

Рисунок 5 – Осциллограммы скорости при пуске двигателя

ських машинах переменного тока в тех случаях, когда использование ИС целесообразно с технической и экономической точек зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В.Г. Взрывозащищенный тиристорный электропривод переменного тока / Власов В.Г., Иванов В.Л., Тимофеева Л.И. – М.: Энергия, 1977. – 160с.
2. Качура О.В. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія / Качура О.В., Количев С.В., С'янов О.М. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. – 209с.
3. Качура О.В. Дослідження асинхронних двигунів з нелінійними елементами у колі фазного ротора / Качура О.В., Кулик М.В., С'янов О.М. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика”. – Кременчук. – 2012. – Випуск 3/2012(19). – С.408-411.
4. Качура А.В. Проектирование электроприводов на основе совместного анализа цепевых и полевых моделей / Качура А.В., Колычев С.В., Сьянов А.М. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2006. – Вип. 3/2006(38)41. – С.17-19.

Поступила в редколлегию 05.09.2016.

УДК 621.314

БОМБИК В.С., асистент

Вінницький національний технічний університет

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ МРРТ-ФУНКЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Вступ. В теперішній час для досягнення необхідних параметрів якості електроенергії все частіше застосовуються мережеві багаторівневі інвертори напруги (МБІН) [1]. Зокрема такі інвертори є невід'ємною частиною сонячних електростанцій [2, 3]. Для ефективного керування таким інвертором виникає необхідність узгодження його режимів роботи з мережею для відслідковування точки відбору максимальної потужності сонячним модулем, де поздовжня та поперечна складові струму багаторівневого інвертора будуть забезпечувати напругу та потужність, яка зі сторони входу інвертора зніматиметься із сонячного модуля, а зі сторони виходу буде віддаватись в мережу.

Однією з проблем сонячних електростанцій є те, що електроенергія, яка виробляється сонячним модулем має нестабільні показники, оскільки останні залежать від ряду

факторів таких як температура навколишнього середовища, рівень освітленості та інші [4], а це в свою чергу повинно враховуватись системою керування інвертором для правильного вибору його режиму роботи. Тому для підвищення ефективності роботи інвертора застосовуються різні алгоритми для визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем (*maximum power point tracking (MPPT)*) [5-8]. Відслідковування точки відбору максимальної потужності – це спосіб, який використовується для отримання максимальної потужності на виході сонячного модуля. Для MPPT використовуються цифрові пристрої, які аналізують вольт-амперну характеристику для визначення режиму роботи сонячного модуля. Пристрій для MPPT вимірює вихідні характеристики сонячного модуля, задаючи параметри і обчислює таке значення опору (навантаження), яке необхідне для отримання максимальної потужності в даних погодних умовах. Тому MPPT реалізовано в більшості алгоритмів керування МБІН для відновлювальних джерел електроенергії.

Постановка задачі. Однак підхід до обчислення MPPT різних виробників та конструкцій інверторів фотоелектростанцій відрізняється [9-11], відповідно, відрізняється і їх ефективність, що потребує додаткового дослідження. Крім того, визначення функції вольт-амперної характеристики (ВАХ) сонячного модуля в більшості випадків формуються за допомогою бази даних або нечіткої логіки при параметрах, які не внесені до баз даних, що суттєво уповільнює процес визначення допустимого навантаження, адже на систему керування інвертора крім задачі визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем покладені і решта задач (діагностика, спряження з мережею, векторне ШІМ-керування вихідними ключами і т.д.), тому доцільно виконати математичний аналіз даних ВАХ сонячних модулів з метою формування уніфікованої функції, яка буде включена в структуру коду системи керування і дозволить використовувати її аргументи в режимі реального часу замість звернення до баз даних та формування нечіткого логічного висновку тощо.

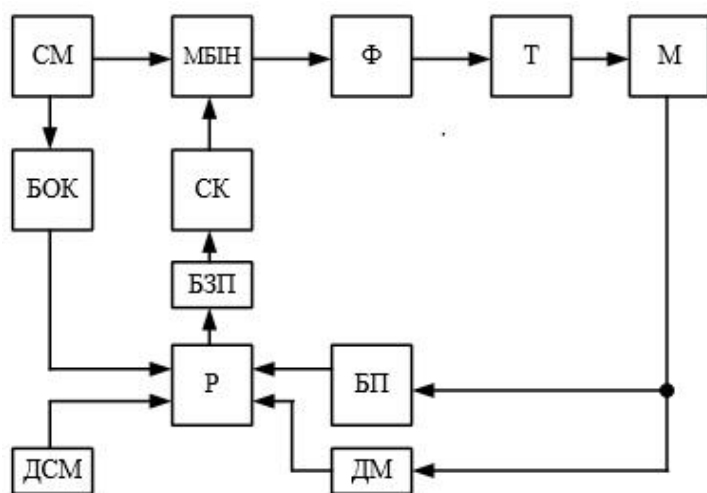


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги

блок перетворення з abc в dq систему координат; БЗП – блок зворотного перетворення з системи dq в abc; СК – система комутації.

Блок перетворення трифазної системи струмів “a-b-c” до ортогональної “d-q”, описується системою рівнянь:

Результати роботи.

Для створення мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги (рис.1) можна використати модель, яка описана рівняннями (1)-(4).

На рис.1: СМ – сонячний модуль; МБІН – мережевий багаторівневий інвертор напруги; Ф – фільтр; Т – трансформатор; М – мережа; БОК – блок обчислення квазіекстремуму; ДСМ – датчики сонячного модуля; Р – регулятори; ДМ – датчики мережі; БП –

$$\begin{cases} I_d = \frac{2}{3} \left(i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ I_q = \frac{2}{3} \left(i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \end{cases}, \quad (1)$$

де θ – кут електромагнітного навантаження інвертора; $\theta = \int_0^{\pi} \Delta f dt$. (2)

i_a, i_b, i_c – струми у відповідних фазах мережі.

Блок зворотного перетворення ортогональної системи обчислених оптимальних значень струмів I_{rd} та I_{rq} до трифазної системи напруг керування плечами моста інвертора $U_{ra} - U_{rb} - U_{rc}$ працює відповідно до системи

$$\begin{cases} U_{ra} = I_{rd} \cdot \sin \theta + I_{rq} \cdot \cos \theta, \\ U_{rb} = \frac{1}{2} \cdot \left((\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) I_{rq} - (\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) I_{rd} \right), \\ U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}. \end{cases} \quad (3)$$

Регулятори описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} I_{q, \text{зад}} = k_p \cdot k_{\text{в.осв}} \cdot P_{\text{осв}} + k_p \cdot P_{\text{зад}} + k_u \cdot U_{\text{DC}} - k_i \cdot I_{\text{DC}}, \\ U_{rq} = k_{pq} \cdot \left(k_{rq, \text{під}} \cdot (I_{q, \text{зад}} - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \cdot \int_0^t (I_{q, \text{зад}} - I_q) dt + T_{dq} \cdot \frac{d(I_{q, \text{зад}} - I_q)}{dt} \right) \\ I_{d, \text{зад}} = k_{pi} \cdot \left(U_{\text{зад}} + U_{\text{DC}} \cdot k_{\text{DC, під}} - U_s \cdot k_{s, \text{під}} \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^2 \right), \\ U_{rd} = k_{pd} \cdot \left(k_{rd, \text{під}} \cdot (I_{d, \text{зад}} - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \cdot \int_0^t (I_{d, \text{зад}} - I_d) dt + T_{dd} \cdot \frac{d(I_{d, \text{зад}} - I_d)}{dt} \right) \end{cases}, \quad (4)$$

де k_{pd} та k_{pq} – коефіцієнти підсилення регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора відповідно; T_{id} та T_{iq} – постійні часу інтегрування регуляторів; T_{dd} – стала часу диференціювання каналу регулювання I_d ; U_{rd} та U_{rq} – вихідні сигнали регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора; k_p – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення потужності до відповідного значення струму; $k_{\text{в.осв}}$ – ваговий коефіцієнт підсилення значення потужності, що поступає на датчик освітлення; $P_{\text{зад}}$ – задане значення потужності сонячного модуля; k_u – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення напруги в каналі завдання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора; U_{DC} – напруга на виході датчика напруги сонячного модуля; k_i – коефіцієнт нахилу регульовальної характеристики; I_{DC} – значення струму яке поступає на БОК з виходу датчика струму; $k_{rq, \text{під}}$ – коефіцієнт підсилення П-складової вихідної напруги U_{rq} ; k_{pi} – коефіцієнт приведення сигналу напруги до струму; $U_{\text{зад}}$ – задане значення напруги, яке повинен підтримувати сонячний модуль; $k_{\text{DC, під}}$ – коефіцієнт підсилення напруги з виходу датчика напруги; U_s – середнє значення напруги мережі; $k_{s, \text{під}}$ – коефіцієнт підсилення значення напруги мережі; $k_{rd, \text{під}}$ – коефіцієнт підсилення П-складової напруги U_{rd} ; T – значення температури сонячної батареї; T_{ref} – різниця температур між соняч-

ною батареєю та навколишнім середовищем.

Однак також необхідно закласти в дану модель функцію, яка б описувала блок визначення точки еквзіекстремуму. Але, як правило, графік залежності потужності, яку може видати сонячний модуль на мережевий інвертор при роботі із фактичною вихідною напругою, можна побудувати тільки за статистичними даними. Тому задачами роботи, які необхідні для досягнення мети, є знаходження адекватних аналітичних моделей за заданими статистичними даними за допомогою чисельних методів аналізу даних.

Статистичні дані, які були отримані при моделюванні:

$$m = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 100 & 150 & 200 & 250 & 300 & 350 & 400 & 403 \\ 0 & 177.5 & 350 & 562.5 & 750 & 937.5 & 1115 & 1095 & 100 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Перший рядок матриці відповідає значенням вихідної напруги сонячного модуля, а другий – значенням потужності. Статистичні дані, які характеризують залежність потужності, яку може видати сонячний модуль на мережевий інвертор при роботі із фактичною вихідною напругою, графічно представлені на рис.2.

Для апроксимації статистичних даних використаємо рівняння логарифмічної, показникової, кубічної та поліноміальної регресій, перевіримо їх адекватність та порівняємо їх між собою.

Знайдемо середні значення потужності та напруги:

$$x_c = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n}, \quad (6)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=0}^n y_i}{n}, \quad (7)$$

де x_i та y_i – i -ті значення напруги та потужності матриці m ;

n – кількість статистичних значень.

Знайдемо значення дисперсій:

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_c)^2}{n}, \quad (8)$$

$$D_y = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (y_i - y_c)^2}{n}. \quad (9)$$

Середньоквадратичні відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}, \quad (10)$$

$$\sigma_y = \sqrt{D_y}. \quad (11)$$

Для статистичних даних знайдені значення виразів (6)-(11) зведемо в табл.1.

Таблиця 1 – Середні значення дисперсій та середньоквадратичних відхилень для вихідних статистичних даних

x_c	y_c	D_x	D_y	σ_x	σ_y
220,3	508,73	118710	177600	136,78	421,403

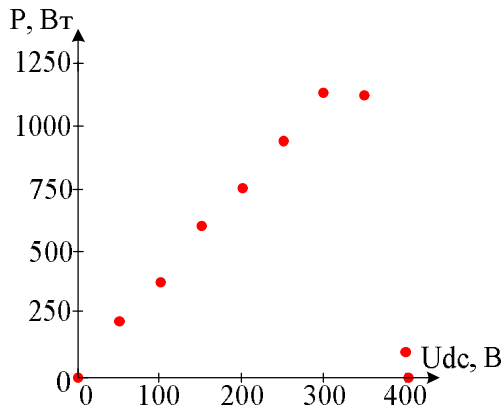


Рисунок 2 – Розкид статистичних даних, отриманих при моделюванні

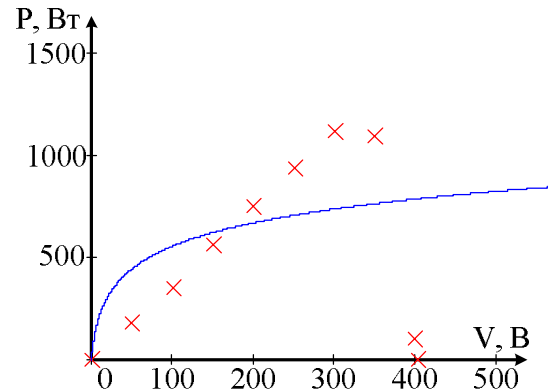


Рисунок 3 – Залежність потужності від напруги, яка описується логарифмічною регресійною моделлю

Рівняння логарифмічної регресійної моделі має вигляд:

$$y(x) = A_0 + A_1 \ln x. \quad (12)$$

де A_0, A_1 – коефіцієнти логарифмічного рівняння регресії.

Визначимо коефіцієнти логарифмічної регресії:

$$A_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n (Y_i \ln X_i) - \sum_{i=1}^n \ln X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n \ln^2 X_i - \left(\sum_{i=1}^n \ln X_i \right)^2} = 79,04, \quad (13)$$

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i = 148,38. \quad (14)$$

Тоді логарифмічна регресійна модель буде мати вигляд:

$$y(x) = 148,38 + 79,04 \ln x. \quad (15)$$

Побудуємо в одній системі координат залежності потужності від напруги, отримані за статистичними даними та за допомогою логарифмічної регресійної моделі (рис.3).

Рівняння показникової регресійної моделі має вигляд:

$$y(x) = A_0 \cdot A_1^x. \quad (16)$$

де A_0, A_1 – коефіцієнти показникової рівняння регресії.

Визначимо коефіцієнти показникової регресії:

$$A_1 = \exp \left(\frac{n \sum_{i=1}^n (Y_i \ln X_i) - \sum_{i=1}^n \ln X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n \ln^2 X_i - \left(\sum_{i=1}^n \ln X_i \right)^2} \right) = 1, \quad (17)$$

$$A_0 = \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln Y_i - \frac{\ln b}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right) = 54,23. \quad (18)$$

Тоді логарифмічна регресійна модель буде мати вигляд:

$$y(x) = 54,23 \cdot 1^x. \quad (19)$$

Побудуємо в одній системі координат залежності потужності від напруги, отримані за статистичними даними та за допомогою показникової регресійної моделі (рис.4).

Рівняння кубічної регресійної моделі має вигляд:

$$y(x) = A_0 x^3 + A_1 x^2 + A_2 x + A_3. \quad (20)$$

де A_0, A_1, A_2, A_3 – коефіцієнти квадратичного рівняння регресії.

Задамо початкові умови рівняння для визначення коефіцієнтів кубічної регресії:

$$A_0 = 1; A_1 = 1; A_2 = 1; A_3 = 1.$$

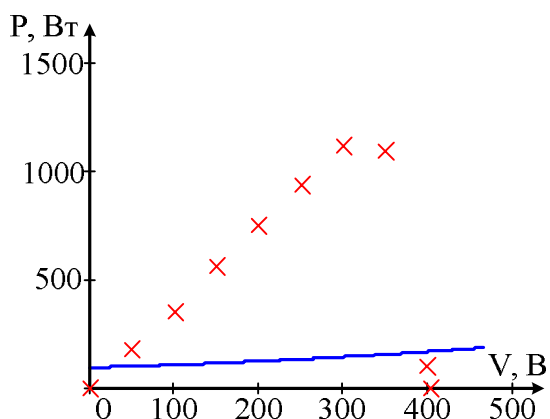


Рисунок 4 – Залежність потужності від напруги, яка описується показниковою регресійною моделлю

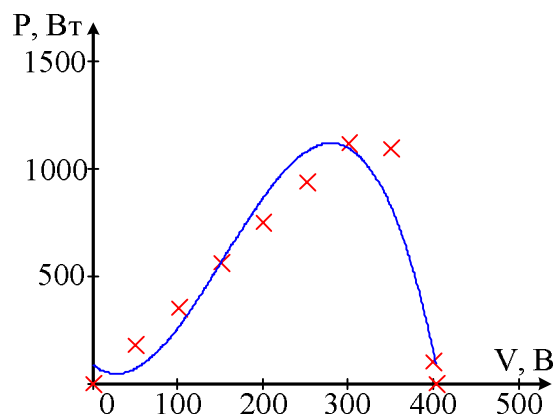


Рисунок 5 – Залежність потужності від напруги, яка описується кубічною регресійною моделлю

За допомогою методу найменших квадратів (МНК) [12] складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} A_1 \sum_{i=1}^n (x_i)^3 + A_2 \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + A_3 \sum_{i=1}^n x_i + n \cdot A_4 = \sum_{i=1}^n y_i, \\ A_1 \sum_{i=1}^n (x_i)^4 + A_2 \sum_{i=1}^n (x_i)^3 + A_3 \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + A_4 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n (x_i y_i), \\ A_1 \sum_{i=1}^n (x_i)^5 + A_2 \sum_{i=1}^n (x_i)^4 + A_3 \sum_{i=1}^n (x_i)^3 + A_4 \sum_{i=1}^n (x_i)^2 = \sum_{i=1}^n ((x_i)^2 y_i), \\ A_1 \sum_{i=1}^n (x_i)^6 + A_2 \sum_{i=1}^n (x_i)^5 + A_3 \sum_{i=1}^n (x_i)^4 + A_4 \sum_{i=1}^n (x_i)^3 = \sum_{i=1}^n ((x_i)^3 y_i) \end{cases} \quad (21)$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримуємо значення коефіцієнтів регресії:

$$A_0 = -1,335 \cdot 10^{-4}; A_1 = 0,061; A_2 = -3,033; A_3 = 86,38.$$

Тоді, квадратична регресійна модель буде мати вигляд:

$$y(x) = -1,335 \cdot 10^{-4} x^3 + 0,061 x^2 - 3,033 x + 86,38. \quad (22)$$

Побудуємо в одній системі координат залежності потужності від напруги, отримані за статистичними даними та за допомогою кубічної регресійної моделі (рис.5).

Знайдемо аналітичний опис статистичних даних за допомогою поліноміальної функції. Задамо кількість членів регресії $b=5$.

Задамо початкові умови рівняння для визначення коефіцієнтів поліноміальної регресії:

$$A_0 = 1; A_1 = 1; A_2 = 1; A_3 = 1; A_4 = 1; A_5 = 1.$$

Рівномірний розподіл даних між рівняннями:

$$s = \frac{n}{b} \approx 2. \quad (23)$$

Складемо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів регресії:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^s P_i = A_0 + A_1 \cdot \sum_{i=1}^s V_i + A_2 \cdot \sum_{i=1}^s (V_i)^2 + A_3 \cdot \sum_{i=1}^s (V_i)^3 + A_4 \cdot \sum_{i=1}^s (V_i)^4 + A_5 \cdot \sum_{i=1}^s (V_i)^5, \\ \sum_{i=s+1}^{2s} P_i = A_0 + A_1 \cdot \sum_{i=s+1}^{2s} V_i + A_2 \cdot \sum_{i=s+1}^{2s} (V_i)^2 + A_3 \cdot \sum_{i=s+1}^{2s} (V_i)^3 + A_4 \cdot \sum_{i=s+1}^{2s} (V_i)^4 + A_5 \cdot \sum_{i=s+1}^{2s} (V_i)^5, \\ \sum_{i=2s+1}^{3s} P_i = A_0 + A_1 \cdot \sum_{i=2s+1}^{3s} V_i + A_2 \cdot \sum_{i=2s+1}^{3s} (V_i)^2 + A_3 \cdot \sum_{i=2s+1}^{3s} (V_i)^3 + A_4 \cdot \sum_{i=2s+1}^{3s} (V_i)^4 + A_5 \cdot \sum_{i=2s+1}^{3s} (V_i)^5, \\ \sum_{i=3s+1}^{4s} P_i = A_0 + A_1 \cdot \sum_{i=3s+1}^{4s} V_i + A_2 \cdot \sum_{i=3s+1}^{4s} (V_i)^2 + A_3 \cdot \sum_{i=3s+1}^{4s} (V_i)^3 + A_4 \cdot \sum_{i=3s+1}^{4s} (V_i)^4 + A_5 \cdot \sum_{i=3s+1}^{4s} (V_i)^5, \\ \sum_{i=4s+1}^n P_i = A_0 + A_1 \cdot \sum_{i=4s+1}^n V_i + A_2 \cdot \sum_{i=4s+1}^n (V_i)^2 + A_3 \cdot \sum_{i=4s+1}^n (V_i)^3 + A_4 \cdot \sum_{i=4s+1}^n (V_i)^4 + A_5 \cdot \sum_{i=4s+1}^n (V_i)^5. \end{array} \right. \quad (24)$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримуємо значення коефіцієнтів регресії:

$$A_0 = 1; A_1 = 2,34; A_2 = 0,04; A_3 = -4,21 \cdot 10^{-4}; A_4 = 1,76 \cdot 10^{-6}; A_5 = -2,41 \cdot 10^{-9}.$$

Тоді поліноміальна регресійна модель буде мати вигляд:

$$y(x) = 1 + 2,34x + 0,04x^2 - 4,21 \cdot 10^{-4} x^3 + 1,76 \cdot 10^{-6} x^4 - 2,41 \cdot 10^{-9} x^5. \quad (25)$$

Побудуємо в одній системі координат залежності потужності від напруги, отримані за статистичними даними та за допомогою поліноміальної регресійної моделі (рис.6).

Для перевірки отриманих регресійних моделей, за допомогою яких здійснено

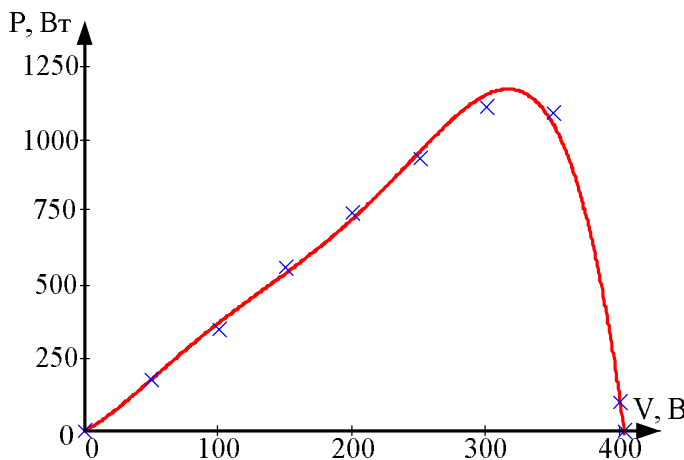


Рисунок 6 – Графіки залежності потужності від вихідної напруги, отримані за статистичними даними та за допомогою поліноміальної функції

апроксимацію статистичних даних, знайдемо індекс кореляції та перевіримо за критерієм Фішера кожен із функцій (15), (19), (22) та (25).

Індекс кореляції описується співвідношенням

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_c)^2}}. \quad (26)$$

Для перевірки адекватності регресійної поліноміальної функції скористаємось критерієм

Фішера [13]. Табличне значення визначається:

$$F_{\text{табл}} = F(\alpha, k_1, k_2). \quad (27)$$

де α – рівень значимості ($\alpha = 0,05$);

k_1, k_2 – ступені свободи.

$$k_1 = N, \quad (28)$$

де N – кількість параметрів біля змінних рівняння регресії.

$$k_2 = N - n - 1. \quad (29)$$

Фактичне значення критерію Фішера:

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_1}{k_2} = \frac{\max(D_a, D_y)}{\min(D_a, D_y)}, \quad (30)$$

де D_a – дисперсія адекватності:

$$D_a = \frac{1}{n - b} \sum_{i=1}^n ((y_c - y(i))^2). \quad (31)$$

Для порівняння аналітичних моделей за заданими статистичними даними зведено оброблені значення індексів кореляції, фактичного та табличного значень критерію Фішера в табл.2.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта кореляції, ступенів свободи, фактичного та табличного значень по критерію Фішера

Функція	R	k_1	k_2	$K_{\text{табл}}$	$K_{\text{факт}}$
$y(x) = 148,38 + 79,04 \ln x$	0,45	1	8	5,32	1,98
$y(x) = 54,23 \cdot 1^x$	-	1	8	5,32	-3,91
$y(x) = -1,335 \cdot 10^{-4} x^3 + 0,061 x^2 - 3,033 x + 86,38$	0,958	3	6	4,76	22,124
$y(x) = 1 + 2,34 x + 0,04 x^2 - 4,21 \cdot 10^{-4} x^3 + 1,76 \cdot 10^{-6} x^4 - 2,41 \cdot 10^{-9} x^5$	0,999	5	4	6,26	3,646

Як видно із табл.2, найгірше описує статистичні дані показникова функція, оскільки індекс кореляції у неї менший нуля, що свідчить про те, що дана модель неадекватно описує статистичні дані. Логарифмічна функція також не підходить для аналітичного опису статистичних даних, оскільки її індекс кореляції 0,45. Функція, яка описується кубічною регресією, також не підходить для адекватного опису статистичних даних, оскільки вона не задовольняє умові критерію Фішера ($K_{\text{табл}} > K_{\text{факт}}$). Найкращою виявилась функція, яка описується поліноміальною регресійною моделлю п'ятого порядку ($K_{\text{табл}} > K_{\text{факт}}$, тобто модель є адекватною, $R = 0,999$ – що майже ідеально описує статистичні дані), однак її недоліком є чутливість.

Висновки. Було здійснено апроксимацію статистичних даних за допомогою функцій, які описуються квадратичною, кубічною та поліноміальною регресіями. Побудовано графіки залежності потужності від вихідної напруги за допомогою цих функцій, здійснено їх порівняння. Визначено індекси кореляції та перевірено адекватність кожної моделі за критерієм Фішера. Встановлено, що для адекватного опису статистичних даних найкраще підходить поліноміальна функція п'ятого порядку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Corzine K.A. Operation and design of multilevel inverters / K.A. Corzine // University of Missouri: Rolla, 2005. – 79p.

2. Gupta A. Grid integrated solar photovoltaic system using multilevel inverter / A.Gupta, P.Gang // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2, Issue 8. – P.3952-3960.
3. A three-phase three-level npc inverter based grid-connected photovoltaic system with active power filtering / S.Sezen, A.Aktas, M.Ucar, E.Ozdemir // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. – 2014. – Vol.16. – P.1572-1576.
4. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. IEEE transactions on power electronics / N.Femia, G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli. – 2005. – Vol. 20, No. 4. – P.963-973.
5. Babaa S.E. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems / S.E.Babaa, M.Armstrong, V.Pickert // Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – № 2. – P.59-72.
6. Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems / V.Salas, E.Olias, A.Barrado, A.Lazaro // Solar Energy Materials and Solar Cells, 90. – P.1555-1578.
7. Zainudin H.N. Comparison study of maximum power point tracker techniques for PV systems / H.N.Zainudin, S.Mekhilef // Proceedings of the 14 th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10). – 2010. – P.750-755.
8. Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems / G.M.S.Azevedo, M.C.Cavalcanti, K.C.Oliveira, F.A.S.Neves, Z.D.Lins // IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. – 2008 – P.1456-1462. Ref.:https://www.researchgate.net/publication/224323740_Evaluation_of_Maximum_Power_Point_Tracking_Methods_for_Grid_Connected_Photovoltaic_Systems
9. Tey K.S. Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level / K.S.Tey, S.Mekhilef // Solar Energy. 2014 – P.333–342. Ref.: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.003>
10. Gomathy S. Design and implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm for a standalone PV system / S.Gomathy, S.Saravanan, S.Thangavel // Elixir Electrical Engineering. – 2012. – P.11110-11114. Ref.: <http://www.elixirpublishers.com>
11. Kumar K.K. Implementation of MPPT algorithm for solar photovoltaic cell by comparing short-circuit method and incremental conductance method / K.K.Kumar, R.Bhaskar, H.Koti // The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Procedia Technology. – 2014. – No. 12. – P.705-715.
12. Мокін Б.І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів: навч. посіб. / Б.І.Мокін., В.Б.Мокін, О.Б.Мокін // Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 300с.
13. Руденко В.М. Математична статистика: навч. посіб. / В.М.Руденко. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 304с.

Надійшла до редколегії 07.11.2016.