

моральної изношенності електричних мереж України, змінення структури електропотреблення і прогнозованого поступового зростання обсягів потреблення електричної енергії всіма групами споживачів, особливо в житловому секторі (що обумовлено розвитком новітніх технологій і зростанням інноваційного попиту). Предложені математичні моделі і проведені розрахунки показали, що заміна сечення на більший дозволяє підвищити пропускну здатність кабельних ліній до 25% при заміні на одну ступінь і 50% при заміні на дві ступені.

**Ключові слова:** пропускну здатність кабельних ліній, сечення кабелів, режим роботи, втрати потужності, опір.

Надійшла 10.12.2013

Received 10.12.2013

УДК 62-83-52.003(082)

О.М. Закладний, канд. техн. наук, доцент;

О.О. Закладний, канд. техн. наук; В.О. Броніцький

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ З ЗАСТОСУВАННЯМ ТРИРІВНЕВОГО ПІ РЕГУЛЯТОРА З FUZZY LOGIC

У статті наведено спосіб керування вентильним двигуном, який забезпечує енергоефективну роботу привода у разі зміни навантаження і частоти обертання. Для досягнення високої якості регулювання вентильного двигуна в динамічних режимах запропоновано трирівневий ПІ регулятор з fuzzy logic. Виконано дослідження привода з використанням програмного забезпечення Simulink. Отримано результати для змінного моменту навантаження.

**Ключові слова:** вентильний двигун, енергоефективність, ПІ регулятор, fuzzy logic.

**Вступ.** Удосконалення регульованого електропривода сприяє технічному прогресу в провідних галузях промисловості. Механічні і комутаційні обмеження машин постійного струму, а також технологічні вимоги та необхідність підвищення експлуатаційної надійності виробничих установок і механізмів спричинили інтенсивний розвиток регульованого привода змінного струму із синхронними двигунами з постійними магнітами (СД), що на сьогодні є найбільш перспективним [1]. Вентильний двигун (ВД) з перетворювачем на повністю керованих елементах (IGBT, IGCT) отримав значне поширення завдяки високим значенням рівня енергоефективності, відмінним регульовальним властивостям, надійності і низьким експлуатаційним витратам. Замість колектора і щіток ВД містить перетворювач і датчик положення ротора (ДПР).

**Аналіз стану проблеми.** Для керування ВД використовується 3-фазний мостовий інвертор (рис.1). Для регулювання швидкості застосовується широтно-імпульсна модуляція з частотою, яка більша ніж у 10 разів перевищує максимальну частоту обертання двигуна. Смуга пропускання інвертора, керованого за положенням ротора СД, регулюється зміною кута випередження  $\beta_0$  або  $\beta$  (кути між струмом і, відповідно, – електрорушійною силою холостого ходу та напругою двигуна). Існують такі способи керування комутатором ВД [2].

Перший, найпростіший спосіб керування, полягає в підтриманні сталого значення кута випередження  $\beta_0 = \text{const}$ , де  $\beta_0 = \beta + \theta$ ;  $\theta$  – кут навантаження СД;  $\beta = \gamma + \delta$ ;  $\gamma$  – кут комутації;  $\delta$  – кут запасу (враховує похибку системи керування і тривалість відновлення запираючих властивостей електронних ключів комутатора). Для реалізації способу застосовується датчик положення ротора (ДПР), статор якого зсувається на необхідний кут випередження 40-60 ел. град. у напрямку проти обертання ротора. Величина кута залишається сталою у всіх режимах роботи двигуна і визначається максимальним значенням струму. Для другого способу керування підтримується сталим кут випередження  $\beta = \text{const}$ . Як джерело напруги синхронізації використовується датчик напруги статора, а для задання кута випередження – система керування зі змінною частотою розгортки.

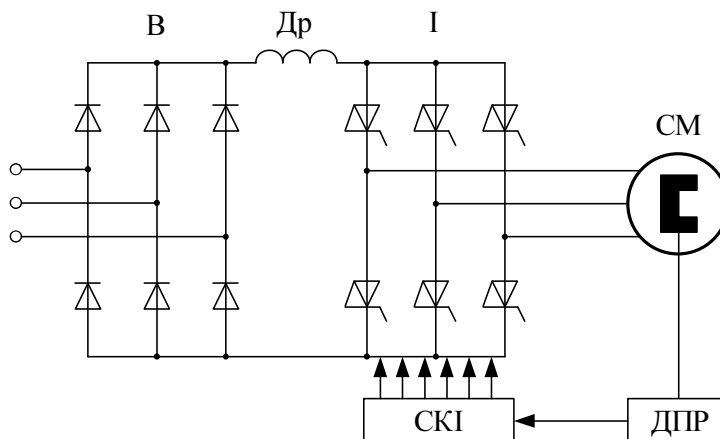


Рис. 1. Схема ВД.

Третій спосіб керування полягає в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні  $\beta = \beta_{\min} = f(\gamma)$  при  $\delta = \delta_{\min} = \text{const}$ . Цей спосіб керування вимагає наявності датчиків кутів комутації і навантаження, а також системи керування, синхронізованої за допомогою ДПР або напруги статора.

За першим і другим способами керування кут випередження лишається сталим у всіх режимах роботи привода й розраховується відповідно до максимальної величини навантаження.

**Метою роботи** є підвищення рівня енергоефективності вентильного двигуна та якості його регулювання в динамічних режимах шляхом застосування способу керування  $\beta = \beta_{\min} = f(\gamma)$  з трирівневим ПІ регулятором з fuzzy logic.

**Викладення основного матеріалу.** Якщо кут випередження ВД підтримувати сталим, то  $\cos\varphi$  залежить від навантаження  $\cos\varphi = \frac{\gamma}{2}$ , і СД працює з найбільшим коефіцієнтом потужності і найкращими енергетичними показниками лише в номінальному режимі. В режимі зменшення навантаження привод працює з погіршеними енергетичними показниками.

Навпаки, виконання способу керування  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  забезпечує роботу СД із максимальною величиною коефіцієнта потужності  $\varphi = \delta_{\min} + \frac{\gamma}{2}$ , тобто з мінімальним споживанням реактивної енергії і найкращими енергетичними показниками при всіх можливих значеннях моментів навантаження і частот обертання [3]. При реальних кутах комутації і малому часі відновлення ключів коефіцієнт потужності і ККД привода наближається до номінальних значень СД.

Але при регулюванні кута  $\beta$  система стає нелінійною, і її параметри в процесі роботи змінюються в деяких межах. Коефіцієнти регуляторів системи автоматичного керування (САК) вибираються для номінального режиму, тому необхідна якість системи забезпечується лише в середньому. Для досягнення оптимального динамічного і енергетичного режимів ВД пропонується застосування трирівневого ПІ регулятора з fuzzy logic згідно зі способом  $\beta = \beta_{\min} = f(\gamma)$ .

Розрахунки і експерименти показують, що для сталих значень струму збудження і кутів випередження, які лежать в межах

$$I_f \geq 0.8 I_f \text{ и } 20^\circ \leq \beta \leq 60^\circ,$$

ВД можна представити лінійним об'єктом [4]. За вказаних умов складна система нелінійних рівнянь приводиться до лінійної передатної функції, для чого необхідно апроксимувати розрахункові криві перехідного процесу лінійними диференціальними рівняннями необхідного порядку. Отримані в результаті реальної апроксимації передатні функції ВД з коефіцієнтами в числовому вигляді враховуватимуть весь набір початкових параметрів і залежностей системи, без додаткових припущень, які призводять до істотної відмінності їх від реального об'єкту.

Перехідним функціям частоти обертання і струму відповідають стандартні диференціальні рівняння другого порядку

$$T_3 T_4 \frac{d^2 I_{ВД}}{dt^2} + (T_3 + T_4) \frac{d\omega_p}{dt} + \omega_p = K_d U - K_{d1} I_c;$$

$$T_3 T_4 \frac{d^2 I_{ВД}}{dt^2} + (T_3 + T_4) \frac{dI_{ВД}}{dt} + I_{ВД} = I_c,$$

де  $K_d$  і  $K_{d1}$  - коефіцієнти передачі.

Якщо ввести позначення

$$T_M = T_3 + T_4; T_E T_M = T_3 T_4; T_M = J \frac{R_E}{K_e K_M}; T_E = \frac{L_E}{R_E};$$

$$K_M = C_M \cos \beta; K_e = C_e \cos \beta,$$

де  $T_M, T_E$  - еквівалентні електромеханічна і електромагнітна сталі часу;  $R_E, L_E$  - еквівалентні активний та індуктивний опори перетворювального кола.

Передатні функції ВД за регулюючою дією визначають для нульових початкових умов і за відсутності зовнішнього збурення. Представимо їх в операторній формі запису як відношення зображень по Лапласу (або Карсону) частоти обертання і струму машини до напруги, яка підводиться

$$W_{ВД}(p) = \frac{\omega_p(p)}{U(p)} = \frac{1}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1} \frac{C_e \cos \beta}{Jp};$$

$$W'_{ВД}(p) = \frac{I_{ВД}(p)}{U(p)} = \frac{C_e C_M \cos^2 \beta}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

При сталій напрузі знаходимо передавальні функції по збудженню

$$F_{ВД}(p) = \frac{\omega_p(p)}{I_c(p)} = \frac{R_E}{C_e \cos \beta} \frac{(T_E p + 1)}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1};$$

$$F'_{ВД}(p) = \frac{I_{ВД}(p)}{I_c(p)} = \frac{1}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

Регульовані величини записуємо в наступному вигляді

$$\omega(t) = W_{ВД}(p)U(t) - F_{ВД}(p)I_c; I_{ВД}(t) = W'_{ВД}(p)U(t) + F'_{ВД}(p)I_c.$$

Після перетворень

$$\omega(t) = \frac{1}{C_e \cos \beta} [U - I_c R_E (T_E p + 1)] \frac{1}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1};$$

$$I_{ВД}(t) = (U \frac{Jp}{C_e C_M \cos^2 \beta} + I_c) \frac{1}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

*Регулятор швидкості.* Швидкість обертання двигуна порівнюють з заданою, використовуючи суматор. Результируюча помилка  $W_e = W_r - W_r^*$  передається на ПІ регулятор, передатна функція якого

$$G_s(s) = K_p (1 + 1 / T_i s),$$

де  $T_i = K_p / K_i$  інтегральна стала часу;  $K_p, K_i$  — пропорційний і інтегральний коефіцієнти відповідно [5].

На рис. 2 наведено структуру моделі регулятора швидкості.

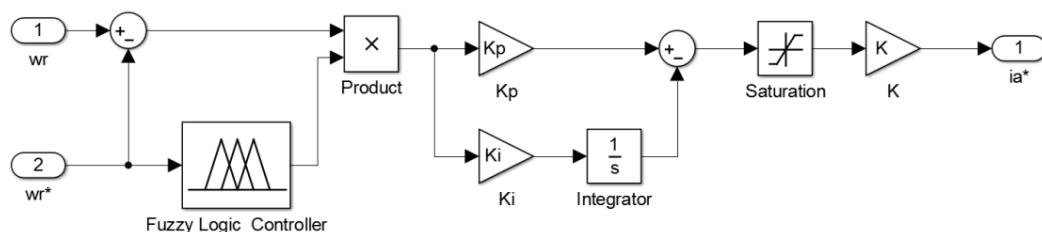


Рис 2. Модель регулятора швидкості

*Регулятор струму.* Задане значення струму порівнюють з фактичним струмом статора. Результат представляється у вигляді сталої в ПІ регуляторі з передатною функцією

$$G_s(s) = K_{pa}.$$

На рис. 3 наведено структуру моделі регулятора струму.

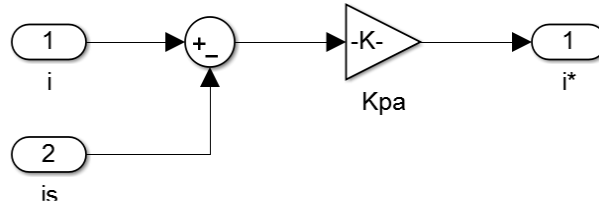


Рис. 3. Модель регулятора струму

*Регулятор з fuzzy logic.* Застосування нечітких контролерів є найбільш доцільним у випадку зміни параметрів системи, порівняно з класичними ПІ регуляторами. Запропоновано трирівневий ПІ регулятор нечіткої логіки для ВД (паралельно включено три ПІ регулятори нечіткої логіки одночасно). Основні функції нечіткої логіки – масштабування швидкості і формування сигналу помилки для ПІ регулятора.

Правило нечіткого керування (правило if-then) для нечіткої логіки: якщо  $\omega$  належить  $L_S$ , то  $e_L$  відповідає  $e$  (правило  $R_L$ ); якщо  $\omega$  належить  $L_M$ , то  $e_M$  відповідає  $e$  (правило  $R_M$ ); якщо  $\omega$  належить  $L_H$ , то  $e_H$  відповідає  $e$  (правило  $R_H$ ).  $R_L, R_M$  і  $R_H$  – правила керування для різної швидкості;  $L_S$  – рівень швидкості, що відповідає нижньому діапазону,  $L_M$  – рівень швидкості, що відповідає середньому діапазону,  $L_H$  – рівень швидкості, що відповідає верхньому діапазону.

Вихідний сигнал:  $e_L = e \cdot y_L$ ;  $e_M = e \cdot y_M$ ;  $e_H = e \cdot y_H$ .

Три ПІ регулятори формують три напруги команд ( $e_L, e_M$  і  $e_H$ ). На рис. 4 наведено структуру моделі регулятора швидкості з нечіткою логікою.

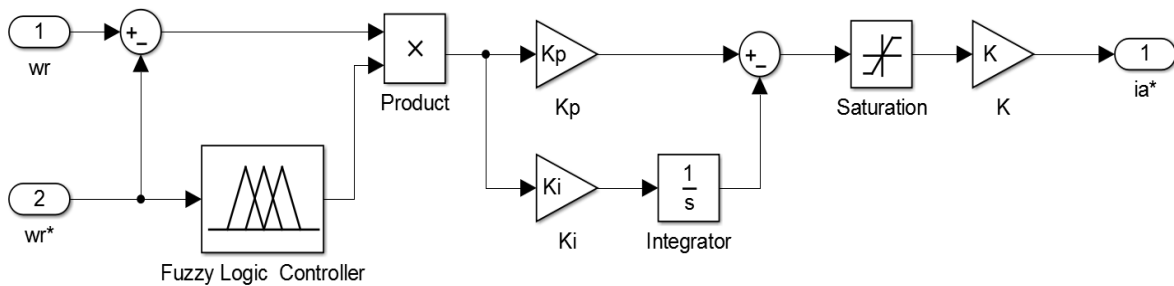


Рис. 4. ПІ-регулятор з нечіткою логікою

На рис. 5 зображено блок-схему нечіткої логіки Simulink. Результати моделювання наведено на рис. 5 для СД з постійними магнітами (номінальні дані: крутний момент – 7 Нм, потужність – 1.1 кВт, струм - 2.3 А, пусковий струм – 9.2 А, частота - 50 Гц, макс. зовнішній момент інерції – 0.013 кгм<sup>2</sup>).

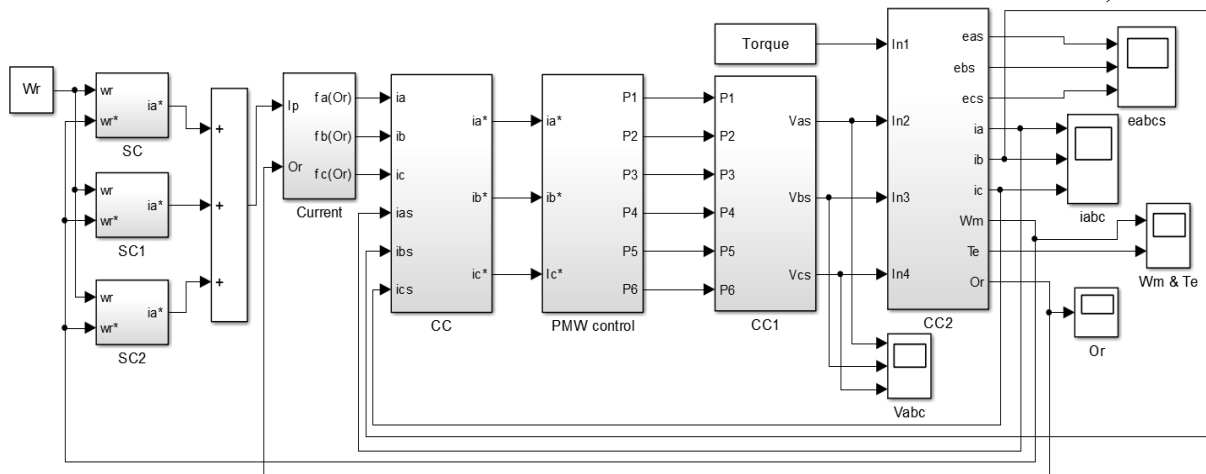


Рис. 5. Simulink блок-схема нечіткої логіки.

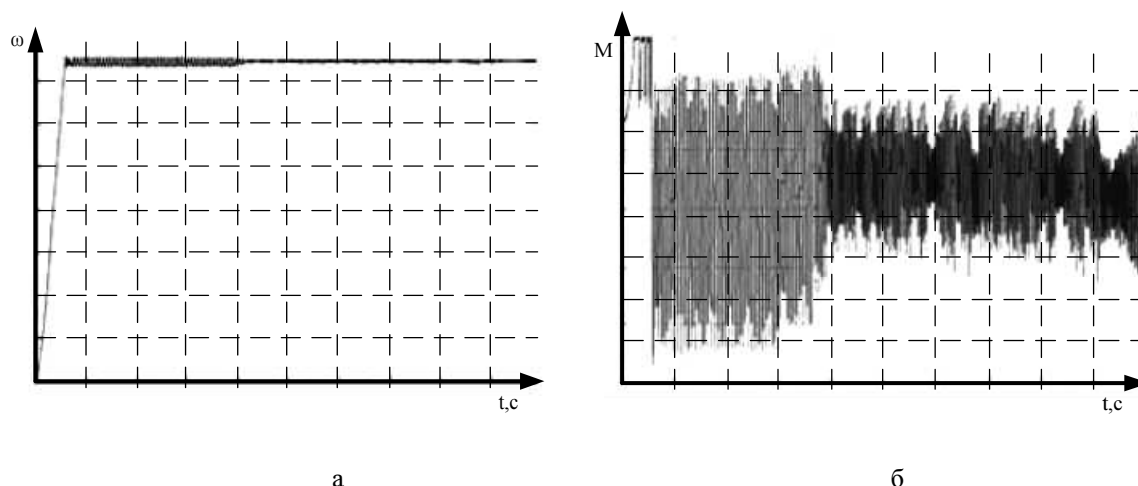


Рис. 6. Частота обертання (а) та електромагнітний момент (б) ротора зі змінним моментом навантаження

**Висновки.** Встановлено, що для досягнення оптимального динамічного і енергетичного режимів ВД необхідно використовувати адаптивне керування з дискретно змінними параметрами регуляторів, для чого систему підпорядкованого регулювання слід доповнити замкнутими контурами стеження і самоналагодження. У статті розглядається синтез трьохрівневого ПІ регулятора з fuzzy logic для керування швидкістю ВД. Результати дослідження, виконані для різних моментів навантаження, показують, що прийнята структура керування ВД з ПІ регулятором з нечіткою логікою відповідає вимогам до сучасних систем керування, які мають високу швидкодію.

Для досягнення оптимального динамічного і енергетичного режимів пропонується використовувати керування вентильним двигуном з застосуванням трьохрівневого ПІ регулятора з fuzzy logic згідно зі способом  $\beta = \beta_{\min} = f(\gamma)$ . Виконання зазначених умов відповідає найефективнішому використанню встановленої потужності електрообладнання і поліпшенню якості перетворення енергії ВД.

Отримані результати дозволять конструктору при виборі електропривода і мінімізації встановленої потужності устаткування достатньо просто і з високою точністю врахувати вплив параметрів комутатора, машини і способу керування на якість перетворення енергії у ВД.

#### Список літератури

1. Закладний О.М., Прокопенко В.В., Закладний О.О. Електропривод: Навч. Посіб. // – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 351с.
2. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. - К: Кондор, 2005. - 408 с.
3. Закладний О.М., Закладний О.О. Вплив способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії вентильним двигуном // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. 2008. №3. С. 35-39.
4. Закладной А.Н., Передрий В.Ю., Гром В.В., Петин И.В. Разработка и исследования математической модели вентильного двигателя / Энергетика: економіка, технології, екологія. 2004, №.2. С. 46-54.
5. Speed control of brushless dc motor by using fuzzy logic pi controller, m. V. Ramesh, j. Amarnath, s. Kamakshaiyah and g. S. Rao // vol. 6, no. 9, september 2011 arpn journal of engineering and applied sciences, ISSN 1819-6608

**A.Zakladnyi, O. Zakladnyi, V. Bronyts'kyy**

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»**

#### **CONTROL BRUSHLESS WITH THE USE OF THREE-LEVEL PI CONTROLLER WITH FUZZY LOGIC**

*The article presents a way to control brushless motor which provides drive energy efficient operation when changing load and speed. To achieve high quality regulation valve engine in dynamic mode proposed three-level PI controller with fuzzy logic. The research drive using software Simulink. The results for the variable moment load.*

**Keywords:** valve engine efficiency, PI controller, fuzzy logic.

1. Zakladnyi O.M., Prokopenko V.V., Zakladnyi O.O. Electric drive: manual. guidances // – К.: Vydavnytstvo «Osvita Ukrayiny», 2009. – 351p.

2. Zakladnyi O.M., Prakhovnyk A.V., Solovey O.I. Energy saving by means of industrial electric: Tutorial. - K: Kondor, 2005. - 408 p.
3. Zakladnyy O.M., Zakladnyy O.O. Influence of ways to manage the switch to electric conversion quality brushless // Informatsiynyy zbirnyk «Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika» Promelektro. 2008. #3. p. 35-39.
4. Zakladnoy A. N., Peredryy V.Yu., Hrom V.V., Petyn Y.V. Development and the study matematycheskoy models the engine valve // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2004, #.2. p. 46-54.
5. Speed control of brushless dc motor by using fuzzy logic pi controller, m. V. Ramesh, j. Amarnath, s. Kamakshaiyah and g. S. Rao // vol. 6, no. 9, september 2011 arpn journal of engineering and applied sciences, ISSN 1819-6608

УДК 62-83-52.003(082)

**А.Н. Закладной**, канд. техн. наук, доцент;

**О.А. Закладной**, канд. техн. наук; **В.О. Броницкий**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЁХУРОВНЕВОГО  
ПИ РЕГУЛЯТОРА С FUZZY LOGIC**

*В статье предлагается способ управления вентиляльным двигателем, обеспечивающий энергоэффективную работу привода в случае изменения нагрузки и частоты вращения. Для достижения высокого качества регулирования вентиляльного двигателя в динамических режимах предложен трёхуровневый ПИ регулятор с fuzzy logic. Выполнены исследования привода с использованием программного обеспечения Simulink. Получены результаты для переменного момента нагрузки.*

**Ключевые слова:** вентиляльный двигатель, энергоэффективность, ПИ регулятор, fuzzy logic.

Надійшла 20.11.2013

Received 20.11.2013

УДК 621.311.153

**В.П.Калінчик**, канд. техн. наук, доцент; **О.В. Скачок**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

**ОЦІНКА ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИРІВНЮВАННЯ ГРАФІКІВ  
НАВАНТАЖЕННЯ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ**

*Зроблений загальний аналіз стану енергетики України. Виявлено пріоритетну галузь в якій можна досягти максимум ефекту при мінімальних витратах і зусиллях з точки зору вирівнювання графіку електричного навантаження об'єднаної енергосистеми України. Проведений аналіз існуючої системи вирівнювання графіку електричного навантаження промислових підприємств. Проведений аналіз методів оцінки нерівномірності графіку електричного навантаження та критерію його рівномірності. Виявлені ряд недоліків як в методах оцінки нерівномірності графіку електричного навантаження так і в критерії його рівномірності. Зроблені відповідні висновки.*

**Ключові слова:** електропостачання, графік електричного навантаження, критерій рівномірності.

**Вступ.** Добовий графік електричного навантаження (ГЕН) об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України має характерну нерівномірність у часі (рисунок 1), що поділяється на три частини: зони піку, напівпіку та провалу [6].

Наведена нерівномірність ГЕН енергосистеми ускладнює забезпечення балансу попиту і пропозиції на електроенергію у вузлах її споживання та недопущення зміни частоти мережі змінного струму і розрахункового рівня напруги (тобто недопущення переходу енергосистеми до аварійного стану). Крім того, через технологічні вимоги генеруючих станцій не можливо оперативно та оптимально чітко забезпечити покриття ГЕН енергосистеми у кожній її точці доби. Це призводить до значних втрат на використання природних ресурсів при генерації електричної енергії.