

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Semestrální práce z předmětu

TEORIE HROMADNÉ OBSLUHY

Propustnost železniční trati Beroun – Praha
(v úseku mezi žst.Dobřichovice a Praha-Radotín)

vypracoval:
Kamenický Dušan
1.75

Popis situace v praxi

Ve své semestrální práci jsem se rozhodl simulovat propustnost jedné z nejvytíženějších železničních tratí v České republice. Jako nejproblematictější se jeví úsek mezi žst. Dobřichovice a Praha-Radotín.

Jedná se o dvoukolejnou trať, s jednosměrným traťovým zabezpečovacím zařízením 2.kategorie. Za normálních okolností je provoz realizován pouze po správné koleji – po každé koleji v jednom směru. Proto i ve vlastní simulaci budu předpokládat, že ve směru Dobřichovice – Praha-Radotín budu využívat pouze jednu traťovou kolej. Tento mezistaniční úsek je rozdělen na 4 oddíly hradly Horní Mokropsy, Kazín a Kosoř. V každém oddíle se může nacházet nejvýše jeden vlak! Jízdní doba v jednotlivých oddílech je různá – zde vycházím z grafikonu vlakové dopravy (GVD):

- žst.Dobřichovice – hr.Horní Mokropsy: R – 1,5min; Os – 4min; Nex a Pn – 2min;
- hr.Horní Mokropsy – hr.Kazín: R – 1,5min; Os – 3min; Nex a Pn – 2min;
- hr.Kazín – hr.Kosoř: R – 1,5min; Os – 3,5min; Nex a Pn – 2min;
- hr.Kosoř – žst.Praha-Radotín: R – 2min; Os – 3min; Nex a Pn – 4min;

V grafikonu vlakové dopravy jsou jízdy jednotlivých vlaků naplánovány dle kapacity dopravní cesty tak, aby nedocházelo k jejich ovlivnění jinými vlaky. V praxi ovšem dochází vlivem mimořádných událostí ke zpoždění vlaků. Ty pak svoji jízdou narušují jiné vlaky. Např. pokud se osobní vlak zpozdí tak, že vyjede ze stanice Dobřichovice pouze 3 minuty před rychlíkem jedoucím za ním a jízda do stanice Praha-Radotín mu trvá 13,5 minuty, rychlík bude nucen za osobním vlakem zpomalovat a čekat, až mu uvolní příslušný oddíl. Jeho jízdní doba se pak z 6,5 minuty prodlouží na přibližně 12,5 minuty. Rychlík tím je opožděn o 6 minut.

Cílem této simulace je zjistit, o kolik minut se zvýší zpoždění vlaků v tomto úseku vlivem narušení jejich jízdy jiným vlakem, který byl již z jakýchkoliv důvodů zpožděn mimo zkoumanou oblast.

Výsledkem simulace pak bude nárůst zpoždění jednotlivých kategorií vlaků průjezdem tímto úsekem, počet mimořádných zastavení vlaků tím, že přední oddíl není pro jejich jízdu volný, a počet vlaků čekajících ve stanici Dobřichovice až bude první traťový oddíl volný.

Formulaci problému termíny THO

Teorii hromadné obsluhy lze charakterizovat jako disciplínu, která analyzuje a řeší procesy, ve kterých se vyskytují proudy jednotek (požadavků) procházejících určitými zařízeními, od nichž vyžadují obsluhu. Vlivem omezené kapacity obsluhy může docházet k hromadění (čekání) jednotek před obslužnými zařízeními, jinými slovy dochází ke vzniku front. Systémem hromadné obsluhy se rozumí všechno, co je mezi příchodem požadavku do systému a jeho odchodem ze systému. Obslužná zařízení se také označují termínem obslužné kanály. Teoreticky mohou jednotky vstupovat do systému v pravidelných nebo nepravidelných časových intervalech. Stejně tak délka obsluhy jednotlivých jednotek může být konstantní anebo případ od případu různá. Podle počtu kanálů ve stanici obsluhy rozlišujeme systémy jednokanálové a vícekanálové.

Vstupní proud – proces, při němž vznikají požadavky na obsluhu. Při generování vstupního proudu jsem vycházel z grafikonu vlakové dopravy. Ze Seznamu vlaků pro staniční zaměstnance jsem vyfiltroval časy odjezdů ze stanice Dobřichovice do stanice Praha-Radotín. Společně s časy odjezdů jsem vyfiltroval data o druhu vlaku a informaci, zda vlak ve stanici Dobřichovice pravidelně zastavuje. Tato data jsem uložil do souboru GVD.mat.

Následně jsem vyhledal v programu ISOŘ (Informační systém operativního řízení) průměrné doby zpoždění jednotlivých vlaků za posledních 28dní ve stanici Dobřichovice. Tyto hodnoty jsem porovnal pomocí testu hypotéz - **Kolmogorov-Smirnovův test** s dostupnými statistickými rozděleními.

Naměřená data nejlépe odpovídala normálnímu rozdělení s příslušnými středními hodnotami a odchylkou.

Jako vstupní proud jsem tedy použil součet pravidelného odjezdu ze stanice podle GVD s náhodně generovaným zpožděním odpovídajícím normálnímu rozdělení rozdělení.

Doba trvání obsluhy – dobu průjezdu jednotlivých oddílů jsem určil z grafikonu vlakové dopravy. Skutečná doba jízdy se u jednotlivých vlaků dané kategorie liší jen minimálně, proto není potřeba volit další náhodou veličinu. V simulaci tedy přistupuji k době trvání obsluhy deterministicky. Vlaky jsem rozdělil do 4 kategorií (R, Os, Nex a Pn) a každé kategorii přiřadil dobu průjezdu jednotlivými oddíly.

Bylo ovšem nutné zohlednit případ, kdy byl vlak nucen zastavit před oddílovým návěstidlem. V tom případě jsem opět deterministicky prodloužil dobu průjezdu následným oddílem, abych zohlednil fakt, že se vlak musí opět rozjet na původní rychlost.

Je nutno upozornit, že obsluha probíhá po 4 subsystémech v sérii – každý z nich reprezentuje jeden oddíl.

Disciplína fronty – bez netrpělivosti (vlaky čekají na průjezd daným úsekem bez ohledu na to, jak dlouho – případné odklony se neuvažují)

Čekací prostor – čekacím prostorem je železniční stanice Dobřichovice. Ve stanici jsou 4 dopravní koleje. Z uspořádání stanice se však předpokládá, že pro směr dopravy Dobřichovice – Praha-Radotín budou využity maximálně 2 staniční koleje. Vlaky je možné v nejhorším případě držet i před stanicí Dobřichovice, proto v simulaci uvažuji frontu nekonečnou. Ale stav, kdy se vlaky nevejdou do stanice, je krajně nepříznivý, proto zaznamenávám i délku fronty. Důležitým faktorem pak je doba, kdy jsou ve frontě víc než dva vlaky.

Režim fronty – způsob, který určuje formu přechodu čekajících požadavků z fronty do obsluhy. Ve své simulaci jsem zvolil režim SJF (Shortest Job First). Je nesmysl, aby odjel zpožděný osobní vlak s jízdní dobou do další stanice 13,5min a minutu po něm rychlík s jízdní dobou 6,5min. Proto pokud by osobní vlak měl odjet ze stanice Dobřichovice méně než 4 minuty před rychlíkem, bude osobní vlak ve stanici Dobřichovice zpožděn, dokud ho nepředjede rychlík. Obdobně jsou deterministicky nastaveny konstanty i pro jiné kategorie vlaků.

Kendallova klasifikace: M/D/1/inf/SJF

Popis řešení problému

K řešení popsaného problému jsem využil matematický nástroj Matlab. Nejprve jsem vyfiltroval data z systému ISOŘ o zpoždění vlaků v žst. Dobřichovice za posledních 28dní. Testem hypotéz - Kolmogorov-Smirnovův test jsem pak potvrdil příslušnost těchto dat do normálního rozdělení. Pomocí náhodných hodnot odpovídající normálnímu rozdělení dané

střední hodnoty a rozptylu jsem simuloval zpoždění vlaků vstupujících do zkoumaného úseku. Následně jsem data vložil do deterministického modelu.

Výstupem simulace jsou hodnoty, které podávají přehled o nárůstu zpoždění jednotlivých kategorií vlaků průjezdem tímto úsekem, počtu mimořádných zastavení vlaků způsobených tím, že přední oddíl nebyl pro jejich jízdu volný, a o počtu vlaků čekajících ve stanici Dobřichovice až bude první traťový úsek volný.

Testování hypotéz

Z systému ISOŘ jsem vyfiltroval data udávající průměrné zpoždění vlaků na příjezdu do žst. Dobřichovice za posledních 28dní.

Pro rychlíky: $x_R = [12;13;0;18;2;14;18;6;21;16;15;15;14;16;14;14;14;4;15;13;12;13;]$

Pro osobní vlaky: $x_{Os} = [1;2;3;4;3;2;5;4;3;3;3;5;4;6;5;5;3;5;2;3;3;1;]$

Nulová hypotéza H_0 : „zkoumané hodnoty jsou z normálního rozdělení o střední hodnotě 13,8 a rozptylu 16 pro rychlíky (střední hodnotě 3,4 a rozptylu 3 pro osobní vlaky)“.

Hypotézu testujeme na hladině pravděpodobnosti $\alpha = 0,05$

```
>> [pval,ks]=ks_test(xR,'normal',13.8,16)
pval =
    0.6562
ks =
    0.7328
```

```
>> [pval,ks]=ks_test(x,'normal',3.4,3)
pval =
    0.4582
ks =
    0.8547
```

p-hodnota *pval* je pravděpodobnost toho, že další získané hodnoty testové statistiky budou ještě nepříznivější pro nulovou hypotézu než ta, kterou jsme spočítali z provedeného výběru.

Vzhledem k tomu, že obě p-hodnoty jsou vyšší než α , nulovou hypotézu nezamítáme.

Simulace Matlab

Jak již bylo výše řečeno, vstupní proud je součet pravidelného odjezdu ze stanice podle GVD s náhodně generovaným zpožděním odpovídajícím normálnímu rozdělení. Na úvod je tedy nutné nahrát soubor GVD.mat – ten obsahuje informace o číslu vlaku, kategorie vlaku, pravidelném odjezdu ze stanice Dobřichovice a informaci, zda vlak ve stanici pravidelně zastavuje či nikoliv.

V úvodu skriptu nastane náhodné generování zpoždění vlaků podle normálního rozdělení (zde je rozdíl ve střední hodnotě a rozptylu zpoždění pro rychlíky, osobní vlaky a nákladní vlaky – vycházím z hodnot zjištěných za posledních 28 dní).

```
switch GVD(ID,2)
    case 1, GVD(ID,5)=round(normrnd(13.8,16)*6);
    case 2, GVD(ID,5)=round(normrnd(3.4,3)*6);
    case 3, GVD(ID,5)=round(normrnd(15,20)*6);
    case 4, GVD(ID,5)=round(normrnd(15,30)*6);
end
```

Dále už probíhá samotná synchronní simulace procesu s konstantním krokem času – po 10s.

V bloku fronta vlaků připravených k odjezdu se určuje priorita jízdy vlaků v závislosti na kategorii a pravidelné době odjezdu ze stanice. Jako první ve frontě se zařadí vlak, který má nejmenší dobu k odjezdu a zároveň pokud v blízké době nemá odjet vlak s vyšší prioritou (např. rychlík)

```
for ID=1:1:pocetvlaku
    switch GVD(ID,2)
        case 1, a=0;
        case 2, a=24;
        case 3, a=18;
        case 4, a=30;
    end
    priorita=GVD(ID,6)+a;
    if (GVD(ID,7)==0) && (priorita<vyhledaniporadi)
        vyhledaniporadi=priorita;
        ZSTfronta=ID; %vlak s nejvetsi prioritou
    end
end
```

V bloku odjezd ze stanice se ověřuje podmínka, že uplynula doba odjezdu a následný oddíl je volný. Pokud jsou obě podmínky splněny, „pošle“ vlak do prvního oddílu. Zároveň zapíše čas odjezdu do proměnné GVD a určí minimální dobu jízdy prvním oddílem v závislosti na

kategorii vlaku a zda vlak byl nucen zastavit. Nakonec odebere vlak z fronty vlaků připravených na odjezd.

```
%odjezd ze stanice
if ZSTfronta~=0 %ve stanici pripraven vlak k odjezdu
    if cas>=GVD(ZSTfronta,6) %uplynul cas odjezdu
        if HR1fronta==0 %prvni usek pred HR1 volny
            HR1fronta=ZSTfronta; %obsad prni usek
            GVD(ZSTfronta,7)=cas; %zapis do GVD cas odjezdu ze stanice
            GVD(ZSTfronta,8)= cas - GVD(ZSTfronta,6); %zpozdeni odjezdu
            %doba jizdy k dalsimu navestidlu na HR1
            a=tJizdy(1,GVD(ZSTfronta,2));
            if GVD(ZSTfronta,8)~=0
                b=tRozjezd(GVD(ZSTfronta,2),1);
            else
                b=0;
            end
            HR1doba=cas+a+b;
            ZSTfronta=0;
        end
    end
end
```

Následné bloky fungují obdobně pro jednotlivé oddíly. Opět se kontroluje, zda uplynula minimální doba jízdy daným oddílem a zda je následný oddíl volný. Pokud jsou obě podmínky splněny, „pošle“ vlak do dalšího oddílu, zapíše se do proměnné GVD čas průjezdu a určí se minimální doba jízdy následným oddílem. Pak odebere uvolní vlastní oddíl, aby mohl jet další vlak.

```
%prujezd hradlem HR1
if HR1fronta~=0 %vlak v prvni useku pred HR1
    if cas>=HR1doba
        if HR2fronta==0 %druhy usek pred HR2 volny
            HR2fronta=HR1fronta; %obsad druhy usek
            GVD(HR1fronta,9)=cas; %zapis do GVD cas prujezdu HR1
            GVD(HR1fronta,10)= cas - HR1doba; %zpozdeni prujezdu
            %doba jizdy k dalsimu navestidlu na HR2
            a=tJizdy(2,GVD(HR1fronta,2));
            if GVD(HR1fronta,10)~=0
                b=tRozjezd(GVD(HR1fronta,2),1);
            else
                b=0;
            end
            HR2doba=cas+a+b;
            HR1fronta=0;
        end
    end
end
```

V posledním bloku se již kontroluje pouze uplynutí jízdní doby. Vzhledem k tomu, že Praha-Radotín je stanice s rozsáhlým kolejištěm a reléovým zabezpečovacím zařízením, nepředpokládá se, že by byl vlak zpožděn u vjezdového návěstidla.

Tímto způsobem krokuji po 10s celý den. Zaznamenávám časy průjezdů kolem oddílových návěstidel a dobu zvýšení zpoždění u jednotlivých oddílových návěstidel. Zároveň sleduji počet vlaků v systému – vlaky, které jsou připraveny k odjezdu až dokud neopustí poslední traťový úsek, a počet vlaků čekajících ve stanici Dobřichovice na odjezd. Na konci dne data uložím. Nechám celé měření opakovat pro několik desítek dnů, aby byla zaručena větší vypovídající hodnota dat.

Dále už pokračuji ve statistickém zpracování s archivem naměřených hodnot.

Nejdříve pročtu všechna data o zvýšení zpoždění u oddílových návěstidel. Zjistím počet mimořádných zastavení. Pro každý vlak pak zjistím průměrnou dobu zvýšení zpoždění v celém úseku. Následně průměrné doby zvýšení zpoždění filtruji podle kategorie vlaků.

```
pocetR=0; pocetOs=0; pocetNex=0; pocetPn=0;
for i=1:1:pocetvlaku

prumer_zpozdeni(i,1)=(mean(zpozdeniZST(i,:))+mean(zpozdeniHR1(i,:))+mean(zp
ozdeniHR2(i,:))+mean(zpozdeniHR3(i,:)))/6;
    switch (GVD(i,2))
        case 1, pocetR=pocetR+1;
        case 2, pocetOs=pocetOs+1;
        case 3, pocetNex=pocetNex+1;
        case 4, pocetPn=pocetPn+1;
    end
    switch (GVD(i,2))
        case 1, zpozdeniR(pocetR,1)=prumer_zpozdeni(i,1);
        case 2, zpozdeniOs(pocetOs,1)=prumer_zpozdeni(i,1);
        case 3, zpozdeniNex(pocetNex,1)=prumer_zpozdeni(i,1);
        case 4, zpozdeniPn(pocetPn,1)=prumer_zpozdeni(i,1);
    end
end

prumer_zpozdeniR=mean(zpozdeniR);
prumer_zpozdeniOs=mean(zpozdeniOs);
prumer_zpozdeniNex=mean(zpozdeniNex);
prumer_zpozdeniPn=mean(zpozdeniPn);
```

Dále bylo nutné upravit data popisující počet vlaků v systému a počet vlaků čekajících ve stanici Dobřichovice na odjezd. Vzorkování po 10s by bylo pro grafické znázornění nevhodné. Využil jsem plovoucího okénka s konstantní délkou.


```

vyhlazeni=200;
for i=1:1:(8640-vyhlazeni)
    vyhlazeni_pocet_vlaku_systemu(i,1)=0;
    vyhlazeni_pocet_vlaku_fronte(i,1)=0;
    for j=0:1:vyhlazeni

vyhlazeni_pocet_vlaku_systemu(i,1)=vyhlazeni_pocet_vlaku_systemu(i,1)+prumer_
r_pocet_vlaku_systemu((i+j),1);

vyhlazeni_pocet_vlaku_fronte(i,1)=vyhlazeni_pocet_vlaku_fronte(i,1)+prumer_
pocet_vlaku_fronte((i+j),1);
    end

vyhlazeni_pocet_vlaku_systemu(i,1)=vyhlazeni_pocet_vlaku_systemu(i,1)/vyhla
zeni;

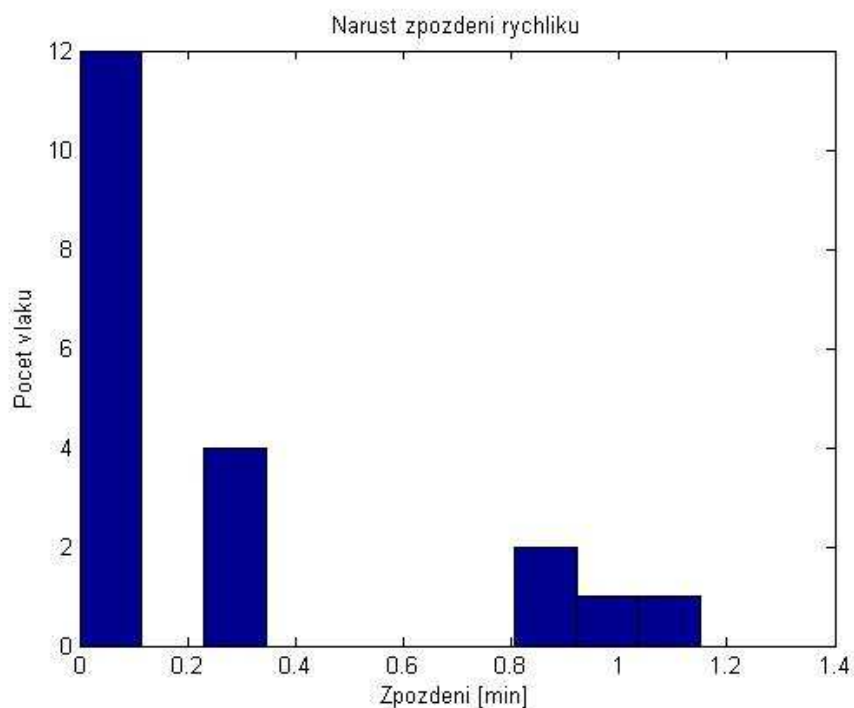
vyhlazeni_pocet_vlaku_fronte(i,1)=vyhlazeni_pocet_vlaku_fronte(i,1)/vyhlaze
ni;
end
F=mean(prumer_pocet_vlaku_fronte);
S=mean(prumer_pocet_vlaku_systemu);

```

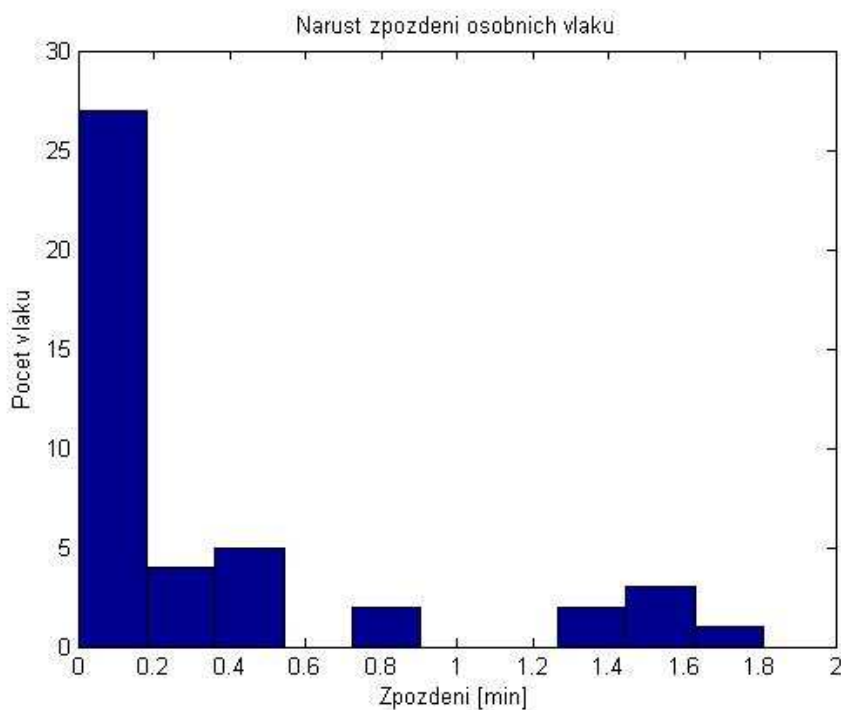
Poté už bylo snadné dopočítat další hodnoty, které jsme v úvodu požadovali. Jejich výsledky a grafické zpracování celé simulace je uvedeno níže.

Výsledky simulace

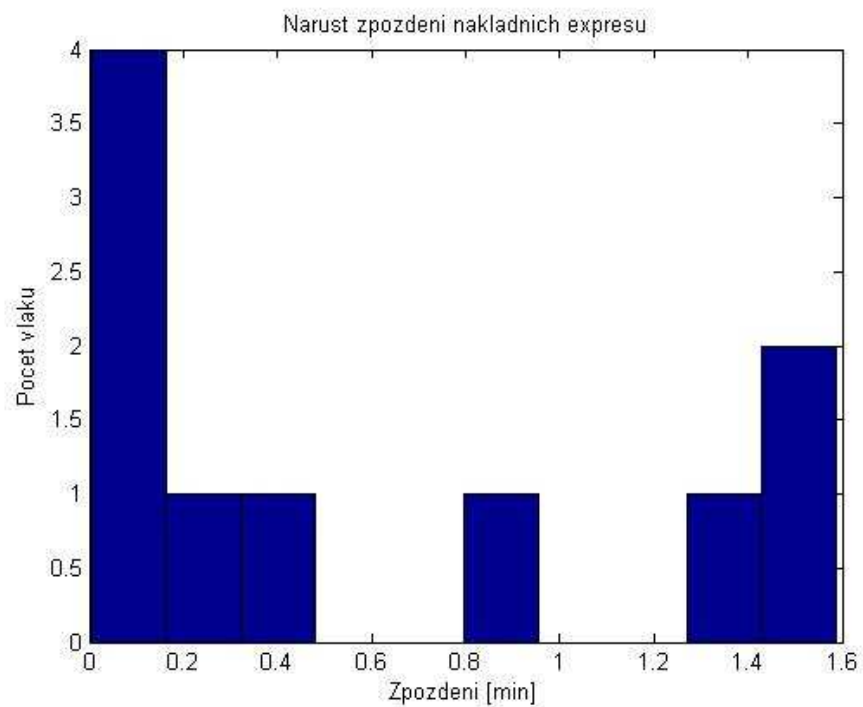
Vytvořil jsem histogramy pro jednotlivé kategorie vlaků, které znázorňují počty vlaků, u nichž byla navýšena doba zpoždění v sledovaném úseku.



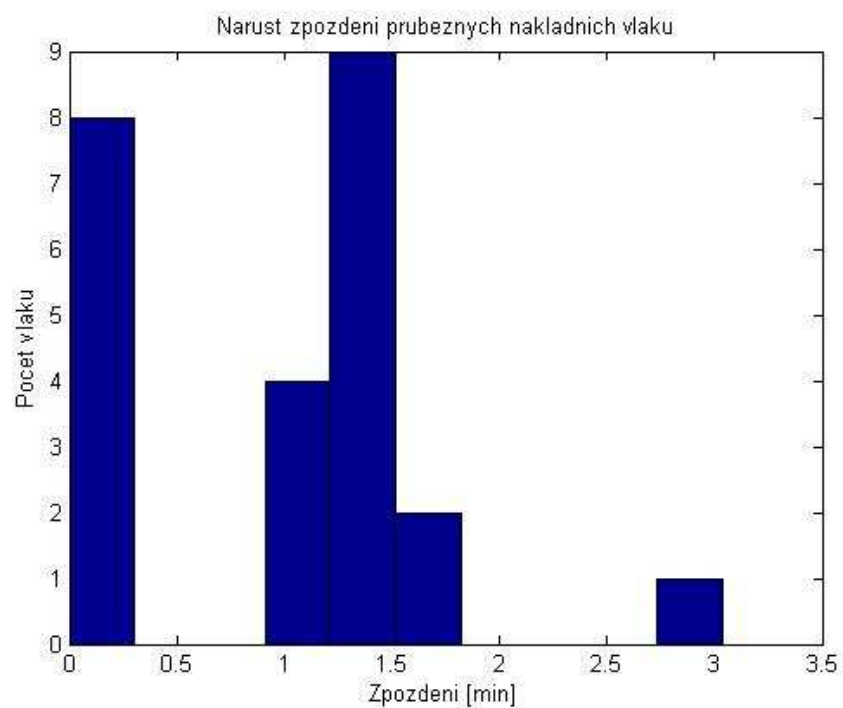
Průměrné zvýšení doby zpoždění rychlíku v sledované oblasti je 15,84s.



Průměrné zvýšení doby zpoždění osobního vlaku v sledované oblasti je 20,322s.

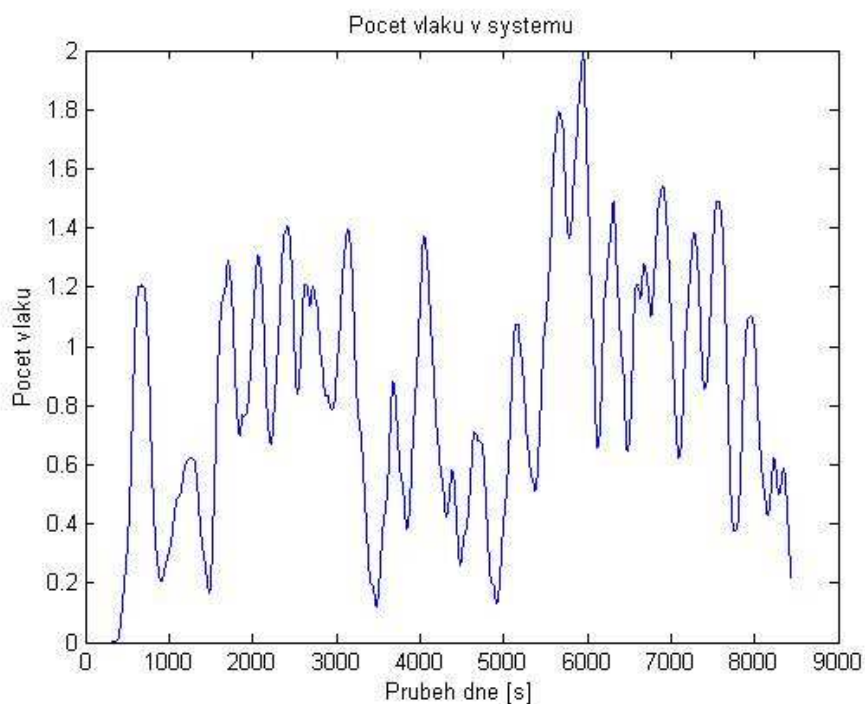


Průměrné zvýšení doby zpoždění nákladního expresu v sledované oblasti je 36,774s.



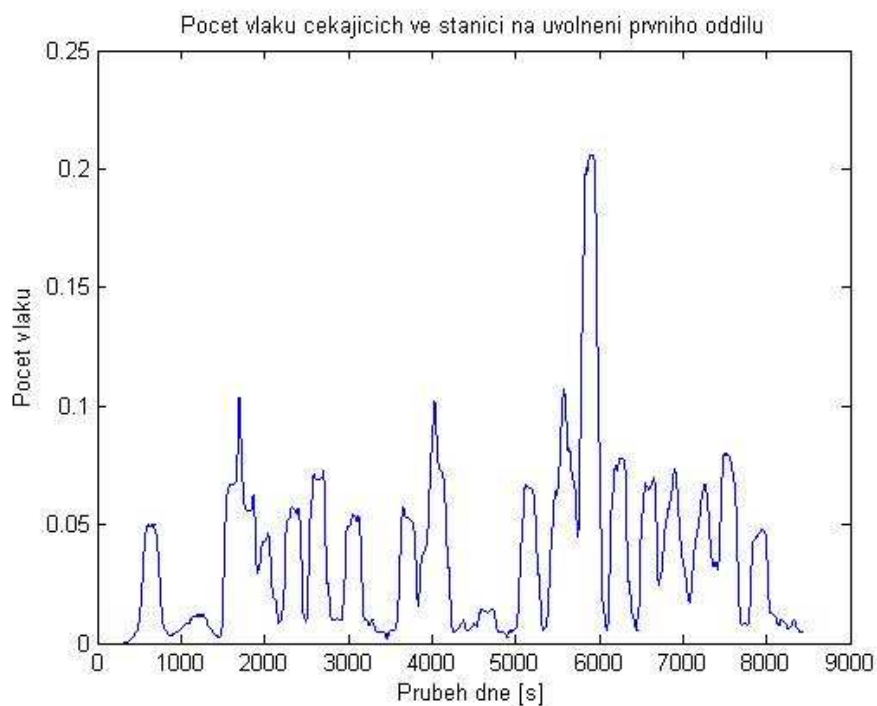
Průměrné zvýšení doby zpoždění průběžného nákl. vlaku v sledované oblasti je 57,204s.

Graf znázorňující průměrný počet vlaků v systému během 24h



Střední počet vlaků v systému je 0,8010

Graf znázorňující průměrný počet vlaků čekajících ve stanici Dobřichovice během 24h



Střední počet vlaků čekající ve stanici Dobřichovice na odjezd je 0,0355

Průměrná doba, kdy jsou ve frontě více než dva vlaky je 1,902s/den.

Důležitým faktorem kvality provozu je i počet mimořádných zastavení z důvodu obsazeného následného úseku.

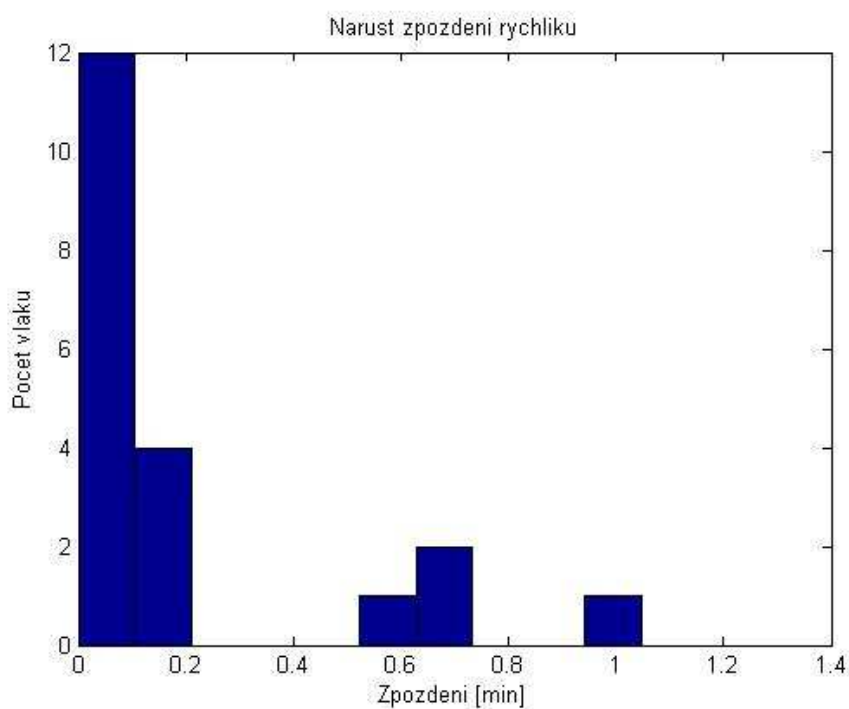
Průměrný počet mimořádných zastavení ve stanici Dobřichovice:	13,91vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení na hradle Horní Mokropsy:	2,242vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení na hradle Kazín:	7,268vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení na hradle Kosoř:	7,435vlaků/den

Simulace navrhovaného řešení

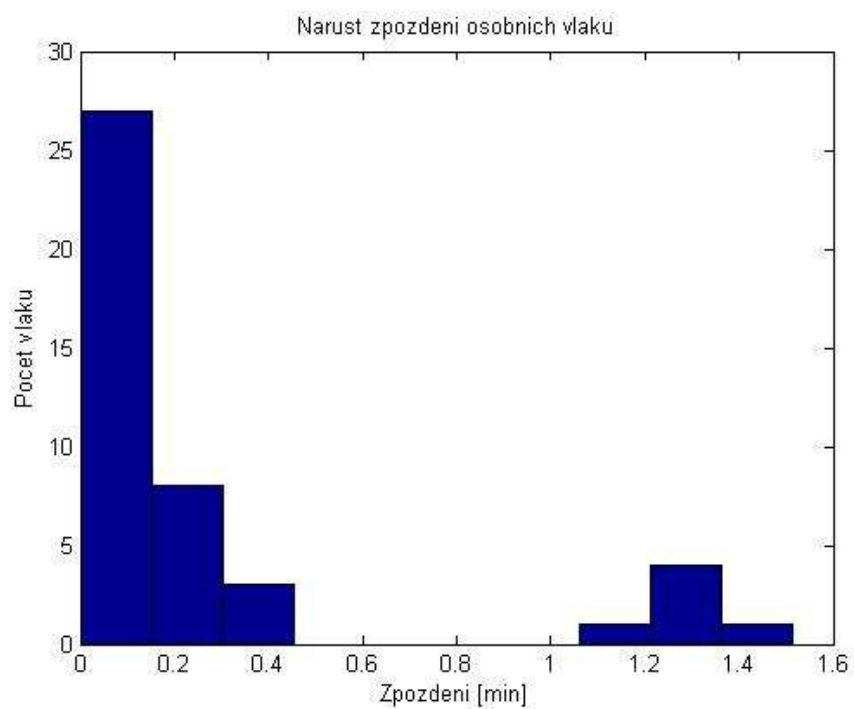
V závěru jsem se rozhodl simulovat stejný problém pro případ, kdy by se realizoval návrh SŽDC s.o. na vybavení tohoto úseku trati zabezpečovacím zařízením 3.kategorie – autoblokem.

Na tratích vybavených autoblokem jsou oddílová návěstidla vzdálena 1 až 2 km. Jejich činnost je automatická. Pro tento konkrétní úsek by to znamenalo zvýšení počtu oddílů mezi stanicemi Dobřichovice a Praha-Radotín na 6 oddílů. Doba průjezdu celým mezistaničním úsekem zůstává zachována.

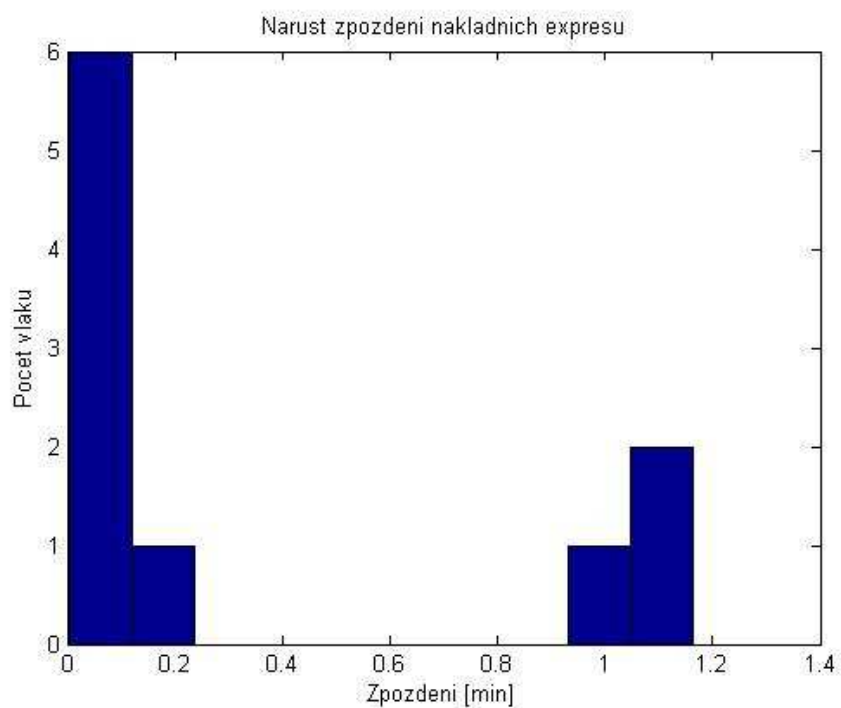
Histogramy pro jednotlivé kategorie vlaků, které znázorňují počty vlaků, u nichž by byla navýšena doba zpoždění v sledovaném úseku.



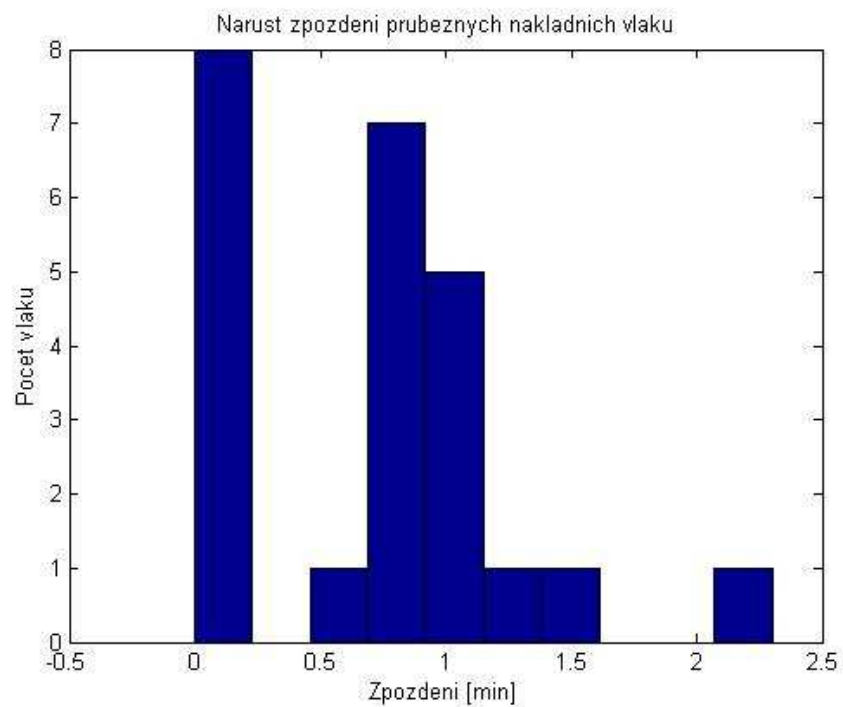
Průměrné zvýšení doby zpoždění rychlíku v sledované oblasti je 11,436s.



Průměrné zvýšení doby zpoždění osobního vlaku v sledované oblasti je 15,402s.

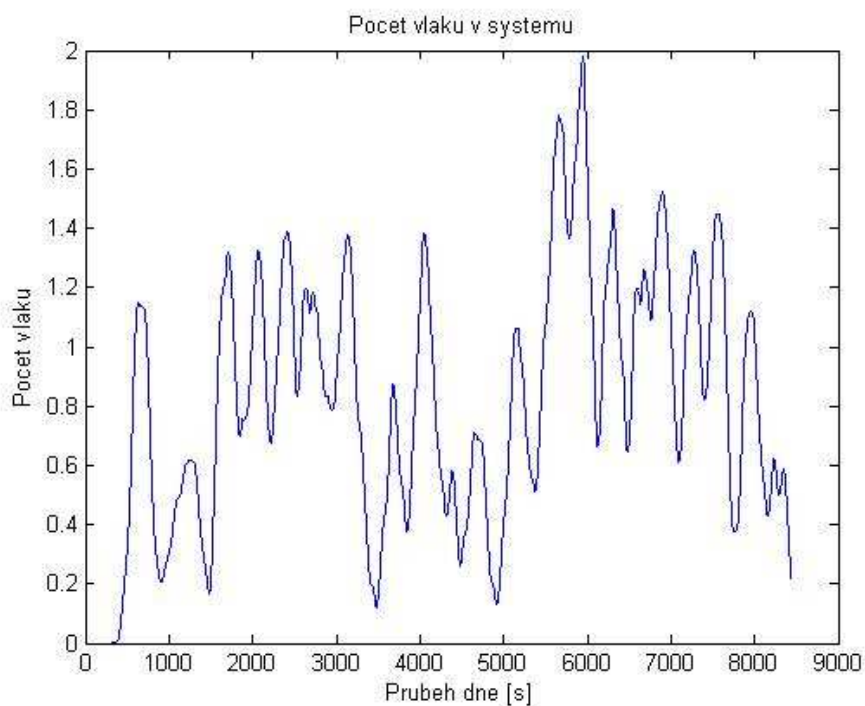


Průměrné zvýšení doby zpoždění nákladního expresu v sledované oblasti je 22,524s.



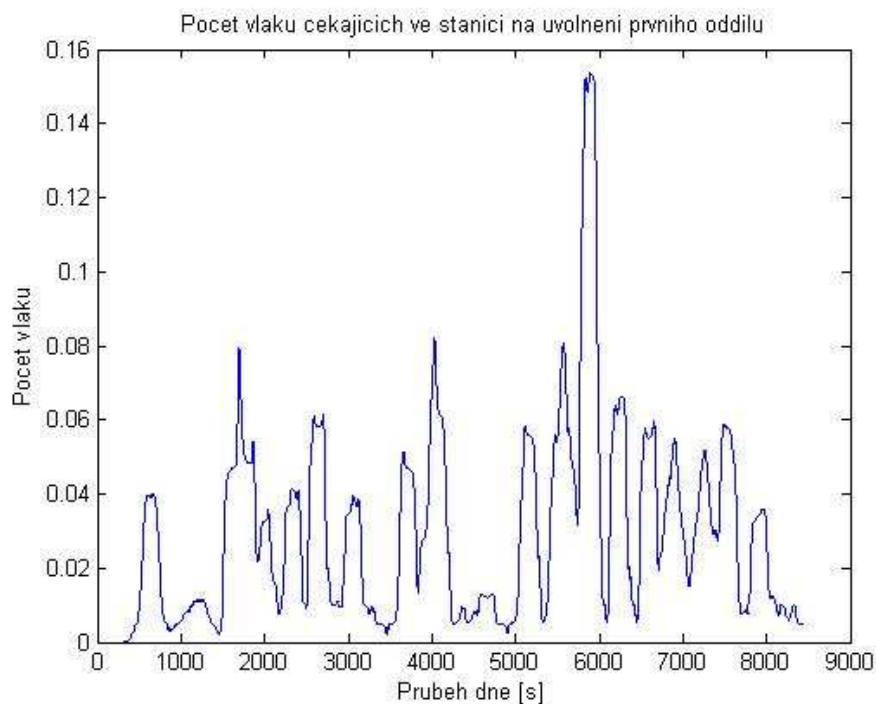
Průměrné zvýšení doby zpoždění průběžného nákl. vlaku v sledované oblasti je 43,416s.

Graf znázorňující průměrný počet vlaků v systému během 24h



Střední počet vlaků v systému je 0,7948

Graf znázorňující průměrný počet vlaků čekajících ve stanici Dobřichovice během 24h



Střední počet vlaků čekající ve stanici Dobřichovice na odjezd je 0,0285

Průměrná doba, kdy jsou ve frontě více než dva vlaky je 0,03s/den.

Počet mimořádných zastavení z důvodu obsazeného následného úseku:

Průměrný počet mimořádných zastavení ve stanici Dobřichovice:	11,082vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení před 1.autoblokem:	0,042vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení před 2.autoblokem:	1,686vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení před 3.autoblokem:	5,597vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení před 4.autoblokem:	1,128vlaků/den
Průměrný počet mimořádných zastavení před 5.autoblokem:	4,578vlaků/den

Závěr, návrh optimálního řešení, diskuse vztahu vstupních a výstupních parametrů.

V případě, že by všechny vlaky jezdily včas podle plánovaného grafikonu vlakové dopravy, nedocházelo by v tomto úseku k narušování jízdy vlaků a tím ke zvyšování jízdní doby. Trať by byla i v současném stavu dostatečně kapacitní.

V praxi ovšem vlivem mimořádných událostí dochází ke zpoždování vlaků, které pak mají za následek narušení jízdy i jiných vlaků. V tom případě se už jeví současný stav tohoto úseku jako nedostatečný. Jedním z návrhů, jak alespoň částečně (a dočasně) řešit tento problém, je vybavení trati zabezpečovacím zařízením 3.kategorie – autoblokem.

Pokud se nebudeme zabývat ekonomickou stránkou projektu, dá se touto simulací konstatovat, že není příliš účelné realizovat tento projekt. Vybavení trati autoblokem by nevedlo k požadovanému cíli - znatelnému zvýšení propustnosti tratí a tím k zamezení navyšování zpoždění průjezdem tímto úsekem. Pokud porovnáme výsledky simulace, kdy je trať vybavena hradlovým poloautoblokem (současný stav), a výsledky simulace, kdy je trať vybavena autoblokem (navrhovaný stav), průměrné hodnoty navyšování zpoždění se oproti současnému stavu u vlaků osobní dopravy nesnížily o více než 30%.

Průměrné navyšování zpoždění by se u rychlíků snížilo oproti stávajícímu stavu o 27,8%, u osobních vlaků o 24,2%, u nákladních expresů o 38,7% a u průběžných nákladních vlaků o 24,1%.

Průměrný počet vlaků čekající ve stanici Dobřichovice by klesl s navrhovaným řešením o 19,7%. Doba, kdy ve stanici Dobřichovice čekají více než 2 vlaky na uvolnění prvního oddílu na trati, je v průběhu dne minimální a nepůsobí žádné větší komplikace.

Samozřejmě, realizace projektu by vedla ke snížení provozních nákladů snížením pracovních míst.

Pokud bychom chtěli opravdu zvýšit kapacitu dopravní cesty na této trati, je nutné realizovat jinou variantu, ve které se počítá se zvýšením počtu traťových kolejí.