

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

ШУЛЛЕ ЮЛІЯ АНДРІЇВНА

УДК 621:311.16:001.18

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

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Вінницькому національному технічному університеті, Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет, завідувач
кафедри електричних станцій та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Саснко Юрій Леонідович,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м.
Маріуполь,
професор кафедри електрифікації промислових підприємств;

кандидат технічних наук, доцент
Федорів Михайло Йосипович,
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу,
доцент кафедри електропостачання і електрообладнання
промислових підприємств.

Захист відбудеться «05» ____ 04 ____ 2013 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «04» ____ 03 ____ 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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. Більш того: саме внаслідок відсутності координації між окремими споживачами можуть виникати великі відхилення в електроспоживанні, амплітуда яких може перевищувати критичні для електропостачальника значення. Це може привести 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 різнотипного 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 зустрічаються 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 іншої сторони розглянути процес прогнозування електроспоживання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Спочатку дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Вінницького національного технічного університету (ВНТУ) під керівництвом д.т.н., проф. Рогальського Б. С. за держбюджетною темою «Розробка методології (методів, моделей і методик) системного і комплексного вирішення проблеми компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній» (номер державної реєстрації 0105U002427). Потім дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри електричних станцій та систем ВНТУ під керівництвом д.т.н., проф. Лежнюка П. Д. за держбюджетною темою «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізація їх живлення» (номер державної реєстрації 0110U002161) у відповідності до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні. Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

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

Відповідно до поставленої мети, необхідно розв'язати такі основні задачі:

–провести огляд відомих методів прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання;

–проаналізувати методи визначення фрактальності ряду і виявити фрактальні властивості графіків електричних навантажень;

–розробити підхід для прогнозування електричного навантаження в реальному масштабі часу з врахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережових технологіях;

–розробити класифікацію сценаріїв поведінки електричних навантажень систем електроспоживання, що дозволяє здійснювати прогнозування добових електричних навантажень;

–розробити єдину інформаційну базу, алгоритм та програмно-апаратний комплекс для автоматизації процесу прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання.

Об'єктом дослідження є процес споживання електричної енергії.

Предметом дослідження є методи прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань в дисертаційній роботі використано такі методи: для дослідження графіків навантажень – елементи математичної статистики та фрактального аналізу; для прогнозування електричних навантажень – методи теорії нейронних мереж і моделі авторегресії та ковзного середнього; для класифікації сценаріїв поведінки електричних навантажень систем електроспоживання – сценарні підходи; для розробки інформаційної бази, алгоритмів та програмно-апаратного комплексу – імітаційне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше виявлено фрактальні властивості графіків електричних навантажень та наявність короткотермінової і довготермінової їх пам'яті, що дозволяє використовувати фрактальний аналіз для математичного моделювання та прогнозування залежності майбутніх значень графіків навантажень від їх минулих змін чи «початкових умов».

2. Вперше розроблено метод для оперативного прогнозування електричного навантаження в реальному масштабі часу з врахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережових технологіях і дозволяє підвищити точність прогнозування в порівнянні з існуючими методами.

3. Вдосконалено математичну модель для опису характеристик графіків навантажень, як випадкового процесу, та запропоновано класифікацію сценаріїв поведінки електричних навантажень систем електроспоживання, які базуються на виділенні стохастичної складової із динамічного ряду електроспоживання, що дозволяє здійснювати оперативне прогнозування електричних навантажень.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено алгоритм для оперативного прогнозування електричних навантажень промислових підприємств з врахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережових технологіях, який дозволяє виявити критичні режими електроспоживання та знизити рівень ризику аварійних вимкнень. Розроблено програмно-апаратний комплекс для автоматизації процесу оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання, що дозволяє підвищити точність та швидкодію.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в ТОВ «Вінницький комбінат хлібопродуктів №2» у вигляді методу та програмно-апаратного комплексу для автоматизації процесу оперативного прогнозування електричного навантаження з врахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережових технологіях. Це підвищує ефективність керування електроспоживанням (акт від 03.09.2012 р.). Результати теоретичних та

експериментальних досліджень використано у навчальному процесі кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ для підготовки фахівців за спеціальностями 7.05070103 – «Електротехнічні системи електроспоживання» та 7.05070108 – «Енергетичний менеджмент» в курсах дисциплін «Енергозбереження», «Енергетичний менеджмент», «Прогнозування та планування енерговикористання» (акт від 04.09.2012 р.).

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: у [3] – запропоновано для опису характеристик електричних навантажень електротехнічних комплексів використати кортеж, що складається із характеристик, як самого випадкового процесу, так і статистичних характеристик його відхилень від середнього значення, а також показано, що такий процес може бути охарактеризовано показником Херста; у [4] – запропоновано алгоритм ідентифікації сценаріїв поведінки електричних навантажень окремих електротехнічних комплексів (окремих підприємств), агрегації декількох сценаріїв в єдину модель прогнозування поведінки та оптимізації керування електричних навантажень електротехнічних комплексів; у [5] – запропоновано математичну модель визначення та прогнозування екстремальних навантажень електротехнічних комплексів в умовах ризику та невизначеності з використанням методу Д. Е. Кнута та фрактальних множин.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на: міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікації та приладобудування» (Вінниця, 2005); на міжнародних науково-технічних конференціях «Контроль і управління в складних системах» (Вінниця, 2005, 2012); на міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікації та приладобудування» (Вінниця, 2006); на міжнародній науково-технічній конференції «Автоматика – 2006» (Вінниця, 2006); на всеукраїнському науковому семінарі «Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств» (Луцьк, 2009); на міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні питання світової науки – 2010» (Перемишль, 2010); на міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (Луцьк, 2010); на міжнародній науково-практичній конференції «Передові наукові розробки» (Прага, 2011); на міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (Вінниця, 2011); на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в період 2005 – 2012 рр.

Публікації. Основні положення дисертації відображені в 10 друкованих працях, в тому числі в 5 статтях у фахових виданнях та 5 тезах науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації 165 сторінок, з яких основна частина складає 130. Дисертація містить 68 рисунків, 3 таблиці, 2 додатки, список використаних джерел із 165 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі досліджень. Приведено характеристику наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, а також описано їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** розглянуті сучасні методи прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання, які мають свої особливості ефективного функціонування. Під системою електроспоживання розуміється сукупність взаємопов'язаних електротехнічних комплексів, окремі електротехнічні комплекси, електроприймачі промислових підприємств, що характеризуються узагальненими параметрами електричного навантаження. Показано, що

оперативне прогнозування електричних навантажень є одною з найбільш важливих складових в процесі прийняття рішень в задачах контролю і керування електроспоживанням. Фактично кожне важливе оптимальне рішення значною мірою залежить від якості оперативного визначення і точності прогнозних параметрів.

Особливості аналізу сучасних методів прогнозування навантажень систем електроспоживання продиктовані необхідністю вирішення наукових, науково-практичних, техніко-економічних задач. Показано необхідність коректного використання класичного математичного апарата часових рядів з адаптуванням його до можливості використання результатів нових інформаційних технологій, а також використання штучних нейронних мереж. Розглянуті методи інтуїтивного прогнозування можуть бути достатньо корисними завдяки своїй простоті у використанні. Розглянутий метод ковзного середнього дозволяє враховувати зсуви в структурі даних. Цей метод економічний у використанні і не чутливий до обсягів баз вхідних даних. Методи ковзного середнього часто використовуються за необхідності повторного прогнозування. Методи експоненціального згладжування використовуються за необхідності використання короткотермінової точності і можливості швидкого коригування. Методика експоненціального згладжування виявилась корисною в оперативному прогнозуванні.

Дано пояснення відносно напрацювань фрактальних множин і фрактальної геометрії, які сьогодні використовуються у різних напрямках науки і практики, а в галузі прогнозування електричних навантажень наукові результати фрактальних множин використовуються вперше.

У **другому розділі** показано можливість застосування законів фрактальних множин і фрактальної геометрії для графіків електричних навантажень. Показано, що для вивчення таких процесів, як споживання електроенергії, може бути використаний базовий інструмент фрактального аналізу часових рядів – R/S -аналіз (рис. 1). Він дозволяє виявити і чисельно оцінити фундаментальні характеристики часових рядів: наявність довготермінової пам'яті, її глибину, трендостійкість, хаотичність або стохастичність аналізованого процесу. Встановлено придатність R/S -аналізу для прогнозування електричних навантажень. Доведено, що графіки електричних навантажень мають фрактальну структуру, або є самоподібними. Показник Херста може бути перетворений у фрактальну розмірність. Фрактальна розмірність, є показником складності графіка навантаження. Аналізуючи чергування ділянок з різною фрактальною розмірністю і те, як на систему електроспоживання впливають зовнішні і внутрішні фактори, можна навчитися передбачати поведінку системи і що найголовніше, діагностувати і передбачати нестабільні стани. Суттєвим моментом запропонованого підходу є наявність критичного значення показника Херста чи фрактальної розмірності графіка навантаження, за наближення до якого система втрачає стійкість та переходить у нестабільний стан і параметри швидко або зростають, або зменшуються, в залежності від тенденції, що має місце в даний час.

Основні властивості, які мають бути притаманні графікам електричних навантажень (ГЕН), за умови їх фрактальності:

- графіки навантажень мають фрактальну розмірність ($1 < D < 2$);
- графіки навантажень мають властивість масштабної інваріантності (різні часові інтервали самоподібні);
- графіки навантажень завжди утворюють певну структуру, яка має унікальні властивості;
- графіки навантажень, як фрактали, «зберігають пам'ять» про свої початкові умови.

У класичному вигляді показник Херста може бути отриманий із співвідношення:

$$R / S = (a \cdot N)^H, \quad (1)$$

де R – максимальний розмах навантаження; S – середньоквадратичне відхилення; N – час досліджень (або об'єм вибірки), a – деяка постійна; H – показник Херста.

Показник Херста може бути перетворений в фрактальну розмірність за допомогою наступної формули:

$$D = 2 - H. \quad (2)$$

Вплив теперішнього на майбутнє для ГЕН може бути виражений кореляційним співвідношенням:

$$C = 2^{2H-1}, \quad (3)$$

де C – міра кореляції, H – показник Херста.

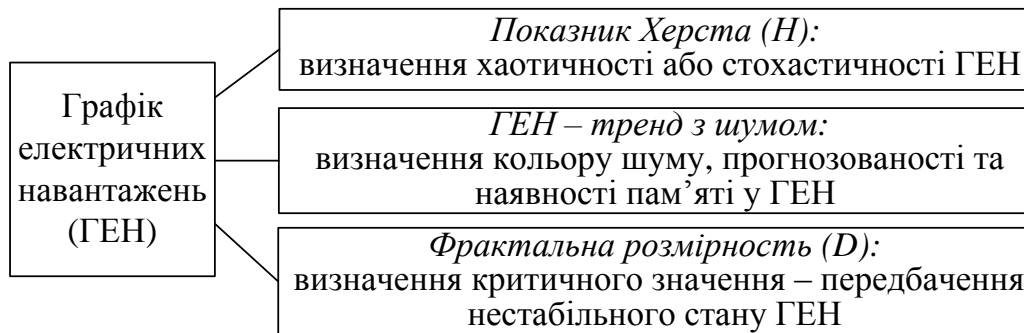


Рисунок 1 – Характеристики фрактальності у ГЕН

Фрактальний аналіз часових рядів споживання електроенергії показав наявність короткотермінової і довготермінової пам'яті даних стохастичних процесів. Розглянувши графік споживання електроенергії ТОВ «Вінницький комбінат хлібопродуктів №2» за період з 08.2007 р. по 01.2012 р., що містить 1650 спостережень, можна це простежити: довготермінова залежність з показником Херста $H = 0,83$. Однак дуже високий показник Херста може пояснюватися наявністю короткотермінової залежності. Для її усунення необхідно знайти лінійну залежність між значеннями ряду в точках n і відповідними значеннями в точках $n-1$. Аналіз ряду $D(-7)$ показав наявність авторегресійної залежності з коефіцієнтом авторегресії 0,79. Показник Херста для ряду $D(-7)$ з вилученою авторегресією знизився до значення $H = 0,57$, що близьке до значення, отриманого раніше для ряду $D(-1)$. Отже, аналіз часового ряду добового споживання електроенергії промисловим підприємством показав наявність довготермінової залежності з показником Херста $H = 0,57$. Часовий інтервал, на якому простежується довготермінова залежність, лежить у діапазоні від тижня до року. Тоді, для математичного моделювання і прогнозування споживання електроенергії промислових підприємств необхідно використовувати стохастичні процеси, яким притаманна як довготермінова, так і короткотермінова залежність. Це можуть бути фрактальні моделі авторегресії і ковзного середнього. Також для часових рядів, що містять трендову і періодичну компоненти ГЕН, необхідно застосовувати не тільки процедуру взяття першої різниці, але й різниці з лагом, що дорівнює періоду і після цього вилучити авторегресійну складову.

Також проведено оцінювання графіка півгодинного навантаження на прикладі ТОВ «Вінницький комбінат хлібопродуктів №2» (рис. 2) та на його основі виконано обґрунтування оцінки H для графіків електричних навантажень.

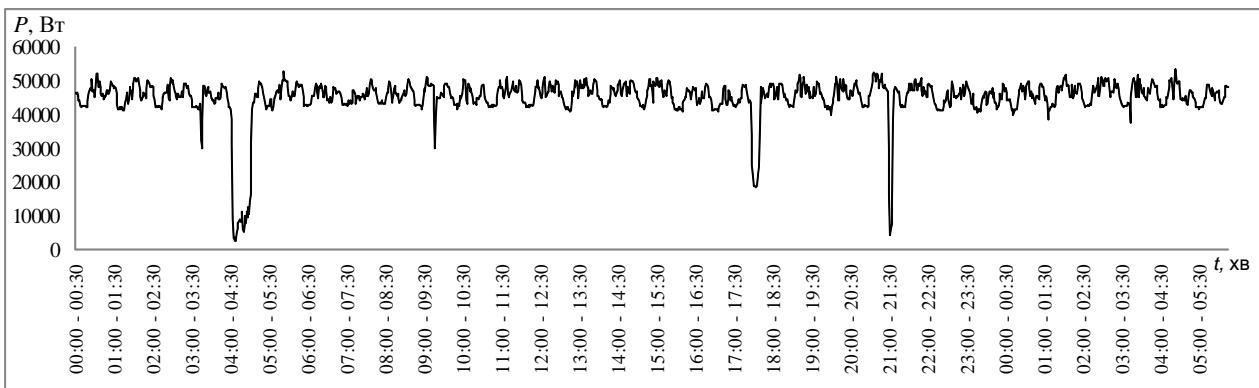


Рисунок 2 – Графік півгодинного навантаження промислового підприємства

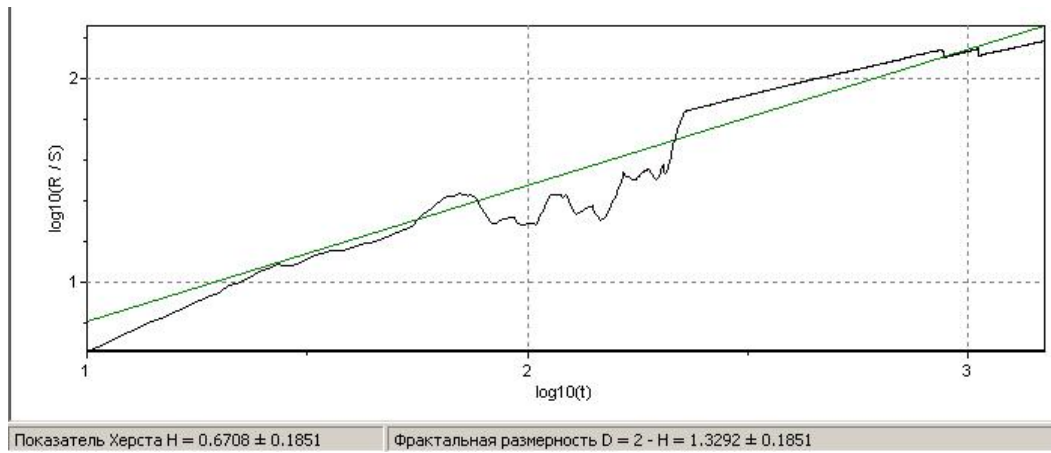


Рисунок 3 – R/S -залежність для ряду півгодинного навантаження промислового підприємства

Розраховані за даними ряду півгодинного навантаження промислового підприємства значення коефіцієнта Херста (рис. 3, рис. 4) свідчать про фрактальну структуру, оскільки можна простежити наявність тренду ($H=0,6708$), тому можна зробити висновок, що ряд є трендостійким.

Випадок $H > 0,67 - 1,0$ відповідає «чорному шуму»; чим більше H , тим більша трендостійкість відрізка часового ряду. За значень H , які помітно перевершують 0,5, розглянутий часовий ряд є персистентним, або трендостійким. Тобто якщо ряд зростає або спадає протягом деякого періоду, то досить імовірно, що він збереже цю тенденцію якийсь час у майбутньому.

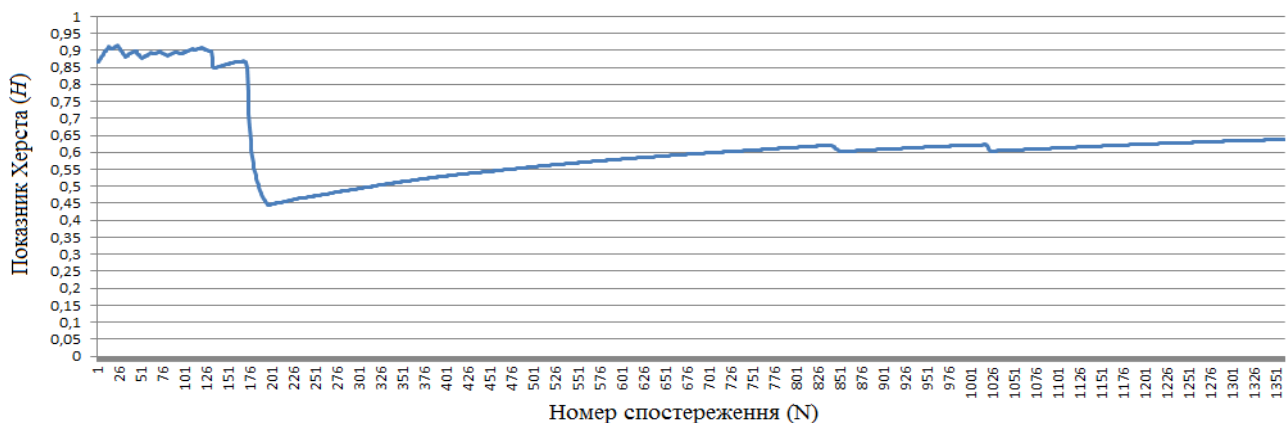


Рисунок 4 – Значення показника Херста для ряду півгодинного навантаження промислового підприємства

Можна перевірити обґрунтованість результатів шляхом випадкового перемішування даних, внаслідок чого порядок спостережень стане повністю відмінним від початкового ряду. З огляду на те, що спостереження залишаються тими ж, їх частотний розподіл також залишиться незмінним. Далі необхідно обчислити показник Херста цих перемішаних даних. Якщо ряд дійсно є незалежним, то показник Херста не зміниться, оскільки був відсутній ефект довготермінової пам'яті, тобто кореляції між спостереженнями. В цьому випадку перемішування даних не впливає на якісні характеристики даних.

Якщо мав місце ефект довготермінової пам'яті, то порядок даних є важливим. Перемішані дані руйнують структуру системи. Значення H при цьому виявиться значно нижчим і наблизатиметься до 0,5, навіть якщо частотний розподіл спостережень не зміниться. Це перевірено на підставі експериментальних даних (рис. 2). На рис. 5 зображено графік вхідних даних, які були перемішані. На рис. 6 зображено ряд із знайденим коефіцієнтом Херста після перемішування.

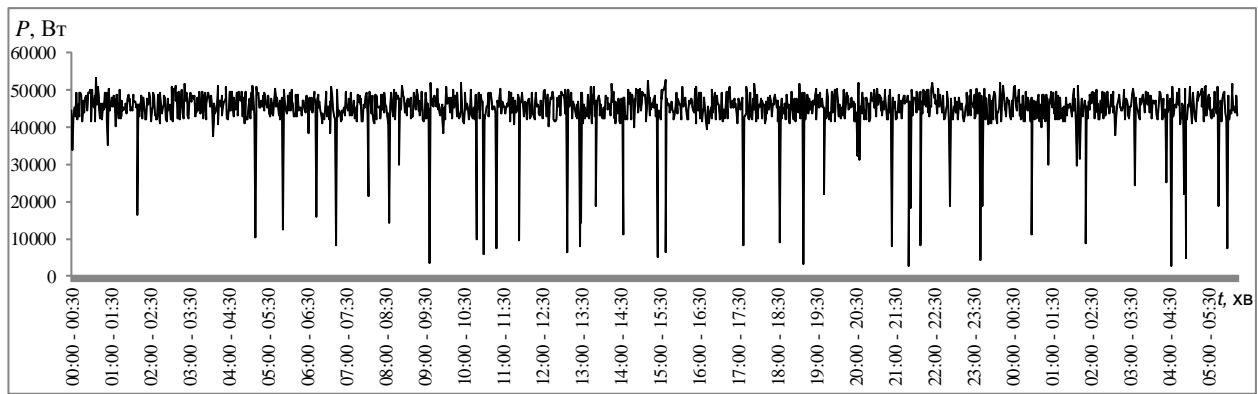


Рисунок 5 – Графік початкових даних, що були перемішані

Початковий ряд дав результативну оцінку $H = 0,67$, перемішаний – $H = 0,52$. Такий спад величини H свідчить про те, що за рахунок перемішування була зруйнована структура процесу. Перемішаний ряд залишився не нормально розподіленим, але процес перемішування зробив дані незалежними та зруйнував пам'ять ряду.

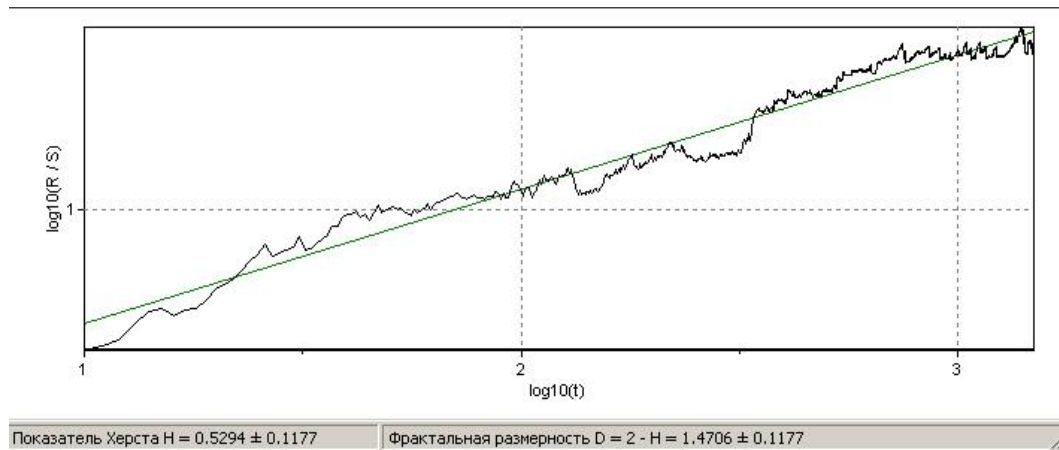


Рисунок 6 – R/S -залежність для перемішаного ряду півгодинного навантаження промислового підприємства із знайденим коефіцієнтом Херста

Розглянуто методику перевірки параметричних гіпотез прогнозування електричних навантажень на основі методу Д. Кнута. Для малих статистичних вибірок отримано новий результат, порівняно з відомими, який полягає в тому, що замість двоальтернативної гіпотези: прийняти H_0 , відхилити H_0 , будемо оперувати чотирма гіпотезами: прийняти H_0 , злегка підозріло, підозріло, відхилити H_0 . Отриманий результат вплине на точність та якість прийнятих рішень під час розроблення моделі оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання.

Розглянуті аспекти методу та методологія прогнозування електричних навантажень з використанням сучасного підходу Бокса-Дженкінса відрізняються від більшості методів, оскільки не передбачають будь-якої особливої структури в даних часових рядів, для яких виконується прогноз. Тут використовується покроково-адаптивний підхід визначення відповідної моделі серед загального класу моделей.

У **третьому розділі** запропоновано систему оперативного прогнозування, в рамках якої можна було б реалізувати фрактальні властивості ГЕН. Основні кроки алгоритму оцінювання та оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання можна описати наступним чином (рис. 7): початком роботи алгоритму є формування бази даних в системі керування базами даних (СКБД) АСКОЕ та зчитування вхідних даних (дані представлені у вигляді часового ряду) з неї для першого етапу аналізу. Таким етапом є розрахунок показника Херста для даних АСКОЕ.

На підставі аналізу показника Херста можна зробити висновок про наявність

персистентності для досліджуваного проміжку часового ряду ГЕН. У випадку наявності персистентності дана інформація записується у відповідну базу даних СКБД АСКОЕ. У випадку, коли часовий ряд ГЕН не можна класифікувати як персистентний (антиперсистентний), то досліджувані дані передаються в наступний блок для прогнозування на основі нейронних мереж. Після оброблення даних, результат прогнозування також записується у відповідну базу даних СКБД АСКОЕ.

Принцип дії програмно-апаратного комплексу оперативного прогнозування електричних навантажень можна описати наступною послідовністю дій (рис. 8):

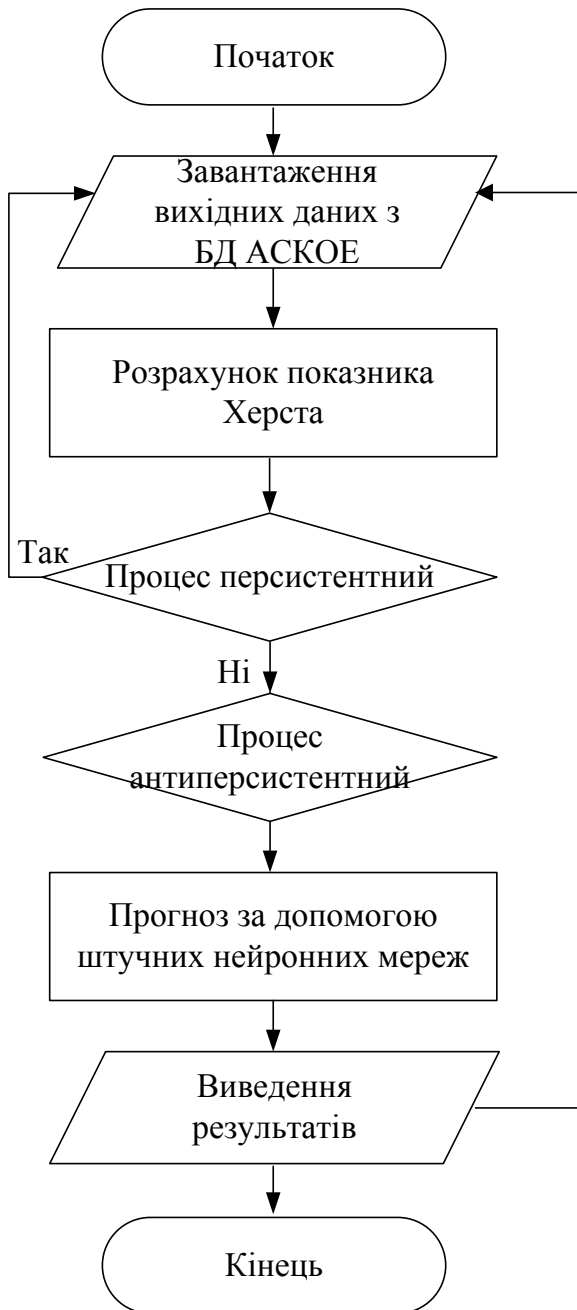


Рисунок 7 – Алгоритм оцінювання та оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання

1. Накопичення даних спостережень АСКОЕ в системі управління базами даних (СКБД).

2. Зчитування вищевказаних даних програмним комплексом фрактального аналізу з наступним обчисленням показника Херста.

2.1. Першим кроком у реалізації фрактального аналізу є представлення вхідних даних АСКОЕ та виконання операції різниці лагу (наприклад, $D-1$, $D-7$) для вилучення періодичних залежностей.

2.2. Виконується розрахунок показника Херста для отриманих на кроці 2.1 даних та візуалізації отриманих результатів у вигляді графіка залежності нормованого розмаху від кількості спостережень $\log(R/S)=f(\log N)$ у подвійному логарифмічному масштабі.

2.3. Виконується оцінювання отриманих значень показника Херста та у базу даних записується значення параметра наявності персистентності та трендостійкості досліджуваного ряду.

2.4. За наявності трендостійкості досліджуваних даних ГЕН результати аналізу та розрахунків передаються в систему прийняття рішень.

3. За відсутності трендостійкості досліджуваних даних ГЕН, оброблені на кроці 2.1 дані передаються в програмний комплекс прогнозування на основі *Statistica Neural Networks*;

3.1. Першим кроком аналізу та прогнозування є вибір моделі і архітектури нейронної мережі з найкращою продуктивністю;

3.2. Після вибору нейронної мережі відбувається її навчання;

3.3. Після навчання мережі виводяться прогнозні дані на обраний користувачем період та відбувається візуалізація таких допоміжних результатів,

як діаграма розсіювання похибок прогнозування, гістограма частот залишків всіх моделей досліджуваних нейронних мереж, діаграма розсіювання прогнозних значень.

3.4. Результат прогнозування передається в систему прийняття рішень.

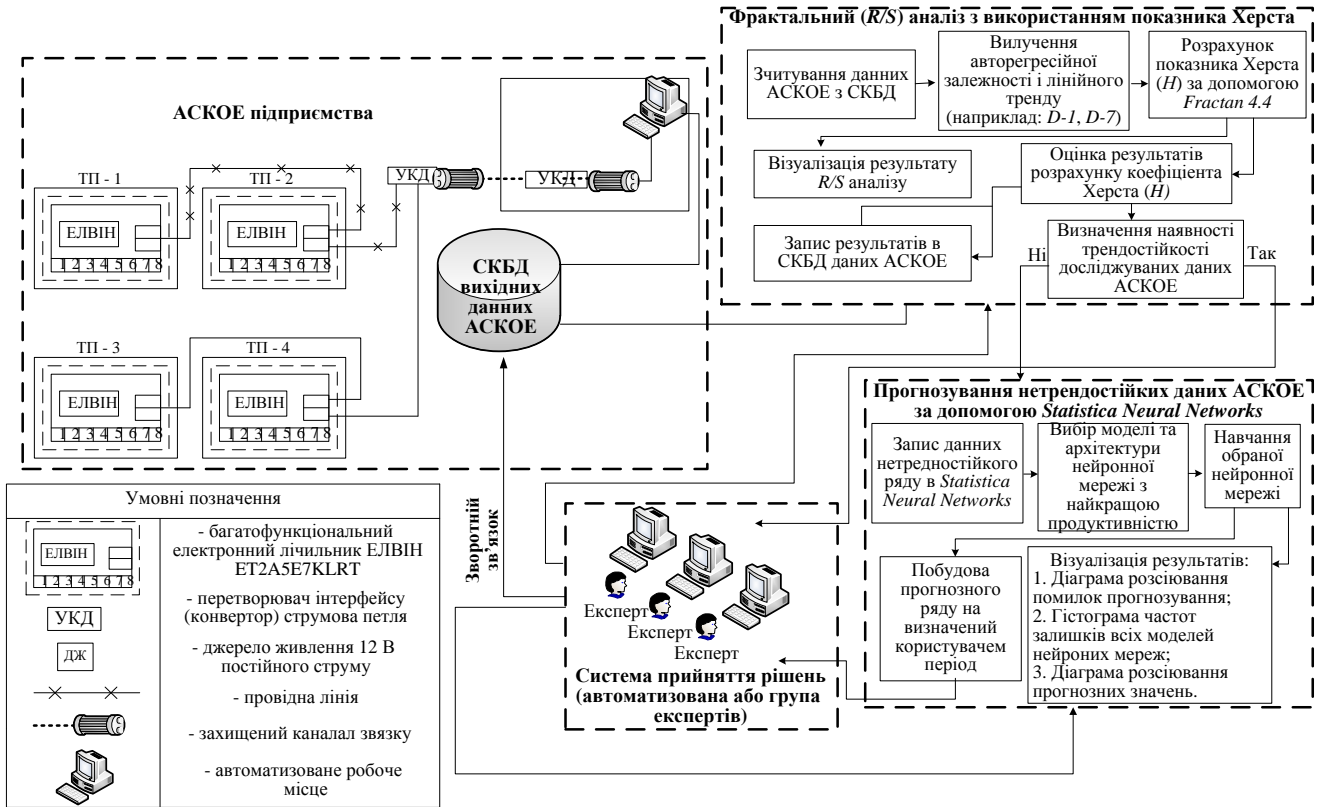


Рисунок 8 – Програмно-апаратний комплекс оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання

Для системи прийняття рішень забезпечено зворотний зв'язок з усіма задіяними програмними комплексами задля можливості ручного керування та тонкого налагодження на будь-якому з етапів прогнозування.

Описано також спосіб класифікації сценаріїв електроспоживання у вигляді алгоритму.

Етап 1. Вибираємо сукупність параметрів, які будемо використовувати як класифікаційні ознаки при класифікації сценаріїв електричного навантаження окремого підприємства. Об'єктом, який потрібно аналізувати, виступає часовий ряд (тобто сукупність величини електричного навантаження даного підприємства в певні моменти часу). Цей ряд є стохастичним, бо величина електричного навантаження залежить від великої кількості випадкових параметрів.

Етап 2. Стохастичний часовий ряд ГЕН може характеризуватися різним набором числових характеристик. В загальному випадку він може бути охарактеризований таким кортежем:

$$K_{\tau} = \{P_{\tau}, P_{\max \tau}, P_{\min \tau}, \Delta_{\tau}, X(t, \tau), R(\tau)\}, \quad (4)$$

або з врахуванням фрактальних властивостей ГЕН:

$$K_{\tau} = \{F(P), K_p(\tau), P_{\tau}, P_{\max \tau}, P_{\min \tau}, \Delta_{\tau}, \sigma, H, D\}, \quad (5)$$

де P – значення електричного навантаження в момент часу τ ; τ – час спостережень; $F(P)$ – відповідна щільність ймовірності (розподіл ймовірності);

$K_p(\tau)$ – автокореляційна функція для даного часового ряду; P_{τ} – середнє значення електричного навантаження; $P_{\max \tau}$, $P_{\min \tau}$ – відповідно, максимальне та мінімальне значення електричного навантаження; σ – дисперсія; $X(t, \tau)$ – накопичене відхилення електричних навантажень системи електроспоживання; $R(\tau)$ – розмах відхилень, що дорівнює величині резервної потужності, яка необхідна для підтримання середнього електричного навантаження для заданої системи електроспоживання протягом часу τ ; H – показник Херста; D – фрактальна розмірність для даного числового ряду.

Величина Δ_τ є розмахом коливань електричного навантаження і обчислюється за формулою:

$$\Delta_\tau = P_{\max \tau} - P_{\min \tau}. \quad (6)$$

Етап 3. Класифікаційними ознаками для кортежу (5) можуть виступати такі характеристики.

1. Параметри розподілу $F(P)$. Якщо відомо до якого класу належить ця функція (наприклад, коли є відповідні теоретичні моделі), то можна розв'язувати задачу ідентифікації параметрів, і, відповідно, будувати класифікацію, спираючись на відомі їх числові значення. Якщо клас функцій, до якого належить $F(P)$, є невідомим, то можна використовувати декілька перших моментів експериментально визначеної щільності ймовірності (найчастіше – їх комбінацій: середнього значення, дисперсії, ексцесу).

2. Характеристики автокореляційної функції $K_p(\tau)$. Можна використовувати, наприклад, час збереження кореляцій (час, протягом якого ця функція зберігає свій знак), вигляд функції (наприклад, кількість зміни її знаків тощо).

3. Середнє значення P_τ .

4. Значення дисперсії σ .

5. Значення $P_{\max \tau}$, $P_{\min \tau}$ та Δ_τ .

6. Значення показника Херста H . Тут важливим буде знак комплексу $(H - 1/2)$: якщо він додатний, то випадковий процес зберігає існуючу тенденцію, коли від'ємний – то змінює тенденцію, а якщо цей комплекс дорівнює нулю – то процес є дифузійним (марківським).

7. Фрактальна розмірність D . Часто значення фрактальної розмірності зв'язують із кількістю незалежних змінних, які формують стохастичний часовий ряд.

Як правило, зону змінності поділяють на 3 – 5 інтервалів, а коли зона змінності охоплює за числовою величиною параметрів кілька порядків, то використовують логарифмічні шкали для класифікації.

Етап 4. Будуємо математичні моделі для кожного із сценаріїв. Цю задачу потрібно виділити окремо через високий рівень її складності. Як правило, побудова ефективних математичних моделей триває роки, і тому зараз цей етап розглядатися не буде.

Етап 5. Розробляємо методи, алгоритми та технології для ідентифікації параметрів, які характеризують вибрані класифікації сценаріїв. На цьому етапі кількість різних класифікацій сценаріїв може бути зменшена внаслідок того, що методи, алгоритми та технології ідентифікації потрібних для них параметрів або не можуть бути застосовані, або ж не можуть забезпечити необхідної точності.

Етап 6. Апробація розроблених методів, алгоритмів та технологій для практичних ситуацій. На цьому етапі будуть виявлені умови, які є потрібними для можливості застосування тієї чи іншої класифікації сценаріїв. Можна очікувати, що на цьому етапі будуть виділені галузі, для яких використання певної класифікації сценаріїв буде більш ефективним.

В запропонованому алгоритмі оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання вперше використано підходи побудови багатокрокових адаптивних процедур покращення їх функціонування в реальних умовах.

У **четвертому розділі** виконано прогнозування електричних навантажень за допомогою програмно-апаратного комплексу оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням штучних нейронних мереж (рис. 9 – 10). Точність прогнозування розробленої нейромережевої структури оцінено показником відсоткової похибки $MAPE$, яка лежить в межах 2,5%:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_t - \bar{P}_t|}{P_t} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де P_t – фактичне значення; \bar{P}_t – прогнозоване значення; n – кількість значень.

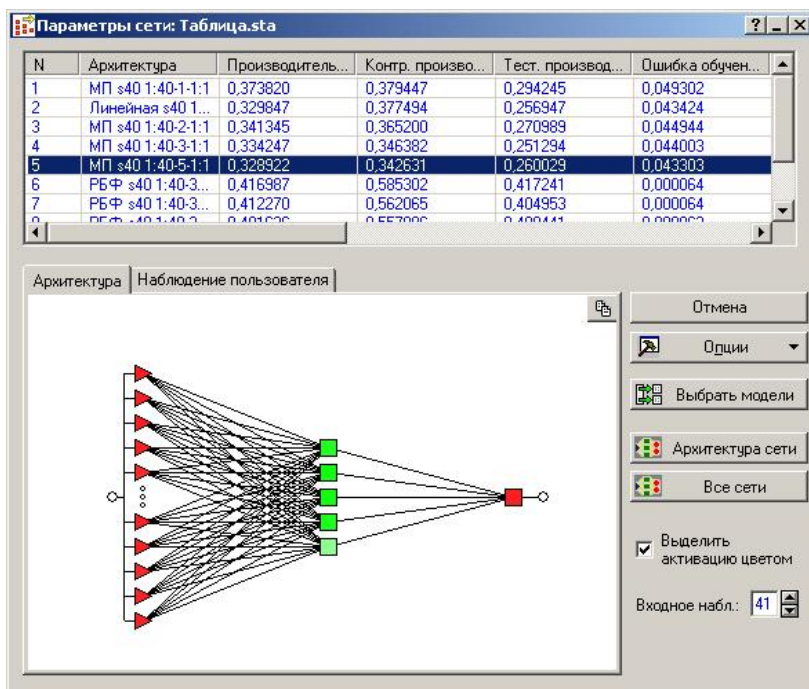


Рисунок 9 – Прогноз півгодинного споживання електроенергії виконаний за допомогою нейронної мережі типу багатошаровий перцептрон

Для порівняння виконано прогноз електричних навантажень за допомогою *ARIMA*. Моделі авторегресії і ковзного середнього можуть врахувати фрактальну природу часових рядів споживання електроенергії з наявною короткотерміною і довготерміною пам'яттю. Як наголошувалось раніше, для графіків електричних навантажень, що містять трендову і періодичну компоненти, необхідно застосовувати не тільки процедуру взяття першої різниці, але й різниці з лагом, що дорівнює періоду, і після цього вилучити авторегресійну складову. Отриманий прогноз також задовільний (похибка в межах 5%).

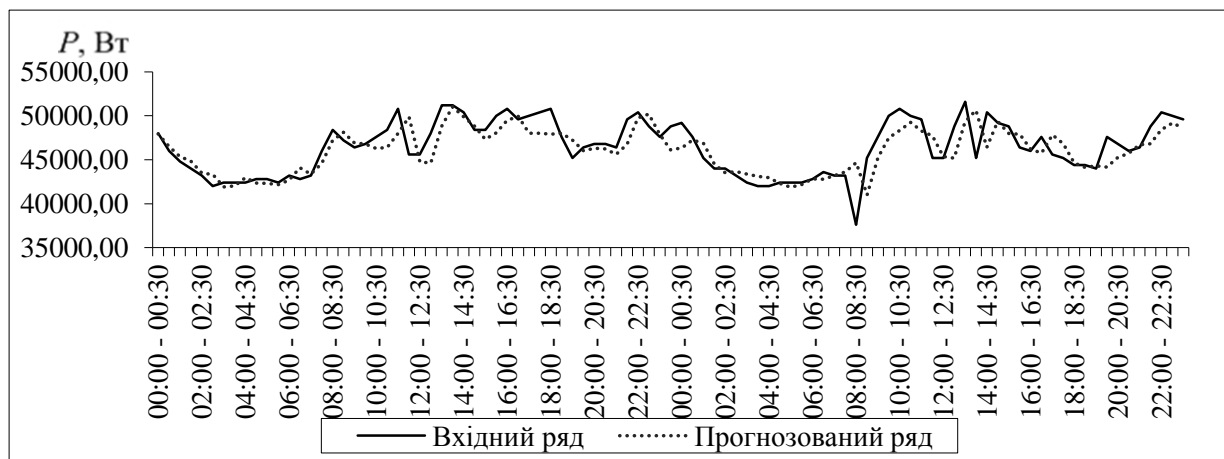


Рисунок 10 – Графіки фактичного та прогнозованого півгодинного споживання електроенергії (за допомогою нейронної мережі типу багатошаровий перцептрон)

Розроблено рекомендації щодо практичного застосування запропонованих у дисертаційній роботі математичних моделей та методу оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням штучних нейронних мереж. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фрактальних властивостей має наступні:

- функціональні можливості: аналіз споживання електроенергії; прогнозування споживання електроенергії з врахуванням фрактальності ряду;

- переваги: унікальний алгоритм аналізу та прогнозування; постійний моніторинг електроспоживання; автоматизація обліку, зберігання, аналітичної обробки і представлення даних по електроспоживанню; висока точність прогнозу та швидкість роботи; простота і зручність використання; сегмент *Smart Grid*-технологій;

- особливості: результати виводяться у вигляді таблиць і графіків; формування бази даних споживання електроенергії, що постійно аналізується і оновлюється; прогнозування з врахуванням прихованих закономірностей; адаптація під конкретне підприємство;

- економічний ефект: підвищення точності прогнозування електроспоживання підприємства; скорочення електроспоживання підприємства та економія коштів, що направлені на оплату за спожиту електроенергію; дотримання лімітів споживання електроенергії, що встановлені енергопостачальною організацією та фінансовими можливостями підприємства;

- основні етапи: імпорт і первинна обробка отриманих даних по електроспоживанню; поглиблений аналіз і аналітична інтерпретація даних; фрактальний аналіз даних; прогнозування електроспоживання на основі наявних даних (за допомогою нейронних мереж); аналіз якості прогнозування електроспоживання підприємства.

Проведено економічну оцінку ефективності оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фрактальних властивостей (рис. 11). В умовах стабільного зростання рівня цін на електроенергію від точності оперативного погодинного прогнозування електроспоживання залежить фінансове становище підприємства.

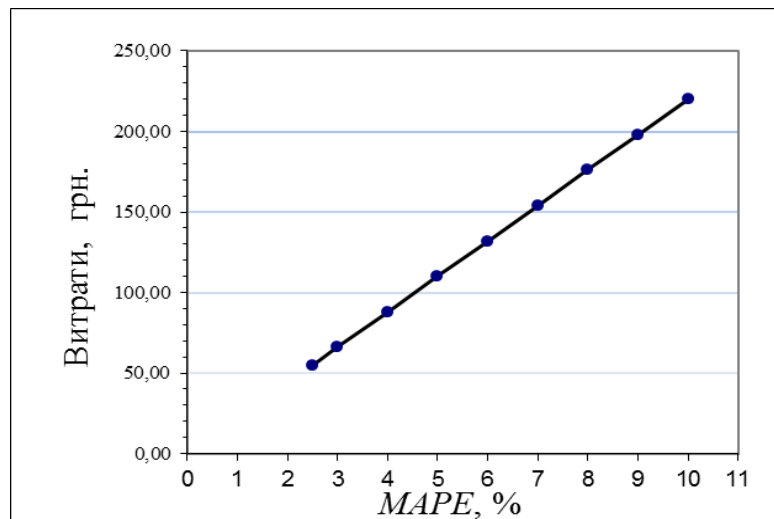


Рисунок 11 – Графік залежності щоденних витрат, викликаних неточним прогнозуванням електроспоживання, від величини похибки прогнозування

Зниження похибки прогнозування *MAPE* на 1 % (наприклад, з 4 % до 3 %) дає економію при середньомісячному електроспоживанні підприємства близько 55000 кВт-год. понад 680 грн. на місяць і 8200 грн. у рік. Розроблений метод оперативного прогнозування електричних навантажень дозволяє знизити витрати підприємства на оплату електроенергії за рахунок коректного формування договірних величин споживання електроенергії.

ВИСНОВКИ

У роботі наведено нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності керування електроспоживанням за рахунок розроблення методу і моделей оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фрактальних властивостей. Проведені наукові дослідження дозволили отримати наступні основні результати та висновки.

1. Внаслідок наявності випадкової складової, природного росту навантаження, нескоординованих дій споживачів, виникає ситуація, коли часовий ряд електроспоживання має суттєво стохастичну компоненту. Для вивчення таких процесів як споживання електроенергії

може бути використаний базовий інструмент фрактального аналізу часових рядів – *R/S*-аналіз, що запропонований Херстом. Він дозволяє виявити і чисельно оцінити фундаментальні характеристики часових рядів: наявність довготермінової пам'яті, її глибину, трендостійкість, хаотичність або стохастичність аналізованого процесу.

2. Аналіз графіків електричних навантажень (ГЕН) показав наявність фрактальних властивостей у ГЕН та показав наявність короткотермінової і довготермінової пам'яті, що дозволяє для математичного моделювання та прогнозування використовувати фрактальний аналіз, який встановлює залежність майбутніх значень ГЕН від їх минулих змін чи «початкових умов». ГЕН є самоподібними, а часовий інтервал, на якому простежується довготермінова залежність, лежить у діапазоні від тижня до року.

3. Розроблено метод для оперативного прогнозування електричного навантаження в реальному масштабі часу з врахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережових технологіях і дозволяє більш точно, в порівнянні з існуючими методами, робити прогноз. Суттєвим моментом запропонованого підходу є наявність критичного значення показника Херста чи фрактальної розмірності ГЕН, при наближенні до якого система втрачає стійкість та переходить у нестабільний стан і параметри швидко або зростають, або зменшуються, в залежності від тенденції, що має місце в даний час. Запропоновано відповідну архітектуру нейронної мережі, що функціонує паралельно контрольованому електроспоживанню, яка при виявленні критичного значення показника Херста чи фрактальної розмірності виконує оперативний прогноз електричного навантаження в реальному масштабі часу.

4. Вдосконалено математичну модель для опису характеристик графіків навантажень як випадкового процесу, який характеризується набором числових характеристик та запропоновано класифікацію сценаріїв поведінки електричних навантажень систем електроспоживання, які базуються на виділенні стохастичної складової із динамічного ряду електроспоживання, що дозволяє здійснювати оперативне прогнозування електричних навантажень.

5. Запропоновані в роботі метод та алгоритм оцінювання і оперативного прогнозування електричних навантажень промислових підприємств з врахуванням його фрактального характеру, що базуються на нейромережових технологіях, практично реалізовані у вигляді програмно-апаратного комплексу для автоматизації процесу оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання, що дозволяє підвищити точність та швидкодію, а також виявити критичні режими електроспоживання та знизити рівень ризику аварійних вимкнень.

6. Виконано прогнозування електричних навантажень за допомогою штучних нейронних мереж. Точність прогнозування розробленої нейромережової структури оцінено показником відсоткової похибки *MAPE*, яка лежить в межах 2,5%. Для порівняння виконано прогноз електричних навантажень за допомогою *ARIMA*. Моделі авторегресії і ковзного середнього можуть врахувати фрактальну природу часових рядів споживання електроенергії з наявною короткотерміновою і довготерміновою пам'яттю. Отриманий прогноз також задовільний (в межах 5%).

7. Надано рекомендації з практичного застосування запропонованого у дисертаційній роботі методу, а також проведено економічну оцінку ефективності оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання. Матеріали дисертаційної роботи впроваджено в ТОВ «Вінницький комбінат хлібопродуктів №2» та в навчальному процесі кафедри ЕСЕЕМ ВНТУ для підготовки фахівців за спеціальностями «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» в курсах «Енергозбереження», «Енергетичний менеджмент», «Прогнозування та планування енерговикористання».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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. – ISSN 1997–9266.
2. 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. – ISSN 1997–9266.
3. Шиян А. А. Метод оцінювання та ідентифікації характеристик і високоамплітудних відхилень електричних навантажень електротехнічних комплексів / А. А. Шиян, Ю. А. Шулле // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – №1. – С.277–279. – ISSN 2226–9150.
4. Шиян А. А. Сценарії оптимізації та прогнозування управління електричними навантаженнями електротехнічних комплексів / А. А. Шиян, Ю. А. Шулле // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – №2. – С.122–124. – ISSN 2226–9150.
5. Лежнюк П. Д. Визначення прогнозування екстремальних навантажень електротехнічних комплексів в умовах ризику та невизначеності / П. Д. Лежнюк, Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №4. – С. 107–110. – ISSN 1997–9266.
6. Лисогор¹ 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.
7. 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. – С. 25–29.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

¹Примітка: Лисогор Ю. А. вважати Шулле Ю. А. у зв'язку з одруженням.

АНОТАЦІЯ

Шулле Ю. А. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фрактальних властивостей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2013.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методу і моделей оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фрактальних властивостей, що дозволяє підвищити ефективність керування електроспоживання.

Аналіз графіків електричних навантажень (ГЕН) показав наявність фрактальних властивостей у ГЕН та показав наявність короткотермінової і довготермінової пам'яті, що дозволяє для математичного моделювання та прогнозування використовувати фрактальний

аналіз, який встановлює залежність майбутніх значень ГЕН від їх минулих змін чи «початкових умов». Розроблено метод для оперативного прогнозування електричного навантаження в реальному масштабі часу з врахуванням його фрактального характеру, що базується на нейромережевих технологіях і дозволяє підвищити точність прогнозування, в порівнянні з існуючими методами.

Запропоновані в роботі метод та алгоритм оцінювання і оперативного прогнозування електричних навантажень промислових підприємств з врахуванням його фрактального характеру, що базуються на нейромережевих технологіях, практично реалізовані у вигляді програмно-апаратного комплексу для автоматизації процесу оперативного прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання, що дозволяє підвищити точність та швидкодію, а також виявити критичні режими електроспоживання та знизити рівень ризику аварійних вимкнень.

Ключові слова: оперативний прогноз, електричне навантаження, показник Херста, фрактальний аналіз, R/S -аналіз, електроспоживання.

ABSTRACT

Shulle Iu. A. Efficiently prognostication of the electric loadings in electroconsumption systems by the means of their fractal properties. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on Speciality 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2013.

Dissertation work is devoted development of new method and models of operative electric loadings prognostication at the the systems of electroconsumption by the means of their fractal properties, that will allow to promote efficiency of management of electro-consumption.

Analysis of electrical loads charts (ELC) showed that there are fractal properties in ELC and showed the presence of short-term and long-term memory properties, which allows for the mathematical modeling and forecasting to use fractal analysis, which establishes the dependence of future values of the ELC from their past changes or «initial conditions». It was developed the method for operational forecasting of electricity load in real time, taking into account its fractal nature, based on neural network technology which can improve prediction accuracy compared to existing methods.

The suggested method and algorithm for evaluation and operational forecasting of electrical loads for industrial enterprises with regard to its fractal nature, based on neural network technology, practically implemented as a hardware-software complex for automation of operational forecasting systems of power electrical loads that can increase the accuracy and speed, also can to identify critical modes of power consumption and reduce the risk of accidental disconnection.

Key words: operative prognosis, electric loading, Hurst index, fractal analysis, R/S -analyze, electroconsumption.

АННОТАЦИЯ

Шулле Ю. А. Оперативное прогнозирование электрических нагрузок систем электропотребления с учетом их фрактальных свойств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2013.

Диссертационная работа посвящена разработке метода и моделей оперативного прогнозирования электрических нагрузок систем электропотребления с учетом их фрактальных свойств, что позволит повысить эффективность управления электропотребления.

В современных условиях рыночной экономики эффективное использование электрической энергии является одной из важнейших проблем электроэнергетики Украины. В последние годы меняется структура электропотребления. Новые источники характеризуется большим количеством нескоординированных потребителей, что приводит к значительному повышению уровня стохастических колебаний потребления электроэнергии на протяжении суток, а также к изменению сезонных колебаний электропотребления на протяжении года.

Более того, именно в результате отсутствия координации между отдельными потребителями могут возникать большие отклонения в электропотреблении, амплитуда которых может превышать критические значения. Это может приводить к аварийным ситуациям, особенно в условиях высокого уровня изношенности оборудования электроэнергетических систем.

Направлением позволяющим сократить расходы и избежать критических ситуаций является оперативное прогнозирование электропотребления, которое помогает эффективно планировать и нормировать потребление электрической энергии, обеспечивать эффективное использование разного технологического оборудования. График нагрузки электрической сети каждого предприятия формируется под воздействием разных факторов, полный учет которых невозможен. Следовательно, в условиях энергетического рынка важное значение для промышленных предприятий имеет создание системы оперативного прогнозирования почасового потребления электрической энергии, что позволяет минимизировать отклонение потребляемой мощности от мощности заявленной на рынке на сутки вперед.

Оперативное прогнозирование электропотребления промышленных предприятий имеет важное значение в условиях развития *Smart Grid*-технологий. В первую очередь, необходимо оно для того, чтобы оптимизировать график выработки электроэнергии, за счет прогнозирования электропотребления. В случае, когда невозможно поддерживать баланс путем генерирования электроэнергии возможно изменение графиков электрических нагрузок предприятий-регуляторов. Таким образом, обеспечивается гибкая двусторонняя связь потоков электроэнергии и информации между энергообъектами.

В результате наличия случайной составляющей, естественного роста нагрузки, нескоординированных действий потребителей, возникает ситуация, когда часовой ряд электропотребления имеет существенно стохастическую компоненту. Для изучения таких процессов, как потребление электроэнергии может быть использован базовый инструмент фрактального анализа часовых рядов – *R/S*-анализ, что предложен Херстом. Он позволяет обнаружить и численно оценить фундаментальные характеристики часовых рядов: наличие долгосрочной памяти, её глубину, трендостойкость, хаотичность или стохастичность анализируемого процесса. Показатель Херста может быть преобразован во фрактальную размерность, которая является показателем сложности графика нагрузки. Анализируя чередование участков с разной фрактальной размерностью и то, как на систему электропотребления влияют внешние и внутренние факторы, можно научиться предусматривать поведение системы, а также диагностировать и предусматривать нестабильные состояния. Существенным моментом предложенного подхода является наличие критического значения показателя Херста или фрактальной размерности графика нагрузки, при приближении к которой система теряет устойчивость и переходит в нестабильное состояние и параметры быстро растут или уменьшаются, в зависимости от тенденции, которая имеет место в настоящее время. Предложена соответствующая архитектура нейронной сети, которая функционирует параллельно контролируемому электропотреблению, а при выявлении критического значения показателя Херста или фрактальной размерности выполняет оперативный прогноз электрической нагрузки в реальном масштабе времени.

В работе выполнен анализ графиков электрических нагрузок (ГЭН), который обнаружил наличие фрактальных свойств в ГЭН и показал наличие краткосрочной и долгосрочной памяти, что позволяет для математического моделирования и прогнозирования использовать фрактальный анализ, который устанавливает зависимость будущих значений ГЭН от их прошлых изменений или «начальных условий». Также в работе предложен метод для оперативного прогнозирования электрической нагрузки в реальном масштабе времени с учетом ее фрактального характера, использующий нейросетевые технологии и позволяющий более точно, по сравнению с существующими методами, делать прогноз. Предложен способ описания ГЭН, который характеризуется набором числовых характеристик и разработана классификация сценариев поведения электрических нагрузок систем электропотребления, которые базируются на выделении стохастической составляющей из динамического ряда электропотребления и классификации ее показателей, что позволяет осуществлять оперативное прогнозирование электрических нагрузок.

Разработан алгоритм и программно-аппаратный комплекс, для автоматизации процесса оперативного прогнозирования электрической нагрузки систем электропотребления, с учетом ее фрактального характера, использующий нейросетевые технологии. Они позволяют обнаружить критические режимы электропотребления и снизить уровень риска аварийных отключений, а также повысить точность и быстродействие.

Ключевые слова: оперативный прогноз, электрическая нагрузка, показатель Херста, фрактальный анализ, *R/S*-анализ, электропотребление.

Підписано до друку 22.01.2013 р. Формат 29,7×42^{1/4}

Наклад 100 прим. Зам. № 2013-016.

Віддруковано у комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38