

8. Herbas, T. B. Steady-State Simulation of Vapor-Compression Heat Pump [Text] / T. B. Herbas, E. C. Berlinck, C. A. T. Uriu, R. P. Marques, J. A. R. Parise // Int. J. Ener.Res. – 1993. – Vol. 17. – P. 801–816.
9. Dubiri, A. E. A Steady-state Computer Simulation Model for Air- to – air Heat pumps [Text] / A. E. Dubiri // ASHRAE Trans. – 1982. – Vol. 88(2). – P. 973–987.
10. Gordon, J. M. Cool Thermodynamics. The Engineering and Physics of Predictive, Diagnostic and Optimization Methods for Cooling Systems [Text] / J. M. Gordon, K. C. Ng. – Cornwall. England: MPG Books Ltd, 2001. – 276 p.
11. Gordon, J. M. Thermodynamic Modeling of Reciprocating Chillers [Text] / J. M. Gordon, K. S. Ng // J Appl.Phys. – 1994. – Vol. 75. – P. 2769–2779.
12. Gordon, J. M. Centrifugal chillers: Thermodynamic modeling and diagnostics case study [Text] / J. M. Gordon, K. S. Ng, H. T. Chua // Int. J Refrig. – 1995. – Vol. 18(4). – P. 253–257.
13. Ust, Y. Analysis of a vapor compression refrigeration system via exergetic performance coefficient criterion [Text] / Y. Ust, A. V. Akkaya, A. Safa// J Energy Inst, – 2011. – Vol. 84(2). – P. 66–72.

*В статті пропонується програмне забезпечення для моделювання прогнозування споживання електричної енергії аеропорту із врахуванням специфіки його обладнання. Це дозволить виявити в динаміці і наочно представляти об'єкти з аномальним електроспоживанням, ефективно здійснювати прогнозування електроспоживання окремими об'єктами та всім комплексом в цілому на етапі реконструкції та побудові нового*

*Ключові слова: споживання електричної енергії, нормальний закон розподілу, аеропорт, теорія ймовірностей, управління*

*В статье предлагается программное обеспечение для моделирования прогнозирования потреблением электроэнергии аэропорта с учетом специфики его оборудования. Такой подход позволит выявить динамику и представлять объекты с аномальным электропотреблением, эффективно осуществлять прогнозирование объемами потребления электрической энергии отдельными объектами и всем комплексом на этапе реконструкции и при строительстве нового*

*Ключевые слова: потребление электроэнергии, нормальный закон распределения, аэропорт, теория вероятностей, управление*

УДК 004.4:621.317.38:656.71(045)

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ОБ'ЄКТАМИ АЕРОПОРТУ

**Н. П. Соколова**

Асистент

Кафедра автоматизації та енергоменеджменту  
Національний авіаційний університет  
пр. Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058  
E-mail: NataSokolova@bigmir.net

## 1. Вступ

В умовах безперервного зростання цін на енергоносії питання прогнозування енергоспоживання в контексті планування енерговитрат є актуальним завданням підприємств. Необхідність прогнозування споживання електроенергії обумовлена механізмом функціонування оптового ринку електроенергії. Відхилення фактичного споживання від заявлених значень більше певного відсотка приводить до купівлі електроенергії з балансууючого ринку за більшою ціною. Відхилення в меншу сторону теж карається оплатою недопоставленої електроенергії, яка визначається різницею між заявленим і фактичним споживанням за встановленими розцінками. Тому складання точного прогнозу дозволить істотно скоротити витрати в собівартості і визначити шляхи підвищення енергоефективності.

Прогнозування електроспоживання є одним із найважливіших завдань управління ефективним споживанням енергетичних ресурсів на підприємстві.

Вибір ефективного методу прогнозування дозволить забезпечити раціональне споживання електричної енергії об'єктами підприємств на прогнозний період та підвищити якість управління споживанням електричної енергії аеропортів, що підтверджує актуальність теми дослідження.

## 2. Постановки проблеми, мета та задачі дослідження

Метою дослідження є прогнозування споживання електричної енергії об'єктами аеропорту на основі теорії математичної статистики.

Задачами дослідження є:

- аналіз існуючих методів прогнозування споживання електричної енергії;
- визначення основних споживачів електричної енергії аеропортів із врахуванням їх технічних характеристик та особливостей режимів роботи;
- розроблення математичної моделі, алгоритму та програмного комплексу моделювання прогнозування споживання електричної енергії об'єктів аеропорту.

---

### 3. Літературний огляд

---

Значний внесок у розвиток прогнозування транспортних процесів було внесено професорами А. І. Воркутою [1], В. В. Сильяновим [2], О. А. Алексєєвим [3], Б. М. Четверухіним [4].

Проблемам прогнозування споживання електричної енергії присвячені численні наукові праці вчених і практиків [5–8]. Найявні джерела вказують на те, що вдосконалення апарату прогнозування споживання обсягу електричної енергії для конкретного підприємства є актуальним.

Прогнозування електроспоживання здійснюється за допомогою різних методів [9, 10], які базуються на аналізі ретроспективної динаміки електроспоживання і факторів його впливу та виявленні статистичного зв'язку між ними для побудови прогнозних моделей з використанням різноманітних методів і програмних засобів.

Існуючі методи прогнозування електроспоживання можна розділити на дві основні групи: методи прогнозування, в яких за споживання електричної енергії розглядається як детермінований процес і методи, засновані на припущенні про ймовірнісний характер електроспоживання.

В залежності від застосованого математичного апарату та цільової спрямованості, математичні методи часової екстраполяції можна розділити на три групи:

- методи аналітичного прогнозування;
- методи ймовірнісного прогнозування;
- методи статистичної класифікації.

Для якісного прогнозування необхідним є проведення аналізу типових графіків споживання електричної енергії, обліку метеорологічної інформації, використання миттєвих або інтегрованих за певний відрізок часу факторних значень споживання електричної енергії.

Можна констатувати, що в даний час у національній економіці застосуванню методів прогнозування обсягу споживання електричної енергії приділяється недостатня увага, так як пріорітетно використовуються моделювання споживання ПЕР, активно впроваджується політика лімітування споживання електричної енергії відносно категорії промислових споживачів.

Прогнозування електроспоживання окремих структурних підрозділів аеропорту є важливим не тільки для всієї енергосистеми в цілому, але і для окремого підприємства, і навіть для його структурних підрозділів. Формування універсального апарату моделювання та прогнозування електроспоживання і потужності для різних рівнів ієрархії промислових підприємств дозволить:

- скоротити витрати на оплату спожитої електроенергії;
- якісно визначити вплив різних технологічних умов і факторів виробництва на електроспоживання;
- вибирати найбільш ефективні стратегії енергозбереження та напрямки заходів щодо економії електричної енергії.

В статті пропонується програмне забезпечення, що дозволить проводити моделювання прогнозування споживання електричної енергії об'єктами аеропорту.

---

### 4. Підходи щодо моделювання прогнозуванням споживання електричної енергії аеропортів

---

У широкому розумінні поняття якості прогнозу охоплює всі основні характеристики, такі як надійність, ймовірність і точність. Якість прогнозу у вузькому розумінні визначається ступенем стійкого розвитку об'єкту за траєкторіями, які визначаються прогнозом.

Методи моделювання передбачають побудову досить складної моделі майбутнього функціонування об'єкту прогнозування. Як вихідну інформацію тут використовують як дані про тенденції розвитку об'єктів, що прогнозуються, так і думки експертів про можливі майбутні способи й результати розвитку прогнозованої галузі. При цьому створюються умови застосування формального апарату математичної логіки, теорії графів, матричного аналізу.

Якісне прогнозування електроспоживання для авіапідприємств і аеропортів, в тому числі, надає наступні переваги:

- зниження штрафів за недостатню, або надлишкову оцінку прогнозування споживання електричної енергії на майбутній період;
- зменшення розриву між запланованими та фактичними значеннями обсягу електричної енергії;
- підвищення рівня якості управління електропостачанням;
- гнучкого вирішення задач, пов'язаних з економією електричної енергії,
- обґрунтованого розподілу лімітів потужності у системі електропостачання між споживачами.

Техніко-економічні показники роботи споживачів підрозділів аеропорту залежать від великої кількості різних факторів. Характерною рисою економічної інформації є її ймовірнісний характер. Об'єктивний вибір факторів та точність їх значень залежать від кваліфікаційного рівня фахівців щодо аналізуючого об'єкту. Тому будь-який показник має задаватися принаймні двома величинами: математичним очікуванням і дисперсією [11]. Найявність середньоквадратичної помилки спричиняє появу зони невизначеності у вихідній інформації і, як наслідок цього, у результатах проектно-планових рішень. Від якості прогнозування на рівні підприємств залежить величина собівартості їх продукції, а отже, і показники ефективності їх роботи.

Процес електроспоживання (ЕП) є складним випадковим нестационарним процесом, який може бути представлений декількома регулярними та нерегулярними (випадковими) величинами. Методом моделю-

вання ЕП, як випадкового нестационарного процесу, є декомпозиція початкового процесу на регулярну і нерегулярну складові. Нерегулярна складова характеризує випадкову непрогнозовану частину споживання та ймовірні відхилення фактичних значень ЕП. Визначення виду і параметрів прогнозуючої моделі виконується шляхом апроксимації відомих значень ЕП на ретроспективному інтервалі часу та на інтервалі попередження.

Споживачами електричної енергії аеропортів [12, 13] є об'єкти, задіяні у технологічних процесах, пов'язаних з обслуговуванням пасажирів та повітряних суден, управлінням повітряних суден (ПС), радіотехнічним забезпеченням та зв'язку, забезпеченням поштових вантажних перевезень, забезпеченням паливно-мастильних матеріалів, тепло- та санітарно-технічним забезпеченням, надійної роботи спеціального автотранспорту, забезпеченням загальноаеропортних процесів (допоміжні та комунально-побутові потреби підприємства тощо).

Структура загальних витрат електроенергії ( $W_{заг}$ ) в аеропортах має вираз:

$$W_{заг} = W_{осн.} + W_{доп.} = (W_{техн.} + W_{доп. сл.} + W_{обсл. р.}) + W_{доп.},$$

де  $W_{осн.}$  – витрати електричної енергії на основні потреби аеропорту;  $W_{доп.}$  – витрати електричної енергії на додаткові потреби (ремонт, обслуговування ТС);  $W_{техн.}$  – витрати на виконання головного технологічного процесу – авіап перевезення (витрати на освітлення та електричне обладнання аеровокзальних комплексів, вантажних терміналів, на роботу систем радіонавігації, управління повітряним рухом, роботу світлосигнальних систем аеродрому, освітлення перрону та місць стоянок ПС);  $W_{доп. сл.}$  – витрати електроенергії допоміжними службами підприємства (аеродромною, інженерно – авіаційною, служба спецтранспорту тощо);  $W_{обсл. р.}$  – витрати електричної енергії на обслуговування рейсів (зліт – посадка).

Витрати електричної енергії на основні потреби аеропорту визначаємо за формулою:

$$W_{осн.} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_{pi} \cdot k_{vi},$$

де  $T_{pi}$  – річна кількість годин роботи системи і-го приміщення;  $P_i$  – значення встановленої потужності споживача електричної енергії;  $k_{vi}$  – коефіцієнт використання споживача електричної енергії.

Приймачі електричної енергії аеропортів відрізняються різноманітністю. Це освітлювальні, нагрівальні установки, електродвигуни та радіоапаратура, система автоматики та обчислювальні машини, різноманітне технологічне устаткування тощо. Всі вони мають різні потужності, режими роботи, категорії і висувають різні вимоги до якості електроенергії. Найбільш наочно змінний характер потужності, споживаної аеропортом і окремими його об'єктами, спостерігається на графіках навантаження, що представляють залежність споживаної потужності групи ЕП в часі.

Тому для прогнозування витрати електроенергії підрозділів аеропорту пропонується використання ймовірнісного підходу.

### 5. Програмне забезпечення для прогнозування споживанням електричної енергії аеровокзального комплексу

На етапі статистичного аналізу та побудови емпіричної моделі процесу електроспоживання – здійснюється повномасштабна статистична обробка даних електроспоживання, яка включає взаємопов'язані процедури. Дані процедури дозволяють упорядковувати інформацію, виявляти в динаміці і наочно представляти об'єкти з аномальним електроспоживанням, ефективно здійснювати прогнозування електроспоживання окремими об'єктами та всім комплексом в цілому.

На етапі аналізу електроспоживання за спеціально розробленими формами запиту здійснюється збір даних про споживачів електроенергії. Це дозволяє отримати розгорнуту картину електроспоживання, виявити об'єкти, які забезпечуються електроенергією з порушенням існуючих організаційно-технічних вимог, підготувати електронну базу даних для багатфакторного аналізу.

З метою проведення якісного прогнозу обсягів споживання електричної енергії аеропорту прогнозування варто проводити окремих об'єктів аеропорту із врахуванням специфіки їх обладнання.

Автором розроблено програмний комплекс ймовірнісного прогнозування із застосуванням мови програмування *yiiframework* [14].

В програмі застосовується зручна ієрархічна система групування даних для забезпечення їх зручного введення. Складні елементи складаються із простих. Для простих елементів вводиться наступна інформація:

- встановлена потужність споживача електричної енергії (системи штучного освітлення), ( $P_n$ , Вт);
- розклад роботи приймача ( $t, c$ );
- ймовірність включення електроприймачів в даний період часу ( $p$ ).

Для вказаного періоду часу визначається:

- максимальне можливе значення активної потужності ( $W_c$ ) на одиницю часу, яке розраховується за формулою:

$$W_c = \int_0^{24} P dt;$$

- середнє значення потужності ( $P_{cp}$ ), яке дорівнює:

$$P_{cp} = \frac{W_c}{24} = \frac{\int_0^{24} P_n dt}{24};$$

- значення коефіцієнту навантаження ( $k_n$ ) для оцінювання ступеню нерівномірності добового графіка розраховуються за формулою:

$$k_n = \frac{P_{cp}}{P_{max}},$$

де  $P_{max}$  – максимальна потужність споживача електричної енергії;

- коефіцієнту максимуму потужності ( $k_m$ ) визначається за формулою:

$$k_m = \frac{P_{max}}{P_{cp}}.$$

Коефіцієнт максимуму активної потужності є інтегральною характеристикою добової нерівномірності навантаження електричної мережі. Чим він більше, тим гірше використовується електротехнічне обладнання (провідники, трансформатори).

Для підприємств зі змінною роботою коефіцієнти  $k_n$  і  $k_m$  розраховуються для найбільш завантаженої зміни.

За добовими графіками будують річні графіки навантаження, на яких відображається тривалість роботи кожного типу навантаження протягом року. Це дозволить окрім проведення якісного прогнозування, надати можливість регулювання режимів роботи обладнання та виявлення пікових навантажень.

Впродовж доби обчислюються й адаптивно прогнозуються поточні відхилення фактичних значень споживання електричної енергії від середнього графіка. Щоденний аналіз і наступні узагальнюючі дослідження форми добового графіка споживання електричної енергії дають змогу диспетчерському персоналу більш детально досліджувати причини та характер будь-яких змін у добових графіках.

Наступним етапом якісного функціонування системи управління ефективністю споживання електричної енергії аеропортів є вдосконалення прогнозування споживання електричної енергії аеропортів. На основі результатів прогнозування проводиться розроблення нормування питомих витрат електричної на основні види діяльності аеропорту.

### 6. Апробація результатів використаної моделі прогнозування обсягу споживання об'єктами аеропорту «Київ» (Жуляни, Україна) електричної енергії

Прогнозування здійснювалось для аеровокзального комплексу (на прикладі терміналу «А» [15]) аеропорту «Київ» (Жуляни, Україна). Вхідними даними є інформація про споживачі електричної енергії аеровокзального комплексу (технічні характеристики, період роботи на добу та ймовірність включення у вказаний період). Інтерфейси наведені на рис. 1 та рис. 2.

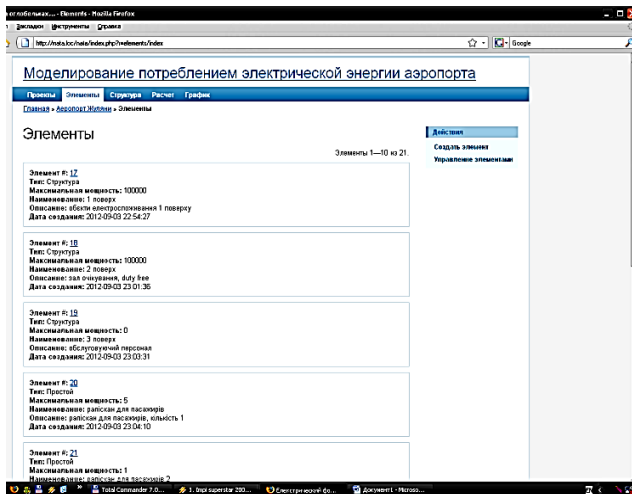


Рис. 1. Интерфейс введения данных до программного обеспечения

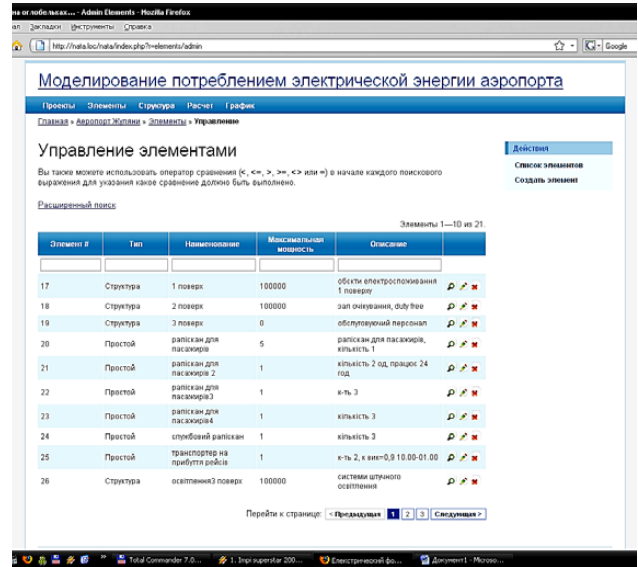


Рис. 2. Интерфейс отображения входных данных про споживачів електричної енергії аеровокзального комплексу

В результаті обробки вхідних даних програмою пропонуються добові графіки навантаження для обраного періоду на майбутній період (рис. 3).

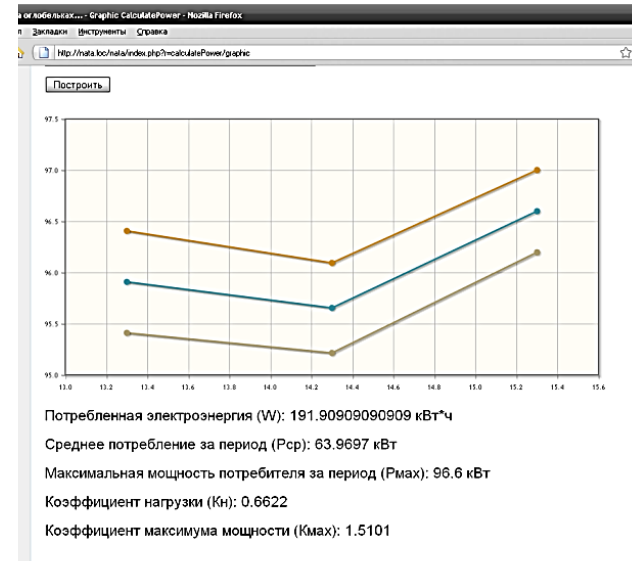


Рис. 3. Візуалізація результатів прогнозування споживання електричної енергії аеровокзального комплексу для обраного періоду

Для вказаного періоду часу будуються графіки максимально та мінімально можливих значень активної потужності на одиницю часу та визначені значення коефіцієнтів  $k_n$  і  $k_m$ . За отриманими результатами можна побудувати річні графіки навантаження із подальшою можливістю моделювання прогнозування обсягів споживання електричної енергії аеровокзального комплексу із передбаченням зміни регулювання режимів роботи систем штучного освітлення для уникнення пікових навантажень та заміни обладнання тощо.

Отримані результати мають практичну цінність і спрямовані на якісне та обґрунтоване:

- прогнозування обсягу споживання електричної енергії аеропорту в цілому та окремо його об'єктів;
- надання пропозицій щодо шляхів економії електричної енергії для аеровокзального комплексу;
- проведення прогнозу обсягів споживання електричної енергії на етапі реконструкції діючого комплексу та побудові нового комплексу;
- ефективне управління споживанням електричної енергії аеропорту.

---

## 7. Висновки

---

1. Запропоновано нові підходи щодо прогнозування споживання електричної енергії авіатранспортних

підприємств на основі теорії ймовірностей. Розроблено програмний комплекс, який дозволяє моделювати прогнозуванням споживання електричної енергії об'єктами аеропорту.

2. На основі отриманих результатів прогнозування запропоновано комплекс заходів щодо підвищення рівня ефективності енерговикористання об'єктами аеропорту, який включає в себе можливість регулювання режимів роботи обладнання та обґрунтування пропозицій щодо його удосконалення, або заміни обладнання. Модель та програмне забезпечення апробовано на статистичних даних аеропорту «Київ» (Жуляни, Україна) для аеровокзального комплексу.

---

## Література

1. Воркут, А. І. Логістичне управління в полі зору ТАУ. [Текст] / А. І. Воркут // Вісник НТУ. – 1999. – №2. – С. 33–37.
2. Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организация движения. [Текст] / В. В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
3. Алексеев, О. А. Логистика: [Текст]: уч. пос. / О. А. Алексеев – М.: ИНФРА–М, 1999. – 327 с.
4. Четверухин, Б. М. Прогнозирование состояния транспортных потоков. [Текст] / Б. М. Четверухин // Автомобильні дороги та дорожнє будівництво. – 1984. – № 34. – С. 31–35.
5. International Energy Outlook [Electronic resource] / April, 2004. – Available at: [www.eia.doe.gov/oiaf/index.htm](http://www.eia.doe.gov/oiaf/index.htm)
6. Vikko, N., Lautala, P. Short-term electric power production scheduling using simulated annealing algorithm [Text] : Proc. of the IASTED Inter. Sym / N. Vikko, P. Lautala // ACTA Press, Anaheim, CA, USA, 1990.
7. Чумаченко, Е. І. Алгоритм решения задачи прогнозирования [Текст] / Е. І. Чумаченко, В. С. Горбатюк // Искусственный интеллект. – 2012. – № 2. – С. 24–30.
8. Blok, K. Enhanced policies for the improvement of electricity efficiencies [Text] / K. Blok // Energy Policy 2005. – Vol. 33, Issue 18. – P. 1635–1641
9. Калинин, В. П. Оперативное прогнозирование и управление электропотреблением [Текст] : книга. / В. П. Калинин // Электрические нагрузки и электропотребление в новых условиях хозяйствования. – М.: Знание, 1989. – С. 108–111.
10. Кудрин, Б. И. Электроснабжение, оперативное и планируемое нормирование расхода электроэнергии, энергосбережение [Текст] / Б. И. Кудрин // Электрика. – 2007. – № 4. – С. 3–6.
11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: [Текст]: учеб. для вузов; 6-е изд. стер. / Е. С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
12. Величко, Ю. К. Электроснабжение аэропортов [Текст] / Ю. К. Величко. – К.: КМУТА, 1996. – 312 с.
13. Аеродроми [Текст] : дод. 14 видання 5 / Конвенція про міжнародну цивільну авіацію. – ІКАО, 2009. – 360 с.
14. Роберт, Лав Ядро Linux: описание процесса разработки = Linux kernel Development [Текст] : 3-е изд. / Лав Робертю – М.: Вильямс, 2012. – 496 с.
15. Офіційний сайт Міжнародного аеропорту «Київ» (Жуляни) [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www.airport.kiev.ua](http://www.airport.kiev.ua). – Назва з екрана.