

## Список літератури

1. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ / В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1980. – 631 с.
2. Ржевский В.В. Комплексы оборудования и вскрытие рабочих горизонтов мощных глубоких карьеров / В.В. Ржевский, В.В. Истомин, В.И. Супрун // Горный журнал. – 1982. – №11. – С. 27-30.
3. Пихлер М. и др. Ввод в эксплуатацию карьерного комбайна Wirtgen 2200 SM на карьере Дубовецкого месторождения известняка ОАО «Ивано-Франковскцемент». // Горная промышленность. 2012. №2. С. 107-110.
4. Фризен А.П. Vermeer серии T1255 – универсальные машины для выполнения вскрышных и добычных работ в карьерах. // Горная промышленность. 2012. №3. С. 56-57.
5. Шапар А.Г. й ін. Ресурсозберігаючі технології видобутку корисних копалин на кар'єрах України. – К.: Наукова думка, 1998.
6. Виницкий К.Е. О ресурсосберегающих технологиях и комплексном освоении недр / Горные науки, промышленность. – М.: Недра, 1989.
7. Мининг С.Э., Мининг С.С. Об оценке стоимости запасов твердых полезных ископаемых // Горный журнал, 2002. – № 9. – С. 6–8.
8. Яковлев В.Л. Проблемы и перспективы развития открытых горных разработок // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): Докл. международной конференции, 6-10 июля 1998 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – Т. 2.
9. Воловик В.П., Голярчук Н.И., Бельченко Е.Н. Современное состояние горно-обогатительных комбинатов Кривбасса и перспективы их развития / Metallургическая и горнорудная промышленность, 2000. – № 4. – С. 59–61. – № 5. – С. 80–83.
10. Куделя А.Д. Комплексное использование минеральных ресурсов железорудных горнообогатительных комбинатов. – К.: Наукова думка, 1984

Рукопис подано до редакції 09.04.2019

УДК 681.5:621.311.1

О.О. ГРАММ, аспирант, О. І. САВИЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

### ПРЕДИКТИВНА ОЦІНКА НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМБІНОВАНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка алгоритмічного забезпечення підсистеми прогнозування рівня споживання електричної енергії промисловими об'єктами з використанням комбінованих інтелектуальних методів на основі механізмів нечіткої логіки та оптимізації її функціонування за рахунок використання генетичного алгоритму для зменшення витрат на енергопостачання, підвищення надійності енергетичної мережі і досягнення максимальної енергоефективності підприємства в умовах енергетичної біржі.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставленої задачі у роботі використовуються методи теорії систем автоматичного керування виробництвом, методи оптимізації систем автоматичного керування, методи нечіткої логіки і генетичного алгоритму і проведено аналіз доцільності використання методів комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна.** У роботі удосконалено алгоритм прогнозування навантаження заснований на системі нечіткої логіки шляхом його оптимізації засобами генетичного алгоритму, що відрізняється від відомих врахуванням погодних умов і тривалості світлового дня, що має забезпечити зменшення відносної помилки прогнозування на 0,2 – 0,4% у порівнянні з відовими методами прогнозування рівня споживання.

**Практична значимість.** Практичне значення роботи полягає у розробці алгоритму предиктивної оцінки навантаження заснованого на комбінації механізмів нечіткої логіки і засобах генетичного алгоритму, використання якого дозволить зменшити фінансові втрати пов'язані з надмірними та недостатніми об'ємами замовлення електричної енергії в умовах єдиного енергетичного ринку, дозволить скоротити кількість випадків перевищення обмежень на споживання електричної енергії.

**Результати.** Результатом виконаної роботи є розроблені алгоритмічні та принципові схеми системи прогнозування рівня споживання електричної енергії, які дозволяють оптимізувати у реальному часі роботу нечіткої системи прогнозування навантаження шляхом оптимізації вагових коефіцієнтів її правил за допомогою засобів генетичного алгоритму, що являється основою для створення інтелектуальної системи автоматичного керування енергопостачання підприємства.

**Ключові слова:** автоматизація, нечітка логіка, генетичний алгоритм, прогнозування, попит, електроенергія, енергетична біржа, енергетичні мережі.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-84-88

**Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Високі темпи технологічного розвитку та швидке зростання кількості населення планети призводить до збільшення споживання ресурсів, в першу чергу – енергетичних. Через це наявні мережі розподілу електроенергії в даний час являються дефіцитними. Одним із способів вирішення зазначених проблем є впровадження концепції розумної мережі. Функціонально розумна мережа повинна забезпечувати більш ефективно розповсюдження та використання енергії. Розумна мережа складається з декількох фундаментальних підсистем: інтелектуальні системи вимірювання та обліку; системи прогнозування попиту; системи динамічного керування мережею і накопичувачами енергії; системи регулювання навантаження і попиту [1]. У загальному випадку прогнозування навантаження використовується лише опосередковано для інформування споживачів про рівень споживання енергії, та для допомоги в управлінні потоками енергії [2, 3].

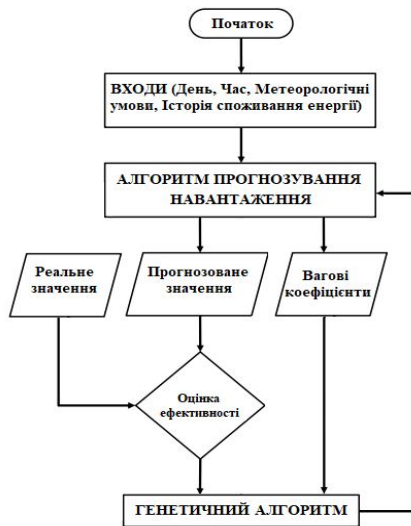
Але в сучасних умовах України питання прогнозування навантаження набуває значення фундаментального питання для здійснення ефективного керування розподіленням енергії промисловими підприємствами, так як в умовах енергетичного ринку замовлення енергії відбувається на наступний день і дуже важливо максимально точно спрогнозувати об'єми замовлення. Прогнозування навантаження може бути використано для підвищення ефективності використання енергії шляхом підвищення обізнаності користувачів і підвищення ефективності кінцевого процесу [4]. Розподіл енергії може бути більш ефективним саме завдяки точному прогнозуванню навантаження. Виробник електроенергії може передбачити, яким буде навантаження, і забезпечити його достатню кількість. А споживач може передбачати свої потреби і не виходити за межі свого замовлення, що дозволить уникнути зайвих затрат.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Відома велика кількість алгоритмів прогнозування навантаження, серед яких: статистичні моделі, моделі часових рядів, моделі регресійного аналізу, експертні системи, мережі штучного інтелекту, системи нечіткої логіки і розрахункові інтелектуальні моделі. Питанням прогнозування рівнів навантаження для різних об'єктів присвячена велика кількість публікацій. Розглядається прогнозування споживання електричної енергії для об'єктів аеропорту [5] де для прогнозування пропонується використання ймовірнісного підходу. Також існують дослідження присвячені прогнозуванню споживання електроенергії на залізниці [6], у яких окремо розглядаються засоби нейронних мереж і генетичного алгоритму. Комбінації статистичних моделей та нейронних мереж використовуються при прогнозуванні споживання електричної енергії у окремих територіальних областях [7]. Виходячи з особливостей об'єкту для прогнозування обсягу споживання енергії світлосигнальним обладнанням аеропортів запропоновано використання багатofакторної регресійної моделі [8]. Багатofакторні регресійні моделі та моделі часових рядів також отримали поширення у прогнозуванні споживання для вугільних шахт [9]. При порівнянні якості прогнозування за допомогою різних підходів [10, 11] та їх комбінацій [12] можна зробити висновок про те, що використання комбінацій різних методів дозволяє зменшити відносну похибку прогнозування, а найбільшу точність прогнозування показують комбінації різних методів з нейромережовим підходом [13, 14]. Але комбінованій системі на основі нечіткої логіки і генетичного алгоритму не приділено значної уваги.

**Постановка задачі.** Поточна система розподілу електроенергії проектувалася і будувалася на ранньому етапі електрифікації більш ніж століття назад, і з того часу її архітектура не зазнавала значних змін [15]. У такій системі єдиним варіантом забезпечення достатньої якості обслуговування та надійності є створення надлишкової генерації та розподілу з надмірною потужністю для запобігання нестійкості системи та забезпечення можливості розвитку. Ця архітектура потребує вдосконалення, оскільки в усьому світі спостерігається швидке зростання попиту на електроенергію і її дефіциту, що призводить до збільшення кількості регіональних відключень. Ці відключення відбуваються через зменшення надлишкових запасів потужності до критичного рівня. Іншим важливим свідченням того, що модернізація діючої системи розподілу електроенергії критично необхідна є зростання рівня забруднення навколишнього середовища та інших негативних впливів на навколишнє середовище, які необхідно ліквідувати.

Для вирішення зазначених проблем враховуючи результати аналізу літературних джерел потребується розробка алгоритму прогнозування споживання електричної енергії, заснований на використанні засобів нейронних мереж для прогнозування і генетичного алгоритму для оптимізації нейромережевого підходу і скорочення відносної помилки.

**Викладення матеріалів і результатів.** Алгоритм прогнозування навантаження пропонується реалізувати у вигляді системи нечіткої логіки. Вхідними даними алгоритму прогнозування пропонується обрати час доби, історичне використання енергії, день тижня і метеорологічні умови. Важливим елементом системи прогнозування є підсистема генетичного алгоритму для налаштування параметрів функцій нечіткої логіки та правил, що виконує функцію максимізації продуктивності алгоритму прогнозування навантаження. Логічна схема алгоритму проілюстрована на рис. 1.



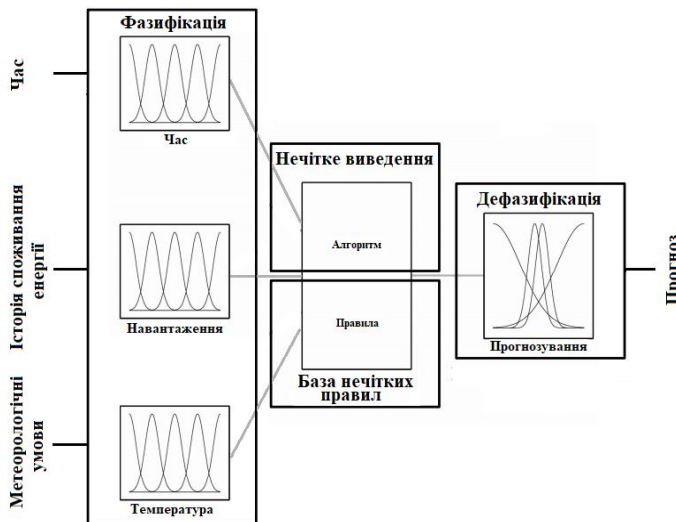
**Рис. 1.** Логічна схема алгоритму прогнозування на базі системи нечіткої логіки та генетичного алгоритму

Структуру системи нечіткої логіки для прогнозування навантаження зображено на рис. 2.

Чіткі значення передаються до системи нечіткої логіки і перетворюються на нечіткі значення через процес фазифікації. При цьому чіткому значенню присвоюється ступінь членства на основі того, якій функції належності воно відповідає.

Нечіткий висновок встановлюється за допомогою бази нечітких лінгвістичних правил. Вага кожного правила, що являється змінною для параметризації з використанням генетичного алгоритму, початково встановлюється в значення одиниці. Це означає, що кожне правило впливає на кінцевий результат однаково. Правила отримуються за допомогою апріорного знання про поведінку системи на основі наявного профілю навантаження.

Виходи нечіткого механізму об'єднуються з єдиним набором чітких вихідних сигналів для дефазифікації нечітких значень. Завдяки цьому отримується бажане чітке значення, що являє собою профіль прогнозованого навантаження.

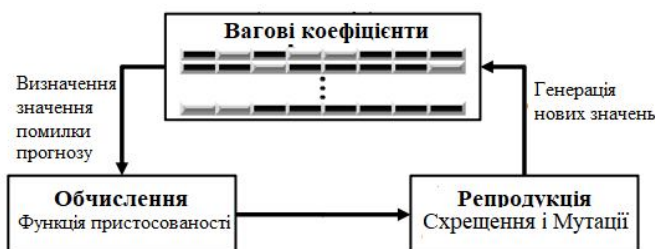


**Рис. 2.** Структура нечіткої системи прогнозування

Генетичний алгоритм використовується для оптимізації алгоритму прогнозування навантаження, його принципова схема зображена на рис. 3.

Змінними генетичного алгоритму обираються середні показники та відхилення ( $\mu$  та  $\sigma$ ) масиву історичних витрат електроенергії для кожної з нечітких функцій належності у всіх вхідних та вихідних нечітких множинах, а також вага кожного правила у базі нечіткого правила. Нижню і верхню межі для кожної із змінних показників електроенергії повинні бути визначені для того, щоб генетичний алгоритм міг збігатися з кінцевим рішенням, що отримується в межах нечіткого простору рішень.

Генетичний алгоритм функціонує на основі створення початкової популяції змінних, заснованої на кількості змінних і бажаному розмірі популяції. Кожне рішення оцінюється і ранжується відповідно до визначеної функції придатності.



**Рис. 3.** Принципова схема генетичного алгоритму

Найбільш пристосовані рішення потім вибираються для вирощування наступного покоління вирішень, включаючи еволюційні ефекти, такі як схрещення гена і мутація. Важливими задачами при цьому являються визначення початкових апріорних припущень для створення початкових хромосом, визначення розміру популяції і максимальну кількість генерацій.

Функція пристосованості (1) генетичного алгоритму визначається як середнє з двох критеріїв ефективності. Це дозволяє гарантувати, що середня величина двох помилок буде зведена до мінімуму.

$$E_{\text{пристосованості}} = \frac{E_{\text{максимальне}} + E_{\text{загальне}}}{2}, \quad (1)$$

де  $E_{\text{максимальне}}$  – різниця між прогнозованим максимальним досягнутим споживанням навантаження і реальним максимальним досягнутим споживанням навантаження протягом певного періоду часу;

$$E_{\text{максимальне}} = \frac{|\max(P_{\text{передбачення}}) - \max(P_{\text{реальне}})|}{\max(P_{\text{реальне}})} \times 100, \quad (2)$$

де  $E_{\text{загальне}}$  – різниця між загальним об'ємом енергії, необхідним для забезпечення прогнозованого навантаження і вимірною спожитою енергією за певний період

$$E_{\text{загальне}} = \int_1^t \frac{|P_{\text{передбачення}}(t) - P_{\text{реальне}}(t)|}{P_{\text{реальне}}(t)} dt \times 100, \quad (3)$$

де  $P_{\text{передбачення}}$  – прогнозоване споживання енергії,  $P_{\text{реальне}}$  – реально виміряне споживання енергії

Метод генетичного алгоритму має бути реалізовано у вигляді стохастичної уніфікованої функції. У результаті цього процесу батьки зазнають двох основних процесів відтворення, схрещення і мутації. Для того, щоб принаймні чотири з більш слабких нащадків потрапляли до наступного покоління може бути прийнято метод елітизму.

Важливим питанням при реалізації генетичного алгоритму також є визначення відношення всієї чисельності популяції до її частини на яку впливало схрещення, і на яку впливали мутації. При цьому важливо визначити функцію переходу для забезпечення різноманітної популяції потомства і функцію мутації для посилення потенційно слабких хромосом і підвищення пристосованості популяції.

Після повного створення нової популяції починається створення наступного покоління. При цьому потомство попереднього покоління стає батьками у новому тесті функції пристосованості, і процес повторюється до досягнення максимальної кількості поколінь, або досягнення допустимого відхилення функції пристосованості.

Схематичний вигляд алгоритму прогнозування навантаження, генетичного алгоритму і процеси розрахунку критеріїв виконання наведені на рис. 4.

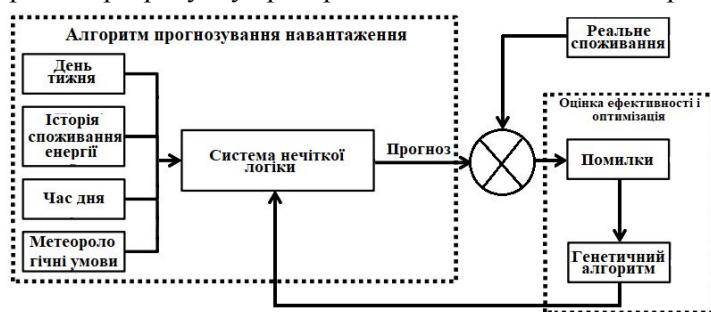


Рис. 4. Принципова схема комбінованого алгоритму прогнозування витрат електроенергії

Для розробки та реалізації алгоритму для кожної окремої задачі можна скористатися пакетом інструментів MATLAB®. Для моделювання системи нечіткої логіки використовується інструментарій fuzzylogictoolbox, а для створення

генетичного алгоритму - optimisationtoolbox.

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** У роботі розглянуто можливість подальшого розвитку підходів до прогнозування споживання електричної енергії. Розроблено алгоритмічні схеми реалізації системи прогнозування на базі комбінації системи нечіткої логіки і генетичного алгоритму. Подальшим кроком у дослідженні є моделювання різних систем енергопостачання та їх комп'ютерних систем керування у пакеті інструментів для проведення оцінки якості її функціонування. При цьому важливим являється питання визначення відношення зростання часу потрібного для обчислення генетичного алгоритму до зростання показника точності прогнозування.

## Список літератури

1. S. E. Collier, «Ten steps to a smarter grid,» in Rural Electric Power Conference. IEEE, pp. B2–B2–7, April 2009.
2. X. Wei, Z. Yu-Hui, and Z. Jie-lin, «Energy-efficient distribution in smart grid,» in International Conference on Sustainable Power Generation and Supply 2009, pp. 1–6, March 2009.
3. R. E. Brown, «Impact of smart grid on distribution system design,» in Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, pp. 1–4, July 2008.
4. H. Farhangi, «The path of the smart grid,» Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 8, pp. 18–28, January-February 2010
5. Соколова Н. П. Моделювання та програмне забезпечення прогнозування споживання електричної енергії об'єктами аеропорту / Н. П. Соколова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 2/8 (68), С. 8–2.
6. Омеляненко В. І. Автоматизована система прогнозування споживання електроенергії на залізницях / В. І. Омеляненко, Г. В. Омеляненко, Ю. П. Чудний // Міжнародний науково-технічний журнал «Світлотехніка та Електроенергетика». – 2009. – № 2. – С. 9–13.
7. Павлюк О. Інтегрована автоматизована система для прогнозування споживання електричної енергії у Львівській області / О. Павлюк. – Національний університет «Львівська політехніка», 2015.
8. Лещинський О. Л. Модель прогнозування обсягу споживання електричної енергії світлосигнального обладнання аеропорту / О. Л. Лещинський, В. С. Коновалюк, Н. П. Соколова // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 2/1(16). – С. 27–31.
9. Бурій С. В. Оцінка методів прогнозування електроспоживання підприємств на прикладі вугільної шахти / С. В. Бурій, В. В. Халімов // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – No 2.
10. More B. R. Electric load forecasting in smart grid environment and classification of methods, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 7, July-2014, pp. 49–51.
11. Chemetova S., Santos P., Ventim-Neves M. (2016) Load Forecasting in Electrical Distribution Grid of Medium Voltage. In: Camarinha-Matos L. M., Falcão A. J., Vafaei N., Najdi S. (eds) Technological Innovation for Cyber-Physical Systems. DoCEIS 2016. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 470. Springer, Cham.
12. A. K. Singh, I. Ibraheem, S. Khatoon, M. Muazzam, D. K. Chaturvedi, «Load forecasting techniques and methodologies: A review», Power Control and Embedded Systems (ICPCES) 2012 2nd International Conference on, pp. 1–10, 2012.
13. R.-H. Liang and C.-C. Cheng, «Combined regression-fuzzy approach for shortterm load forecasting,» IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 147, pp. 261–266, July 2000.
14. G.-C. Liao, «An evolutionary fuzzy neural network approach for short-term electric power load forecasting,» in Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006.
15. A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, and D. Morton, «Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid,» in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1627–1632, July 2008.

Рукопис подано до редакції 10.04.2019

УДК 622.625.28

Д.О. КАЛЬМУС, ст. викладач, Криворізький національний університет

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ З РЕЛЕЙНИМ РЕГУЛЯТОРОМ СТРУМУ

**Мета.** Метою даної роботи є вдосконалення електричного приводу шахтного електровозу за рахунок застосування цифрової системи керування тяговим електричним двигуном з релейним регулятором струму, та знаходження за квадратичними критеріями оптимального за відхиленням керування, яке б забезпечувало максимальну швидкість при роботі шахтного електровозу в пунктах завантаження.

**Методи дослідження.** При проведенні розглянутого в статті дослідження було використано методи безпосереднього спостереження та вивчення режимів роботи та графіків навантаження електроприводів, загальна теорія навантажень електроприймачів із змінним графіком навантаження, а також методи синтезу оптимальних систем із застосуванням функції Белмана – Ляпунова.

**Наукова новизна.** Розв'язання даної задачі складає актуальність роботи. Її метою є узагальнення відомих методів розрахунків імпульсних електромеханічних систем і формулювання на цій основі уніфікованого методу з розробкою цифрової системи керування, яка б забезпечила ефективне функціонування електричного приводу шахтного електровозу при роботі в пунктах завантаження.

**Практична значимість.** Отримані результати можна використовувати як розрахунково-аналітичний апарат на етапі ескізного проектування тягового електропривода при складанні методики розрахунку та розробки схемних рішень системи керування електромеханічними тяговими комплексами, а також для модернізації існуючого парку шахтного електровозного транспорту.

**Результати.** Вдосконалення теорії комплексного розрахунку систем з імпульсними перетворювачами та врахуванням процесів в системах регулювання й керування, а також специфіки експлуатації дозволить виконувати комплексне проектування систем імпульсного регулювання за критерієм досягнення найкращих показників роботи