

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta informačních technologií

Modelování a simulace

Projekt

Varianta 1: Uhlíková stopa v dopravě

Sabína Gregušová (xgregu02)

Filip Weigel (xweige01)

1.12.2019

Úvod

Cílem této Simulační studie je sestavit model středně velkého evropského města a simulovat pohyb osob dopravními prostředky, které produkují emise CO₂. Investice do infrastruktury a nákupy nových vozidel představují nemalé peníze pohybující se v řádek desítek, stovek milionu, případně i miliard korun. Pomocí simulace jednoho, či více pracovních dní budeme moci pozorovat, jak mohou rozhodnutí jednotlivců přispět k tvorbě uhlíkové stopy a budeme se snažit najít optimální řešení, které by mohlo pomoci k jejich snížení. Vyplatí se investovat do nových autobusů a vozidel, které mají nižší emise? Jak se změní emise CO₂, Pokud provozovatel MHD snižuje cenu jízdného a bude hromadnou dopravu využívat více obyvatel? Tyto a mnoho dalších otázek Můžeme díky simulaci zodpovědět.

Rozbor tématu a fakta

Uhlíková stopa se stala v poslední době fenomén, který pohltil téměř celý svět. Téměř v každém koutu světa se konají konference na téma – znečištění ovzduší automobily. V Evropě tvoří 30 % z celkové produkce CO₂ doprava a transport zboží na základě průzkumu Evropského parlamentu z roku 2017 [1]. Evropská Unie se podílí produkcí oxidu uhličitýho 13 % z celého světa a paradoxně nejvýrazněji bojovníci je Greta Thunberg pocházející ze Švédska, která šokovala svět při svém projevu. Apelovala na občany všech zemí, že by měli přestat jezdit automobily, neboť osobní vozidla způsobují asi 60.7 % CO₂ z celkového množství emisí, které produkuje doprava [1], což je asi 12 % z celkového množství emisí, které produkuje Evropa [2].

Evropská unie se snaží redukovat produkci emisí CO₂ novými modely osobních automobilů pod hranici 130 g/Km; v některých zemích se již podařilo snížit tento průměr na 120.4 g/km. Musíme brát v úvahu, že tento nový zákon se týká nových osobních automobilů, zatímco lidé stále využívají osobní automobily, které byly vyrobeny před více než 10 lety. Můžeme se proto domnívat, že skutečná průměrná produkce CO₂ se pohybuje okolo 135 g/km [3].

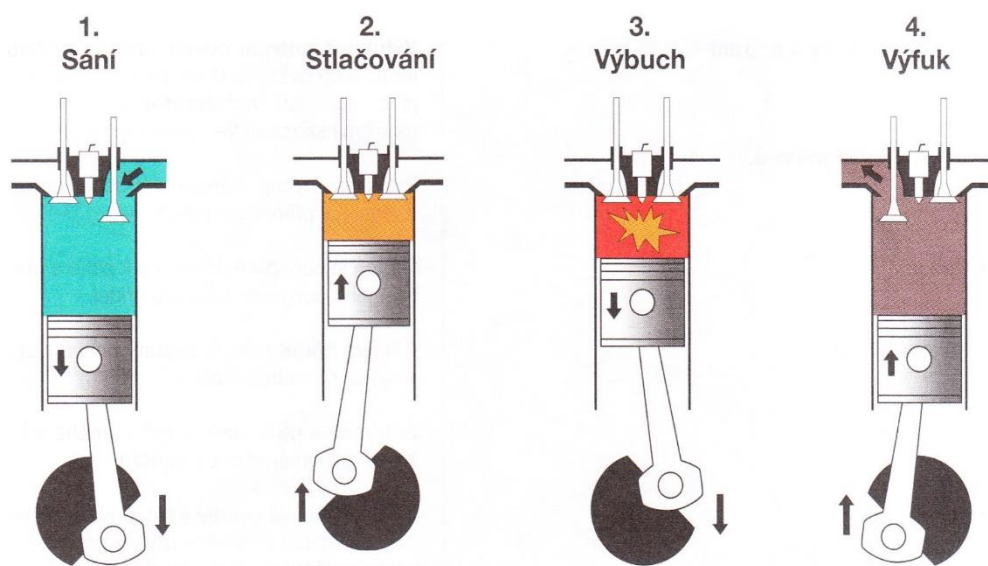
V rámci fakt je třeba si také přiblížit princip spalovacího motoru. Spalovací motor je druh stroje, který přeměňuje chemickou energii obsaženou v palivě především na teplo a mechanickou energii. Teplo tvoří asi 75 % přeměněné energie a je v automobilovém průmyslu využito jen pro vytápění prostoru pro cestující. Je to tedy nechtěný produkt. Zbýlých 25 % je přeměněno na mechanickou práci. Hlavní částí motoru je válec, píst, ventily umístěné v hlavě motoru a kliková hřídel. Všechny ze zmíněných součástí tvoří tzv. spalovací prostor.

Píst se pohybuje ve válci nahoru a dolů v posuvném pohybu. V případě, že je píst ve válci úplně nahoře, tak tuto událost nazýváme horní úvrať, pokud je píst úplně dole tak dolní úvrať. Při posuvném pohybu pístu se zároveň otáčí kliková hřídel, která převádí posuvný pohyb na otáčivý.

Budeme uvažovat obyčejný atmosférický motor, který nemá žádné pomocné součásti typu turbodmychadlo a kompresor.

Fáze

1. Píst nachází v horní úvratí a posunuje se směrem dolů a nasává vzduch otevřeným sacím ventilem.
2. Píst pohybuje směrem nahoru, stlačuje nasátý vzduch v spalovacím prostoru a způsobuje jeho zahřátí.
3. Těsně před horní úvratí se pomocí vstřikovače stříkne do spalovacího prostoru přesně odměřená dávka paliva, která se vznítí a tlačí píst dolů. Zde dochází k velmi patrné ztrátě účinnosti, jelikož palivo vybuchuje ještě ve fázi, kdy píst jde nahoru.
4. Píst je setrvačností tlačěn nahoru a probíhá výfuk. Výfukový ventil je otevřen a ven ze spalovacího prostoru jsou tlačeny spaliny.



Obrázek viz [4]

Spaliny jsou z valné většiny tvořeny oxidem uhličitým a různými prvky/sloučeninami, jež jsou produkty hoření paliva.

Městská hromadná doprava také produkuje CO₂ emise, avšak dokáže přepravit několikanásobně více osob. V této studii se zabýváme dopravními prostředky pro přepravu osob ve městě, které produkují emise CO₂ pomocí spalovacího motoru. Mnohá města disponují rozsáhlou sítí městské hromadné dopravy, která se skládá z tramvají, tramvají a autobusů. Autobusy disponují spalovacím motorem, a na základě průzkumu vyprodukuje asi 822 g/Km s mírnými odchylkami různých modelů. [5]

Popis konceptuálního modelu

Cílem modelu, viz Petriho síť, je simulovat běžný pracovní den ve středně velkém evropském městě. Taktéž sledovat rozhodování jednotlivců, které ovlivňují celkovou denní produkci CO₂ emisí. Vstupním parametrem modelu je počet osob, které mají být přepraveny v rámci jednoho dne. Pro zjednodušení modelu předpokládáme, že v rámci tohoto jednoho dne musí být úspěšně přepraveny všechny osoby. V Evropské unii vlastní asi 60 % obyvatelstva alespoň 1 vozidlo, proto předpokládáme, že každá osoba má 60 % šanci, že vlastní alespoň jedno vozidlo. [6]

Osoby, které auto nevlastní jdou hned na zastávku autobusu. Předpokládáme, že osoby, které auto vlastní se rozhodnou použít MHD s pravděpodobností přibližně 25 % na základě průzkumu. Tento údaj vznikl zprůměrováním hodnot evropských zemí, kde respondenti odpověděli, že využijí MHD 1 a vícerát za týden. Dle průzkumu v evropských zemích využívá MHD 37.2 % populace [7]. Jeho hodnota je vstupním parametrem modelu, protože chceme být schopni simulovat situaci, kdy se MHD stane velmi žádoucí (například rapidně snížení ceny) a tato hodnota se bude měnit.

Architektura simulačního modelu

Zdroj uvádí [8], že v roce 2015 se za rok v celé ČR vyprodukovalo celkem 6 634 769 tun CO₂, které byly vyprodukovány individuální osobní dopravou a městskou hromadnou dopravou. Předpokládejme tedy, že se vyprodukuje 18 177 tun CO₂ denně. Pokud toto číslo vydělíme počtem obyvatel, dostaneme číslo, které vypovídá o znečištění jednoho obyvatele na den. Z výpočtu vyplývá, že každý obywatel ČR zanechává uhlíkovou stopu rovnu 173,1 gramu za den.

Průměrný počet zastávek autobusu: 28 zastávek, průměrná vzdálenost mezi zastávkami 550 metrů – vypočítáno na základě 10 linek MHD v Brně. Doba potřebná pro ujetí jednoho km: 97 sekund – průměrná rychlost ve větším městě: 37 km/h [9].

Pokud chceme simulovat pohyb lidí co nejpřirozenějším způsobem, tak budeme lambda pro exponenciální pravděpodobnost se počítat dynamicky. Naším cílem je, aby se přepravili všichni lidé do konce simulace. Je tedy třeba omezit generování nových lidí (procesů) a počítat s určitou časovou rezervou. Experimentálně jsme zjistili, že lidé se musí přestat generovat přibližně 2 hodiny a 55 minut před ukončením simulace, aby zájemci o přepravu stihli nastoupit na autobus a nezůstali na zastávkách. Lambda pro naši exponenciální je číslo 75 900 (počet sekund v rámci kterých je nutné vygenerovat všechny cestující) vydělený celkovým počtem cestujících.

Šance, že daný člověk vlastní auto je též kalkulovaná dynamicky, aby odpovídala zadaným vstupům. Toto procento je kalkulované jako počet všech aut vyděleným počtem všech lidí, to znamená, kolik aut připadá na jednoho člověka. Pokud z pravděpodobnosti vyjde, že člověk vlastní auto, musí být stále nějaká dostupná, jinak auto nevlastní. Pokud člověk auto má, rozhodne se podle vstupního argumentu transportRatio (výchozí hodnota je 25 %), zda použije městskou hromadnou dopravu, nebo zda použije svůj automobil.

Časový údaj, kdy se má generovat autobus je dán číslem 79 200 vyděleným počtem autobusů, abychom docílili stavu, že se vygenerují vždy všechny autobusové okruhy s dostatečnou časovou rezervou.

Okruh je tedy vygenerován a autobus stojí v depu. Předpokládáme, že autobus je třeba nastartovat, tlakovat vzduchové okruhy a dojet na první zastávku. Pro zmíněný účel poslouží normální rozdělení se střední hodnotou 500 sekund a rozptylem 100 sekund. Autobus dojel na první zastávku a cestující nastupují. Průměrný čas nastoupení jednoho cestujícího je dán normálním rozdělením se středem 2,5s a rozptyl je roven 0,5 sekundy. V modelu nastupuje jede pasažér po druhém. Model nereflektuje situaci, že reálný autobus má více dveří, proto je zmíněná hodnota nižší.

Po nastoupení a vystoupení všech cestujících se autobus rozjede na další zastávku. Doba jízdy je dána normálním rozdělením se středem 84 sekund a rozptylem 10 sekund. Autobus poté jezdí v cyklu mezi zastávkami. Na konečné zastávce jsou všichni cestující nuceni vystoupit a autobus jede zpět do depa dle normálního rozdělení se střední hodnotou 500 sekund a rozptyl opět 100 sekund. Dle ujeté vzdálenosti model počítá, kolik CO2 autobus/automobil vyprodukoval a číslo je přičteno k celkovému znečištění za den. Na konci simulace je vypsána statistika o celkovém znečištění.

Experimenty

Validace modelu

Předpokládáme normální pracovní den. Dále bude cestovat celkem 250 000 lidí. Autobusů bude k dispozici celkem 370 a počet dostupných aut bude 60 000. Pravděpodobnost na použití MHD, pokud obyvatel vlastní automobil je 25 %.

Cestující autobusem	Cestující automobilem	Emise autobusů	Emise automobilů	Emise dle zdroje	Emise dle modelu
205 214 osob	44 786 osob	6 289 kg	59 663 kg	43 278 kg	65 953 kg

V prvním experimentu se snažíme porovnat reálné hodnoty uvedené ve zdroji s hodnotami, které produkuje simulovaný model města. Výstupní hodnota uhlíkové stopy je lehce nadsazená, ale v podstatě reflektuje reálnou situaci. Emise automobilů jsou oproti skutečnosti nadhodnocené, protože pro jednoduchost modelu předpokládáme, že v automobilu cestuje vždy pouze jeden člověk.

Experiment 2

Provozovatel se rozhodl snížit cenu jízdného a zvýšil celkový počet autobusů na 500. Více lidí tedy využívá městskou hromadnou dopravu. Pravděpodobnost, že obyvatel použije na svoji cestu MHD místo automobilu je zvýšena z původních 25 % na 50 %. Ostatní parametry zůstaly nezměněné.

Autobus	Automobil	Emise autobusů	Emise automobilů	Emise dle experimentu	Původní emise dle modelu
220 353 osob	29 647 osob	7 827 kg	39 559 kg	47 387 kg	65 953 kg

Z experimentu je zřejmé, že emise v porovnání s prvním experimentem klesly o necelých 29 %.

Experiment 3

Nastala extrémní situace. Vyhláška města zakazuje vjezd osobních vozidel do města. Všichni obyvatelé jsou tedy nuceni využít MHD. Dopravce zvýšil počet autobusů na 800, aby zvládl větší nápor na autobusových zastávkách.

Autobus	Automobil	Emise autobusů	Emise automobilů	Emise dle experimentu	Původní emise dle modelu
250 000 osob	0 osob	13 744 kg	0 kg	13 744 kg	65 953 kg

Dle výsledku experimentu s velmi nepravděpodobnou situací, že místní vyhláška zakázala jízdu automobilů ve městě jsme docílili snížení emisí o necelých 80 %.

Experiment 4

Ekonomické výsledky dopravce jsou znepokojující, proto se rozhodl dramaticky zvýšit cenu jízdného. Pro některé obyvatele se to stává nepříjemné. Tudíž se více obyvatel rozhodne, že si pořídí vlastní automobil a nebude cestu realizovat pomocí MHD. Dostupných aut je 100 000 kusů, pravděpodobnost na využití MHD, pokud vlastní obywatel automobil je stejná jako v prvním experimentu 25 %.

Autobus	Automobil	Emise autobusů	Emise automobilů	Emise dle experimentu	Původní emise dle modelu
175 416 osob	74 584 osob	5 855 kg	99 259 kg	105 114 kg	65 953 kg

Experiment ukazuje poměrně znepokojivé hodnoty emisí, jež oproti prvnímu experimentu vzrostly téměř o 60 %, což je poměrně alarmující.

Závěr

Dle výsledku prvního experimentu jsme mohli zjistit, že simulovaný model města poměrně dobře reflektuje reálnou situaci. Z následných experimentů odvodíme, že městská hromadná doprava je zcela nepostradatelnou věcí. Lidé většinou cestují sami v automobilu, a to je z hlediska uhlíkové stopy velmi znepokojivé. Autobusy produkují téměř 7x vyšší emise než automobil, ale cestuje nimi podstatně více lidí. Z experimentů vyplývá, že nejmenší znečištění nastane, pokud všichni lidé budou cestovat MHD, což zcela určitě odpovídá realitě.

Sabína Gregušová

Filip Weigel

Petriho síť

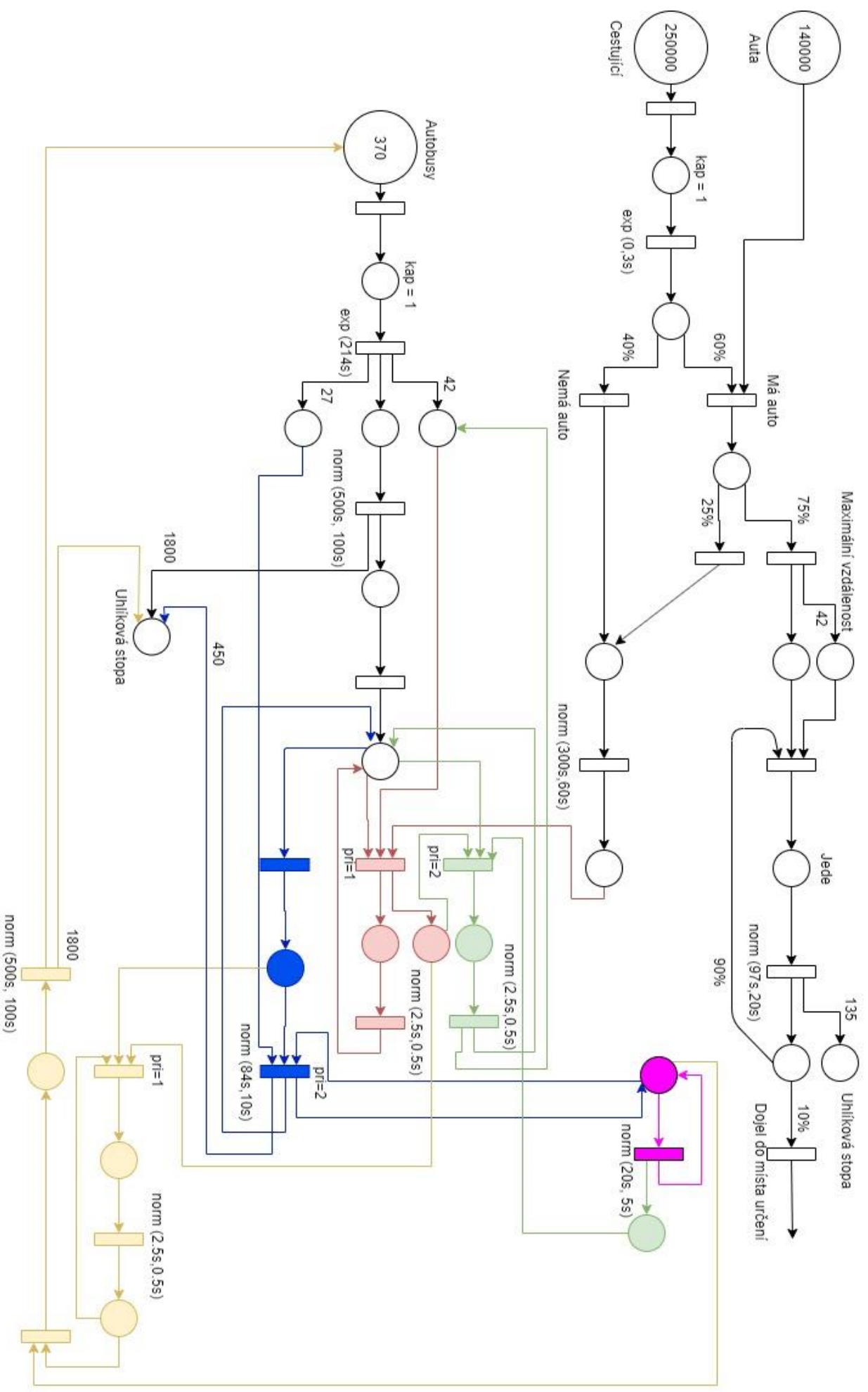
Vycházíme z předpokladu, že je k dispozici 140 tisíc automobilů, 250 tisíc cestujících a 370 autobusů. Cestující se generuje s exponenciálním rozdělením (0,3 sekundy). Poté se s poměrem 60/40 rozhodne, zda vlastní automobil, či nikoliv. V případě, že má automobil existuje 25% šance, že pojede MHD. Pokud jede automobilem maximální délka, kterou může urazit je 42 kilometrů. Předpokládáme, že 1 km urazí dle normálního rozdělení se směrodatnou odchylkou 97 sekund a rozptylem 20 sekund. Za každý ujetý kilometr vyprodukuje v 135 gramů CO₂. Dále s pravděpodobností 90 % pojede další kilometr, jinak opustí systém. V případě, že nemá auto a rozhodl se jet MHD dle normálního rozdělení jde 300 sekund na zastávku s rozptylem 60 sekund.

Máme k dispozici celkem 370 autobusů, které stojí v depu. Dle exponenciálního rozdělení autobus vyrazí za 214 sekund z depa na svoji túru. Při výjezdu z depa vygeneruje 27 zastávek a kapacitu autobusu 42 míst. Dále jede na první zastávku dle normálního rozdělení 500 sekund s rozptylem 100 sekund. Předpokládáme, že ujede vzdálenost, která vede k vyprodukování 1 800 gramů CO₂. Po dojetí na první zastávku má nejvyšší prioritu vystupování cestujících, ovšem autobus je prázdný a nikdo nevystupuje (zelená barva).

Následujícím stavem je tedy nastupování cestujících (červená barva). V cyklu nastupují cestující do autobusu. Jeden cestující nastoupí v průměru za 2,5 sekundy s rozptylem 0,5 sekundy. Nastupují pouze v případě, že je v autobuse volné místo anebo pokud někdo stojí na zastávce. Poté se autobus vydá na další zastávku (modrá barva). Na další zastávku jede dle exponenciálního rozdělení se středem 84 sekund a rozptylem 10 sekund. Vyprodukuje při tom 450 gramů CO₂. Nyní aktivuje timer, který počítá kolik lidí má na další zastávce vystoupit dle normálního rozdělení střední hodnota 20 sekund a rozptylem 5 sekund. V případě, že dojede na další zastávku deaktivuje timer a cyklus se opakuje.

Na poslední zastávku dojede opět s normálním rozdělením se středem 84 sekund a rozptylem 10 sekund. Všichni cestující musí vystoupit. Autobus deaktivuje timer pro vystupování lidí a vrací se zpět do depa se středem 500 sekund, rozptyl 100 sekund a vyprodukuje 1 800 gramů CO₂.

Petriho síť viz další strana



Zdroje:

- [1] CO2 emissions from cars: facts and figures (infographics): News: European Parliament, 2019, Apr
- [2] Reducing CO2 emissions from passenger cars. Climate Action - European Commission. 2017, Feb
- [3] Volkswagen Golf 5 1.9 TDI 105
- [4] www.autoforum.cz/tmp/magazin/pn/princip_fungovani_motoru_07.jpg
- [5] Emissions from bus travel, viz. <https://www.carbonindependent.org/20.html>
- [6] ACEA, viz. <https://www.acea.be/statistics/tag/category/vehicles-per-capita-by-country>
- [7] NatGeo surveys countries' transit use: guess who comes in last, viz. <https://www.smartcitiesdive.com/ex/sustainablecitiescollective/natgeo-surveys-countries%E2%80%99-transit-use-guess-who-comes-last/9081/>
- [8] Produkce emisí CO₂, CH₄ a N₂O dopravou v ČR – stav a vývoj, viz <https://www.cdv.cz/file/clanek-produkce-emisi-co2-ch4-a-n2o-dopravou-v-cr/>
- [9] Nejpomalejší je Londýn, Praha průměrná, viz. https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/nejpomalejsi-je-londyn-praha-prumerna.A071029_132052_automoto_fdv