DOPRAVNÍ SÍTĚ A LOGISTICKÉ ŘETĚZCE

Základem dopravní obsluhy logistického systému je existence dopravní sítě, která umožňuje dosažení přemístění zboží z místa, kde bylo vyrobeno, do místa, kde pokračuje jako komponenta ve výrobním procesu až po montáž finálního výrobku a dále v procesu oběhu přes velkoobchod a maloobchod ke konečnému spotřebiteli, včetně likvidace odpadů. Je nutné zdůraznit, že obsluha jednoho logistického systému může sdílet dopravní sítě s mnoha dalšími abonenty, kteří obsluhují jiné logistické systémy. To se pak projeví ve stanovení kapacity použitelné dopravní sítě a jejích prvků, jak o tom bude pojednáno v dalších kapitolách.

1 DEFINICE DOPRAVNÍ SÍTĚ

Dopravní sítě je nutné charakterizovat jako velmi složitý systém, neboť se rozkládají na rozsáhlém území, často překračující hranice států, na kterém umožňují pohyb dopravních jednotek a dopravních kompletů (dopravních prostředků, které jakou vybaveny k pohybu po dopravní síti včetně jejich obsluhy; *z tohoto pohledu např. není vlaková souprava, ale vlak vybavený všemi předepsanými náležitostmi včetně personální obsluhy*). Z hlediska komplexní obsluhy jde o sítě multimodální (nehomogenní) co do technické konstrukce, a tudíž i technického druhu dopravy, které umožňují v určitých uzlech přechod z jednoho technického druhu dopravy na druhý a vytvářejí tak multimodální přepravní obslužné systémy. Z hlediska technické konstrukce dopravních sítí a tomu odpovídající technické konstrukce dopravních prostředků rozlišme technické druhy dopravy na:

- dopravu silniční (s nejhustší dopravní – hierarchizovanou – sítí)
- dopravu železniční
- dopravu vnitrozemskou vodní

(tyto tři druhy dopravy se označují souhrnně jako doprava vnitrozemská)

- dopravu leteckou
- dopravu námořní.

Vnitrozemská doprava obvykle tvoří souvislou nehomogenní dopravní síť, na které je možné

- umožnit v určitých místech styku (terminálech) přechod zásilek z jednoho technického druhu dopravy na jiný, včetně vytváření systémově organizovaných přepravních systémů,

- definovat místa styku vnitrozemské a mezikontinentální (letecké a námořní) dopravy s druhy dopravy vnitrozemské.

2 POJEM DOPRAVNÍ SÍTĚ

Dopravní síť je možno definovat jako konečnou množinu dopravních uzlů a cest, které tyto uzly spojují. Ty pak tvoří pevnou, nepřemístitelnou část dopravní soustavy, označovanou pojmem *dopravní infrastruktura*. Je nutno poznamenat, že do dopravní infrastruktury se podle mezinárodních dohod nezařazují zařízení, sloužící komerčním účelům jednoho dopravce nebo operátora, byť měla charakter nemovitosti (např. nakládací rampy, budovy sloužící k odbavování zásilek a osob, depa, opravny mobilních prostředků atd.).

Po formální stránce můžeme dopravní síť zobrazit jako rovinný síťový graf, definovaný množinou uzlů (***U***), množinou hran (***H***), které jsou ohodnoceny směrovou orientací, délkou hrany (***d***) a propustností buď sítě jako celku, jednotlivých cest v síti nebo prvků sítě (***p***):

$$S = (V, H, d, p)$$

3 PRVKY DOPRAVNÍCH SÍTÍ

Byla-li uvedena definice dopravní sítě jako množina uzlů a hran, je nasnadě, že prvky dopravní sítě jsou dopravní uzly (dále jen uzly) a dopravní cesty, které uzly spojují, které označíme pojmem hrany. Každému prvku dopravní sítě přiřazujeme jednu nebo více hodnot, která je charakterizují. Jde zejména o

- propustnost prvku dopravní sítě vyjádřenou obvykle počtem dopravních jednotek nebo kompletů za jednotku času,
- časovou průchodnost prvkem dopravní sítě obvykle vyjadřovanou v minutách,
- náklady na průchodnost prvkem dopravní sítě dopravní jednotkou nebo dopravním komplexem obvykle vyjadřovanou v monitárních jednotkách na jednici výkonu, v tomto případě na přepočtenou dopravní jednotku, nebo komplet.

Uzlem na dopravní síti (***dopravním uzlem***) rozumíme místo na dopravní síti, kde:

- se tvoří z *dopravních elementů* (tj. ze základních prvků, které se mohou pohybovat podle určitých pravidel po dopravní síti) ***dopravní jednotky*** (dopravní jednotku tvoří jeden nebo více dopravních elementů, opatřených základním vybavením, především pak trakční jednotkou) nebo ***do-***

pravní komplety (dopravní komplet tvoří více dopravních elementů nebo dopravních jednotek, s vybavením, které je dáno na reálné dopravní síti uživatelskými pravidly),

- zanikají (rozpouštějí se) dopravní jednotky a dopravní komplety,
- dopravní jednotky a dopravní komplety mění svůj směr přechodem na jinou hranu sítě,
- *přepravní* jednotky (přepravované objekty nebo subjekty na dopravních jednotkách – prostředcích, které tvoří ucelený přemísťovaný prvek, který se v průběhu přemístění nemění) mění technický druh dopravy.

Hranou na dopravní síti budeme rozumět každé fyzické spojení dvou uzlů dopravní sítě. Hrany se mohou křížit, spojovat nebo směrově rozdělovat pouze v uzlech. Křížení mimo uzel je možné pouze u sítí, které jsou definovány v trojrozměrném prostoru (tedy nikoli u sítí zobrazených jako rovinný síťový graf, např. v letecké dopravě). V dalším se budeme zabývat pouze sítěmi, které lze zobrazit rovinným síťovým grafem.

Hrany na dopravní síti zobrazujeme vždy jako ***směrově orientované***. Je-li v praxi možné, aby se po fyzické hraně mezi dvěma uzly pohybovaly dopravní jednotky současně, avšak v opačném směru, zobrazíme takové spojení jako dvě paralelní hrany s opačnou orientací.

Délkou hrany budeme rozumět buď její fyzickou délku danou v délkových jednotkách, nebo může být vyjádřena dobou průchodu dopravní jednotky (to se netýká jen hran, ale i uzlů), v optimalizačních úlohách pak lze nahradit délku hodnotou hrany (uzlu), která vyjadřuje např. náklady na průchod dopravní jednotky hranou (uzlem), případně jinými ekonomickými hodnotami.

4 PROPUSTNOST DOPRAVNÍCH SÍTÍ A JEJICH PRVKŮ

Pro možnosti optimalizace dopravní obsluhy logistického systému je téměř vždy nutné kalkulovat s jeho kapacitou, respektive propustností.

Propustnost obecně budeme definovat jako počet dopravních elementů (dopravních jednotek, dopravních kompletů, v reálném systému počet dopravních prostředků), které mohou dopravní sítí (prvkem dopravní sítě) projít za jednotku času (které dopravní síť, prvek dopravní sítě *propustí* za jednotku času). Rozlišení propustnosti sítě a propustnosti prvků je nutné, neboť propustnost sítě není rovna součtu propustností jejích prvků a závisí do značné míry na způsobu (technologii) průchodu dopravních jednotek, na místě vzniku a zániku dopravního proudu *(dopravní proud budeme definovat jako počet dopravních*

elementů, resp. dopravních jednotek, resp. dopravních kompletů, které mají definováno místo vzniku a zániku na síti a časový interval, ve kterém po síti projdou; dopravní proud může vznikat náhodně nebo cílevědomě, organizovaně).

V logistice bude rozlišovat trojí propustnost:

- ***technickou propustnost***, kterou budeme definovat jako propustnost dopravní sítě (prvku dopravní sítě) za předpokladu, že všechny dopravní jednotky (dopravní komplety) dodržují stanovenou rychlost, na kterou je dopravní cesta konstruována, dodržují mezi sebou stanovenou bezpečnou vzdálenost a využívají všechny k tomu stanovené cesty (v silniční dopravě např. pruhy na silniční komunikaci) [obvykle se udává v počtu dopravních jednotek za hodinu],
- ***technologickou kapacitu***, kterou budeme definovat jako propustnost za předpokladu, že dopravní proud je heterogenní, tj. že dopravní jednotky (komplety) nemají stejnou délku (tedy ani dobu průjezdu prvky sítě), že nemají stejnou rychlost a že vstupují – nikoli v determinovaných intervalech rovných bezpečné vzdálenosti, ale stochasticky podle potřeb dopravní klientely [obvykle se uvádí v počtu dopravních jednotek za 24 hodin],
- ***použitelnou kapacitu***, která je dána možností využití definované dopravní sítě pro logistickou obsluhu systému a je dána technologickou kapacitou po odečtení především dopravních výkonů ve veřejném zájmu a ostatních obvyklých výkonů dalších dopravců nebo v dalších nasmlouvaných komoditách.

4.1 Propustnost dopravních sítí

V logistice je nutné rozlišit – jak již bylo uvedeno – homogenní dopravní proud a dopravní proud heterogenní. Pod pojmem *homogenní dopravní proud* budeme rozumět dopravní proud, který *vzniká a zaniká z působení logistického systému*. Naopak heterogenní dopravní proud tvoří dopravní elementy (dopravní jednotky, dopravní komplety), které jsou vedeny po dopravní síti všemi zúčastněnými zákazníky a dopravci. Pro logistický systém je pochopitelně nutné znát použitelnou kapacitu, která bude rozhodující pro plynulý průchod homogenního dopravního proudu. Ten pak může být časově limitován v poměrně krátkém časovém období (které označíme symbolem T_L), nebo může být trvalým v dlouhém časovém období (např. při zachování intervalu dodávek v logistické technologii JIT). Dále je nutné rozlišit, zda se jedná o dopravní síť jednoznačně ohraničenou místem vstupu dopravního proudu (*pramenem* ***P***) a místem výstupu dopravního proudu (*ústím* ***U***). Takovouto dopravní síť označíme za jednoduchou.

Naopak je možné v logistice definovat dopravní proud na síti, která je definována sice spočitatelným, leč velmi vysokým počtem uzlů a hran. Na takové síti budeme pro dopravní proud hledat optimální cestu nebo optimální rozložení na více cest (jak bude uvedeno dále), ale síť nelze definovat jednoznačně, neboť heterogenní dopravní proud mění svou intenzitu se vstupy a výstupy v různých uzlech sítě i v čase. Takové sítě označíme jako složité a jejich kapacitu budeme stanovovat statistickými metodami s cílem zkoumat, zda jmenovitý dopravní proud, za předpokladu rozložení na síti, sítí projde.

4.1.1 Propustnost jednoduchých dopravních sítí

Za jednoduchou dopravní síť budeme považovat takovou dopravní síť,

- kterou lze zobrazit rovinným síťovým hranově orientovaným grafem,
- u které lze definovat jeden uzel jako uzel, ve kterém dopravní proud vzniká (pramen – P) a jeden uzel, ve kterém dopravní proud zaniká (ústí – U),
- všechny hrany grafu jsou ohodnoceny propustností,
- počet uzlů a hran je nejen konečný, ale omezený možnostmi realizace algoritmu a použitou technikou.

Definujme dále cestu v této síti: ***cestou*** z uzlu *P* do uzlu *U* v orientovaném grafu G=(V,H) nazýváme konečnou posloupnost (v_0, h_1, v_1, ... h_n, v_n), kde $v_{i\in} V$ (i = 0, 1, ..., n) a $h_{j\in} H$ (j = 1, ..., n), přičemž hrany mezi uzly jsou navzájem různé.

Propustnost takovéto sítě je uváděna prakticky ve všech učebnicích teorie grafu jako stanovení úplného a maximálního toku podle algoritmu Forda a Fulkersona. Proto nebudeme uvádět odvození včetně demonstrace na příkladu, pro úplnost však uvedeme algoritmus výpočtu. Definujme dále:

- c(h) jako propustnost (kapacitu hrany h)
- ***tok v síti G = (V,H)*** jako každou funkci ***f***, která vyhovuje těmto podmínkám:
  1. pro všechny hrany je $h \in H$ je $0 \leq f(h) \leq c(h)$,
  2. pro každý uzel $v \in V$ kromě pramene a ústí je součet hodnot f(h) hran do uzlu u vstupujících roven součtu hodnot f(h) hran z uzlu u vystupujících.

Jestliže pro některou hranu $h \in H$ platí f(h) = c(h), říkáme o ní, že je ***nasycená***. Je-li ***f*** takový tok v síti G = (V,H), že na každé cestě je alespoň jedna nasycená hrana, říkáme, že ***f*** je ***úplný tok***.

Existuje-li rovněž propustnost (kapacit) uzlů (např. na reálné síti silniční křižovatka, železniční stanice apod.), nahradíme takový uzel dvěma uzly u^- a u^+ tak, že do uzlu u^- vstupují právě hrany, které vstupovaly do původního uzlu u a z uzlu u^+ vystupují právě ty hrany, které vystupovaly z původního uzlu u.

Dále u uzlu v^- do uzlu v^+ povede nová hrana, jejíž propustnost se rovná propustnosti původního uzlu.

Úlohu řešíme pomocí algoritmu Forda a Fulkersona, kterou uvádí v podstatě každá učebnice teorie grafu, a proto jej nebudeme dále rozvíjet. Aplikace pro dopravní sítě viz lit. [2], [3].

4.1.2 Propustnost složitých dopravních sítí

Ve složitých dopravních sítích, kde je velký počet uzlů a hran, případně se nejedná o rovinnou síť, je velmi nesnadné determinovat výkonnost, propustnost nebo kapacitu sítě.

Jak již bylo řečeno, nelze v obecných dopravních sítích obvykle stanovit pouze jeden pramen a jediné ústí, neboť potřeba přemístit po síti určitý počet dopravních jednotek může vznikat v kterémkoliv uzlu, právě tak, jako může potřeba přemístění v kterémkoliv uzlu zaniknout. Pohyb dopravních jednotek pak může být realizován v různých směrech, tzn. že graf, zobrazující dopravní síť, není jednoznačně orientován. I za těchto podmínek může nastat situace, kdy se síť dopravními jednotkami nasytí a při dalším vstupu dopravních jednotek se mohou projevovat poruchy:

I. zpomalením, případně i zastavením dopravního toku,
II. čekáním na možnost vstupu dopravní jednotky (jednotek, kompletu) v dopravním uzlu do dopravního toku na dopravní síti,
III. vyčleněním dopravních jednotek z dopravního toku na síti a jejich deponováním v uzlech sítě (dopravních uzlech) do uvolnění vhodné dopravní trasy.

Za těchto okolností je vhodné využít metod statistické analýzy, především ***metody saturačních mezí***.

Výkonnost každého technického zařízení, tedy i dopravní sítě závisí na jeho technickém stavu.

Vysoká technická úroveň, tj. bezvadný stav a progresivní vývojový typ zařízení bývá bezprostředně po jeho uvedení do provozu, nebo po uvedení do provozu po jeho inovaci, včetně systému řízení jeho provozu a funkcí. Tomu by odpovídaly i nejvyšší parametry technické výkonnosti. Provoz však obvykle není schopen tyto přednosti využívat především proto, že jednotlivá zařízení jsou využívána více než jejich systémový komplex (chybí synergický efekt v systému řízení). Je to způsobeno jednak současným uváděním do funkčního režimu řídícího systému, jednak i tím, že obsluha systému nemá dostatečně rychlou adaptabilitu na změny technologie obsluhy a dokonce ani technologie a organizace práce obvykle neodpovídá optimálním možnostem. Teprve v průběhu určité doby provozu, po adaptaci personálu na novou technologii a vypra-

cování optimálního režimu práce roste rychlým tempem výkon technického komplexu nebo systému.

Strmý růst se po určité době začne přimykat k limitě, která je dána jednak technickým i morálním opotřebením, jednak technickou a technologickou výkonností elementů systému, které mohou vyvolávat potřeby změn technologie systému. Empiricky bylo zjištěno, že při dosažení 90% saturace této limity se mohou začít projevovat poruchy, v dopravní síti již výše citované, a proto byla 90% hranice označena za saturační mez. Předpokládá se, že v časové ose mohou odchylky od průměru dosahovat 10 %, které mají být zárukou, že pokud se tato rezerva nepřekročí, nemělo by dojít k zastavení (zahlcení) systému.

Období od uvedení zařízení (systému, sítě) do provozu po dosažení limity (resp. saturační meze, neboť limity by nemělo být nikdy dosaženo) se zabývá obdobím náběhu a lze je obvykle s dobrou shodou zobrazit některou ***logistickou*** (***S***) křivkou, z nichž nejčastěji užívané jsou:

A)

$$y_t = \frac{A}{1 + Be^{ct}}$$

kde: A – je horní limita (asymptota) funkce
B, c – jsou parametry, které se stanoví regresní analýzou
e – je Eulerovo číslo
t – je časová proměnná

B)

$$y_t = \frac{K}{(1 + Ce^{-bt})^{1/m}}$$

kde: K – je horní limita (asymptota) funkce
b – je parametr strmosti
C – je parametr vodorovného (časového) posunu
m – je poloha inflexního bodu
e – je Eulerovo číslo
t – je časová proměnná

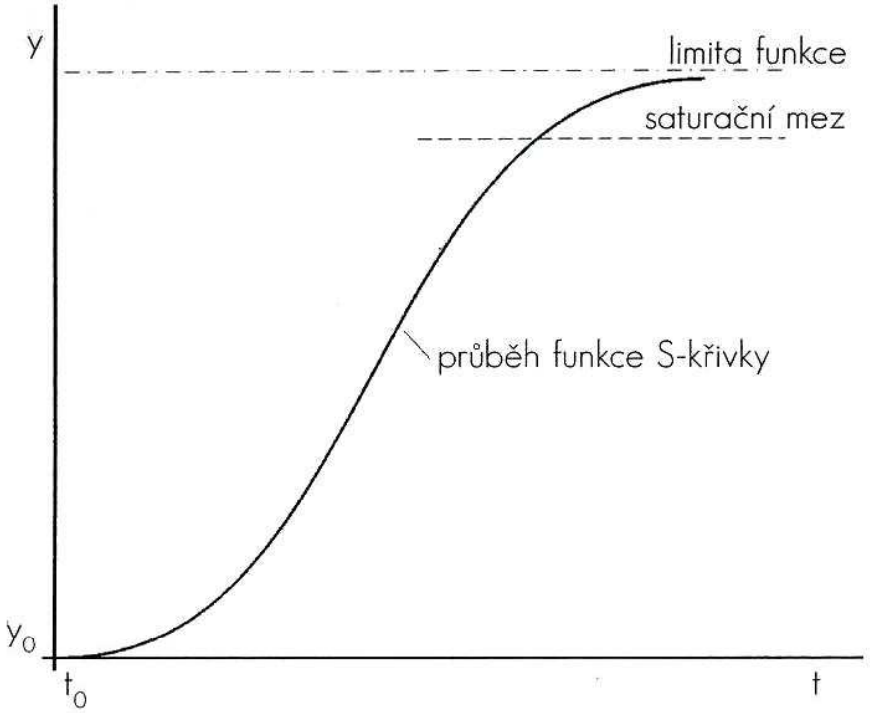
C)

$$y_t = \frac{A}{B^{c^t}}$$

kde: A – je horní limita (asymptota) funkce
B – je parametr, pro který platí, že $A/B = y_0$
c – je parametr strmosti definovaný v intervalu (0,1)
t – je časová proměnná

Výpočet limit a parametrů funkcí je popsán právě v literatuře z oboru matematické statistiky (viz lit. [6]).

Obrázek 3: **Výpočet meze saturace sítě dopravními jednotkami**



Výše bylo uvedeno, že empirické vyhodnocení nasycenosti systémů činí průměrně 90 % z vypočítané limity optimálně extrapolované funkce. Tato zkušenost se nepotvrdila v oblasti řešení saturace dopravních sítí, neboť na odchylky od průměru působí v průběhu roku nejméně dva cyklické vlivy:

I. týdenní nerovnoměrnost, tj. odchylky od průměru v jednotlivých dnech v týdnu a

II. roční nerovnoměrnost, tj. odchylky od průměru v jednotlivých měsících roku.

V zásadě není nutné zkoumat odchylky záporné, tedy takové, které dosahují hodnot menších, než je hodnota průměrná, neboť zařízení, které spolehlivě pracuje při dosahovaní průměrných hodnot, stejně spolehlivě pracuje při dosahování hodnot podprůměrných. Je nutné si položit otázku, jak velkou odchylku musí pokrývat pásmo, které je rozdílem limity a saturační meze, neboli jak veliká je saturační mez, vztažená k průměru, aby maximální odchylka nad průměrnou hodnotu nepřekročila limitu a nezpůsobila tak v delším časovém období kolaps systému. Je-li A limita výkonnosti, potom saturační mez bude

$$S = A - d_{max} \qquad (+)$$

kde: S je saturační mez,

d_{max} je maximální relevantní odchylka od průměru.

Matematická statistika se v jedné ze svých disciplín zabývá teorií vyloučení extrémních hodnot ze statistického souboru, jestliže tyto extrémní hodnoty se vyskytují s tak malou četností, že je jejich vliv na chování systému zanedbatelný.

Při tom je nutné rozhodnout o tom, zda je nutné vyloučit extrémní hodnoty zdola i shora, nebo jen z jedné strany (jak jsme ukázali v případě saturace dopravních sítí) a jak velká, respektive jak malá může být četnost hodnot, které je možné zanedbat.

Mějme obecně definovaný statistický soubor, pro který platí, že rozdělení četností prvků tohoto souboru se řídí normálním Gaussovým zákonem rozdělení, to znamená, že hustota pravděpodobnosti je definována funkcí

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}$$

kde: náhodná proměnná X je definována v intervalu $(-\infty, +\infty)$

σ, μ jsou parametry rozdělení.

Definujme dále $X_š$ jako špičkovou hodnotu, ležící nad průměrem, pro kterou platí, že pravděpodobnost výskytu takovéto hodnoty se blíží nule. Podobně můžeme definovat extrém ležící pod průměrem. Pro tyto hodnoty platí vztahy:

$$X_š = EX + 3\sigma$$

$$X_{-š} = EX - 3\sigma$$

Empiricky je prokázáno, že kolem hodnot $X_š$ a $X_{-š}$ se pohybuje určitý počet hodnot proměnné X, jejichž četnost je tak malá, že jejich vliv na chování souboru, resp. funkčního systému (v našem případě dopravní sítě) je zanedbatelný. Je potom třeba stanovit hodnotu náhodné proměnné X_m, jako hodnotu již s nezanedbatelnou hladinou významnosti.

Definujme hladinu významnosti jako pravděpodobnost, že hodnota náhodné proměnné padne do intervalu $(X_m;\infty)$ nebo $(X_{-m};-\infty)$, což vymezíme pojmem ***statistická jistota***.

Statistická jistota je potom definována plochou, kterou vymezuje trajektorie funkce hustoty pravděpodobnosti f(x), osy souřadnic (x) a rovnoběžky s osou pořadnic vedené z bodů X_m a X_{-m}. Je-li náhodná proměnná ξ, pro kterou platí:

$$P = \Phi(\xi) = \int_{X_{-m}}^{X_m} f(x)dx,$$

nazýváme tuto náhodnou proměnnou koeficientem statistické jistoty. Za před-

pokladu, že rozdělení odchylek od průměru má normální normované rozdělení, jsou hodnoty statistické jistoty uváděny ve statistických tabulkách.

Označme poměr $X_m/EX = \Psi$ pojmem ***špičkový faktor***. Mezní hodnotu náhodné proměnné X můžeme vyjádřit pomocí střední hodnoty a násobku směrodatné odchylky. Pro zjednodušení se budeme dále zabývat jen kladnými odchylkami, které jsou pro saturační mez rozhodující.

$$X_m = EX + \xi\sigma$$

Vyjádřeme nyní špičkový faktor s použitím předcházejícího vztahu:

$$\Psi = (EX + \xi\sigma) / EX$$

Nahradíme-li nyní obecnou náhodnou proměnnou kladnou diferencí od střední hodnoty a dosadíme-li do vztahu (+), definujeme mez saturace:

$$S = A - Ed\Psi_d$$

Závěrem je třeba opakovat, že kapacitu velmi složitých dopravních sítí nelze obvykle řešit výpočetními metodami, a to ze dvou příčin:

I. první příčinou je vysoký počet uzlů a hran, přičemž obvykle není možné definovat jeden uzel jako pramen a jeden uzel jako ústí,

II. vstupy do prvků sítě (uzlů a hran) jsou často stochastického charakteru, a proto ani jejich propustnost není možné stanovit jako deterministickou hodnotu, ale jako střední hodnotu s definovatelnou variací.

Proto se jeví účelné v těchto případech aplikovat metodu saturačních mezí, včetně metody špičkového faktoru za předpokladu, že pro statistickou analýzu je k dispozici dostatečně velký statistický soubor.

4.2 Propustnost prvků dopravních sítí

Z kapitoly 3.1 je patrné, že řešení propustnosti dopravních sítí není možné bez znalosti propustnosti jejich prvků, tj. uzlů a hran. Sama propustnost pak nemusí být vždy absolutní, jednoznačně determinovaný ukazatel. Jeho determinace je dána především charakterem toku vstupujících dopravních jednotek (dopravních kompletů). Tento vstupní tok může mít v zásadě trojí charakter:

- dopravní jednotky (komplety) mohou vstupovat podle determinovaného časového plánu, a to buď tak, že je plánem dán pevný interval mezi vstupy dvou následných dopravních jednotek, nebo je časový plán dán pevným jízdním řádem, u kterého sice nemusí být interval mezi vstupy dvou následných dopravních jednotek konstantní, avšak není přípustná (obvykle relativně) odchylka od stanoveného jízdního řádu,
- dopravní jednotky (komplety) vstupují nahodile (stochasticky), interval

mezi vstupy vykazuje předvídatelný (pomocí teorie pravděpodobnosti vypočitatelný) rozptyl, což činí rozhodování v řízení sítě, a to i vzhledem k její propustnosti jako celku, tak i na jednotlivých cestách v síti (grafu), resp. na faktorech grafu (řízených částech sítě), nejistým s předem stanoveným rizikem,

- dopravní jednotky (komplety) vstupují chaoticky, stanovení odchylek od středního intervalu není řešeno metodami matematické statistiky a teorie pravděpodobnosti.

Je zřejmé, že za předpokladu deterministického vstupu lze propustnost sítě stanovit jako deterministickou hodnotu (např. podle algoritmu popsaného v kapitole 1.1), přičemž propustnost uzlů a hran je stanovena rovněž deterministicky. Je-li vstup dopravních jednotek (kompletů) stochastický, je možné propustnost (kapacitu) stanovit jako přípustný střední vstupní tok, přičemž maximální hodnota možného zatížení systému musí zabezpečit náhodné odchylky od střední hodnoty (viz metoda špičkových faktorů, popsaná v části 2). Pokud jde o systémy s chaotickým režimem práce, jsou dosud předmětem základního výzkumu.

4.2.1 Propustnost prvků dopravní sítě s deterministickým vstupem

Již bylo řečeno, že v deterministickém systému jsou možné dva přístupy k režimu práce dopravního systému.

Je-li minimální interval mezi vstupy dvou následujících dopravních jednotek, který umožňuje rychlost průjezdu dopravním zařízením (např. úsekem dopravní cesty /hrany/ grafu, dopravním uzlem), způsob a technika zabezpečení průjezdu s vyloučením kolize s jinou dopravní jednotkou (např. činnost návěstidel zabezpečovacího zařízení) za předpokladu homogenního dopravního proudu, tedy takového, u kterého se předpokládají shodné doby průjezdu i zabezpečení dopravní cesty, lze technickou (maximální) propustnost vypočítat ze vztahu:

$$n_{max} = \frac{T}{t_{tech}}$$

kde: n_{max} je maximální (technická) propustnost dopravního prvku (systému)

T je výpočetní doba, za kterou se propustnost stanovuje (obvykle 1 hodina nebo 1 den = 24 h = 1440 min)

t_{tech} je technický interval minimálního možného vstupu následné dopravní jednotky do systému, který se skládá z doby průchodu dopravní jednotky systémem + doby na zajištění bezpečného následného vstupu (např. vložení žluté na „semaforu“ křižovatky).

Technologická, obvykle označovaná jako praktická propustnost vychází z pevného časového plánu vstupu dopravní jednotky do dopravního systému. Již bylo řečeno, že pevný časový plán může být vyjádřen buď pevným intervalem vstupu dopravní jednotky (kompletu) do dopravního systému, nebo pevným jízdním řádem. V prvním případě praktickou propustnost vyjádříme vztahem:

$$n_{prakt} = \frac{T}{I},$$

kde n_{prakt} je praktická propustnost dopravního systému (prvku dopravní sítě) v režimu pevného intervalu vstupu dopravních jednotek

T je výpočetní doba (obvykle 1 h nebo 1 den = 24 h = 1440 min)

I je interval mezi vstupy dvou následných dopravních jednotek (pokud se v průběhu dne interval mění, potom se bere v úvahu interval nejmenší).

Ve druhém případě použijeme pro stanovení praktické propustnosti vzorec:

$$n_{prakt} = \frac{T}{EI},$$

kde n_{prakt} je praktická propustnost dopravního systému (prvku dopravní sítě) v režimu pevného intervalu vstupu dopravních jednotek

T je výpočetní doba (obvykle 1 h nebo 1 den = 24 h = 1440 min.)

EI je střední hodnota intervalu vstupu dle pevného časového plánu.

4.2.2 Propustnost prvků dopravní sítě se stochastickým vstupem

Technickou propustnost prvků je nutné považovat za maximální a deterministickou; bude se proto zjišťovat stejným způsobem jako v předchozím případě. Rozdíl je ovšem v technologické propustnosti, kde interval mezi vstupy dopravních elementů (jednotek, kompletů – dále jen *jednotek*) není předem znám a je náhodný. V tom případě vznikají mezi vstupy jednotek mezery, do kterých by bylo možné vložit obsluhu, podobně je např. další jednotka v zásobníku, nebo naopak jednotky zůstanou před systémem ve frontě. Na základě teorie hromadné obsluhy [3], [5] byla zjištěna závislost mezer dostatečně velkých pro vložení další obsluhy a závislost počtu odmítnutých vstupů do systému na velikosti vstupního toku l. Z této závislosti vynesené ve společném grafu vyplývá, že s rostoucím vstupním tokem jednotek do systému klesá počet mezer, do kterých lze vložit další obsluhu (při známé střední době obsluhy t), ale narůstá při stejných hodnotách l a t počet odmítnutých vstupů, jak je patrno z grafu 1. Z něj vyplývá, že překročí-li hodnota vstupního toku hodnotu, ve které se obě křivky protnou, je počet odmítnutých vstupů větší, než počet mož-

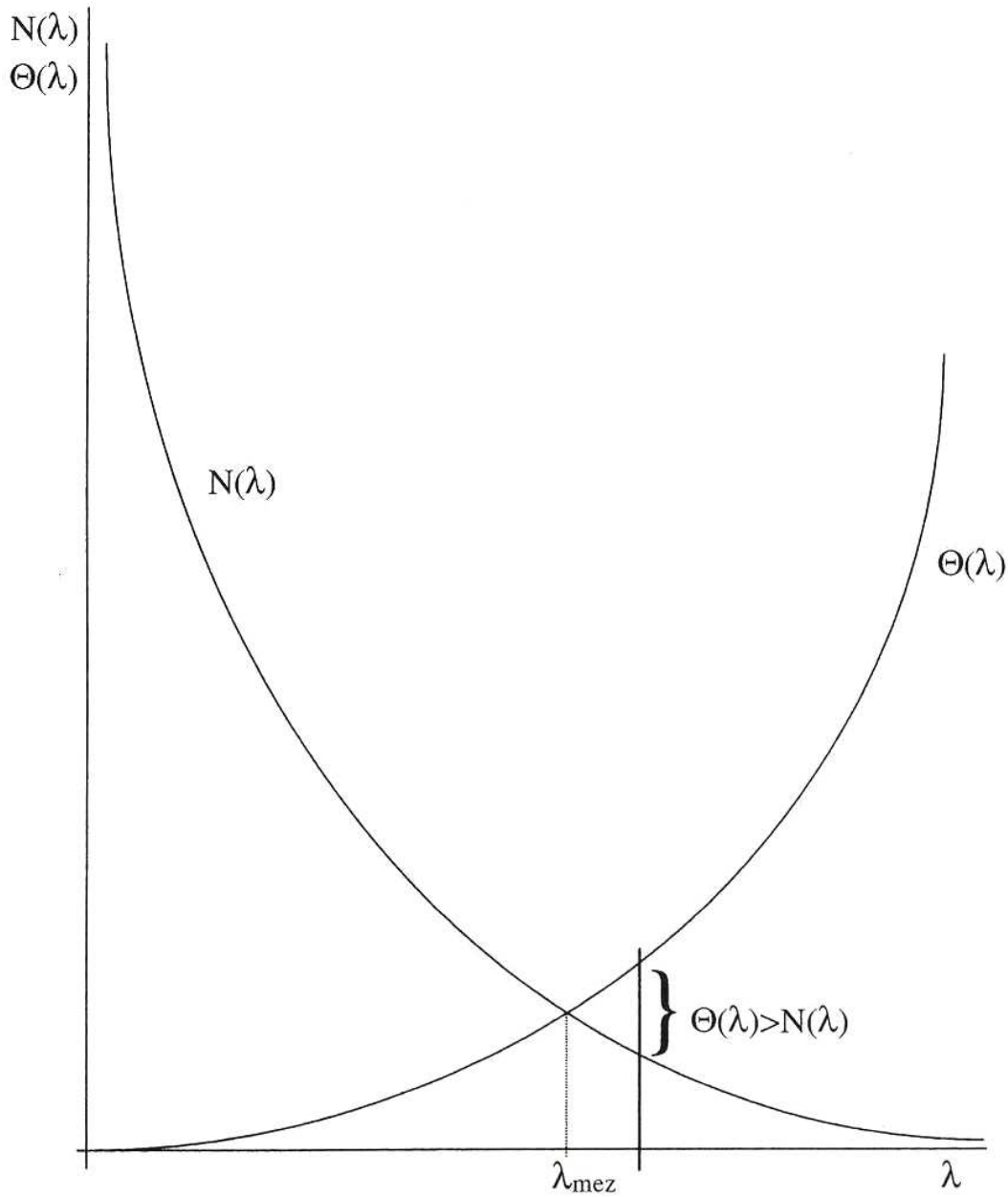
ností dodatečně vložit obsluhu a kapacita systému tak klesá. Vstupní tok, který odpovídá průsečíku obou křivek, nazvěme λ_{opt}.

Zaveďme parametr $\alpha = \lambda_{opt}\tau$ jako parametr optimálního využití disponibilního času. Je-li disponibilní čas T [1 hodina nebo 24 h – 1440 min], potom technologická propustnost stochastického systému je dána vzorcem

$$n_{prakt} = \frac{T\alpha}{\tau}$$

Parametr α je v lit. [3] a [5] matematicky odvozen a tabelován (viz tabulka na následující straně).

Graf 1



Tabulka

k	α_{mez}
1	0,825
2	0,860
3	0,884
4	0,905
5	0,920
6	0,930
7	0,935
8	0,940
9	0,944
10	0,948

4.3 Propustnost prvků dopravních sítí v prostředí chaosu

V literatuře (např. [8]) se uvádějí dva typy chaosu, a to tzv. chaos entropického typu, tj. chaos s minimální rozlišitelností, v dopravě je těžko rozlišit co, kam a čím přemístit, a chaos fraktálového typu, který je charakteristický tím, že existují neshody mezi chováním celku a jeho částí. Jak je patrné z poznámky, je zkoumání systémů s chaotickým chováním v současné době předmětem výzkumu. Proto budeme konstatovat aktuální stav praxe.

V současné době se výkonnost systémů, které pracují v prokazatelně chaotickém prostředí, obvykle stanovuje sčítáním obsloužených dopravních jednotek v časových profilech. Aby spolehlivost takového zjištění byla dostačující, je nutné rozhodnout o počtu a rozložení časových profilů, a to nejlépe pomocí generátoru (tabulek) náhodných čísel. Naprosto nespolehlivé jsou praxe, kdy se na dopravních zařízeních provede sledování buď jedenkrát ročně po dobu 14 dnů (na železnici obvykle navíc v atypickém období dva týdny po zavedení nového grafikonu vlakové dopravy), v silniční dopravě pak dvakrát do roka po dobu jednoho týdne.

4.3.1 Vznik kongescí na dopravních sítích

Vznik kongescí na dopravních sítích je pravděpodobný vždy na místech, která označujeme jako úzká hrdla, tedy v místech, kde je trvale nebo z nějakých náhodných příčin omezena propustnost (např. na umělých stavbách, jako jsou

mosty nebo tunely s menší šířkou, než jsou příjezdové komunikace). Označíme-li t_i střední interval mezi vozidly a τ střední dobu průjezdu úzkým hrdlem (dobu obsluhy), kongesce nastane vždy, je-li splněna nerovnost

$$t_i < \tau \qquad (*)$$

Interval t_i je obvykle charakterizován exponenciální hustotou pravděpodobnosti. Známe-li hustotu pravděpodobnosti intervalu t_i, můžeme pravděpodobnost vzniku kongesce vypočítat ze vztahu

$$p_k = \int_0^{\tau} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{1}{\tau} t_i} \, dt$$

Nastane-li tato situace, dopravní jednotky dojíždějí k úzkému místu a čekání ve frontě lze pak stanovit jako střední dobu čekání v neohraničené frontě před n-linkovým systémem hromadné obsluhy s neohraničenou frontou (viz lit. [4] až [7]). Lze-li ocenit časovou jednotku čekání ve frontě, můžeme vypočítat i ztrátu, která vznikne vytvořením kongesce. To za předpokladu, že každý účastník dopravního provozu, který se dostane do fronty, se chová standardním způsobem.

Tomu tak ovšem není obvykle. Obvykle se najde účastník, který se standardně nezachová, tj. nechce čekat a hledá souběžnou komunikaci, která by mu umožnila úzké hrdlo objet. Takových možností obvykle bývá více a vytvářejí souběžnou dopravní síť nižší hierarchické úrovně. Účastník, který se takto zachová svým jednáním strhne k podobnému jednání další účastníky, kteří pak zaplní paralelní síť nižší hierarchické úrovně, kde se vytvoří podružné kongesce, ale na hlavní komunikaci se obvykle fronta rozplyne. To dá podnět k opětnému použití hlavní komunikace. Vytvoří-li se opět předpoklady, že hustota dopravy převýší kapacitu (viz nerovnost (*)), situace se opakuje. Střídání vzniku front s volnou komunikací a zaplněním paralelní sítě ovšem často závisí na denní době, dni v týdnu, měsíci či roku nebo dokonce na počasí a nelze je tedy předvídat v pravidelných cyklech. Vzniká tak určitá forma turbulence. Jde potom opět o řešení nelineárních soustav, tj. o řešení přechodu od řádu k chaosu, které je nutné brát v úvahu zejména při rozhodování o použití vhodných logistických technologií.

4.3.2 Shrnutí k problému chaosu

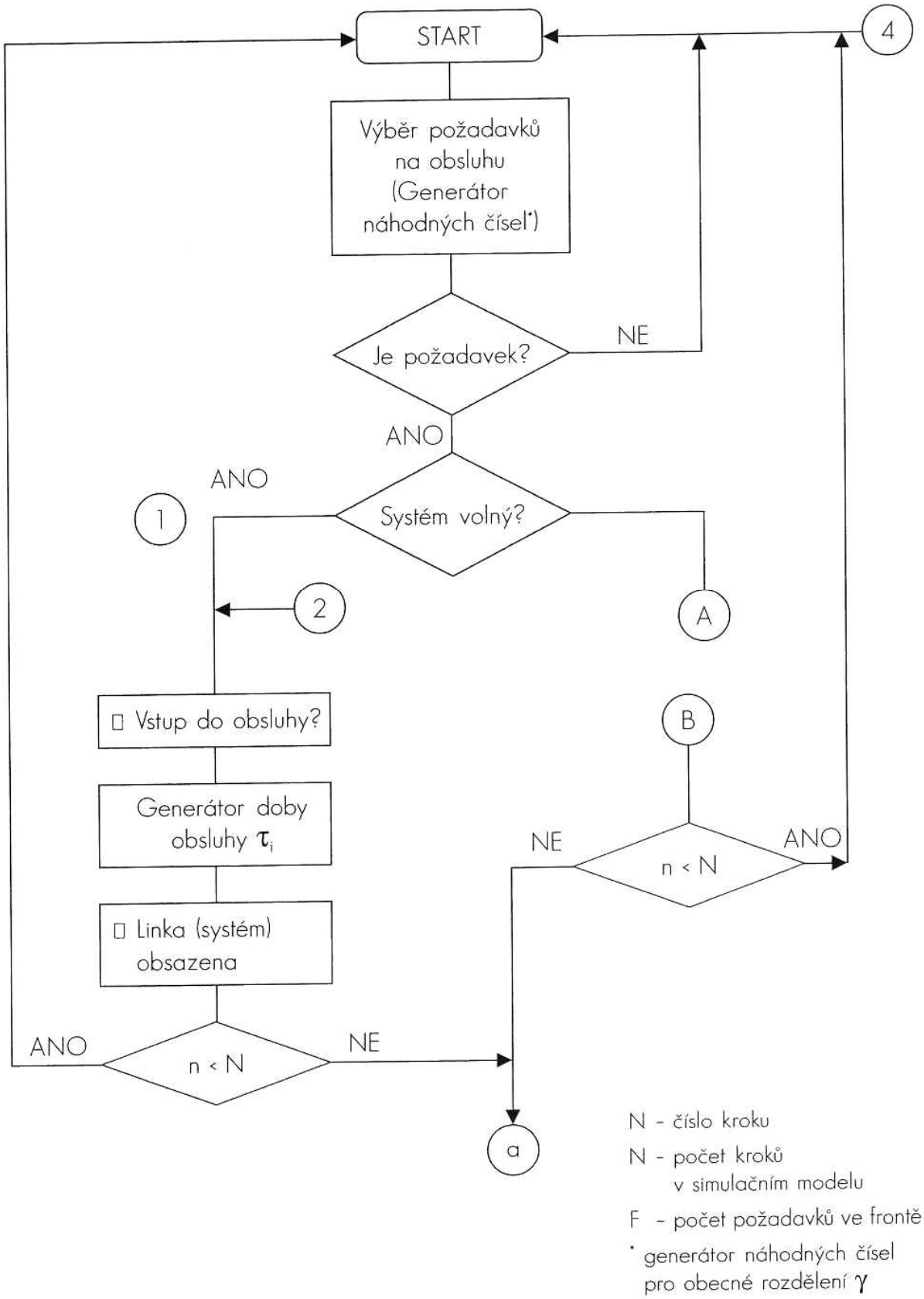
Byly uvedeny ***problémy***, které vznikají, když volba vhodného dopravního systému či vhodné logistické technologie závisí na možnostech předvídání přechodu od řádu k chaosu a opačně. Lze předpokládat, že k řešení přispěje do určité míry postupné uplatňování dopravní telematiky, přesto je nasnadě, že bude nutné se zdokonalováním optimalizačních postupů při stále se zvyšujícím zatížení dopravních sítí hledat řešení v modelování nelineárních systémů.

Řešení takovéto soustavy nelineárních diferenciálních rovnic je značně složité a často se nahrazuje metodami buď iteračními, nebo jinými přibližnými metodami. V tomto případě se jeví účelné nahradit řešení simulací práce části dopravní sítě. Postupujeme takto:

- Existuje-li reálná dopravní síť, dané hiearchické úrovně s úzkým místem, provede se na základě statistického sledování výpočet parametrů a, b obecného rozdělení M.
- Definuje se zkoumaná dopravní síť dané hiearchické úrovně a poloha úzkého místa a jeho charakteristik, zejména počet obsluhovaných linek (na silniční síti např. počet pruhů k průjezdu vozidel) nebo jiná omezení, např. omezení rychlosti atd.
- Definuje se paralelní dopravní síť a úzká místa na této paralelní dopravní síti.
- Definují se místa možného opuštění sítě zkoumané hiearchické úrovně na dopravní síti paralelní (zákazník obvykle nemůže opustit frontu kdekoliv, ale pouze na místech „sjezdu", tzn. že zákazník, který se dostal do fronty mezi úzkým místem a místem „sjezdu", nemůže frontu opustit).
- V extrémních případech lze připustit snahu obrátit vozidlo do protisměru a uniknout z fronty návratem ke sjezdu v protisměru, pokud tomuto pokusu nebrání střední svodidla.

Hrubý vývojový diagram simulace práce úzkého místa je uveden na následujících stránkách.

Schéma 2: **Hrubý vývojový diagram simulace práce úzkého místa**
(za předpokladu neohraničené fronty)

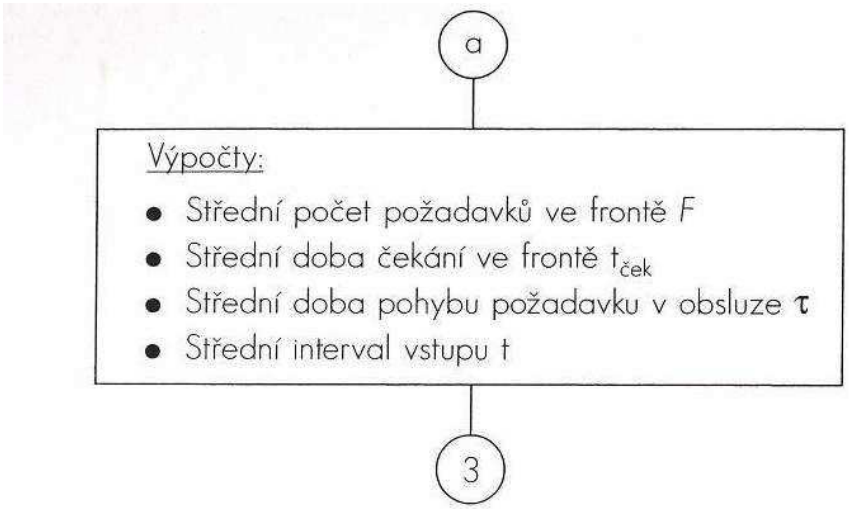


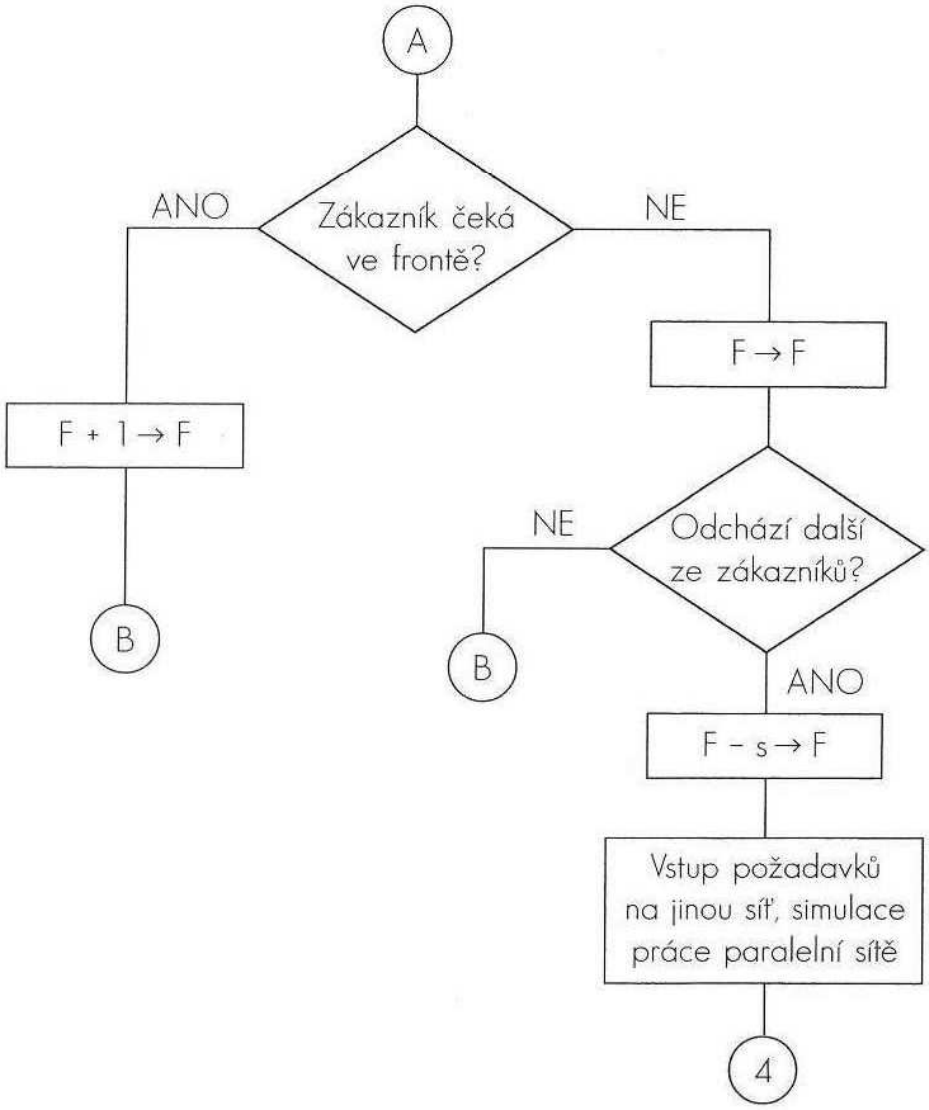
N - číslo kroku

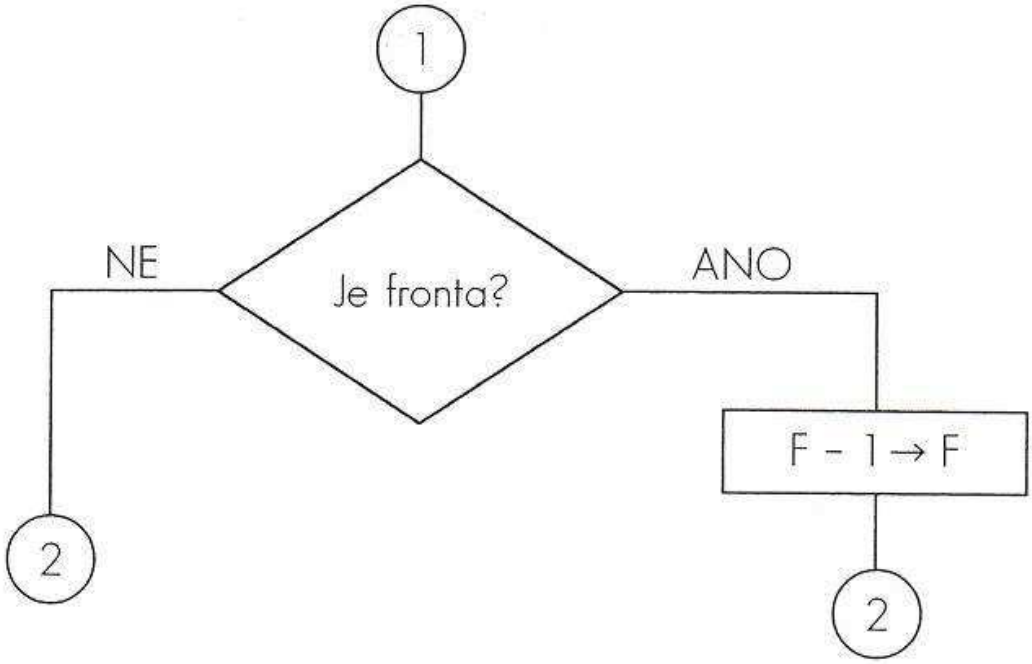
N - počet kroků v simulačním modelu

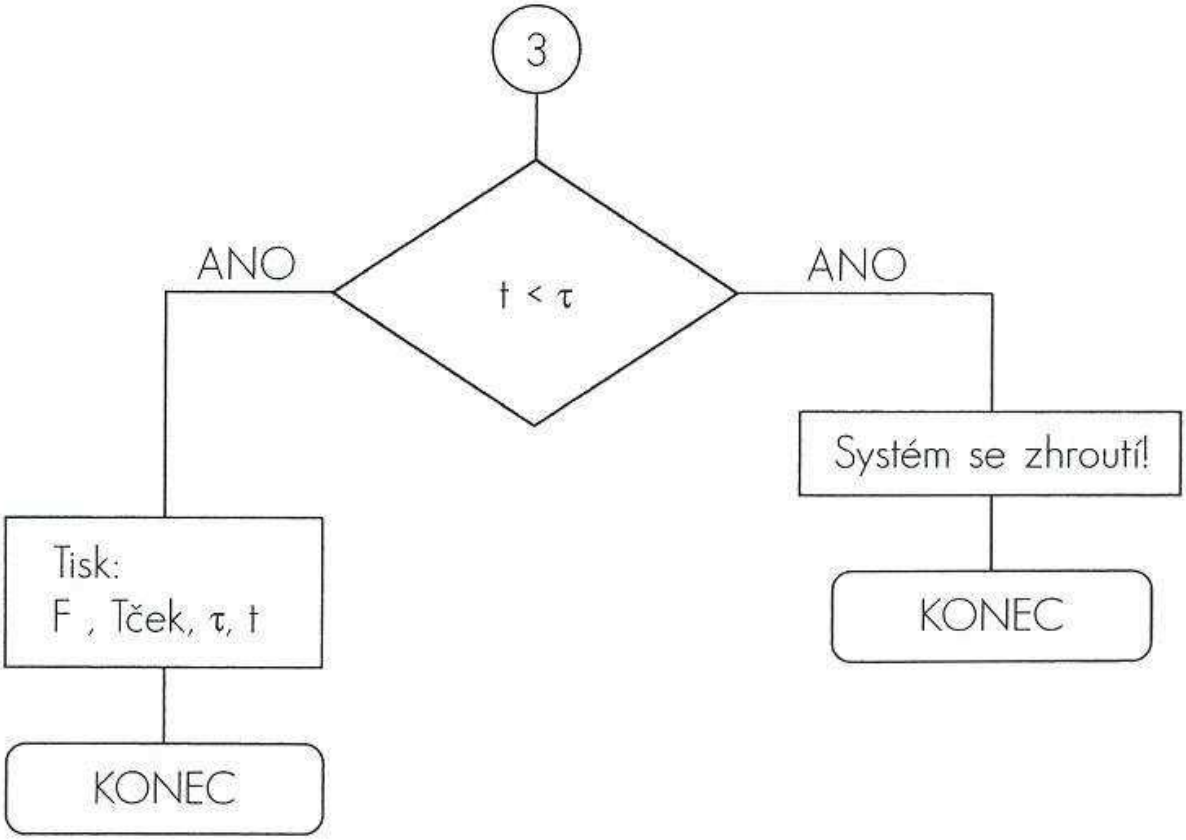
F - počet požadavků ve frontě

* generátor náhodných čísel pro obecné rozdělení γ


a
Výpočty:
• Střední počet požadavků ve frontě F
• Střední doba čekání ve frontě $t_{ček}$
• Střední doba pohybu požadavku v obsluze τ
• Střední interval vstupu t
3


A
Zákazník čeká ve frontě?
ANO
NE
F + 1 → F
B
F → F
Odchází další ze zákazníků?
NE
B
ANO
F − s → F
Vstup požadavků na jinou síť, simulace práce paralelní sítě
4


1
NE
Je fronta?
ANO
F - 1 → F
2
2


3
ANO
t < τ
ANO
Systém se zhroutí!
Tisk:
F , Tček, τ, t
KONEC
KONEC