

Wielotypowe procesy substytucji technologicznej

Witold Kwaśnicki

Przedstawiono opis jedno- i wielośrodowiskowego modelu substytucji technologicznej oraz wyniki badań symulacyjnych tego modelu przy użyciu pakietu symulacyjnego STELLA 5.1.

W referacie zawartym w pracach poprzedniej szkoły *Symulacji Systemów Gospodarczych Antałówka '98* [Kwaśnicki, 1998] przedstawiłem przegląd modeli substytucji technologicznej (dwo i wielotypowej) oraz propozycje ewolucyjnego modelu substytucji technologicznej. Przedstawiłem tam też metodę identyfikacji jego parametrów oraz możliwości wykorzystania modelu ewolucyjnego do prognozowania. Najbardziej popularnym i najczęściej wykorzystywanym jest model procesów substytucji opisujący zmiany udziału jednej technologii w kształcie litery *S* (nazywanej niekiedy krzywa logistyczną). Jest to typowy przypadek współzawodnictwa (konkurencji) dwóch technologii: „nowej” i „starej” [Fisher, Pry, 1977], [Blackman, 1973], [Sharif i Kabir, 1976]. Na ogół jednak występują więcej niż dwie konkurujące technologie, tak więc mamy do czynienia z procesami substytucji multitechnologicznej (nazywanej często wielotypową). W sytuacji wielu konkurujących technologii zmiana udziału pojedynczej technologii w czasie ma kształt krzywej dzwonowej w której wyróżnić możemy cztery fazy: fazę wstępną, kiedy to tempo dyfuzji nie jest wysokie, następującej po niej fazę relatywnie szybkiej dyfuzji, w trzeciej fazie dana technologia osiąga stan ‘dojrzałości’, jej udział jest wówczas największy, w ostatniej fazie, inne, lepsze technologie wypierają ‘dojrzałe’ rozwiązanie, udział danej technologii w czwartej fazie stale maleje [Bright, 1968].

1. Model ewolucyjny – jedno środowisko.

Założmy, że każda z podanych technologii scharakteryzowana jest w dowolnym momencie *t* przez pojedynczy indeks opisujący jej jakość. Nazwijmy ten indeks

konkurencyjnością $c_i(t)$ technologii i . Konkurencyjność jest funkcją czasu t i zależy od charakterystyk technicznych danej technologii oraz jej ceny, jest większa, gdy charakterystyka techniczna danej technologii jest lepsza a cena niższa. Środowisko zewnętrzne, w którym technologie ewoluują nie jest stabilne i wpływa na wartości każdej konkurencyjności $c_i(t)$.

Niech $N_i(t)$ oznacza miarę rozległości stosowania technologii i w czasie t . Załóżmy dyskretny czas oraz przyjmijmy, że rozmiar użycia technologii i w najbliższej chwili ($t + 1$) jest proporcjonalny do rozmiaru stosowania tej technologii w poprzedniej chwili $N_i(t)$ i konkurencyjności technologii c_i ,

$$N_i(t+1) = AN_i(t)c_i. \quad (1)$$

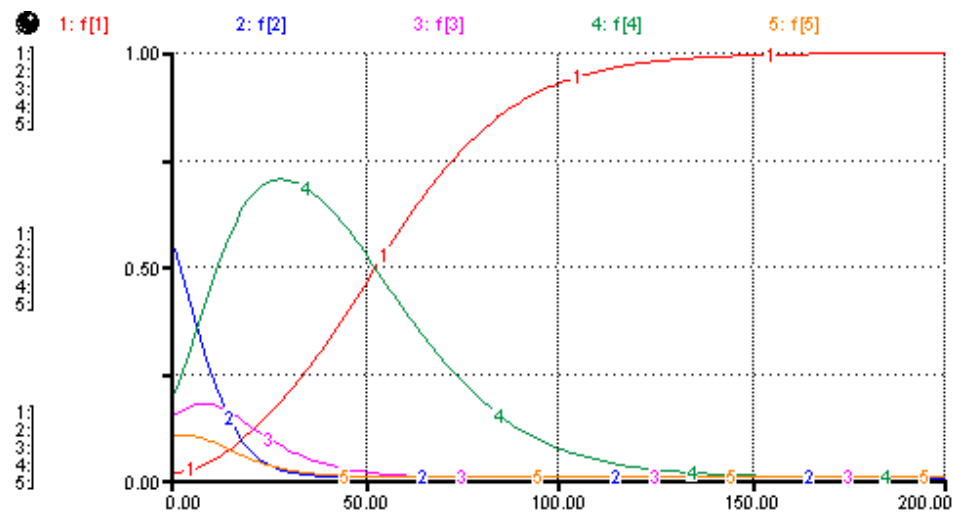
Stosując proste przekształcenia arytmetyczne, można wyprowadzić następujący układ równań opisujący zmiany udziałów i -tej technologii w czasie:

$$f_i(t+1) = f_i(t) \frac{c_i}{\bar{c}(t)} \quad (2)$$

gdzie $\bar{c}(t)$ jest średnią konkurencyjnością

$$\bar{c}(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t)c_i(t). \quad (3)$$

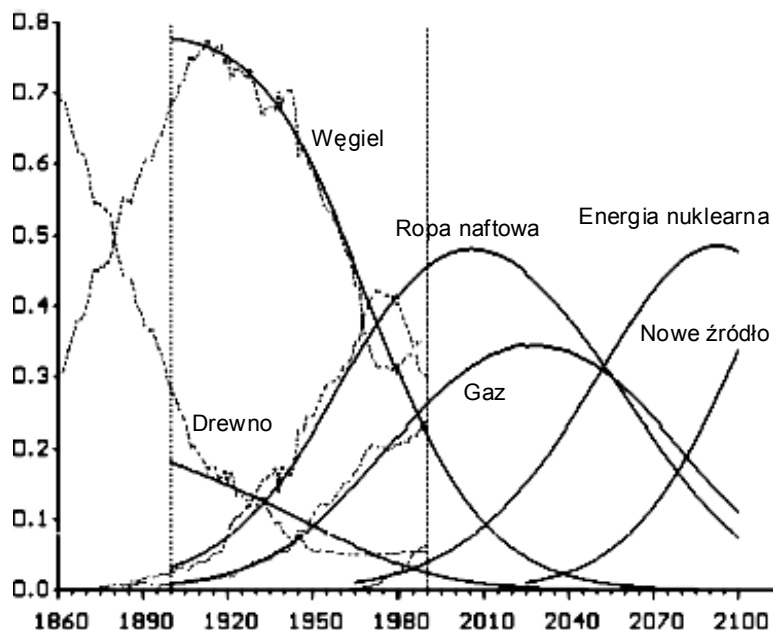
Widać więc, że stosując równanie (2) jesteśmy w stanie opisać ewolucję struktury stosowanych technologii (proces substytucji). W celu opisanie ewolucji zbioru technologii powinniśmy znać wartości ich konkurencyjności c_i oraz udziały początkowe $f_i(t_0)$.



Rysunek 1. Udziały pięciu typów - jedno środowisko

Cechą charakterystyczną takiego modelu jest, że przy założeniu stałości wszystkich konkurencyjności w czasie zawsze 'wgrzywa' jedna technologia, ta o największej konkurencyjności. Typowy przebieg zmiany udziałów wielu technologii dla takiego modelu przedstawiono na Rysunku 1. Dla przebiegu symulacyjnego, którego wyniki przedstawiono na Rysunku 1 przyjęto, że w chwili początkowej istnieje 5 typów o wartościach konkurencyjności c_i równych odpowiednio: 1,107, 0,881, 0,997, 1,048, 0,948. Udziały początkowe $f_i(t_0)$ dobrano tak by typ najlepszy miał udział najmniejszy. Udziały początkowe pięciu typów były równe odpowiednio: 0,01, 0,54, 0,15, 0,20, 0,1.

Widzimy, że udział najlepszego typu stale rósł tak, że w ostatnim okresie symulacji jego udział był bardzo równy 100%. Typu najgorsze 2 i 5 (o udziałach początkowych 54% i 10%) zostały bardzo szybko wyeliminowane. Natomiast dwa pozostałe typy (o stosunkowo dużych udziałach początkowych 15% i 20%), których konkurencyjności były niewiele mniejsze od konkurencyjności typu najlepszego początkowo, początkowo zwiększały swój udział by w następnej fazie swego rozwoju podzielić los typów najgorszych i zostać także wyeliminowanym. Kształt udziałów typów o pośredniej konkurencyjności przypomina postulowany często przez badaczy kształt krzywej dzwonowej.



Rysunek 2. Światowe udziały (rzeczywiste i prognozowane) różnych źródeł energii

Bardzo często jednak obserwujemy współistnienie kilku typów, nawet w stosunkowo długim przedziale czasu. Niech jako przykład posłuży nam udział

różnych nośników w produkcji energii w skali całego świata. Krzywe kropkowane na Rysunku 2 pokazują rzeczywiste udziały pięciu podstawowych źródeł energii, mianowicie drewna, węgla, ropy naftowej, gazu i energii nuklearnej. Krzywe ciągłe pokazują prognozę udziałów tych źródeł w oparciu o identyfikację ich konkurencyjności dokonana na podstawie danych rzeczywistych z okresu 1900-1990. Długookresowe konkurencyjności zidentyfikowane w oparciu o 90 letni okres wynoszą: dla węgla 1,0, drewna 0,9919, ropy naftowej 1,0444, gazu 1,0533. Identyfikacja konkurencyjności energii nuklearnej na podstawie okresu 1900-1990 nie była możliwa, jako, że energia nuklearna wprowadzona została 1961 roku. Analiza zmian udziału energii nuklearnej w okresie 1961-1990 pozwala zidentyfikować jej konkurencyjność na 1,086. W prezentowanym scenariuszu rozwoju energii dodano także nowe, hipotetyczne źródło energii. Przyjęto, że to nowe źródło zostanie wprowadzone w roku 2025 a jego konkurencyjność będzie równa 1,12.

Na uwagę zasługują zmiany udziału drewna. Do 1950 roku udział drewna systematycznie malał ale od tego roku udział ten ustabilizował się na poziomie ok. 5%. Zgodnie z przewidywaniami modelu drewno powinno być systematycznie eliminowane. Można zadać sobie pytanie, dlaczego typ którego konkurencyjność jest wyraźnie gorsza od wszystkich pozostałych nie jest eliminowany nawet w stosunkowo długim okresie czasu. Charakterystyczne zachowania modelu o których wspominaliśmy poprzednio wynikają z założenia stałości konkurencyjności wszystkich typów. Jedną z możliwych przyczyn jest zmiana konkurencyjności w czasie. Zmienne konkurencyjności analizowane były w referacie z poprzedniej szkoły. Wydaje się, że w przypadku alternatywnych źródeł energii nie to jest przyczyną tak charakterystycznego przebiegu udziału drewna. Wydaje się, że mamy tutaj sytuację co najmniej dwóch istotnie różnych środowisk w których różne typy mają różne konkurencyjności. Nazwijmy te dwa środowiska 'światem uprzemysłowionym' i 'światem tradycyjnym'. Światowe udziały poszczególnych typów są ważoną sumą udziałów tych typów w obu środowiskach. W świecie uprzemysłowionym istotnie drewno uznawane jest za najgorsze źródło energii i już dawno zostało praktycznie wyeliminowane, natomiast nadal pozostaje ono podstawowym źródłem energetycznym w świecie tradycyjnym.

Sytuacja współistnienia kilku typów wynikająca z istnienia wielu środowisk w których konkurencyjności typów mogą być różne nie jest zjawiskiem rzadkim. Wydaje się, że znane zjawisko segmentacji rynków może być także uznane za bliskie takiemu modelowi wielośrodowiskowemu.

2. Wielośrodowiskowy model substytucji technologicznej

Przyjmijmy zatem, że mamy s środowisk w których konkuruje ze sobą n technologii. Konkurencyjność technologii i -tej w j -tym środowisku oznaczmy

przez c_{ij} , a udział i -tej w j -tym środowisku w chwili t przez $f_{ij}(t)$. W obrębie każdego środowiska występuje konkurencja opisywana przez prezentowany w poprzedniej części model jednośrodowiskowy. Zatem możemy napisać, że zmiany udziału i -tej technologii w j -tym środowisku opisywane są równaniem:

$$f_{ij}(t+1) = f_{ij}(t) \frac{c_{ij}}{\bar{c}_j(t)} \quad (4)$$

gdzie $\bar{c}_j(t)$ jest średnią konkurencyjnością w j -tym środowisku.

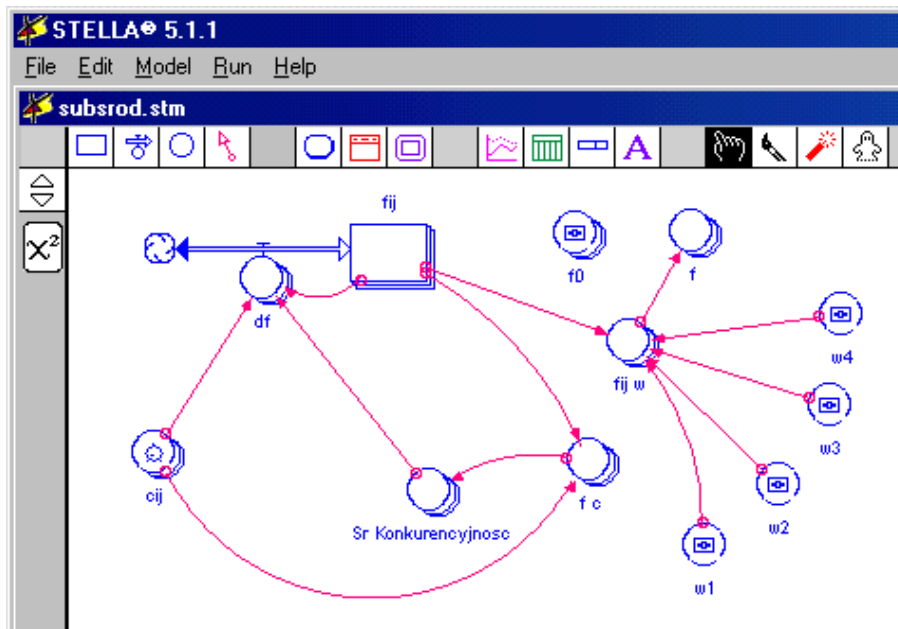
$$\bar{c}_j(t) = \sum_{i=1}^n f_{ij}(t) c_{ij}(t) \quad (5)$$

Udział typu i we wszystkich środowiskach jest ważoną sumą udziałów w poszczególnych środowiskach

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^s f_{ij}(t) w_j(t). \quad (6)$$

Waga w_j środowiska j zależy od względnego zakresu stosowania (N_{ij}) poszczególnych technologii w każdym ze środowisk:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s N_{ij}} \quad (7)$$



Rysunek 3. Model wielośrodowiskowy zapisany w STELLI

Nowe możliwości pakietu symulacyjnego *STELLA 5.1* (zwłaszcza możliwość stosowania tablic) umożliwiają stosunkowo proste zaimplementowanie takiego wielośrodowiskowego modelu i symulacyjne badanie jego właściwości. Model zapisany w *STELLI* przedstawiono na Rysunku 3.

Przyjmując, że występują cztery środowiska i pięć typów, zakładając, że w różnych środowiskach poszczególne typy są w różnym stopniu preferowane otrzymujemy całkiem inny charakter zmian aniżeli w modelu jednośrodowiskowym (por. Rysunek 1 i Rysunek 4). Konkurencyjności pięciu typów w czterech środowiskach przedstawiono w Tabeli 1. Konkurencyjności w pierwszym środowisku są równe konkurencyjnością w modelu jednośrodowiskowym.

Tabela 1. Konkurencyjności pięciu typów w czterech środowiskach

Typ Środowisko	1	2	3	4	5
1	1,107	0,881	0,978	1,048	0,948
2	0,893	1,022	1,044	0,937	1,067
3	0,915	0,944	1,137	0,856	1,030
4	1,000	0,911	0,948	1,100	1,078

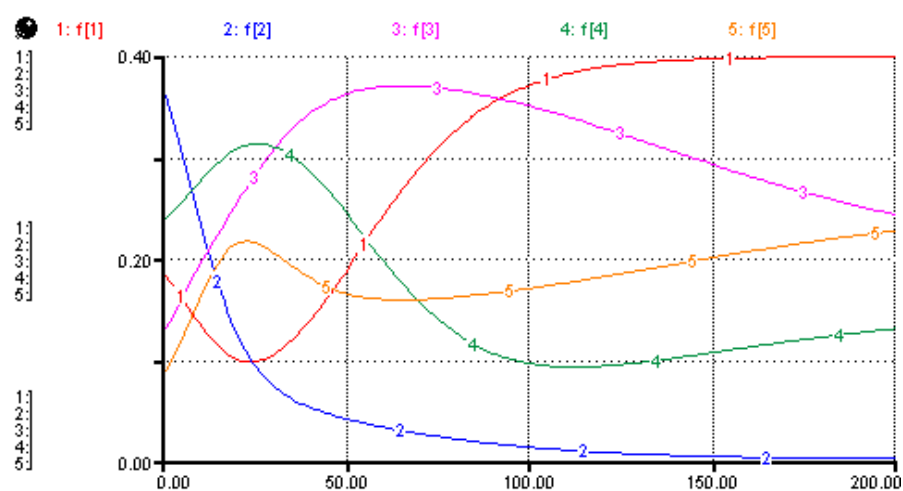
Początkowe udziały pięciu typów w poszczególnych środowiskach przedstawione są w Tabeli 2. Podobnie jak w przypadku konkurencyjności udziały typów w pierwszym środowisku są takie same jak w modelu jednośrodowiskowym. W pozostałych środowiskach też przyjęto zasadę, że najlepszy typ jest najmniej liczny a typ najgorszy ma największe udziały.

Tabela 2. Udziały początkowe poszczególnych typów w czterech środowiskach

Typ Środowisko	1	2	3	4	5
1	0,01	0,54	0,15	0,20	0,10
2	0,54	0,10	0,15	0,20	0,01
3	0,10	0,20	0,01	0,54	0,15
4	0,15	0,54	0,20	0,01	0,10

Do pełnego opisu modelu potrzeba nam jeszcze wartości wag w_j poszczególnych środowisk. Przyjęto, że środowisko pierwsze jest największe, jego waga w_1 jest równy 0,4. Wagi pozostałych środowisk są równe odpowiednio 0,25, 0,20, 0,15.

Wyniki symulacji o powyższych warunkach początkowych przedstawiono na Rysunku 4. Warunki symulacji są takie, że w każdym środowisku inny typ jest typem najlepszym. W środowisku pierwszym jest to typ 1, w drugim typ 5, w trzecim typ trzeci i w czwartym typ czwarty. W takiej sytuacji naturalnym jest, że typy te dominują w swoich środowiskach a ich sumaryczny udział na koniec symulacji (w stanie równowagi) jest równy wartościom wag poszczególnych środowisk; i tak typ 1 ma udział w stanie równowagi równy 40%, typ trzeci 20%, czwarty 15% i piąty 25%. Typ drugi nie jest typem najlepszym w żadnym ze środowisk i dlatego jego sumaryczny udział w stanie równowagi jest równy zero. Krzywe udziałów nie przypominają typowych krzywych dzwonowych. Typowym w takiej sytuacji jest występowanie na przemian okresów wzrostu i malenia udziałów (typy 1, 4, 5)



Rysunek 4. Udziały pięciu typów – cztery środowiska

3. Zakończenie

W referacie przedstawiono propozycję wielośrodowiskowego modelu substytucji i wstępne wyniki badań symulacyjnych. Niestety nie udało się znaleźć ‘eleganckiej’, analitycznej metody identyfikacji parametrów tego modelu (tak jak możliwe było to w przypadku modelu jednośrodowiskowego). Wątpliwym jest czy znalezienie takiej analitycznej metoda identyfikacji jest możliwe. Wydaje się, że praktycznym podejściem byłoby wykorzystanie jednej z metod optymalizacji (np. algorytmów genetycznych) do identyfikacji tych parametrów. Takie podejście do identyfikacji parametrów modelu planowane jest w przyszłości. Problemem może być jednak bardzo duża

liczba parametrów do identyfikacji (wartości konkurencyjności, udziałów początkowych w poszczególnych środowiskach i wagi poszczególnych środowisk). Jeśli mamy s środowisk i n typów to ogólna liczba identyfikowanych parametrów jest równa $s(2n-1)-1$; czyli dla czterech środowisk i pięciu typów, na podstawie sumarycznych udziałów poszczególnych typów (bo takie dane najczęściej są dostępne) należałoby określić wartości 35 parametrów modelu. Tak duża liczba parametrów może być sporym problemem nawet dla efektywnych algorytmów optymalizacyjnych.

Literatura

- [Blackman Jr.A. Wade, 1973] New Venture Planning: The Role of Technological Forecasting, *Techn. Forec. and Social Change* 5, 25-49 (1).
- [Bright J.R., 1968] *Technological Forecasting for Industry and Government: Methods and Applications*, Prentice-Hall, New Jersey.
- [Fisher J.C., Pry R.H, 1977] A Simple Substitution Model of Technological Change, *Techn. Forec. and Social Change* 3, 75-88.
- [Kwaśnicki W., 1998] Symulacja procesów substytucji technologicznej, *Symulacja systemów gospodarczych Antałówka '98*, Zakopane.
- [Ryan B., Gross N., 1943] The Diffusion of Hybrid Seed Corn in Two Communities, *Rural Sociology* 7, 15-24.
- [Sharif M.N., Kabir C., 1976] System Dynamics Modeling for Forecasting Multilevel Technological Substitution, *Techn. Forec. and Social Change* 9, 89-112 (1976).

Witold Kwaśnicki
Instytut Organizacji i Zarządzania
Politechnika Wroclawska
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: kwasnicki@ci.pwr.wroc.pl