

RYSZARD POZNAŃSKI

Entropia lasu

Forest entropy

Abstract. The paper presents the results of the assessment of entropy for four types of forests described by: the model of normal forest, the model of target forest (OPAL), as well as the model of real forest managed in a clear-cutting system and the model of natural forest managed in a selection cutting system.

Key words: deterministic model of natural forest, random-deterministic model of target forest, probabilistic model of real forest, probabilistic model of natural forest

Wstęp

Powstanie w XIX w. termodynamiki oraz odkrycie przez Sadi-Carnata prawa o rozprószeniu energii przyczyniło się do stworzenia idei procesu nieodwracalnego, wyrażającej się stopniowym przechodzeniem od ładu do chaosu (Klocek A, Oesten G. 1993). Matematycznym wyrazem tego procesu jest entropia, czyli miara nieuporządkowania, interpretowana jako najbardziej prawdopodobny stan, w którym system osiąga maksymalny poziom nieuporządkowania (chaosu) oraz zmienności i najprostszą strukturę (entropia = energia i przemiana energii – tropos) (Klocek A, Oesten G. 1993). Entropia zwiększa się wtedy, kiedy względny porządek dąży do chaosu, a w systemach, gdzie panuje całkowity chaos jest ona największa.

Celem niniejszej pracy jest określenie wielkości entropii dla gospodarstw leśnych odwzorowanych przez modele lasu: normalnego, celowego OPAL, rzeczywistego w zrębowym sposobie zagospodarowania i naturalnego w przerębowym sposobie zagospodarowania.

Modele wiekowej i grubościowej struktury lasu

Nauka i praktyka leśnictwa dysponuje obecnie czterema modelami lasu: trzema modelami wiekowej struktury lasu w zrębowym sposobie zagospodarowania, tj. lasu normalnego, lasu celowego i lasu rzeczywistego oraz jednym modelem grubościowej struktury lasu naturalnego w przerębowym sposobie zagospodarowania (Klocek A., Rutkowski B. 1971; Poznański R. 1973, 1986, 1987).

Modele lasu normalnego i lasu celowego mają charakter teoretyczny, a modele lasu rzeczywistego i lasu naturalnego – empiryczny.

Model lasu normalnego został opracowany przez Heyera i Hundeshagena w XIX w. dla gospodarstw w zrębowym sposobie zagospodarowania. Podstawą teoretycznego modelu lasu są dwie tezy, jedna przyrodnicza, druga ekonomiczna (Klocek A., Rutkowski B. 1971). Według pierwszej zakłada się, że las zagospodarowany sposobem zrębowym jest układem zamkniętym, wyizolowanym z gospodarczego i przyrodniczego otoczenia oraz zupełnie odpornym na wpływy i zakłócenia z tego otoczenia płynące. Według drugiej tezy, warunki ekonomiczne są względnie stabilne i niezmiennie. Znajduje to swój formalny i logiczny wyraz w przyjęciu wielkości stałych: plonu, długości okresu produkcyjnego, etatu rębego oraz niezmiennej struktury zapasu produkcyjnego (Klocek A., Rutkowski B. 1971).

Punktem wyjścia do opracowania różnych modeli urealnionego lasu normalnego, tzw. lasu celowego, było stwierdzenie, że dążenie do osiągnięcia i utrzymania gospodarstw leśnych o cechach lasu normalnego, nie jest możliwe. Wynika to z oddziaływania na las różnych losowych czynników przyrodniczych, a także decyzyjnych czynników o charakterze gospodarczym. Prowadzą one zwykle do przedwczesnego w stosunku do założeń lasu normalnego wyrębu niektórych drzewostanów lub ich części (Poznański R. 1973).

Ideę lasu celowego oparto na założeniu, że na przeszkodzie do osiągnięcia normalnego stanu gospodarstwa zrębowego stają wyłącznie losowe czynniki przyrodnicze, powodujące wypad lub wyrąb drzewostanów przed osiągnięciem wieku dojrzałości rębnej (Klocek A., Oesten G. 1993; Lucas G., Anders B. 1978). W różnych modelach lasu celowego jego rozwój określa się teoretycznie za pomocą łańcuchów Markowa lub funkcji wykładniczej. Zakłada się, że struktura wiekowa lasu zależy wyłącznie od aktualnego stanu drzewostanów, a nie od ich dotychczasowego rozwoju (Klocek A., Oesten G. 1993; Lucas G., Anders B. 1978). Modele lasu celowego przez przyjęcie założenia o otwartości układu przyrodniczego na wpływ losowych czynników otoczenia przyrodniczego mają charakter losowo-deterministycznego modelu urealnionego lasu normalnego (Klocek A., Oesten G. 1993).

Jeden z bardziej znanych w leśnictwie modeli lasu celowego nosi nazwę OPAL (Lucas G., Anders B. 1978). Przyjmuje się w nim, że do wieku dojrzałości rębnej dochodzą nie wszystkie drzewostany. W wariancie pesymistycznym tylko 70% ich powierzchni, a w optymistycznym – 90% (a nie w 100% jak w modelu lasu normalnego).

W modelu lasu rzeczywistego przyjmuje się, że las jest układem otwartym na wpływy przyrodniczego i gospodarczego otoczenia, a warunki ekonomiczne są zmienne (Poznański R. 1973). W związku z tym wielkość plonu i długość okresu produkcyjnego są wielkościami zmiennymi, a rozwój lasu można ocenić tylko z określonym prawdopodobieństwem.

Empiryczny model wiekowej struktury lasu w zrębowym sposobie zagospodarowania zbudowano na podstawie ustalonych doświadczalnie prawdopodobieństw w przeżywaniu i ubywaniu drzewostanów w klasach wieku (Poznański R. 1987). Ustalony empirycznie probabilistyczny wzorzec wiekowej struktury lasu rzeczywistego w zrębowym sposobie zagospodarowania obejmuje wartość średnią i wartości graniczne dolne i górne wzorcowych frakcji powierzchniowych, jakie zdarzają się w obecnej rzeczywistości z prawdopodobieństwem 0,954 (Poznański R. 1987).

TABELA 1
Prawdopodobieństwo przeżycia drzewostanów w klasach wieku i drzew w stopniach grubości

Nr klasy wieku j	Szerokość klasy wieku m lat	Prrawdopodobieństwo przeżycia lasu		stopień grubości (cm) i	las rzeczywisty		las naturalny				
		normalny LN $t_0=100$ I	las celowy OPAL $t_0=100$ I		95% przedział ufności: wartości:	95% przedział ufności wartości:					
		0,70	0,80	0,90	dolne	górne	dolne	górne			
1	1-10	1	0,9921	0,9951	0,9977	0,966	0,947	0,985	0,8141	0,7100	0,9171
2	11-20	1	0,9843	0,9901	0,9953	0,996	0,988	0,999	0,8304	0,7541	0,9101
3	21-30	1	0,9765	0,9852	0,9930	0,992	0,982	0,999	0,8435	0,7847	0,9067
4	31-40	1	0,9688	0,9804	0,9907	0,983	0,969	0,997	0,8514	0,8008	0,9055
5	41-50	1	0,9611	0,9755	0,9884	0,982	0,967	0,997	0,8524	0,8011	0,9050
6	51-60	1	0,9535	0,9707	0,9861	0,978	0,963	0,993	0,8445	0,7848	0,9033
7	61-70	1	0,9460	0,9659	0,9838	0,956	0,933	0,979	0,8259	0,7506	0,8988
8	71-80	1	0,9385	0,9611	0,9815	0,831	0,790	0,872	0,7947	0,6975	0,8899
9	81-90	1	0,9311	0,9563	0,9892	0,693	0,642	0,744	0,7491	0,6245	0,8748
10	91-100	0	0	0	0	0,563	0,506	0,620	0,6871	0,5305	0,8520
11	>100	0	0	0	0	0,448	0,397	0,499	0,6069	0,4145	0,8195
									0,5067	0,2752	0,7759
									0,3846	0,1117	0,7195
									0,2387	0,0770	0,6484

Probabilistyczny model grubościowej struktury lasu naturalnego w przerębowym sposobie zagospodarowania, zbudowano na podstawie ustalonych doświadczalnie prawdopodobieństw w przeżywaniu i ubywaniu drzew w stopniach grubości w lasach naturalnych Les Verrieres w Szwajcarii. Ustalony z 14 okresów kontrolnych wzorzec grubościowej struktury drzew obejmuje wartości średnie i wartości graniczne (dolne i górne), jakie zdarzają się z prawdopodobieństwem 0,954 (Poznański 1986).

Prawdopodobieństwa przeżycia drzewostanów w klasach wieku i drzew w stopniach grubości dla gospodarstw leśnych odwzorowywanych przez różne modele lasu przedstawiono w tabeli 1.

Sposób oszacowania entropii

Do oszacowania entropii różnych typów gospodarstw leśnych przyjęto:

- prawdopodobieństwa przeżycia drzewostanów w klasach wieku w zrębowym sposobie zagospodarowania o cechach:
 - lasu normalnego, dla 100-letniej kolei rębności,
 - lasu celowego OPAL dla 100-letniej kolei rębności i dla prawdopodobieństw dojścia upraw do wieku dojrzałości rębnej: 0,70 i 0,90,
 - lasu rzeczywistego,
- prawdopodobieństwa przeżycia drzew w stopniach grubości w przerębowym sposobie zagospodarowania:
 - lasu naturalnego Les Verrieres

Entropię zdarzenia przeżycia drzewostanów w klasach wieku ($E_{(p_j)}$) i drzew w stopniach grubości ($E_{(p_i)}$) określono za pomocą wzorów (Szylejko W., Szylejko T. 1974):

$$E_{(p_j)} = -\sum_{j=1}^k p_j \cdot \log_2 \cdot p_j$$

$$E_{(p_i)} = -\sum_{i=1}^k p_i \cdot \log_2 \cdot p_i$$

gdzie:

- p_j i p_i – w kolejności prawdopodobieństwa zdarzeń przeżywania drzewostanów w klasach wieku o nr j oraz przeżywania drzew w stopniach grubości o nr i ,
- k – liczba możliwych stanów zdarzeń przeżywania drzewostanów i drzew,
- \log_2 – logarytm naturalny przy podstawie 2.

Ponieważ $\log_2 p_j$ (p_i) dla p_j (p_i) ≤ 1 ma zawsze wartość ujemną, dlatego w prawej części wzoru wprowadzono znak minus, aby entropię zdarzeń wyrazić nieujemną liczbą rzeczywistą.

Entropia różnych typów gospodarstw leśnych

Każdy typ gospodarstwa różni się wielkością entropii (tab. 2). Największym uporządkowaniem, a więc entropią równą zero, charakteryzują się gospodarstwa zrębowe odwzorowane przez model lasu normalnego. Mniejszym uporządkowaniem i większą entropią charakteryzują się gospodarstwa zrębowe odwzorowane przez model lasu celowego OPAL: od 0,135 do 0,312. Zdecydowanie mniejszym uporządkowaniem i większą entropią charakteryzują się rzeczywiste gospodarstwa w zrębowym sposobie zagospodarowania: od 1,488 do 2,330, a najmniejszym uporządkowaniem i największą entropią – lasy naturalne w przerębowym sposobie zagospodarowania: od 2,679 do 4,979.

Odpowiednio silnie zróżnicowane są entropie wiekowej i grubościowej struktury wewnętrznej poszczególnych typów gospodarstw leśnych. Największym i całkowitym uporządkowaniem charakteryzuje się wiekowa struktura lasu normalnego. Entropia drzewostanów przedrębnych równa się zawsze zero.

W drzewostanach rębnych, których prawdopodobieństwo przeżycia równa się zero nie można określić logarytmu o podstawie 2, stąd i wielkości entropii. Gospodarstwo leśne odwzorowywane przez model lasu normalnego jest więc klasycznym przykładem układu zamkniętego (wyizolowanego z otoczenia), w którym procesy rozwoju mają charakter mechanistyczny.

Nieco większą entropią w stosunku do modelu lasu normalnego charakteryzuje się wiekowa struktura gospodarstw zrębowych opisana modelem lasu celowego OPAL. Entropia w drzewostanach przedrębnych jest zawsze większa od zera, ale niewielka i silnie zróżnicowana w poszczególnych klasach wieku: od 0,011 do 0,096 – przy pesymistycznym wariacie dojścia upraw do wieku dojrzałości rębnej – 0,70 oraz od 0,034 do 0,015 przy wariacie optymistycznym – 0,90.

Jeszcze mniejszym uporządkowaniem, a więc i większą entropią, w stosunku do dwóch poprzednich modeli gospodarstw leśnych w zrębowym sposobie zagospodarowania, charakteryzuje się wiekowa struktura wewnętrzna rzeczywistych gospodarstw w tym sposobie zagospodarowania. Entropia drzewostanów w poszczególnych klasach wieku jest bardzo silnie zróżnicowana, rośnie na ogół wraz z wiekiem i zawiera się w przedziale: od 0,006 do 0,529 z prawdopodobieństwem 0,954.

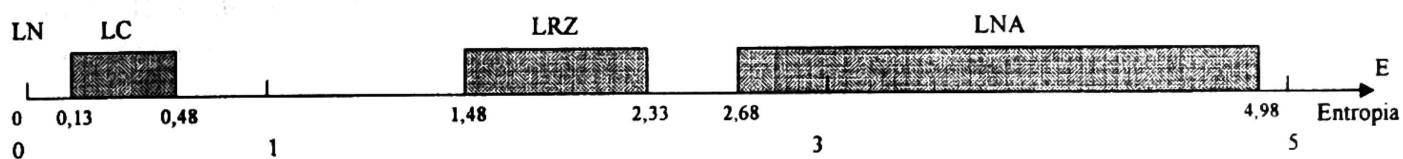
Najmniejszym uporządkowaniem, a więc i największym zróżnicowaniem i entropią w stosunku do wszystkich dotychczas przedstawionych modeli gospodarstw leśnych, charakteryzuje się grubościowa struktura lasu naturalnego w przerębowym sposobie zagospodarowania. Entropia drzew w poszczególnych stopniach grubości jest bardzo silnie zróżnicowana; zawiera się w przedziale: od 0,114 do 0,530 i rośnie wraz z powiększaniem się grubości drzew.

Trudno jest porównać i ocenić wielkości oszacowanych entropii dla różnych typów gospodarstw leśnych, ponieważ chaosu nie można zdefiniować.

Na osi naniesiono przedziały zmienności entropii dla różnych gospodarstw leśnych (ryc.). Z ryciny tej wynika, że przedziały zmienności entropii różnych gospodarstw nie nakładają

TABELA 2
Entropia różnych modeli wiekowej i grubościowej struktury lasu

Nr klasy wieku j	Szerokość klasy wieku m lat	Entropia modeli lasu w zrębowym sposobie zagospodarowania			Entropia modelu lasu naturalnego							
		las normalny LN $t_u=100$ I	las celowy OPAL $t_u=100$ I	las rzeczywisty 95% przedział ufności: wartości: $\bar{}$ średnie $\bar{}$ dolne $\bar{}$ górne $\bar{}$	stopień grubości (cm) i	las naturalny 95% przedział ufności: wartości: $\bar{}$ średnie $\bar{}$ dolne $\bar{}$ górne $\bar{}$						
1	1-10	0	0,0114	0,0071	0,0034	0,0482	0,0215	0,0744	20	0,2416	0,1140	0,3508
2	11-20	0	0,0225	0,0142	0,0067	0,0058	0,0001	0,0172	25	0,2226	0,1237	0,3070
3	21-30	0	0,0355	0,0142	0,0067	0,0115	0,0001	0,2959	30	0,2071	0,1281	0,2745
4	31-40	0	0,0433	0,0281	0,0133	0,0243	0,0043	0,0440	35	0,1976	0,1297	0,2566
5	41-50	0	0,0550	0,0349	0,0166	0,0257	0,0043	0,0468	40	0,1964	0,1303	0,2563
6	51-60	0	0,0655	0,0417	0,0199	0,0314	0,0101	0,0524	45	0,2059	0,1325	0,2744
7	61-70	0	0,0758	0,0484	0,0232	0,0621	0,0300	0,0933	50	0,2279	0,1384	0,3107
8	71-80	0	0,0859	0,0550	0,0264	0,2219	0,1723	0,2687	55	0,2635	0,1498	0,3625
9	81-90	0	0,0959	0,0616	0,0155	0,3666	0,3174	0,4105	60	0,3122	0,1688	0,4242
10	91-100	całkowicie	całk.	całk.	całk.	0,4666	0,4276	0,4973	65	0,3720	0,1969	0,4852
11	>100	określona	określ.	określ.	określ.	0,5190	0,5004	0,5291	70	0,4373	0,2353	0,5266
									75	0,4970	0,2840	0,5123
									80	0,5302	0,3417	0,3532
									85	0,4933	0,4053	0,2848
Razem	0	0,4898	0,3122	0,1351	1,7831	1,4881	2,3296			4,4046	2,6785	4,9792



RYC. Entropia modelu lasu normalnego (LN), celowego (LC), rzeczywistego (LRZ) i naturalnego (LNA)

się wzajemnie na siebie, co oznacza, że są od siebie niezależne i stanowią odrębne i niezależne wzorce gospodarowania w leśnictwie.

Wyniki badań potwierdziły założenia idei Sadi-Carnata o nieodwracalnym procesie przechodzenia (przemiany energii) od ładu do chaosu w układach przyrodniczych, dlatego w lesie naturalnym, gdzie dominuje chaos entropia jest najwyższa.

Entropia a trwałość lasu

Utrzymanie trwałości lasu zależy od wielkości entropii. Najłatwiej utrzymać trwałość takiego lasu, który charakteryzuje się dużą entropią, a jest nim las naturalny, trudniej lasu rzeczywistego zrębowego, a najtrudniej – lasu normalnego i celowego o małej entropii.

Z uzyskanych rezultatów oszacowania miar nieuporządkowania lasu wynika, że powstanie oraz utrzymanie na trwałe lasu całkowicie lub w większości uporządkowanego o entropii równej lub bliskiej zero, jak w modelu lasu normalnego i w modelu lasu celowego OPAL – nie wydaje się być realne. Trudne byłoby osiągnięcie i utrzymanie na stałe gospodarstw leśnych zgodnie z urealnionym modelem lasu normalnego OPAL, z uwagi na ilość energii jaka byłaby potrzebna do osiągnięcia prawie całkowitego uporządkowania układu i do zbliżenia entropii gospodarstwa zrębowego do zera. Utrzymanie trwałości lasu rzeczywistego w zrębowym sposobie zagospodarowania jest natomiast możliwe, pod warunkiem zmniejszania nieuporządkowania takiego układu przez sztuczne wzmacnianie samoregulujących zdolności lasu działaniami sterowniczymi i regulacyjnymi leśnika (Kazimierczak J. 1978, Regulski J. 1974). W świetle uzyskanych rezultatów badań wydaje się, że wzorcem dla gospodarstw zrębowych nie mogą być modele o tak wielkim uporządkowaniu (małej entropii) struktury układu jak model lasu normalnego i model lasu celowego OPAL.

Alternatywą dla modelu lasu normalnego i lasu celowego mogą być wielowariantowe empiryczne modele lasu rzeczywistego i lasu naturalnego o charakterze probabilistycznym. Modele te bowiem odwzorowują w sposób optymalny rzeczywistą strukturę wiekową gospodarstw zrębowych i strukturę grubościową gospodarstw przerębowych, a do ich utrzymania na trwałe nie potrzeba wydatkować tak dużej energii jak w przypadku modeli lasu normalnego i lasu celowego (Poznański R. 2000).

Porównywanie różnych gospodarstw leśnych do probabilistycznego wzorca lasu rzeczywistego i lasu naturalnego ma charakter przyrodniczy, a nie techniczny jak w przypadku modeli lasu normalnego i lasu celowego (niższy lub równy przyjętemu wzorcowi). Przyrodniczy charakter tego porównania polega na określeniu miejsca indywidualnych cech gospodarstw zrębowych lub przerębowych w przedziale zmienności wzorców porównaw-

czych. Określenie położenia tych cech wskazuje jednoznacznie na charakter działań regulacyjnych, które polegają na ciągłym procesie zbliżania indywidualnych cech gospodarstw leśnych do średniej wartości wzorca porównawczego.

*Katedra Urządzania Lasu
Akademia Rolnicza
Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków*

Literatura

- Kazimierzak J.** 1978: System cybernetyczny z zachowaniem celowym. W. P. Omega nr 328. Warszawa.
- Klocek A., Rutkowski B.** 1971: Optymalizacja regulacji użytkowania rębnych drzewostanów. PWRiL. Warszawa.
- Klocek A., Oesten G.** 1993: Optymalizacja wieku rębności w lesie normalnym oraz celowym. Prace IBL, nr 747.
- Lucas G., Anders B.** 1978: Mathematische Grundlage zur Anwendung von Uebergangswahrscheinlichkeiten bei der Strukturregelung im Walde. Tech. Univ. Dresden – Tharant.
- Poznański R.** 1973: Las jako układ i macierz prawdopodobieństwa przejść. Sylwan 5.
- Poznański R.** 1986: Zastosowanie metody współczynników przeżycia i wyrębu do prognozowania rozwoju lasów jodłowych o zróżnicowanej strukturze. Sylwan 4.
- Poznański R.** 1987: Empiryczny i teoretyczny wzorzec wiekowej struktury gospodarstw zrębowych. Sylwan 8.
- Poznański R.** 2000: Idea lasu celowego a idea lasu rzeczywistego. Sylwan 2.
- Regulski J.** 1974: Cybernetyka systemów planowania. W. P. Omega nr 268. Warszawa.
- Szylejko W., Szylejko T.** 1974: Cybernetyka bez matematyki. W. P. Omega nr 268. Warszawa.

Summary

Forest entropy

The aim of the paper was to determine the degree of disorder or entropy for four types of forests described by the model of normal forest, the model of target forest (OPAL), the model of real forest managed in a clear-cutting system and the probabilistic model of natural forest managed in a selection cutting system.

The results of the studies indicate that natural forests show the greatest entropy, and the forests managed in accordance with the normal and target (OPAL) forest models - the lowest. The entropy of real forests managed in a clear-cutting system occupies position between the entropy of normal forest and target forest and the entropy of natural forest.

The results of entropy assessment for various types of forests allows for the statement that a permanent maintenance of forests with high level of entropy as in the models of normal forest and target forest seems unrealistic. The probabilistic model of real forest and natural forest managed in a clear-cutting system and selection cutting system seems to be an alternative for these two forest models.