Jan Kodada[1], Otto Pastor[2]

Aplikace prediktivního řízení na intermodální přepravní síť

Klíčová slova: *optimalizace, přepravní síť, prediktivní řízení, horizont predikce*

Úvod

Všude přítomná finanční a hospodářská krize se nevyhnula ani odvětví dopravy a logistiky. Neviditelná ruka trhu tak zasáhla jak Eurozónu, tak i Českou republiku. Vzhledem k této situaci poskytovatelé dopravních a logistických služeb, bez ohledu na jejich velikost či působnost, řeší mnoho otázek. Mezi nejčastější patří například jak optimalizovat své náklady, jak zefektivnit procesy, jak optimalizovat lidské zdroje. Nebo jak se vyrovnat se přetlakem nabídky nad poptávkou či jak zefektivnit celou přepravní síť.

Autoři článku [1] popisují různé možnosti optimalizace intermodální přepravní sítě z hlediska časového horizontu a z hlediska role účastníka sítě. Pro optimální řízení přepravní sítě se nabízejí různé možnosti, jež uvádějí autoři článků [2] a [3], které však nezohledňují dynamiku systému. Jednou z možností jak optimalizovat přepravní síť (ze střednědobého hlediska operátora přepravní sítě) dynamicky je využití Prediktivního řízení s klouzavým horizontem.

Prediktivní řízení

MPC – Model based Predictive Control, bývá také nazýváno jako řízení s klouzavým horizontem. MPC je pokročilý způsob řízení, který nalezl široké uplatnění zejména v automobilovém, chemickém průmyslu, ale také v energetice.

Autoři článku [4] ilustrují základní myšlenku prediktivního řízení na způsobu, jakým se hrají šachy. V určitém stavu hry hráč probírá budoucí možné strategie např. čtyři tahy dopředu a subjektivně je hodnotí za účelem vybrat tu nejlepší. Nakonec se pro jednu strategii rozhodne a vykoná její první tah. Po tahu soupeře celý postup znovu opakuje s tím, že již zná poslední tah svého soupeře, který pro něj byl při předchozím rozhodování neznámý a může podle něj aktualizovat svoji herní strategii (zpětná vazba). Opět hodnotí možné strategie na čtyři tahy dopředu. Dobrý šachista se od slabšího šachisty liší tím, že promýšlí své strategie na větší počet tahů dopředu (neboli pracuje s delším horizontem predikce), a dělá při tom méně chyb. Obecně je možné MPC zhodnotit jako vícekrokovou strategii řízení, která se skládá ze dvou hlavních částí. A to sice z predikce budoucích stavů neboli výstupů systému a minimalizace kriteria, které zahrnuje požadavky na optimalitu řízení (kde jsou predikce zahrnuty) [5].

[1] Ing. Jan Kodada, ČVUT FD, doktorand, Ústav logistiky a managementu dopravy

[2] prof. Dr. Ing. Otto Pastor, CSc. ČVUT FD, zástupce vedoucího Ústavu logistiky a managementu dopravy

Formulace řešeného problému

Přepravní síť je tvořena uzly (HUBy), které jsou propojeny přepravními cestami. U každé přepravní cesty je specifikována cena za přepravu jednoho kontejneru, doba přepravy, jízdní řád (vlakový jízdní řád, doby odjezdů tahačů) a její přepravní kapacita. Kontejnery vstupují do vybraných HUBů a součástí každého kontejneru je jeho cílový HUB a termín, do kterého musí být doručen. Dále má každý HUB určenou svou skladovací kapacitu a cenu za skladování kontejnerů.

Cílem řešené úlohy je včas přepravit všechny zásilky (pro potřeby tohoto článku kontejnery) do jejich cílových HUBů a minimalizovat přitom náklady. Výstupem optimalizace je strategie, která na horizontu predikce určuje, které kontejnery, kdy a kterými přepravními cestami převézt.

Notace

V úloze se vyskytuje mnoho proměnných, parametrů a různých indexů. K formulaci úlohy je třeba nejprve zavést vhodnou notaci.

Stavy a proměnné

$x_i^{j,d}(k)$ ....počet kontejnerů skladovaných v hubu s indexem *i* v periodě vzorkování *k*, které míří do hubu s indexem *j* a k doručení jim zbývá *d* period vzorkování

$u_i^{j,d}(k)$ ....počet kontejnerů, které v periodě vzorkování *k* vstoupily do přepravní trasy s indexem *i*, míří do hubu s indexem *j* a k doručení jim zbývá *d* period vzorkování

$d_i^{j,d}(k)$ ....počet kontejnerů, které v periodě vzorkování *k* vstoupily do přepravní v místě hubu s indexem *i*, míří do hubu s indexem *j* a k doručení jim zbývá *d* period vzorkování

Stavy a proměnné

$a(i)$ ....index výchozího hubu pro přepravní trasu s indexem *i*

$b(i)$ ....index cílového hubu pro přepravní trasu s indexem *i*

$T(i)$ ....počet period vzorkování, které trvá cesta přepravní trasou s indexem *i*

A_i^j ....množina indexů všech přepravních tras, které vedou z hubu s indexem *i* do hubu s indexem *j*

Ceny a penále

$s(i)$ ....cena za skladování jednoho kontejneru po dobu periody vzorkování v hubu s indexem *i*

$c(i)$ ....cena za přepravu jednoho kontejneru přepravní trasou s indexem *i*

$p(d)$ ....penále za kontejner, kterému zbývá *d* period vzorkování k doručení (toto penále je účtováno za danou periodu vzorkování)

Limity přepravní tras a skladů

$\overline{x}_i$ ....maximální kontejnerová kapacita skladu v hubu s indexem *i*

$\overline{u}_i(k)$ ....maximální počet kontejnerů, které v periodě vzorkování *k* mohou vstoupit do přepravní trasy s indexem *i*

Pomocné proměnné

n_H ....počet hubů

n_T ....počet přepravních tras

N ....horizont predikce (v periodách vzorkování)

$d_{\max}$ ....maximální uvažovaná doba k doručení (v periodách vzorkování)

$T_{\max}$ ....maximální uvažovaná doba přepravy (v periodách vzorkování)

Matematická formulace

Ceny

celková cena za skladování v periodě vzorkování *k*

$$J_S(k) = \sum_{i=1}^{n_H} s(i) \sum_{j=1}^{n_H} \sum_{d=0}^{d_{\max}} x_i^{j,d}(k), \tag{1}$$

celková cena za aktivace přepravních tras v periodě vzorkování *k*

$$J_T(k) = \sum_{i=1}^{n_T} c(i) \sum_{j=1}^{n_H} \sum_{d=0}^{d_{\max}} u_i^{j,d}(k), \tag{2}$$

celkové penále v periodě vzorkování *k*

$$J_P(k) = \sum_{d=0}^{d_{\max}} p(d) \sum_{i=1}^{n_H} \sum_{j=1}^{n_H} x_i^{j,d}(k) + \sum_{m=1}^{T_{\max}} \sum_{d=0}^{d_{\max}} p(\min\{0, d-m\}) \sum_{i=1}^{n_H} \sum_{j=1}^{n_H} u_i^{j,d}(k-m), \tag{3}$$

celková cena v periodě vzorkování *k*

$$J(k) = J_S(k) + J_T(k) + J_P(k). \tag{4}$$

Omezení

Omezení na kapacitu přepravní trasy s indexem *i* v periodě vzorkování *k*

$$\sum_{j=1}^{n_H} \sum_{d=0}^{d_{\max}} u_i^{j,d}(k) \le \bar{u}_i(k), \tag{5}$$

souhrnné omezení na všechny trasy v periodě vzorkování bude dále označováno jako

$$u(k) \in \overline{U}(k) \tag{6}$$

Omezení na skladovací kapacitu HUBu s indexem *i* v periodě vzorkování *k*

$$\sum_{j=1}^{n_H} \sum_{d=0}^{d_{\max}} x_i^{j,d}(k) \le \bar{x}_i, \tag{7}$$

souhrnné omezení pro všechny sklady v periodě vzorkování bude dále označováno jako

$$x(k) \in \overline{X}(k). \tag{8}$$

Časový vývoj přepravní sítě

Časový vývoj počtu kontejnerů v hubu s indexem *i*, které míří do hubu s indexem *j* a k doručení jim zbývá *d>0* period vzorkování

$$x_i^{j,d}(k) = x_i^{j,d+1}(k-1) + d_i^{j,d}(k) - \sum_{r \in A_i^j} u_r^{j,d}(k) + \sum_{r \in A_i^j} u_r^{j,d+T(r)}(k - T(r)), \tag{9}$$

a speciálně pro stavy kontejnerů, kterým k doručení zbývá nula period vzorkování

$$x_i^{j,0}(k) = x_i^{j,0}(k-1) + x_i^{j,1}(k-1) + d_i^{j,0}(k) - \sum_{r \in A_i^j} u_r^{j,0}(k) + \sum_{r \in A_i^j} \sum_{m=0}^{T(r)} u_r^{j,m}(k - T(r)), \tag{10}$$

a dále speciálně pro kontejnery, které dospěly do místa určení

$$x_i^{i,0}(k) = 0. \tag{11}$$

Souhrnně lze časový vývoj přepravní sítě zapsat jako

$$x(k) = f\left(x(k-1), d(k), u(k), \ldots, u(k - T_{\max})\right). \tag{12}$$

Formulace prediktivní optimalizace

Prediktivní formulace minimalizuje součet celkových nákladů přepravní sítě na *N* periodách vzorkování od současného okamžiku do budoucnosti (horizont predikce). Souhrnně lze úlohu zapsat jako lineární diskrétní programování

$$\min_{u(k),\ldots,u(k+N)} \sum_{l=k}^{N} J(l) \qquad s.t. \qquad \begin{array}{c} u(k) \in \overline{U}(k), \ldots, u(k+N) \in \overline{U}(k+N) \\ x(k) \in \overline{X}(k), \ldots, x(k+N) \in \overline{X}(k+N) \\ x(k) = f\left(x(k-1), d(k), u(k), \ldots, u(k-T_{\max})\right) \end{array}, \tag{13}$$

Při zavedení vhodné notace lze tuto úlohu zapsat v maticovém tvaru. Pro periodu vzorkování k zavedeme vektor skladových zásob *x(k)*, vektor aktivace přepravních tras *u(k)* a vektor nových kontejnerů *d(k)* vstupujících do přepravní sítě

$$\begin{aligned} x(k) &= \left(x_1^{1,0\prime}(k) \quad \ldots \quad x_1^{1,d_{\max}\prime}(k) \;\vdots\; \ldots \;\vdots\; x_1^{n_H,0\prime}(k) \quad \ldots \quad x_1^{n_H,d_{\max}\prime}(k) \;\middle|\; x_2^{1,0\prime}(k) \quad \ldots\right)^T, \\ u(k) &= \left(u_1^{1,0\prime}(k) \quad \ldots \quad u_1^{1,d_{\max}\prime}(k) \;\vdots\; \ldots \;\vdots\; u_1^{n_H,0\prime}(k) \quad \ldots \quad u_1^{n_H,d_{\max}\prime}(k) \;\middle|\; u_2^{1,0\prime}(k) \quad \ldots\right)^T, \\ d(k) &= \left(d_1^{1,0\prime}(k) \quad \ldots \quad d_1^{1,d_{\max}\prime}(k) \;\vdots\; \ldots \;\vdots\; d_1^{n_H,0\prime}(k) \quad \ldots \quad d_1^{n_H,d_{\max}\prime}(k) \;\middle|\; d_2^{1,0\prime}(k) \quad \ldots\right)^T. \end{aligned} \tag{14}$$

Na celém horizontu predikce pak stavy skladů, aktivace přepravních cesta a vstupy nových kontejnerů můžeme poskládat jako

$$X = \begin{pmatrix} x(k+1) \\ \vdots \\ x(k+N) \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} u(k-T_{\max}) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} d(k) \\ \vdots \\ d(k+N-1) \end{pmatrix}. \tag{15}$$

Ze stavu skladů *x(k)* v periodě vzorkování *k* a ze znalosti aktivací přepravních tras *U* a vstupu nových kontejnerů *D* můžeme spočítat stavy skladů na horizontu predikce

$$X = Sx(k) + HU + D, \tag{16}$$

kde *S* a *H* jsou matice sestavené na základě znalosti topologie přepravní sítě.

Náklady přepravní sítě lze zapsat jako

$$J(k) = C_S^T X + C_T^T U + C_{PX}^T X + C_{PU}^T U, \tag{17}$$

kde C_S, C_T, C_{PX}, C_{PU} jsou sestaveny z rovnice (1), (2) a (3). Náklady lze reformulovat jako lineární kritérium $J(k) = C^T U + c_0$. Podobně omezení na kapacity skladů a přepravních tras lze naformulovat jako lineární ve tvaru $AU \leq b$ podle rovnic (5) a (7). Finální optimalizační úloha má pak tvar lineárního diskrétního programování v maticovém zápisu

$$\min_U C^T U, \quad AU \leq b. \tag{18}$$

Aplikace na reálnou přepravní síť

V této kapitole bude popsáno a demonstrováno použití optimalizačního algoritmu popsaného v předchozí kapitole na komplexní přepravní problém reálné velikosti. Pro demonstraci bude vybrána přepravní síť společnosti Metrans.

Přepravní síť

Do této sítě vstupují kontejnery ze čtyř Evropských přístavů, které jsou označeny:

HAM	Hamburk
BRE	Bremerhaven
ROT	Rotterdam
KOP	Koper

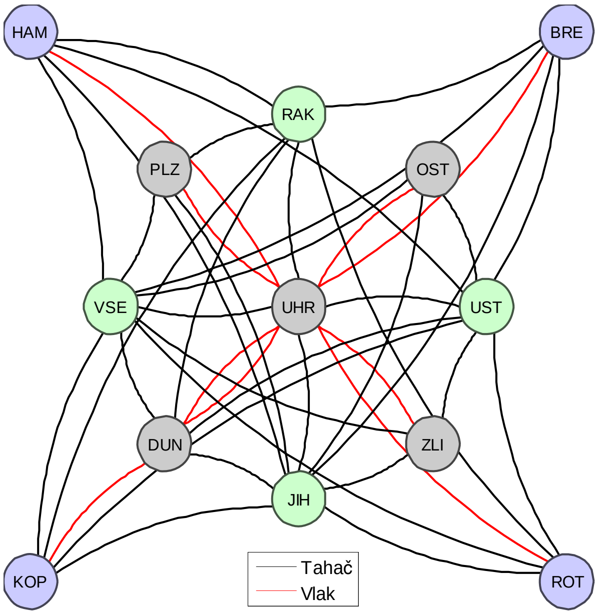
Jako příjemce těchto kontejnerů (zboží) jsou zvolena čtyři města rovnoměrně rozmístěná po České republice, které jsou označena:

RAK	Rakovník
UST	Ústí nad Orlicí
JIH	Jihlava
VSE	Vsetín

Společnost Metrans využívá k přepravě z výše uvedených Evropských přístavů svoje kontejnerové terminály. Pro přehlednost budou tyto terminály označeny:

UHR	Uhříněves
PLZ	Plzeň
OST	Ostrava
ZLI	Zlín
DUN	Dunajská Streda

Přepravní sít a propojení jednotlivých HUBů je znázorněno na obr. 1, kde červené trasy znázorňují vlaková spojení a černé trasy znázorňují trasy tahačů.

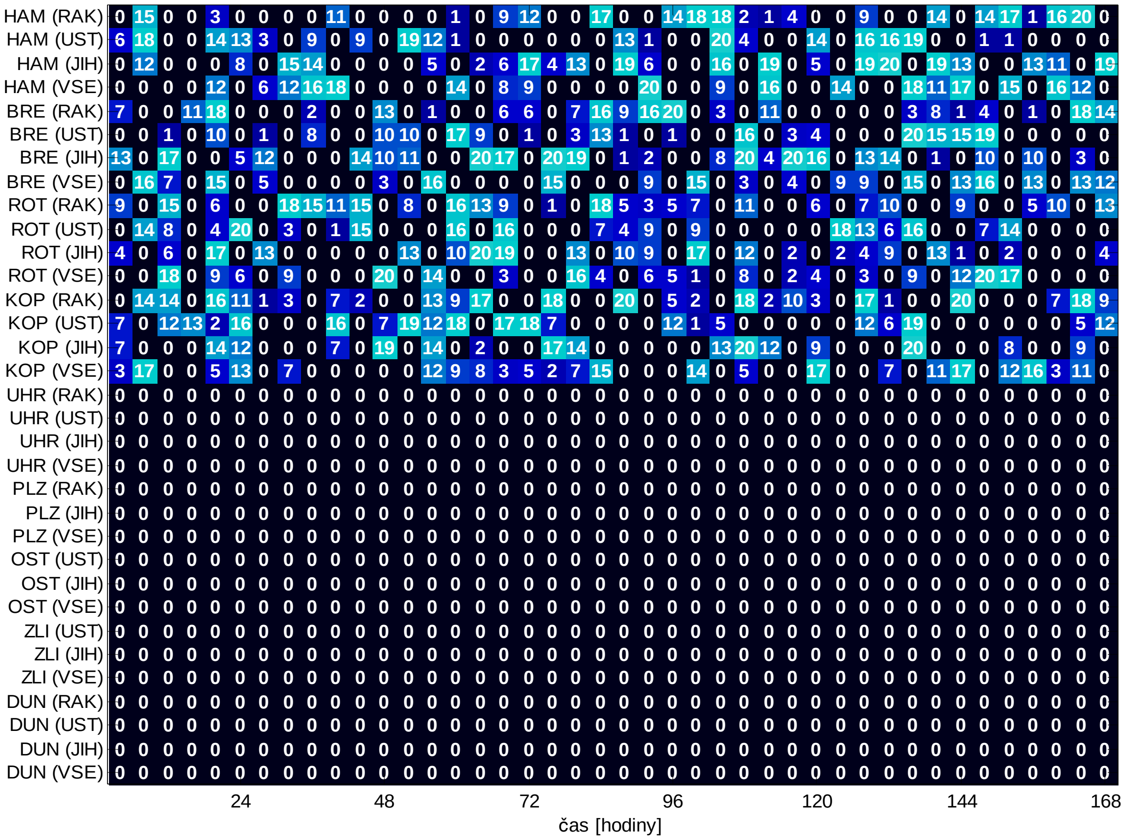


Obr. 1 – Reálná přepravní síť

Kontejnery vstupující do přepravní sítě

Aby bylo možné porovnávat jednotlivé strategie řízení přepravní sítě, je nutné nejprve nadefinovat, jak do přepravní sítě jednotlivé kontejnery vstupují. Zvolené zadání je znázorněno na obr 2. Kde svislá osa značí vstupní HUB s uvedením cílového HUBu v závorce. Vodorovná osa značí čas v hodinách s výhledem na jeden týden.

Maximální doba doručení kontejneru k příjemci je definována na 3 dny. Za překročení doby dodání kontejneru je zvoleno penále 1000 EUR, za každý den prodlení. Perioda vzorkování je zvolena na 4 hod. To znamená, že každé čtyři hodiny proběhne zjištění stavu přepravní sítě, predikce nových kontejnerů a naplánování jednotlivých přepravních tras (s ohledem na klouzavý horizont predikce). Horizont predikce (optimalizace) je zvolen na 7 dnů, tj. celkem 42 jednotlivých kroků pro zvolenou periodu vzorkování.



Obr. 2 – Kontejnery vstupující do přepravní sítě

Řešení reálné přepravní sítě bude znázorněno na čtyřech možných způsobech řešení optimalizace. Ukazatele jednotlivých strategií řízení budou porovnány vždy v okamžiku, kdy budou všechny kontejnery přepraveny do cíle.

Varianty optimalizace

V této kapitole bude popsáno porovnání jednotlivých variant optimalizací.

V1 – Plná optimalizace

Je strategie řízení minimalizující celkové náklady na přepravu a zohledňující penále za překročení doby dodání. Jedná se o multi-kriteriální optimalizaci uvažující současně cenu za přepravu, skladování a cenu případného penále.

V2 – Maximální rychlost

Je strategie řízení minimalizující dobu přepravy bez ohledu na cenu přepravy. V podstatě používá obdobný algoritmus jako V1 s tím rozdílem, že kritérium je rozšířeno o „fiktivní“ progresivní penále, které je úměrné době přepravy každého kontejneru. Váha (cena) tohoto penále výrazně převyšuje cenu za přepravu a skladování. To způsobí, že optimalizace vždy nejprve vybere nejrychlejší přepravní trasu a tu levnější vybírá pouze v případě, že jsou časově ekvivalentní. Modifikace této varianty oproti variantě V1 znamená úpravu hodnot koeficientu *p(d)* udávajícího penále za kontejner, kterému zbývá *d* period vzorkování k nejzazšímu termínu doručení.

Příklad možné úpravy

$$\overline{p}(k) = 1000 c_{\max} / k, \tag{19}$$

kde $c_{\max}$ je maximum přes koeficienty *c(i)* a *s(i)*, tj. cena nejdražšího skladu nebo cena nejdražší přepravní trasy.

V3 – První možná trasa

Je strategie řízení která pro kontejnery čekající v HUBu vybírá vždy první možnou přepravu, která míří směrem k místu určení (nemusí mířit přímo do místa určení). V případě více možností je vybrána vždy cenově výhodnější kombinace. Této varianty je dosahováno rozšířením kritéria o vysoké „fiktivní" penále za využití skladu. Modifikace této varianty oproti variantě V1 znamená úpravu umělé navýšení cenového koeficientu *s(i)*, například na tisíci násobek

$$\overline{s}(k) = 1000 s(k). \tag{20}$$

V4 – Nejlevnější ignorující penále

Je strategie řízení, která minimalizuje náklady na přepravu, avšak nezohledňuje penále za překročení doby přepravy. Této varianty je dosahováno absencí členu kritéria zohledňující penále za překročení doby přepravy. Modifikace této varianty oproti variantě V1 znamená vynulování penalizačního koeficientu

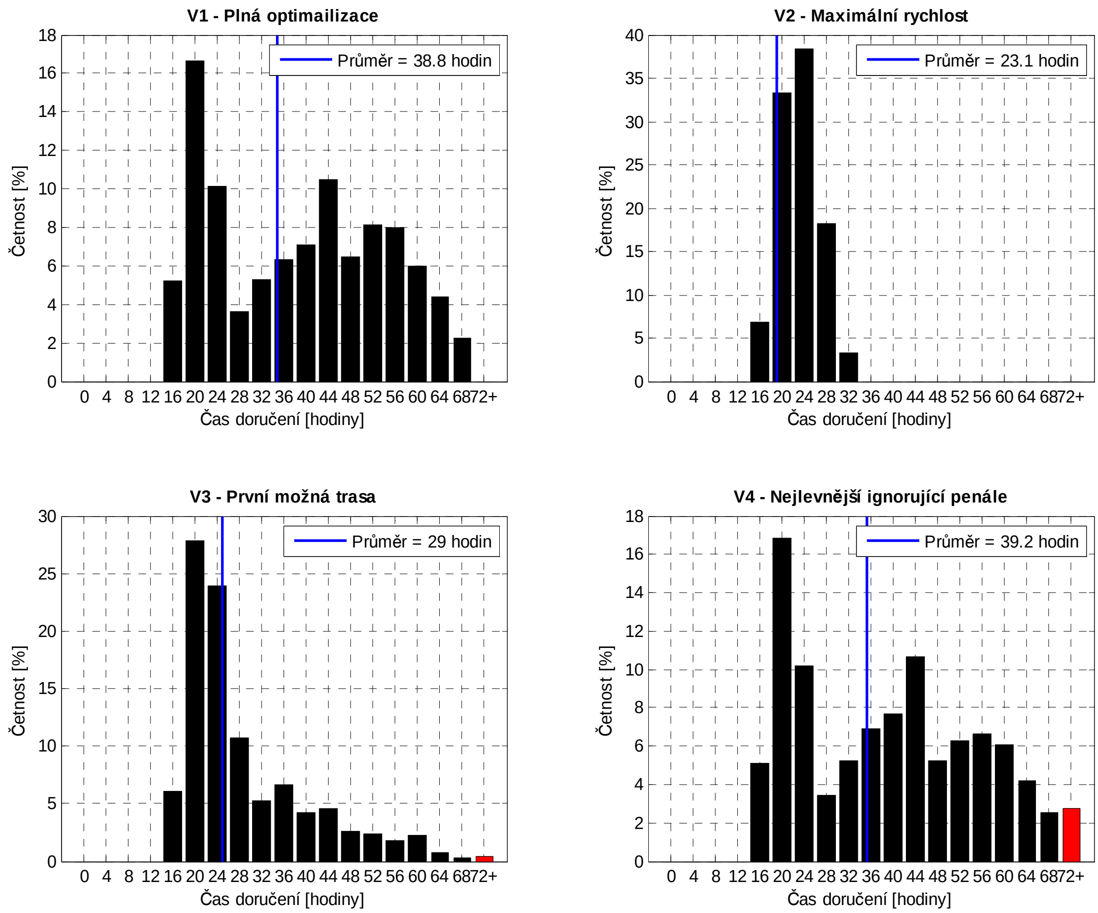
$$\overline{p}(k) = 0. \tag{21}$$

Výsledky na reálné přepravní síti

V této kapitole budou porovnány jednotlivé výsledky variant optimalizací (V1 až V4) z hlediska doby přepravy, využití přepravních cest a výsledné ceny.

Doba přepravy

Histogram znázorněný na obr. 3 zobrazuje průměrnou dobu přepravy pro jednotlivé varianty optimalizace reálné přepravní sítě.

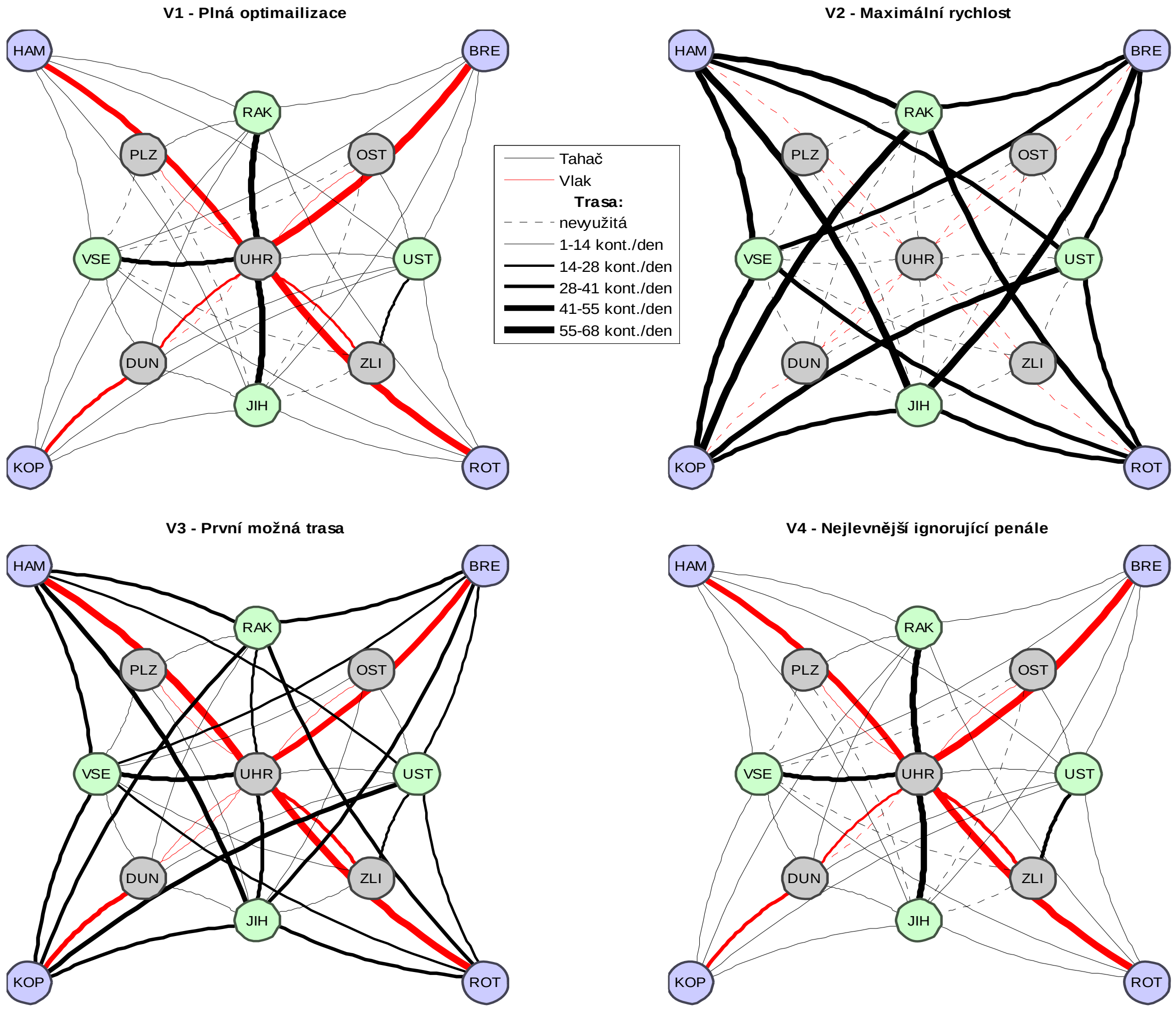


Obr. 3 – Doba dodání pro V1-V4

Průměrná doba dodání se pohybuje v intervalu od 23 do 39 hodin. Kdy nejrychlejší dodání všech kontejnerů nabízí varianta optimalizace V2 s průměrnou dobou doručení 23 hodin a 6 minnut. Nejpomalejší je varianta V4 s průměrnou dobou doručení 39 hodin a 12 minut. Z obrázku varianty V1 je možné vyčíst, že v průběhu šestnácté až dvacáté hodiny bylo přepraveno 5% všech kontejnerů. Mezi dvacátou a dvacátoučtvrtou hodinou nastala špička a bylo přepraveno 16,4% všech kontejnerů.

Využití přepravních cest

Každá výše popsaná strategie využívá jinak přepravní trasy a jejich kapacitu. Využití přepravních tras jednotlivými strategiemi optimalizace je znázorněno na obr. 4.

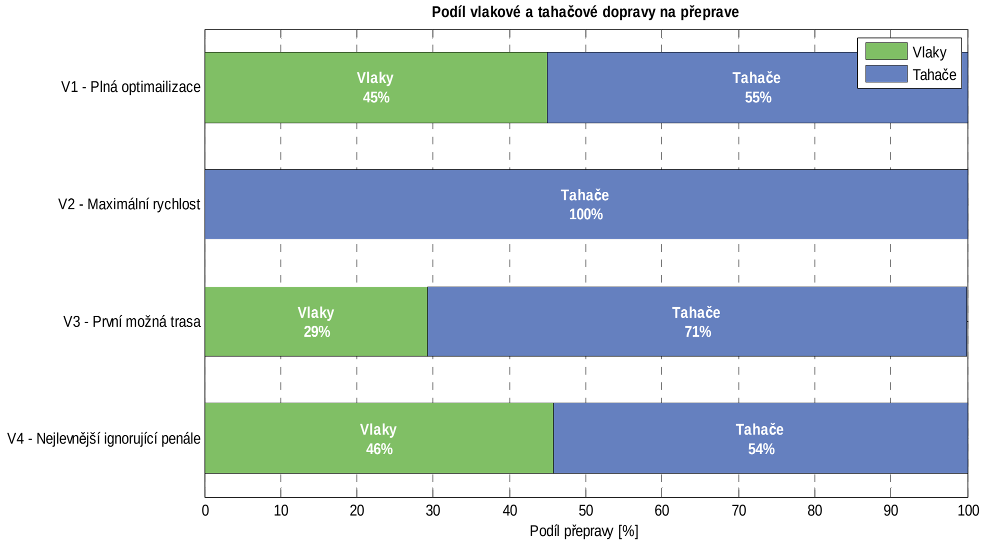


Obr. 4 – Využití přepravních tras pro V1-V4

Kde síla čáry vyjadřuje průměrný počet kontejnerů přepravených danou trasou za den. Nevyužitá přepravní trasa je znázorněna čárkovaně. Červeně je na obrázku znázorněna přeprava vlakem a černě přeprava tahačem.

Z obrázku varianty V1 je možné vyčíst, že u této varianty je nejvíce využíváno železniční přepravy a to zejména mezi Uhříněvsí a jednotlivými přístavy (Hamburg, Bremerhaven Rotterdam a Koper). Oproti tomu varianta V2 využívá nejvíce silniční přepravy a železniční přepravu nevyužívá. Varianty V3 a V4 kombinují více mezi oběma druhy přepravy.

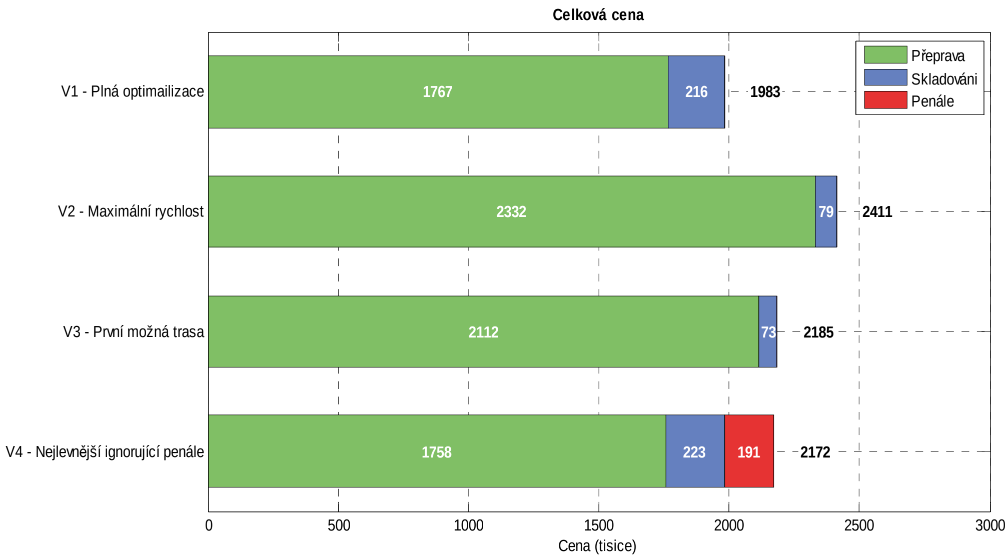
Obr. 5 udává využití jednotlivých druhů přeprav pro jednotlivé strategie optimalizace. Nejvyrovnanějšího podílu železniční a silniční přepravy dosahuje varianta V4 a to v poměru 46:54%. Varianta V2 využívá ze 100% pouze silniční přepravy.



Obr. 5 – Využití druhů přeprav pro V1-V4

Celkové náklady

Porovnání jednotlivých strategií z hlediska celkových nákladů je graficky znázorněno na obr. 6, kde jsou znázorněny jednotlivé náklady pro každou strategii optimalizace.



Obr. 6 – Celkové náklady pro V1-V4

Svislá osa znázorňuje jednotlivé varianty. Na vodorovné ose jsou zeleně znázorněny náklady na přepravu, modře náklady na skladování a červeně jsou znázorněny náklady na penále za překročení povolené doby přepravy. Výsledné ceny jsou uváděny v tisících EUR a jsou zaokrouhlené na celé tisíce.

Celkové náklady se pohybují v rozmezí 1983 – 2411 tisíc EUR, kdy rozdíl mezi nejlevnější a nejdražší variantou je 428 tisíc EUR. Z hlediska celkových nákladů vychází nejvýhodněji varianta optimalizace V1. Nejdražší je varianta V2. Varianty

V1,V2 a V3 nemají žádné náklady na penále za překročení maximální možné doby přepravy. Optimální z hlediska nákladů na přepravu je varianta V1, z hlediska nákladů na skladování je to pak varianta V3.

Závěr

Jednou z možností jak optimalizovat procesy a celkové náklady intermodální přepravní sítě je možnost využití prediktivního řízení s klouzavým horizontem.

Uvedený článek popisuje možnost optimalizace intermodální přepravní sítě právě touto metodou. Článek dále popisuje postup sestavení optimalizačního algoritmu pro tuto úlohu a předkládá výsledky jednotlivých optimalizačních postupů.

Výhodou prediktivního řízení je, že řeší optimalizační úlohu dynamicky v čase a pružně tak reaguje na nové zpřesňující informace, které vstupují do systému a způsobují nesoulad mezi predikcí a skutečností.

Vzhledem využívání prediktivního řízení s klouzavým horizontem v energetice, ale i chemickém a automobilovém průmyslu a k jeho pozitivním vlastnostem je předpoklad k jeho dalšímu rozšiřování a to i v oblasti logistických problémů.

Literatura:

[1] Carris, A., Macharis, C., Janssens, G. K. (2008). Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects, *Transportation Planning and Technology*, č. 3,

[2] Francis, P., Zhang, G., Smilowitz, K.(2007). Improved modeling and solution methods for the multi-resource routing problem, *European Journal of Operational Research* č. 3, 1045-1059

[3] Ziliaskopoulos, A., Wardell, W. (2000) An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays, *European Journal of Operational Research* č. 3, 486-502

[4] Schlegel, M., Sobota, J.(2007). Prediktivní regulátor pro průmyslovou praxi, *AUTOMA č.2*, ISSN 1210-9592

[5] Belda, K., Böhm, J. (2007). Prediktivní řízení pro mechatronické systémy, *AUTOMATIZACE* č. 4, ISSN 0005-125X

Praha, srpen 2013 Lektorovali: Ing. Karel Šindelář, VŠE, Fakulta podnikohospodářská

Ing. Jan Engel,VŠE, Fakulta mezinárodních vztahů