

SIMULAČNÍ MODELY TOKU ENERGIE V EKOSYSTÉMECH

Luboš Matějček

Ústav pro životní prostředí
Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Benátská 2, Praha 2, 128 01
e-mail: LMATEJIC@MBOX.CESNET.CZ

Abstrakt

Řešení matematických modelů v podobě simulačních modelů realizovaných pomocí blokových schémat a vhodného výpočetního prostředku se ukázalo velice vhodné v technicky zaměřených vědách a přináší i nové možnosti při studiu ekologických soustav v ekologii. Grafické schéma představuje názorný prostředek pro vyjádření vzájemných vazeb a závislosti řady fyzikálně-chemických a ekologických veličin a umožňuje lépe oddělit řadu významných jevů vzhledem k značné složitosti a obtížím při sledování přírodních dějů v ekosystémech na úrovni akumulace a toků energie. Uvedený článek se zabývá možnostmi simulace energetických modelů ekosystémů pomocí programů MATLAB a SIMULINK. Na několika příkladech jsou ukázány přístupy k formulaci matematických modelů a návrhu struktury simulačních modelů. Pro studium dynamiky akumulace a přenosu energie je využito logistické závislosti se zpožděnými veličinami.

Úvod

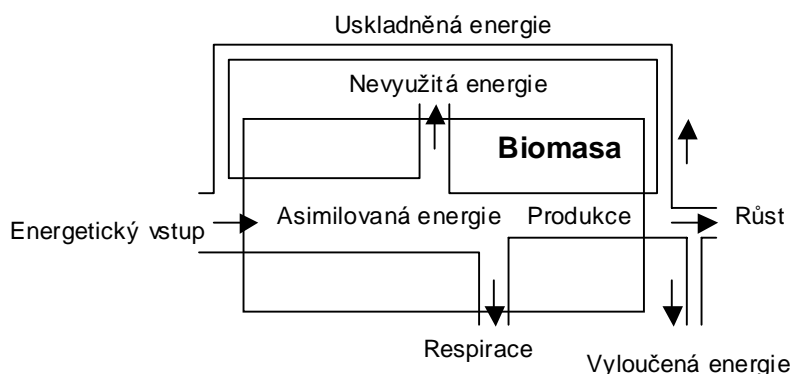
V ekologii existují různé přístupy při sestavování matematických modelů ekologických systémů na úrovni populací, společenstev a ekosystémů. Základní vztahy popsal Malthus již v 19. století v podobě exponenciálních růstových křivek. Exponenciální růstový model předpokládá zvyšování početnosti populace úměrně celkovému počtu jedinců. Tento model je však použitelný většinou pouze pro počáteční stádia růstu některých populací, kdy nepůsobí biotické a abiotické omezující faktory (omezený prostor a množství potravy, klimatické podmínky, zvýšený výskyt nemocí při rostoucí hustotě jedinců). Růstový model zahrnující tyto faktory popsali nezávisle Verhulst (1838) a Pearl (1920). Tento model nachází i využití při popisu interakcí populací v rámci společenstev. Je znám také pod označením logistický růstový model. Popsané modely v podobě obyčejných diferenciálních rovnic jsou řešitelné analyticky. Ve své původní podobě však poskytují pouze základní popis chování populací z hlediska dynamiky její početnosti, biomasy a případně i vázané energie. Zahrnutí vzájemných interakcí populací, dalších faktorů a časových zpoždění působících v rámci společenstev vede na diferenciální rovnice řešitelné analyticky za speciálních podmínek. Při popisu vztahů v rámci ekosystémů je řešení těchto matematických modelů většinou omezeno na využití numerických metod společně s výkonnými výpočetními prostředky.

Popis okamžitých změn početností lze využít ve zjednodušených případech, kde je možné jedince považovat vzhledem k vzájemným interakcím a nárokům přibližně za rovnocenné, jestliže početnost populací je dostatečně velká a jednotlivé věkové třídy se vzájemně časově překrývají. V případech rozdílné velikosti různých druhů a jejich významnosti z hlediska přenosu energie v rámci potravních řetězců je vhodné použít pro popis velikosti populací jejich celkové biomasy a nebo množství vázané energie. Vzhledem k nepřímým metodám zjišťování množství energie jsou příslušné modely zatíženy značnými nepřesnostmi. Jejich význam často spočívá pouze v naznačení vzájemných interakcí v rámci

potravních řetězců. Ve všech případech však nachází jak exponenciální tak i logistické růstové vztahy značné uplatnění pro svou jednoduchost a možnost srovnat různé ekologické systémy na základě parametrů příslušných růstových modelů.

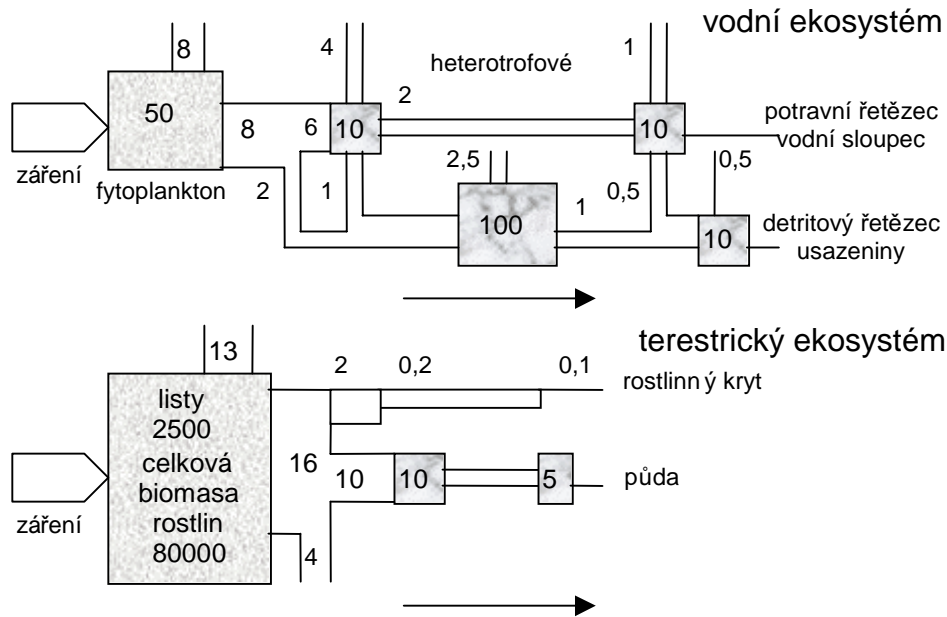
Toky energie v ekosystémech

Hlavním zdrojem energie ekosystémů je sluneční záření, které vstupuje jednak přímo do jednotlivých biotických složek ekosystémů a nebo ve formě dlouhovělného tepelného záření z okolních ploch. Pouze malá část je však přeměněna fotosyntézou, aby poskytovala energii biotickým složkám. Odhaduje se zhruba, že 0,1% celkové energie slunečního záření vstupující do autotrofní vrstvy biosféry je dále k dispozici ve formě čisté primární produkce dostupné pro heterotrofy. K dalšímu přesunu energie dochází v potravních řetězcích, kde je velká část energie přeměněna na teplo a pouze asi 10% u býložravců a 20% u masožravců je využito na další trofické úrovni. Podle druhů vstupujících do transformace energie v rámci ekosystémů lze vymezit různé typy potravních řetězců. Pastevní řetězec vede od rostlin přes býložravce k masožravcům. Detritový řetězec postupuje od mrtvé ústrojné hmoty do mikroorganismů, dále pak k detritivorům a jejich predátorům. Jak pastevní tak i detritové řetězce jsou navzájem propojeny a tvoří potravní síť. Na základě postupné transformací energie jednotlivými biotickými složkami lze definovat různé trofické úrovně. Rostliny se tak vyskytují na první trofické úrovni, býložravci na druhé a masožravci postupně na dalších trofických úrovních. Zároveň platí, že podle popsaného dělení se některé populace organismů mohou podle potravních zdrojů vyskytovat na více trofických úrovních. Na obr.1 je znázorněna jedna složka, ve které dochází k transformaci energie.



Obr.1 Modelová složka transformace energie v ekosystému

Biomasa je vyjadřována v jednotkách energie a značí množství energie akumulované v dané složce. Protože v rovnovážných stavech platí zákony zachování energie, je možné na základě experimentálních terénních měření odhadovat zbývající složky energetických toků nebo prověřovat správnost získávání a odhadu dat jednotlivých energetických toků. Vzhledem k tomu, že měření akumulované energie a energetických toků se odhaduje na základě nepřímých měření, může být chyba stanovení veličin na úrovni nejvyšších řádů hodnot měřených veličin. I když se však nepodaří přesně kvantifikovat příslušné veličiny, již možnost zakreslení všech vazeb mezi složkami na dané rozlišovací úrovni umožňuje provést přibližné úvahy o chování ekologického systému. Příklady přibližného rozložení akumulované energie a energetických toků ve složkách vodního a terestrického ekosystému ukazuje obr.2.



Obr.2 Příklady toku energie v ekosystémech (E.P. Odum, 1963)

Pozn.: Akumulovaná energie, energetické toky v jednotkách kcal m², kcal m² rok⁻¹.

Matematický popis akumulace a přenosu energie

Akumulace a přenos energie v ekosystémech závisí na vzájemné interakci složek v rámci trofických sítí, působení omezujících vnitřních a vnějších faktorů a v poslední době také stále více na antropogenní činnosti. Existují různé přístupy pro popis zmíněných jevů. Kromě matematických modelů většinou v podobě obyčejných diferenciálních rovnic, existují různé grafické metody znázorňující akumulaci, toky energie a další vazby s využitím různých vzájemně propojených symbolů (H.T.Odum, 1999). Tato schémata lze převést do tvaru matematických vztahů. Na podobném principu je také založen například grafický simulační program Stella (Hannon, Ruth, 1994). Grafické přístupy k sestavování modelů jsou ovlivněny specifickými vlastnostmi modelovaných reálných objektů a přístupy jednotlivých autorů. Jednou z možností, která je prezentována v tomto příspěvku, je využití blokových schémat. Grafické modely sestavené na uvedeném principu jsou využívány především při studiu dynamických vlastností řídicích a regulačních obvodů. Využití tohoto přístupu při studiu složitých vazeb ekologických systémů často umožňuje překonat obtíže při formulaci matematických modelů a interpretaci simulačních výsledků. Dalším požadavkem pro zjednodušení formulace modelů představuje možnost vytvářet subsystemy, které představují různé ekologické složky. Takto vzniklé modely se vyznačují hierarchickým uspořádáním s lepší čitelností vazeb na jednotlivých úrovních. Pro obecný popis akumulace energie v jednotlivých ekologických složkách lze využít modelu logistického růstu populací:

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K} \right) \quad (1)$$

kde x představuje množství energie [J], r je rychlost růstu [J s⁻¹] a t je čas [s]. K se nazývá kapacitou [J] a v tomto případě označuje maximální množství energie vzhledem k prostoru, množství potravy, klimatickým faktorům a dalším omezujícím parametrům, která může být vázána například na populaci určitého druhu.

Model logistického růstu (1) nerespektuje změnu kapacity podle množství energie ve složkách, na kterých je uvedená složka v potravním řetězci závislá, a dále neuvažuje

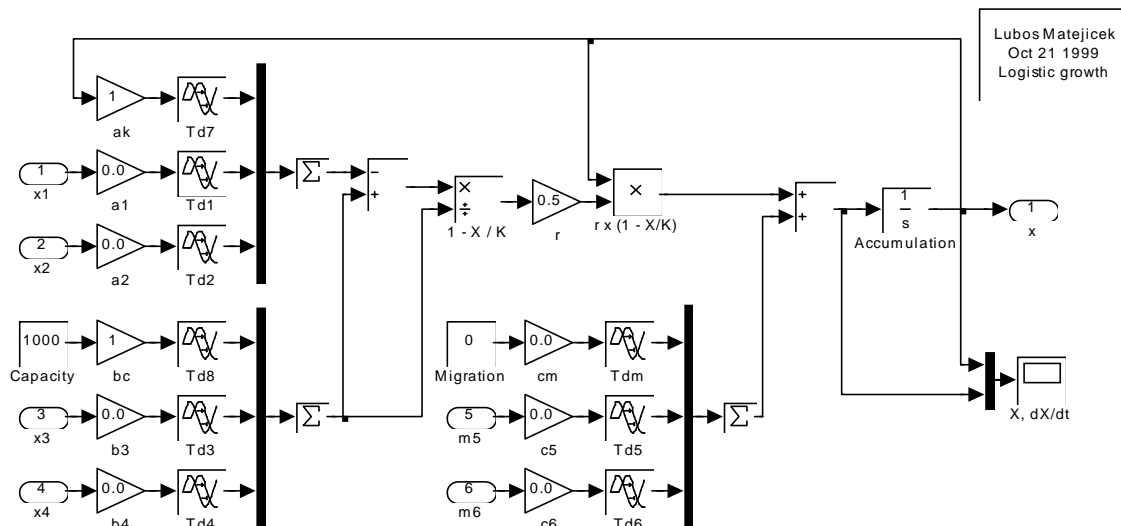
zpoždění v přenosu energie a kompetici některých populací o společný zdroj potravy. Po úpravě přechází rovnice (1) do tvaru:

$$\frac{dx_k}{dt} = r_k x_k \left(1 - \frac{x_k(t-Tdk) + a_i \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n x_i(t-Tdi)}{b_j \sum_{j=1}^m x_j(t-Tdj)} \right) + \sum_{l=1}^p c_l m_l(t-Tdl) \quad (2)$$

kde x_k je energie vázaná danou složkou s indexem k , v čitateli zlomku značí veličiny x_i v sumaci všechny další energetické složky, které využívají stejný potravní zdroj. Celková kapacita energetických zdrojů, které jsou přímo využitelné pro danou složku, se nachází ve jmenovateli. Koeficienty a_i resp. b_i nastavují váhy s jakými ovlivňují jednotlivé složky x_i resp. x_j danou složku x_k . Sumace m_l představuje migrace, které v případě prostorového rozdělení složky na více podsystémů jsou upraveny váhovými koeficienty c_l . Matematický model podle rovnice (2) reprezentuje subsystém popisující dynamiku akumulace energie v jedné složce ekosystému. Hodnoty, kterých nabývají indexy i a j , závisí na struktuře trofické sítě. Vlivem konečné rychlosti při transportu energie mezi složkami a i uvnitř složky dochází ke zpoždění přenosu energie. To je zohledněno příslušnými konstantami zpoždění Tdk , Tdi a Tdj a Tdl . Zpoždění přenosu energie může být také způsobeno nutnými vývojovými stádii jednotlivých zdrojů nebo nedostupností potenciálních zdrojů energie vlivem působení biotických a abiotických faktorů.

Simulace akumulace a přenosu energie

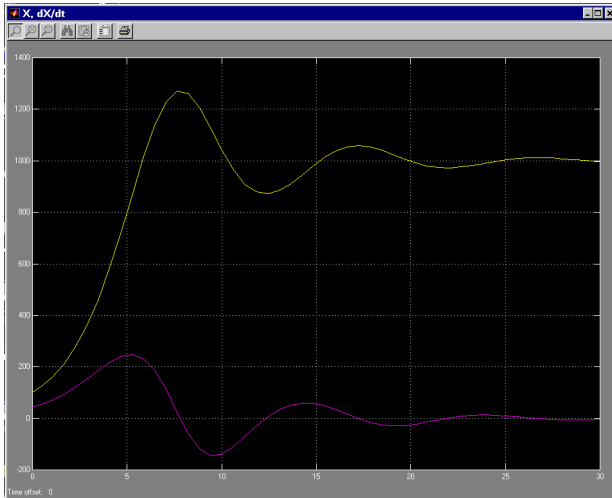
Obecný matematický model energetických poměrů ve složce ekosystému (2) lze převést na simulační model v prostředí nadstavby *SIMULINK* programu *MATLAB*. Matematické vztahy jsou vyjádřeny v podobě blokových schémat pomocí bloků a spojnic mezi nimi. Bloky značí matematické operace nebo různé pomocné funkce a spojnice příslušné veličiny. Jedna z možných blokových realizací rovnice (2) je na obr.3.



Obr.3 Simulační schéma modelu logistického růstu

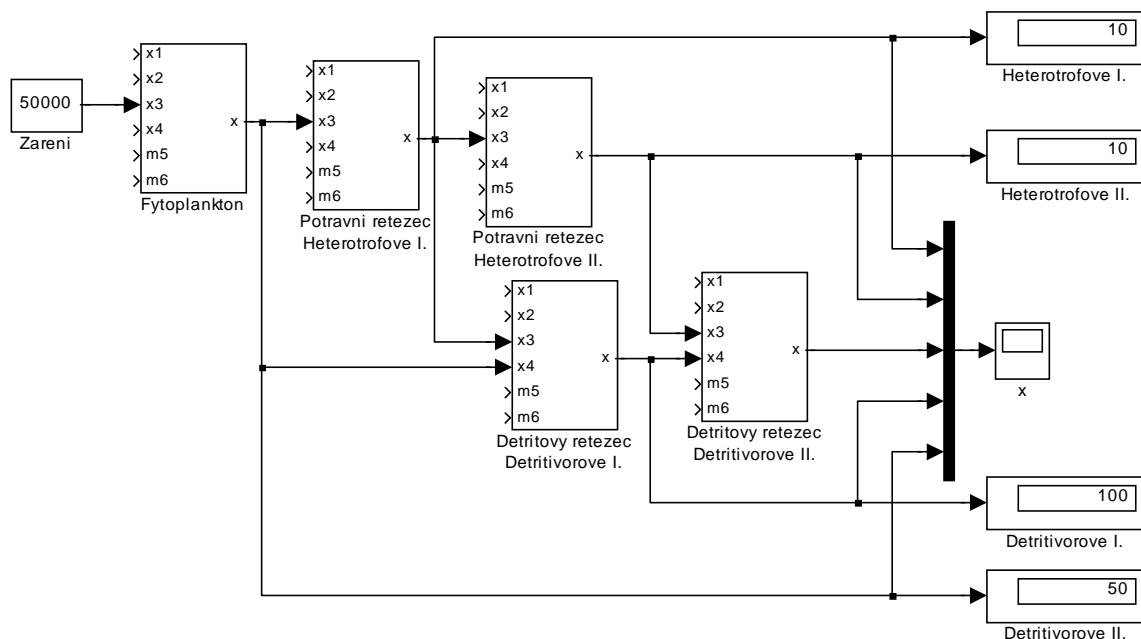
Tento základní subsystém slouží jednak jako výchozí verze pro různé další modifikace v rámci formulace modelů akumulace a toku energie na úrovni jednotlivých populací a dále

pro vytváření modelů společenstev a ekosystémů. Simulační výstupy pro nastavení veličin podle obr.3 jsou na obr.4.



Obr.4 Průběhy veličiny x (horní graf) a její derivace dx/dt (spodní graf) modelu (1) realizovaného pomocí blokového schématu na obr.3 při nastavení parametrů $r = 0,5$; $K = 1000$ a zpoždění veličiny x ve členu v závorce $Td = 2$. Počáteční podmínka $x_0 = 100$. Počáteční konstantní funkce zpoždění byla nastavena na hodnotu $x_f = 100$.

Na základě předlohy vodního ekosystému z obr.2 byl vytvořen pomocí složek v podobě simulačního schématu z obr.3 simulační model na obr.5.



Obr.5 Simulační model vodního ekosystému

Model tvoří 5 bloků v podobě subsystémů logistického růstu. Výstupy jednotlivých subsystémů představují množství energie v dané jednotce. Toto množství je dále využitelné na následujících trofických úrovních. Při studiu ekologických systémů lze vypořádat ve

srovnání s technickými zařízeními výrazně nižší účinnosti přeměny energie na různých stupních trofických sítí. Nízká ekologická účinnost je dána především potřebami regenerace a rozmnožování (zachování druhu). Toto hlediska představuje asi zásadní rozdíl pokud by byla potřeba srovnávat transformace energie v technických systémech.

Závěr

Modely vytvořené na bázi akumulace a toku energie představují vzhledem k obtížím při měření a odhadu hodnot veličin v realitě často pouze přibližné studie. Jejich postupným zpřesňováním a dalšími pozorováními, při nichž se často ukazuje, že je nutno studovat i jevy zdánlivě nesouvisící s přenosem energie, je možné dosáhnout potřebné přesnosti. Jejich zásadní význam spočívá v odhalení fungování ekosystému a odhadu možných příčin náhlých změn po zásazích do některé z jeho částí. Již tyto výsledky přináší neocenitelnou pomoc vzhledem k možnostem studovat možné následky a minimalizovat tak například dopady zemědělské a průmyslové činnosti. Studium změn na modelu vede přitom mnohdy k značným úsporám finančních prostředků a nebo i k zamezení nenávratných škod.

Použitá literatura

- Hannon, B., Ruth, M., 1994. Dynamic Modeling. Springer-Verlag, New York, London, Berlin, Tokyo.
- Odum, E.P., 1963. Fundamentals of Ecology. W.B. Saunders Co., Philadelphia, London, Toronto.
- Odum, H.T., 1998. Modelling: Representing Simulation Models With Energy Systems. Suggestion for a Project for The International Society of Ecological Modelling. ISEM-ECOMOD (December 1998), [<http://ecomod.tamu.edu/>].