

$$K_{sum} \approx \frac{Cp_1}{\left(1 + \frac{(1 - \sqrt{1 - Cp_2})^2}{Cp_2}\right)} = \frac{0,48}{\left(1 + \frac{(1 - \sqrt{1 - 0,48})^2}{0,48}\right)} = 0,41. \quad (14)$$

Выводы

1. В результате анализа диаграммы преобразования мощности в системе с аэродинамическим мультиплицированием установлено, что для общего коэффициента преобразования важно соотношение коэффициента потерь и коэффициента преобразования вторичного воздушного потока.

2. При равенстве нулю коэффициента потерь $K_{пот2}$ коэффициент мощности вторичной аэромеханической системы вообще не влияет на результирующий коэффициент преобразования, а его значение определяется только коэффициентом преобразования мощности первичной аэромеханической системы.

3. Полученное выражение для суммарного коэффициента преобразования подтверждает утверждение, приведенное в [1], о некорректности определения коэффициента преобразования системы с аэродинамическим мультиплицированием как произведения коэффициентов преобразования мощности воздушного потока вторичной и первичной аэромеханических систем.

Список использованных источников

1. Голубенко Н. С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности / Н. С. Голубенко // Материалы IV Международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке». – Гурзуф, 2003. – С. 125–132.

2. Алексеевский Д. Г. Анализ поведения электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием с учетом потерь / Д. Г. Алексеевский, А. А. Бурова, С. А. Кулаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 18 (991). – С. 61–65. – Бібліогр. : 2 назв.

УДК 621.316:62-8:004.9

С.А. Иванець, канд. техн. наук

О.В. Красножон, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СИСТЕМАХ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

С.А. Иванець, канд. техн. наук

А.В. Красножон, аспірант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Serhii Ivanets, PhD in Technical Sciences

Oleksii Krasnozhon, PhD student

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

THE USING OF FUZZY LOGIC FOR DEVELOPMENT OF PHOTOVOLTAIC MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEMS

Розглянуто підхід з використанням апарату нечіткої логіки для вирішення проблем, що виникають при побудові системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів. Запропоновано та обґрунтовано вибір необхідної кількості лінгвістичних змінних для нечіткого пристрою управління, вибір кількості і

параметрів функцій приналежності для кожної лінгвістичної змінної, використання нечітких правил у вигляді, запропонованому вченими Такагі і Сугено.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, точка максимальної потужності, лінгвістична змінна, функція приналежності, нечітке правило, зворотний зв'язок, DC/DC-інвертор, Matlab.

Рассмотрен подход с использованием аппарата нечёткой логики для решения проблем, возникающих при построении систем отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей. Предложен и обоснован выбор необходимого количества лингвистических переменных для нечёткого устройства управления, выбор количества и параметров функций принадлежности для каждой лингвистической переменной, использование нечётких правил в виде, предложенном учёными Такаги и Сугено.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, точка максимальной мощности, лингвистическая переменная, функция принадлежности, нечёткое правило, обратная связь, DC/DC-инвертор, Matlab.

The approach of using the fuzzy logic appliance for solving problems, that arise during the construction of the photovoltaic maximum power point tracking system was examined. The choice of the absolutely indispensable quantity of the variable linguistic for the indistinct operation mechanism and quantity and membership function parameters selection for each variable linguistic using the indistinct rules in form suggested by scientists Takagi and Sugeno were offered and well substantiated.

Key words: photovoltaic, maximum power point, linguistic variable, membership function, fuzzy rule, feedback, DC/DC-inverter, Matlab.

Вступ. Останнім часом в енергетичній галузі України значно зростає попит на використання фотоелектричних перетворювачів. Такий підхід є виправданим за умов використання їх для забезпечення енергетичних потреб малопотужних споживачів. До того ж такий спосіб генерації електричної енергії значно менше забруднює довкілля [1]. Як відомо, найголовнішими недоліками в роботі фотоелектричних перетворювачів є істотно низький коефіцієнт корисної дії (не більше 19 % поглиненої сонячної енергії може бути перетворено в електричну) та висока чутливість до зміни факторів навколишнього середовища.

Усі зазначені недоліки обумовлені тим, що як фотоелектричний перетворювач використовується напівпровідник, властивості якого істотно залежать від температури й освітленості (густини потужності падаючого сонячного випромінювання). Із аналізу вольт-амперної характеристики типового фотоелектричного перетворювача можна зробити висновок, що за умови постійної густини потужності сонячного випромінювання існує певна точка, в якій фотоелектричний перетворювач може генерувати максимальну електричну потужність. Точка максимальної потужності визначається за величиною навантаження, що підключено до вихідних клем фотоелектричного перетворювача. Оскільки неможливо постійно забезпечувати стабільну освітленість сонячного випромінювання, тому для дотримання фотоелектричного перетворювача в такій точці необхідно постійно регулювати величину опору навантаження. Саме з цією метою створюється система управління фотоелектричним перетворювачем, більш відома як система відстеження точки максимальної потужності (в іноземній літературі такі системи отримали назву MPPT – Maximum Power Point Tracker).

Аналіз наявних методів побудови систем відстеження точки максимальної потужності. Ідея використання напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів енергії не є новою, вона з'явилася ще на початку 70-х років ХХ століття. Однак найбільш активно методи побудови систем відстеження точки максимальної потужності розвиваються в останні 10–15 років [2]. Найпоширеніші методи побудови таких систем можна об'єднати в такі групи: методи, що ґрунтуються на зворотному зв'язку за напругою; методи, що ґрунтуються на зворотному зв'язку за струмом; методи, що ґрунтуються на спостереженнях за коливаннями потужності. Розглянемо більш детально кожен із груп методів [3].

Суттю методів, що ґрунтуються на зворотному зв'язку за напругою, є порівняння величин робочої напруги фотоелектричного перетворювача (напруги на його вихідних клемах) з величиною опорної напруги. На основі знака та модуля отриманої різниці напруг робиться висновок про те, яким чином слід змінювати величину опору навантаження перетворювача.

Як відомо, фотоелектричний перетворювач є джерелом постійної напруги, однак він може забезпечувати живлення як для навантаження, що споживає постійний струм, так і для навантаження по змінному струму. Тому між вихідними клемами фотоелектричного перетворювача та навантаженням необхідно встановлювати пристрій перетворення електричної енергії – DC/AC-перетворювач, або DC/DC-перетворювач. Кожний з таких пристроїв забезпечує регулювання величини напруги, а в деяких випадках – ще й її форми.

Отже, у випадку, якщо навантаження працює на постійному струмі, регулювання величини його опору може здійснюватись за рахунок DC/DC-перетворювача. Оскільки величина напруги на його виході формується за допомогою ШІМ (широтно-імпульсної модуляції), то отриману різницю напруг можна перетворити у необхідні параметри ШІМ.

Група методів, що ґрунтуються на зворотному зв'язку за струмом, багато в чому схожа на попередньо розглянуті методи. Вони також включають у себе порівняння величин струму короткого замикання перетворювача з величиною вихідного струму.

Як відомо, струм короткого замикання – це максимально можливий струм, що може генеруватись фотоелектричний перетворювач за умови короткого замикання його вихідних клем. Очевидно, що він є чітко визначеним для кожного значення густини потужності падаючого сонячного випромінювання. Тому внаслідок порівняння величин струмів можна зробити висновок, наскільки оптимальним за величиною струму є поточний режим роботи фотоелектричного перетворювача. Корегування режиму роботи також може здійснюватись за допомогою параметрів ШІМ DC/DC-перетворювача.

Методи, що ґрунтуються на спостереженнях за коливаннями потужності, є найбільш точними, але й найбільш складними. Їх суть полягає в постійному спостереженні за коливаннями вихідних величин напруги та струму фотоелектричного перетворювача (оскільки потужність перетворювача є добутком цих величин), причому ці коливання провокуються самим керуючим пристроєм.

Всі ці методи є ітераційними: на кожному кроці коливання напруги та струму провоюється таким чином, щоб вихідна потужність перетворювача збільшувалась, після цього вимірюється значення вихідної потужності і порівнюється зі значенням, отриманим на попередньому кроці. В такому разі точкою генерації максимальної потужності буде така, в якій значення потужності починає зменшуватись порівняно із попереднім значенням. Величина, на яку збільшується коливання потужності на кожному кроці, є невеликою за модулем.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що характерною рисою всіх зазначених методів є необхідність вимірювання однієї чи декількох вихідних величин фотоелектричного перетворювача з метою подальшого регулювання режиму генерації електричної енергії. Саме ж регулювання потужності відбувається через підбір оптимального опору навантаження при заданій густині потужності сонячного випромінювання і температурі перетворювача.

Мета статті. Аналіз наведених вище методів побудови систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача вказує на те, що їх використання в енергетичній галузі є дуже важливим. Крім того, на сьогодні в деяких провідних країнах (США, Швеція, Італія) активно запроваджуються фотоелектричні мініелектростанції [4; 5]. Вони дозволяють істотно заощадити кошти пересічних споживачів, наприклад, завдяки скороченню обсягів споживання електричної енергії з основної мережі живлення. Широкої популярності також набувають елементи живлення (зарядні пристрої), побудовані на основі фотоелектричних перетворювачів.

Водночас, для цієї задачі можливо застосувати математичний апарат нечіткої логіки, ефективність використання якого для побудови систем управління була неоднора-

зово доведена на практиці, тому доцільним буде розглянути можливість використання апарату нечіткої логіки для задачі пошуку точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача.

Отже, метою цієї статті є розглянути підхід з використанням математичного апарату нечіткої логіки для вирішення основних проблем, що виникають під час побудови системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача.

Виклад основного матеріалу. Складовим елементом будь-якого фотоелектричного перетворювача є фотоелектричний модуль, який є джерелом напруги, а не струму, тому доцільним буде розглянути її вольт-амперну характеристику. Залежність вихідної напруги від струму можна представити у вигляді:

$$V_{PV} = \frac{A \cdot k \cdot T_C}{e} \cdot \ln \left(\frac{I_{PH} + I_0 - I_{PV}}{I_0} \right) - I_{PV} \cdot R_S, \quad (1)$$

де I_{PH} – величина струму, що генерується фотоелектричним модулем під впливом сонячного випромінювання при певній температурі;

e – стала заряду електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

k – стала Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T_C – робоча температура модуля;

R_S – величина послідовного опору модуля;

I_{PV} – вихідний струм модуля;

I_0 – зворотний струм насичення напівпровідникового переходу;

A – коефіцієнт ідеалізації, який показує, наскільки обчислені за формулою (1) значення напруг та струмів модуля відповідають реально вимірним.

Легко бачити, що залежність (1) має певні обмеження: для обчислення вихідної напруги фотоелектричного модуля застосовується натуральний логарифм. Вираз, що стоїть під знаком натурального логарифма, може набувати від’ємне значення у випадку, якщо $I_{PH} + I_0 - I_{PV} < 0$, робота моделі при цьому стає некоректною, оскільки значення логарифма стане комплексним числом, а не дійсним. Тобто струм I_{PV} , якого потребує навантаження, не може перевищувати величину генерованого фотоелектричного струму. Фактично це означає, що фотоелектричний модуль може генерувати скінчений вихідний струм, тобто максимальний струм фотоелектричного модуля приблизно дорівнює величині фотоелектричного струму. Графічне зображення залежності (1) за умов, що густина потужності падаючого сонячного випромінювання є постійною, представлено нижче на рис. 1.

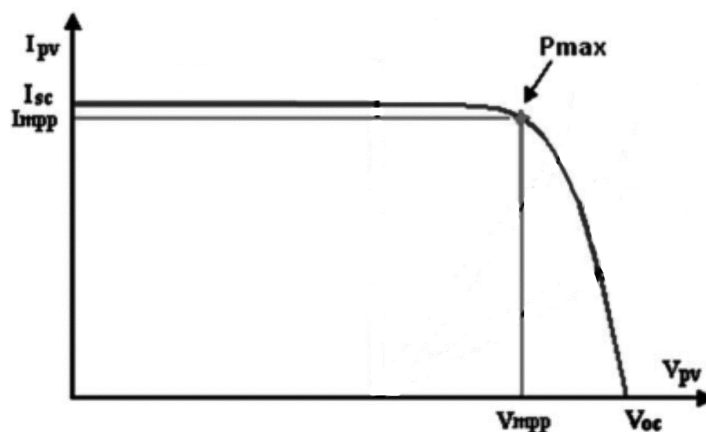


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля

З рис. 1 видно, що у разі, якщо вихідні клеми фотоелектричного перетворювача з'єднати накоротко, він буде генерувати максимальний вихідний струм – струм короткого замикання (I_{SC}), якщо ж залишити їх розімкненими, перетворювач буде генерувати максимальну вихідну напругу – напругу холостого ходу (V_{OC}). Внаслідок прояву певних властивостей напівпровідника зростання вихідної напруги до певної межі не призводить до істотного зниження вихідного струму. Отже, точка максимальної потужності – це така точка, в якій швидкість спадання вихідного струму ще залишається відносно малою.

Залежність координат точки максимальної потужності від густини потужності падаючого сонячного випромінювання за умови сталої робочої температури для будь-якого фотоелектричного перетворювача має типовий вигляд, її зображено нижче, на рис. 2. З рис. 2 очевидно, що у разі зменшення освітленості падаючого сонячного випромінювання спостерігається незначне зменшення напруги для точки максимальної потужності.

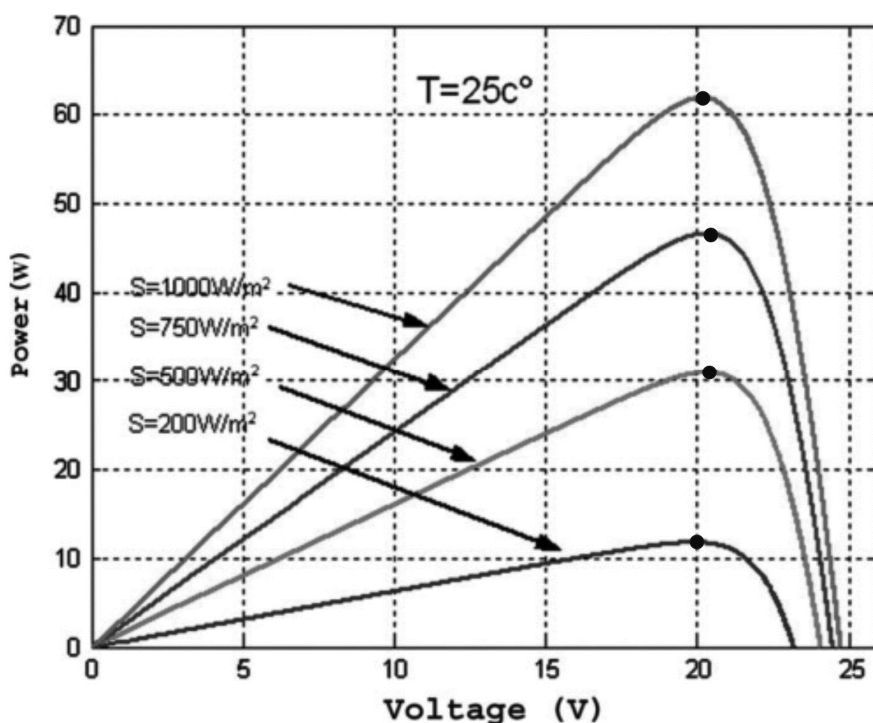


Рис. 2. Залежність положення точки максимальної потужності від густини потужності падаючого сонячного випромінювання

Однак незалежно від того, за якою з фізичних величин (вихідна напруга, струм або потужність) відбувається пошук точки максимальної потужності, треба однозначно враховувати динаміку роботи фотоелектричного перетворювача: з якою швидкістю та в якому напрямку відбувається зміна вихідної величини, що відстежується [6].

Оскільки нині існує велика кількість фотоелектричних перетворювачів, що мають схожі характеристики, але генерують різну потужність, процес розроблення та налаштування системи відстеження точки максимальної потужності можна істотно спростити та формалізувати. Для вирішення такої задачі можна використовувати математичний апарат нечіткої логіки, оскільки саме він дозволяє описати багатозначні та неточні процеси [6; 8].

Перш за все слід визначити необхідну кількість вхідних та вихідних лінгвістичних змінних для керуючого пристрою системи відстеження точки максимальної потужності. Як приклад, розглянемо використання апарату нечіткої логіки для системи, що реалізується за методом зворотного зв'язку за напругою.

Першій лінгвістичній змінній, що має відображати різницю між поточним рівнем вихідної напруги фотоелектричного перетворювача та опорним значенням напруги, дамо назву “відхилення напруги”, а другій змінній, що буде відображати швидкість зміни вихідної напруги, – “швидкість напруги”. Вихідну лінгвістичну змінну назвемо “рівень напруги”. Для кожної із зазначених лінгвістичних змінних слід визначити діапазон значень, які вона може набувати.

Очевидно, що в найгірших випадках роботи фотоелектричного перетворювача, різниця опорного і поточного значень напруги на виході фотоелектричного перетворювача за абсолютною величиною не може перевищувати значення напруги холостого ходу (V_{oc}), але може мати різний знак. Отже, діапазон значень першої лінгвістичної змінної можна визначити як $[-V_{oc}; +V_{oc}]$.

Діапазон значень лінгвістичної змінної “швидкість напруги” може бути визначений експериментальним шляхом, попередньо проаналізувавши технічні характеристики конкретного фотоелектричного перетворювача. При цьому особливо слід враховувати частоту, з якою відбувається оновлення результатів вимірювання значення вихідної напруги.

Як зазначалося вище, вихідна напруга фотоелектричного перетворювача не може бути від’ємною, також вона не перевищує величини напруги холостого ходу (V_{oc}). Тобто діапазон значень вихідної лінгвістичної змінної можна визначити як $[0; +V_{oc}]$. Насправді ж, цей діапазон може бути істотно зменшений, оскільки вихідна напруга фотоелектричного перетворювача, що працює в нормальному робочому режимі, не може досягати 0 В, як видно з рис. 2.

На наступному кроці необхідно обрати кількість та форму нечітких функцій приналежності, з яких складається кожна лінгвістична змінна. Вибір форми та кількості таких функцій слід виконувати з урахуванням таких вимог:

- усі функції приналежності, незалежно від форми, повинні мати приблизно однакову ширину;
- усі функції приналежності мають повністю охоплювати діапазон значень лінгвістичної змінної;
- діапазони значень двох сусідніх функцій приналежності мають перекриватися хоча б на третину.

Як зазначається в багатьох літературних джерелах, типовою кількістю таких функцій для однієї лінгвістичної змінної є п’ять [6]. У разі зменшення кількості функцій приналежності, точність отримання вихідного результату може істотно зменшуватися, що відбувається внаслідок погіршення роздільної здатності регулюючого пристрою (тобто однакова зміна величини напруги на виході пристрою регулювання відбувається при більшому значенні вхідних параметрів). Збільшення ж кількості функцій призводить до зростання кількості нечітких правил, за якими буде обчислюватися вихідний результат, що сповільнить роботу регулюючого пристрою. Так, наприклад, повністю визначена таблиця нечітких правил для регулюючого пристрою, що має 2 вхідні лінгвістичні змінні, для кожної з яких визначено по 5 нечітких функцій приналежності, повинна мати 25 нечітких правил, якщо ж обрати по 6 нечітких функцій – 36 правил, а якщо по 7 – 49.

Як відомо, існує 5 класів нечітких функцій приналежності – s , π , γ , t , L [5]. Найбільш поширеними для використання у системах управління є 3 останні класи функцій.

На наступному кроці необхідно запропонувати таблицю нечітких правил. Вона має складатися на основі аналізу поведінки фотоелектричного перетворювача. З метою підвищення точності прогнозування отримання вихідної величини нечітким пристроєм регулювання, ця таблиця має бути повною, тобто в ній мають бути визначено всі правила.

Також вона не може містити правила, зміст яких суперечить одне одному. Кожне нечітке правило складається з двох частин: частини IF, яка ще називається посилкою, та THEN – висновку. В загальному вигляді нечітке правило можна представити так:

$$IF(x_1 \in A_1^{(k)} \text{ AND } x_2 \in A_2^{(k)}) THEN (y_1 \in B_1^{(k)} \text{ AND } y_2 \in B_2^{(k)}), \quad (2)$$

де x_i – вхідні лінгвістичні змінні пристрою керування;

y_i – вихідні лінгвістичні змінні пристрою керування;

$A_i^{(k)}, B_i^{(k)}$ – відповідні нечіткі множини;

$k = 1, \dots, N$ – номер нечіткого правила.

Однак, як доводить практика використання математичного апарату нечіткої логіки у системах управління, нечітке правило виду (2) малопридатне для використання, оскільки обидві його частини носять нечіткий характер [6]. Тому набагато доцільнішим буде використання правил такого виду:

$$IF(x_1 \in A_1^{(k)} \text{ AND } x_2 \in A_2^{(k)}) THEN (y_1 = f^{(k)}(x_1, x_2)), \quad (3)$$

де x_i – вхідні лінгвістичні змінні пристрою керування;

y_i – вихідні лінгвістичні змінні пристрою керування;

$A_i^{(k)}$ – відповідна нечітка множина;

$k = 1, \dots, N$ – номер нечіткого правила.

Цей вид правил був запропонований ученими Такагі і Сугено. Як бачимо, таке правило носить нечіткий характер лише у частині посилки, а в частині висновку воно містить деяку функціональну залежність. Ще однією перевагою є те, що при подачі на входи нечіткого пристрою керування сигналів, які можна інтерпретувати як вектор станів об'єкта управління, то вихідний сигнал буде обраховуватися як нормалізована зважена сума окремих виходів за формулою:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N w^k \bar{y}^k}{\sum_{k=1}^N w^k}, \quad (4)$$

де w^k – ширина відповідної нечіткої множини;

\bar{y}^k – номеру виходу.

У разі, якщо всі зазначені вище кроки з розроблення нечіткої системи відстеження точки максимальної потужності виконуються людиною, що не є експертом у цій предметній галузі, очікувати на високі показники точності та швидкодії системи не варто. В такому випадку можливо декілька варіантів:

– підібрати інші класи та параметри функцій приналежності для усіх заданих лінгвістичних змінних системи;

– запропонувати інший склад таблиці нечітких правил за умов незмінності якісного складу лінгвістичних змінних;

– використати один з можливих підходів для налаштування параметрів нечітких функцій приналежності – штучні нейронні мережі або генетичні алгоритми.

У свою чергу, виконання етапів вибору та налаштування функцій приналежності лінгвістичних змінних, складання таблиці нечітких правил може бути істотно прискорено за рахунок використання наявних спеціалізованих програмних пакетів: Matlab (інструментарій – Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox, Global Optimization Toolbox), Flex Tool, а також Evolver [6; 9].

Висновки. У цій статті було розглянуто основні етапи використання математичного апарату нечіткої логіки для побудови системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача на прикладі методів, заснованих на зворотному зв'язку за напругою. Запропоновано та обґрунтовано:

- вибір необхідної кількості вхідних та вихідних лінгвістичних змінних для нечіткого пристрою управління;
- вибір кількості і параметрів нечітких функцій приналежності для кожної лінгвістичної змінної;
- використання нечітких правил модуля керування у вигляді, запропонованому вченими Такагі і Сугено;
- можливі шляхи для налаштування нечіткого пристрою управління у випадку, якщо точність отримання його вихідних результатів не задовольняє заданим вимогам.

Список використаних джерел

1. *Іванець С. А.* Розвиток електроенергетики на основі концепції “інтелектуальних” електричних мереж Smart Grid / С. А. Іванець, О. В. Красножон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”. – 2013. – № 1(63). – С. 167–178.
2. *News and analysis for the modernization and automation of electric power* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.smartgridnews.com>.
3. *Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system* / C. Larbes, S. M. Cheikh, T. Obeidi, A. Zerguerras // *Renewable Energy*. – 2009. – № 34. – Р. 2093–2100.
4. *Кобец Б. Б.* Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
5. *European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities: «European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the future»*, European Communities, 2006.
6. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
7. *Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK* / Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, Yi-Jie Su // *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. – 2008, October 22–24. – 6 p.
8. *Altas, I. H., Sharaf, A. M.* A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. – Р. 341–345.
9. *Моделирование электротехнических устройств в MATALB. SimPowerSystems и Simulink*. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил.