



УДК 621.317.38

DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-28

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Лисенко О. В., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (0619) 42-11-74

Анотація – Робота присвячена розрахунку параметрів математичної моделі споживання електричної енергії. Враховуючи відмінності середніх потужностей на різних рівнях агрегування даних були розглянуті коефіцієнти варіації потужності C_v як відносні величини. Для коректного моделювання процесу розглянуті складові варіацій потужності протягом місяця, що містять СКВ для місячного набору даних та їх міждодові і середньододові компоненти. На відміну від енергосистем більшого масштабу, добові варіації споживання окремих громад мають більший розмах, проте мають виражене відносне зменшення в зимові місяці. Був розглянутий розподіл стрибків потужності за одиницю часу як вираження поточних флуктуацій. Середня величина стрибків потужності ОЕС становить 2,5-3,0% від середньомісячної потужності, а максимальні значення сягають 7-8%. Середня величина стрибків потужності для одного н.п. становила 3-5%, а максимальні значення сягали 10-14% від середньомісячної потужності. Загалом показники окремих споживачів мають більшу варіативність порівняно з крупною енергосистемою.

Ключові слова – споживання електричної енергії, математичне моделювання, коефіцієнт варіації, розподіл стрибків потужності.

Постановка проблеми. Останнім часом у світі відбуваються зміни в підходах до формування енергетичної політики держав. Здійснюється перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектора, в якій домінували великі виробники енергії, викопне паливо, неефективні мережі, недосконала конкуренція на ринках природного газу, вугілля, електроенергії, до нової моделі, в якій створюється конкурентне середовище, вирівнюються можливості для розвитку ринку та мінімізується домінування одного виду виробництва енергії. Разом з цим віддається перевага підвищенню енергоефективності та використанню енергії відновлюваних і альтернативних джерел енергії, таких як енергія вітру і сонця. Це ставить перед Україною нові економічні та технологічні виклики, але одночасно відкриває нові можливості для пошуку і впровадження інноваційних розробок в області виробництва, трансформації,



постачання та споживання енергії [1].

Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та їх інтегрування до енергосистеми різних рівнів супроводжується потребами в додатковому узгодженні режимів генерування та споживання електроенергії. Надходження таких видів енергії, як вітрова та сонячна, суттєво залежить від погодних факторів і є по суті некерованим процесом (можна лише обмежити робочу потужність встановленого обладнання). Разом з тим споживання також містить елементи випадковості, особливо коли мова йде про велику кількість однакових чи різнотипних споживачів [2]. Отже, при значному рівні впровадження ВДЕ може загостритися проблема забезпечення енергетичного балансу. Мова про використання вітрової та сонячної енергії для живлення окремих груп споживачів (населених пунктів, груп населених пунктів, місцевих підприємств), енергосистем різного рівня. Зокрема, для південного регіону (території Запорізької обл.) виконано ряд досліджень щодо режимів надходження вітрової та сонячної енергії [3-5].

Аналіз останніх досліджень. Математична модель енергетичного балансу як результуючого випадкового процесу потребує знання особливостей процесу.

У вітчизняних та зарубіжних роботах аналіз наявних даних базується на методиці статистичного аналізу [6-7], а моделювання процесу часто проводять з використанням штучних нейронних мереж [8-9].

Так в роботі [10] проведено аналіз методів встановлення «стандарту» енергоспоживання для побудови системи контролю та планування електроспоживання. У [11] проведено дослідження та моделювання прогнозування електричних навантажень в реальному масштабі часу з урахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережових технологіях моделі процесу енергоспоживання. Проведений аналіз добових графіків електроспоживання сільськогосподарського виробництва, який показав, що процес споживання електричної енергії представляє собою адитивну суміш постійної регулярної складової і стаціонарного імовірного процесу. Отримана модель процесу електроспоживання у вигляді дробно-раціональної спектральної щільності. Її параметри мало залежать від сезону, чим забезпечується можливість побудови оптимальної системи оперативного прогнозування в умовах невизначеності для найбільш тяжких технологічних умов.

Робота [6] присвячена емпіричному аналізу споживання електроенергії на Кіпрі. Використовуючи щорічні дані за період з 1960 по 2004 рік, було проведено дослідження споживання



електроенергії в житлово-комунальному господарстві та секторі послуг, які є найбільш швидко зростаючими споживачами електроенергії на острові, та її взаємодії з доходами, цінами та погодою. Аналіз проводився за допомогою методів аналізу часових рядів, таких як коректні тести з блокуванням та без структурного розриву рівнів, коінтеграційних тестів, векторних корекцій помилок, тестів Грейнджера і функцій імпульсної відповіді.

В [7] представлені три методи моделювання для прогнозування споживання електроенергії. Окрім традиційного регресійного аналізу, розглядається дерево рішень та нейронні мережі. Показано, що з появою методу інтелектуального аналізу даних для прогнозного моделювання можна побудувати різні типи моделей на єдиній платформі: впроваджувати різні методи моделювання, оцінювати продуктивність різних моделей і вибрати найбільш підходящу модель для майбутнього прогнозування.

Таким чином наявність моделі дозволяє розглядати різноманітні конфігурації енергосистем як в частині генеруючих потужностей, так і щодо різних варіантів об'єднань споживачів.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). За наявними даними про споживання електричної енергії різноманітними групами споживачів провести розрахунок параметрів математичної моделі споживання електричної енергії за графіками навантажень, що дозволить виявити можливості узгодження генерації енергії ВДЕ зі її споживанням.

Основна частина. Для отримання гарантовано стаціонарних процесів виконується декомпозиція часового ряду з виділенням осередненої складової, середньомісячних значень та поточних флуктуацій. В рамках даного дослідження важливим фактором є поточна мінливість рівня споживання. Враховуючи відмінності середніх потужностей на різних рівнях агрегування даних (від окремих н.п. до ОЕС), розглянемо коефіцієнти варіації потужності C_v як відносні величини (відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення). Для коректного моделювання процесу розглянемо складові варіацій потужності протягом місяця, що містять СКВ для місячного набору даних та їх міждобові і середньодобові компоненти. В табл. 1-3 наведено відповідні показники для кількох останніх років.

Дані за 2017 рік є неповними, проте дають уявлення про характер варіативності. І хоч абсолютні значення впали на 20% порівняно з 2013 роком, характер мінливості змінюється незначно (рис. 1), що обґрунтовує стабільність нормованих процесів.

Таблица 1.

Середньомісячні потужності ОЕС та їх варіативність

Місяць	2013 р.				2017 р.			
	Потужність, МВт	Коефіцієнти варіації C_v			Потужність, МВт	Коефіцієнти варіації C_v		
		місячна	між-добова	добова		місячна	між-добова	добова
Січень	23539	0,103	0,045	0,093	19542	0,103	0,050	0,090
Лютий	23070	0,095	0,030	0,090	19453	0,105	0,060	0,086
Березень	22595	0,093	0,036	0,086	16736	0,088	0,030	0,082
Квітень	19969	0,107	0,068	0,083	15577	0,104	0,058	0,086
Травень	17880	0,100	0,046	0,089	14366	0,091	0,031	0,086
Червень	18486	0,097	0,038	0,089	14602	0,093	0,034	0,086
Липень	18831	0,097	0,029	0,092	14848	0,099	0,042	0,089
Серпень	18853	0,103	0,038	0,095	15431	0,104	0,047	0,093
Вересень	19096	0,110	0,044	0,101	14904	0,095	0,027	0,091
Жовтень	21073	0,107	0,042	0,098	16709	0,110	0,056	0,095
Листопад	21609	0,116	0,050	0,104				
Грудень	23719	0,109	0,039	0,102				
Середнє	20727	0,103	0,042	0,094				

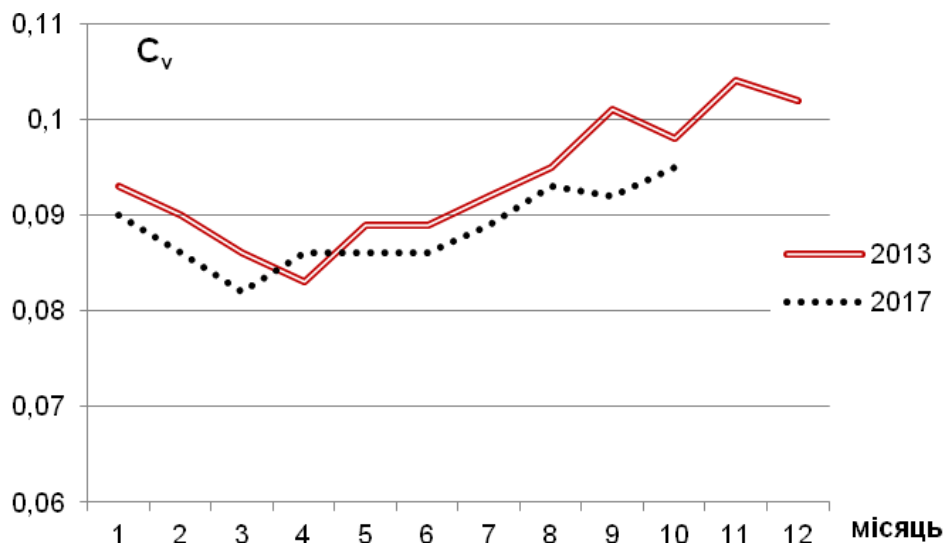


Рис. 1 Середньодобова складова варіації рівнів споживання ОЕС

Наскільки стабільними є показники споживання від року до року, розглянемо на прикладі регіональної Дніпровської енергосистеми, за даними НЕК «Укренерго» [12] для кількох суміжних років (табл. 2).

Таблица 2.

Коефіцієнти варіації поточної потужності ДнЕС

Місяць	2013 р.			2014 р.			2015 р.		
	Потуж., МВт	C_v , місяч.	C_v , добова	Потуж., МВт	C_v , місяч.	C_v , добова	Потуж., МВт	C_v , місяч.	C_v , добова
Січень	5752	0,050	0,037	5621	0,084	0,044	5606	0,043	0,036
Лютий	5689	0,039	0,034	5807	0,060	0,037	5565	0,046	0,035
Березень	5689	0,042	0,032	5380	0,051	0,033	5228	0,038	0,031
Квітень	5231	0,052	0,027	5211	0,053	0,032	4966	0,055	0,031
Травень	4902	0,050	0,030	4991	0,041	0,035	4634	0,036	0,030
Червень	5062	0,043	0,033	5100	0,043	0,036	4767	0,038	0,032
Липень	5023	0,042	0,038	5144	0,042	0,040	4737	0,041	0,036
Серпень	5055	0,047	0,040	5099	0,049	0,039	4685	0,043	0,038
Вересень	5102	0,049	0,040	5040	0,045	0,038	4728	0,038	0,034
Жовтень	5410	0,055	0,040	5439	0,057	0,036	5185	0,048	0,035
Листопад	5489	0,054	0,044	5823	0,058	0,044	5367	0,043	0,038
Грудень	5775	0,055	0,043	5837	0,036	0,032	5339	0,053	0,039
Середнє	5348	0,048	0,037	5374	0,052	0,037	5067	0,044	0,035

Отже, коефіцієнти варіації зберігають певну стабільність від року до року, а впродовж одного року спостерігається локальне зростання варіативності при зміні пір року (у квітні та жовтні), і зимові показники дещо вищі від літніх. Відносно середнього ці відмінності незначні, проте розгляд показників по сезону все ж виглядає виправданим. Завищені дані місячної варіації в січні 2014 р. (рис. 2) пояснюються поступовим зростанням споживаної потужності від 5,0 ГВт на початку місяця до 6,4 ГВт в кінці, а наступного місяця спад до середнього рівня. Причиною було аномальне падіння температури (в Запоріжжі від $+8^{\circ}\text{C}$ до -25°C); в інший час коливання потужності не такі значні. Натомість середньодобові варіації більш стабільні (рис. 3).

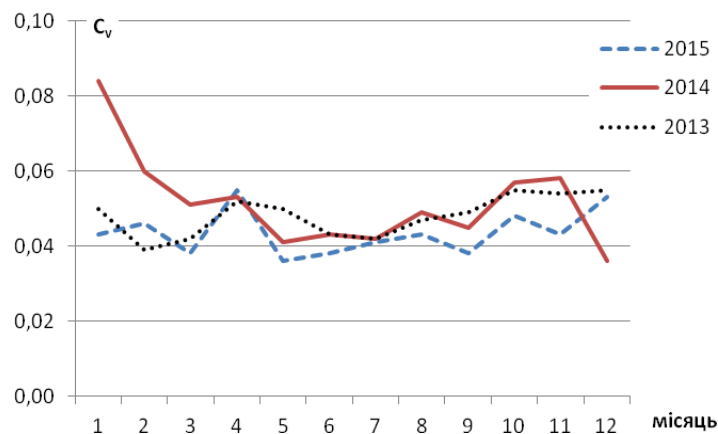


Рис. 2. Варіація рівнів споживання ДнЕС помісячно

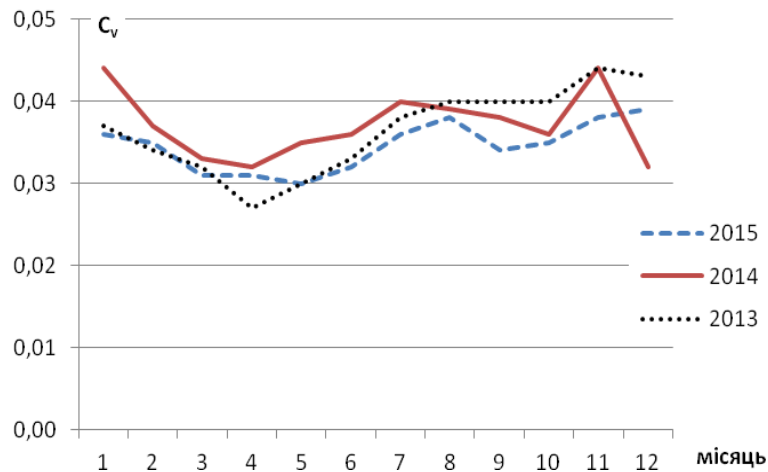


Рис. 3. Середньодобова складова варіації рівнів споживання ДнЕС

На відміну від варіації місячних наборів даних (рис. 2), для добової варіативності спостерігається більш виражений річний хід (рис. 3), з більшим розкидом значень в зимові місяці, хоча така поведінка не є детермінованою і містить помітну (особливо на прикладі 2014 р.) випадкову складову. При цьому поведінка коефіцієнта варіації добових значень якісно не повторює зміну середньомісячної потужності (рис. 4), тобто варіативність не має вираженої залежності від рівня споживання.

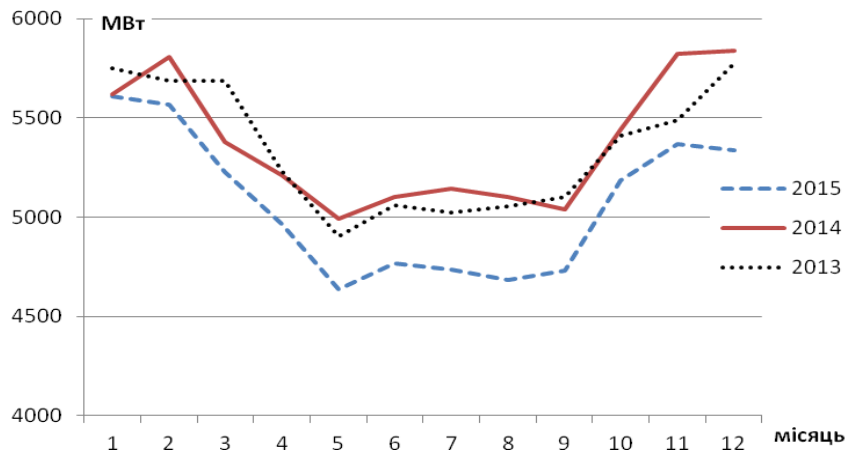


Рис. 4. Середньомісячні рівні споживання ДнЕС

Якісно подібна поведінка варіації добових значень потужності регіональної енергосистеми ДнЕС подібна до об'єднаної електроенергетичної системи України (рис. 1), хоча величина коефіцієнтів варіації для ОЕС більша. Для окремого населеного пункту розмах варіацій ще більший (в табл. 3 наведено дані за один з останніх років), при цьому якісно добова варіативність зростає у міжсезоння та зберігає певну постійність в зимовий та літній періоди (рис. 5).



Таблиця 3.

Коефіцієнти варіації поточної потужності населених пунктів

Місяць	н.п. Мордвинівка Т1				н.п. Терпіння Т1			
	Потужність, кВт	Коефіцієнти варіації C_v			Потужність, МВт	Коефіцієнти варіації C_v		
		місячна	між-добова	добова		місячна	між-добова	добова
Січень	1072	0,210	0,076	0,196	1757	0,191	0,084	0,171
Лютий	868	0,242	0,078	0,229	1579	0,237	0,139	0,192
Березень	763	0,296	0,138	0,262	1462	0,241	0,129	0,204
Квітень	695	0,276	0,069	0,268	1504	0,216	0,086	0,198
Травень	631	0,255	0,052	0,250	1363	0,269	0,161	0,216
Червень	685	0,272	0,121	0,242	1384	0,301	0,190	0,234
Липень	678	0,264	0,084	0,251	1621	0,234	0,074	0,222
Серпень	690	0,274	0,077	0,262	1608	0,240	0,104	0,216
Вересень	637	0,303	0,061	0,297	1476	0,255	0,110	0,230
Жовтень	769	0,264	0,104	0,243	1526	0,245	0,129	0,208
Листопад	848	0,235	0,044	0,231	1507	0,216	0,101	0,191
Грудень	920	0,226	0,066	0,216	1710	0,216	0,105	0,189
Середнє	771	0,259	0,081	0,245	1541	0,239	0,118	0,206

Для групи населених пунктів рівень сукупної варіативності дещо нижчий, ніж для одиночних н.п. (табл.4). Графічно ця особливість відображена на рис. 5.

Таблиця 4

Середньомісячні потужності та їх стандартні відхилення для групи н.п.

Місяці року	C_v			Потужність, кВт	СКВ		
	місячне	між-добове	добове		місячне	між-добове	добове
січень	0,175	0,065	0,162	5020	877	328	813
квітень	0,196	0,054	0,188	3858	756	210	726
липень	0,195	0,054	0,187	3928	765	212	735
листопад	0,192	0,059	0,182	4350	834	256	794
середнє	0,190	0,058	0,180	4205	808	252	767

На відміну від енергосистем більшого масштабу (рис.1, 3), добові варіації споживання окремих громад (рис. 5) мають більший розмах, проте мають виражене відносне зменшення (стабілізацію споживання) в зимові місяці.

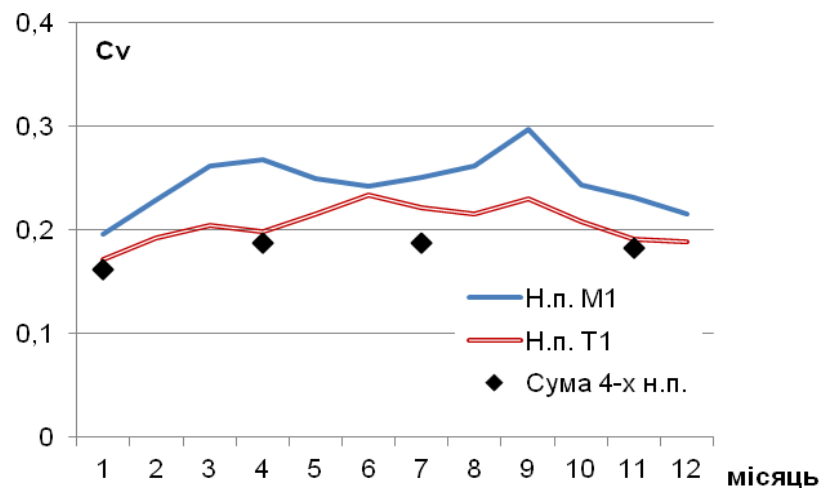


Рис. 5. Середньодобова складова варіації рівнів споживання н.п.

Загалом показники варіації споживаної потужності змінюються несуттєво впродовж року, що дозволяє говорити про принаймні позесонну стаціонарність процесів споживання електроенергії.

Крім варіативної складової, яка характеризує кількість імовірних значень випадкової величини (процесу), важливим показником є градієнтна складова, або темп поточних змін [3]. Числовим вираженням цього показника може слугувати розподіл стрибків потужності за одиницю часу як вираження поточних флуктуацій. Можна окремо розглядати позитивні зміни (зростання) та від'ємні (спад потужності). Характеристиками динаміки процесу є максимальні стрибки, середні по модулю значення, середньоквадратичні відхилення або коефіцієнти варіації як їх відносні значення, функції розподілу, тощо. Щодо максимальних (по модулю) значень важливо оцінити їх довірчий інтервал. Для оцінки використовують довірчі ймовірності 99% (симетричне відсіювання 1% значень як недостовірних), 95% (практичного рівня надійності) та інші, залежно від практичних потреб. Приклади числових характеристик реальної динамічності процесу та максимальні значення стрибків потужності при довірчих ймовірностях 99% та 95% наведено в табл. 5-7.

Середня величина стрибків потужності (табл. 5) становить 2,5-3,0% від середньомісячної потужності, а максимальні значення сягають 7-8%. Щільність розподілу стрибків має ознаки симетрії.

Середня величина стрибків потужності (табл. 6) становить 1,6-2,0% від середньомісячної потужності, а максимальні значення сягають 5-6%.



Таблиця 5.

Стрибки потужності ОЕС за 1 год. (МВт)

Місяць	Макс. ріст		Макс. спад		Середній стрибок	СКВ	Середня потужність
	99%	95%	99%	95%			
січень	1550	1300	1240	1020	474	596	19542
квітень	1530	1270	1310	1200	460	617	15577
липень	1260	950	1400	1170	382	510	14848
жовтень	1500	1320	1250	1070	443	601	16615
середнє	1460	1210	1300	1115	440	581	16645

Таблиця 6.

Стрибки потужності ДнЕС за 1 год. (МВт)

Місяць	Макс. ріст		Макс. спад		Середній стрибок	СКВ	Середня потужність
	99%	95%	99%	95%			
січень	350	260	290	235	97	122	5606
квітень	330	240	295	230	96	119	4966
липень	300	245	340	275	96	124	4737
жовтень	310	230	260	210	85	107	5185
середнє	323	244	296	238	94	118	5124

Таблиця 7.

Стрибки потужності н.п. за 0,5 год. (кВт)

ПС	Місяць	Макс. ріст		Макс. спад		Середній стрибок	СКВ	Середня потужність
		99%	95%	99%	95%			
1 н.п.	січень	110	83	90	75	32,7	41	1069
	квітень	132	95	130	100	34,6	61	695
	липень	85	61	130	101	29,0	44	679
	жовтень	133	96	105	85	34,2	47	775
	середнє	115	84	114	90	32,6	48	805
4 н.п.	січень	710	530	700	580	210	272	7869
	квітень	490	380	480	385	143	185	3858
	липень	395	320	520	400	141	184	3928
	жовтень*	410	315	375	280	115	147	3175
	середнє	501	386	519	411	152	197	4708

* Дані за жовтень неповні.

Середня величина стрибків потужності для одного н.п. становила 3-5%, а максимальні значення сягали 10-14% від середньомісячної потужності. Для групи н.п. відповідні показники: середня величина 2,5-3,5% від середньомісячної потужності, а максимальні значення 9-11%. Загалом показники окремих споживачів мають більшу варіативність порівняно з крупною енергосистемою.

Висновки. Врахування означених факторів варіативності та



стаціонарності дозволить сформувані адекватні математичні моделі роботи енергосистеми при різних масштабах об'єднання споживачів. Як свідчить виконане дослідження, таке моделювання допустиме на різних часових горизонтах та з різною дискретністю даних.

Література

1. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : проект [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>

2. Кузнецов М. П. Моделювання параметрів роботи енергосистеми, які носять випадковий характер / М. П. Кузнецов // Відновлювана енергетика. – 2012. – № 3. – С. 5–9.

3. Кузнецов М. П. Оцінка градієнтів генеруючої потужності вітроенергетичних установок / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. – Мелітополь, 2017. – Вип. 7, т. 1. – С. 3-10.

4. Кузнецов М. П. Оцінка характеристик вітрового режиму півдня України для потреб вітроенергетики / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Науковий вісник НУБіП України. – К., 2017. – № 261. – С. 195-202. – (Техніка та енергетика АПК).

5. Кузнецов Н. П. Вероятностные аспекты использования возобновляемых источников энергии на пустующих и непригодных для сельского хозяйства территориях / Н. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference "Topical researches of the World Science" (June 28, 2017, Dubai, UAE) – С. 45-51.

6. Nelson, W. B. (2009). *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*. New York: John Wiley & Sons.

7. Schabenberger, O., & Gotway, C. A. (2017). *Statistical methods for spatial data analysis*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

8. Ramsey, F., & Schafer, D. (2012). *The statistical sleuth: a course in methods of data analysis*. Cengage Learning.

9. Черненко П. О. Моделювання і прогнозування електроспоживання та експериментальних значень електричного навантаження енергооб'єднання / П. О. Черненко, О. В. Мартинюк, А. І. Заславський // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 11. – С. 24-34.

10. Находов В. Ф. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В. Ф. Находов, Д. О. Іванько, А. В. Головка // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – Спецвипуск. – С. 20-27.



11. Шулле Ю. А. Прогнозування електричних навантажень з використанням R/S-аналізу часових рядів / Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – С. 53-56.

12. ДП НЕК «Укренерго» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua.energy>

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Лысенко О. В.

Аннотация

Работа посвящена расчету параметров математической модели потребления электрической энергии. Учитывая различия средних мощностей на разных уровнях агрегирования данных были рассмотрены коэффициенты вариации мощности C_v как относительные величины. Для корректного моделирования процесса рассмотрены составляющие вариаций мощности в течение месяца, содержащих СКВ для месячного набора данных и их межсуточные и среднесуточные компоненты. В общем показатели отдельных потребителей имеют большую вариативность по сравнению с крупной энергосистемой.

GEOMETRICAL SIMULATION OF RADIAL HEAT CHANGE BETWEEN A PLUME AND BUILDINGS

O. Lysenko

Summary

The paper is devoted to the calculation of the parameters of the electric power consumption mathematical model. Taking into account the differences in average values on different levels of data aggregation, the coefficients of variation of power C_v as relative values were considered. For the correct modeling of the process, components of power variations within a month that contain standard deviation for a monthly data set and their daily and intermediate components are considered. Unlike larger systems, the daily variations in the consumption of certain communities are larger, but have a pronounced relative decline in the winter months. The split of power jumps per unit time was considered as the expression of current fluctuations. The average value of the integrated power system jets is 2.5-3.0% of the average monthly power, and the maximum values reach 7-8%. Average power jump for one settlement was 3-5%, and the maximum values reached 10-14% of the average monthly capacity. In general, the indices of individual consumers have a greater variation than a large power system.

Keywords: power consumption, mathematical modeling, variation coefficient, power split distribution.