

П. Д. Лежнюк, Ю. А. Шулле

**ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ
НАВАНТАЖЕНЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
З ВИКОРИСТАННЯМ ЇХ ФРАКТАЛЬНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

П. Д. Лежнюк, Ю. А. Шуллє

P. D. Lezhniuk, J. A. Shulle

**ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЇХ ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

**ON-LINE FORECASTING OF ELECTRIC ENERGY
CONSUMPTION SYSTEMS ELECTRIC LOADS,
USING THEIR FRACTAL PROPERTIES**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 658.262
ББК 65.291.808.4
Л40

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 29.01.2015 р.)

Рецензенти:

М. І. Михайлів, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

The monograph considers problems of control efficiency enhancement of electric energy consumption as a result of the development of the method and models of on-line forecasting of electric energy consumption systems loading, using their fractal properties. The book will serve as the excellent source of information for researchers, scientists, post-graduates, students who study the problems of electric loads forecasting.

Лежнюк, П. Д.

Л40 Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням їх фрактальних властивостей : монографія / П. Д. Лежнюк, Ю. А. Шулле. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 104 с.

ISBN 978-966-641-627-1

У роботі розглядаються питання підвищення ефективності керування електроспоживанням за рахунок розроблення методу і моделей оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням їх фрактальних властивостей. Книга розрахована на науковців, аспірантів, студентів та фахівців, які займаються питаннями прогнозування електричних навантажень.

УДК 658.262
ББК 65.291.808.4

ISBN 978-966-641-627-1

© П. Лежнюк, Ю. Шулле, 2015

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ	7
1.1 Аналіз сучасних методів прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання.....	7
1.1.1 Аналіз методів прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання	7
1.1.2 Сучасні методи, що можуть бути використані для прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання	16
1.2 Використання теорії фрактальних множин і фрактальної геометрії для прогнозування	19
1.3 Висновки до розділу 1	22
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ МНОЖИН	23
2.1 Формування математичної моделі прогнозу навантажень систем електроспоживання з використанням фрактальних множин.....	23
2.1.1 Представлення графіка навантаження у вигляді фракталу	23
2.1.2 Визначення придатності R/S-аналізу для прогнозування електричних навантажень	25
2.1.3 Якісна інтерпретація результатів R/S-аналізу графіків електричних навантажень	28
2.2 Дослідження фрактальних властивостей графіків навантаження	33
2.2.1 Дослідження фрактальних властивостей річних графіків споживання електроенергії	33
2.2.2 Дослідження фрактальних властивостей графіка півгодинних навантажень промислового підприємства	39
2.2.3 Обґрунтованість оцінки H для графіків електричних навантажень	42
2.3 Висновки до розділу 2	43

3	СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ, В РАМКАХ ЯКОЇ МОЖНА РЕАЛІЗУВАТИ ФРАКТАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАФІКА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	45
3.1	Оцінювання та оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання	45
3.1.1	Модель інтелектуальної адаптивної програмно-апаратної системи контролю та ідентифікації функціонування системи електроспоживання	45
3.1.2	Алгоритм оцінювання та оперативного прогнозування електричних навантажень промислових підприємств	48
3.1.3	Програмно-апаратний комплекс оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання	50
3.2	Алгоритм оцінювання та ідентифікації навантажень систем електроспоживання	54
3.3	Сценарний алгоритм оптимізації та прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання	57
3.4	Нейромережевий алгоритм оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання	59
3.5	Висновки до розділу 3	63
4	ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ	64
4.1	Оперативне прогнозування електричних навантажень за допомогою штучних нейронних мереж	64
4.2	Прогнозування електричних навантажень за допомогою ARIMA	78
4.3	Економічна оцінка ефективності оперативного прогнозування електричних навантажень	85
4.4	Висновки до розділу 4	88
	ВИСНОВКИ	89
	ЛІТЕРАТУРА	91
	SUMMARY	102

ВСТУП

В сучасних умовах ринкової економіки ефективне використання електричної енергії є однією з найважливіших проблем електроенергетики України. Це зумовлено зростанням цін на електроенергію і зростанням її частки в собівартості продукції. В останні роки в Україні змінюється структура електроспоживання. Нові осередки електроспоживання, кількість яких стрімко зростає, характеризується великою кількістю нескоординованих споживачів, що приводить до значного підвищення рівня стохастичних коливань споживання протягом доби, а також до зміни сезонних коливань електроспоживання протягом року. Більше того, саме внаслідок відсутності координації між окремими споживачами можуть виникати великі відхилення в електроспоживанні, амплітуда яких може перевищувати критичні для електропостачальника значення. Це може призвести до аварійних ситуацій, особливо за умов високого рівня зношеності обладнання електротехнічних систем.

Напрямок, що дозволяє скоротити витрати та уникнути критичних ситуацій, є оперативне прогнозування електроспоживання, яке допомагає ефективно планувати та нормувати споживання електричної енергії, забезпечувати ефективне використання різноманітного технологічного устаткування. Графік навантаження електричної мережі кожного підприємства формується під впливом різних факторів, повне врахування яких неможливе. Отже, в умовах енергетичного ринку важливе значення для промислових підприємств має створення системи оперативного прогнозування погодинного споживання електричної енергії на добу, що дозволяє мінімізувати відхилення споживаної потужності від потужності, заявленої на ринку на добу вперед.

Оперативне прогнозування електроспоживання промислових підприємств має важливе значення в умовах розвитку Smart Grid-технологій. Насамперед, необхідне воно для того, щоб оптимізувати графіки вироблення електроенергії, за рахунок прогнозування електроспоживання. У випадку, коли неможливо підтримувати баланс шляхом генерування електроенергії, можлива зміна графіків електричних навантажень підприємств-регуляторів. Таким чином забезпечується

гнучкий двосторонній зв'язок потоків електроенергії і інформації між енергооб'єктами.

Ймовірнісний характер змін навантаження є однією з істотних особливостей процесу електроспоживання. Внаслідок наявності випадкової складової, природного росту навантаження та впливу різних факторів, строгої періодичності в графіках навантаження немає. Раніше запропоновані методи прогнозування електричного навантаження на практиці стикаються з певними труднощами, що обумовлює актуальність розроблення нових методів для прогнозування навантаження. Спектр методик прогнозування витрат електроенергії досить широкий. Однак все більшого поширення набувають інтелектуальні інформаційні технології, які пов'язані з використанням штучних нейронних мереж. Вони дозволяють відтворювати складні залежності, які супроводжуються погано формалізованим завданням. Зокрема, це і теорія фракталів, яка дозволяє з іншого боку розглянути процес прогнозування електроспоживання.

Метою роботи є підвищення ефективності керування електроспоживанням шляхом використання методу і моделей оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фрактальних властивостей.

Робота буде корисна науковцям, аспірантам, студентам та фахівцям, які займаються питаннями прогнозування електричних навантажень.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Загальний стан сучасних методів прогнозування електричних навантажень визначається значною зміною парадигми енергоспоживання. Саме це є основою для можливості ефективного застосування загальних математичних процедур та алгоритмів при розв'язанні задач детермінованого і стохастичного аналізу електромеханічних систем, електропостачання потужних технологічних комплексів, до яких необхідно віднести обладнання промислових підприємств. Перші роботи, на тему оперативного, короткострокового, середньострокового прогнозування електричних навантажень з'явилися у середині минулого століття. Однак і сьогодні потік публікацій у цьому напрямку не зменшується, а методи прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання продовжують стрімко розвиватись. Це обумовлено, в першу чергу, складністю задач, які пов'язані з безперервним розвитком систем електроспоживання, недослідженістю випадкових процесів, що формують режими їх функціонування.

Велика кількість вчених проводили дослідження у цій сфері. Значний внесок у розвиток методів визначення і прогнозування електричних навантажень внесли такі вчені: В. І. Гордєєв, А. А. Федоров, Е. М. Рістхейн, О. О. Єрмілов, С. Д. Волобрінський, А. В. Праховник, І. Є. Васильєв, В. І. Щуцкій, С. К. Гурський, Б. І. Макоколюєв, А. П. Резніков, В. Ф. Тимченко, Б. С. Рогальський.

У даному розділі розглядаються сучасні методи прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання.

1.1 Аналіз сучасних методів прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання

1.1.1 Аналіз методів прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання

На сьогоднішній день основні дослідження в електроенергетиці спрямовані на вирішення проблем енергосистем. Питанням прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання приділяється уваги значно менше. Під системою електроспоживання розуміється сукупність взаємопов'язаних електротехнічних комплексів, окремі електротехнічні комплекси, електроприймачі промислових підприємств, що характеризуються узагальненими параметрами елект-

ричного навантаження. Прогнозування режимів функціонування електричних навантажень систем електроспоживання необхідні для розв'язання наукових, науково-практичних, техніко-економічних задач управління і прийняття рішень. В загальному випадку розглядають такі види прогнозів [117–121]:

- годинний прогноз, що застосовується для прогнозування електричного навантаження з терміном до однієї години;
- оперативний прогноз, що використовується для прогнозування погодинного електричного навантаження в межах однієї доби;
- короткостроковий прогноз, застосовується для прогнозування добового електроспоживання та погодинного визначення навантажень з тижневим упередженням;
- місячний прогноз, використовується для добового електроспоживання до кінця поточного місяця;
- середньостроковий прогноз, застосовується для дослідження питань прогнозування місячного електроспоживання, тижневих та місячних екстремумів (максимумів та мінімумів) електричних навантажень з терміном 1–12 місяців;
- довгостроковий прогноз, використовується для прогнозування з терміном 1–5 років;
- перспективний прогноз, застосовується для прогнозування з терміном понад п'ять років.

Кожен вид прогнозу потребує власних вхідних даних та особливої методики прогнозування [1, 8, 10, 27, 29, 31, 37, 48, 66, 70, 71, 83, 85, 91, 95, 103, 115, 117–119]. В запропонованій роботі увага приділена оперативному прогнозуванню, для якого досить часто використовують метод еталонного графіка, де беруться усереднені за певний проміжок часу значення споживання електричної енергії в якості типового графіка. Такий типовий графік корегується під час появи нових даних. На сьогодні для оперативного прогнозування майже завжди використовують однофакторні моделі [117–121].

Прогнозування є однією з тих задач статистичного аналізу, які є дуже необхідними, але в той же час, дуже складними [27, 29–31, 37, 48, 66, 70, 71, 83, 85, 92, 95, 117–121]. Серед методів прогнозування (таких налічується близько 150) виділяють три групи [10]:

- статистичні (ймовірнісні);
- детерміновані (в тому числі алгебраїчні);
- комбіновані ймовірнісно-детерміновані.

Статистичні моделі отримали найбільш широке застосування в задачах прогнозування процесів електроспоживання [6, 8, 15, 20, 26, 71, 77, 123]. Популярність моделей цього типу пояснюється високим сту-

пенем адекватності для розв'язання цілої низки задач прогнозування процесів в енергетиці [27, 30, 31, 34, 86, 103].

У загальному випадку найбільш повною характеристикою сигналу як випадкового стохастичного процесу є n -мірна щільність ймовірності $\varphi(P_1, P_2, \dots, P_n)$, яка під час інтегрування по dP_1, dP_2, \dots, dP_n дає ймовірність того, що випадковий процес пройде в інтервалах $(P_1 - \Delta P_1 / 2; P_1 + \Delta P_1 / 2), \dots, (P_n - \Delta P_n / 2; P_n + \Delta P_n / 2)$:

$$\varepsilon = \int_{P_1 - \Delta P_1 / 2}^{P_1 + \Delta P_1 / 2} \int_{P_2 - \Delta P_2 / 2}^{P_2 + \Delta P_2 / 2} \dots \int_{P_n - \Delta P_n / 2}^{P_n + \Delta P_n / 2} \varphi(P_1, P_2, \dots, P_n) dP_1 dP_2 \dots dP_n,$$

де P_1, P_2, \dots, P_n – потужність навантаження $P(t)$ в момент часу t_1, t_2, \dots, t_n .

На практиці користуватися багатовимірними щільностями ймовірності досить складно, так само як і їх визначити.

Для нестационарних випадкових процесів, що представляються процесами з періодичним трендом, n -мірна щільність розподілу є періодичною функцією часу по кожному аргументу:

$$\varphi(P_1, P_2, \dots, P_n) = \varphi(P(t_1 + T), P(t_2 + T), \dots, P(t_n + T)),$$

де T – період повторення тренду;

$$P_i = P(t_i), i = \overline{1, n}.$$

Математичне очікування і автокореляційна функція цього процесу мають також періодичний характер:

$$M[P(t)] = M[P(t + T)] = p_c(t); \quad R(\tau) = R(\tau + T).$$

Часткові реалізації процесу $P_j(t), j = \overline{1, N}$ можна досліджувати як за властивостями окремих реалізацій $P_j(t)$ (вивчення процесу «поздовж»), так і за властивостями окремого відліку $P_j(t_k)$, але для всіх реалізацій (вивчення процесу «упоперек»). В першому випадку $P_j(t)$ величина j – фіксоване ціле число, і вивчення графіка здійснюється на часовому інтервалі $t \in [0, T_0]$, в іншому випадку фіксований момент часу t_k , і вивчається поведінка відліку $P_j(t_k)$ по всій множині реалізацій $j = \overline{1, N}$ графіків.

Особливий інтерес викликають процеси, які відносяться до класу нестационарних випадкових процесів, вибірккові реалізації яких мають загальний детермінований тренд. Для процесів такого типу показано,

що також можливе визначення статистичних характеристик за певними реалізаціями [15, 123]:

$$p_c = M[P(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt; \quad (1.1)$$

$$DP = M\left\{[P(t) - p_c]^2\right\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - p_c]^2 dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - p_c]^2 dt; \quad (1.2)$$

$$k_{ij} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [P_i(t)P_j(t + t_{ij})]^2 dt - p_{ci}p_{cj} \approx \frac{1}{T} \int_0^T [P_i(t)P_j(t + t_{ij})]^2 dt - p_{ci}p_{cj}; \quad (1.3)$$

$$R_{ij}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T - \tau} P_i(t)P_j(t + \tau) dt - p_{ci}p_{cj}; \quad (1.4)$$

$$S(\omega) \approx \frac{2}{T} \int_0^T R(t) \cos(\omega t) dt. \quad (1.5)$$

Випадкові нестационарні графіки навантаження часто мають особливості, що спрощують їх аналіз і моделювання. До таких особливостей відноситься повторюваність технологічних або добових циклів, а також циклів викликаних сезонними змінами.

Результати вимірювань таких графіків навантаження або часових рядів електроспоживання можна представити нестационарним випадковим процесом, усі реалізації якого мають загальний майже періодичний детермінований тренд. Для опису таких процесів не завжди вимагається усереднення за ансамблем реалізацій, а багато важливих властивостей можна оцінити за однією реалізацією [11].

Основу статистичних прогнозних математичних моделей електричних навантажень систем електроспоживання складають різні моделі часових рядів: модель ковзного середнього і зваженого ковзного середнього, модель експоненційного згладжування Брауна, авторегресійна модель, поєднана модель авторегресії ковзного середнього, поєднана модель авторегресії інтегрованого ковзного середнього або Бокса-

Дженкінса і інші. Класифікація основних статистичних прогнозних математичних моделей показана на рис. 1.1.

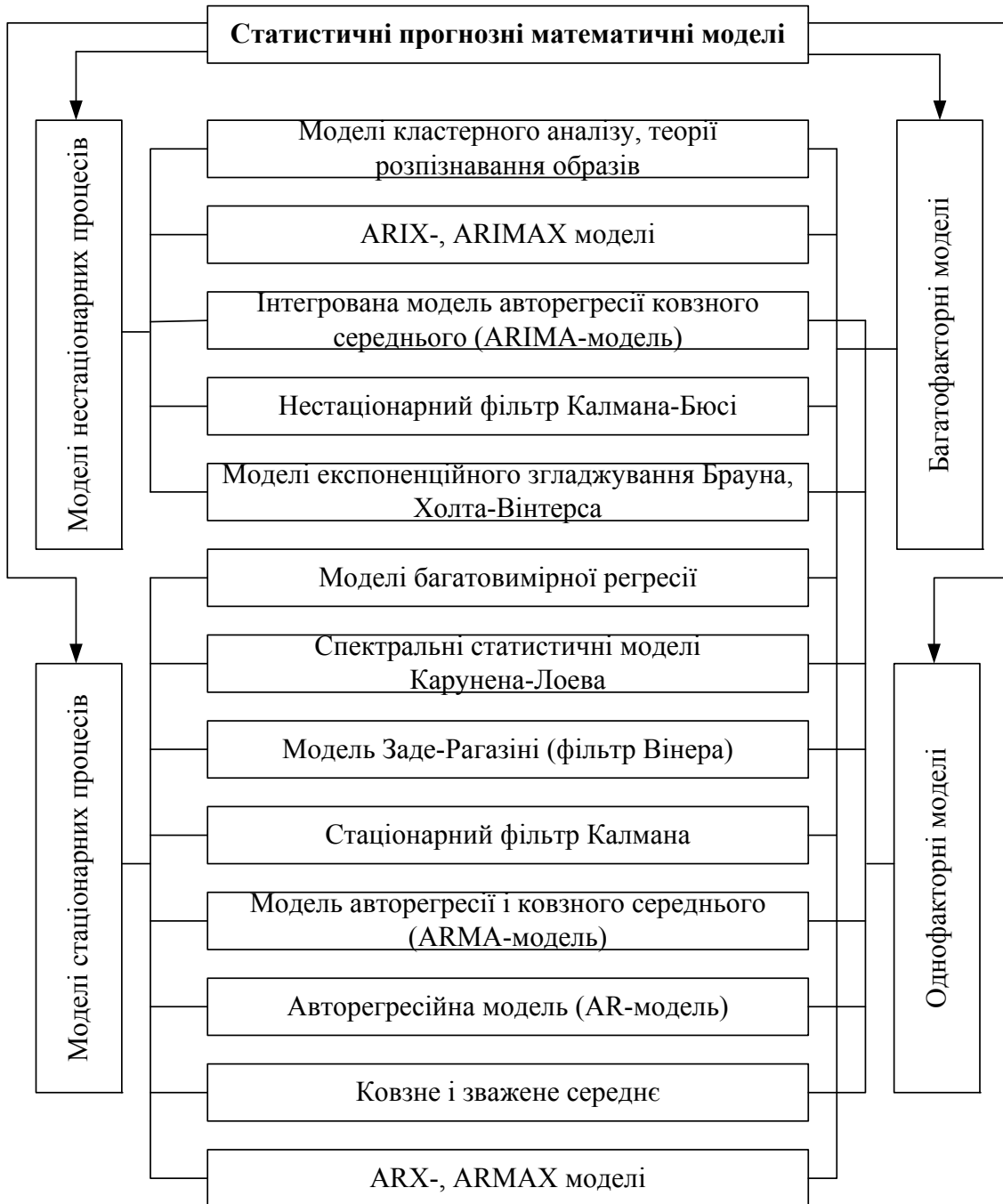


Рисунок 1.1 – Класифікація основних статистичних прогнозних математичних моделей електричних навантажень систем електроспоживання

Статистичні моделі, залежно від обліку в них вхідних параметрів зовнішніх впливаючих чинників, ділять на: однофакторні і багатофакторні. У першому типі моделей облік зовнішніх чинників не здійснюється, а будується замкнута динамічна модель самої вихідної величини.

ни. У другому типі – динамічна модель має один або декілька зовнішніх впливаючих чинників. Якщо модель часового ряду багатofакторна, то цей факт може позначатися буквою «X» в скороченні її назви (ARX-модель, ARMAX-модель і так далі).

Окрім моделей часових рядів при статистичному прогнозуванні використовуються моделі, які базуються на: фільтрах Калмана і Вінера (модель Заде–Рагазіні); спектральних ортогональних розкладаннях, у тому числі Карунена–Лоева; канонічному розкладанні випадкового процесу; багатовимірній регресії; теорії кластерного аналізу; теорії розпізнавання образів [10, 30, 31, 76, 103, 106, 112].

Усі перелічені статистичні моделі можуть використовуватися під час моделювання окремо, але найчастіше у складі комбінованих ймовірно-детермінованих моделей.

Методи статистичної обробки інформації мають добре розвинені і вивчені класичні методи, а саме, регресійний, кореляційний аналіз і так далі. Незважаючи на безперечну цінність цього виду досліджень, у багатьох випадках від нього доводиться відмовлятися. На превеликий жаль, людина без освіти в галузі статистики зустрічається з труднощами, як під час вибору конкретного методу аналізу, так і під час трактування результату.

В останні роки намітилася тенденція критичного ставлення до статистичної обробки інформації. Особливо у випадку, коли відсутня можливість отримання представницьких вибірок для побудови математичних моделей, статистичних характеристик процесів та перевірки їх адекватності [4, 74, 107]. Крім того, статистична теорія використовує операції усереднення по безлічі реалізацій, що в багатьох випадках приводить до погіршення математичної моделі, особливо в умовах малих і нестационарних вибірок.

В електроенергетиці є приклади, коли ймовірнісні моделі застосовуються без належного обґрунтування, тобто, коли відсутня можливість отримання представницьких вибірок для побудови математичних моделей і перевірки їх адекватності [9, 47]. У цих випадках ефективно використовувати алгебраїчний, детермінований, а не статистичний підхід до вирішення проблеми прогнозування електричних навантажень. Основні відмінності алгебраїчного підходу від статистичного полягають в наступному:

- при моделюванні знаходяться, уточнюються і використовуються не статистичні характеристики помилок вимірювань, а безпосередньо самі значення помилок у конкретному епізоді ідентифікації;
- уточнення параметрів моделі здійснюється безпосередньо за нев'язкою сигналів на виході об'єкта і на виході поточної моделі.

Більшість детермінованих прогнозних моделей процесів (поліноміальна модель, кінцевий гармонійний ряд Фур'є, алгебраїчні регресії, спектральні розкладання і інші) можуть представлятися моделлю загального виду:

$$P_j = F(\varphi, S_j) + \Theta_j, \quad (1.6)$$

де φ – вектор параметрів детермінованої моделі; $S_j = [Z_j^T, \dots, Z_{j-l_1}^T, P_{j-1}^T, \dots, P_{j-l_2}^T]^T$ – комбінований вектор: вхідних впливових факторів Z_j , у поточний і ряд попередніх моментів часу, а також, можливо, самої вихідної величини P_j в попередні моменти часу; Θ – вектор помилки моделі; $F(\dots)$ – функція або векторна функція, що визначає детерміновану прогнозну модель.

Завдання ідентифікації (1.6) ставиться в алгебраїчному випадку так: визначити найкращу, за деяким критерієм якості $I(\hat{\varphi})$, оцінку $\hat{\varphi}$ параметрів φ на підставі змін входу–виходу об'єкта в допустимому області Φ значень:

$$\hat{\varphi} = \arg \left(\min_{S_j \in \Phi} I(\hat{\varphi}) \right).$$

В алгебраїчній постановці вектор помилки моделі Θ_j і його статистичні характеристики вважаються невідомими.

З формальних алгебраїчних позицій система (1.6) не може бути розв'язана, оскільки містить два невідомих вектори: параметрів моделі φ і помилки моделі Θ_j . Однак, використовуючи метод найменших квадратів при алгебраїчній ідентифікації, модель (1.6) наближено заміняють системою:

$$P_j = F(\varphi, S_j) + e; \quad e = p_j - F(\varphi, S_j),$$

а за оптимальну оцінку $\hat{\varphi}$ приймають значення, що забезпечує мінімум евклідової норми вектора нев'язок, або позитивно визначеної квадратичної форми:

$$I(\hat{\varphi}) = e_j^T R^2 e_j, \quad (1.7)$$

де $R^2 = R^T R$ – позитивно певна вагома матриця, $\det R \neq 0$; $e_j = P_j - F(\varphi, S_j)$ – вектор нев'язок (похибок).

Хоча використання в теорії ідентифікації цього підходу статистично необґрунтоване, проте цей метод є більш практичним методом

розв'язання задачі по єдиній вибірці або малій кількості вибірок вимірювань обмеженого обсягу.

Для поліпшення оцінки φ необхідне залучення додаткової (нестатистичної) інформації або про вектор параметрів φ , або про вектор помилки моделі Θ . Одним із шляхів є ітераційне уточнення моделі помилки шляхом модифікації, наприклад, матриці R в квадратичному критерії якості (1.7), або реалізація постійного адаптивного налаштування моделі. В деяких підходах рекомендується фільтрувати на основі методу експоненційного згладжування одержані оцінки параметрів φ моделі.

Як алгебраїчний підхід можна розглядати побудову математичних моделей процесів на основі теорії нечітких множин, штучних нейронних мереж, які дозволяють формувати модель об'єкта або процесу в умовах малих і нестаціонарних вибірок, а також формалізувати експертні оцінки фахівців [5, 25, 74, 93]. Основні детерміновані моделі, що використовуються при моделюванні та прогнозуванні, наведені на рис. 1.2. Як правило, ці моделі використовуються в складі комбінованих ймовірно-детермінованих моделей.

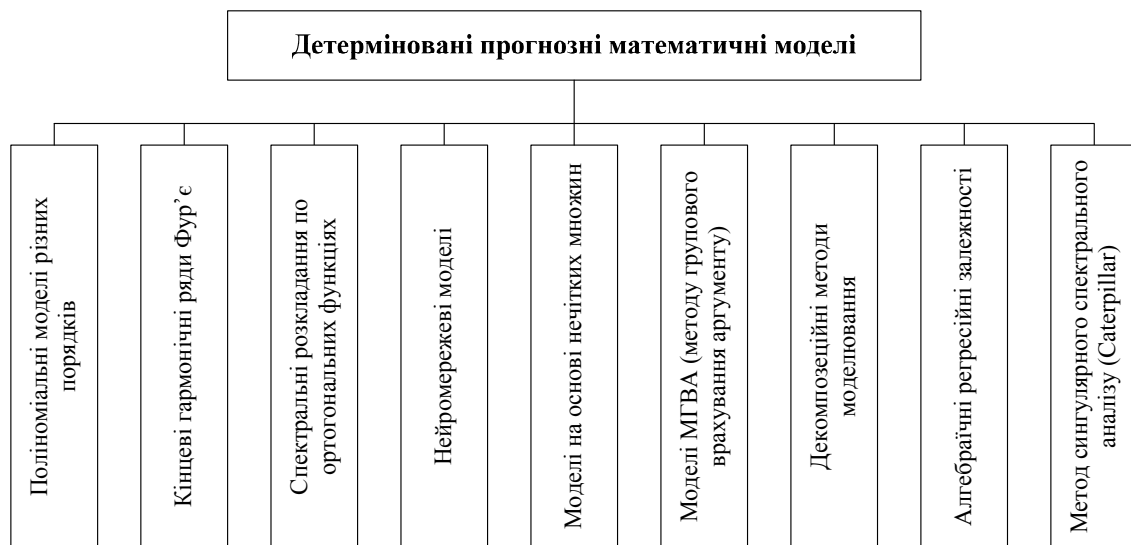


Рисунок 1.2 – Детерміновані підходи розробки прогнозних математичних моделей електричних навантажень систем електроспоживання

Усе більшого поширення набувають математичні прогнозні моделі, які є комбінацією статистичних та детермінованих моделей. Саме ці моделі дозволяють забезпечити найкращу точність прогнозування, адаптивність до змінного процесу електроспоживання [10, 30, 103]. Вони базуються на концепції стандартизованого моделювання наван-

таження, яка полягає в моделюванні фактичного навантаження $P(t,d)$ як сукупності стандартизованого графіка (базової складової, детермінованого тренду) $P_S(t,d)$ і залишкової складової $P_D(t,d)$.

Така декомпозиція на складові найчастіше має адитивний характер:

$$P(t,d) = P_S(t,d) + P_D(t,d), \quad (1.8)$$

іноді використовується і мультиплікативна декомпозиція:

$$P(t,d) = P_S(t,d) \cdot P_D(t,d), \quad (1.9)$$

де d – тип прогнозованої доби.

Іноді використовується модель, що поєднує властивості адитивної і мультиплікативної моделей:

$$P(t,d) = P_{S1}(t,d) + P_{S2}(t,d) \cdot P_D(t,d), \quad (1.10)$$

де $P_{S1}(t,d)$, $P_{S2}(t,d)$ – детерміновані складові; $P_D(t,d)$ – остаточна випадкова складова.

Найбільш широке застосування в електроенергетиці має адитивна модель (1.8), моделі (1.9) і (1.10) мають обмежене застосування.

Процес $P_D(t,d)$ у першому наближенні вважають стаціонарним, а це спрощує його моделювання з використанням статистичних моделей. Виділення стандартної складової $P_S(t,d)$ здійснюють різними широко відомими методами [5, 10, 25, 74, 76, 87, 93]. При моделюванні стандартної складової $P_S(t,d)$ також часто здійснюють її декомпозицію на окремі складові [10]:

$$P_S(t,d) = P_A(t,d) + P_R(t,d) + P_T(t,d) + P_W(t,d), \quad (1.11)$$

де $P_A(t,d)$ – складова, що враховує зміну середнього сезонного навантаження; $P_R(t,d)$ – складова, що враховує тижневу циклічність зміни електроспоживання; $P_T(t,d)$ – трендова складова, що моделює додаткові ефекти, пов'язані зі зміною сходу і заходу сонця від сезону до сезону; $P_W(t,d)$ – складова, яка враховує залежність електроспоживання від метеофакторів (температури).

Кожна із складових в комбінованій моделі (1.8), (1.11) реалізується на основі того чи іншого статистичного або детермінованого методу. Це і визначає різноманіття комбінованих прогнозних математичних моделей процесів. Комбіновані моделі виду (1.8), (1.11) не завжди обов'язково містять всі перелічені складові: $P_S(t,d)$, $P_A(t,d)$, $P_R(t,d)$, $P_T(t,d)$, $P_W(t,d)$, $P_D(t,d)$. У низці випадків одні складові вбирають у себе функції інших відсутніх в моделі складових.

1.1.2 Сучасні методи, що можуть бути використані для прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання

Розглянемо досить нові, сучасні методи прогнозування. До них віднесемо:

- інтелектуальні технології аналізу даних;
- оперативну обробку даних (OLAP-технології);
- технічний аналіз;
- нейронні мережі;
- нелінійні регресійні методи;
- еволюційне програмування;
- гібридні варіанти;
- адаптивні методи прогнозування;
- нечітке прогнозування;
- сценарний підхід;
- фрактальний аналіз;
- сплайн-прогнозування.

Розглянемо деякі зі списку нових підходів, які знайшли своє застосування в електроенергетиці.

Адаптивне прогнозування іноді називають «двоступеневим прогнозуванням», що є окремим випадком адаптивного підходу. Адаптивне прогнозування полягає в тому, що поряд зі швидкими змінами прогнозованих змінних існують відносно повільні зміни їх структурних коефіцієнтів. Тоді спочатку прогнозуються повільні зміни коефіцієнтів, які впливають на подальшу прогнозованість самих змінних. Для цього частіше використовується метод експоненційного згладжування, на його основі будується більшість моделей адаптивного прогнозування [30, 66, 74, 83, 122]. Недоліком адаптивного прогнозування є те, що в деяких випадках (при прогнозуванні і моделюванні сезонних процесів) воно стає громіздким.

Нечітке прогнозування іноді ще називається лінгвістичним або символним. Тут можуть використовуватись лінгвістичні представлення змінних, в цих методах цікавий грубий, наближений опис з прогнозуванням тенденцій. Також застосовують такі терміни, як високий, середній, низький, що особливо зручно для експертних методів аналізу і прогнозування.

З середини 60-х років двадцятого століття після розробки Л. Заде теорії нечітких множин, було запропоновано декілька теорій, які дозволяють формалізувати невизначеність. Для людини звичніше наділити величини і поняття реального світу в звичайну числову форму і описувати взаємовідношення між ними однозначними функціями. В цьому випадку при розвитку будь-якого процесу завжди є тільки одна

можливість. Іншими словами, усі величини мають детермінований характер. Суть теорії нечіткої логіки полягає в тому, що подібно до звичайних чисел з розподілами нечіткості можна робити різні операції, наприклад, складати і множити [5, 50, 74, 93].

Нейронні мережі утворюються нейроподібними елементами, які з'єднані між собою синоптичними зв'язками. Елементи розташовуються пошарово, причому бажано звести до мінімуму кількість шарів і нейронів у шарі. Мережа проходить етап навчання на звітних даних і продовжує роботу на перспективних даних. Нейромережа, як правило, є багат шаровою мережевою структурою однотипних елементів – нейронів, сполучених між собою і згрупованих в шари (багат шарові нейромережі). Вхідна інформація подається на нейрони вхідного шару, а після проходження через багат шарову структуру вихідна інформація знімається з вихідного шару. Перед використанням на практиці нейронну мережу необхідно «навчити» на прикладах. В результаті нейромережу налаштовують так, щоб отримати відповідь максимально близьку до вірної [25, 50, 74, 84, 88, 91, 92, 114, 126].

В електроенергетиці на основі моделей багат шарового персептрона і штучних нейронних мереж вирішені завдання класифікації добових графіків навантаження і їх короткострокового прогнозування на термін від однієї до десяти діб, а також моделювання електроспоживання промислового підприємства. Дві головні переваги нейронних мереж над іншими методами:

- при використанні нейронних мереж легко досліджувати залежність прогнозованої величини від незалежних змінних;
- експерт не є заручником вибору математичної моделі поведінки часового ряду (побудова нейромережевої моделі відбувається адаптивно під час навчання без участі експерта, при цьому нейронній мережі надаються приклади з бази даних і вона сама підлаштовується під ці дані).

Сценарний підхід. Сценарієм в прогностиці прийнято називати опис майбутнього, складений з врахуванням правдоподібних припущень, об'єднаних деякими балансами. Розрізняють пошукове прогнозування і новаторське прогнозування. До винахідників цього підходу, в першу чергу, можна віднести Х. Кана [125].

Технічний аналіз використовує статистику для того, щоб визначити тренди на ранніх стадіях їх розвитку і прогнозувати процеси у відповідності до цих трендів. Стандартні методи технічного аналізу, засновані на значеннях різноманітних індикаторів, дають лише оцінку руху змінних (в такому випадку це значення електричних навантажень) вгору або вниз. При цьому величина діапазону, в якому буде знаходитись прогнозована величина, залишається невизначеною. Тер-

мін «технічний аналіз» означає дослідження динаміки будь-яких часових показників за допомогою графічних методів з метою прогнозування майбутнього напрямку їх еволюції.

З точки зору математики, технічний аналіз визначається як графічне відображення статистики еволюційних процесів. Технічний аналіз часових рядів розвивався під впливом статистичних методів аналізу часових рядів, які можна поділити на три частини:

- часові ряди враховують все;
- часові ряди підкоряються тенденціям;
- часові ряди мають закономірності.

Друге твердження є основою для трендового аналізу: намічений тренд з більшою ймовірністю продовжить свій рух, ніж змінить напрям. В той же час електричні навантаження в масштабі промислового підприємства об'єктивно обумовлюють непередбачувані появи і закінчення трендів. Тренд (тенденція) це найважливіший інструмент технічного аналізу, який є однонаправленим рухом аналізованого показника, що діє протягом певного безперервного періоду часу.

Третє з наведених тверджень означає, що тенденції електроспоживання, які діяли в минулому, діятимуть в сьогоденні і майбутньому, а це основа для фрактального аналізу.

У технічному аналізі напрям тренду визначають за допомогою різних процедур усереднювання спостережуваного часового ряду. Для даного часового ряду $Y: y_i, i=1..N$ при обраній довжині t інтервалу згладжування, елемент $y_t, t > m/2$ звичайного «ковзного середнього» [44] обчислюється за формулою

$$\bar{z}_t = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=t-p}^{t+p} z_i, \quad p = \left[\frac{m}{2} \right], \quad t = \overline{p+1}, \overline{n-p}.$$

У технічному аналізі вже склалася класифікація трендів. Тренд буває не тільки зростаючим, спадним або нейтральним, але і сильним, слабким або нормальним; молодим, зрілим або старим; довгостроковим, середньостроковим чи короткостроковим. Наприклад, сильний тренд розвивається під кутом, не меншим 45° по відношенню до осі часу; слабкий тренд – під кутом, меншим 45° ; а нормальний – дотримується кута 45° . Ділянку, наступну за точкою зміни тренду, називають «молодим трендом»; ділянку, що передує точці зміни тренду, називають «старий тренд»; частина, що залишилася, «зрілий тренд». Термін «життя тренду» визначають за допомогою теорії циклів. Вважається, що класичний часовий ряд складається з періодичної зміни підйомів і спадів, поєднання яких складає цикл. Такі цикли характеризуються двома поняттям: амплітудою циклу і його періодом – довжи-

ною хвилі між двома сусідніми значеннями показника. Іншими словами, хвиля циклу складається зі зростаючої та спадної фаз (гілок).

Фрактальний аналіз. Інструментарій фрактального аналізу розроблений в процесі розвитку нелінійної динаміки, народження останньої було тісно пов'язане з широким використанням нової технології наукових досліджень – обчислювального експерименту. Базовим інструментом для фрактального аналізу часових рядів є запропонований Херстом *R/S*-аналіз. За допомогою цього аналізу вдається виявити і чисельно оцінити такі фундаментальні характеристики часових рядів: наявність довготривалої пам'яті і її глибину, трендостійкість (персистентність) або, навпаки, антиперсистентність та ін. Використання цих характеристик (показників, критеріїв) дозволяє будувати прогнозні моделі, які виявляються продуктивними у разі, коли класичні методи прогнозування виявляються неефективними [89, 109].

Отже, розглянуті методи прогнозування набувають все більшого поширення в енергетиці. Тому для оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання використовуємо декілька цих методів, зокрема фрактальний аналіз, сценарні підходи, нейромережеве прогнозування.

1.2 Використання теорії фрактальних множин і фрактальної геометрії для прогнозування

Надамо деякі пояснення відносно напрацювань фрактальних множин і фрактальної геометрії [40, 89, 109], які сьогодні використовуються у різних напрямках науки і практики. У сфері прогнозування електричних навантажень наукові результати фрактальних множин використовуються вперше.

Зародження теорії фрактальних множин і фрактальної геометрії пов'язують з іменем математика Бенуа Мандельбротом, який опублікував у 1977 році книгу «*The Fractal Geometry of Nature*». Основна ідея, викладена у цій праці, полягала в наступному: традиційна геометрія з прямими лініями і гладкими поверхнями не підходить для опису різноманітних природних об'єктів, для цього варто використати спеціальні самоафінні структури – фрактали. В перекладі з англійської мови слово «*fractal*» означає «той, що складається з частин» [40, 89, 109].

Перше визначення фракталам дав Б. Мандельброт: «Фракталом називається структура, яка складається з частин і у деякому значенні подібна цілому» [109]. Отже, фрактал – це самоподібна структура, розвиток якої не залежить від масштабу; це рекурсивна модель, кожна частина якої повторює у своєму розвитку розвиток усієї моделі в цілому [40, 89, 109].

У теорії фрактальних множин і фрактальної геометрії значну роль відіграють самоподібні і фрактальні множини [40, 89, 109]. Розглянемо декілька класичних прикладів фрактальних самоподібних множин. Вони допоможуть зрозуміти особливості самоподібності графіків електричних навантажень. Щоб отримати Криву Коха, необхідно розділити відрізок на три рівні частини, на середній з яких побудувати правильний трикутник. Кожну із сторін фігури, що утворилася, знову розділити на три рівні частини і на середніх із них побудувати правильні трикутники і т. д. Результатом цього процесу буде крива Коха. Побудова кривої Коха (п'ять ітерацій) показана на рис. 1.3.

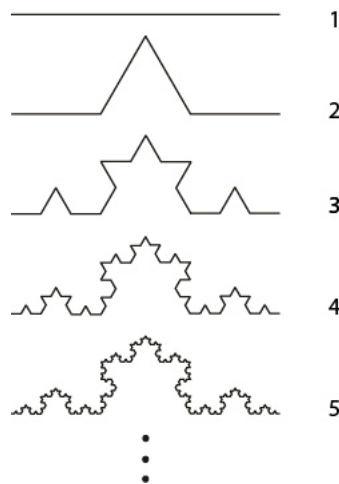


Рисунок 1.3 – Побудова кривої Коха

Крива Коха самоподібна: складається з чотирьох частин, подібних усій кривій з коефіцієнтом подібності $1/3$. Крива Коха є кривою нескінченної довжини. Якщо розглянути сніжинку Коха (для її побудови за принципом викладеним вище, необхідно перетворити сторони рівностороннього трикутника), то в цьому випадку буде крива нескінченної довжини, що обмежує скінчену площу, і є самоподібною. На рис. 1.4 наведені три стадії побудови сніжинки Коха.



Рисунок 1.4 – Побудова сніжинки Коха

Загальним для розглянутих прикладів є самоподібність і розбіжність їх топологічної і самоподібної розмірностей.

Топологічна розмірність фрактальних множин і фрактальної геометрії мають таке означення. Топологічною розмірністю $\dim X$ компактної множини X називають найменше ціле число n , таке, що для будь якого $\varepsilon > 0$ існує скінчена сукупність замкнутих множин, що покривають X , діаметр яких не більше ε , причому ніякі $n+2$ з цих множин не мають спільної точки. Іншими словами, множина X має топологічну розмірність n , якщо її можна покрити замкнутими множинами як завгодно малого діаметра, так, щоб жодна з точок X не належала різноманітним $n+2$ множинам, що покривають X , проте були точки, що належать $n+1$ множинам. Відповідно до цього означення, крива Коха і коло мають однакову топологічну розмірність, яка дорівнює 1. Для прикладу значення топологічної розмірності для деяких об'єктів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Топологічна розмірність для деяких об'єктів

Об'єкт	Топологічна розмірність
Відрізок, коло	1
Квадрат	2
Куб	3
Крива Кох	1
Множина Кантора	0
Трикутний килим Серпинського	1
Квадратний килим Серпинського	1

Створення головного інструментарію фрактального аналізу та методології R/S -аналізу відноситься до середини ХХ-го сторіччя та належить гідрологу Херсту. Він дав визначення новій статистичній характеристиці - показнику Херста (H). Виявилось, що цей показник має широке застосування для аналізу часових рядів. І все це завдяки властивій йому стійкості. Він характеризує мінімальні припущення про систему, яка досліджується, і може класифікувати часові ряди. Також завдяки йому можна відрізнити випадковий ряд від тенденційного, навіть за умови, якщо випадковий ряд не є гаусівським (тобто не нормально розподілений). Після своїх спостережень Херст прийшов до висновку, що більшість природних систем не підкоряються гаусівському блуканню. Це означає, що поведінка часових рядів показників таких систем не підкоряється нормальному закону [40, 89, 109]. Бенуа Мандельброт узагальнив метод Херста з метою дослідження часових рядів довільної природи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Авата Х. Модель среднесрочного прогнозирования спроса на электроэнергию / Х. Авата, Ц. Хаттори, Н. Сакураи // Дэнреку кэй дзай кэнкю. – 1985. – № 18. – С. 17–40.
2. Авраменко В. М. Програмні засоби для автоматизації оперативного диспетчерського керування енергосистем / В. М. Авраменко, В. Л. Прихно, П. О. Черненко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – № 3. – С 21–26.
3. Акофф Р. О целеустремленных системах / Р. Акофф, Э. Эмери ; пер. с англ. – М. : Советское радио, 1974. – 272 с.
4. Алимов Ю. И. Альтернативы методу математической статистики. / Ю. И. Алимов. – М. : Знание, 1980. – 64 с.
5. Алиев Р. А. Управление производством при нечеткой исходной информации / Р. А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. А. Мамедова. – М., 1991. – 240 с.
6. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. – М. : Мир, 1976. – 755 с.
7. Афанасьев В. И. Математическая теория конструирования систем управления / В. И. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – М. : Высшая школа, 1998. – 574 с.
8. Безденежных А. Г. Статистическое прогнозирование максимумов загрузки и электропотребления энергетических систем и промышленных предприятий / А. Г. Безденежных, А. М. Тихонов // Электроснабжение и автоматизирование электрически-приводных промышленных предприятий. – 1984. – С. 3–8.
9. Беляев Л. С. Применимость вероятностных методов в энергетических расчетах / Л. С. Беляев, Л. А. Крумм // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт, 1983. – № 2. – С. 3–11.
10. Бэнн Д. В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки / Д. В. Бэнн, Е. Д. Фармер. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
11. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1974. – 474 с.
12. Богданов В. Л. Влияние температуры и освещенности на потребление активной мощности / В. Л. Богданов, В. М. Бордюгов // Электрические станции. – 1983. – № 7. – С. 55–57.
13. Богуславский И. А. Прикладные задачи фильтрации и управления / И. А. Богуславский. – М. : Наука, 1983. – 400 с.
14. Бокс Д. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Д. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир. – Вып. 1. – 1974. – 406 с.

15. Большев Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
16. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория / Д. Бриллинджер ; под ред. А. Н. Колмогорова ; пер. с англ. А. В. Булинского, И. Г. Журбенко. – М. : Мир, 1980. – 536 с.
17. Бурбело М. Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. Й. Бурбело; Вінниц. нац. техн. ун-т. – 2-е вид., перероб. і доповн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 147 с.
18. Бурбело М. Й. Розрахунки в системах електропостачання : навч. посіб. з дисципліни «Електропостачання» для студ. електротехн. спец. / М. Й. Бурбело; Вінниц. держ. техн. ун-т. – Вінниця, 2001. – 140 с.
19. Бурбело М. Й. Алгоритм цифрової обробки інформації системи керування симетрувальним трансформатором / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2006. – № 6. – С. 147–151.
20. Вадзинський Р. Статистические вычисления в среде Excel / Р. Вадзинский. – СПб. : Питер, 2008. – 608 с.
21. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1964. – 576 с.
22. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высшая школа, 2000. – 383 с.
23. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов / В. А. Веников, Г. В. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
24. Вороновский Г. К. Опыт синтеза и использования математических моделей потребления электрической энергии в быту / Г. К. Вороновский, С. А. Сергеев, К. В. Махотило // Техн. Електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електродинаміки». – 2004. – Ч. 1. – С. 33–41.
25. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей / А. И. Галушкин. – М. : ИПРЖР, 2000. – 416 с.
26. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2004. – 479 с.
27. Гордеев В. И. Управление электроуправление и его прогнозирование / В. И. Гордеев, И. Е. Васильев, В. И. Щуцкий. – Ростов-на-Дону : Ростовский университет, 1991. – 104 с.
28. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М. : Мир, 1979. – 304 с.

29. Гросс Дж. Краткосрочное прогнозирование нагрузки / Дж. Гросс, Ф. Д. Гальяна // ТИИЭР. Темат. Вип. «ЭВМ в управлении энергосистемами». – 1987. – Т. 75. – № 12. – С. 6–23.
30. Гурский С. К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в электроэнергетике / С. К. Гурский. – Минск : Наука и техника, 1983. – 271 с.
31. Гурский С. К. Методы теории искусственного интеллекта в задачах оперативного прогнозирования недоступных для измерения режимных параметров / С. К. Гурский, С. В. Домников // Алгоритмы обработки данных в электроэнергетике. – Иркутск : СЭИ. – 1982. – С. 148–158.
32. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 318 с.
33. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2007. – 912 с.
34. Жежеленко И. В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, В. П. Степанов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 123 с.
35. Занг В. Б. Синергетическая кономика. Время и переменны в нелинейной экономической теории / В. Б. Занг ; пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 336 с.
36. Енциклопедія кібернетики / Під ред. В. М. Глушкова. – К. : Головна редакція Української Радянської Енциклопедії. 1973. – Т. 1. – 583 с.; Т. 2. – 573 с.
37. Ефременко Ф. В. Прогнозирование реализации электроэнергии по энергосистеме с использованием метода скользящей авторегрессии / Ф. В. Ефременко, С. С. Савенко, Г. И. Бровун // Изв. Вузов. Энергетика. – 1980. – № 1. – С. 83–88.
38. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – К. : Наукова думка. – 1981. – 296 с.
39. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский. – М. : Радио и связь. – 1987. – 120 с.
40. Кветний Р. Н. Інтерполяція самоподібними множинами : моногр. / Р. Н. Кветний, К. Ю. Кострова, І. В. Богач. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 100 с.
41. Кендалл М. Дж. Временные ряды / М. Дж. Кендалл. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 199 с.
42. Кириленко А. В. Двухуровневый программный комплекс для решения задач оперативного управления электроэнергетическими системами / А. В. Кириленко, В. Л. Прихно, П. А. Черненко // Те-

- хнічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 3. – С. 33–38.
43. Кнут Д. Искусство программирования, Т. 2. Получисленные методы. / Д. Кнут ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2007. – 832 с.
44. Коенда Н. В. Морфометричні методи і моделі оцінки та зменшення нерівномірності навантажень систем електропостачання: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Наталія Володимирівна Коенда ; Вінницький національний технічний ун-т. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 19 с.
45. Коенда Т. І. Моделі та методи управління навантаженням систем електропостачання в умовах нечіткості вихідної інформації: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Тарас Іванович Коенда ; Вінницький національний технічний ун-т. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 19 с.
46. Левитин А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. В. Левитин ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2006. – 576 с.
47. Левин М. С. Методы теории решений в задачах оптимизации систем электроснабжения / М. С. Левин, Т. Б. Лещинская. – М. : ВИ-ПКЭнерго, 1989. – 130 с.
48. Левуш А. И. Методика прогнозирования электропотребления групп точек поставки на оптовом рынке электроэнергии и мощности / А. И. Левуш, Г. М. Поляк // Электрические станции. – 2008. – № 8. – С. 33–40.
49. Лежнюк П. Д. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом: Моногр. / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 108 с.
50. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах : моногр. / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 118 с.
51. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень у складних системах критеріальним методом : моногр. / П. Д. Лежнюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 131 с.
52. Лежнюк П. Д. Визначення і прогнозування екстремальних навантажень електротехнічних комплексів у умовах ризику та невизначеності / П. Д. Лежнюк, Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2011. – № 4. – С. 107–110.
53. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з застосу-

- ванням нейронечіткого моделювання : моногр. / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 136 с.
54. Лисогор В. М. Концептуальна модель управлінських рішень для виробничих процесів гірничих підприємств / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Вісник Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2007. – № 2. – С. 14–19.
55. Лисогор В. М. Математична модель контролю стану гірничого підприємства на основі концепції розпізнавання образів / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2006. – № 3. – С. 36–40.
56. Лисогор В. М. Моделі оцінки якості та надійності електропостачання гірничих підприємств / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2007. – № 1. – С. 52–56.
57. Лисогор В. М. Моделі систем електропостачання гірничих підприємств на основі сучасних географічних інформаційних технологій / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2007. – № 2. – С. 48–52.
58. Лисогор В. М. Математична модель оцінки визначення та прогнозування електричних навантажень гірничих підприємств на основі розпізнавання образів / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2004. – № 2. – С. 148–152.
59. Лисогор В. М. Основні компоненти структурної реалізації автоматизованої системи визначення та прогнозування електричних навантажень гірничих підприємств / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2005. – № 2. – С. 131–134.
60. Лисогор В. М. Байєсівська модель вимірювання та розпізнавання образів стану електричних навантажень промислових підприємств / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки. – Хмельницький. 2004. – № 2. – Ч. 1, Т. 1. – С. 131–134.
61. Лисогор В. М. Теоретичні засади по визначенню і прогнозуванню електричних навантажень промислових підприємств на основі теорії розпізнавання образів / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2005. – № 4. – Ч. 1, Т. 1. – С. 138–142.
62. Лисогор В. М. Моделювання електропостачання гірничих підприємств з використанням геоінформаційних технологій / В. М. Лисогор, Ю. А. Лисогор // Картографія та вища школа : збі-

- рник наукових праць. – К. : Інститут передових технологій, 2006. – Вип. 11. – С. 89–92.
63. Лисогор Ю. А. Оптимізаційні регресійні моделі оцінки визначення та прогнозування електричних навантажень гірничих підприємств: модульний підхід / Ю. А. Лисогор // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2007. – № 1. – С. 141–146.
64. Лисогор Ю. А. Удосконалення прогнозування електричних навантажень (на прикладі гірничих підприємств) / Ю. А. Лисогор // «Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств»: тези наукового семінару. – Луцьк – Шацькі озера. – 2009. – С. 109–112.
65. Люгер Дж. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Люгер ; пер. с англ. – М. : Изд. дом. «Вильямс», 2005. – 864 с.
66. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования / Ю. П. Лукашин. – М. : Статистика, 1979. – 251 с.
67. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М. : Наука, 1991. – 432 с.
68. Мак-Кинси Дж. Введение в теорию игр / Дж. Мак-Кинси ; пер. с англ. – М. : Наука, 1960. – 420 с.
69. Макоклюев Б. И. Информационная структура и программные средства обработки и хранения данных технологического оборудования и режимных параметров / Б. И. Макоклюев, А. В. Антонов, Р. Ф. Набиев // Электрические станции. – 2004. – № 6. – С. 45–52.
70. Макоклюев Б. И. Взаимосвязь точного прогнозирования и неравномерности графиков электропотребления / Б. И. Макоклюев, В. Ф. Еч // Электрические станции. – 2005. – № 5. – С. 49–54.
71. Манькина Л. А. Принципы формирования и прогнозирования суточных графиков по продолжительности загрузки энергосистемы с использованием статистических методов временных рядов / Л. А. Манькина // Изв. вузов. Энергетика. – 1985. – № 1. – С. 22–26.
72. Математика в понятиях, определениях и терминах / Под ред. Л. В. Сабина. – М. : Просвещение, 1978. – Ч. 1. – 319 с.; 1982. – Ч. 2. – 351 с.
73. Методики і програмні засоби для забезпечення автоматичного та диспетчерського керування електроенергетичними системами / [В. М. Авраменко, В. О. Крилов, В. Л. Прихно, П. О. Черненко] // ПР. Ін-ту електродинаміки НАНУ: ЗБ. Наук. пр.– 2010.– Вип. 26. – С. 31–38.

74. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 744 с.
75. Методы классической и современной теории автоматического управления : В 3-х томах. Т. 3. : Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 748 с.
76. Методы решения задач реального времени в электроэнергетике / [А. З. Гамм, Ю. Н. Кучеров и др.]. – Новосибирск : Наука, 1990. – 294 с.
77. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М. : Наука, 1971. – 576 с.
78. Мітюшкін Ю. І. Soft Computing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань : моногр. / Ю. І. Мітюшкін, Б. І. Мокін, О. П. Ротштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.
79. Моделювання електроенергетичних систем і нові програмні засоби для планування режимів та оперативного керування енергосистемами / [В. М. Авраменко, В. О. Крилов, В. Л. Прихно, П. О. Черненко] // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ : зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 23. – С. 27–32.
80. Мокін Б. І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів : навч. посіб. / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 300 с.
81. Мур Дж. Экономическое моделирование в Microsoft Excel / Дж. Мур, Л. Р. Уэдерфорд ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2004. – 1024 с.
82. Муромцев Д. Ю. Энергосберегающее управление сложными объектами / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин // Промышленные АСУ и контролеры, 2005. – № 11. – С. 145–162.
83. Надтока И. И. Адаптивные модели прогнозирования нестационарных временных рядов электропотребления / И. И. Надтока, А. В. Седов // Изв. вузов. Электромеханика, 1994. – № 1–2. – С. 57–64.
84. Нейросетевая модель связанного потребления тепловой и электрической энергии крупным жилым массивом города / [Г. К. Вороновский, В. Б. Клепиков, М. В. Коваленко, К. В. Махотило] // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – № 113. – С. 363–366.
85. Ноздренков В. С. Прогнозирование электрических нагрузок промышленных предприятий / В. С. Ноздренков, А. Ю. Хатунцев, И. В. Мошенский // «Вісник СумДУ. Серія Технічні науки», 2009. – № 2. – С. 135–139.

86. Оценивание состояния в электроэнергетике / [А. З. Гамм, Л. Н. Герасимов, Н. Н. Голуб и др.]. – М. : Наука, 1983. – 300 с.
87. Орнов В. Г. Задачи оперативного и автоматического управления энергосистемами / В. Г. Орнов, М. А. Рабинович. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
88. Передбачення режимів навантаження електроенергетичних систем на основі технологій штучних нейронних мереж / [А. В. Данилюк, А. Ю. Майоров, Н. Б. Батюк, М. І. Михайляк] // Інформаційні технології і системи. – 2001. – Т. 4. – № 1. – С. 100–103.
89. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков: применение теории хаоса в инвестициях и экономике / Э. Петерс. – М. : Интернет-трейдинг, 2004. – 304 с.
90. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка / Э. Петерс. – М. : Мир, 2000. – 334 с.
91. Подорожнюк А. А. Нейросетевые технологии в прогнозировании телекоммуникационного трафика / А. А. Подорожнюк // Системи обробки інформації, 2007, Вип. 4 (62). Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – С. 91–96.
92. Праховник А. В. Прогнозування електричних навантажень нейронних мереж / А. В. Праховник, В. А. Попов, Д. М. Федосенко // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Ч. 4. – С. 24–27.
93. Прикладные нечеткие системы / [К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.]. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
94. Проблеми моделювання та керування режимами електроенергетичних систем / [В. М. Авраменко, В. О. Крилов, В. Л. Прихно, П. О. Черненко] // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 3. – С. 64–71.
95. Прогнозирование электропотребления в энергосистеме с учетом температуры воздуха и освещенности / [А. В. Демура, И. И. Надтока, А. В. Седов и др.] // Электрика. – 2005. – № 3. – С. 18–24.
96. Развитие методов и программных средств моделирования сложных ЭЭС для задач АСДУ энергосистем / [В. Н. Авраменко, В. А. Крылов, В. Н. Прихно, П. А. Черненко] // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 7. – С. 54–69.
97. Разумный Ю. Т. Классификация графиков электрической нагрузки по группам электроприемников угольной шахты / Ю. Т. Разумный, А. В. Рухлов // Науковий вісник НГУ, 2009. – № 12. – С. 63–65.

98. Рогальський Б. С. Методи визначення і прогнозування електричних навантажень промислових підприємств : моногр. / Б. С. Рогальський. – Вінниця : ВДТУ, 1996. – 95 с.
99. Рогальський Б. С. Проблеми енергозбереження. Нормування і прогноз електроспоживання (на прикладі гірничих підприємств) : навч. посіб. / Б. С. Рогальський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1996. – 150 с.
100. Рогальський Б. С. удосконалення методів прогнозування електричних навантажень промислових підприємств на основі розпізнавання образів / Б. С. Рогальський, Ю. А. Лисогор // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2005. – № 2. – С. 56–68.
101. Рогальський Б. С. Моделі параметричної оцінки та прогнозування електричних навантажень гірничих підприємств: модульний підхід / Б. С. Рогальський, Ю. А. Лисогор // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2005. – № 3. – С. 58–66.
102. Рогальський Б. С. Моделі багатокритеріальної оцінки визначення та прогнозування електричних навантажень гірничих підприємств: модульний підхід / Б. С. Рогальський, Ю. А. Лисогор // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2005. – № 6. – С. 101–109.
103. Седов А. А. Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства / А. В. Седов, И. И. Надтока. – Ростов н/Д. : Изд. РГУ, 2002. – 320 с.
104. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. Эйкоффа – М. : Мир, 1983. – 400 с.
105. Тимченко В. Ф. Колебание нагрузки и обменной мощности энергосистем / В. Ф. Тимченко. – М. : Энергия, 1975. – 208 с.
106. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес ; пер. с англ. – М. : Мир, 1978. – 412 с.
107. Тутубалин В. Н. Теория вероятностей и случайных процес сов : учеб. пособ. / В. Н. Тутубалин. – М. : Изд. МГУ, 1992. – 400 с.
108. Уолленберг Б. Ф. Искусственный интеллект в управлении энергосистемами / Б. Ф. Уолленберг, Т. Сакагути // ТИИЭР. – Т. 75. – № 12. – 1987. – С. 150–158.
109. Федер Е. Фракталы / Е. Федер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
110. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий : учебник / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М. : Энергия, 1979. – 408 с.
111. Федоров А. А. Электроснабжения промышленных предприятий : учебник / А. А. Федоров, Э. М. Ристхейн. – М. : Энергия, 1981. – 360 с.

112. Фор А. Восприятие и распознавание образов / А. Фор ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1989. – 272 с.
113. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии / [Н. Н. Титов, М. С. Доценко, С. И. Доценко и др.] // Праці ІЕД НАНУ – К., 2009. – Спец. випуск. – С. 41–48.
114. Хайкин С. Нейронные сети / С. Хайкин. – М. : Изд. Дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
115. Ханк Д. Э. Бизнес-прогнозирование / Д. Э. Ханк, Д. У. Уичерн, А. Дж. Райтс ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 656 с.
116. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1984. – 320 с.
117. Черненко П. А. Прогнозирование электрических нагрузок с учетом регулирования электропотребления / П. А. Черненко // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. – 2004. – № 2(8). – С. 149–150.
118. Черненко П. А. Обработка и анализ информации для иерархического прогнозирования электрических нагрузок / П. А. Черненко, А. В. Мартынюк, А. И. Заславский // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. – Вип. 2(14). – С 47–49.
119. Черненко П. А. Прогнозирование суммарной электрических загрузки электроэнергетической системы в экстремальных точках суточного графика / П. А. Черненко, А. В. Мартынюк, П. А. Черненко // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2007. – № 596. – С. 95–101.
120. Черненко П. О. Середньострокове дворівневе прогнозування електричного споживання енергооб'єднання / П. А. Черненко, О. В. Мартинюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 77–81. – ISSN 1997-9266.
121. Черненко П. О. Ідентифікація параметрів математичної моделі для короткострокового прогнозування електричного навантаження енергооб'єднання / П. О. Черненко // Науковий вісник Академії муніципального управління, серія «Техніка». – 2010. – Вип. 1. – С. 168–179.
122. Чураков Е. П. Оптимальные и адаптивные системы / Е. П. Чураков. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 255 с.
123. Шидловский А. К. Введение в статистическую динамику систем энергоснабжения / А. К. Шидловский, Э. Г. Куренный. – К. : Наукова думка, 1984. – 273 с.
124. Шиян А. А. Метод оцінювання та ідентифікації характеристик і високо амплітудних відхилень електричних навантажень електротехнічних комплексів / А. А. Шиян, Ю. А. Шулле // Вісник Хме-

- льницького національного університету. Технічні науки, 2010. – № 1. – С. 215–217.
125. Шиян А. А. Сценарії оптимізації та прогнозування управління електричними навантаженнями електротехнічних комплексів / А. А. Шиян, Ю. А. Шулле // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2010. – № 2. – С. 122–124.
126. Шулле Ю. А. Розробка нової модульної нейронної моделі навчання з визначення і прогнозування електричних навантажень електротехнологічних комплексів. / Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010. – № 3. – С. 81–84.
127. Шулле Ю. А. Методи формування бази даних/знань щодо сценаріїв оптимізації та прогнозування управління електричними навантаженнями електротехнічних комплексів / Ю. А. Шулле // VI міжнародна науково-практична конференція «Стратегічні питання світової науки – 2010». – Перемешиль. – 2010. – 104 с.
128. Шулле Ю. А. Прогнозування електричних навантажень з використанням r/s-аналізу часових рядів / Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – С. 53–56.
129. Шулле Ю. А. Прогнозування навантажень електротехнічних комплексів з використанням фрактального аналізу часових рядів / Ю. А. Шулле // VII міжнародна науково-практична конференція «Передові наукові розробки – 2011». – Прага. – 2011. – С. 16–21.
130. Шулле Ю. А. Прогнозування електричних навантажень з використанням r/s-аналізу часових рядів / Ю. А. Шулле // I міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ 2011)». – Вінниця. – 2011. – С.91.
131. Шулле Ю. А. Прогнозування електричних навантажень промислових підприємств з врахуванням фрактальних властивостей часового ряду спостережень/ Ю. А. Шулле // XI Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». – Вінниця. – 2012. – С. 178–179.
132. Sheinkman J. Non-linear dynamics and stock returns / Sheinkman J., LeBaron B. // Journal of Business. – 1989. – Vol. 62. – P. 311–327.

Наукове видання

**Лежнюк Петро Дем'янович
Шулле Юлія Андріївна**

**ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З ВРАХУВАННЯМ
ЇХ ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено Ю. Шулле

Підписано до друку 30.06.2015 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,01
Наклад 300 (1-й запуск 1–100) пр. Зам № В2015-26

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.