových toků (NTP) lze zapsat v podobě distribuční funkce:

$$P(k \leq N) = P(k = 0) + P(k = 1) + \dots + P(k = N) = \sum_{k=0}^N p_k(t), \quad (13)$$

přičemž pokud dosadíme do rovnice (13) pravděpodobností funkci (10) popisující speciální případ, kdy $t = 1$, lze výslednou pravděpodobnost zapsat ve tvaru:

$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda}; \lambda > 0. \quad (14)$$

Výslednou rovnici (14) pro distribuční funkci popisující pravděpodobnost, že přijde do systému s hromadnou obsluhou současně N datových toků generovaných stejným počtem NTP, lze použít k posouzení dopadu kapacity sítě na výkon služby přístupu k internetu. Je vhodné

² Český telekomunikační úřad, Praha, 2021: *Metodika pro měření a vyhodnocování datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací 2.1*

zohlednit i chování koncových uživatelů v dané lokalitě, které se vyjadřuje prostřednictvím parametru UF (*utilization factor*) na základě výsledků monitoringu síťového provozu.

1. Počet koncových bodů sítě (NTP)

Při posouzení dopadu kapacity sítě na průměrný počet NTP, které budou schopny zajistit předpokládanou limitní hodnotu výkonu služby, tedy přenosové rychlosti SDR, kdy např. z pohledu poskytování služeb přístupu k internetu v pevném místě se bude jednat o limitní hodnotu v podobě běžně dostupné rychlosti (dále jen „BDR“), tedy situaci, kdy $SDR = BDR$, je nutné nejprve vycházet ze samotné znalosti hodnoty kapacity sítě. Vstupním předpokladem je situace, kdy rozhraní NTP (dle typu DeP) a rozhraní posuzované přípojné nebo distribuční sítě odpovídá běžným standardům IEEE 802.3. Kapacita sítě se nejčastěji udává hodnotou bitové rychlosti NBR odpovídající fyzické vrstvě modelu ISO/OSI (L 1), eventuálně hodnotou rychlosti IR odpovídající spojové vrstvě modelu ISO/OSI (L 2) nebo hodnotou IP propustnosti IP TR, tedy hodnotou rychlosti odpovídající síťové vrstvě modelu ISO/OSI (L 3). Skutečnou hodnotu kapacity sítě lze ověřit měřením šířky pásma ve směru downlink nebo uplink metodou specifikovanou v Metodice pro měření³, přičemž během procesu měření se předpokládá na transportní vrstvě nespojově orientovaný protokol UDP. Metodika pro měření³ také umožňuje vzhledem k měsíčnímu časovému rámci posuzovat dopad kapacity sítě na základě výsledku monitoringu síťového provozu. Pro posouzení dopadu kapacity sítě v rámci této Metodiky je nutné nejprve hodnotu kapacity sítě přepočítat na transportní vrstvu modelu ISO/OSI (L 4) odpovídající běžné hodnotě záhlaví protokolu TCP (např. 20 B).

Příkladem může být rozhraní standardu IEEE 802.3z, u kterého je na fyzické vrstvě modelu ISO/OSI dosahovaná bitová rychlost $NBR = 1000 \text{ Mb/s}$. Maximálně dosažitelná informační rychlost IR spojové vrstvy modelu ISO/OSI je limitována maximálním počtem rámců FPS:

$$FPS = \frac{NBR}{(IFG + \text{Preamble} + \text{MAC DST} + \text{MAC SRC} + \text{Ethertype} + 802.1Q(802.1ad) + \text{MTU} + \text{FCS}) \cdot 8} \quad [1/\text{s}; \text{b/s}, \text{B}], \quad (15)$$

kde v uvedeném příkladu se předpokládá, že hodnoty $IFG = 12 \text{ B}$, $\text{Preamble} = 8 \text{ B}$, $\text{MAC DST} = 6 \text{ B}$, $\text{MAC SRC} = 6 \text{ B}$, $802.1Q(802.1ad) = 0 \text{ B}$, $\text{Ethertype} = 2 \text{ B}$, $\text{MTU} = 1500 \text{ B}$ a $\text{FCS} = 4 \text{ B}$. V takovém případě bude rozhraní odpovídající standardu IEEE 802.3z dosahovat dle vztahu (15) hodnoty $FPS = 81274 \text{ 1/s}$. Hodnota výsledné TCP propustnosti, TCP TR, tedy rychlosti odpovídající transportní vrstvě modelu ISO/OSI při použití TCP protokolu, kdy je na síťové vrstvě použit protokol IPv4 bez volitelných částí záhlaví (20 B) a TCP záhlaví bez jakéhokoliv rozšíření (20 B), je stanovena dle rovnice:

$$TCP \text{ TR} = (\text{MTU} - IP_{\text{header}} - TCP_{\text{header}}) \cdot 8 \cdot FPS; [\text{b/s}; \text{B}, 1/\text{s}]. \quad (16)$$

V uvedeném příkladu dosahuje rozhraní odpovídající standardu IEEE 802.3z hodnoty TCP propustnosti $TCP \text{ TR} = 949,285 \text{ Mb/s}$. V případě použití IPv6 protokolu je z důvodů většího záhlaví (40 B) hodnota TCP propustnosti TCP TR nižší, konkrétně $936,28 \text{ Mb/s}$. Dále bude pro jednoduchost uvažováno pouze IPv4, nicméně výpočty lze obdobně upravit i pro IPv6.

Při znalosti hodnoty kapacity sítě na transportní vrstvě je nutné dále stanovit limitní hodnotu přenosové rychlosti (SDR) posuzované z hlediska dopadu kapacity sítě na celkový počet NTP, které budou stanovenou limitní hodnotu přenosové rychlosti dosahovat s pravděpodobností odpovídající distribuční funkci dle vztahu (14). Příkladem může být vybudovaná přístupová síť (*access network*) odpovídající standardu ITU-T G.984, resp. technologií GPON (*gigabit passive optical networks*), přičemž v návaznosti na výše uvedený přepočet mezi vrstvami modelu ISO/OSI se předpokládá, že zařízení optického linkového zakončení OLT (*optical line termination*) technologie GPON je připojeno k distribuční síti prostřednictvím optického modulu SFP (*small form-factor pluggable*) odpovídajícímu standardu IEEE 802.3z, např. v podobě varianty 1000BASE-SX. V uvažovaném příkladu poskytování služby přístupu k internetu

³ Huawei, 2016: *WTTx Capacity White Paper*

v pevném místě technologií GPON odpovídá hodnota BDR = 60 Mb/s ve směru download. Pro zjednodušení výpočtu dopadu kapacity sítě je možné tedy uvést, že $SDR_{\min} = BDR = 60 \text{ Mb/s}$. Pro zajištění, aby hodnota SDR_{\min} nebyla nižší než BDR, nesmí být průměrný počet NTP generujících datový tok v čase $t = 1$ vyšší než definovaný počet N , kde parametrem CAP se označuje kapacita sítě, která svojí hodnotou odpovídá transportní vrstvě (TCP protokolu):

$$N = \left\lfloor \frac{CAP}{SDR_{\min}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{949,285}{60} \right\rfloor = 15 [-; \text{Mb/s}, \text{Mb/s}]. \quad (17)$$

Následně je nutné stanovit hodnotu pravděpodobnosti $P(k \leq N)$, při které bude zajištěno, že hodnota SDR_{\min} neklesne pod stanovenou hodnotu BDR. Obecně se doporučuje, aby hodnota pravděpodobnosti nebyla nižší než 90 %. Pro potřeby příkladu je zvolena dolní hranice limitní hodnoty $P(k \leq N) = 90 \%$. Výpočet hodnoty střední intenzity vstupu λ , která je klíčovým parametrem pro stanovení výsledné hodnoty průměrného počtu NTP, se provede pomocí uvedeného vztahu (14):

$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90 \% \rightarrow P(k \leq 15) = \sum_{k=0}^{15} \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 \rightarrow \\ \rightarrow \lambda \doteq 11,140 [-]. \quad (18)$$

Výsledná hodnota střední intenzity vstupu λ odpovídá průměrnému počtu NTP generujících datový tok v čase t , které s pravděpodobností 90 % dle Poissonova procesu budou využívat službu přístupu k internetu. Pro tento případ lze výkon služby přístupu k internetu stanovit tedy jako SDR_{\max} :

$$SDR_{\max} = \frac{CAP}{\lambda} = \frac{949,285}{11,140} \doteq 85,214 [\text{Mb/s}; \text{Mb/s}, -]. \quad (19)$$

Poměr průměrného počtu NTP a střední intenzity vstupu λ lze na základě vztahu (17) a vztahu (19) stanovit jako:

$$\frac{NTP}{\lambda} = \frac{\frac{CAP}{SDR_{\min}}}{\frac{CAP}{SDR_{\max}}} = \frac{CAP}{SDR_{\min}} \cdot \frac{SDR_{\max}}{CAP} = \frac{SDR_{\max}}{SDR_{\min}} = \frac{85,214}{60} \doteq 1,420. \quad (20)$$

Hodnota SDR_{\max} může však limitně dosahovat hodnoty rychlosti odpovídající kapacitě sítě. V případě rovnosti hodnot SDR_{\max} a kapacity CAP lze konstatovat, že průměrný počet NTP odpovídá vztahu (21), přičemž pro zjednodušení je hodnota SDR_{\min} označována všeobecně jako SDR ($SDR_{\min} \rightarrow SDR$):

$$SDR_{\max} = CAP \Rightarrow \frac{NTP}{\lambda} = \frac{CAP}{SDR} \Rightarrow NTP = \left\lfloor \frac{CAP \cdot \lambda}{SDR} \right\rfloor [-; \text{Mb/s}, -, \text{Mb/s}]. \quad (21)$$

Výsledný vztah (21) pro výpočet průměrného počtu NTP odpovídá postupu, který uvádějí výrobci telekomunikačních zařízení pro návrh dimenzování kapacity distribučních (přípojných) sítí³. Situaci, kdy hodnota SDR_{\max} odpovídá hodnotě kapacity sítě, bude věnována pozornost v části Metodiky, která se zabývá dopadu parametru UF (*utilization factor*) na průměrný počet NTP. Výslednou hodnotu průměrného počtu NTP v uvedeném příkladu technologie GPON, kdy bude s pravděpodobností $P(k \leq N) = 90 \%$ zajištěno, že pokud budou současně generovat datový tok v systému s hromadnou obsluhou, neklesne SDR pod zvolenou hodnotu 60 Mb/s, stanovíme následně na základě vztahu (21):

$$NTP = \left\lfloor \frac{CAP \cdot \lambda}{SDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{949,285 \cdot 11,140}{60} \right\rfloor = 176 [-; \text{Mb/s}, -, \text{Mb/s}]. \quad (22)$$

Platí tedy, že technologie GPON s vyhrazenou kapacitou sítě 1 Gb/s (L 1) na vstupu OLT zařízení dokáže zajistit s pravděpodobností 90 % pro 176 koncových zařízení NT (*Network Terminal*), resp. ONT (*Optical Network Terminal*), průměrnou hodnotu přenosové rychlosti 60 Mb/s. V případě technologie PON se doporučuje konfigurovat pasivní optickou síťovou infrastrukturou na nižší možný dělicí poměr, v tomto případě by se jednalo o poměr 1:128. Obdobně lze postupovat v případě poskytování služby přístupu k internetu v pevném místě i prostřednictvím mobilních sítí, resp. prostřednictvím technologie FWA. Příkladem může být

mobilní technologie spadající do kategorie 5G sítí v pásmu 3,5 GHz se systémovou šířkou pásma $B = 100$ MHz, konfigurací časového slotu v poměru mezi downlink a uplink 3:1, přičemž gNodeB odpovídá 64T64R a vykazuje dostatečnou úroveň EIRP na straně koncového zařízení (např. 27 dBm; 2T4R). Při plánování kapacity přípojné sítě pro zajištění dostatečné konektivity mobilní sítě (gNodeB) se vychází z problematiky dimenzování kapacity buňky, a to s ohledem na fyzikální principy chování dané technologie mobilní sítě. Je nutné určit hodnotu limitního parametru rozšíření kapacity CE_{thr} (*capacity expansion threshold*), dále určit hodnotu poměru časového slotu v patřičném směru $TR_{DL/UL}$ (*downlink/uplink time ratio*) a spektrální účinnost η (*spectrum efficiency*). Výsledná kapacita technologie FWA ve směru downlink je určena jako:

$$CAP = B \cdot CE_{thr} \cdot TR_{DL} \cdot \eta \text{ [Mb/s; MHz, -, -, b/s/Hz]}, \quad (23)$$

přičemž pro uvedený příklad technologie 5G sítě v provozované v pásmu 3,5 GHz lze stanovit parametry $B = 100$ MHz, $CE_{thr} = 70$ %, $TR_{DL} = 0,75$ a $\eta = 17$ b/s/Hz. Po dosazení do rovnice (23) dostaneme dostupnou kapacitu 892,5 Mb/s (L 3). Protože tato hodnota odpovídá síťové vrstvě modelu ISO/OSI, tedy IP propustnosti IP TR, je opět nutné ji přepočítat na transportní vrstvu při použití TCP protokolu, kdy se předpokládá velikost TCP záhlaví bez jakéhokoliv rozšíření (20 B), a to na základě úpravy vztahu (16):

$$TCP \text{ TR} = IP \text{ TR} - \frac{IP \text{ TR} \cdot TCP_{header}}{MTU - IP_{header}} \text{ [b/s; b/s, B, B, B]}. \quad (24)$$

V uvedeném příkladu dosahuje kapacita technologie 5G sítě provozované v pásmu 3,5 GHz výslednou TCP propustnost $TCP \text{ TR} = 880,439$ Mb/s. Stejně jako v příkladu technologie GPON je nutné stanovit limitní hodnotu přenosové rychlosti posuzované z hlediska dopadu kapacity sítě na průměrný počet NTP, které budou stanovenou hodnotu přenosové rychlosti dosahovat s pravděpodobností dle vztahu (14). V tomto příkladu se opět bude vycházet ze stejné hodnoty $BDR = 60$ Mb/s. Pro zajištění, že hodnota SDR_{min} nebude nižší než BDR, musí být počet NTP generujících datový tok pro čas $t = 1$ menší, než definovaný počet N , kde parametrem CAP se označuje určená kapacita sítě na úrovni transportní vrstvy (L 4):

$$N = \left\lfloor \frac{CAP}{SDR_{min}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{880,439}{60} \right\rfloor = 14 \text{ [-; Mb/s, Mb/s]}. \quad (25)$$

Následně je nutné stanovit hodnotu pravděpodobnosti $P(k \leq N)$, při které bude zajištěno, že hodnota SDR neklesne pod stanovenou hodnotu BDR. Stejně jako v uvedeném příkladu technologie GPON je pro potřeby tohoto případu zvolena limitní hodnota pravděpodobnosti $P(k \leq N) = 90$ %. Výpočet hodnoty průměrného počtu NTP odpovídajícího střední intenzitě vstupu λ , která je klíčovým parametrem pro stanovení výsledné hodnoty průměrného počtu NTP, se provede pomocí uvedeného vztahu (14):

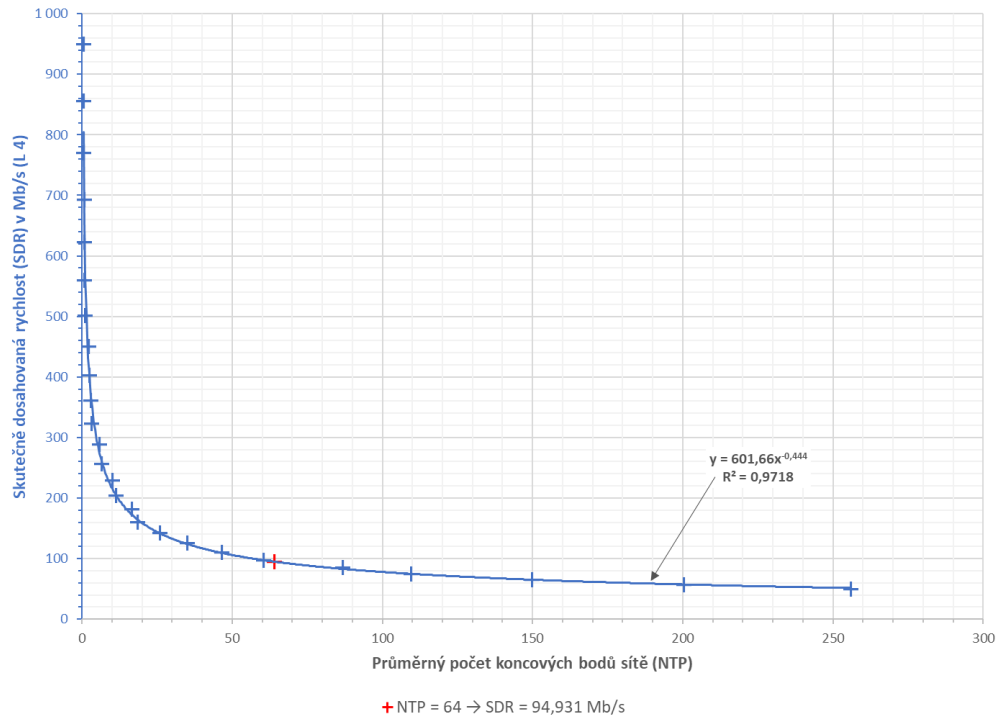
$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90 \% \rightarrow P(k \leq 14) = \sum_{k=0}^{14} \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 \rightarrow \\ \rightarrow \lambda \doteq 10,305 \text{ [-]}. \quad (26)$$

Výslednou hodnotu průměrného počtu NTP, u kterých bude s pravděpodobností $P(k \leq N) = 90$ % zajištěno, že pokud budou generovat datový tok současně v systému s hromadnou obsluhou, realizovaného technologií uvedenou technologií 5G sítě v pásmu 3,5 GHz, neklesne SDR pod zvolenou hodnotu BDR, stanovíme na základě vztahu (21):

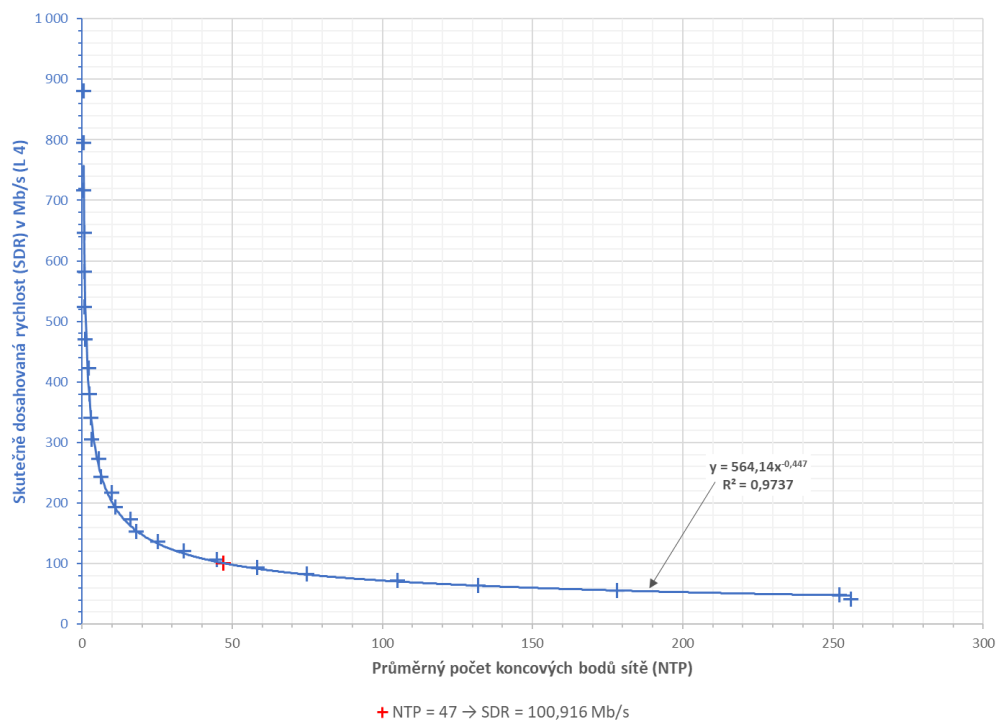
$$NTP = \left\lfloor \frac{CAP \cdot \lambda}{SDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{880,439 \cdot 10,305}{60} \right\rfloor = 151 \text{ [-; Mb/s, -, Mb/s]}. \quad (27)$$

Platí tedy, že uvedený příklad FWA technologie s kapacitou přípojné sítě odpovídající alespoň kapacitě stanovené na základě problematiky dimenzování kapacity buňky ve směru downlink (technologie FWA bude tvořit úzké hrdlo, tzv. *bottleneck*), a to s ohledem na fyzikální principy chování technologie 5G sítě, tedy 892,5 Mb/s (L 3), dokáže zajistit s pravděpodobností 90 % pro 151 koncových zařízení průměrnou hodnotu přenosové rychlosti 60 Mb/s. Výsledný dopad kapacity sítě CAP na průměrný počet NTP, které budou schopné zajistit předpokládanou limitní hodnotu přenosové rychlosti, resp. z pohledu poskytování služeb přístupu k internetu

v pevném místě se bude jednat o hodnotu $SDR_{\min} = BDR$, lze také zobrazit v podobě převodní charakteristiky, a to pro konkrétní hodnotu kapacity sítě. Výsledná převodní charakteristika uvedeného příkladu technologie GPON při kapacitě sítě 1000 Mb/s (L 1) je uvedena na obr. 1. Na zobrazeném průběhu převodní charakteristiky si lze povšimnout, že pro případ průměrného počtu NTP = 64, tedy typickému základnímu dělicímu poměru 1:64 pasivní optické distribuční sítě, odpovídá hodnota SDR = 94,931 Mb/s (červený bod na obr. 1).



Obr. 1: Závislost skutečně dosahované rychlosti (SDR) na průměrném počtu koncových bodů sítě (NTP), příklad přístupové technologie GPON s kapacitou přípojné sítě 1000 Mb/s (L 1)

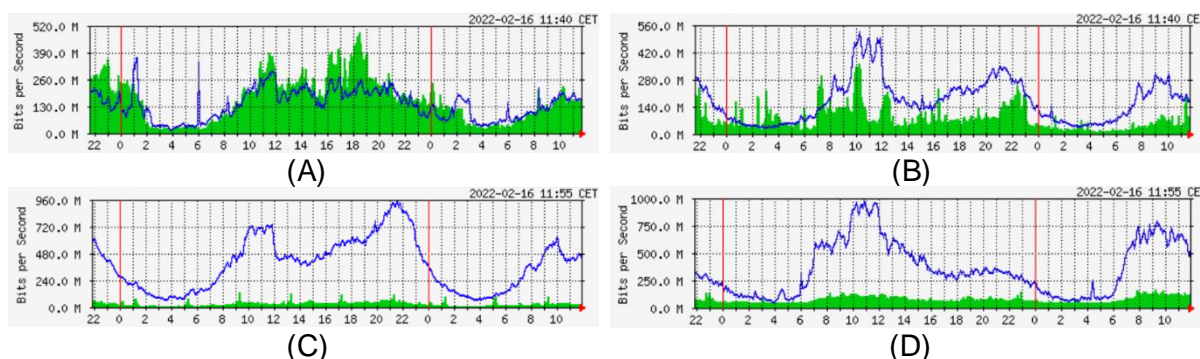


Obr. 2: Závislost skutečně dosahované rychlosti (SDR) na průměrném počtu koncových bodů sítě (NTP), příklad přístupové technologie FWA (5G v pásmu 3,5 GHz) s dostupnou kapacitou přípojné sítě $\geq 892,5$ Mb/s (L 3)

Obdobným způsobem je stanovena převodní charakteristika příkladu přístupové technologie FWA, odpovídající 5G síti provozované v pásmu 3,5 GHz ($B = 100$ MHz), kdy kapacita přípojné sítě odpovídá alespoň kapacitě buňky ve směru downlink, a to alespoň hodnotě 892,5 Mb/s (L 3), viz obr. 2. Pokud by tato FWA přístupová technologie v uvedené konfiguraci měla zajistit hodnotu $BDR \geq 100$ Mb/s pro svá koncová zařízení současně, byla by tohoto požadavku schopna s pravděpodobností 90 % pro průměrný počet NTP = 47 (červený bod na obr. 2).

2. Dopad faktoru využití sítě (UF) koncovými uživateli

Mezi běžně používané metody identifikace míry využití sítě, resp. síťové topologie jako celku, patří stanovení parametru využití jednotlivých datových spojů LU (*link utilization*) síťové topologie. Parametr LU je definován jako podíl nominální hodnoty rychlosti v čase (aktuální hodnota bitové rychlosti NBR) a příslušné kapacity. Tento parametr je možné také označit jako využití kapacity (*capacity utilization*) a je spjat vždy s konkrétním demarkačním bodem DeP topologie sítě. Pro příklad vysvětlení dopadu parametru LU, resp. faktoru využití sítě UF (*utilization factor*) koncovými uživateli, je vybrán vzorek 4 poskytovatelů služby přístupu k internetu s kapacitou přípojné sítě $CAP = 1000$ Mb/s, kde výsledky monitoringu síťového provozu jejich přípojných sítí budou příkladem vysvětlení. Na obr. 3 jsou uvedeny denní průběhy monitoringu síťového provozu vybraných 4 přípojných sítí (označení A, B, C a D), a to v rámci stejného dne.

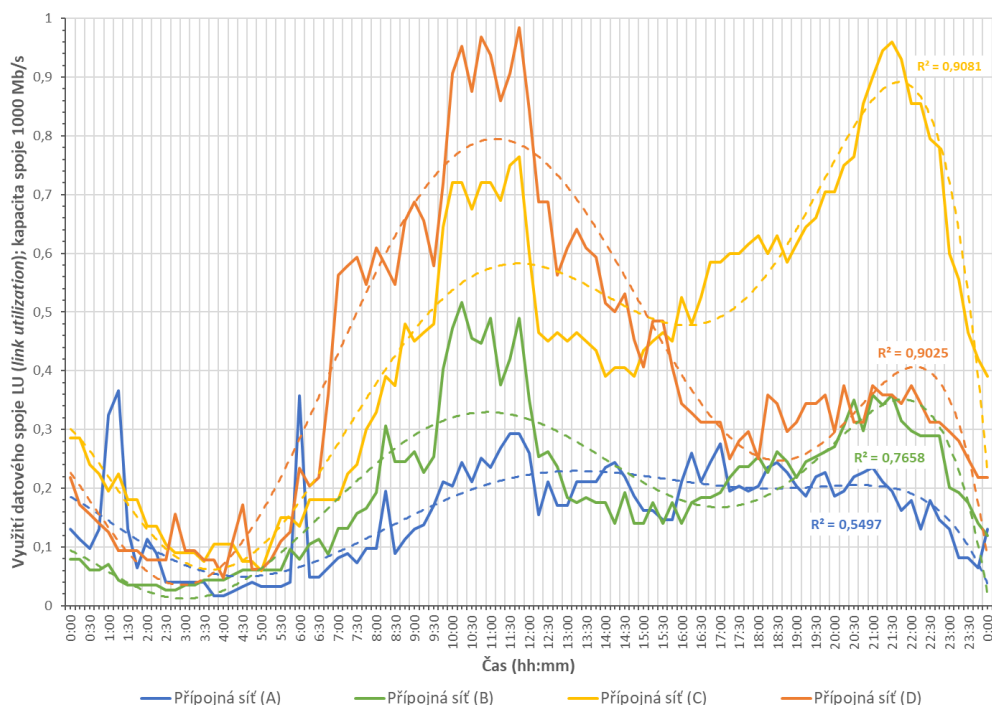


Obr. 3: Výsledky denního monitoringu síťového provozu přípojných sítí vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu (A, B, C a D), a to za stejný časový úsek, průměrné hodnoty v intervalu 5 minut

Následně je obr. 4 zobrazena odpovídající změnu hodnoty parametru LU v čase dne (směr downlink označený na obr. 3 modrou čarou). Hodnota parametru LU je závislá na čase dne a samotný její průběh je v čase odlišný v závislosti na konkrétním poskytovateli služby přístupu k internetu v důsledku typického chování jeho koncových uživatelů, a to vzhledem k typu datového provozu a konkrétní lokalitě.

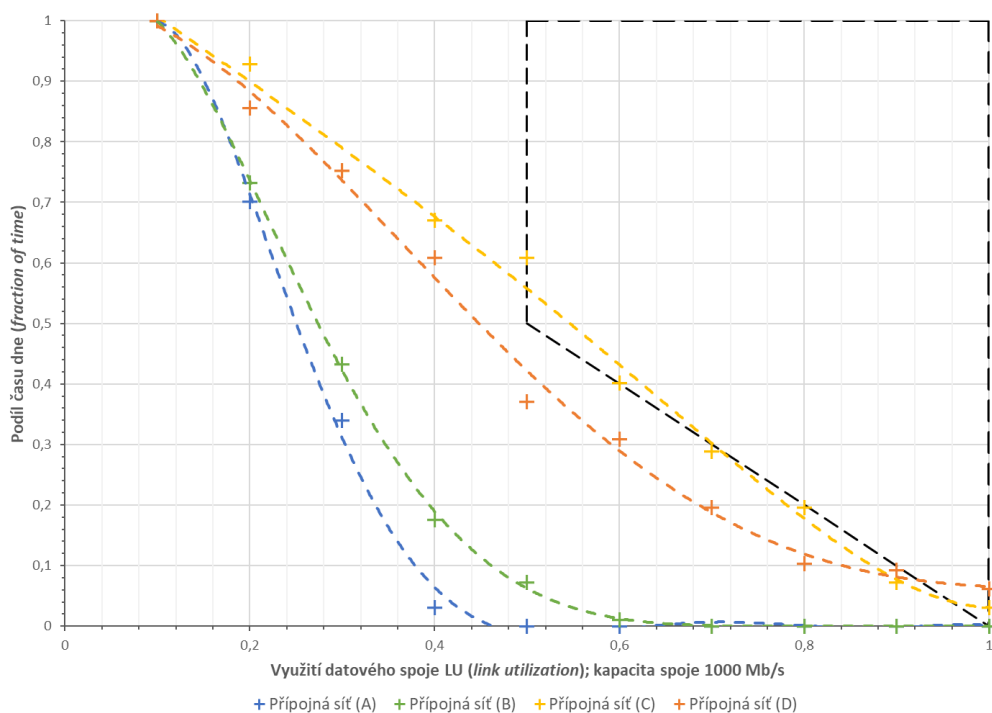
Tab. 1: Výpočet hodnoty faktoru využití UF (*utilization factor*) u vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu; kapacita spoje (přípojné sítě) ve všech případech 1000 Mb/s; nominální hodnota rychlosti NBR v čase provozní špičky odpovídá maximální hodnotě průběhu na obr. 4 (denní průběh)

Poskytovatel služby přístupu k internetu	Maximální bitová rychlost NBR_{max}	Průměrná bitová rychlost NBR_{avg}	Faktor využití UF (<i>utilization factor</i>)	Průměrné využití spoje LU (<i>link utilization</i>)	Podíl času dne při $LU \geq 0,5$
A	365,63 Mb/s	159,15 Mb/s	0,435	0,159	0 %
B	516,25 Mb/s	198,34 Mb/s	0,384	0,198	6 %
C	960,00 Mb/s	450,93 Mb/s	0,470	0,451	56 %
D	984,38 Mb/s	388,85 Mb/s	0,395	0,389	42 %



Obr. 4: Závislost hodnoty parametru využití datového spoje LU (*link utilization*) na čase dne vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu; kapacita spoje (přípojných sítí) ve všech případech 1000 Mb/s; vstupní data pro analýzu vycházela z monitoringu síťového provozu s denním průběhem (obr. 3)

Závislost hodnoty parametru využití datového spoje LU (*link utilization*) na čase dne lze vyjádřit také pomocí tzv. relativní hodnoty kumulativní četnosti, jak je uvedeno na obr. 5. Na ose x jsou znázorněny úrovně využití datového spoje LU, osa y představuje hodnotu podílu času dne, po který byl datový spoj využíván konkrétní úrovní parametru LU.

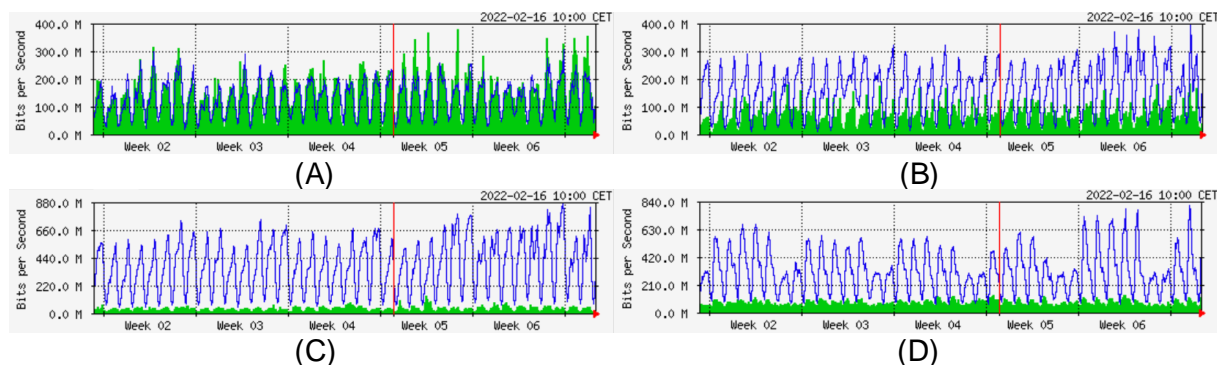


Obr. 5: Závislost relativní hodnoty kumulativní četnosti parametru využití datového spoje LU (*link utilization*) na čase dne u vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu; kapacita spoje (přípojných sítí) ve všech případech 1000 Mb/s; oblast parametru LU znamenající posílení kapacity ohraničena černou barvou

Z průběhů relativních hodnot kumulativní četnosti uvedených na obr. 5 vyplývá, že např. přípojná síť poskytovatele služby přístupu k internetu A dosahuje hodnoty parametru $LU \geq 0,4$ v přibližně 6 % času dne, zatímco přípojná síť poskytovatele služby přístupu k internetu D dosahuje hodnoty parametru $LU \geq 0,4$ v přibližně 68 % času dne. Tento způsob interpretace parametru LU umožňuje získat daleko podrobnější informace o stavu vytížení datového spoje. Přípojná síť poskytovatele služby přístupu k internetu C dosahuje hodnoty parametru $LU \geq 0,5$ v přibližně 56 % času dne. Je zažitým pravidlem, že pokud se dostane průměrná hodnota parametru LU na úroveň 0,4 až 0,5, doporučuje se posílit kapacitu daného datového spoje.

Charakter typického využití sítě elektronických komunikací koncovými uživateli v dané lokalitě a typem provozu lze popsat také pomocí souhrnného faktoru využití UF (*utilization factor*), který se stanovuje jako podíl průměrné hodnoty rychlosti (průměrné bitové rychlosti) za určitý časový rámec a nominální hodnoty bitové rychlosti v čase provozní špičky. Časový rámec se vztahuje k výsledku monitoringu síťového provozu, a to konkrétně k dennímu, týdennímu nebo měsíčnímu průběhu. Úřad doporučuje podle Metodiky pro měření² posuzovat parametr faktoru využití UF na základě měsíčního průběhu. Z průběhů uvedených na obr. 3 a obr. 4 je patrné, že čas provozní špičky je u jednotlivých poskytovatelů služby přístupu k internetu, resp. v částech jejich síťové topologie, odlišný. Proto se doporučuje použít jako nominální hodnotu rychlosti v čase provozní špičky maximální hodnotu bitové rychlosti NBR ve sledovém časovém rámci. Výpočet faktoru využití UF na základě denního průběhu monitoringu síťového provozu (obr. 3) je uveden v tab. 1. Z výsledků uvedených v tab. 1 vyplývá, že rozdílné přístupové sítě vykazují podobné hodnoty faktoru využití UF . Faktor využití UF nezávisí přímo na hodnotě kapacity daného datového spoje (přípojně sítě), resp. na aktuální hodnotě parametru využití LU v daném čase, ale na chování koncových uživatelů v závislosti na lokalitě a charakteru datového provozu.

Na obr. 6 jsou uvedeny výsledky měsíčního monitoringu síťového provozu přípojných sítí (směr downlink označen modrou čarou) vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu (A, B, C a D), přičemž poslední denní záznam průběhu monitoringu uvedeného na obr. 6 koreluje s uvedeným průběhem monitoringu na obr. 3. Výsledky výpočtu hodnot faktoru využití UF (*utilization factor*) na základě měsíčního monitoringu síťového provozu jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 6: Výsledky měsíčního monitoringu síťového provozu přípojných sítí vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu (A, B, C a D), a to za stejný časový úsek, průměrné hodnoty v intervalu 2 hodiny

Výsledky uvedené v tab. 2 ukazují, že procentuální rozdíl při výpočtu hodnoty faktoru využití UF (*utilization factor*) na základě výsledků měsíčního (obr. 6) a denního (obr. 3) monitoringu síťového provozu se pohybuje kolem hodnoty 6 % (průměr). Důvodem je rozdílné vzorkování v případě měsíčního a denního monitoringu síťového provozu (2 hodiny vs. 5 minut). Úřad dle Metodiky pro měření² doporučuje vycházet primárně pro posouzení z výsledků měsíčního monitoringu síťového provozu, přičemž z výsledků uvedených v tab. 2 je patrné, že v případě nedostupnosti měsíčního monitoringu síťového provozu lze vycházet i z denního průběhu.

Tab. 2: Výpočet faktoru využití UF (*utilization factor*) u vybraného vzorku poskytovatelů služby přístupu k internetu; kapacita spoje (přípojné sítě) byla ve všech případech 1000 Mb/s; nominální hodnota rychlosti NBR v čase provozní špičky odpovídá maximální hodnotě průběhu na obr. 6 (měsíční průběhy v porovnání s denním průběhem)

Poskytovatel služby přístupu k internetu	Maximální bitová rychlost NBR_{max}	Průměrná bitová rychlost NBR_{avg}	Faktor využití UF (<i>utilization factor</i>) měsíční průběh	Faktor využití UF (<i>utilization factor</i>) denní průběh	Procentuální rozdíl mezi denním a měsíčním průběhem
A	302,2 Mb/s	127,3 Mb/s	0,421	0,435	3,32 %
B	388,1 Mb/s	156,1 Mb/s	0,402	0,384	4,48 %
C	870,1 Mb/s	366,5 Mb/s	0,421	0,470	11,63 %
D	800,1 Mb/s	300,3 Mb/s	0,375	0,395	5,33 %

Jaký je dopad hodnoty faktoru využití UF (*utilization factor*), lze vysvětlit na příkladu výsledku měsíčního monitoringu síťového provozu části distribuční sítě poskytovatele služby přístupu k internetu, která vykazuje hodnotu průměrné bitové rychlosti $NBR_{avg} = 150$ Mb/s, přičemž uvažovaná část distribuční sítě disponuje kapacitou 1000 Mb/s. Při hodnotě faktoru využití UF = 0,4 bude daná část distribuční sítě v čase provozní špičky dosahovat bitové rychlosti $NBR_{max} = 375$ Mb/s ($LU_{max} = 37,5$ %), zatímco při hodnotě faktoru využití UF = 0,2 bude dosahovat bitové rychlosti $NBR_{max} = 750$ Mb/s ($LU_{max} = 75$ %), což je dvojnásobné využití uvažované části distribuční sítě, resp. demarkačního bodu DeP. Je tedy zřejmé, že hodnota faktoru využití UF má nepřímý dopad na hodnotu průměrného počtu koncových bodů sítě NTP, které budou schopny zajistit předpokládanou limitní hodnotu přenosové rychlosti, resp. hodnoty BDR. Při stanovení průměrného počtu NTP se vychází ze samotné hodnoty kapacity sítě, viz uvedený vztah (21). Pro posouzení dopadu faktoru využití UF na výslednou hodnotu průměrného počtu NTP, u kterých bude s pravděpodobností $P(k \leq N)$ zajištěno, že pokud budou generovat datový tok současně v systému s hromadnou obsluhou, neklesne SDR pod zvolenou hodnotu, se stanoví na základě uvedeného vztahu (21). Ze znalosti hodnoty faktoru využití UF lze vyjádřit nominální hodnotu rychlosti ve špičce, tedy maximální hodnotu bitové rychlosti NBR_{max} jako:

$$UF = \frac{NBR_{avg}}{NBR_{max}} \Rightarrow NBR_{max} = \frac{NBR_{avg}}{UF} \text{ [Mb/s; Mb/s, -]}. \quad (28)$$

Při maximální hodnotě bitové rychlosti NBR_{max} lze vyjádřit kapacitu datového spoje na základě znalosti hodnoty parametru využití LU_{max} (*link utilization*), pokud budeme tento parametr posuzovat právě v čase provozní špičky (maximální hodnoty ve sledovaném časovém rámci):

$$LU_{max} = \frac{NBR_{max}}{CAP} \Rightarrow CAP = \frac{NBR_{max}}{LU_{max}} = \frac{NBR_{avg}}{UF \cdot LU_{max}} = \frac{NBR_{avg}}{UF \cdot LU_{max}} \text{ [Mb/s; Mb/s, -, -]}. \quad (29)$$

Z výsledného vztahu (29) je evidentní, že faktor využití UF má dopad na výslednou kapacitu datového spoje, nicméně jak bude dále upřesněno, samotná znalost hodnoty faktoru využití UF je pro posouzení dopadu na výslednou hodnotu průměrného počtu NTP nedostatečná. Je nutné dle vztahu (29) znát i průměrnou hodnotu bitové rychlosti NBR_{avg} . V teoretickém případě při maximálním možném využití datového spoje LU, kdy maximální bitová rychlosti NBR_{max} se rovná kapacitě spoje CAP (v případě přípojné sítě A by se $NBR_{max} = 1000$ Mb/s), se bude parametr využití datového spoje LU rovnat hodnotě 1. Tento teoretický případ přesně odpovídá předpokladu uvedeném ve vztahu (21) pro výpočet průměrného počtu NTP, tedy situaci, kdy je kapacita daného spoje využita maximálním možným způsobem:

$$UF = \frac{NBR_{avg}}{NBR_{max}} = \frac{NBR_{avg}}{CAP} \Rightarrow NBR_{avg} = UF \cdot CAP, \quad (30)$$

a zároveň:

$$LU = \frac{NBR}{CAP} \Rightarrow LU_{\max}(NBR = CAP) = \frac{CAP}{CAP} = 1. \quad (31)$$

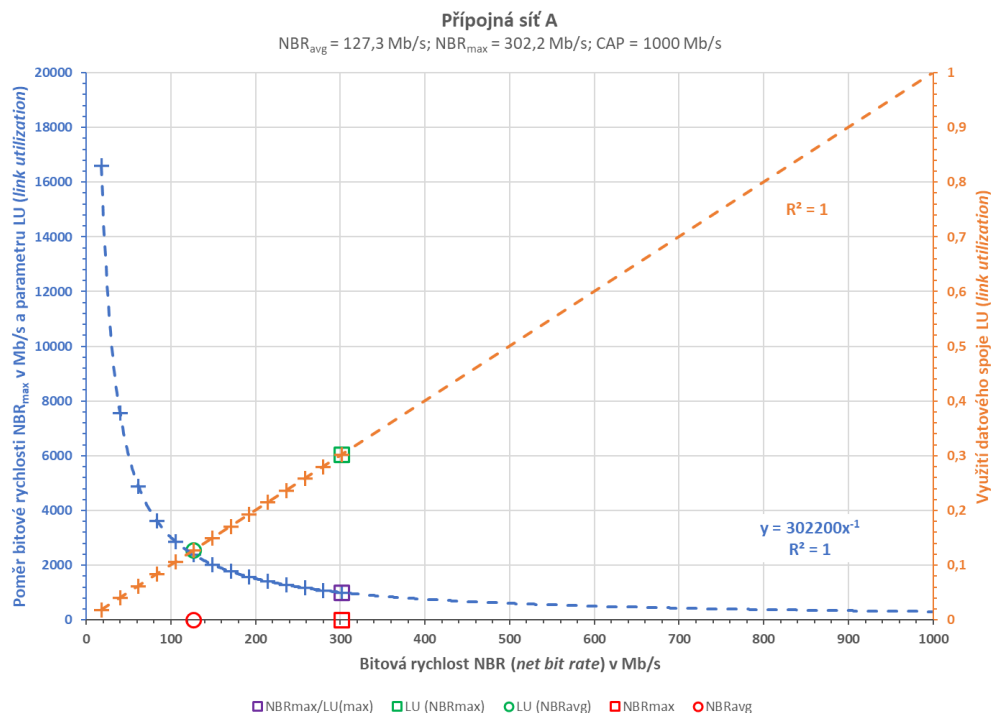
Dopad této kombinace odvozených parametrů dle vztahu (30) a vztahu (31) lze vyjádřit pomocí upravené kapacity CAP' (*adjusted capacity*) jako teoretické změny původní kapacity:

$$CAP'_{\text{pro } LU_{\max}=1} = \frac{NBR_{\text{avg}}}{UF \cdot LU_{\max}} = \frac{UF \cdot CAP}{UF \cdot \frac{CAP}{NBR_{\max}}} = \frac{UF \cdot CAP}{UF \cdot \frac{CAP}{NBR_{\max}}} = \frac{UF \cdot CAP}{UF} = CAP. \quad (32)$$

Výchozí obecný vztah (21) pro stanovení hodnoty průměrného počtu NTP, u kterých bude s pravděpodobností $P(k \leq N)$ zajištěno, že pokud budou generovat datový tok současně v systému s hromadnou obsluhou, neklesne SDR pod zvolenou hodnotu, předpokládá situaci, kdy je daný datový spoj využit hodnotou bitové rychlosti NBR odpovídající dané kapacitě spoje, tedy $NBR_{\max} = CAP$, a hodnota faktoru využití UF je tak prakticky závislá pouze na hodnotě průměrné bitové rychlosti NBR_{avg} a nebude mít žádný vliv na výsledek výchozího vztahu (21). Odlišná situace nastává v případě, kdy je daný datový spoj využíván hodnotou bitové rychlosti NBR nižší než daná kapacita spoje, tedy $NBR < CAP$. V tomto případě lze provést zohlednění hodnoty faktoru využití UF daného datového spoje, resp. přípojně nebo distribuční sítě (obecně segmentu sítě). Pokud dopad faktoru využití UF zohledníme v obecné rovině v podobě faktoru úpravy (korekce) κ (*adjustment factor*), můžeme zapsat vztah mezi původní hodnotou kapacity spoje CAP a výslednou hodnotou upravené kapacity CAP' do podoby vztahu:

$$CAP' = \kappa \cdot CAP, \quad (33)$$

přičemž je patrné, že v případě výchozího obecného vztahu (21) je hodnota faktoru úpravy $\kappa = 1$. Posouzení dopadu faktoru využití UF na hodnotu faktoru úpravy κ je provedeno na příkladu přípojně sítě A (tab. 2) poskytovatele služby přístupu k internetu, a to posouzením dopadu změny bitové rychlosti NBR v rozsahu od hodnoty limitně se blížíící 0 až po hodnotu maximální bitové rychlosti NBR_{\max} . Výsledek je uveden na obr. 7 jako závislost hodnoty poměru maximální bitové rychlosti a využití datového spoje NBR_{\max}/LU na hodnotě bitové rychlosti NBR.



Obr. 7: Závislost hodnoty poměru bitové rychlosti NBR_{\max} (Mb/s) a využití datového spoje LU (*link utilization*) na hodnotě bitové rychlosti NBR v příkladu přípojně sítě A; kapacita spoje odpovídá $CAP = 1000 \text{ Mb/s}$; v grafu jsou uvedeny hodnoty přípojně sítě A dle měsíčního monitoringu síťového provozu (tab. 2)

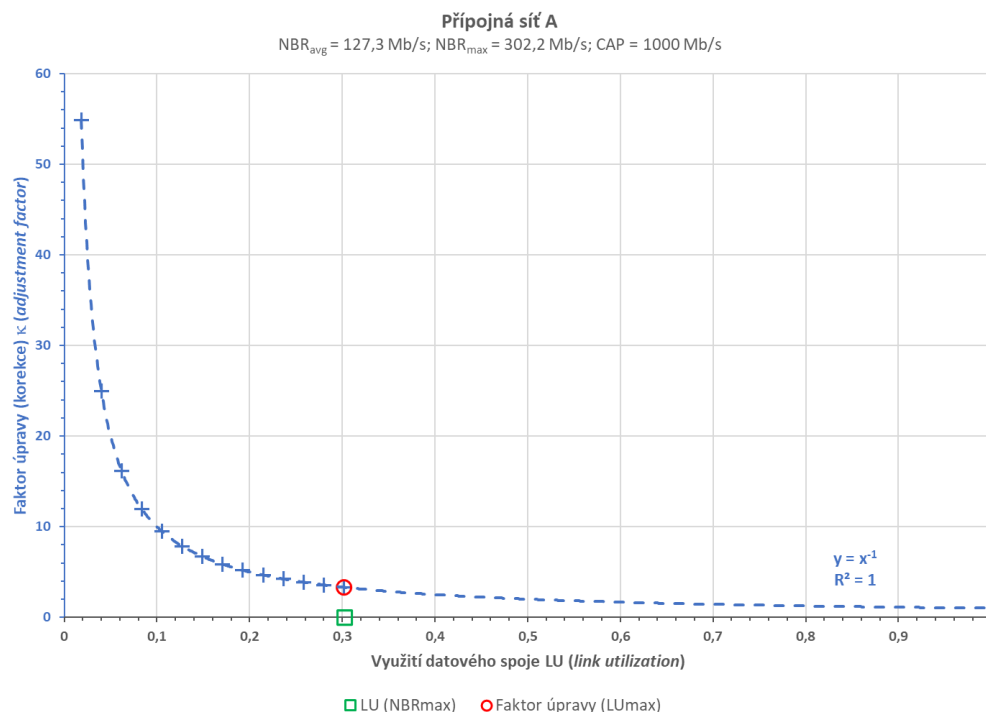
Při stanovení faktoru úpravy κ je nutné vycházet z poměru hodnoty maximální bitové rychlosti NBR_{max} stanovené na základě monitoringu síťového provozu a hodnoty parametru využití datového spoje LU. V konkrétním příkladu přípojné sítě A dosahovala v provozní špičce maximální bitová rychlost hodnoty $NBR_{max} = 302,2 \text{ Mb/s}$, což představuje hodnotu parametru $LU_{max} \doteq 0,302$. Hodnota využití datového spoje LU je obecně lineárně závislá na aktuální hodnotě bitové rychlosti NBR. Jak je uvedeno na obr. 7, závislost hodnoty poměru NBR_{max}/LU na bitové rychlosti NBR je mocninného charakteru a je významným způsobem ovlivněna hodnotou maximální bitové rychlosti NBR_{max} , která zároveň shora ohraničuje posuzovanou množinu hodnot bitových rychlostí NBR. Hodnota maximální bitové rychlosti NBR_{max} stanovená z monitoringu síťového provozu také vyjadřuje stávající využití kapacity datového spoje během provozní špičky (v posuzovaném časovém rámci).

Faktor úpravy κ určuje dle vztahu (33) míru teoretického navýšení původní hodnoty kapacity CAP do upravené (korigované) hodnoty kapacity CAP' (*adjusted capacity*), protože výchozí vztah (21) vždy předpokládá maximální kapacitní využití posuzovaného datového spoje. Při stanovení faktoru úpravy κ se musí zohlednit stávající využití kapacity datového spoje dle výsledků monitoringu síťového provozu, které je v čase provozní špičky ohraničeno hodnotou maximální bitové rychlosti NBR_{max} :

$$\kappa = \frac{\frac{NBR_{max}}{LU}}{NBR_{max}} = \frac{NBR_{max}}{LU \cdot NBR_{max}} = \frac{1}{LU}. \quad (34)$$

Hodnota faktoru úpravy κ je převrácenou hodnotou využití datového spoje LU. Obecně tedy platí, že s rostoucí hodnotou bitové rychlosti NBR roste lineárně i hodnota parametru LU, zatímco hodnota faktoru úpravy κ klesá, viz obr. 8. Vztah (33) lze upravit do podoby:

$$CAP' = \frac{CAP}{LU}. \quad (35)$$



Obr. 8: Závislost hodnoty faktoru úpravy (korekce) κ na hodnotě využití datového spoje LU (*link utilization*) v případě příkladu přípojné sítě A; kapacita spoje odpovídá 1000 Mb/s

V situaci, kdy se bitová rychlosti NBR rovná kapacitě datového spoje CAP, je hodnota $LU = 1$ a tedy i hodnota $\kappa = 1$. K teoretickému navýšení kapacity tedy nedochází, využití datového spoje je na svém maximu a nastává tedy situace uvedená ve vztahu (32). Pokud do vztahu (34) dosadíme hodnoty z příkladu přípojné sítě A, která dosahovala v čase provozní špičky

hodnoty maximální bitové rychlosti $NBR_{max} = 302,2 \text{ Mb/s}$, což představuje hodnotu parametru $LU_{max} \doteq 0,302$ (viz obr. 8), můžeme stanovit faktor úpravy κ jako:

$$\kappa = \frac{\frac{NBR_{max}}{LU_{max}}}{NBR_{max}} = \frac{1}{LU_{max}} = \frac{1}{0,302} \doteq 3,307. \quad (36)$$

Pro zohlednění hodnoty faktoru využití UF při výpočtu hodnoty upravené kapacity CAP' lze vztah (34) dále upravit, přičemž vzhledem ke způsobu určení hodnoty faktoru využití UF na základě monitoringu síťového provozu (maximální bitová rychlost NBR_{max} a průměrná bitová rychlost NBR_{avg} za sledovaný časový rámec), odpovídá hodnota využití datového spoje LU ve vztahu (34) konkrétní hodnotě maximální bitové rychlosti NBR_{max} , platí tedy, že:

$$\kappa = \frac{1}{LU_{max}} = \frac{1}{\frac{NBR_{max}}{CAP}} = \frac{CAP}{NBR_{max}} \cdot \frac{NBR_{avg}}{NBR_{avg}} = \frac{CAP \cdot UF}{NBR_{avg}}. \quad (37)$$

Výslednou hodnotu upravené kapacity CAP' můžeme stanovit na základě dosazení vyjádření faktoru úpravy κ dle vztahu (37) do vztahu (33):

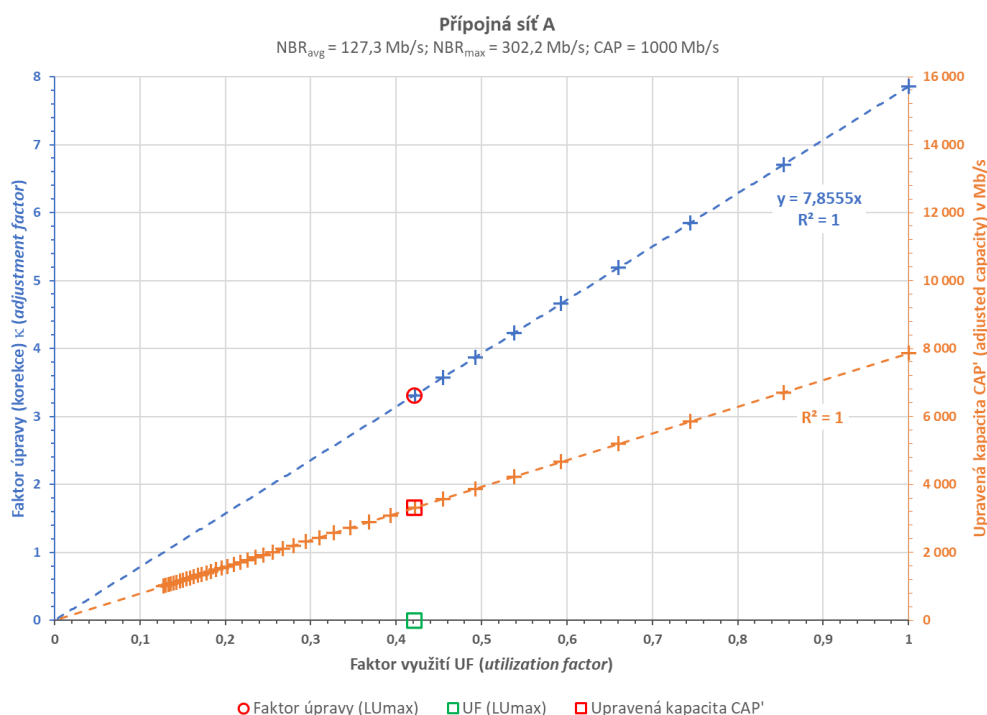
$$CAP' = \kappa \cdot CAP = \frac{CAP \cdot UF}{NBR_{avg}} \cdot CAP = \frac{CAP^2 \cdot UF}{NBR_{avg}}. \quad (38)$$

Výsledek vztahu (37) a vztahu (38) zohledňující změnu hodnoty faktoru využití UF je uveden na obr. 9. Pro hodnotu faktoru využití UF příkladu přípojné sítě A (tab. 2) odpovídá CAP' :

$$CAP' = \frac{CAP^2 \cdot UF}{NBR_{avg}} = \frac{1000^2 \cdot 0,421}{127,3} \doteq 3307 \text{ Mb/s}. \quad (39)$$

Výslednou hodnotu průměrného počtu koncových bodů sítě NTP dle Poissonova procesu, odvozených na základě vztahu (21), lze po dosazení vztahu (38) zapsat v obecném tvaru:

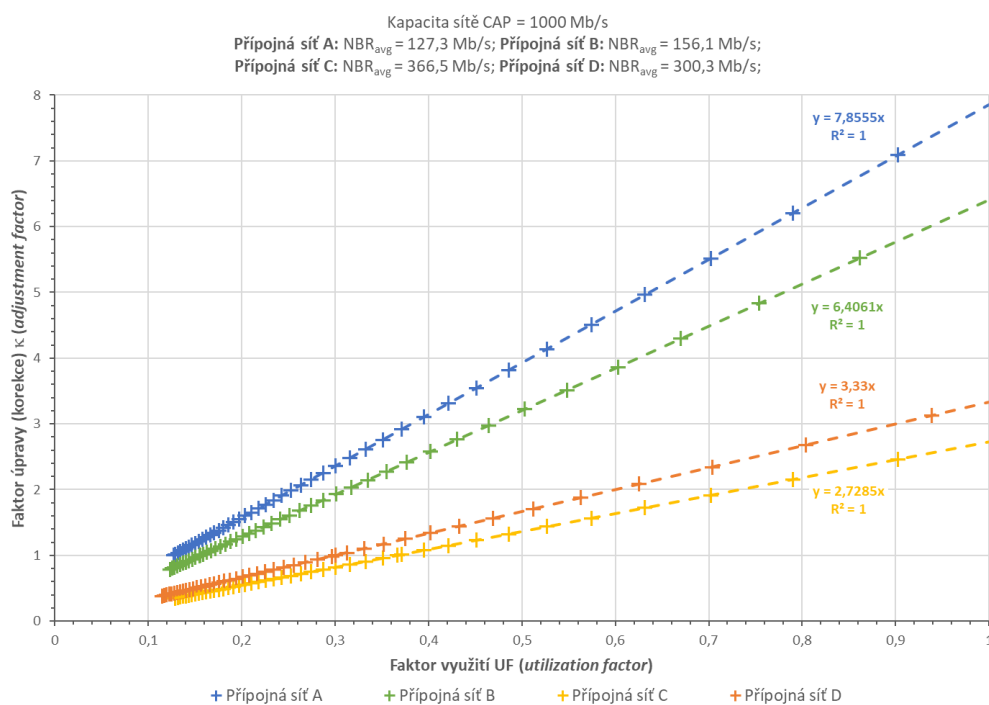
$$NTP = \left[\frac{CAP' \cdot \lambda}{SDR} \right] = \left[\frac{\kappa \cdot CAP \cdot \lambda}{SDR} \right] = \left[\frac{\frac{CAP^2 \cdot UF}{NBR_{avg}} \cdot \lambda}{SDR} \right] = \left[\frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{SDR \cdot NBR_{avg}} \right] [-; -, (\text{Mb/s})^2, -, \text{Mb/s}, \text{Mb/s}]. \quad (40)$$



Obr. 9: Závislost upravené kapacity CAP' (*adjusted capacity*) a faktoru úpravy (korekce) κ (*adjustment factor*) na hodnotě faktoru využití UF (*utilization factor*) v případě příkladu přípojné sítě A

Je zřejmé, že vztah (40) pro výpočet průměrného počtu NTP dle Poissonova procesu je závislý nejen na znalosti hodnoty faktoru využití UF, ale také na znalosti hodnoty průměrné bitové

rychlosti NBR_{avg} (viz matematické vyjádření regresní rovnice pro faktor úpravy κ na obr. 9). Ze vztahu (40) dále vyplývá, stejně jako v případě výchozího obecného vztahu (21), že je nutné hodnotu kapacity CAP a hodnotu průměrné bitové rychlosti NBR_{avg} přepočítat z fyzické vrstvy dle referenčního modelu ISO/OSI na vrstvu transportní. Na obr. 10 jsou pro porovnání uvedeny závislosti faktoru úpravy (korekce) κ na faktoru využití UF uvedených příkladů přípojných sítí dle tab. 2 (A, B, C a D).



Obr. 10: Závislost hodnoty faktoru úpravy (korekce) κ (*adjustment factor*) na hodnotě faktoru využití UF (*utilization factor*) v případě uvedených příkladů přípojných sítí (A, B, C a D) dle tab. 2, rozhodujícími parametry jsou hodnoty rychlosti NBR_{avg} a kapacita spoje CAP = 1000 Mb/s

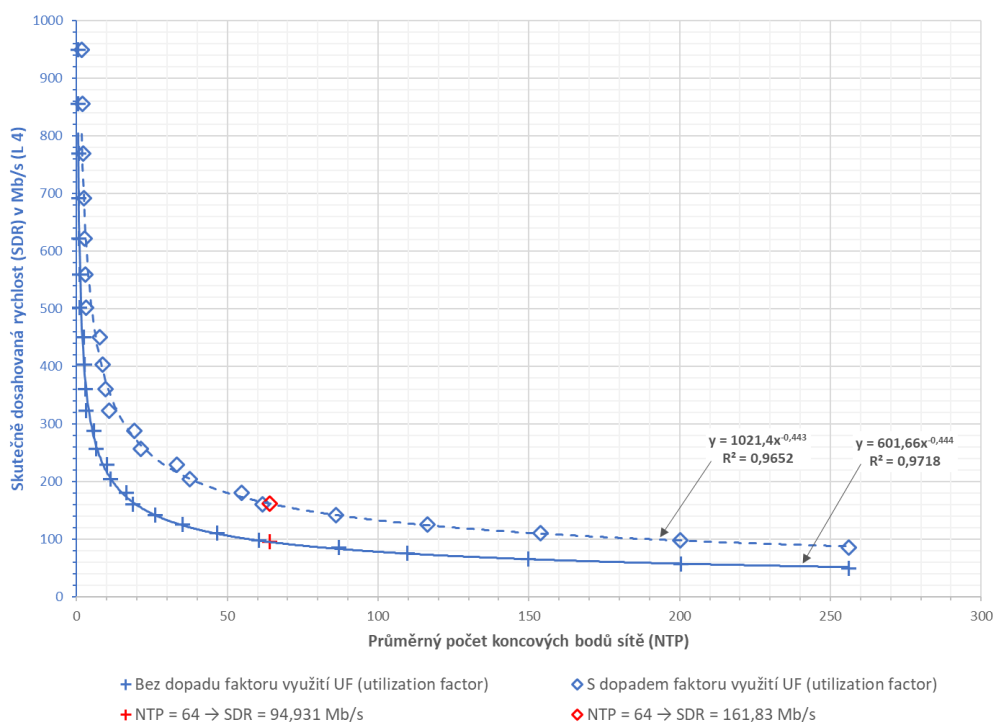
Pokud se vrátíme k příkladu výpočtu průměrného počtu NTP v případě přístupové technologie GPON, viz vztah (22), přičemž budeme předpokládat měsíční parametry distribuční sítě jako v případě přípojně sítě A, viz tab. 2, resp. $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s a $UF = 0,421$, při zachování stejné kapacity CAP = 1000 Mb/s se pro SDR = 60 Mb/s změní průměrný počet NTP ze 176 na 582, viz výpočet (41). Je nutné neopomenout opět hodnotu průměrné bitové rychlosti NBR_{avg} přepočítat z fyzické vrstvy modelu ISO/OSI na vrstvu transportní.

$$NTP_{A_GPON} = \left\lfloor \frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{SDR \cdot NBR_{avg}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0,421 \cdot 949,285^2 \cdot 11,140}{60 \cdot 120,844} \right\rfloor = 582 [-; -, (Mb/s)^2, -, Mb/s, Mb/s]. \quad (41)$$

V případě měsíčních parametrů distribuční sítě u příkladu technologie GPON, jaké vykazovala přípojná síť D, viz tab. 2, resp. $NBR_{avg} = 300,3$ Mb/s a $UF = 0,375$ při zachování stejné kapacity CAP = 1000 Mb/s, se změní průměrný počet NTP z hodnoty 176 na 220, respektive:

$$NTP_{D_GPON} = \left\lfloor \frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{SDR \cdot NBR_{avg}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0,375 \cdot 949,285^2 \cdot 11,140}{60 \cdot 285,070} \right\rfloor = 220 [-; -, (Mb/s)^2, -, Mb/s, Mb/s]. \quad (42)$$

Převodní charakteristika uvedeného příkladu technologie GPON při kapacitě distribuční sítě odpovídající hodnotě 1000 Mb/s (L 1), parametrech faktoru využití $UF = 0,421$ a průměrné bitové rychlosti $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s převzatých z příkladu přípojně sítě A, viz tab. 2, je uvedena na obr. 11. Na tomto zobrazení převodní charakteristiky je možné si povšimnout, že pro případ počtu NTP = 64, tedy typickému základnímu dělicímu poměru 1: 64 pasivní optické distribuční sítě, se vlivem faktoru využití UF změnila SDR z hodnoty 94,931 Mb/s na hodnotu 161,83 Mb/s (hodnoty odvozeny z průběhu regresní charakteristiky; červené body).



Obr. 11: Závislost hodnoty SDR na průměrném počtu NTP, příklad technologie GPON s kapacitou přípojné sítě 1000 Mb/s (L 1); jsou zohledněny parametry $UF = 0,421$ a $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s převzaté z přípojné sítě A, viz tab. 2

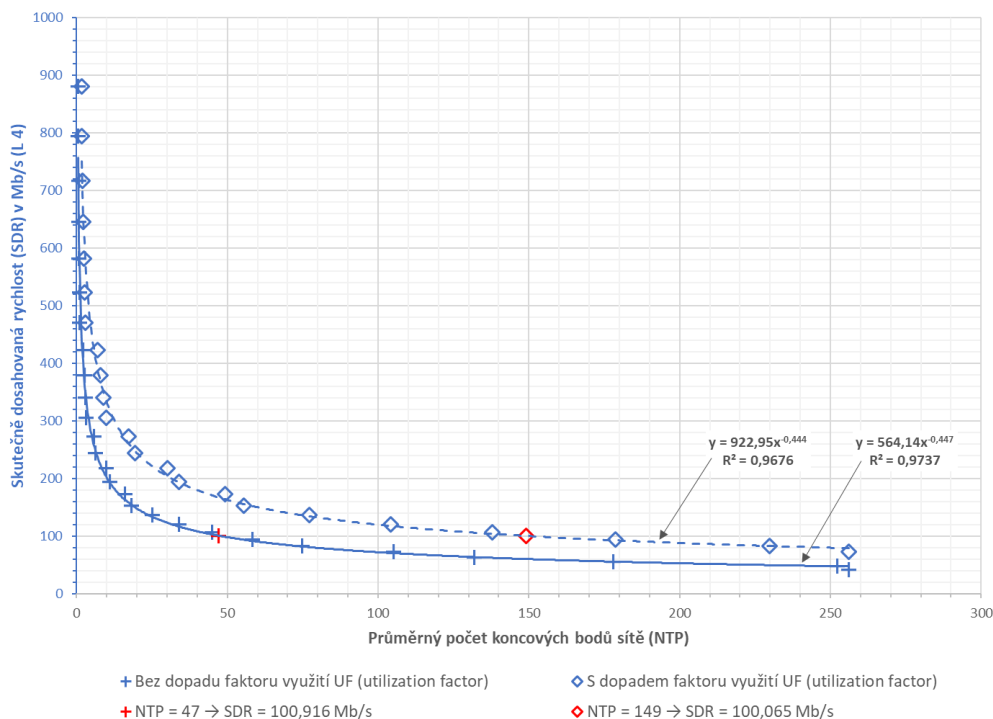
Ve druhém případě technologie 5G sítě provozované v pásmu 3,5 GHz se systémovou šířkou pásma $B = 100$ MHz, kdy kapacita přípojné sítě odpovídá kapacitě stanovené na základě problematiky dimenzování kapacity buňky ve směru downlink, a to s ohledem na fyzikální principy chování technologie 5G, tedy hodnotě 892,5 Mb/s (L 3), viz vztah (23), se změní výpočet průměrného počtu NTP na základě vztahu (43), přičemž budeme předpokládat stejné parametry jako v případě příkladu přípojné sítě A, viz tab. 2, resp. $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s a $UF = 0,421$. Výsledná změna ve výpočtu bude znamenat nárůst průměrného počtu NTP ze 151 na 463, viz výpočet (43). Opět je nutné neopomenout hodnotu průměrné bitové rychlosti NBR_{avg} přepočítat z fyzické vrstvy modelu ISO/OSI na vrstvu transportní.

$$NTP_{A_{5G}} = \left\lfloor \frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{SDR \cdot NBR_{avg}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0,421 \cdot 880,439^2 \cdot 10,305}{60 \cdot 120,844} \right\rfloor = 463 [-; -, (Mb/s)^2, -, Mb/s, Mb/s]. \quad (43)$$

V případě stejných parametrů distribuční sítě u příkladu technologie 5G sítě, jaké vykazovala přípojná síť D, viz tab. 2, resp. $NBR_{avg} = 300,3$ Mb/s a $UF = 0,375$ při zachování stejné kapacity $CAP = 1000$ Mb/s, změní se průměrný počet NTP z hodnoty 151 na 175, respektive:

$$NTP_{D_{5G}} = \left\lfloor \frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{SDR \cdot NBR_{avg}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0,375 \cdot 880,439^2 \cdot 10,305}{60 \cdot 285,070} \right\rfloor = 175 [-; -, (Mb/s)^2, -, Mb/s, Mb/s]. \quad (44)$$

Převodní charakteristika příkladu technologie 5G sítě provozované v pásmu 3,5 GHz se systémovou šířkou pásma $B = 100$ MHz, při kapacitě odpovídající kapacitě stanovené na základě problematiky dimenzování kapacity buňky ve směru downlink a parametrech využití služby $UF = 0,421$ a průměrné bitové rychlosti $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s převzatých z příkladu přípojné sítě A, viz tab. 2, je uvedena na obr. 12. Pokud by tato FWA technologie v uvedené konfiguraci měla zajistit hodnotu $BDR = 100$ Mb/s (L 4) pro svá koncová zařízení, byla by tohoto požadavku schopna s pravděpodobností 90 % až pro průměrnou hodnotu počtu $NTP = 149$, proti původní hodnotě $NTP = 47$ (dle regresní charakteristiky).



Obr. 12: Závislost hodnoty SDR na průměrném počtu NTP, příklad technologie FWA (5G v pásmu 3,5 GHz) s dostupnou kapacitou přípojné sítě $\geq 892,5$ Mb/s (L 3); jsou zohledněny parametry $UF = 0,421$ a $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s převzaté z přípojné sítě A, viz tab. 2

3. Výkon služby přístupu k internetu (SDR)

Při posouzení dopadu kapacity sítě na výsledný výkon služeb přístupu k internetu reprezentovaný hodnotou SDR v místě NTP je nutné stejně jako při posuzování dopadu na průměrný počet NTP vycházet ze samotné znalosti kapacity sítě. Postup je v tomto případě stejný jako v podkapitole *Počet koncových bodů sítě (NTP)*, proto bude počáteční proces zahrnující identifikaci hodnoty kapacity sítě a její přepočtení na transportní vrstvu při použití protokolu TCP přeskočen. Při znalosti kapacity sítě je nutné dále specifikovat počet NTP. Příkladem může být opět přístupová síť odpovídající technologii ITU-T G.984, resp. GPON, s počtem koncových jednotek ONT odpovídající počtu $NTP = 64$, tedy základnímu dělicímu poměru 1: 64 (agregaci) pasivní optické distribuční sítě, přičemž v návaznosti na již uvedený přepočtení mezi jednotlivými vrstvami modelu ISO/OSI se předpokládá, že centrální jednotka OLT technologie GPON je připojena k přípojné síti prostřednictvím optického modulu SFP standardu IEEE 802.3z (1000BASE-SX) s kapacitou odpovídající bitové rychlosti $NBR = 1000$ Mb/s (L 1), tedy rychlostí $TCP TR = 949,285$ Mb/s (L 4).

Dále je nutné stanovit procentuální hodnotu pravděpodobnosti $P(k \leq N)$, při které přijde k systému s hromadnou obsluhou (GPON) určitý počet datových toků generovaný současně specifikovaným počtem ONT (NTP). Obecně se doporučuje, aby hodnota pravděpodobnosti nebyla nižší než 90 %. Pro potřeby tohoto případu je zvolena limitní hodnota pravděpodobnosti $P(k \leq N) = 90$ %. S ohledem na vztah (17), který popisuje výpočet vstupního parametru N Poissonova procesu, je patrné, že bez znalosti hodnoty SDR není možné vstupní parametr na základě vztahu (17) stanovit a je nutné ho matematicky odvodit. K matematickému odvození neznámé hodnoty SDR lze použít vztah (21):

$$NTP = \left\lceil \frac{CAP \cdot \lambda}{SDR} \right\rceil \Rightarrow SDR = \frac{CAP \cdot \lambda}{NTP} \text{ [Mb/s; Mb/s, -, -]}. \quad (45)$$

Pokud takto získané matematické odvození hodnoty SDR zpětně dosadíme do vztahu (17), je možné hodnotu vstupního parametru N zapsat ve tvaru:

$$SDR_{\min} = SDR \Rightarrow N = \left\lfloor \frac{CAP}{SDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{CAP}{\frac{CAP \cdot \lambda}{NTP}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{CAP \cdot NTP}{CAP \cdot \lambda} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{NTP}{\lambda} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{64}{\lambda} \right\rfloor [-; -], \quad (46)$$

přičemž lze říct, že vstupní parametr N se rovná podílu počtu NTP a střední intenzity vstupu λ Poissonova rozdělení pravděpodobnosti, která vyjadřuje průměrný počet datových toků, které vstoupily do systému hromadné obsluhy za jednotku času t . Parametr střední intenzity vstupu λ lze určit pro čas $t = 1$ pomocí uvedeného vztahu (14):

$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90 \% \Rightarrow P\left(k \leq \left\lfloor \frac{64}{\lambda} \right\rfloor\right) = \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{64}{\lambda} \right\rfloor} \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda \doteq 6,485 [-]. \quad (47)$$

Takto získanou hodnotu střední intenzity vstupu λ lze následně zpětně dosadit do vztahu (45) a stanovit tak hodnotu SDR. V použitém příkladu technologie GPON s počtem NTP = 64 lze na základě teorie systému s hromadnou obsluhou dle Poissonova rozdělení s pravděpodobností $P(k \leq N) = 90 \%$ konstatovat, že SDR bude dosahovat průměrné hodnoty 96,189 Mb/s:

$$SDR = \frac{CAP \cdot \lambda}{NTP} = \frac{949,285 \cdot 6,485}{64} \doteq 96,189 [\text{Mb/s}; \text{Mb/s}, -, -]. \quad (48)$$

V případě, kdy je nutné zohlednit vliv faktoru využití UF stávajícího datového spoje, přípojné nebo distribuční sítě (obecně místa, kde vzniká úzké hrdlo, tzv. *bottleneck*), přičemž jeho hodnoty charakterizující chování koncových uživatelů v dané lokalitě a typu datového provozu, je nutné provést adekvátní úpravu výchozího vztahu (45), a to podle vztahu (40). Pro uvedený příklad technologie GPON s počtem koncových bodů sítě NTP = 64 budou parametry chování koncových uživatelů převzaty z konkrétního příkladu přístupové sítě A, kde hodnota průměrné bitové rychlosti $NBR_{\text{avg}} = 127,3 \text{ Mb/s}$ a hodnota faktoru využití UF = 0,421 vychází z tab. 2. Výchozí vztah (45) lze tedy upravit do podoby:

$$NTP = \left\lfloor \frac{CAP' \cdot \lambda}{SDR} \right\rfloor \Rightarrow SDR = \frac{CAP' \cdot \lambda}{NTP} = \frac{\kappa \cdot CAP \cdot \lambda}{NTP} = \frac{\frac{CAP}{NBR_{\text{avg}}} \cdot UF \cdot CAP \cdot \lambda}{NTP} =$$

$$= \frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{NTP \cdot NBR_{\text{avg}}} [\text{Mb/s}; -, (\text{Mb/s})^2, -, -, \text{Mb/s}]. \quad (49)$$

Následně po dosazení vztahu (49) do vztahu (17) lze pro konkrétní uvedený případ GPON technologie vyjádřit hodnotu vstupního parametru N jako:

$$SDR_{\min} = SDR \Rightarrow N = \left\lfloor \frac{CAP}{SDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{CAP}{\frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{NTP \cdot NBR_{\text{avg}}}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{NTP \cdot NBR_{\text{avg}}}{UF \cdot CAP \cdot \lambda} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{NBR_{\text{avg}} \cdot NTP}{UF \cdot CAP \cdot \lambda} \right\rfloor =$$

$$= \left\lfloor \frac{127,3}{0,421 \cdot 1000} \cdot \frac{64}{\lambda} \right\rfloor = \left\lfloor 0,302 \cdot \frac{64}{\lambda} \right\rfloor [-; -, \text{Mb/s}, -, \text{Mb/s}, -]. \quad (50)$$

přičemž lze říct, že vstupní parametr N se rovná stejně jako v případě vztahu (46) podílu počtu NTP a střední intenzity vstupu λ rozšířeného o konstantu, jejíž hodnota prakticky odpovídá podílu maximální hodnoty bitové rychlosti NBR_{max} a dané kapacity datového spoje CAP, tedy hodnotě maximálního využití datového spoje LU_{max} , viz vztah (29). Správnost matematického zjednodušení hodnoty výsledné konstanty ze vztahu (50) do podoby hodnoty maximálního využití datového spoje LU_{max} lze odvodit následujícím způsobem:

$$\frac{NBR_{\text{avg}}}{UF \cdot CAP} = \frac{NBR_{\text{avg}}}{\frac{NBR_{\text{avg}} \cdot CAP}{NBR_{\text{max}}}} = \frac{NBR_{\text{avg}} \cdot NBR_{\text{max}}}{NBR_{\text{avg}} \cdot CAP} = \frac{NBR_{\text{max}}}{CAP} = LU_{\text{max}} [-; \text{Mb/s}, \text{Mb/s}], \quad (51)$$

přičemž pro uvedený příklad jako ověření platnosti vztahu (51) lze tedy vypočítat:

$$LU_{\text{max}} = \frac{NBR_{\text{max}}}{CAP} = \frac{302,2}{1000} \doteq 0,302 [-; \text{Mb/s}, \text{Mb/s}]. \quad (52)$$

Jak je zřejmé, hodnota výsledku zjednodušeného vztahu (52) je stejná, jako hodnota konstanty uvedená na základě výpočtu dle výchozího vztahu (50), tedy 0,302. Parametr střední intenzity vstupu λ lze následně určit pro čas $t = 1$ pomocí vztahu (14):

$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90 \% \Rightarrow P\left(k \leq \left\lfloor LU_{\max} \cdot \frac{NTP}{\lambda} \right\rfloor\right) = \sum_{k=0}^{\left\lfloor LU_{\max} \cdot \frac{NTP}{\lambda} \right\rfloor} \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 =$$

$$\sum_{k=0}^{\left\lfloor 0,302 \cdot \frac{64}{\lambda} \right\rfloor} \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 \Rightarrow \lambda \doteq 3,350 [-; -, -, -]. \quad (53)$$

Takto získanou hodnotu střední intenzity vstupu λ lze následně zpětně dosadit do vztahu (50) a stanovit tak průměrnou hodnotu SDR. V použitém příkladu technologie GPON s počtem $NTP = 64$ a parametry chování koncových uživatelů převzatých z konkrétního příkladu přípojné sítě A, viz tab. 2, tedy hodnotu průměrné bitové rychlosti $NBR_{\text{avg}} = 127,3$ Mb/s a hodnotu faktoru využití $UF = 0,421$, lze na základě teorie systému s hromadnou obsluhou dle Poissonova rozdělení s pravděpodobností $P(k \leq N) = 90 \%$ konstatovat, že SDR bude dosahovat průměrné hodnoty:

$$SDR = \frac{UF \cdot CAP^2 \cdot \lambda}{NTP \cdot NBR_{\text{avg}}} = \frac{0,421 \cdot 949,285^2 \cdot 3,350}{64 \cdot 120,844} \doteq 164,329 \text{ [Mb/s; Mb/s, -, -]}. \quad (54)$$

Z globálního hlediska lze výkon služby přístupu k internetu, který je reprezentovaný průměrnou hodnotou SDR, posuzovat také z hlediska výsledného dopadu kombinace hodnoty kapacity a odpovídajícího agregačního poměru, a to ve formě rozptylu výkonu služby. Pro vysvětlení bude opět použito výše uvedeného příkladu technologie GPON. Pokud označíme nejnižší možnou průměrnou hodnotu SDR_{min} , která bude v místech NTP dosahována v čase, kdy všichni koncoví uživatelé služby přístupu k internetu budou službu využívat maximálním možným způsobem, jako konkrétní hodnotu běžně dostupnou rychlost $BDR = 100$ Mb/s, lze ze vztahu (17) stanovit:

$$BDR = SDR_{\text{min}} = 100 \text{ Mb/s} \Rightarrow N = \left\lfloor \frac{CAP}{BDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{949,285}{100} \right\rfloor = 9 \text{ [; Mb/s, Mb/s]}. \quad (55)$$

Pokud hodnotu počtu N dosadíme do vztahu (14) s pravděpodobností $P(k \leq N) = 90 \%$, získáme tak hodnotu střední intenzity vstupu λ odpovídající průměrnému počtu NTP generujících datový tok v čase $t = 1$, které budou tak jinými slovy s pravděpodobností 90 % využívat službu přístupu k internetu:

$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90 \% \Rightarrow P(k \leq 9) = \sum_{k=0}^9 \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 \rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda \doteq 6,215 [-]. \quad (56)$$

Při znalosti hodnoty střední intenzity vstupu λ lze podle uvedeného vztahu (19) stanovit výkon služby přístupu k internetu SDR_{max} jako:

$$SDR_{\text{max}} = \frac{CAP}{\lambda} = \frac{949,285}{6,215} \doteq 152,741 \text{ [Mb/s; Mb/s, -]}. \quad (57)$$

Rozptyl výkonu služby přístupu k internetu, tedy průměrné hodnoty SDR dosahované v místě NTP, se stanoví jako rozdíl maximální hodnoty SDR_{max} a minimální hodnoty SDR_{min} :

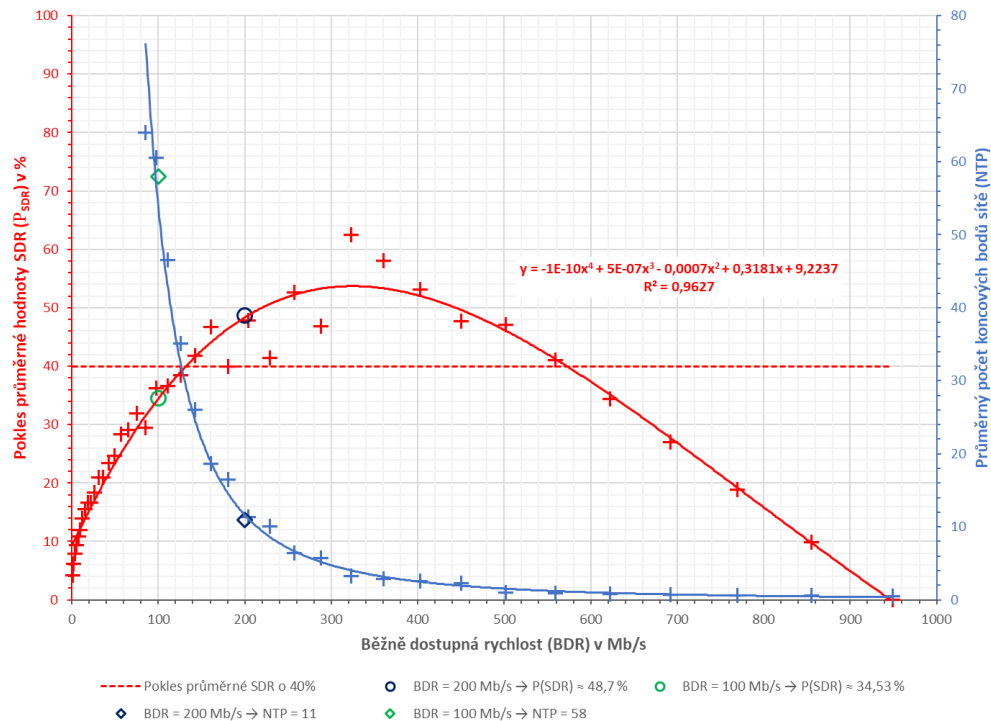
$$\sigma_{SDR} = SDR_{\text{max}} - SDR_{\text{min}} = 152,741 - 100 = 52,741 \text{ [Mb/s; Mb/s, Mb/s]}. \quad (58)$$

Z důvodů lepší interpretace hodnoty rozptylu výkonu služby přístupu k internetu se stanovuje procentuální poměr hodnoty rozptylu σ_{SDR} a hodnoty SDR_{max} , který lze označit jako pokles průměrné hodnoty SDR (P_{SDR}):

$$P_{SDR} = \frac{\sigma_{SDR}}{SDR_{\text{max}}} \cdot 100 = \frac{52,741}{152,741} \cdot 100 \doteq 34,53 \text{ [%; Mb/s, Mb/s]}. \quad (59)$$

Pokud platí, že hodnota $BDR = SDR_{\text{min}}$, viz vztah (17), lze pro výše uvedený příklad přístupové technologie GPON zobrazit závislost hodnoty poklesu výkonu služby přístupu k internetu P_{SDR}

a průměrného počtu NTP na hodnotě BDR, jak je uvedeno na obr. 13. Z výsledku lze například odvodit, že při kapacitě přípojné sítě 1000 Mb/s lze uvedenou technologií GPON zajistit hodnotu BDR = 200 Mb/s u průměrného počtu NTP = 11, nicméně pokles průměrné hodnoty SDR bude dosahovat $P_{SDR} = 48,7\%$. Hodnotu BDR = 100 Mb/s lze dle obr. 13 zajistit průměrným počtem NTP = 58, přičemž pokles průměrné hodnoty SDR bude dosahovat $P_{SDR} = 34,53\%$ viz vztah (59). Opět v tomto případě platí, že všechny NTP využívají služby přístupu k internetu maximální možnou přenosovou rychlostí v daném čase $t = 1$, viz vztah (14).



Obr. 13: Závislost poklesu průměrné rychlosti SDR (P_{SDR}) a průměrného počtu koncových bodů sítě NTP na běžně dostupné rychlosti (BDR), příklad přístupové technologie GPON s kapacitou sítě 1000 Mb/s (L 1); faktor využití sítě UF a průměrná bitová rychlost NBR_{avg} nejsou zohledněny

V případě, kdy je požadavkem zohlednit vliv faktoru využití UF stávajícího datového spoje, resp. přípojné nebo distribuční sítě (obecně místa, kde vzniká úzké hrdlo, tzv. *bottleneck*), přičemž jeho hodnoty charakterizující chování koncových uživatelů v dané lokalitě a typu datového provozu, je nutné provést adekvátní úpravu výchozího vztahu (55), a to podle vztahu (40). Pro uvedený příklad technologie GPON budou parametry chování koncových uživatelů převzaty z konkrétního příkladu přípojné sítě A, kde hodnota průměrné bitové rychlosti $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s a hodnota faktoru využití UF = 0,421 vychází z tab. 2. Hodnotu průměrné bitové rychlosti NBR_{avg} je nutné opět přepočítat na transportní vrstvu. Výchozí vztah (55) lze tedy upravit do podoby:

$$SDR_{min} = BDR = 100 \text{ Mb/s} \Rightarrow N = \left\lfloor \frac{CAP'}{BDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\kappa \cdot CAP}{BDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\frac{CAP}{NBR_{avg}} \cdot UF \cdot CAP}{BDR} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{UF \cdot CAP^2}{BDR \cdot NBR_{avg}} \right\rfloor =$$

$$= \left\lfloor \frac{0,421 \cdot 949,285^2}{100 \cdot 120,844} \right\rfloor = 31 \text{ [-; -, (Mb/s)^2, Mb/s, Mb/s]}. \quad (60)$$

Stejným způsobem je nutné dle vztahu (56) určit střední intenzitu vstupu λ odpovídající průměrnému počtu NTP generujících datový tok v čase $t = 1$, které budou s pravděpodobností s pravděpodobností $P(k \leq N) = 90\%$ využívat službu přístupu k internetu:

$$P(k \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90\% \Rightarrow P(k \leq 31) = \sum_{k=0}^{31} \frac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 0,9 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda \doteq 25,050 \text{ [-]}. \quad (61)$$

Stejným způsobem jako v případě vztahu (60) je nutné upravit vztah (57) při využití znalosti hodnoty střední intenzity vstupu λ dle výše uvedeného vztahu (61). Výkon služby přístupu k internetu SDR_{max} lze tedy stanovit jako:

$$SDR_{max} = \frac{CAP'}{\lambda} = \frac{\kappa \cdot CAP}{\lambda} = \frac{\frac{CAP}{NBR_{avg}} \cdot UF \cdot CAP}{\lambda} = \frac{UF \cdot CAP^2}{\lambda \cdot NBR_{avg}} =$$

$$= \frac{0,421 \cdot 949,285^2}{25,050 \cdot 120,844} \doteq 125,326 \text{ [Mb/s; } -(Mb/s)^2, -, Mb/s]. \quad (62)$$

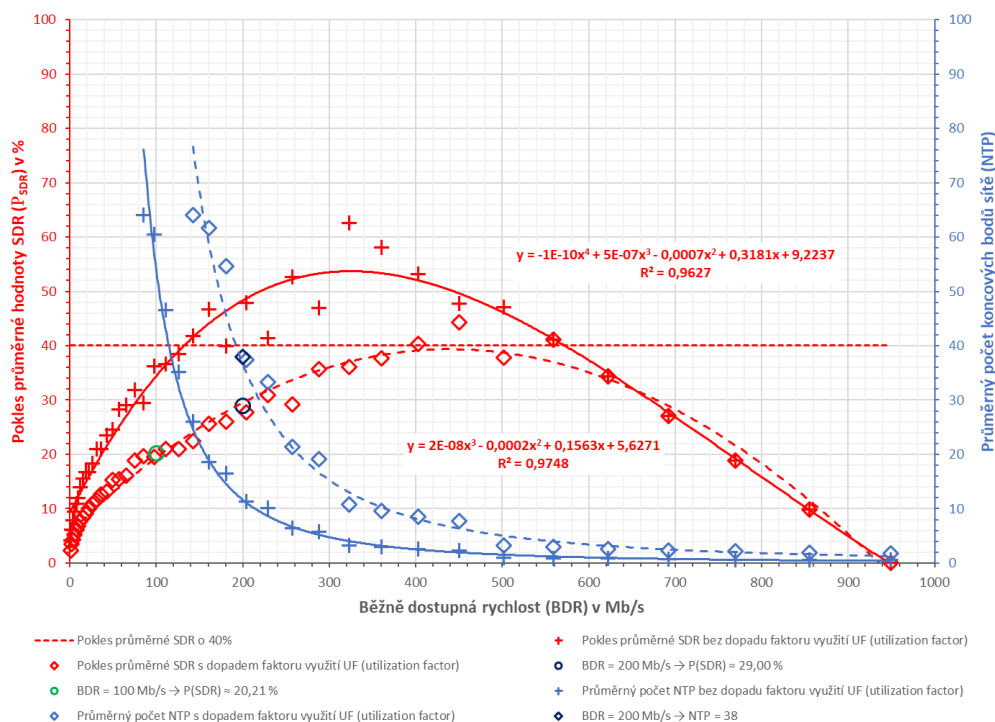
Rozptyl výkonu služby přístupu k internetu, tedy průměrné hodnoty SDR dosahované v místě NTP, se stanoví opět jako rozdíl maximální hodnoty SDR_{max} a minimální hodnoty SDR_{min} :

$$\sigma_{SDR} = SDR_{max} - SDR_{min} = 125,326 - 100,000 = 25,326 \text{ [Mb/s; Mb/s, Mb/s].} \quad (62)$$

Výsledný pokles průměrné hodnoty SDR (P_{SDR}) je stanoven na základě vztahu (59):

$$P_{SDR} = \frac{\sigma_{SDR}}{SDR_{max}} \cdot 100 = \frac{25,326}{125,326} \cdot 100 \doteq 20,21 \text{ [%; Mb/s, Mb/s].} \quad (63)$$

Pokud platí, že hodnota $BDR = SDR_{min}$, viz vztah (17), lze pro výše uvedený příklad přístupové technologie GPON zobrazit závislost hodnoty rozptylu výkonu služby přístupu k internetu P_{SDR} a průměrného počtu NTP na hodnotě BDR, jak je uvedeno na obr. 14. Z výsledku (modrý přerušovaný průběh) lze opět odvodit, že při kapacitě distribuční sítě 1000 Mb/s lze uvedenou technologii GPON zajistit hodnotu $BDR = 200$ Mb/s u průměrného počtu NTP = 38, přičemž pokles průměrné hodnoty SDR bude v tomto případě dosahovat pouze $P_{SDR} = 29,00$ %. Hodnotu $BDR = 100$ Mb/s lze podle obr. 14 zajistit průměrným počtem NTP > 90, konkrétně NTP = 195 (stanoveno výpočtem), přičemž pokles hodnoty průměrné SDR bude dosahovat $P_{SDR} = 20,21$ %.



Obr. 14: Závislost poklesu průměrné rychlosti SDR (P_{SDR}) a průměrného počtu koncových bodů sítě NTP na běžně dostupné rychlosti (BDR), příklad přístupové technologie GPON s kapacitou sítě 1000 Mb/s (L 1); jsou zohledněny faktor využití $UF = 0,421$ a průměrná bitová rychlost $NBR_{avg} = 127,3$ Mb/s převzaté z přípojné sítě A, viz tab. 2

Závěry kapitoly zabývající se dopadem faktoru využití sítě koncovými uživateli na výkon služby přístupu k internetu lze vysvětlit na jednoduchém příkladu. Existuje přípojná (distribuční) síť

s kapacitou $CAP = 1000 \text{ Mb/s}$ (L 1), tedy po přepočtu mezi vrstvami modelu ISO/OSI 949,285 Mb/s (L 4), a počtem koncových bodů sítě $NTP = 64$ (počet koncových uživatelů, tedy počet přípojek). Pokud by v jeden okamžik využívalo všech 64 koncových uživatelů (stejným zařízením) poskytovanou službu přístupu k internetu maximálním možným způsobem, dosahovala by přibližné hodnoty $SDR \doteq 14,833 \text{ Mb/s}$. Poissonův proces upravuje počet koncových uživatelů (NTP), které s pravděpodobností $P(k \leq N)$ budou využívat službu přístupu k internetu současně, ovšem opět maximálním možným způsobem (maximální hodnotou přenosové rychlosti), přičemž limitujícím faktorem je hodnota kapacity přípojné (distribuční) sítě CAP . Pro zvolenou pravděpodobnost $P(k \leq N) = 90 \%$ se bude jednat o přibližnou hodnotu $SDR \doteq 96,189 \text{ Mb/s}$. Faktor využití UF dále upřesňuje charakter využívání sítě koncovými uživateli, tedy nikoliv maximálním možným způsobem, ale typickým způsobem pro danou oblast a typ datového provozu. Například pro hodnotu faktoru využití $UF = 0,421$ s průměrnou bitovou rychlostí $NBR_{avg} = 127,3 \text{ Mb/s}$ (dle monitoringu síťového provozu) se bude jednat o přibližnou hodnotu $SDR \doteq 164,329 \text{ Mb/s}$.

1

IV. Pojmy, definice a zkratky

- 2 B (*bandwidth*) – obecné označení šířky pásma přenosového média a technologie [Hz]
- 3 BDR – běžně dostupná rychlost, kterou může koncový uživatel předpokládat a reálně
4 dosahovat při stahování a nahrávání dat v době odpovídající 95 % času 1 kalendářního dne
- 5 CAP (*link capacity*) – označuje celkovou kapacitu daného datového spoje v daném směru
6 (uplink nebo downlink). Kapacita většinou souvisí s fyzikálními možnostmi daného datového
7 spojení, nebo s nastavenými limitními hodnotami (skutečnou šířkou pásma v daném směru)
- 8 CAP' (*link adjusted capacity*) – teoreticky upravená hodnota kapacity daného datového spoje
9 v důsledku dopadu hodnoty faktoru využití UF
- 10 CE_{thr} (*capacity expansion threshold*) – parametr rozšíření kapacity v případě technologie
11 mobilní sítě, pro 5G sítě je typická a zároveň maximální doporučená hodnota 70%
- 12 DeP x (*demarcation point x*) – označuje konkrétní demarkační bod jako předávací rozhraní
13 mezi dvěma odlišnými síťovými entitami (páteřní síť, přístupová síť, lokální síť atd.)
- 14 DP (*distribution point*) – distribuční bod (uzel) distribuční sítě náležící do množiny přístupové
15 sítě
- 16 $F(t)$ – distribuční funkce daného pravděpodobnostního rozdělení
- 17 FS (*frame size*) – velikost ethernetového rámce
- 18 FTD (*frame time delay*) – zpoždění rámců představující časového zpoždění NUT mezi
19 odesláním a příjmem ethernetového rámce
- 20 FTD (*RTT*) – odpovídá uplynulé době mezi odesláním prvního bitu rámce od koncového
21 uživatele směrem k poskytovateli služby přístupu k síti internet a příjmem posledního bitu
22 zpětně odeslaného rámce od poskytovatele služby směrem ke koncovému uživateli
- 23 FLR (*frame loss ratio*) – ztrátovost paketů jako poměr všech nedoručených (ztracených)
24 ethernetových rámců k celkovému počtu všech odeslaných ethernetových rámců
- 25 FPS (*frame per second*) – maximální počet rámců na spojové vrstvě modelu ISO/OSI
- 26 FWA (*fixed wireless access*) – bezdrátová síť elektronických komunikací v pevném místě
- 27 IFDV (*inter-frame delay variation*) – kolísání zpoždění rámců, často také rozptyl zpoždění,
28 variace zpoždění nebo jitter, představuje rozdíl mezi referenčním časem doručení
29 ethernetového rámce (c_k) a jeho skutečným časem doručení (d_k)
- 30 IPER – (*IP packet error ratio*) hodnota chybovosti paketů v podobě poměru chybně přijatých
31 paketů ku všem přijatých paketů.
- 32 IR – (*information rate*) hodnota informační rychlosti odpovídající spojové vrstvě modelu
33 ISO/OSI
- 34 k – počet datových toků
- 35 L_x (*layer x*) – konkrétní vrstva modelu ISO/OSI
- 36 LU (*link utilization*) – označuje využití daného datového spoje ve formě procentuálního
37 vytížení celkové kapacity daného datového spoje
- 38 LU_{max} – označuje maximální hodnotu využití daného datového spoje LU, která může
39 odpovídat hodnotě kapacity CAP
- 40 N – obecné označení počtu koncových bodů (NTP) v matematických vztazích
- 41 NTP (*network termination point*) – koncový bod sítě splňující kritéria specifikovaná v BEREC
42 Pokynech BoR (20) 46

- 43 MTU (*maximum transmission unit*) – označení pro maximální velikost IP datagramu (TCP
44 segmentu), který je možné vyslat daným síťovým rozhraním
- 45 NBR (*net bit rate*) – označuje přenosovou rychlost, označovanou často jako bitovou rychlost,
46 odpovídající fyzické vrstvě modelu ISO/OSI daného rozhraní s předpokladem využití
47 ethernetového rámce
- 48 NBR_{avg} – průměrná hodnota bitové rychlosti NBR za sledovaný časový rámeček (typicky
49 z monitoringu síťového provozu)
- 50 NBR_{max} – maximální hodnota bitové rychlosti NBR za sledovaný časový rámeček (typicky
51 z monitoringu síťového provozu)
- 52 $p_k(t)$ – pravděpodobnost existence k datových toků v síti elektronických komunikací
53 (v posuzovaném datovém spoji) v čase t
- 54 P_{SRD} – pokles hodnoty SDR stanoven jako podíl rozptylu σ_{SDR} a maximální hodnoty SDR_{max} ,
55 hodnota poklesu je často udávána v [%]
- 56 SDR – skutečně dosahovaná rychlost, tj. TCP propustnost za daný časový interval měření,
57 která odpovídá skutečnému výkonu služby
- 58 SDR_{max} – maximální hodnota SDR, tedy TCP propustnosti, za daný časový interval
- 59 SDR_{min} – minimální hodnota SDR, tedy TCP propustnosti, za daný časový interval
- 60 TCP TR (*TCP throughput*) – TCP propustnost, tedy přenosová rychlost odpovídající
61 transportní vrstvě modelu ISO/OSI při použití protokolu TCP (spojově orientovaný)
- 62 TR_{DL} (*downlink/uplink time ratio*) – poměr časového využití jednotlivých směrů datové
63 komunikace, např. 75 % ve směru downlink (25 % ve směru uplink)
- 64 UF (*utilization factor*) – faktor využití odpovídá průměru nominální rychlosti v čase provozní
65 špičky (NBR_{max}) a průměrné rychlosti (NBR_{avg}) za sledovaný časový rámeček (např. měsíc)
- 66 t – čas [s]
- 67 Δt – časový interval [s]
- 68 κ (*adjustment factor*) – faktor úpravy (korekce) určující hodnotu CAP' vůči původní hodnotě
69 CAP , hodnota faktoru odpovídá podílu součinu původní hodnotou kapacity CAP a faktoru
70 využití UF s hodnotou průměrné bitové rychlosti NBR_{avg} , respektive převrácené hodnotě
71 využití datového spoje LU
- 72 η (*spectrum efficiency*) – spektrální účinnost technologie mobilní sítě, v případě 5G sítě lze
73 počítat s typickou hodnotou 17 b/s/Hz
- 74 σ_{SDR} – rozptyl hodnoty SDR stanovený jako rozdíl hodnot SDR_{max} a SDR_{min} v [Mb/s]
- 75 λ – střední intenzita vstupu Poissonova rozdělení pravděpodobnosti
- 76 5G – označení technologie mobilní sítě