

Йерархия на структурата на енергийните баланси

И. Петров

Hierarchy of the Structure of Energy Balances

I. Petrov

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev St., Bl. 2, 1113 Sofia, Bulgaria, petrovindex@gmail.com

Key Words: Information theory; entropy; hierarchy; energy mix; renewable energies.

Abstract. The dynamics of development and distribution of resources are key questions for characterizing the complexity of systems in a large number of areas. Traditionally, the natural sciences (physics, chemistry, computer science, telecommunications, and others) have used Shannon's information theory and the concept of entropy to assess diversity, uncertainty, and chaos. Social sciences (economics, competition law, etc.) prefer to consider these issues from the opposite point of view – the concentration of resources, reflecting the dominance and hierarchy in competition interactions. Energy systems are a typical example of complex and dynamic systems and their study is of particular interest in theoretical and practical terms. Becoming the engine of innovation in energy technologies, renewable energy sources play an important role in the evolution and dynamics of energy balances at the international, national and local levels. The article presents the possibilities of the original method developed by the author for estimating the hierarchy of information, its advantages in comparison with the traditional methods of Shannon's entropy and Herfindahl concentration and its application for improving the analysis of energy balances and the role of renewable energy sources.

зиране на различните показатели или модели използват първата буква от фамилията на съответния автор, поставяйки я като индекс към символа за ентропията или йерархията: ϵ_s и E_s за ентропия на Шанън [1]; ϵ_R и E_R за ентропия на Рени [2]; ι_H и I_H за йерархия на Херфиндал [3,4]; ι_P и I_P за йерархия на Петров.

Обобщените (сумирани) резултати на макрониво за всякакви системни конфигурации и разпределения на носителните тегла могат да бъдат оценени с нашата скала на Харингтън-Петров за психофизическа класификация. Тази скала съдържа шест фази и представлява по-подробен и усъвършенстван вариант на оценъчната скала, предложена от Е. Харингтън [5], която в оригиналния си вид съдържа само три интервала или нива на оценка (0-0.37-0.63-1). Табл. 1 представя шестте нива на оценяване на структурното пространство в скалата на Харингтън-Петров.

Табл. 1. Скала за класификация Петров-Харингтон

Ентропия	Количествена оценка	Качествена оценка	Йерархия
Хиперполия	0.8-1	Много високо	Концентрирана олигополия
Мултиполия	0.63-0.8	Средно високо	Класическа олигополия
Полиполия	0.5-0.63	Високо	Разширена олигополия
Разширена олигополия	0.37-0.5	Ниско	Полиполия
Класическа олигополия	0.2-0.37	Средно ниско	Мултиполия
Концентрирана олигополия	0-0.2	Много ниско	Хиперполия

Комбинирането на количествени и психофизически оценки подобрява възможностите за възприемане на информацията и показва противоположните концепции на двата подхода и връзката между тях: когато пряко измерваме йерархията, получаваме косвена представа за ентропията: например високата йерархия означава ниска ентропия и обратно.

Въведение: ентропия и йерархия на информацията

Оценяването на сложността и взаимодействията в динамичните системи е предизвикателен процес, изискващ логично дефинирани методи и инструменти. Традиционно като първа стъпка (ниво 1) в този процес емпиричните данни за относителните тегла или вероятности (p_w) на отделните компоненти в системата се обработват с определени базови функции за трансформиране от гледна точка на две основни концепции: ентропия $\epsilon(p_w)$ като представа на разнообразие и неопределеност и йерархия $\iota(p_w)$ като представа за ред, сигурност и доминиране. Като втора стъпка (ниво 2) трансформираните изходни резултати от ниво 1 за всички отделни компоненти се сумират, за да се получи обобщен резултат, характеризиращ сложността на системата като цяло. В симетрични конфигурации частите p_w (относителни тегла или вероятности за събития) на всички n компоненти в системата са равни, така че $\sum_{w=1}^n p_w = 100\%$, като в тези случаи ентропията на системата е максимална, а йерархията – минимална. За индивидуали-

Йерархия на Петров

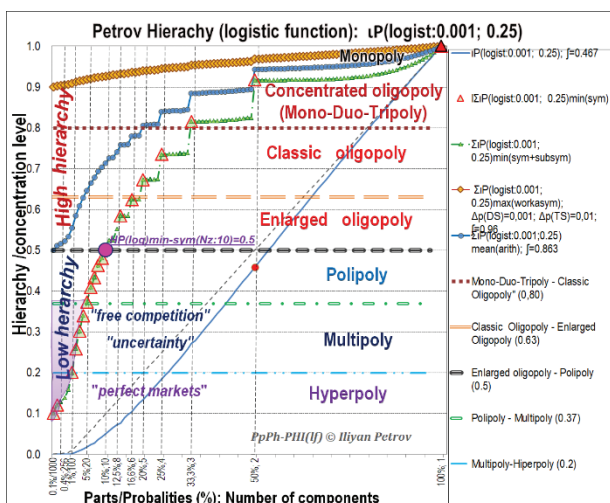
За усъвършенстване на методите и инструментите за измерване на сложността на системите предлагаме оригинален подход за оценка на реда и сигурността, наречен *йерархия на Петров (логистична функция)/Petrov Hierarchy (logistic function)*. Базовата функция за трансформиране на емпирични данни за частите на компонентите се определя, както следва:

$$(1) \quad \iota_P(\text{logist}) = \frac{p_w}{1 + \left(\frac{\sum_{j=1}^J \log R_j p_w}{J} \right)^c}$$

където: ι_P е индивидуална йерархия на микрониво; p_w – част (относително тегло или вероятност) на отделните компоненти; $p_w \in [0,1]$; R_j – референтно (еталонно) относително тегло или Reference Structural Thresholds (RST); $R_j \in [0,1]$; J – брой на референтните относителни тегла (RST) R_j ; c – степенен фактор, определящ интензивността на конкурентните взаимодействия, $c \in [0,1]$. В изследването ни бяха проведени серия от експерименти за оптимизиране на базовата функция $\iota_{P(\text{logist})}$ на ниво 1 и ниво 2 чрез задаване на различни комбинации от стойности на трите контролируеми променливи R_j , J и c . В комбинация $J=2$, $R_1=0.001$, $R_2=0.25$ и $c=2$ базовата функция на *йерархия на Петров* придобива вида

$$(2) \quad \iota_{P(\text{logist};0.001;0.25)} = \frac{p_w}{1 + \left(\frac{\log_{0.001} p_w + \log_{0.25} p_w}{2} \right)^2}$$

Фиг. 1 включва информация за следните стойности и графики: а) базовата функция ($\iota_{P(\text{logist};0.001;0.25)}$); б) сценарий за развитие на *активна конкуренция с изравняване във всяка популация*, при който наборът от точки за симетрични конфигурации са свързани с поредица от транзитни пътеки, състоящи се от точки с последователни субсиметрични, като така формират нивото на *минимална йерархия*; в) сценарий за развитие на *слаба конкуренция с еднолично доминиране във всички популации*, при който асиметричните конфигурации на системата формират определено ниво на *максимална работна йерархия*; г) *средна работна йерархия*, образувана от средната аритметична стойност на минималната йерархия и максималната работна йерархия.



Фиг. 1. Структурно пространство в йерархията на Петров

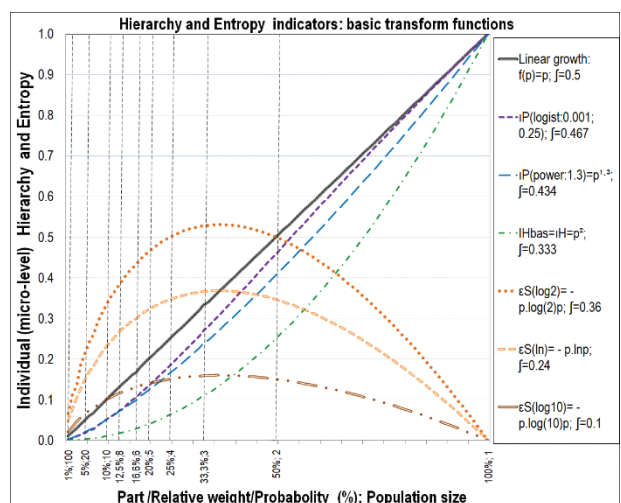
Сравнение на ентропия и йерархия

Чрез математически анализ оценка на качеството на показателите за ентропия и йерархия може да се направи, като се определят и сравнят интегралите на техните базови функции. В графичен аспект това означава да се сравни повърхността (квадратурата) на фигурите на съответните функции, които те заемат в структурното пространство. Всички базови трансформационни функции са непрекъснати в целия интервал $[0,1]$ и определянето на стойностите на техните интеграли чрез символни изчисления е възможно с максимална точност. На това ниво на анализ заключението е очевидно: безспорен лидер е *йерархията на Петров*, следвана на *ентропията на Шанън*, докато *йерархията на Херфингал* изглежда много по-неефективен инструмент за оценка на сложността на системите. Символните изчисления на интегралите на всички базови функции е извършено с програмата Maple 17 и резултатите са представени в табл. 2.

Табл. 2. Интегралите на базови функции за йерархия и ентропия

Индикатори за ентропия и йерархия	$\int_0^1 f(p_w)$
Базови функции	(dx=0.01)
Йерархия на Петров: уравнение (2)	0.467
Ентропия на Шанън: $p_w \log 2 p_w$	0.361
Йерархия на Херфингал: p_w^2	0.333
Ентропия на Шанън: $p_w \cdot \ln p_w$	0.241
Ентропия на Шанън: $p_w \log_{10} p_w$	0.1

Фиг. 2 представя базовите функции на индикаторите на йерархията на Петров и Херфингал и ентропията на Шанън (в три логаритмични формата – с двоичен, десетичен и нормален логаритъм). Графичният анализ показва, че разпределението на информацията в интегралите също е в полза на *йерархията на Петров*.



Фиг. 2. Базови функции за ентропия и йерархия

Йерархия на енергийни баланси

Източници на информация и методология. Изследването на енергийните пазари и баланси е извършено въз основа на общодостъпна и възможно най-актуална информация, предоставяна в едни от най-престижните и подробни ежегодни издания в областта на енергетиката – *IEA World Energy Outlook 2019* [9] и *BP Statistical Review of World Energy 2020* [10]. В методологичен аспект анализът на структурата на енергийните баланси е направен въз основа на *йерархията на Петров* като безспорен лидер в сравнение с *ентропията на Шанън* и *концентрацията на Херфингал*. Изходните данни за всеки енергиен носител са преобразувани от абсолютните стойности в сравними физически показатели в относителни тегла за всяка година, страна и регион.

Класификация на ЕБ. Енергийната индустрия е типичен пример за система от редица подсистеми, всяка от които използва различни технологии и изисква интензивни и мащабни финансови инвестиции в огромни индустриални и инфраструктурни проекти. През последното десетилетие (2010-2019 г.) в резултат на технологичния напредък в сектора на ВИЕ и политиките за контрол на промените в климата и околната среда структурните промени в този сектор стават все по-забележими. През този период йерархията в структурата на енергийния баланс (ЕБ) на световната енергетика, изчислен по метода на *йерархията на Петров*,

намалява от 0.727 на 0.709. И въпреки че традиционните изкопаеми горива (нефт, въглища и газ) все още запазват позициите си на трите водещи енергийни източника в повечето страни, техните дялове намаляват постепенно в полза на сектора на ВИЕ. По-задълбочен анализ на тенденциите на развитие на ЕБ е извършен по групи страни.

Йерархията на Петров ($t_{Plogist:0.001;0.25}$) позволява да бъде направена обективна и балансирана количествена оценка и качествена класификация относно динамиката в структурата на ЕБ. Резултатите от изследването на йерархията в структурата на енергийните баланси са обобщени в *табл. 3* по фази в съответствие с броя на енергийните носители и от гледна точка на зависимостта на страните от местни и вносни ресурси.

В повечето национални енергийни системи, които използват само два или три вида енергия, йерархията в структурата на ЕБ традиционно е много висока и се класифицира във фазата на *концентрирана олигополия (0.8-1)*. В някои от тях тя се понижава бавно, но остава далеч от долната граница (0.8) за преминаване към фазата на *класическа олигополия*. В повечето случаи причина за това е използването на един или два местни енергийни ресурса с ниска себестойност, които често са обект на активен износ на международните пазари. Освен в сектора на производството тези страни са принудени да инвестират в мащабни инфраструктурни проекти и това ограничава възможностите и мотивацията за развитие на ВЕИ.

Табл. 3. Класификация на енергийните баланси

Йерархия на ЕБ – 2019 г.	Видове енергии в ЕБ	Страни износители	Страни вносител на енергия (повече от 50% местни ресурси в ЕБ)	Страни вносител (по-малко от 50% местни ресурси в ЕБ)
Концентрирана олигополия (ЙП=0.8-1)	2 (E-2)	Тринидат 0.95; Туркменистан 0.92; Кувейт 0.92; Катар 0.92; С. Арабия 0.91;		
	3 (E-3)	Ирак 0.91; Азербайджан 0.9		Сингапур 0.93
	4 (E-4)	Узбекистан 0.9; ОАЕ 0.88; Венецуела 0.81		Израел 0.91
	5 (E-5)	Алжир 0.91; Иран 0.89; Египет 0.86; Норвегия 0.82; Казахстан 0.81; Холандия 0.81		Литва 0.92 Беларус 0.88
	6 (E-6)	Мексико 0.81	ЮАР 0.86	
Класическа олигополия (ЙП=0.63-0.8)	5 (E-5)	Виетнам 0.78	Дания 0.79	Тайланд 0.8; Тайван 0.8; Ирландия 0.79; Гърция 0.78; Полша 0.78; Италия 0.77; Португалия 0.75; Турция 0.71; Австрия 0.71
	6 (E-6)	Русия 0.76 Канада 0.71	Великобритания 0.76; Австралия 0.75; САЩ 0.73; Бразилия 0.72; Франция 0.72; Румъния 0.68; България 0.68; Финландия 0.66	Ю. Корея 0.75; Пакистан 0.75; Унгария 0.74; Япония 0.73; Испания 0.73; Украйна 0.73 Германия 0.71; Белгия 0.71; Чехия 0.71; Швеция 0.7; Словакия 0.68

За страните производители и износители на нефт, газ и въглища много високата йерархия на ЕБ не създава проблеми по отношение на енергийната независимост. Резките промени на световните енергийни пазари и понижения на цените водят традиционно до значително съкращаване на валутните приходи от износа, до стресови състояния в социалните и финансовите системи и до намаляване на надеждността и управляемостта на икономиките им като цяло. Особено чувствителни в това отношение са Венецуела, Русия, Нигерия, Алжир, Египет, Иран, Ирак, Сирия, Мексико и други страни. В значително по-малка степен на подобни рискове са изложени С. Арабия, Катар, Кувейт, Оман и ОАЕ, които разполагат със значителни златно-валутно резерви по отношение на brutния вътрешен продукт и бюджетите на социалните си системи.

Различна тенденция се наблюдава в страните, които използват повече от четири вида енергии, но не могат да постигнат пълна или значителна енергийна независимост за сметка на собствени ресурси. Особено активни са инвестициите във ВЕИ в страните, в които местните традиционни енергоносители заемат около или по-малко от 50% от потреблението на енергия. Нивото на йерархия на техните ЕБ се понижава плавно, но остава средновисоко във фазата на класическа олигополия (0.63- 0.8), като все още е далече от преминаване към фазата на разширена олигополия (0.5-0.63).

Структурните изменения се изразяват в рамките на сравнително ограничени отклонения на стойностите на йерархията на ЕБ – в повечето случаи около ± 0.01 . Икономиката на развитите страни традиционно е по-диверсифицирана със значителен дял на сектора на услугите, в който потреблението на електрическа енергия е значително. Вследствие на това инвестициите във ВЕИ са съсредоточени в производството на електрическа енергия от големи фотоволтаични и вятърни паркове и от микромошности на ниво домакинства и фирми. Основни фактори за разнообразяване на структурата на ЕБ в ЕС е приоритетността на политиките в областта на околната среда и активното стимулиране на инвестициите в областта на ВЕИ. За съжаление не всички ВЕИ са достигнали необходимото ниво на технологична зрялост и икономическа ефективност. Така например прякото производство на електрическа енергия от ВИЕ е все по-динамично и все по-ефективно [11]. В същото време очакваните големи надежди са технологии за производство и използване на водород [12,13] в транспорта и много сектори на промишлеността.

Плановите на ЕС за намаляване на въглеродните емисии в рамките на т. нар. Зелена сделка на 50% до 2030 г. и до 0% до 2050 г. все още не са подкрепени с ясни програми и планове. Това може да доведе до значителни сътресения във секторите на добив на въглища и ядрената енергия в някои страни (Германия [14], Франция, България, Полша, Чехия, Словакия и други страни), където тези отрасли заемат традиционно значителен дял в енергийната система. Неблагоприятното развитие на пандемията от COVID-19 и икономическата криза от началото на 2020 г. внасят допълнителна неяснота в плановите за извеждане

от експлоатация на мощностите, свързани с въглища [15] и ядрена енергия и за развитието на сектора на ВЕИ.

Заклучение

Резултатите от изследването показват, че в теоретичен аспект подходът на *йерархията на Петров* предлага ефективни методи и инструменти за анализ на динамичните системи и процеси в сектора на енергетиката. Анализът на развитието на енергийните баланси в периода 2011-2019 г. показва все още недостатъчното технологично развитие в областта на ВИЕ. В този смисъл в обозримо бъдеще не се очаква световните и националните енергийни баланси да достигнат до представата за перфектна структура и да преминат към фазата на *полиполия* с ниво на йерархия под 0.5 по метода на *йерархията на Петров*.

Особен интерес като предмет на бъдещи изследвания представляват анализът и прогнозирането на структурата на сектора на ВЕИ в средносрочен и дългосрочен план. От една страна, на този етап в обобщените статистически изследвания и прогнози всички видове нови ВЕИ (фотоволтаици, вятърни генератори, слънчеви топлинни генератори, биотехнологии, водород и други) се обобщават традиционно в една група. От друга страна, технологиите и перспективите за тяхното развитие в отделни страни и региони се различават значително. Към 2019 г. общият дял на ВЕИ в ЕБ е по-малко от 5% на световно ниво и по-малко от 10% на европейско ниво. В близка перспектива, когато дялът на някои видове ВЕИ достигне 4-5%, би било целесъобразно те своевременно и ясно да се разделят на отделни позиции и да започнат да се разглеждат като отделни позиции в ЕБ. В съвсем близко бъдеще анализът на енергийната сигурност и диверсификацията на ЕБ във формат Е6 (т.е. въз основа на шест вида енергия) би изглеждал все по-опростен и по-ограничен. Това би създавало непълна представа за реалното разпределение и перспективите за развитие на производството и потреблението в сектора енергетика по страни и региони. Възможно например е съществуващите видове ВЕИ да се представят като 10 отделни позиции (ВЕИ 10): производство на хидроелектроенергия, фотоволтаично производство на електрическа енергия, производство на вятърна електрическа енергия, генериране на слънчево отопление (термопомпи), геотермална енергия за отопление или охлаждане, биомаса, биогаз, биогориво, „зелен“ водород (електролиза на вода чрез ВЕИ), „син“ водород (пиролиза на природен газ). В резултат на това общият брой на видовете енергия се увеличава от 6 на 14 (Е14).

Друго перспективно направление е изследването на енергийната независимост и диверсификацията на структурите на енергийните пазари и баланси да започне да се извършва и в икономически показатели, отразяващи себестойността и цените на съответните енергоносители. В този смисъл привилегии за отделни проекти, свързани с традиционни енергоносители или ускорено внедряване на ВЕИ по необосновано високи цени биха могли да доведат до нелоялна конкуренция и икономическа недостъпност на енергията за много отрасли и региони.

Литература

1. Shannon, C., W. Weaver. A Mathematical Theory of Communication. – *The Bell System Technical Journal*, 27, 1948, 379-423 and 623-656.
2. Renyi, A. On Measures of Information and Entropy. Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematics, Statistics and Probability, 1961, 547-561.
3. Herfindahl, O. C. Concentration in the U.S. Steel Industry. Unpublished Doctoral Dissertation, Columbia University, 1950.
4. Simpson, E. H. Measurement of Diversity. – *Nature*, 163, 1949, 4148: 688. Bibcode: 1949Natur.163.688S. doi:10.1038/163688a0.
5. Harrington, E. The Desirability Function. – *Industrial Quality Control*, 21, 1965, 10, 494-498.
6. Petrov, I. I. Improving The Methodology Of Market Structures Analysis with Innovative Concepts for Phase-Structure States and Set Concentration Index. – *Journal Economic Alternative*, 1, 2016, 5-15.
7. Guidelines on the Assessment of Horizontal Mergers Under The Council Regulation On The Control Of Concentrations between Undertakings (2004/C 31/03) /Section HHI levels paragraph 19-20; Official Journal of the European Union, 5.2.2004./ [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52004XC0205\(02\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52004XC0205(02)).
8. Petrov, I. I. 2015. Structural Evolution of World and European Energy Markets and the Development of Gas Pipeline Networks in South-East Europe with Participation. Ph.D. Dissertation, Russian State University for Oil and Gas, Moscow, Russia.
9. BP Statistical Review of World Energy 2020: Statistical Review of World Energy – All Data, 1965-2019.
10. IEA World Energy Outlook – 2019, International Energy Outlook: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019#>.
11. Agora Energiewende. The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition, 2020. https://www.agora-energiemwende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_EU_2019/172_A-EW_EU-Annual-Report-2019_Web.pdf.
12. Dickel, R. Blue Hydrogen as an Enabler of Green Hydrogen: The Case of Germany, Oxford Institute for Energy Studies, 2020, ISBN978-1-78467-159-4, DOI: <https://doi.org/10.26889/978178467159>.
13. Stahl Business Association. National Hydrogen Strategy in Delay, 17 March 2020 (inGerman)<https://www.stahl-online.de/index.php/nationale-wasserstoffstrategie-in-verzug/>.
14. German Coal Commission. Growth, Structural Change and Jobs Commission: Final Report, January 2019 (inGerman)https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile.
15. Energate Messenger. Corona Shakes up Coal Phase-out Schedule, 6 April 2020 <https://www.energate-messenger.ch/news/201586/corona-bringt-zeitplan-fuer-kohleausstieg-ins-wanken?media=print>.

За контакти:

Гл. асистент д-р **Илиян Петров**
Секция „Информационни процеси
и системи за вземане на решения“
ИИКТ – БАН
e-mail: petrovindex@gmail.com

info.com
infobg.info

bginfo.com
infobg.com

bgspravka.info
bgspravka.com

БЯХТЕ ЛИ В
НОВИЯ ИНФОРМАЦИОНЕН САЙТ
НА БЪЛГАРИЯ?

СОФСПРАВКА[®]
национална информационна система

www.sofspravka.com

АБОНИРАЙТЕ СЕ!