

DYNAMICKÝ MODEL SPOLOČNÉHO TRHU S EMISNÝMI POVOLENAMI AKO SPÔSOB RIEŠENIA PROBLÉMU ZNEČIŠŤOVANIA PERZISTENTNÝMI LÁTKAMI*

Anetta Čaplánová^a , Rudolf Sivák^a, Keith Willett^b 

Abstract

Dynamic Model of Common-pool Emission Permit Market as a Method for Solving the Persistent Pollutant Problem

In the paper, we develop a common-pool permit market formulated as a dynamic gross pool for trading emission discharge permits (EDPs) for persistent pollutants. We discuss individual agents' demand decisions concerning EDPs and develop a common-pool market dynamic gross pool formulation, including a general set of marginal-cost pricing rules used in this type of permit trading market. Numerical simulations are used to illustrate the usefulness of this type of permit market design for addressing environmental problems.

Keywords: environmental pollution policies; air pollution; emission permit trading; dynamic permit trading models; common-pool permit markets

JEL Classifications: Q52, Q53, C61

Úvod

V súčasnosti používaný prístup k riešeniu problému kvality ovzdušia napr. v USA, ale aj v krajinách Európskej únie, je založený na uplatňovaných vlastníckych právach. Typickým obchodovaným vlastníckym právom je povolenie na znečistenie. Tieto povolenia sa spravidla prideliťujú prostredníctvom využitia trhového procesu. V USA patrí k príkladom využitia tohto systému riešenie znečistenia oxidom siričitým – SO₂ (Lewis, 2011), alebo

* Tento príspevok bol pripravený s podporou projektu VEGA-1/0239/19 a projektu VEGA-1/0688/20.

a Ekonomická univerzita v Bratislave, Národohospodárska fakulta, Bratislava, Slovensko
E-mail: anetta.caplanova@euba.sk; rudolf.sivak@euba.sk

b Oklahoma State University, Spears School of Business, Stillwater, USA
E-mail: keith.willett@okstate.edu

trh s oxidom dusičitým – NO₂, používaný v štáte Virginia (Porter *et al.*, 2009). Atkinson a Tietenberg (1991) ukázali, že systémy obchodovania, ktoré sa vyskytujú v reálnom živote, možno v teoretickej rovine najlepšie aproximovať s využitím bilaterálnych postupných systémov obchodovania. Tieto sú však spojené s vysokými transakčnými nákladmi. Kruitwagen *et al.* (2000) vo svojom článku preskúmali využívané systémy obchodovania s emisnými povoleniami na znečisťovanie sírou existujúce v Európe.

Alternatívne využitie kvót na obchodované emisie pri znečisťovaní SO₂ a všetkými oxidmi dusíka (NO_x) nedokáže zohľadniť pretrvávajúci charakter týchto znečisťujúcich látok. Začiatkom 90. rokov 20. storočia si Opschoor a Pearce (1991) uvedomili výzvy, ktoré tieto znečisťujúce látky predstavujú pre environmentálnu politiku. Zadefinovali perzistentné organické znečisťujúce látky ako tie, ktoré sa uvoľňujú v malom množstve v danej lokalite a čase, často sa iba veľmi pomaly rozkladajú, preto dochádza k ich hromadeniu a akumulovaným koncentráciám (Griffin, 1987). Ide teda o ťažko odbúrateľné organické znečisťujúce látky, ktoré sa vyznačujú dlhou dobou prežitia v životnom prostredí a do prostredia sa spravidla dostávajú v dôsledku ekonomickej činnosti. Ak do ovzdušia uniknú, nie je ich možné odtiaľ odstrániť a ich častice sa môžu prenášať aj do iných teritoriálnych oblastí. Tento problém, našiel svoj odraz aj v odbornej literatúre. Napr. Farzin (1996) poukázal na to, že tieto znečisťujúce prvky majú tendenciu akumulovať sa a preto ich možno skúmať vo vzťahu k ich zásobe a Hordijk (1991) analyzoval možnosti vytvorenia integrovaných environmentálnych ekonomických modelov využiteľných pri tvorbe mechanizmov obchodovania s perzistentnými znečisťujúcimi látkami, napr. SO₂ a NO_x.

V tomto príspevku prezentujeme nami formulovaný model obchodovania s perzistentnými znečisťujúcimi látkami na dynamickom spoločnom trhu s povoleniami na znečisťovanie. Model, ktorý uvádzane v článku, je rozšírením našich predchádzajúcich statických modelov obchodovania s povoleniami na znečistenie (Willett *et al.*, 2014, 2015).

Prínos tohto príspevku je teda v tom, že formuluje dynamický model obchodovania s povoleniami na znečisťovanie perzistentnými znečisťujúcimi látkami. Všetky obchody sa uskutočňujú na spoločnom trhu, čo umožňuje výrazne znížiť transakčné náklady spojené s obchodovaním s emisnými povoleniami. V našom modeli nie je možné, aby obchodníci s povoleniami boli spárovaní (z dôvodu, že bilaterálne obchody nie sú povolené) a všetky obchody s povoleniami sa uskutočňujú prostredníctvom spoločného trhu, ktorý koordinuje jeho centrálny manažér. Ceny emisných povolení vychádzajú z tieňových cien, ktoré odrážajú vplyv každej firmy na trhu na aktuálnu environmentálnu kapacitu v každej uvažovanej lokalite.

Ďalším prínosom výskumu prezentovaného v tomto článku je zohľadnenie regionálnych (lokalizačných) obmedzení na znečisťovanie. V situáciách, keď môžu byť stanovené

normy kvality ovzdušia v jednotlivých lokalitách porušené, uskutočňované transakcie s emisnými povoleniami sa tomu automaticky prispôbia. Uvedené procesy sa prejavajú v hraničných nákladoch a cenách emisných povolení, ktoré sú vygenerované modelom.

Prínosom príspevku je aj vytvorenie súboru numerických simulácií, ktoré ilustrujú, ako by tento dynamický spoločný trh s emisnými povoleniami na znečisťovanie perzistentnými znečisťujúcimi látkami mohol v realite fungovať.

Príspevok je štruktúrovaný tak, že v nasledujúcej časti uvádzame vlastnosti dynamického trhu s emisnými povoleniami, v ďalšej časti model trhu podrobne špecifikujeme a následne dokumentujeme jeho fungovanie na uskutočnených numerických simuláciách, ktoré vychádzajú zo zadefinovaného modelu. V závere článku sme zhrnuli výsledky našej analýzy a uvádzame z nej vyplývajúce odporúčania pre environmentálnu politiku.

1. Dynamický spoločný trh na obchodovanie s emisnými povoleniami

V tejto časti zadefinujeme znaky dynamického spoločného trhu s emisnými povoleniami. Najskôr špecifikujeme rozhodovací model, ktorý určuje dopyt individuálnej firmy po emisných povoleniach. Následne sa zaoberáme vlastníckymi právami, s ktorými sa obchoduje, ďalej z dynamického hľadiska skúmame vplyv každého účastníka trhu na kvalitu ovzdušia v danej lokalite, spôsob tvorby cien a proces utvárania trhovej rovnováhy.

Aké sú dôvody každej jednotlivcej firmy pre vstup na trh s povoleniami na znečisťovanie? Firma sa musí v každom období uvažovaného časového horizontu rozhodovať medzi odstránením emisií a ich uvoľňovaním do ovzdušia. Za predpokladu, že sú zavedené kvóty na vypúšťané emisie, od firmy sa vyžaduje, aby v každom časovom období, v ktorom znečisťuje, disponovala potrebným počtom emisných povolení na toto znečisťovanie. To znamená, že dopyt každej jednotlivcej firmy po emisných povoleniach na znečisťovanie v danom časovom období je funkciou jej hraničných nákladov na zníženie emisií v každom z týchto časovom období.

Willett *et al.* (2015) uvádzajú príklad funkcie dopytu firmy po emisných povoleniach, keď sa firma rozhoduje o dopyte po nich s cieľom minimalizovať súčasnú hodnotu celkových nákladov na zníženie emisií a na nákup/predaj emisných povolení. Určené obmedzujúce predpoklady vyžadujú, aby množstvo emisných povolení, ktorými firma disponuje, nikdy nepresiahlo množstvo emisií, ktoré uvoľní do ovzdušia. Riešenie tohto obmedzenia vyžaduje formulovať individuálny dopyt každej firmy po emisných povoleniach. Vo všeobecnosti je funkcia dopytu každej firmy komunikovaná ďalším účastníkom trhu prostredníctvom mechanizmu aukcie zakomponovaného do dizajnu trhu, ktorý zodpovedá napr. mechanizmu použitému v McCabe *et al.* (1991). Význam týchto na aukčnom mechanizme založených dopytových funkcií v našom dizajne trhu je podrobnejšie popísaný nižšie.

Emisné povolenie na znečisťovanie poskytuje držiteľovi povolenia právo na vypúšťanie jednej jednotky emisií, ktorú možno merať v tonách, alebo kilogramoch. Predpokladáme, že každému účastníkovi trhu bude pred začiatkom obchodovania pridelený rovnaký počet povolení na znečisťovanie. Ako vysvetlíme nižšie, obchodovanie s emisnými povoleniami môže ovplyvniť aj úroveň znečistenia v jednotlivých lokalitách.

V našom modeli dynamického spoločného trhu zohráva dôležitú úlohu manažér trhu, ktorý dohliada na jeho fungovanie. Môže ísť o jednotlivca, alebo agentúru, ktorí sú určení inštitúciou zodpovednou za environmentálne otázky (ako napr. Americká environmentálna agentúra – The United States Environmental Agency, USEPA). Manažér definuje cieľové úrovne znečistenia v jednotlivých monitorovaných lokalitách a stanovuje počet emisných povolení emitovaných pre daný trh. Po ukončení prijímania ponúk od účastníkov trhu už neakceptuje žiadne ďalšie ponuky a s využitím optimalizačného modelu vyčistí trh. Model optimalizácie trhu je formulovaný tak, že nie sú povolené bilaterálne obchody medzi firmami a všetky firmy na trhu nakupujú/predávajú emisné povolenia manažérovi trhu (Hogan *et al.*, 1996; Prabodanie *et al.*, 2014; Prabodanie *et al.*, 2010; Prabodanie *et al.*, 2014; Willett *et al.*, 2014, 2015). Trhový manažér je zodpovedný za všetky súvisiace finančné vyrovnanie a za zúčtovanie pohľadávok, ktoré v procese obchodovania na trhu s emisiami vznikajú. Zodpovedá tiež za prepojenie rozhodnutí účastníkov trhu na jednej strane znižovať emisie a na druhej strane uvoľňovať emisie do ovzdušia v jednotlivých lokalitách. Na určenie vplyvu, resp. prevodových (transferových) koeficientov, ktoré špecifikujú vzťah medzi uvoľňovaním emisií účastníkmi trhu a súvisiacimi environmentálnymi vplyvmi v jednotlivých lokalitách, možno využiť model vzdušnej disperzie rozpracovaný napr. v Eliassen a Saltbones (1975, 1983), Ellis (1988) a Ellis *et al.* (1985). Tieto vplyvy sú súčasťou obmedzení aj v nami formulovanom optimalizačnom modeli.

Za realizáciu aukcie zodpovedá manažér trhu. Na jej začiatku disponuje každý účastník trhu (t.j. každá firma) vopred prideleným počtom emisných povolení. Počas aukcie môže firma na trhu povolenia predávať, alebo kúpiť. Počiatočná držba emisných povolení, ich ponuka na predaj a ich predpokladané nákupy determinujú dopyt účastníkov trhu po emisných povoleniach pri rôznych cenách, ktoré sú jednotliví účastníci trhu ochotní za emisné povolenia zaplatiť.

Dôležitou črtou tohto modelu trhu je, že všetci jeho účastníci (firmy) deklarujú svoj celkový dopyt po emisných povoleniach na znečisťovanie, ktorý reflektuje ich počiatočnú držbu emisných povolení a je zohľadnený vo vypočítanej trhovej rovnováhe. Keď sa vytvorí trhová rovnováha (t.j. nájde sa trhové optimum), manažér trhu vyšpecifikuje čisté obchody zohľadňujúce počiatočné rozdelenie emisných povolení každému účastníkovi trhu. V tejto fáze obchodovania sa uskutočnia aj všetky finančné vyrovnanie. Jednotliví účastníci trhu buď platia, alebo je im vyplatená cena vychádzajúca z hraničných nákladov

(a nie cena, ktorá by vznikla v procese aukcie). Táto cena je určená na základe tieňových cien zohľadňujúcich zadané obmedzenia modelu trhu (Willett *et al.*, 2014). To znamená, že tieňová rovnovážna cena modelu je integrálnou súčasťou nášho modelu obchodovania s povoleniami na znečisťovanie.

Inštitucionálna štruktúra spoločného trhu na obchodovanie s emisnými povoleniami na znečisťovanie je určená súborom pravidiel na vykonávanie obchodných činností. Proces sa začína tým, že trhoví manažér oznamuje vyvolávacie ceny emisných povolení a požiada účastníkov trhu, aby uviedli počty povolení, ktoré budú na trhu dopytovať pri každej zo stanovených cien. Manažér proces uzavrie, ak už od účastníkov trhu nepredpokladá žiadny dodatočný dopyt. Dosiahnuté výsledky obchodovania sa následne využijú pri riešení optimalizácie obchodovania s povoleniami na znečisťovanie v zadanom modeli.

Tento model trhu možno matematicky riešiť s využitím lineárneho programovania a nájsť tak trhovú rovnováhu. Vypočítajú sa čisté obchody každého účastníka trhu, pričom sa zohľadní jeho počiatočná držba emisných povolení. Trh bude v rovnováhe, ak žiadny účastník trhu nebude mať motiváciu zmeniť svoju držbu počtu emisných povolení. Willett *et al.* (2015) považujú za výhodu tohto trhu, že znižuje motívy firiem k strategickému správaniu sa.

Ako sme už vyššie uviedli, vplyv perzistentných znečisťujúcich látok na kvalitu ovzdušia v jednotlivých oblastiach je rozptýlený a oneskorený. Je zjavné, že obchodovanie s povoleniami na znečisťovanie musí vyjadrovať dopad týchto látok na kvalitu ovzdušia v súčasnosti ako aj v budúcich obdobiach. Akonáhle sa jednotka emisií uvoľní do životného prostredia, predpokladáme, že to ovplyvní ovzdušie v súčasnom ako aj v nasledujúcich obdobiach. Dĺžka vplyvu emisií na prostredie sa bude líšiť v závislosti od typu znečisťujúcich látok, pri vysvetlení mechanizmu fungovania tohto trhového modelu však budeme uvažovať s dvomi časovými obdobiami.

2. Matematická špecifikácia dynamického spoločného trhu s emisiami

V tejto časti podrobne vysvetlíme matematické základy nášho modelu. Jeho základná formulácia vychádza zo Samuelsona (1952), ktorý ukázal, že za predpokladu klesajúcich funkcií dopytu bude na konkurenčnom trhu existovať riešenie maximalizačného modelu simulujúceho utváranie trhovej rovnováhy. Cieľom Samuelsonovej analýzy bolo ukázať, že objektívna funkcia modelu musí zodpovedať sume renty spotrebiteľa a renty výrobcu. Samuelsonova základná formulácia modelu lineárneho programovania bola využitá v početných ďalších modeloch (napr. McCarl a Spreen, 1980 a Takayama a Judge, 1971). Tento typ modelu, ktorý sa niekedy označuje aj ako počítačom podporovaný model,

rozoberajú aj McCabe *et al.* (1991). V štúdiách zameraných na environmentálnu politiku, napr. Murphy *et al.* (2000) ukázali, ako modelový prístup uplatnený McCabe *et al.* (1991) možno využiť aj pri dizajne obchodovania s povoleniami. Výskum uskutočnený Prabodanie *et al.* (2014) a Willett *et al.* (2014, 2015) poskytuje príklady využitia tohto modelového prístupu pri obchodovaní s emisnými povoleniami. Model, ktorý využívame v našom výskume, je rozšírením modelu týchto autorov.

Predpokladajme, že t ($t = 1, \dots, T$) vyjadruje časové obdobie, počas ktorého sa obchoduje. Ďalej predpokladajme, že každý účastník trhu zahrnul do svojho rozhodovania o nákupe/predaji emisných povolení aj diskontovanie, t.j. využívame prístup, ktorý uvádzajú Raffensperger *et al.* (2009). Preto v tomto modeli už osobitne s diskontovaním neuvažujeme. Funkcia ponuky každého účastníka trhu je vyjadrená diskretnou krokovou funkciou a každý diskretný prvok tejto funkcie označujeme ako tranža. Index n ($n = 1, \dots, N$) potom vyjadruje individuálne tranže počas aukcie. Predpokladáme, že obchodovanie s emisnými povoleniami zohľadňuje možné porušenia environmentálnych štandardov kvality ovzdušia, ktoré sa môžu v jednotlivých oblastiach objaviť. V našom modeli sú štandardy kvality ovzdušia špecifikované pre sériu lokalít, tzv. receptorových bodov.

Model sme zjednodušili tým, že uvažujeme s existenciou len jedného znečisťujúceho prvku a s dvomi lokalitami. Predpokladajme, že \bar{Q}_j^t je environmentálny štandard v lokalite j v období t , B_{in}^t je veľkosť tranže n navrhnutej firmou i v období t , P_{in}^{bt} je cena zadaná v aukcii pre tranžu n firmou i pre obdobie t , a l_{in}^{bt} vyjadruje množstvo emisných povolení na znečisťovanie akceptovaných firmou i z tranže n v období t . Za týchto predpokladov možno model dynamického spoločného trhu na obchodovanie s emisiami vyjadriť nasledovne:

$$\text{Max } R = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N P_{in}^{bt} l_{in}^{bt} \quad (1)$$

za predpokladu, že:

$$\sum_{n=1}^N l_{in}^{bt} = l_i^t(\pi_i^t) \quad (i = 1, \dots, I) \quad (t = 1, \dots, T) \quad (2)$$

$$l_{in}^{bt} \leq B_{in}^t(\theta_{in}^t) \quad (n = 1, \dots, N) \quad (i = 1, \dots, I) \quad (t = 1, \dots, T) \quad (3)$$

$$-l_{in}^{bt} \leq 0(\phi_{in}^t) \quad (n = 1, \dots, N) \quad (i = 1, \dots, I) \quad (t = 1, \dots, T) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I l_i^t \leq \bar{l}^t(\psi^t) \quad (t = 1, \dots, T) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I d_{ij}^1 l_i^1 \leq \bar{Q}_j(\mu_j^1) \quad (j = 1, 2) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I d_{ij}^t l_i^t + \sum_{i=1}^I f_{ij}^t l_i^{t-1} \leq \bar{Q}_j(\mu_j^t) \quad (j = 1, 2) \quad (t = 2, \dots, T) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I f_{ij}^{T+1} l_i^T \leq \bar{Q}_j^{T+1}(\mu_j^{T+1}) \quad (j = 1, 2). \quad (8)$$

Premenné v zátvorkách vedľa výrazov (2) – (8) sú Lagrangeove multiplikátory.

Rovnica (1) vyjadruje celkový ekonomický prínos všetkých firiem na trhu za predpokladu, že sú dodržané trhové obmedzenia týkajúce sa počtu dostupných emisných povolení na znečisťovanie ako aj štandardy kvality ovzdušia vo všetkých uvažovaných lokalitách. Riešenie modelu s využitím lineárneho programovania vedie k určeniu optimálneho množstva emisných povolení, potrebných v každom období, ako aj odpovedajúce ceny emisných povolení vychádzajúce z hraničných nákladov každého účastníka trhu.

Koeficient P_m^{bt} v rovnici (1) vyjadruje hraničnú hodnotu, ktorú firma i priradzuje množstvu emisných povolení v tranži n . Obmedzenie (3) špecifikuje hornú hranicu počtu povolení spojenú s každou tranžou a obmedzenie (4) vyjadruje, že počet akceptovaných povolení v každej tranži nemôže byť záporný. Obmedzenie (2) je alokačným obmedzením a špecifikuje množstvo akceptovaných emisných povolení a konečnú pozíciu firmy i . Obmedzenie (5) vyjadruje, že celkový počet obchodovaných emisných povolení nemôže byť vyšší ako celkový počet vydaných povolení. Obmedzenia (6) – (8) sú priestorovými (lokalizačnými) obmedzeniami a vyjadrujú kapacitné obmedzenia trhu, t.j. obmedzujú obchodovateľné zdroje. Inými slovami, tieto obmedzenia zohľadňujú štandardy kvality ovzdušia v jednotlivých lokalitách, ktoré musia byť dodržané, d_{ij}^t sú transferové koeficienty, ktoré vyjadrujú vplyv jednotky emisií emitovaných firmou i na environmentálny štandard v monitorovacom bode j a v období t , f_{ij}^t sú transferové koeficienty, ktoré vyjadrujú dopad jednotky emisií emitovaných firmou i v čase $t - 1$ na kvalitu ovzdušia v lokalite j v období t . Obmedzenie (7) vyjadruje vplyv emisií na kvalitu ovzdušia v období t ($t = 1, \dots, T$), ktorý zohľadňuje vplyv emisií v súčasnom období spolu s vplyvom emisií z obdobia $t - 1$ na kvalitu ovzdušia v lokalite j . Obmedzenie (6) vyjadruje vplyv emisií na kvalitu ovzdušia v období 1 a obmedzenie (8) vyjadruje dopad emisií na kvalitu ovzdušia v čase T emitovaných v každej monitorovanej lokalite v období $t + 1$.

3. Oceňovanie emisných povolení na základe hraničných nákladov pri alternatívnych lokalizačných environmentálnych obmedzeniach

Určenie optimálnej ceny na základe hraničných nákladov pri nákupe/predaji emisných povolení je založené na stanovení tieňových cien (Willett *et al.*, 2014, 2015). Všetky odvodenia, ktoré uvádzame v tejto časti, vychádzajú z Lagrangeovej funkcie modelu zodpovedajúcemu špecifikáciám (1) – (8) a nájdenia Kuhnových-Tuckerových podmienok. Tieto sú potom použité na odvodenie uvádzaných vzťahov. V súlade s teóriou optimalizácie je nevyhnutné sledovať tieňové ceny, keďže ide o ceny, ktoré sú vyplatené za povolenia za znečisťovanie v situácii, keď je trh rovnováhe.

Najskôr predpokladajme, že žiadne z lokalizačných obmedzení kvality ovzdušia (6) – (8) nie je záväzné, ale obmedzenie (5), týkajúce sa celkového počtu emisných povolení vydaných manažérom trhu, je záväzné. V takom prípade môžeme ukázať, že

$$\pi_i^t = \psi^t. \quad (9)$$

Tieňová cena pre obmedzenie (5) vyjadruje pokles nákladov na emisné kontroly, ku ktorému by došlo, ak by trhový manažér v každom z týchto období pridal jedno emisné povolenie k celkovému počtu povolení na trhu \bar{I}^t . Táto tieňová cena je cenou „čistiaceou“ trh s emisnými povoleniami v každom časovom období. Ak ani jedno z environmentálnych obmedzení (6) – (8) nie je v ktoromkoľvek období záväzné, budú všetky firmy v každom z týchto období platiť za emisné povolenia rovnakú cenu.

Teraz predpokladajme, že obmedzenie (5) a obmedzenia týkajúce sa kvality ovzdušia sú záväzné v každom časovom období, cena firmy v každom časovom období potom bude vyjadrená nasledovne:

$$\pi_i^t = \psi^t + \sum_{j=1}^2 (\mu_j^t d_{ij}^t + \mu_j^{t+1} f_{ij}^{t+1}). \quad (10)$$

Prvá časť pravej strany rovnice (10) vyjadruje rovnovážnu cenu emisného povolenia v ktoromkoľvek časovom období t , ak súčasne platí rovnica (9). Druhá časť výrazu na pravej strane rovnice (10) vyjadruje hodnotu environmentálneho vplyvu, ktorý má firma na jednotlivé lokality v obdobiach t a $t + 1$. Tieňová cena μ_j^t v lokalite j v časovom období t vyjadruje náklady, ktoré vzniknú, ak firma i poruší environmentálny štandard v čase t o jednu emisnú jednotku. Podobne tieňová cena μ_j^{t+1} v lokalite vyjadruje náklady v období $t + 1$, ak dodatočná jednotka znečistenia v čase t vedie k prekročeniu environmentálneho štandardu v období $t + 1$, d_{ij}^t a h_{ij}^{t+1} vyjadrujú transferové koeficienty. Ak každá firma bude musieť zaplatiť $\mu_j^t d_{ij}^t + \mu_j^{t+1} h_{ij}^{t+1}$ za každú emitovanú jednotku znečistenia,

firmy nebudú prekračovať environmentálne štandardy v lokalite j v obdobiach t a $t + 1$ emitovaním dodatočnej jednotky do ovzdušia.

Uvažujeme s treťou možnosťou, ktorá je založená na predpoklade, že regionálne obmedzenia kvality ovzdušia (6) – (8) sú záväzné, ale obmedzenie (5) záväzné nie je. To znamená, že na trhu s emisnými povoleniami existuje prebytok a tieňová cena ψ^t je nulová. Cena za emisné povolenie platená firmou i v období t potom bude:

$$\pi_i^t = \sum_{j=1}^2 (\mu_j^t d_{ij}^t + \mu_j^{t+1} h_{ij}^{t+1}), \quad (11)$$

π_i^t môžeme označiť ako participatívne ceny a vyjadrujú ceny, ktoré by každá firma platila za zakúpené emisné povolenie v každom časovom období. V tomto prípade predpokladáme, že každá firma bude platiť inú cenu (Willett *et al.*, 2014), pričom všetky obchody sa realizujú v rámci spoločného trhu a bilaterálne obchodovanie s emisnými povoleniami nie je možné.

Predpokladajme, že π_i^{t*} vyjadruje optimálnu cenu, založenú na hraničných alternatívnych nákladoch firmy i v časovom období t . Tiež predpokladajme, že l_i^{t*} vyjadruje optimálny počet emisných povolení požadovaných firmou i v časovom období t a \hat{l}_i^t vyjadruje pôvodnú alokáciu emisných povolení, ktoré boli pridelené firme i v každom časovom období t .

Ak $l_i^{t*} > \hat{l}_i^t$, firma i je čistým kupujúcim emisných povolení v období t a čiastka, ktorú firma i v období t za tieto povolenia zaplatí, je vyjadrená nasledovne:

$$\Gamma_i^t = \pi_i^t (l_i^{t*} - \hat{l}_i^t). \quad (12)$$

V prípade, ak $l_i^{t*} < \hat{l}_i^t$, firma i je čistým predávajúcim emisných povolení v období t . Za tieto povolenia získa firma i v období t platbu:

$$\Gamma_i^t = \Pi_i^t (\hat{l}_i^t - l_i^{t*}). \quad (13)$$

Ak $l_i^{t*} = \hat{l}_i^t$, v období t potom firma i nie je ani kupujúcim ani predávajúcim emisných povolení.

4. Numerické simulácie obchodovania s emisnými povoleniami

Uvažujeme s dvoma typmi numerických simulácií. Prvé simulácie sa zameriavajú na určenie optimálneho množstva emisných povolení na znečistenie, ktoré budú jednotlivé firmy držať. Predpokladáme, že pred začiatkom obchodovania firmy od trhového manažéra dostanú bezplatne počiatkové pridelenie emisných povolení. Vzhľadom na túto skutočnosť každá firma vstúpi na trh s povoleniami s cieľom ich kúpiť, alebo predat', aby tak

dosiahla z jej pohľadu držbu optimálneho množstva emisných povolení. Pôvodná alokácia povolení na znečisťovanie je v každej z uskutočnených simulácií rovnaká. V prvej sérii simulácií predpokladáme, že lokalizačné obmedzenia na znečisťovanie nie sú záväzné. Následne sa v druhej sérii simulácií tieto lokalizačné obmedzenia stanú záväznými.

Tabuľka 1: Individuálne inverzné funkcie dopytu firiem

	Obdobie 1	Obdobie 2	Obdobie 3
Firma A	$I_1^1 = 2000 - 0,5P^1$	$I_1^2 = 1923 - 0,48P^2$	$I_1^3 = 1778 - 0,4438P^3$
Firma B	$I_2^1 = 2000 - 0,25P^1$	$I_2^2 = 1923 - 0,24P^2$	$I_2^3 = 1778 - 0,2219P^3$
Firma C	$I_3^1 = 2000 - 0,2P^1$	$I_3^2 = 1923 - 0,1923P^2$	$I_3^3 = 1778 - 0,1778P^3$
Firma D	$I_4^1 = 4000 - P^1$	$I_4^2 = 3846 - 0,9615P^2$	$I_4^3 = 3555,63 - 0,8889P^3$
Firma E	$I_5^1 = 4000 - 0,5P^1$	$I_5^2 = 3846 - 0,4808P^2$	$I_5^3 = 3555,63 - 0,4444P^3$
Firma F	$I_6^1 = 4000 - 0,4P^1$	$I_6^2 = 3846 - 0,3846P^2$	$I_6^3 = 3555,63 - 0,3356P^3$

Poznámka: I_i^t vyjadruje jedno emisné povolenie na znečisťovanie merané ako 1 tona emisií uvoľnených firmou i v období t .

Zdroj: Willett *et al.* (2015)

Tabuľka 2: Transferové koeficienty znečisťovania (obdobie t)

	Znečisťovaná lokalita 1	Znečisťovaná lokalita 2
Firma A	$d_{11}^t = 0,035$	$d_{12}^t = 0,018$
Firma B	$d_{21}^t = 0,017$	$d_{22}^t = 0,0318$
Firma C	$d_{31}^t = 0,046$	$d_{32}^t = 0,227$
Firma D	$d_{41}^t = 0,046$	$d_{42}^t = 0,067$
Firma E	$d_{51}^t = 0,038$	$d_{52}^t = 0,031$
Firma F	$d_{61}^t = 0,027$	$d_{62}^t = 0,062$

Zdroj: vlastné spracovanie autorov podľa Eliassen a Saltbones (1975, 1983)

Uvažujeme s tromi časovými obdobiami. Limity emisných povolení na znečisťovanie sú pre jednotlivé časové obdobia definované nasledovne: limit pre časové obdobie 1 je 8 800 ton, limit pre časové obdobie 2 je 7 104 ton a limit pre časové obdobie 3 je 5 683 ton. V časovom období 1 dostane každá zo šiestich firiem pred začiatkom obchodovania 1 480 emisných povolení. V časovom období 2 dostane každá firma na začiatku

1 184 emisných povolení. V časovom období 3 je počiatočná alokácia každej firmy 947 emisných povolení. Jednotlivé inverzné funkcie dopytu každej zo šiestich firiem a súvisiace transferové koeficienty znečisťovania pre obdobie (t) a pre nasledujúce obdobia sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách. Transferové koeficienty znečisťovania v tabuľkách 2 a 3 vyjadrujú skutočné hodnoty SO_2 , vychádzajúce z Eliassen a Saltbones (1975, 1983) a prispôbené potrebám nášho výskumu.

Tabuľka 3: Transferové koeficienty znečisťovania (obdobie $t + 1$)

	Znečisťovaná lokalita 1	Znečisťovaná lokalita 1
Firma A	$h_{11}^{t+1} = 0,0175$	$h_{12}^{t+1} = 0,009$
Firma B	$h_{21}^{t+1} = 0,0085$	$h_{22}^{t+1} = 0,0159$
Firma C	$h_{31}^{t+1} = 0,023$	$h_{32}^{t+1} = 0,1135$
Firma D	$h_{41}^{t+1} = 0,023$	$h_{42}^{t+1} = 0,0335$
Firma E	$h_{51}^{t+1} = 0,019$	$h_{52}^{t+1} = 0,0155$
Firma F	$h_{61}^{t+1} = 0,0135$	$h_{62}^{t+1} = 0,031$

Zdroj: vlastné spracovanie autorov podľa Eliassen a Saltbones (1975, 1983)

V ďalšom ukážeme, ako sa môže uskutočňovať obchodovanie v nami zadefinovanej trhovej štruktúre. Pripomeňme si, že počiatočné pridelenie emisných povolení na znečisťovanie je zohľadnené v ponukách firiem na trhu. Ak dôjde k exogénnej zmene trhových podmienok, možno očakávať, že firmy prehodnotia optimálny počet emisných povolení na znečisťovanie, ktoré chcú držať. Dopyt po emisných povoleniach zo strany jednotlivéj firmy v každom období vychádza z celkového počtu emisných povolení (vrátane aktuálne držaných emisných povolení), ktoré dopytuje firma v danom časovom období pri rôznych cenách. V prípade, že sa dosiahne na trhu rovnováha, trhoví manažér, vychádzajúc z počiatočnej alokácie emisných povolení, vypočíta veľkosť čistých obchodov jednotlivých firiem. Na určenie počtu kúpených/predaných emisných povolení využije odpovedajúce tieňové ceny a odpovedajúce rozdelenie emisných povolení. Následne vypočíta odpovedajúce príjmy a výdavky každej firmy spojené s uskutočnenými transakciami. Je dôležité pripomenúť, že všetky obchody koordinuje trhoví manažér a nie sú povolené bilaterálne obchody medzi firmami. Každá firma zaplatí cenu, ktorá dokumentuje jej vplyv na existujúce environmentálne kapacity vyjadrené záväznými regionálnymi obmedzeniami na znečistenie v každej lokalite. Algebraická verzia modelu lineárneho programovania použitá v našich simuláciách obchodovania je uvedená v Prílohe.

Výsledky prvej série obchodovania zachytáva tabuľka 4. Ako sme uviedli vyššie, každej z firiem boli pridelené emisné povolenia pre jednotlivé obchodované obdobia. Obchodovanie s emisnými povoleniami v každom z uvažovaných časových období je výsledkom požadovaných prispôsobovacích procesov, ktoré jednotlivé firmy uskutočnia v každom z týchto období s cieľom priblížiť svoj počet emisných povolení optimálnej úrovni. Záporné znamienko pri počte realizovaných transakcií znamená, že firma je čistým predávajúcim, kladná hodnota vyjadruje, že firma je čistým kupujúcim emisných povolení.

Tabuľka 4: Obchodovanie s emisnými povoleniami bez zohľadnenia regionálnych obmedzení

	Počet obchodovaných povolení	Cena za emisné povolenie (EUR)	Výdavky na emisné povolenia (EUR)
Obdobie 1			
Firma A	-1,480	7,200	-10,656,000
Firma B	5,800	7,200	41,760,000
Firma C	-1,080	7,200	-7,776,000
Firma D	-1,480	7,200	-10,656,000
Firma E	-1,080	7,200	-7,776,000
Firma F	-680	7,200	-4,896,000
Spolu	0		0
Obdobie 2			
Firma A	-799	3,168	-2,531,232
Firma B	-30	3,168	-95,040
Firma C	-30	3,168	-95,040
Firma D	-619	3,168	-1,960,992
Firma E	739	3,168	2,341,152
Firma F	739	3,168	2,341,152
Spolu	0		0
Obdobie 3			
Firma A	-947	3,999	-3,787,053
Firma B	-237	3,999	-947,763
Firma C	114	3,999	455,886
Firma D	-947	3,999	-3,787,053
Firma E	831	3,999	3,323,169
Firma F	1 186	3,999	4,742,814
Spolu	0		0

Zdroj: simulácie rovnováhy na dynamickom spoločnom trhu na obchodovanie s emisnými povoleniami formulovali autori

V prvom období bude emisné povolenia nakupovať len firma B, zatiaľ čo všetky ostatné firmy budú určité množstvo emisných povolení predávať. Druhý stĺpec tabuľky 4 ukazuje, že v tejto situácii bude trhovú cenu za emisné povolenie 7 200 EUR. Táto cena je určená podľa rovnice (13). Odpovedajúce výdavky na emisné povolenia sú uvedené v treťom stĺpci tabuľky 4. V tomto období všetky emisné povolenia, ktoré kúpila firma B, nakúpil trhoví manažér od ostatných piatich firiem. Tabuľka 4 zachytáva aj obchodovanie s povoleniami v druhom a treťom časovom období.

Výsledky simulácií uskutočnených za týchto podmienok dokumentujú, že ak sa zníži počet pridelených emisných povolení, je možné dosiahnuť zlepšenie kvality ovzdušia. Zároveň sa v žiadnom z uvažovaných období na trhu neprejavil prebytok emisných povolení, a teda trhoví manažér nebol nútený prebytočné emisné povolenia nakupovať.

Prvá simulácia uvažujúca so záväznými regionálnymi obmedzeniami na znečistenie je uvedená v tabuľke 5. V prvom období vznikne na trhu prebytok emisných povolení v rozsahu 605. Z tohto výsledku môžeme vyvodit' dva závery. Po prvé, regionálne obmedzenia na znečisťovanie sú stanovené tak, že nie všetky emisné povolenia vydané v časovom období 1 sa pri dodržaní regionálnych obmedzení na znečisťovanie môžu aj použiť. Trhoví manažér teda nakúpi prebytočné množstvo emisných povolení od firiem, ktoré sú ich čistými predajcami, ako je uvedené v druhom stĺpci tabuľky 5. V tomto prípade firmy B, C a E predajú niektoré emisné povolenia trhovému manažérovi a firma F bude emisné povolenia nakupovať.

Ďalší záver, ktorý môžeme z výsledkov v tabuľke 5 za prvé obdobie vyvodit', sa týka konkrétnej formy určovania cien na základe hraničných nákladov. V tejto situácii nie je obmedzenie (9) záväzné, takže stanovenie ceny na základe hraničných nákladov nadobúda formu rovnice (15). Ako sme predpokladali, každá firma kupujúca/predávajúca emisné povolenia bude obchodovať za rozdielnú cenu určenú na základe jej hraničných nákladov. Tieto ceny sú uvedené v treťom stĺpci tabuľky 5.

Tabuľka 5 obsahuje aj výsledky obchodovania s emisnými povoleniami v druhom a treťom období. Obchody v treťom období sú podobné obchodom počas prvého obdobia. V druhom období však existuje jeden významný rozdiel. Výsledky obchodovania v tomto období ukazujú, že prebytok emisných povolení nevznikne, a preto nebude potrebné, aby ich trhoví manažér nakúpil. To znamená, že obmedzenie (9) spolu s obmedzeniami (10) – (12) sú záväzné a cena vychádzajúca z hraničných nákladov je pre každú firmu, ktorá na trhu obchoduje, vypočítaná podľa rovnice (14).

Vo všeobecnosti možno pri pohľade na výsledky obchodovania znázornené v tabuľke 5 konštatovať, že v prvom a treťom období firmy nepoužili všetky emisné povolenia, čo možno z hľadiska kvality ovzdušia ako želaného výsledku tohto procesu vnímať pozitívne. Na druhej strane bol tento výsledok spojený s vyššími čistými výdavkami manažéra

trhu na nákup prebytočných emisných povolení. Porovnanie výsledkov v tabuľkách 4 a 5 ukazuje, že zavedenie záväzných regionálnych obmedzení môže viesť k nižším celkovým emisiám do ovzdušia, a to najmä v prípade, ak obmedzenie 5, stanovené pre celkový počet obchodovaných emisných povolení, nie je záväzné.

Tabuľka 5: Obchodovanie s emisnými povoleniami pri zohľadnení regionálnych obmedzení

	Počet obchodovaných povolení	Cena za emisné povolenie (EUR)	Výdavky na emisné povolenia (EUR)
Obdobie 1			
Firma A	0	3,600	0
Firma B	-757	7,200	-5,450,400
Firma C	-248	9,000	-2,232,000
Firma D	0	3,600	0
Firma E	-400	7,200	-288,000
Firma F	800	5,130	4,104,000
Spolu	-605		-6,458,400
Obdobie 2			
Firma A	191	2,468	471,388
Firma B	-385	4,673	-1,799,105
Firma C	-157	4,000	628,000
Firma D	-181	3,315	-600,015
Firma E	147	2,565	377,055
Firma F	385	2,194	844,690
Spolu	0		-1,333,987
Obdobie 3			
Firma A	135	3,808	514,080
Firma B	136	3,403	462,808
Firma C	-528	6,027	-3,182,256
Firma D	0	3,400	0
Firma E	-356	4,192	-1,492,352
Firma F	322	3,180	1,023,960
Spolu	-291		-2,673,760

Zdroj: simulácie rovnováhy na dynamickom spoločnom trhu na obchodovanie s emisnými povoleniami formulovali autori

Tretia séria numerických simulácií uvažuje so znížením regionálnych štandardov na znečisťovanie pre lokality uvažované v simuláciách v tabuľke 5 o 10%. Výsledky týchto simulácií sú uvedené v tabuľke 6.

Tabuľka 6: Obchodovanie s emisnými povoleniami pri zohľadnení regionálnych obmedzení znížených o 10 %

	Počet obchodovaných povolení	Cena za emisné povolenie (EUR)	Výdavky na emisné povolenia (EUR)
Obdobie 1			
Firma A	0	6,326	0
Firma B	-672	7,200	-4,838,400
Firma C	-152	9,000	-1,368,000
Firma D	0	3,600	0
Firma E	60	7,200	432,000
Firma F	0	5,097	0
Spolu	-764		-5,774,400
Obdobie 2			
Firma A	-167	2,406	-401,802
Firma B	-384	4,935	-1,198,5040
Firma C	-87	5,000	-435,000
Firma D	0	3,564	0
Firma E	238	2,436	579,768
Firma F	0	2,291	0
Spolu	-400		-2,152,074
Obdobie 3			
Firma A	-135	4,006	-540,810
Firma B	-115	3,205	-368,575
Firma C	0	6,304	0
Firma D	0	3,400	0
Firma E	0	4,623	0
Firma F	-322	3,434	-1,105,748
Spolu	-572		-2,015,133

Zdroj: simulácie rovnováhy na dynamickom spoločnom trhu na obchodovanie s emisnými povoleniami formulované autormi

V prvom období firmy B a C predávajú trhovému manažérovi emisné povolenia, zatiaľ čo firma E nakupuje 60 emisných povolení. Firmy A, D a F v prvom období obchodovania emisné povolenia nekupujú, ani nepredávajú. V tomto období vznikne na trhu prebytok emisných povolení vo výške 764 jednotiek, ktoré nakúpi trhový manažér. Prebytok emisných povolení spolu s ich rôznymi cenami pre jednotlivé firmy v tomto období znamená, že obmedzenie (5) týkajúce sa dostupných emisných povolení nie je záväzné, zatiaľ čo obmedzenia (6) – (8) sú záväzné a ceny vychádzajúce z hraničných nákladov sú určené v súlade s rovnicou (9).

Údaje o obchodovaní v druhom období uvedené v tabuľke 6 dokumentujú, že firmy A, B a C budú emisné povolenia na trhu predávať, zatiaľ čo firma E nakúpi emisné povolenia v počte 238. Firmy D a F sa v druhom období na predaji/nákupе emisných povolení nezúčastnia. Opäť vidíme, že v tejto situácii na trhu existuje prebytok emisných povolení. V druhom období nakúpi trhový manažér 400 emisných povolení, ktoré odpovedajú výške ich prebytku na trhu. Existencia prebytku emisných povolení znamená, že obmedzenie (5), týkajúce sa celkového počtu vydaných emisných povolení, nie je záväzné, ale regionálne environmentálne obmedzenia (6) – (8) sú záväzné. Ceny za emisné povolenia zaplatené/prijaté firmami sú stanovené na základe rovnice (11).

Údaje o obchodovaní s emisnými povoleniami v treťom období ukazujú, že firmy A, B a F budú emisné povolenia predávať. Zaujímavé je, že firma F predá 322 emisných povolení, pričom v prvých dvoch obdobiach s emisnými povoleniami neobchodovala. Znovu vidíme, že obmedzenia (6) – (8) sú záväzné a vzniká prebytok počtu emisných povolení. Ceny sú v tomto období určené v súlade s rovnicou (11).

Ak porovnáme tieto tri série simulácií dospejeme k nasledujúcim záverom:

1. Simulácie uvedené v tabuľke 4, ktoré neobsahovali regionálne environmentálne obmedzenia, ukázali, že v tomto prípade ceny vychádzajúce z hraničných nákladov boli v každom z uvažovaných období pre všetky firmy rovnaké, v jednotlivých obdobiach sa však od seba líšili. Rozdiely medzi jednotlivými obdobiami možno vysvetliť najmä zakomponovaním diskontovania do rozhodnutí jednotlivých firiem. V tejto simulácii v žiadnom z uvažovaných časových období nevznikli prebytky emisných povolení a ceny boli stanovené v súlade s rovnicou (13).

2. Základný rozdiel medzi simuláciami v tabuľke 4 a simuláciami v tabuľkách 5 a 6 je zahrnutie regionálnych environmentálnych obmedzení do analýzy. V tomto prípade obmedzenie (5) pre počet emisných povolení vydaných trhovým manažérom už nie je záväzné pre všetky obdobia obchodovania s výnimkou druhého obdobia (tabuľka 5). V tejto situácii v druhom období obchodovania nevzniká prebytok emisných povolení, ale ich rozdielne ceny naznačujú, že regionálne environmentálne obmedzenia sú záväzné a ceny sú určené na základe rovnice (10). V ostatných obdobiach obchodovania zachytených

v tabuľke 5 ako aj v tabuľke 6 existuje prebytok emisných povolení a ceny sú stanovené v súlade s rovnicou (11). Kombinácia záväzných regionálnych obmedzení a nezáväznosti obmedzenia (5) pre počet obchodovaných emisných povolení vedie k nižším celkovým emisiám, avšak s vyššími čistými výdavkami trhového manažéra. Nižšie celkové emisie je podľa výsledkov v tabuľke 4 možné dosiahnuť aj pri nulových čistých výdavkoch manažéra trhu, avšak v takom prípade nemusí dochádzať k dodržaniu prípustnej úrovne emisií v jednotlivých lokalitách. Regionálne environmentálne obmedzenia pre simulácie uvedené v tabuľke 6 sú reštriktívnejšie ako obmedzenia pre simulácie v tabuľke 5. Jednou z príčin tohto rozdielu je väčší prebytok emisných povolení v simuláciách uvedených v tabuľke 6.

Zhrnutie a závery

V príspevku sme rozpracovali dynamický model spoločného trhu na obchodovanie s emisnými povoleniami na znečisťovanie vhodný na riešenie problému perzistentných látok znečisťujúcich ovzdušie. Odvodili sme pravidlá pre určovanie cien založených na hraničných nákladoch, ktoré nadobúdajú tri rôzne formy v závislosti od kombinácie obmedzení, ktoré sú na tomto trhu záväzné. Použili sme numerické simulácie obchodovania na tomto trhu v troch časových obdobiach, aby sme ukázali užitočnosť uvedeného dynamického modelu pre riešenie problému znečisťovania ovzdušia perzistentnými látkami. Formulovaný modelový prístup môže byť užitočný najmä pri riešení potenciálnych problémov pri obchodovaní s emisnými povoleniami v súvislosti s porušením regionálnych environmentálnych noriem v rôznych lokalitách a s riešením problému znečistenia perzistentnou znečisťujúcou látkou. Všetky obchody sa uskutočňujú prostredníctvom spoločného trhu a koordinuje ich trhový manažér. Ceny emisných povolení vychádzajú zo súboru tieňových cien, ktoré zohľadňujú vplyv každej firmy na aktuálnu environmentálnu kapacitu v každej uvažovanej lokalite, v ktorej dochádza k znečisteniu.

Navrhnutý model trhu má predpoklady významne znížiť transakčné náklady spojené s obchodovaním s emisnými povoleniami. Keďže v modeli explicitne uvažujeme s regionálnymi obmedzeniami na znečistenie, ak by hrozilo, že budú porušené stanovené štandardy pre kvalitu ovzdušia v jednotlivých lokalitách, obchodovanie s emisnými povoleniami by sa tomu automaticky prispôbilo, čo by sa prejavilo aj v cenách emisných povolení generovaných modelom. Dynamická formulácia trhu tiež zvyšuje možnosti nájdenia vhodných riešení pre vznik trhovej rovnováhy. Uskutočnené numerické simulácie ilustrujú fungovanie vytvoreného systému ako aj užitočnosť modelu pre riešenie praktických problémov obchodovania s emisnými povoleniami a ponúkajú zaujímavé výsledky využiteľné pri konštruovaní trhu s emisiami v praxi. Kombinácia záväzných regionálnych

obmedzení a nezávnosti obmedzenia pre počet obchodovaných emisných povolení vedie k nižším celkovým emisiám, avšak pri vyšších čistých výdavkoch trhového manažéra. Nižšie celkové emisie je podľa výsledkov simulácií možné dosiahnuť aj pri nulových čistých výdavkoch manažéra trhu, avšak v takom prípade sa nemusí dosiahnuť prípustná úroveň emisií v jednotlivých lokalitách.

Výskum, ktorý sme prezentovali v tomto článku, je možné ďalej rozvinúť tak, že sériu obmedzení modelu rozšírime na viac znečisťujúcich látok a viacero lokalít. Je tiež možné navrhnúť rôzne postupy testovania formulovaného modelu v konkrétnom hospodársko-politickom kontexte obchodovania s emisnými povoleniami. Použité numerické príklady sú založené na hypotetických ponukových funkciách firiem vo vzťahu k emisným povoleniam, alternatívne by však bolo možné na otestovanie fungovania modelu použiť aj experimentálnu metodológiu. V snahe kvantifikovať úsporu transakčných nákladov, ku ktorej pri využití tohto typu obchodovania s emisnými povoleniami dôjde, by bolo možné porovnať transakčné náklady pri obchodovaní na spoločnom trhu s transakčnými nákladmi pri obchodovaní v systéme postupného bilaterálneho obchodovania, a tým explicitne zistiť, ktorá z týchto metód je spojená s nižšími transakčnými nákladmi.

Príloha 1

Táto príloha uvádza numerickú špecifikáciu základného modelu lineárneho programovania, ktorú sme použili v našom výskume. Najskôr sme zadefinovali nasledovné premenné: t – obdobie obchodovania ($t = 1, 2, 3$; i – počet firiem obchodujúcich s povoleniami na znečisťovanie ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) a s ($s = 1, \dots, 9$) – ponuka každej firmy v jednotlivých tranžách, L_{tis} – množstvo povolení na znečisťovanie akceptovaných v každej tranži s firmou i v obchodovanom období t a L_{it} – celkové množstvo povolení na znečisťovanie požadovaných firmou i v období t

Pri vyššie zadefinovaných premenných sme použili nasledovný program (kód):

$$\begin{aligned} & \text{MAX } 3600L_{111} + 3200L_{112} + 2800L_{113} + 2400L_{114} + 2000L_{115} + 1600L_{116} + 1200L_{117} + \\ & \quad 800L_{118} + 400L_{119} \\ & \quad + 7200L_{121} + 6400L_{122} + 5600L_{123} + 4800L_{124} + 4000L_{125} + 3200L_{126} + 2400L_{127} + \\ & \quad 1600L_{128} + 800L_{129} \\ & \quad + 9000L_{131} + 8000L_{132} + 7000L_{133} + 6000L_{134} + 5000L_{135} + 4000L_{136} + 3000L_{137} + \\ & \quad 2000L_{138} + 1000L_{139} \\ & \quad + 3600L_{141} + 3200L_{142} + 2800L_{143} + 2400L_{144} + 2000L_{145} + 1600L_{146} + 1200L_{147} + \\ & \quad 800L_{148} + 400L_{149} \\ & \quad + 7200L_{151} + 6400L_{152} + 5600L_{153} + 4800L_{154} + 4000L_{155} + 3200L_{156} + 2400L_{157} + \\ & \quad 1600L_{158} + 800L_{159} \end{aligned}$$

+ 9000L161 + 8000L162 + 7000L163 + 6000L164 + 5000L165 + 4000L166 + 3000L167 +
 2000L168 + 1000L169
 + 3606.266L211 + 3206.282L212 + 2806.298L213 + 2406.314L214 + 2006.33L215 +
 1606.346L216 + 120.362L217 + 806.378L218 + 406.394L219
 + 7211.244L221 + 6409.987L222 + 5608.731L223 + 4807.474L224 + 4006.218L225 +
 3204.962L226 + 2403.705L227 + 1602.449L228 + 801.1923L229
 + 9000.04L231 + 8000.02L232 + 7000.12L233 + 6000.12L234 + 5000.2L235 +
 4000.24L236 + 3000.28L237 + 2000.32L238 + 1004.36L239
 + 3584L241 + 3168L242 + 2752L243 + 2336L244 + 1920L245 + 1504L246 + 1008L247 +
 672L248 + 256L249
 + 7222.814L251 + 6446.461L252 + 5670.109L253 + 4893.754L254 + 4117.4L255 +
 3341.047L256 + 2564.694L257 + 1788.34L258 + 1011.986L259
 + 9000.04L261 + 8000.08L262 + 7000.02L263 + 6000.16L263 + 5000.2L265 +
 4000.24L266 + 3000.28L267 + 2000.32L268 + 1000.36L269
 + 3605.673L311 + 3205.037L312 + 2804.4L313 + 2403.763L314 + 2003.126L315 +
 1602.49L316 + 1201.854L317 + 801.2161L318 + 400.5793L319
 + 7211.362L321 + 6410.107L322 + 5608.851L323 + 4807.595L324 + 4006.34L325 +
 3205.084L326 + 2403.828L327 + 1602.572L328 + 801.3167L329
 + 8999.999L331 + 7999.998L332 + 6999.998L333 + 5999.997L334 + 4999.997L335 +
 3999.996L336 + 2999.996L337 + 1999.996L338 + 999.9951L339
 + 3399.992L341 + 3199.983L342 + 2799.975L343 + 2399.967L344 + 1999.958L345 +
 1599.195L346 + 1199.944L347 + 799.933L348 + 399.9246L349
 + 7200.951L351 + 6400.933L352 + 5600.918L353 + 4800.901L354 + 4000.884L355 +
 3200.868L356 + 2400.851L357 + 1600.834L358 + 800.8172L359
 + 9535.277L361 + 8475.903L362 + 7416.432L363 + 6536.961L364 + 5297.49L365 +
 4238.019L366 + 3179.548L367 + 2119.076L368 + 1059.605L369 **(A.1)**

Subject to

$L11 + L12 + L13 + L14 + L15 + L16 \leq 8880$ **(A.2)**

$L21 + L22 + L23 + L24 + L25 + L26 \leq 7104$ **(A.3)**

$L31 + L32 + L33 + L34 + L35 + L36 \leq 5683$ **(A.4)**

$L111 + L112 + L113 + L114 + L115 + L116 + L117 + L118 + L119 - L11 = 0$ **(A.5)**

$L121 + L122 + L123 + L124 + L125 + L126 + L127 + L128 + L129 - L12 = 0$ **(A.6)**

$L131 + L132 + L133 + L134 + L135 + L136 + L137 + L138 + L139 - L13 = 0$ **(A.7)**

$L141 + L142 + L143 + L144 + L145 + L146 + L147 + L148 + L149 - L14 = 0$ **(A.8)**

$L151 + L152 + L153 + L154 + L155 + L156 + L157 + L158 + L159 - L15 = 0$ **(A.9)**

$L161 + L162 + L163 + L164 + L165 + L166 + L167 + L168 + L169 - L16 = 0$ **(A.10)**

$L221 + L212 + L213 + L214 + L215 + L216 + L217 + L218 + L219 - L21 = 0$ **(A.11)**
 $L221 + L222 + L223 + L224 + L225 + L226 + L227 + L228 + L229 - L22 = 0$ **(A.12)**
 $L231 + L232 + L233 + L234 + L235 + L236 + L237 + L238 + L239 - L23 = 0$ **(A.13)**
 $L241 + L242 + L243 + L244 + L245 + L246 + L247 + L248 + L249 - L24 = 0$ **(A.14)**
 $L251 + L252 + L253 + L254 + L255 + L256 + L257 + L258 + L259 - L25 = 0$ **(A.15)**
 $L261 + L262 + L263 + L264 + L265 + L266 + L267 + L268 + L269 - L26 = 0$ **(A.16)**
 $L311 + L321 + L313 + L314 + L315 + L316 + L317 + L318 + L319 - L31 = 0$ **(A.17)**
 $L321 + L322 + L323 + L324 + L325 + L326 + L327 + L328 + L329 - L32 = 0$ **(A.18)**
 $L331 + L332 + L333 + L334 + L335 + L336 + L337 + L338 + L339 - L33 = 0$ **(A.19)**
 $L341 + L342 + L343 + L344 + L345 + L346 + L347 + L348 + L349 - L34 = 0$ **(A.20)**
 $L351 + L352 + L353 + L354 + L355 + L356 + L357 + L358 + L359 - L35 = 0$ **(A.21)**
 $L361 + L362 + L363 + L364 + L365 + L366 + L367 + L368 + L369 - L36 = 0$ **(A.22)**
 $L111 \leq 200$ **(A.23)**
 $L112 \leq 200$ **(A.24)**
 $L113 \leq 200$ **(A.25)**
 $L114 \leq 200$ **(A.26)**
 $L115 \leq 200$ **(A.27)**
 $L116 \leq 200$ **(A.28)**
 $L117 \leq 200$ **(A.29)**
 $L118 \leq 200$ **(A.30)**
 $L119 \leq 200$ **(A.31)**
 $L122 \leq 200$ **(A.32)**
 $L123 \leq 200$ **(A.33)**
 $L124 \leq 200$ **(A.34)**
 $L125 \leq 200$ **(A.35)**
 $L126 \leq 200$ **(A.36)**
 $L127 \leq 200$ **(A.37)**
 $L128 \leq 200$ **(A.38)**
 $L129 \leq 200$ **(A.39)**
 $L131 \leq 200$ **(A.40)**
 $L132 \leq 200$ **(A.41)**
 $L133 \leq 200$ **(A.42)**
 $L134 \leq 200$ **(A.43)**
 $L135 \leq 200$ **(A.44)**
 $L136 \leq 200$ **(A.45)**

L137 <= 200 (A.46)	L216 <= 192.3 (A.81)
L138 <= 200 (A.47)	L217 <= 192.3 (A.82)
L139 <= 200 (A.48)	L218 <= 192.3 (A.83)
L141 <= 400 (A.49)	L219 <= 192.3 (A.84)
L142 <= 400 (A.50)	L221 <= 192.3 (A.85)
L143 <= 400 (A.51)	L222 <= 192.3 (A.86)
L144 <= 400 (A.52)	L223 <= 192.3 (A.87)
L145 <= 400 (A.53)	L224 <= 192.3 (A.88)
L146 <= 400 (A.54)	L225 <= 192.3 (A.89)
L147 <= 400 (A.55)	L226 <= 192.3 (A.90)
L148 <= 400 (A.56)	L227 <= 192.3 (A.91)
L149 <= 400 (A.57)	L228 <= 192.3 (A.92)
L151 <= 400 (A.58)	L229 <= 192.3 (A.93)
L152 <= 400 (A.59)	
L153 <= 400 (A.60)	L231 <= 192.3 (A.94)
L154 <= 400 (A.61)	L232 <= 192.3 (A.95)
L155 <= 400 (A.62)	L233 <= 192.3 (A.96)
L156 <= 400 (A.63)	L234 <= 192.3 (A.97)
L157 <= 400 (A.64)	L235 <= 192.3 (A.98)
L158 <= 400 (A.65)	L236 <= 192.3 (A.99)
L159 <= 400 (A.66)	L237 <= 192.3 (A.100)
L161 <= 400 (A.67)	L238 <= 192.3 (A.101)
L162 <= 400 (A.68)	L239 <= 192.3 (A.102)
L163 <= 400 (A.69)	L241 <= 383.6 (A.103)
L164 <= 400 (A.70)	L242 <= 384.6 (A.104)
L165 <= 400 (A.71)	L243 <= 384.6 (A.105)
L166 <= 400 (A.72)	L244 <= 384.6 (A.106)
L167 <= 400 (A.73)	L245 <= 384.6 (A.107)
L168 <= 400 (A.74)	L246 <= 384.6 (A.108)
L169 <= 400 (A.75)	L247 <= 384.6 (A.109)
L211 <= 192.3 (A.76)	L248 <= 384.6 (A.110)
L212 <= 192.3 (A.77)	L249 <= 384.6 (A.111)
L213 <= 192.3 (A.78)	L251 <= 384.6 (A.112)
L214 <= 192.3 (A.79)	L252 <= 384.6 (A.113)
L215 <= 192.3 (A.80)	L253 <= 384.6 (A.114)

L254 <= 384.6 (A.115)	L332 <= 177.8 (A.150)
L255 <= 384.6 (A.116)	L333 <= 177.8 (A.151)
L256 <= 384.6 (A.117)	L334 <= 177.8 (A.152)
L257 <= 384.6 (A.118)	L335 <= 177.8 (A.153)
L258 <= 384.6 (A.119)	L336 <= 177.8 (A.154)
L259 <= 384.6 (A.120)	L337 <= 177.8 (A.155)
L261 <= 384.6 (A.121)	L338 <= 177.8 (A.156)
L262 <= 384.6 (A.122)	L339 <= 177.8 (A.157)
L263 <= 384.6 (A.123)	L341 <= 355.563 (A.158)
L264 <= 384.6 (A.124)	L342 <= 355.563 (A.159)
L265 <= 384.6 (A.125)	L343 <= 355.563 (A.160)
L266 <= 384.6 (A.126)	L344 <= 355.563 (A.161)
L267 <= 384.6 (A.127)	L345 <= 355.563 (A.162)
L268 <= 384.6 (A.128)	L346 <= 355.563 (A.163)
L269 <= 384.6 (A.129)	L347 <= 355.563 (A.164)
L311 <= 177.8 (A.130)	L348 <= 355.563 (A.165)
L312 <= 177.8 (A.131)	L349 <= 355.563 (A.166)
L313 <= 177.8 (A.132)	L351 <= 355.563 (A.167)
L314 <= 177.8 (A.133)	L352 <= 355.563 (A.168)
L314 <= 177.8 (A.134)	L353 <= 355.563 (A.169)
L315 <= 177.8 (A.135)	L354 <= 355.563 (A.170)
L316 <= 177.8 (A.136)	L355 <= 355.563 (A.171)
L317 <= 177.8 (A.137)	L356 <= 355.563 (A.172)
L318 <= 177.8 (A.138)	L357 <= 355.563 (A.173)
L319 <= 177.8 (A.139)	L358 <= 355.563 (A.174)
L321 <= 177.8 (A.140)	L359 <= 355.563 (A.175)
L322 <= 177.8 (A.141)	L361 <= 355.563 (A.176)
L323 <= 177.8 (A.142)	L362 <= 355.563 (A.177)
L324 <= 177.8 (A.143)	L363 <= 355.563 (A.178)
L325 <= 177.8 (A.144)	L364 <= 355.563 (A.179)
L326 <= 177.8 (A.145)	L365 <= 355.563 (A.180)
L327 <= 177.8 (A.146)	L366 <= 355.563 (A.181)
L328 <= 177.8 (A.147)	L367 <= 355.563 (A.182)
L329 <= 177.8 (A.148)	L368 <= 355.563 (A.183)
L331 <= 177.8 (A.149)	L369 <= 355.563 (A.184)

$$\begin{aligned}
&0.035L11 + 0.017L12 + 0.046L13 + 0.046L14 + 0.038L15 + 0.027L16 \leq 144.96 \text{ (A.185)} \\
&0.018L11 + 0.0318L12 + 0.227L13 + 0.067L14 + 0.03L15 + 0.062L16 \leq 310.96 \text{ (A.186)} \\
&0.035L21 + 0.017L22 + 0.046L23 + 0.046L24 + 0.038L25 + 0.027L26 + 0.0175L11 + 0.85L12 + \\
&\quad 0.023L13 + 0.023L14 + 0.019L15 + 0.0135L16 \leq 5226.73 \text{ (A.187)} \\
&0.018L21 + 0.0318L22 + 0.227L23 + 0.067L24 + 0.031L15 + 0.062L26 + 0.009L11 + 0.0139L12 \\
&\quad + 0.1135L13 + 0.0335L14 + 0.0155L15 + 0.031L16 \leq 528.65 \text{ (A.188)} \\
&0.035L31 + 0.017L32 + 0.046L33 + 0.046L34 + 0.038L35 + 0.027L36 + 0.0175L21 + 0.0385L22 \\
&\quad + 0.023L23 + 0.023L24 + 0.019L25 + 0.0135L26 \leq 275.32 \text{ (A.189)} \\
&0.018L31 + 0.0318L32 + 0.227L33 + 0.067L34 + 0.031L35 + 0.062L36 + 0.009L21 + 0.159L22 + \\
&\quad 0.1135L23 + 0.035L24 + 0.0155L25 + 0.031L26 \leq 711.07 \text{ (A.190)} \\
&0.0175L31 + 0.0085L32 + 0.023L33 + 0.023L34 + 0.019L35 + 0.0135L36 \leq 75.34 \text{ (A.191)} \\
&0.009L31 + 0.159L32 + 0.1135L33 + 0.0335L34 + 0.0155L35 + 0.031L36 \leq 264.99 \text{ (A.192)}
\end{aligned}$$

Objektívna funkcia modelu je daná rovnicou (A.1). Obmedzenia (A.2), (A.3), a (A.4) sú obmedzenia, ktoré zabezpečujú, že celkové množstvo obchodovaných povolení na znečisťovanie nemôže byť vyššie ako celkové množstvo povolení, ktoré vydal manažér trhu v každom z troch období obchodovania. Rovnice (A.5) – (A.22) vyjadrujú alokačné obmedzenia vo vzťahu k množstvu akceptovaných povolení na znečisťovanie a konečnú pozíciu každej firmy vo vzťahu k počtu povolení na znečisťovanie v každom z troch obchodovaných období. Obmedzenia (A.23) – (A.184) určujú horné hranice na obchodovanie s povoleniami pre všetky firmy v každom z uvažovaných období obchodovania, ktoré sú súčasťou krokových funkcií dopytu po povoleniach zo strany jednotlivých firiem na tomto trhu. Obmedzenia (A.185) – (A.192) sú priestorové SO₂ obmedzenia pre každý z dvoch receptorových bodov v každom z troch období obchodovania.

Tento model sme riešili s využitím software na lineárne programovanie LINDO (Schrage, 1986), ktorý je vhodný na riešenie podobných zadanií. Tieňové ceny sú tiež určené v systéme LINDO pre každé obmedzenie ako súčasť numerického riešenia. Ako je dobre známe, tieňová cena pre nezáväzné obmedzenie je 0, zatiaľ čo pre záväzné obmedzenie nadobúda tieňová cena číselné hodnoty, ktoré sú odlišné od nuly.

Literatúra

- Atkinson, S., Tietenberg, T. (1991). Market Failure in Incentive-Based Regulation: The Case of Emissions Trading. *Journal of Environmental Economics and Management*, 21(1), 17–31, [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(91\)90002-z](https://doi.org/10.1016/0095-0696(91)90002-z)
- Eliassen, A., Saltbones, J. (1975). Decay and Transformation Rates of SO₂, as Estimated from Emission Data, Trajectories, and Measured Air Concentrations. *Atmospheric Environment*, 9(4), 425–429, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90128-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90128-6)

- Eliassen, A., Saltbones, J. (1983). Modeling of Long-Range Transport of Sulphur over Europe: A Two-Year Model Run and Some Model Experiments. *Atmospheric Environment*, 17(8), 1457–1473, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(83\)90299-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(83)90299-8)
- Ellis, J. H. (1988). Multiobjective Mathematical Programming Models for Acid Rain Control. *European Journal of Operational Research*, 35(3), 365–377, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90226-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90226-3)
- Ellis, J. H., McBean, E. A., Farquhar, G. J. (1985). Deterministic Linear Programming Models for Acid Rain Abatement. *Journal of Environmental Engineering*, 111(2), 119–132, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1985\)111:2\(119\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1985)111:2(119))
- Farzin, Y. H. (1996). Optimal Pricing of Environmental and Natural Resource Use with Stock Externalities. *Journal of Public Economics*, 62(1–2), 31–57, [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(96\)01573-3](https://doi.org/10.1016/0047-2727(96)01573-3)
- Griffin, R. C. (1987). Environmental Policy for Spatial and Persistent Pollutants. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14(1), 41–53, [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(87\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0095-0696(87)90004-0)
- Hogan, W. W., Read, E. G., Ring, B. J. (1996). Using Mathematical Programming for Electricity Spot Pricing. *International Transactions on Operations Research*, 3(3–4), 209–221, <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1996.tb00048.x>
- Hordijk, L. (1991). Integrated Environmental Economic Systems, in Opschoor, H., Pearce, D., eds., *Persistent Pollutants: Economics and Policy*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 105–114, https://doi.org/10.1007/978-94-011-3372-2_11
- Kruitwagen, S., Folmer, H., Hendrix, E., et al. (2000). Trading Sulphur Emissions in Europe: Guided Bilateral Trade. *Environmental and Resource Economics*, 16, 423–441, <https://doi.org/10.1023/A:1008371731089>
- Lewis, L. Y. (2011). A Virtual Field Trip to the Real World of Cap and Trade: Environmental Economics and the EPA SO₂ Allowance Auction. *Journal of Economic Education*, 42(4), 354–365, <https://doi.org/10.1080/00220485.2011.606086>
- McCabe, K. A., Rassenti, S. J., Smith, V. L. (1991). Smart Computer-Assisted Markets. *Science*, 254(5031), 534–538, <https://doi.org/10.1126/science.254.5031.534>
- McCarl, B. A., Spreen, T. H. (1980). Price Endogenous Mathematical Programming as a Tool for Sector Analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 62(1), 87–102, <https://doi.org/10.2307/1239475>
- Murphy, J. J., Dinar, A., Howitt, R. E., et al. (2000). The Design of Smart Market Institutions Using Laboratory Experiments. *Environmental and Resource Economics*, 17, 375–394, <https://doi.org/10.1023/A:1026598014870>
- Opschoor, J. B., Pearce, D. W. (1991). Persistent Pollutants: A Challenge for the 1990s, in Opschoor, H., Pearce, D., eds., *Persistent Pollutants: Economics and Policy*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 1–8, https://doi.org/10.1007/978-94-011-3372-2_1

- Porter, D., Rassenti, S., Shobe, W., *et al.* (2009). The Design, Testing, and Implementation of Virginia's NO_x Allowance Auction. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 69(2), 190–200, <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2007.09.007>
- Prabodanie, R. A. R., Raffensperger, J. F., Milke, M. W. (2010). A Pollution Offset System for Trading Non-Point Source Water Pollution Permits. *Environmental and Resource Economics*, 45(4), 499–515, <https://doi.org/10.1007/s10640-009-9325-1>
- Prabodanie, R. A. R., Raffensperger, J. F., Read, E. F., *et al.* (2014). LP Models for Pricing Diffuse Nitrate Discharge Permits. *Annals of Operations Research*, 220(1), 87–109, <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0941-0>
- Raffensperger, J. F., Milke, M. W., Read, E. G. (2009). A Deterministic Smart Market Model for Groundwater. *Operations Research*, 57(6), 1333–1346, <https://doi.org/10.1287/opre.1090.0730>
- Samuelson, P. A. (1952). Spatial Price Equilibrium and Linear Programming. *American Economic Review*, 42(3), 283–303.
- Schrage, L. (1986). *Linear, Integer, and Quadratic Programming with LINDO*. Palo Alto, CA: 1986, 3rd Edition.
- Takayama, T., Judge, G. G. (1971). *Spatial and Temporal Price and Allocation Models*. Amsterdam: North-Holland Publishing Co.
- Willett, K., Caplanova, A., Sivak, R. (2014). Pricing Mechanisms for Cap and Trade Policies: Computer-Assisted Smart Markets for Air Quality. *Journal of Environmental Planning and Management*, 57(8), 1240–1251, <https://doi.org/10.1080/09640568.2013.795887>
- Willett, K., Caplanova, A., Sivak, R. (2015). Emission Discharge Permits with Regulatory Tiering: Numerical Simulations with a Computer-Assisted Smart Market. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 4(3), 259–277, <https://doi.org/10.1080/21606544.2014.987181>