

## Seminár 2: Menová reforma v Tramtárii – samostatné objavovanie matematického problému

### Ciele

Umožniť študentom zažiť proces riešenia otvoreného problému bez zjavného spôsobu riešenia a otvoriť diskusiu o tom, čo správne a úplné riešenie úlohy obsahuje.

### Úvodný komentár

Cieľom tohto seminára nie je študentom predať isté konkrétne znalosti, ale dať im príležitosť zažiť si objavný riešiteľský proces. Sada úloh, ktoré sú na seminár pripravené, nie je typickým reprezentantom úloh MO, považujeme však za dôležité so študentmi precvičovať rozličné typy úloh. Zároveň tento seminár slúži na otvorenie diskusie o tom, čo obsahuje úplné a dôkladné riešenie matematickej úlohy.

### Úlohy a riešenia

**Úloha 2.1.** [[?], úloha 43] V Tramtárii chcú zaviesť novú základnú peňažnú jednotku: toliar. V spojitosti s reformou sa vynorila otázka: aké majú mať hodnoty mince, ktoré pripraví mincovňa? Starí obyvatelia Tramtárie považovali 3 a 5 za šťastné čísla. Preto popredný historik navrhol, aby sa obmedzili na razenie troj- a päťtoliarových mincí. Svoj návrh zdôvodňoval takto: troj- a päťtoliarovými mincami možno vyplatiť hociktorú celočíselnú sumu a to skoro vždy presne, bez vrátenia. Ten, kto peniaze dostáva, musí niečo vrátiť iba vtedy, ak je vyplácaná suma 1, 2, 4 alebo 7 toliarov. Bola by to pravda?

**Riešenie\*.** Úloha nie je ľahká: ak je tvrdenie pravdivé, tak naraz treba pre všetky celé čísla dokázať, že toľko toliarov možno vyplatiť troj- a päťtoliarovými mincami (v prípade 1, 2, 4 a 7 s vydaním, inak bez neho) – a ak to nie je pravda, tak o nejakom celom čísle treba dokázať, že toľko toliarov nemožno nijakým spôsobom vyplatiť (v prípade 1, 2, 4 a 7 ani s vydaním, inak bez vydania).

O to posledné sa márne pokúšame: naopak, ak vezmeme hocikaké celé číslo, po väčšom alebo menšom počte pokusov vždy nájdeme nejaký spôsob výplaty. To poukazuje na to, že tvrdenie je asi pravdivé.

Ale v tom prípade bude najúčelnejšie, ak celé čísla berieme radom a s každým jednotlivým sa o to pokúsime.

Napríklad 1 toliar možno vyplatiť tak, že z dvoch kusov trojtoliarníkových mincí vydáme päťtoliarníkovú. Stručne:

$$1 = 2 \cdot 3 - 5.$$

Podobne

$$2 = 5 - 3.$$

3 toliare možno vyplatiť jednou mincou. 4 toliare môžeme vyplatiť tak, že „zdvojnásobíme“ 2 toliare:

$$4 = 2 \cdot 5 - 2 \cdot 3.$$

5 toliarov možno vyplatiť jednou mincou, 6 toliarov dvoma trojtoliarníkovými mincami.  $7 = 3 + 4$ , preto 7 toliarov vyplatíme ako 4 toliare, ale pridáme navyše jednu trojtoliarovú mincu, teda vydáme o 1 menej:

$$7 = 2 \cdot 5 - 3.$$

8 toliarov zase môžeme vyplatiť zdvojnásobením 4, čiže  $8 = 4 \cdot 5 - 4 \cdot 3$ , to sa ale neoplatí, lebo existuje aj jednoduchší spôsob bez vydania:

$$8 = 5 + 3.$$

Tým sme sa dostali k najdôležitejšej hranici: podľa tvrdenia totiž, začínajúc od hodnoty 8, výplatu možno vyplatiť aj bez vydania.

Pretože aj tak nemôžeme do nekonečna pokračovať v pokusoch o spôsobe výplaty jednotlivých súm, začínajúc nejakým číslom musíme nájsť takú súvislosť (vzťah), ktorá zabezpečuje, že v postupnosti

môžeme aj ďalej pokračovať. Čiže ak nejakú sumu toliarov môžeme vyplatiť, samozrejme bez vydania, tak môžeme vyplatiť aj sumu o 1 toliar väčšiu.

Predstavme si, že na stôl sme vyložili sumu  $n$  toliarov, ale sa ukáže, že nie toľko, ale  $n + 1$  toliarov máme vyplatiť. Ako vieme sumu zväčšiť o 1 toliar, keď nemáme jednotoliarovú mincu?

Videli sme, že

$$1 = 2 \cdot 3 - 5.$$

Ak teda zo sumy na stole vezmeme jednu päťtoliarnikovou mincu a nahradíme ju dvoma trojtoliarnikovými, dosiahli sme svoj cieľ.

No dobre, ale čo urobíme v prípade, keď v tej hromade mincí, ktorou sme pôvodne chceli vyplatiť  $n$  toliarov, nie je päťtoliarniková (napr. pre  $n = 9$  sme na stôl vyložili 3 trojtoliarnikové mince, alebo pre  $n = 18$  je tam 6 trojtoliarnikových).

Aj v takomto prípade existuje východisko. Hodnotu 1 toliar možno dostať aj takto:

$$1 = 2 \cdot 5 - 3 \cdot 3$$

a na tomto základe sumu vyloženú na stole môžeme zvýšiť o 1 toliar tak, že odoberieme 3 trojtoliarnikové mince a pridáme 2 päťtoliarnikové.

A aká je situácia, keď sa v pôvodne vyloženej sume nenachádza ani päťtoliarniková, ani 3 trojtoliarnikové mince? Tak tam môžu ležať najviac 2 trojtoliarnikové. Ak sme vyložili väčšiu sumu, tak sú tam aspoň 3 trojtoliarnikové mince, alebo aj jedna päťtoliarniková. (Teda suma, ktorá sa mala vyplatiť, je väčšia ako 6; ale 7 to nemôže byť, lebo 7 toliarov nemôžeme „vyložiť na stôl“, tie môžeme vyplatiť len s vydaním. Zato 8 – ako sme videli – už áno.)

Zhrňme teda podstatu našich úvah. Ak nejakú aspoň 8-toliarovú sumu „vyložíme na stôl“, tak v nej bude

a) buď 5-toliarniková minca,

b) alebo aspoň 3 trojtoliarové mince.

V prípade a) vezmeme päťtoliarnikovou mincu a nahradíme ju dvoma trojtoliarnikovými, v prípade b) vezmeme tri trojtoliarnikové a nahradíme ich dvoma päťtoliarnikovými.

Týmto spôsobom v oboch prípadoch, opierajúcich sa iba o vlastné mince, môžeme na stôl vyložiť aj o 1 toliar viac: vieme vyplatiť bez vydania.

Pretože pri 8 toliaroch už máme spôsob výplaty bez vydania, túto hodnotu – ak inak nie – opakovaním predošlých postov pri zväčšovaní o jednu, manipuláciu s mincami podľa a) alebo b) môžeme zvyšovať po hocikakú požadovanú hodnotu. Tramtárijský historik teda hovoril pravdu.

*Poznámka.* Uvedený postup sa nazýva „existenčný dôkaz“. Cieľom je dôkaz existencie spôsobu výplaty podľa tvrdenia. Spôsobom použitým v dôkaze môžeme teoreticky vyhľadať spôsob výplaty hociktorej sumy, ale v praxi je to dosť ťažkopádne. Ak by sme chceli výplatu 49 toliarov bez vydania uskutočniť touto metódou, tak by sa to stalo takto: na stôl by sme vyložili 8 toliarov v tvare  $5 + 3$ , potom by sme začali mince zamiňať. Situácia na stole sa bude meniť takto:

1 trojtoliar	1 päťtoliar	dovedna	8 toliarov,
3 trojtoliare	0 päťtoliarov	dovedna	9 toliarov,
0 trojtoliarov	2 päťtoliare	dovedna	10 toliarov,
2 trojtoliare	1 päťtoliar	dovedna	11 toliarov,
4 trojtoliare	0 päťtoliarov	dovedna	12 toliarov,
1 trojtoliar	2 päťtoliare	dovedna	13 toliarov, atď.

Je isté, že sa dostaneme aj po 49 toliarov, ale trvalo by to dosť dlho, pokiaľ by sme týmto spôsobom „vykúzlili“ požadovanú sumu. V praxi je užitočné to urobiť šikovnejšie.

**Iné riešenie\*.** Spôsob výplaty pre 1 až 10 toliarov nájdeme tak ako v predchádzajúcom riešení. Pretože každé prirodzené číslo  $n$  dáva po delení tromi buď (I) zvyšok 0, alebo (II) zvyšok 1, alebo (III) zvyšok 2, teda ho možno napísať v tvare (I)  $n = 3k$ , alebo (II)  $n = 3k + 1$  alebo  $n = 3k + 2$  ( $k$  je prirodzené číslo alebo 0) a tak, ak  $n > 10$ , potom

v prípade (I)  $n - 9 = 3k - 9 = 3(k - 3)$ ,

v prípade (II)  $n - 10 = 3k + 1 - 10 = 3k - 9 = 3(k - 3)$ ,

v prípade (III)  $n - 8 = 3k + 2 - 8 = 3k - 6 = 3(k - 2)$

je to kladný celočíselný násobok troch, preto spôsob výplaty  $n$  toliarov dostaneme, ak k sume

v prípade (I) 9 toliarov,

v prípade (II) 10 toliarov,

v prípade (III) 8 toliarov,

pridáme potrebný počet trojtoliarov.

**Komentár.** Je pravdepodobné, že väčšina študentov bude zo začiatku skúšať jednotlivé možnosti, ako zaplatiť malé sumy a až potom sa bude snažiť svoje úvahy zovšeobecniť. Je vhodné študentom klásť otázky, ktoré budú študentov stimulovať k premýšľaniu, či sú ich závery skutočne správne. Ak by sa stalo, že študenti neprídu na druhé riešenie úlohy, bude určite zaujímavé im ho ukázať, keďže ide o veľmi elegantný spôsob, ako sa s úlohou vysporiadať.

**Úloha 2.2.** [[?], úloha 44] K návrhu z predchádzajúcej úlohy došiel upravujúci návrh. Istý občan píše: Uznávam síce, že troj- a päťtoliarovými mincami možno opísaným spôsobom naozaj zaplatiť každú sumu, ale sú to primálne hodnoty. Navrhujem, aby sa razili radšej päť- a osemtoliarové mince. Je zrejmé – zdôvodňoval ďalej –, že berúc do úvahy aj výdavok z peňazí, všetko, čo možno vyplatiť 3 a 5 toliarmi, možno vyplatiť aj 5 a 8 toliarmi. Tiež je zrejmé, že od istého čísla – vlastne v prípade väčších súm toliarov – ani tu netreba vrátiť mince. Je to skutočne také zrejmé?

**Riešenie\*.** Všimnime si, že päťtoliar zostal bez zmeny, len trojtoliar nahradil osemtoliar.

Prvá časť tvrdenia je skutočne zrejmá. Pretože

$$3 = 8 - 5$$

a ak je aj vydanie povolené, tak vlastne nemáme nijaký problém: postupujeme ako pri troj- a päťtoliarových minciach.

Pravdivá je aj druhá časť – hoci to už nie je také samozrejmé. Na základe predošlého môžeme aj teraz použiť na pridanie 1 toliara „recepty“ z predchádzajúcej úlohy.

$$1 = 2 \cdot 3 - 5 = 2(8 - 5) - 5 = 2 \cdot 8 - 2 \cdot 5 - 5 = 2 \cdot 8 - 3 \cdot 5,$$

$$1 = 2 \cdot 5 - 3 \cdot 3 = 2 \cdot 5 - 3(8 - 5) = 2 \cdot 5 - 3 \cdot 8 + 3 \cdot 5 = 5 \cdot 5 - 3 \cdot 8.$$

Teda nejakú sumu vieme zvýšiť o jeden toliar, ale pretože je reč o výplate „bez vydania“, tento rast musíme dosiahnuť výmenou, čiže už z vyložených peňazí musíme vedieť odobrať 3·5 alebo 3·8 toliarov.

Postupné pokračovanie je isté začínajúc sumou, keď je reč o toľkých toliarochoch

1. koľko môžeme vyplatiť päťtoliarmi a osemtoliarmi bez vydania, a to tak, že buď päťtoliarov alebo osemtoliarov máme aspoň 3,

2. od ktorých viac bez najmenej 3 päťtoliarnikov alebo najmenej 3 osemtoliarov určite nevieme vyložiť.

Požiadavku 2 suma

$$26 = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 8$$

a od toho väčšia určite spĺňa, ale požiadavku 1 nie. To platí aj o 27 toliarochoch, avšak 28 už vyhovuje:

$$28 = 4 \cdot 5 + 8.$$

Teda 28 toliarov možno vyplatiť aj bez vydania päťtoliarmi a osemtoliarmi. Vychádzajúc z toho platí, že ak istú (celočíselnú) sumu môžeme takto vyplatiť, potom môžeme vyplatiť aj sumu o 1 toliar väčšiu. Buď tak, že 3 päťtoliare nahradíme 2 osemtoliarmi alebo tak, že 3 osemtoliare nahradíme 5 päťtoliarmi.

**Komentár.** Úloha pravdepodobne nebude pre študentov veľmi náročná, zaujímavá však bude diskusia o tom, aká najväčšia suma sa ešte bez vydávania vyplatiť nedá.

**Úloha 2.3.** [[?], úloha 45] Diskusia, o ktorej sme v predchádzajúcich dvoch úlohách referovali, pokračovala aj ďalej. Boli aj takí, ktorí päť- a osemtoliarové mince považovali za primálne hodnoty a navrhovali väčšie. Návrhy na dve hodnoty toliarov boli napokon tieto:

- a) 8 a 13,
- b) 21 a 34,
- c) 144 a 233.

Autori všetkých troch návrhov tvrdili, že týmito dvojicami hodnôt možno vyplatiť hocikolko (celočíslných) súm toliarov a keď vyplácaná suma je dosť veľká, tak netreba ani vrátiť peniaze. Tvrdenie ktorého z týchto autorov je správne a ktorého nie?

**Riešenie\*.** Čo zabezpečovalo v predchádzajúcej úlohe to, že môžeme aj naďalej súhlasne odpovedať? To, že hodnota novej mince sa rovnala súčtu dvoch predošlých:  $8 = 3 + 5$ . Vynechanú hodnotu (trojtoliar) preto môžeme nahradiť rozdielom teraz používaných  $3 = 8 - 5$ .

Všetky tri tvrdenia sú pravdivé.

I. Práve tak, ako sme v predošlej úlohe prešli od trojtoliarov a päťtoliarov na päťtoliarové a osemtoliarové platidlá, tak môžeme z týchto prejsť na 8- a  $8 + 5 = 13$ -toliarové. Príslušný vzťah je  $5 = 13 - 8$ . S jeho pomocou z „receptov“ riešenia predošlej úlohy môžeme odvodiť nové a na ich základe môžeme napísať aj nové podmienky 1 a 2. Práve tak možno dokázať, že od istého čísla ďalej budú splnené.

II. Ak o hociktorých dvoch menových hodnotách, povedzme o  $a$  a  $b$  ( $a < b$ ) je už dokázané, že pomocou nich možno vyplatiť hocijakú celočíslnú sumu toliarov, a  $t$  od určitého čísla začínajúc všetky väčšie už bez vydania, tak podľa predošlého textu možno dokázať, že to isté platí aj pre menové hodnoty  $b$  a  $a + b$ .

V konečnom dôsledku dôjdeme k tomu, že uvažované dve hodnoty môžu byť hociktoré dve po sebe idúce čísla Fibonacciho postupnosti:

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, \dots$$

Môžu to teda byť 8 a 13, 21 a 34 alebo 144 a 233 – tvrdenia uvedené v úlohe sú vo všetkých prípadoch splnené.

**Úloha 2.4.** [[?], úloha 46] Tri návrhy, ktoré sme uviedli v predchádzajúcej úlohe, neboli náhodné. Starí obyvatelia uctievali nielen čísla 3 a 5, ale aj všetky čísla Fibonacciho postupnosti. Pravdepodobne dospeli až k variáciám týchto čísel, pretože sa objavili aj také návrhy, aby hodnoty dvoch mincí boli

- a) 2 a 8,
- b) 3 a 21,
- c) 21 a 144 toliarov.

Ktorý z týchto troch návrhov je vhodný na zaplatenie hocijakej (celočíselnej) sumy toliarov, dokonca tak, aby sa pri dostatočne veľkej sume nemuselo nič vrátiť?

**Riešenie\*.** Ani jedno.

V prípade a) to môžeme hneď zbrať: totiž osemtoliar môžeme premeniť na 4 dvojtoliare. Ak by teda týmito dvoma hodnotami bolo možné vyplatiť hocijakú (celočíslnú) sumu, tak by sme ju mohli

vyplatiť v samých dvojtoliaroch. To ale nie je pravda: dvojtoliarmi môžeme vyplatiť len párnú sumu toliarov. Vydanie v tomto prípade zrejme nemá význam.

Situácia je taká istá aj v prípade b): týmito dvoma hodnotami možno vyplatiť len takú sumu toliarov, ktorá je celočíselným násobkom troch (deliteľná tromi bezo zvyšku).

Prípad c) je len zdanlivo zložitejší. Nakolko totiž

$$21 = 7 \cdot 3, 144 = 48 \cdot 3, \quad (1)$$

tak obidve hodnoty môžeme premeniť na trojtoliare. Ak by týmito dvoma hodnotami bolo možné vyplatiť hociktorú sumu, tak by to bolo možné aj samými trjtoliarmi. To ale zrejme nie je pravda. Preto aj v c) navrhovanými hodnotami možno vyplatiť len takú sumu toliarov, ktorá je deliteľná 3.

*Poznámka.* Vhodnosť vymenovaných dvojíc hodnôt viditeľne prekazilo to, že 2 a 8 sú súčasne deliteľné 2, 3 a 21 zase 3. Nie je teda ťažké rozpoznať spoločnú matematickú podstatu všetkých troch prípadov: ak dve celé čísla majú spoločného deliteľa väčšieho ako 1, tak mince v príslušných hodnotách nie sú vhodné na výplatu hocijakej sumy (ani s vydaním).

**Komentár.** Prvá časť tejto úlohy je relatívne jednoduchá a mala by študentom pomôcť vyvodiť závery v častiach b) a c), kde najmä pre poslednú dvojicu nemusí byť na prvý pohľad zrejmé, že na vyplácanie ľubovoľnej sumy vhodná nie je.

**Úloha 2.5.** [[?], úloha 47] Diskusia o peňažnej reforme v Tramtárii nadobúdala čoraz väčšie rozmery. Mnohí jej účastníci tvrdili, že návrhy z úlohy sa ukazujú byť správne, lebo rešpektujú aj poradie magických čísel, zatiaľ čo v úlohe sú neúspešné, pretože toto pradie nerešpektovali. Ako skutočná bomba preto zapôsobil návrh, aby sa vydali mince v hodnote 4 a 11 toliarov. Ani jedna hodnota sa nenachádza medzi „magickými“ číslami! Napriek tomu autor tvrdil, že aj tieto hodnoty spĺňajú potrebné dve požiadavky: možno nimi vyplatiť hocijaké celočíselné množstvo toliarov a keď je táto suma dostatočne veľká, tak netreba ani nič vrátiť. Mal pravdu?

**Riešenie\*.** *Áno.*

Nápad riešenia vyplýva z prvých dvoch úloh. Po krátkom skúšaní nie je ťažké prísť na to, že z 3 kusov štvortoliarov vydaním jedného jedenásttoliara zvýši práve jeden toliar. Rovnaká je situácia, keď z 3 kusov jedenásttoliarov vydáme 8 štvortoliarov.

Keďže

$$3 \cdot 4 - 1 \cdot 11 = 1 \quad \text{a} \quad 3 \cdot 11 - 8 \cdot 4 = 1, \quad (2)$$

po násobení oboch rovností číslom  $k$  dostaneme

$$3k \cdot 4 - k \cdot 11 = k \quad \text{a} \quad 3k \cdot 11 - 8k \cdot 4 = k.$$

Teda hocijaké (t.j.  $k$ ) celočíselné množstvo toliarov môžeme vyplatiť hoci aj tak, že z trikrát takého počtu štvortoliarov si vyberieme práve toľko jedenásttoliarov, alebo aj tak, že z trikrát takého počtu jedenásttoliarov vyberieme osemkrát toľko štvortoliarov.

Z rovnosti 2 vyplýva aj to, že 30 a viac toliarov môžeme vyplatiť aj bez vydania. Veď

$$30 = 2 \cdot 11 + 2 \cdot 4 \quad \text{a} \quad 31 = 11 + 5 \cdot 4$$

a odtiaľ začínajúc už vždy môžeme zvyšovať počet toliarov buď tak, že jeden jedenásttoliar zameníme za 3 štvortoliare alebo tak, že 8 štvortoliarov zameníme za 3 jedenásttoliare. Totiž sumu 32 a viac toliarov môžeme vyplatiť len tak, ak buď je v nej jedenásttoliar alebo aspoň 8 štvortoliarov.

**Komentár.** Úloha je náročnejšia v tom, že je otvorená a zo zadania nie je jasné, či máme tvrdenie vyvrátiť alebo dokázať. Bude tak zaujímavé sledovať, akými cestami a akými spôsobmi sa budú študentské riešenia odoberať. Ak sa v triede vyskytnú dva protikladné názory, je to výborná príležitosť

nechať študentov argumentovať a hľadať chyby vo vlastných riešeniach.

**Úloha 2.6.** [[?], úloha 48] Veľká diskusia však odrazu skončila (práve vtedy, keď bola najživšia), pretože Národná banka Tramtárie na veľké prekvapenie oznámila, že zavedie dve platidlá: troj- a päťtoliarové mince. Koľkými spôsobmi možno nimi vyplatiť 49 toliarov bez vrátenia peňazí?

**Riešenie\*.** Násobky piatich končia na 0 alebo 5. Teda ako od 49 odčítame číslo končiace na 0 alebo 5, vždy dostaneme číslo končiace na 9 alebo 4. Potom suma trojtoliarov bude také číslo, ktoré je menšie ako 49, končí sa na 4 alebo 9 a je (prirodzene) násobkom 3.

Takéto čísla sú len tri: 9, 24 a 39. Pri výplate 49 toliarov celková suma vyplatená trojtoliarmi môže byť len 9, 24 alebo 39 toliarov. Preto sú možné len tri spôsoby výplaty:

$$3 \cdot 3 + 8 \cdot 5 = 49,$$

$$8 \cdot 3 + 5 \cdot 5 = 49,$$

$$13 \cdot 3 + 2 \cdot 5 = 49.$$

**Komentár.** Záverečná úloha seminára je relatívne jednoduchou bodkou, avšak trénuje systematický prístup k práci, preto jej zaradenie považujeme za vhodné.

**Komentár.** Na záver seminára je vhodné nechať si niekoľko (desiatok) minút času na otvorenie diskusie so študentmi. Mali by sme sa pobaviť o tom, čo správne riešenie úlohy obsahuje, aké typy poznáme a podobne. Nie je nutné prísť ku konkrétnym a špecifickým záverom, keďže téme sa budeme venovať ešte aj v nasledujúcom seminári.

## Doplňujúce úlohy a materiály

V prípade, že študentov úlohy seminára zaujali, je možné ich odkázať na publikáciu [?], ktorá obsahuje ďalšie zovšeobecnenie riešených úloh a komentár o riešení diofantických rovníc.