

УДК 621.311

П. Д. Лежнюк¹
А. А. Бартецький¹
І. А. Бартецька¹

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖУ НА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІЙ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТУ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано математичну модель оптимізації процесу перетворення енергії фотоелектричної станції. Оскільки фотоелектричні станції є нестабільним джерелом енергії, в процесі експлуатації, відповідно до прогнозованого графіка генерування, можуть виникати провали генерування або пере-генерування, що є похибкою генерування, обумовленою ймовірнісним характером кліматичних факторів, оскільки погодні умови суттєво впливають на генерування фотоелектричних станцій. Тому виникає необхідність оптимізації роботи фотоелектричних станцій під час передачі електричної енергії в мережу. Встановлено, що для реалізації математичної моделі оптимізації роботи нестабільних джерел електроенергії, зокрема фотоелектричних станцій, підходить математичний апарат нечітких множин. В результаті синтезовано математичну модель оптимізації роботи фотоелектричних станцій, реалізовану з використанням математичного апарату нечітких множин. Застосування математичної моделі дозволяє враховувати вплив навколишнього середовища та розподільних електричних мереж на роботу фотоелектричних станцій в процесі генерування та передачі електричної енергії в мережу. Для забезпечення максимального відбору згенерованої енергії фотоелектричної станції та для уникнення аварійної ситуації, у разі виникнення перенапруги в локальній мережі, проведено аналіз факторів, які впливають на перетворення енергії на фотоелектричній станції та які є визначальними в процесі її передачі в мережу. На основі лінгвістичної оцінки факторів впливу на роботу фотоелектричної станції сформовано базу знань та нечіткі логічні рівняння для знаходження вагових коефіцієнтів. На основі отриманих рівнянь розроблено та відлагоджено комп'ютерну модель нечіткого регулятора за допомогою бібліотеки пакету прикладних програм Matlab Fuzzy Logic Toolbox. В результаті моделювання зміни вхідних величин, які характеризують фактори впливу на роботу фотоелектричної станції, на виході регулятора визначається коефіцієнт регулювання, який в подальшому необхідно використовувати для регулювання інвертора під час генерування електричної енергії у мережу.

Ключові слова: фотоелектрична станція, fuzzy-регулятор, оптимізація, мережевий інвертор.

Вступ

Згідно з проектом Енергетичної стратегії України до 2030 р. одним з основних напрямків розвитку енергетичної галузі є використання енергії вітру, гідроенергії, сонячної, геотермальної енергії, утилізація відходів біомаси та твердих побутових відходів шляхом спалювання або одержання біогазу для виробництва тепла й електроенергії, а також використання біогазу як моторного палива [1].

В результаті інтегрування різнотипних відновлюваних джерел енергії у електричну систему виникає проблема керування їх сумісною роботою із забезпеченням максимальної ефективності перетворення первинної енергії. Для ефективного розв'язання задачі слід враховувати зміни параметрів навколишнього середовища такі як інсоляція, температура навколишнього середовища, режими електроспоживання, вплив електричних мереж тощо. Тому синтез математичних та

комп'ютерних моделей, які б дозволили реалізувати такі системи керування, є актуальним.

Аналіз попередніх досліджень

Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток нечітких регуляторів для різноманітних об'єктів. Розроблено велику кількість моделей нечітких регуляторів, які допомагають керувати складними процесами. В роботі [2] автори використали апарат нечіткої логіки та нейронних мереж для автоматизації процесу керування енергопостачанням від альтернативних джерел енергії. Цей підхід не придатний для розв'язання задачі оптимізації роботи сонячних електростанцій в локальних електричних мережах, оскільки не враховуються критерії оптимізації та параметри, які впливають на генерування електричної енергії сонячними електростанціями. У статті [3] пропонується використання математичного апарату нечітких множин для моделювання невизначеності в вихідних змінних за наявності невизначеностей у вхідних змінних. Але в роботі авторами не висвітлено експлуатацію мереж з розподіленими відновлювальними джерелами електроенергії. Авторами роботи [4] запропоновано систему автоматизованого керування ВДЕ в електричних мережах на основі SMART Grid для досягнення загального техніко-економічного ефекту. Сформовані умови оптимальності можуть бути використані для керування генеруванням малих гідроелектростанцій. Проте, для вирішення проблеми оптимізації первинного перетворення на СЕС через значно більший вплив випадкових факторів навколишнього середовища такий підхід не може бути використаний.

У роботі [5] авторами запропоновано модель з використанням нечітких множин, що дозволяє реалізувати систему керування фотоелектричною установкою, базуючись на визначенні оптимальної споживаної потужності та рівня заряду акумуляторної батареї. Але наведена модель не враховує дію окремих факторів навколишнього середовища та пропускну здатність електричної мережі, що робить таку модель непридатною для розв'язання поставленої задачі.

В роботі [6] авторами запропоновано математичні моделі та методи оптимального керування РДЕ в умовах балансуєчого ринку. Однією з задач оптимізації є забезпечення максимальної видачі електроенергії керованими джерелами, незалежно від режимів роботи електромереж та умовно-керуваних ВДЕ.

$$\int_{t_0}^{t_k} C(t) k_{tr} \sum_{i=1}^n P_i(t) dt \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $[t_0; t_k]$ — інтервал часу; $C(t)$ — багатоступеневий тариф енергоринку; k_{tr} — коефіцієнт, що враховує зменшення прибутку для РДЕ за рахунок компенсації втрат на транспортування електроенергії мережами, n — кількість керованих ВДЕ, $P_i(t)$ — потужність керованих джерел енергії. Це є одним з критеріїв оптимізації, але повної кількості параметрів не враховується. В статті подано один з критеріїв оптимізації, але не враховано низку параметрів, від яких залежить генерування. В роботі [7] автори пропонують алгоритм пошуку режиму роботи сонячного модуля в районі точки відбору максимальної потужності. Такий підхід не дозволяє враховувати генерувальну спроможність сонячної електростанції в цілому, на яку впливають різні типи чинників навколишнього середовища.

В роботі [8] авторами викладено методику розв'язання задачі прогнозування добових графіків споживання електричної потужності, що в свою чергу також залежить від швидкозмінних погодних факторів, із застосуванням математичного апарату нечітких множин. В роботі авторами зазначається, що використання цього математичного апарату дозволяє вирішити такі основні проблеми, властиві завданню прогнозування добових графіків споживання електричної потужності:

1) практична відсутність статистичної стійкості для даних електроспоживання в сучасних умовах, що ставить під сумнів рівень довіри до моделей, побудованих методами теорії ймовірностей і класичної математичної статистики;

2) недостатню достовірність представлення результатів прогнозування у вигляді детермінованих графіків електричних навантажень, оскільки фактори, що впливають, мають якісну природу і складно піддаються формалізації із застосуванням традиційних методів моделювання.

Застосування цього підходу дає можливість усунути низку недоліків, характерних для традиційних методів. По-перше, нечіткі множини є зручним засобом формалізації величин, що мають якісну природу, і їх застосування для формування нечіткого прогнозу найприйнятніше в умовах невизначеності параметрів прогнозування. По-друге, велике значення має ефективність моделі

прогнозування та достовірність прогнозу, що вимагає вибору відповідних методів для її побудови.

Враховуючи аналіз попередніх досліджень, можна зробити висновок, що відомі методи та моделі оптимізації не дають можливості здійснення оперативного керування відповідно до поставленої мети. Вирішення цієї проблеми потребує застосування методів, які дадуть можливість врахувати імовірнісний та нечіткий характер зміни погодних факторів, які впливають на роботу фотоелектростанцій.

Отже, метою дослідження є розробка математичної моделі для аналізу факторів, що впливають на генерування ФЕС.

Результати дослідження

На генерування потужності сонячної електричної станції впливає низка чинників: пропускна здатність електричної мережі, відносна вологість повітря, висота сонця над горизонтом, інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні фотопанелі, тривалість світлового дня, запиленість поверхні фотогальванічних панелей, температура навколишнього середовища, рівень напруги на шинах розподільного пристрою сонячної станції.

Пропускна здатність електричної мережі відіграє важливу роль для оптимізації генерування потужності відновлюваними джерелами енергії, оскільки необхідно знайти такі режими на інтервалі часу $[t_0; t_k]$, які забезпечили б максимальну видачу потужності від ВДЕ без критичного перевантаження основного обладнання мереж та порушення стійкості роботи системи.

Вплив параметрів навколишнього середовища є визначальним. Відносна вологість повітря впливає на довжину шляху променів сонця у повітрі, а отже, на інтенсивність поглинання первинної енергії. Кількість сонячної енергії, яка надходить на земну поверхню, прямо пропорційна куту падіння променів. При проходженні крізь атмосферу Землі інтенсивність сонячного випромінювання зменшується через його поглинання, розсіювання та відбивання через взаємодію з частинками пилу, з киснем, озonom, вуглекислим газом, парами води. Від інтенсивності сонячного випромінювання залежить яка кількість сонячної енергії досягне поверхні землі [9]. Від тривалості світлового дня залежить тривалість генерування потужності сонячних електричних станцій. Від забрудненості поверхні фотогальванічних панелей залежить кількість сонячної енергії, що буде потрапляти на панель.

Для здійснення оперативного керування необхідно постійно отримувати кліматичні дані. Їх можна періодично отримувати з місцевих метеопостів або через інформаційні мережі Smart Grid систем.

На рис. 1 показано структурну схему функціонування системи інтелектуального керування інвертором сонячної фотоелектричної станції.

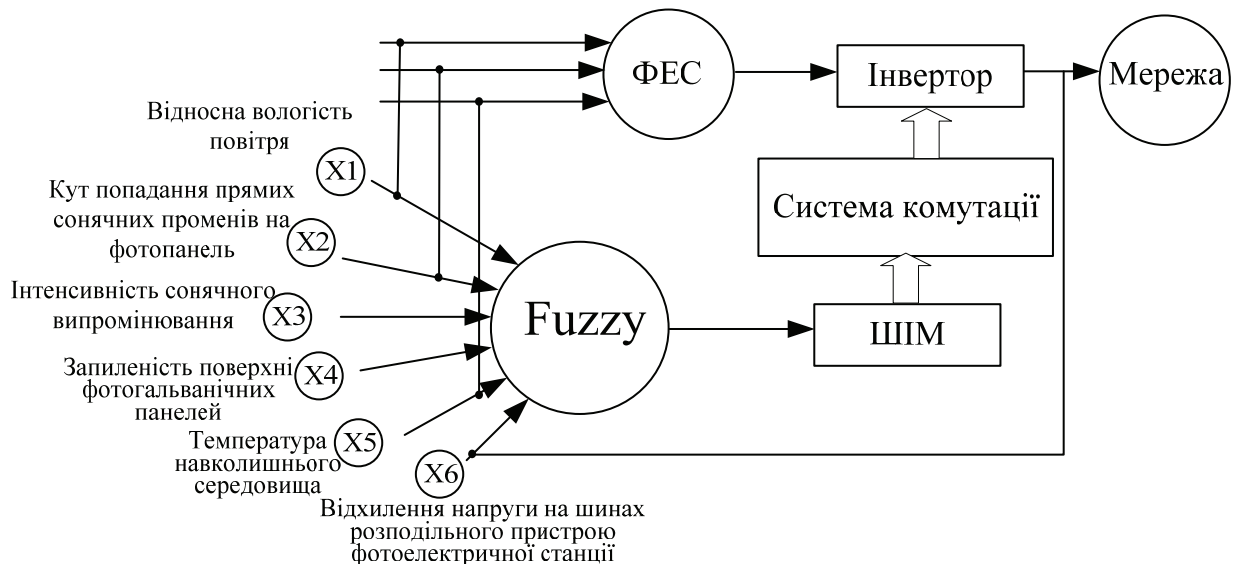


Рис. 1. Структурна схема системи керування перетворення енергії на ФЕС

Під впливом параметрів, показаних на рис. 1, значення напруги на виході фотогальванічного елемента постійно змінюється. Для забезпечення максимального відбору згенерованої енергії сонячної електричної станції та для уникнення аварійної ситуації, у разі виникнення перенапруги в

локальній мережі, виникає необхідність регулювання вихідної напруги інвертора. Регулююча дія створюється інтелектуальним Fuzzy-регулятором в режимі реального часу. Сигнал з виходу якого надходить на широтно-імпульсний модулятор (ШІМ), який формує задавальний сигнал для системи комутації транзисторними ключами мережевого інвертора.

Для побудови нечіткої моделі виділено параметри $X_1 \dots X_6$. Використано також лінгвістичну оцінку відповідно до термів, поданих в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри математичної моделі для врахування зовнішнього впливу на генерування ФЕС

Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
X1	Відносна вологість повітря	0...100 %	Низька (Н) Середня (С) Висока (В)
X2	Кут попадання прямих сонячних променів на фотопанель	0... 90°	Низька (Н) Середня (С) Висока (В)
X3	Інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні панелі метеостанції	0...100 %	Низька (Н) Середня (С) Висока (В)
X4	Запиленість поверхні фотогальванічних панелей	0...100 %	Низька (Н) Середня (С) Висока (В)
X5	Температура навколишнього середовища	20...40 °С	Низька (Н) Середня (С) Висока (В)
X6	Відхилення напруги на шинах розподільного пристрою фотоелектричної станції	±5 % Уном	Низька (Н) Середня (С) Висока (В)

Ваговий коефіцієнт визначено на таких рівнях (терма): y_1 — низький, y_2 — середній, y_3 — високий. Структура моделі визначення вагового коефіцієнта відповідає співвідношенню:

$$y = f_y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6). \quad (2)$$

Для лінгвістичної оцінки входних чинників $X_1 \dots X_6$ використано нечіткі терми. Вони показані у вигляді нечітких множин, використовуючи модель функцій належності (ФН) [10]

$$\mu^T(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (3)$$

де c — координата максимуму функції; σ — коефіцієнт концентрації-розтягування.

Створено нечітку базу знань, користуючись введеними термами, фрагмент якої поданий в табл. 2.

Таблиця 2

Фрагмент нечіткої бази знань для вагового коефіцієнта y_1

X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y
В	Н	Н	В	В	В	Y1
С	Н	Н	В	В	В	
Н	Н	Н	В	В	В	
В	С	С	С	С	В	
С	С	С	С	С	В	
Н	С	С	С	С	В	
В	В	С	С	С	В	
...	

Ключовим параметром є рівень напруги на шинах розподільного пристрою.

Нечіткі логічні рівняння моделі знаходження вагового коефіцієнта y_1 мають вигляд

$$\begin{aligned} \mu^{y^1}(y) = & \left[\left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \right. \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \\ & \left. \left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

У табл. 2 покажемо фрагмент нечіткої бази знань для вагового коефіцієнта у2.

Таблиця 3

Фрагмент нечіткої бази знань для вагового коефіцієнта у2

X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y
H	B	B	H	H	C	Y2
C	B	B	H	H	C	
H	C	B	H	H	C	
H	B	C	H	H	C	
C	C	C	C	C	C	
H	B	B	H	C	C	
B	C	C	C	C	B	
B	H	C	C	C	B	
...	

$$\begin{aligned} \mu^{y^2}(y) = & \left[\left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \right) \vee \right. \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \vee \\ & \left. \left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Наведемо фрагмент нечіткої бази знань для вагового коефіцієнта у3.

Таблиця 4

Фрагмент нечіткої бази знань для вагового коефіцієнта у3

X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y
H	B	B	H	H	H	Y3
H	B	B	H	C	H	
H	C	B	H	H	H	
C	B	B	C	C	H	
C	C	C	C	C	H	
B	H	H	B	B	H	
C	C	H	C	C	H	
B	H	H	B	B	H	
...	

$$\begin{aligned} \mu^{y^3}(y) = & \left[\left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \right. \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \\ & \left(\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \vee \\ & \left. \left(\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Подальшим кроком буде операція агрегування підумови. Метою цього етапу є визначення ступеня істинності умов для кожного правила системи нечіткого виведення. Спрощено для кожної умови знаходимо мінімальне значення істинності всіх її підумов.

На етапі активізації підзаклучень відбувається перехід від умов до підзаклучень. Для кожного підзаклучення знаходиться ступінь істинності

Потім знову, кожному i -му підзаклученню зіставляється безліч ступенів істинності з новою функцією належності. Цей метод називається *min*-активізацією, який формально записується в такий спосіб:

$$\mu'_i(x) = \min \{d_i, \mu_i(x)\}, \quad (7)$$

де: $\mu'_i(x)$ — «активізована» функція належності; $\mu_i(x)$ — функція належності терма; d_i — ступінь істинності i -го підзаклучення.

Отже, мета цього етапу — це отримання сукупності «активізованих» нечітких множин для кожного з підзаклучень в базі правил.

Метою етапу акумуляції висновків є отримання нечіткої множини для кожної з вихідних змінних.

Зауважимо, що ваги правил не зазначено, оскільки під час грубого налагодження їх значення дорівнюють одиницям. Тепер, фіксуючи конкретні вхідні параметри моделі та застосовуючи запропоновану модель, для визначення чіткого значення вагового коефіцієнта регулювання інвертора фотоелектричної станції необхідно застосовувати один з відомих методів дефазифікації [10], наприклад, метод «центра ваги». Зазначимо, що на значення вихідного результату можуть впливати якість правил у нечіткій базі знань, форми функцій належності, метод дефазифікації та способи виконання нечітко-логічних операцій. Крім того, доцільно параметри моделі оптимізувати, наприклад, шляхом застосування генетичного алгоритму [8].

Мета дефазифікації — отримати кількісне значення (*crisp value*) для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Формально, це відбувається в такий спосіб. Розглядається i -та вихідна змінна і відноситься до неї безліч E_i ($i = 1 \dots s$). Потім за допомогою методу дефазифікації знаходиться підсумкове кількісне значення вихідної змінної. У цій реалізації алгоритму використовується метод центру тяжіння, в якому значення i -ї вихідної змінної розраховується за формулою

$$y_i = \frac{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} x \cdot \mu_i(x) dx}{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} \mu_i(x) dx}, \quad (8)$$

де: $\mu_i(x)$ — функція належності відповідного нечіткого безлічі E_i ; Min і Max — кордони універсуму нечітких змінних; y_i — результат дефазифікації.

За наведеними рівняннями у пакеті прикладних програм (ППП) Matlab відлагодимо роботу математичної моделі. Вона враховує фактори зовнішнього впливу під час генерування електричної енергії фотоелектричною станцією. База правил описана на основі нечітких логічних рівнянь моделі знаходження вагового коефіцієнта. Налаштування моделі здійснено за допомогою бібліотеки ППП Matlab Fuzzy Logic Toolbox [12] (рис. 2) та (рис. 3).

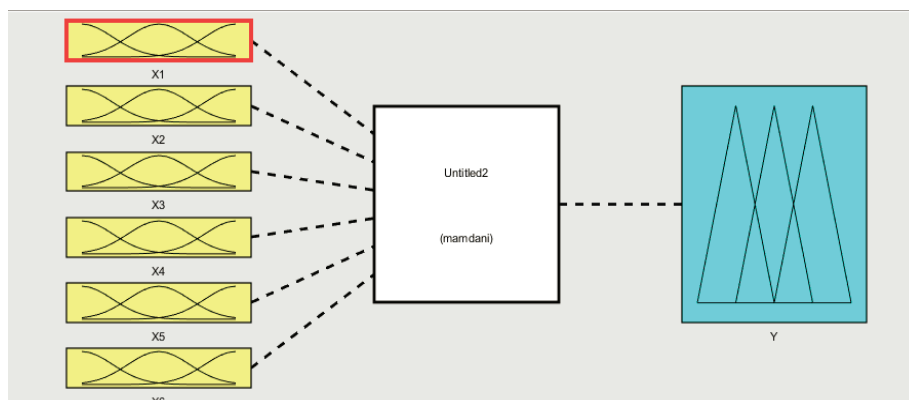


Рис. 2. Структурна схема нечіткого регулятора в ППП Matlab Fuzzy Logic Toolbox

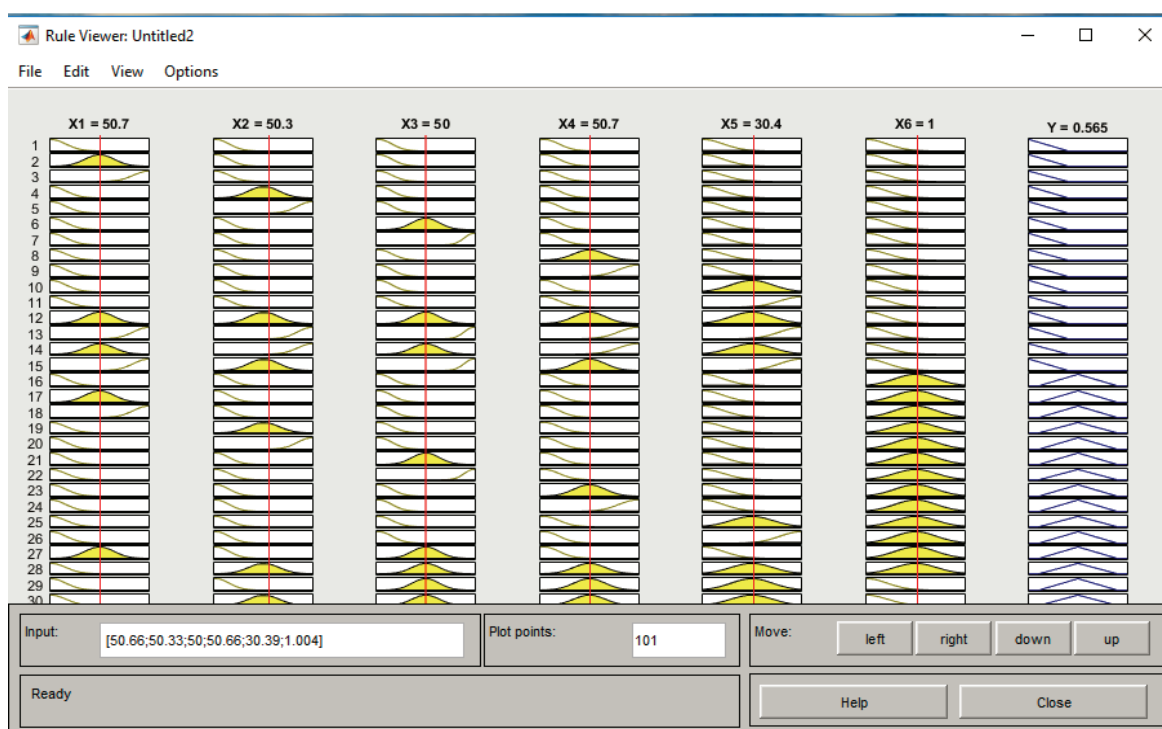


Рис. 3. Фрагмент результатів моделювання роботи нечіткого регулятора в ППП Matlab Fuzzy Logic Toolbox

Отже, в результаті моделювання роботи регулятора (рис. 3) за отриманих значень кліматичних чинників на виході визначається коефіцієнт регулювання, який в подальшому необхідно використовувати для регулювання інвертора під час генерування електричної енергії у мережу.

Висновки

Запропоновано математичну модель оптимізації процесу перетворення енергії на фотоелектричній станції з використанням апарату нечіткої логіки, що дозволяє досліджувати вплив окремих факторів на генерування ФЕС і відповідним чином визначати коригувальні дії щодо вироблення ними електроенергії. Розроблено комп'ютерну модель в ППП Matlab Fuzzy Logic Toolbox, яка дозволяє налагоджувати нечіткий регулятор інвертора фотоелектричної станції і підтримувати оптимальний графік генерування ФЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] О. Ю. Амосов, та Н. Л. Гавкалова, «Проблема ресурсозбереження в Україні та шляхи її вирішення,» у *Розвиток системи державного управління в Україні*, 2011.

[2] О. П. Голик, та Ю. Б. Беляєв, «Нейромережна адаптація системи автоматичного керування процесом автономного енергопостачання від альтернативних джерел енергії,» *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, № 1, с. 44-52, 2014.

[3] P. R. Bijwe, Senior Member, and G. K. Viswanadha Raju, "Fuzzy Distribution Power Flow for Weakly Meshed Sys-

tems,” *IEEE Transaction on power systems*, vol. 21, no. 4, 2006.

[4] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук, та І. В. Котилко, «Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії з використанням SMART GRID технологій», *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*, № 2, с. 17-20, 2014.

[5] James A. Momoh, Abdul R. Ofoli, “Loadmanagment and control of the photovoltaic (PV) system using fuzzy logic,” *FEIIEEE, Power Engineering LESCOPE '01, Large Engineering Systems Conference*, on 11-13 July 2001.

[6] П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, та В. В. Кулик, «Оптимізація режиму розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії», *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, № 11 (86), с. 250-254, 2011.

[7] С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, вип. 1, с. 75-81, 2016.

[8] Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, и А. П. Ротштейн, *Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002.

[9] *Загальні відомості про взаємодію електромагнітного випромінювання Сонця з атмосферою Землі*, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://poznayka.org/s9922t1.html> .

[10] А. П. Ротштейн, *Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.

[11] С. Д. Штовба, *Проектирование нечетких систем средствами MATLAB*. Москва, Россия: Телеком, 2007.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.03.2018

Лежнюк Петро Дем'янович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій і систем;
Бартетський Андрій Анатолійович — канд. техн. наук, асистент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті;

Бартетська Ірина Анатоліївна — аспірант кафедри електричних станцій та систем, e-mail: bartetskayairina@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

P. D. Lezhniuk¹
A. A. Bartetskyi¹
I. A. Bartetska¹

Mathematical Model of Optimization Process of Generating Electricity to the Grid with Solar Power Plants with Use of Apparatus of Fuzzy Sets

¹Vinnytsia National Technical University

There has been proposed the mathematical model for optimizing the energy conversion of a photovoltaic station in this article. A photovoltaic power plant is an unstable source of energy. During operation, according to the predicted generation schedule, there may be dips in the generation or regeneration, which is the inaccuracy of generation that is caused by the probabilistic nature of climatic factors, since weather conditions have a significant effect on the generation of photovoltaic stations. Therefore, there is a need to optimize the work of photovoltaic power plants in the transmission of electrical energy to the network. It was found that the mathematical apparatus of fuzzy sets fits perfectly into the mathematical model for optimizing the operation of unstable power sources, in particular photovoltaic stations. As a result, a mathematical model for optimizing the operation of photovoltaic stations was synthesized, which was realized using a mathematical apparatus of fuzzy sets. The application of the mathematical model allows takes into account the influence of the environment and distribution electric networks on the operation of photovoltaic stations in the process of generating and transferring electrical energy to the grid. To ensure the maximum selection of the generated photovoltaic power and to avoid an emergency situation, in the event of overvoltage in the local network, an analysis was made of the factors affecting the energy conversion at the photovoltaic station and which are crucial in the process of this transmission to the network. Based on the linguistic evaluation of the factors influencing the operation of the photovoltaic power station, a knowledge base and fuzzy logical equations were derived to find the weight coefficients. Based on the equations, the computer model of the fuzzy controller was developed and debugged using the Matlab-Fuzzy Logic Toolbox software package library. As a result of modeling the change in the input values characterizing the influence factors on the operation of the photovoltaic station, a regulating factor is formed at the output of the regulator, which in the future must be used to control the inverter when generating electricity to the network.

Keywords: photovoltaic power station, fuzzy-regulator, optimization, network inverter.

Lezhniuk Petro D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Power Plants and Systems;
Bartetskyi Andrii A. — Cand. Sc. (Eng), Assistant of the Chair of Electromechanical Automation Systems in Industry and Transport;
Bartetska Iryna A. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Plants and Systems, e-mail: bartetskayairina@gmail.com

П. Д. Лежнюк¹
А. А. Бартецкий¹
И. А. Бартецкая¹

Математическая модель оптимизации процесса генерирования электроэнергии в сеть на фотоэлектрической станции с использованием аппарата нечетких множеств

¹Винницкий национальный технический университет

Предложена математическая модель оптимизации процесса преобразования энергии фотоэлектрической станции. Поскольку фотоэлектрические станции являются нестабильным источником энергии, в процессе эксплуатации, в соответствии с прогнозируемым графиком генерации, могут возникать провалы генерирования или перегенерирование, что является погрешностью генерирования, обусловленной вероятностным характером климатических факторов, поскольку погодные условия существенно влияют на генерирование фотоэлектрических станций. Поэтому возникает необходимость оптимизации работы фотоэлектрических станций при передаче электрической энергии в сеть. Установлено, что для реализации математической модели оптимизации работы нестабильных источников электроэнергии, в частности фотоэлектрических станций, прекрасно подходит математический аппарат нечетких множеств. В результате синтезирована математическая модель оптимизации работы фотоэлектрических станций, которая реализована с использованием математического аппарата нечетких множеств. Применение математической модели позволяет учитывать влияние окружающей среды и распределительных электрических сетей на работу фотоэлектрических станций в процессе генерирования и передачи электрической энергии в сеть. Для обеспечения максимального отбора сгенерированной энергии фотоэлектрической станции и во избежание аварийной ситуации, в случае возникновения перенапряжения в локальной сети, в работе был проведен анализ факторов, влияющих на преобразование энергии на фотоэлектрической станции, и которые являются определяющими в процессе ее передачи в сеть. На основе лингвистической оценки факторов влияния на работу фотоэлектрической станции сформирована база знаний и нечеткие логические уравнения для нахождения весовых коэффициентов. На основе полученных уравнений разработана и отлажена компьютерная модель нечеткого регулятора с помощью библиотеки пакета прикладных программ Matlab – Fuzzy Logic Toolbox. В результате моделирования изменения входных величин, характеризующих факторы влияния на работу фотоэлектрической станции, на выходе регулятора формируется коэффициент регулирования, который в дальнейшем необходимо использовать для регулирования инвертора при генерировании электроэнергии в сеть.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, fuzzy-регулятор, оптимизация, сетевой инвертор.

Лежнюк Петр Демьянович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем;

Бартецкий Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте;

Бартецкая Ирина Анатольевна — аспирант кафедры электрических станций и систем, e-mail: bartetskayairina@gmail.com