

В статті приведено розроблену методика визначення параметрів складної математичної моделі шляхом мінімізації функціоналу суми квадратів відхилень між модельними та експериментальними даними. Пошук відповідних значень параметрів розбито на дві частини: визначення чутливості математичної моделі до зміни значень кожного параметру та пошук мінімуму функціоналу розходження

Ключові слова: ідентифікація, визначення, модель, параметр, розряд, лампа, високий, мінімізація, чутливість

Приведена методика определения параметров сложной математической модели путем поиска минимума функционала суммы квадратов отклонений, в котором сравниваются экспериментальные и модельные данные. Поиск значений параметров модели разбит на два этапа, это определение степени влияния изменения каждого параметра на выход модели и непосредственно поиск минимума функционала отклонений

Ключевые слова: идентификация, определение, модель, параметр, разряд, лампа, высокий, минимизация, чувствительность

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ РОЗРЯДНОЇ ЛАМПИ ВИСОКОГО ТИСКУ

О. А. Якунін

Інженер

Кафедра електропостачання міст
Харківський національний університет
міського господарства ім. О. М. Бекетова
вул. Маршала Бажанова, 17,
м. Харків, Україна, 61002
E-mail: Yakuinin_AA_Kh@mail.ru

1. Вступ

При створенні математичних моделей важливо забезпечити точність опису моделлю необхідних об'єктів та процесів, що протікають в них. Це можна забезпечити двома шляхами:

1) дослідити якомога більшу кількість об'єктів та визначити відповідні (середньостатистичні) набори коефіцієнтів (параметрів) моделі;

2) створити методіку (та програму) визначення параметрів моделі для якісного опису даною моделлю конкретного об'єкту.

При цьому слід мати на увазі, що в об'єктах відбуваються неповоротні процеси «старіння», при чому змінюються не тільки їх показники, а й поведінка – реакція на впливи. Наприклад поширені джерела світла – розрядні лампи (РЛ), не лише «старіють» (зношуються електроди), а й мають деякий люфт параметрів від партії до партії, та між однотипними лампами різних виробників, в тому числі завдяки конкуренції, бо кожний виробник намагається покращити техніко-економічні показники своєї продукції (при цьому вносячи зміни), тому навіть у одного виробника лампи одного типу та потужності, що мають різну дату випуску (наприклад 5 років), та навіть не експлуатувались дещо відрізняються за характером поведінки в мережі.

При розробці систем керування необхідним є їх тестування на наявність вузьких (проблемних) місць. Для такого тестування якнайкращим підходом є використання математичних моделей (ММ). Крім того сучасні системи керування можуть містити в собі модель керованого об'єкту для визначення характеру та величини керуючих сигналів, подальшої оцінки їх відповідності, та якості керування.

Так, при використанні ММ комплексу «розрядна лампа – пускорегулюючий апарат» («РЛ – ПРА»), та розробці відповідного приладу керування, є висока вірогідність виникнення помилок, оскільки технологія виготовлення РЛ змінюється, при чому однотипні РЛ різних виробників мають не однакові характеристики, зокрема РЛ однієї партії мають деяку розбіжність в характеристиках.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідники приділяють достатньо уваги створенню та покращенню моделей різних об'єктів. Створенню моделей РЛ, в тому числі розрядних ламп високого тиску (РЛВТ) (англійською – HPD lamps, тобто High Pressure Discharge lamps, що входять у HID lamps, тобто High Intensity Discharge lamps – розрядні лампи високої інтенсивності), присвячено ряд цікавих робіт. Це обумовлено їх високою ефективністю, надійністю та тривалим строком експлуатації. Так можна виділити два основні підходи до створення моделей РЛ (що в подальшому впливає на можливість їх уточнення та покращення якості моделювання): по-перше – це моделі, що базуються на дослідженні процесів, що відбуваються в робочій колбі лампи (розрядної дуги, процесів, що протікають в ній; процесів в робочій колбі лампи близько електродів), а по-друге створення моделі лампи в результаті аналізу величин на вході та виході «чорного ящика», яким є лампа (складний елемент мережі – навантаження з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ), який слід описати).

В статтях [1–2] використовується перший підхід. В статті [1] описується спрощена модель, що базується на фізичних законах розрядної плазми. Ця модель не потребує знання точних характеристик ламп (від ви-

робника), передбачається визначення параметрів при низькій (звичайній) частоті роботи лампи. Визначені параметри моделі для двох типів ламп. Після аналізу залишилися питання стосовно універсальності моделі, щодо якої наголошується в назві роботи, – завжди існують обмеження. В статті [2] освітлюється створення моделі розрядної лампи високого тиску, шляхом опису процесів, що відбуваються близько електродів: розподіл щільності струму та енергетичні процеси в катоді. При цьому зазначається, що така модель не потребує розгляду процесів, що проходять безпосередньо в плазмі дуги між електродами.

Другий підхід до моделювання РЛ освітлюється в статтях [3, 4]. Стаття [3] висуває модель розрядної лампи високого тиску, що базується на аналізі провідності лампи, термінологічно це відрізняється, але де-факто відповідає підходу, на якому базується модель [4], де модель ґрунтується на диференціальній апроксимації ВАХ лампи. Саме для визначення параметрів моделі приведеної в публікації [4] створена методика ідентифікації параметрів, що освітлюється в даній роботі.

Розгляд підходів до створення та відмінностей між моделями є важливим, так як підхід та реалізація ідентифікаційних методів (відповідних рівнянь) залежить від безпосередньої реалізації моделі ідентифікованого об'єкту.

Безпосередньо параметричній ідентифікації моделей розрядних ламп присвячено розглянуті праці [5–7]. В першій роботі [5] приведено оптимізацію математичної моделі розрядної лампи, що базується на описі фізичних процесів в розрядній дузі. Пропонована методика (алгоритм) визначення параметрів моделі, розроблена авторами на базі моделі [1] експонується як така, що може віднайти коефіцієнти моделі опису її роботи як на звичайній (низькій), так і високій частоті. Публікація [6] розширює можливості моделі розрядної люмінесцентної лампи низького тиску, освітлюється можливість опису моделлю не лише провідності лампи, а й щільності електронів та електронну температуру в лампі. Стаття [7] представляє підхід до ідентифікації параметрів методом пошуку оптимальних варіантів серед скупчення точок оптимальності. Дана методика прикладається до нелінійного елемента – розрядної лампи низького тиску.

Стосовно розробки питань створення методики параметричної ідентифікації моделі (приведеної в [4]) розглянуто ряд публікацій [8–10] та книги [11, 12]. Так стаття Авдеєнко Т. В. [8] має якісний аналіз літератури, що допоміг при виборі інших публікацій стосовно теорії параметричної ідентифікації. Дослідження [9] проведене професором Новосибірського державного технічного університету, освітлює етапи побудови математичних моделей за експериментальними даними, виділено основні проблеми параметричної ідентифікації, що можуть привести до створення неякісної моделі.

Слід зазначити, що використання ряду припущень при створенні математичних моделей РЛ, базуючись на фізиці процесів в стовпі розряду (в плазмі), може спричинити значні похибки при описі РЛ. Тому перспективним вважаємо створення та покращення моделей другого підходу, а саме тих, що базуються на розгляді РЛ як нелінійного навантаження зі складною ВАХ (складним характером провідності). Враховуючи

все вище викладене завдання визначення параметрів уніфікованих моделей керованого об'єкту, зокрема РЛ, є актуальним.

3. Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету створення методики параметричної ідентифікації (визначення параметрів моделі) розрядної лампи високого тиску за даними з фізичних експериментів.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено наступні задачі:

- 1) дослідити літературні джерела стосовно ідентифікації параметрів моделей, обрати перспективну модель розрядної лампи високого тиску;
- 2) створити модель чутливості математичної моделі до зміни значень параметрів;
- 3) створити функціонал розходження модельних та експериментальних даних, мінімізуючи який визначається відповідний набір параметрів;
- 4) створити методику ідентифікації параметрів моделі, протягом досліджуваного періоду часу;
- 5) створити таку методику ідентифікації параметрів моделі, яку можна легко реалізувати в програмах математичних розрахунків;
- 6) реалізувати методику в пакеті комп'ютерних математичних обчислень та провести пробний обчислювальний експеримент, для підтвердження дієвості отриманої методики.

4. Матеріали та методи визначення параметрів математичної моделі розрядної лампи за даними фізичного експерименту

Визначення параметрів моделі за даними фізичного експерименту розбито на два основних етапи: це створення моделі чутливості та формування функціоналу, що в подальшому підлягає мінімізації.

Під моделлю чутливості розуміємо систему рівнянь, розрахунок якої повинен надати відомості стосовно реакції вихідних величин математичної моделі комплексу «розрядна лампа високого тиску (РЛВТ) – ПРА» [4] на зміну кожного коефіцієнту. Система рівнянь чутливості утворена шляхом диференціювання рівнянь моделі комплексу «РЛВТ – ПРА» [4] окремо по кожному коефіцієнту.

Пропонуємий функціонал, що в подальшому підлягає мінімізації, базується на розрахунку суми квадратів відхилень експериментальних та модельних даних за приведених початкових умов; відштовхуючись від попереднього значення параметрів моделі проходить розрахунок вихідних величин, масив яких порівнюються з масивом, отриманим в результаті фізичних експериментів.

Значення даного функціоналу відповідає якості моделі, тобто чим менше його величина, тим кращий набір значень параметрів моделі знайдено.

Дослідження і проведення ідентифікації параметрів моделі, при синусоїдальній напрузі зовнішнього живлення, протягом всього комплексу основних режимів, що протікають послідовно, – запалення (пускові процеси), розгорання (перехідні процеси), стабілізації

(сталі процеси) і загасання припускає опис початкових умов, відповідних включенню лампи при початковій температурі лампи, рівній температурі навколишнього середовища.

Пропоновану методику реалізовано в пакеті комп'ютерних математичних розрахунків та моделювання MATLAB (подробіці планується освітити в подальших публікаціях), де розрахунок проходить за наступними етапами:

- 1) розрахунок чутливості моделі;
- 2) розрахунок першого стартового значення мінімізованого функціоналу;
- 3) визначення нового (пробного) набору значень параметрів моделі;
- 4) розрахунок математичної моделі та моделі чутливості з новими значеннями параметрів;
- 5) розрахунок функціоналу суми відхилень;
- 6) оцінка якості опису моделлю лампи з новими параметрами;
- 7) якщо необхідно – визначення нового набору значень параметрів моделі.

Експериментальні дані отримано в результаті проведення експерименту за методом планування експериментів [10], на експериментальному стенді [11], з використанням сучасного цифрового осцилографа [12].

Розробка методики ідентифікації (визначення) параметрів моделі велась згідно теорії ідентифікації систем керування [13, 14].

5. Методика визначення параметрів математичної моделі розрядної лампи за даними фізичного експерименту

5.1. Розрахунок чутливості моделі до зміни значень її параметрів

Модель освітлювального комплексу, отримана в [4] у векторно-матричній формі має наступний вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, \theta), \quad (1)$$

де $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор правих частин.

Введемо наступні величини та позначення:

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор змінних стану моделі;

n – кількість змінних стану моделі;

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)^T \in \mathbb{R}^p$ – вектор оцінюваних параметрів моделі, p – кількість оцінюваних параметрів моделі;

$y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T \in \mathbb{R}^m$ – вектор вихідних змінних, $m = 2$, (y_1 – струм в ланцюгу; y_2 – напруга на лампі);

$y_e = (y_{e1}, y_{e2}, \dots, y_{em})^T \in \mathbb{R}^m$ – вектор експериментальних значень вихідних змінних;

$[t_0; t_k]$ – відрізок часу спостереження; за t_0 – початок відліку часу t_k – кінець відліку часу;

T_0 – характерний час (період напруги зовнішнього живлення промислової частоти f_0), $T_0 = 1/f_0$;

R та L – параметри баласту;

δ та ϵ – позитивні параметри регуляризації;

U_0 – номінальна напруга лампи;

P_0 – номінальна потужність;

A_n – коефіцієнт, що залежать від типу лампи та її потужності.

З врахуванням введених вище величин модель комплексу «РЛВТ – ПРА» [4] в скалярній формі отримує вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \frac{\theta_5 x_1^2 \left[(x_3 / (x_1 x_2 + \epsilon))^2 - 1 \right]}{\left[1 + \theta_1 \left(\sqrt{x_3^2 + \delta} / (x_1 x_2 + \epsilon) - 1 \right) \right]}; \\ \frac{dx_2}{dt} &= \left[\theta_2 + \theta_3 \left(\sqrt{x_3^2 + \delta} / (x_1 x_2 + \epsilon) \right)^{\theta_4} \right] \times \\ &\times \left[1 + \theta_1 \left(\sqrt{x_3^2 + \delta} / (x_1 x_2 + \epsilon) - 1 \right) - x_2 \right]; \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{T_0}{LP_0} \left[U_0^2 U_s - P_0 R x_3 - U_0^2 x_3 / (x_1 x_2 + \epsilon) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Модель виходу у векторно-матричній формі:

$$y = h(x), \quad (3)$$

де $h(x) = (h_1, \dots, h_m)^T \in \mathbb{R}^m$ – вектор правих частин.

Модель виходу в скалярній формі:

$$y_1 = h_1(x_1, x_2, x_3); \quad y_2 = h_2(x_1, x_2, x_3), \quad (4)$$

де

$$h_1(x_1, x_2, x_3) = x_3; \quad h_2(x_1, x_2, x_3) = x_3 / (x_1 x_2 + \epsilon). \quad (5)$$

Ввівши проміжні розрахункові величини:

$$F = x_1 x_2 + \epsilon; \quad A = x_1^2 \left[(x_3 / F)^2 - 1 \right]; \quad G = \sqrt{x_3^2 + \delta}; \quad (6)$$

$$B = G / F; \quad C = B - 1; \quad D = 1 + \theta_1 C; \quad E = D - x_2, \quad (7)$$

отримано наступні рівняння моделі стану (2) (перетворена модель освітлювального комплексу) Тоді вектор правих частин моделі освітлювального комплексу «РЛВТ – ПРА» визначається відношеннями:

$$f_1 = \theta_5 A / D; \quad f_2 = (\theta_2 + \theta_3 B^{\theta_4}) E;$$

$$f_3 = \frac{T_0}{LP_0} \left(U_0^2 w - P_0 R x_3 - U_0^2 \frac{x_3}{F} \right). \quad (8)$$

Параметр регуляризації ϵ відображає невраховану в початковій моделі складову повної провідності лампи $G_n = y_1 / y_2$, обумовлену наявністю додаткових електродів для РЛВТ-ку типу ДРЛ та результуючий (запалюючий) вплив не врахованого в математичній моделі імпульсного запалюючого пристрою (ІЗП) для РЛВТ типу ДНаТ і втрат. Спочатку прийняте значення $\epsilon = 10^{-6}$ параметру регуляризації коректується, виходячи з середньої інтегральної оцінки ΔG_0 відхилень модельних значень повної провідності лампи від розрахованих за експериментальними даними, яка визначається співвідношенням:

$$\Delta G_0 = \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{y_{e1}}{y_{e2} + \delta} - x_1 x_2 \right) dt, \tag{9}$$

де для стабілізації обчислень використаний позитивний параметр регуляризації δ .

Вважається $\epsilon = \Delta G_0$, а потім методом підбору близько даного значення визначається прийнятне значення параметру регуляризації ϵ . Якість підбору оцінюється візуальним порівнянням графіків модельних і експериментальних значень вихідних змінних y_1 (струм в ланцюзі), y_2 (напруга на лампі) і повної провідності лампи

$$G_n = x_1 x_2, \tag{10}$$

оскільки вказані величини мають очевидний фізичний сенс і легко піддаються експертній оцінці.

Модель чутливості складається з матриць Якобі, похідних правих частин системи рівнянь стану по параметрах (коефіцієнтах) та по змінним (вихідним величинам) математичної моделі комплексу «РЛВТ – ПРА».

Матриця Якобі $\partial f/\partial \theta \in R^{n \times p}$ похідних правих частин системи рівнянь стану по параметрах визначається співвідношеннями:

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} = -f_1 C/D; \quad \frac{\partial f_1}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{2,4}; \quad \frac{\partial f_1}{\partial \theta_5} = A/D;$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} = -(\theta_2 + \theta_3 B^{\theta_1}) C; \tag{11}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} = E; \quad \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} = B^{\theta_1} E; \quad \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} = \theta_3 B^{\theta_1} E \ln B;$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_5} = 0; \quad \frac{\partial f_3}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{1,5}. \tag{12}$$

Матриця Якобі $\partial f/\partial x \in R^{n \times n}$ похідних правих частин системи рівнянь стану по змінним стану визначається співвідношеннями:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \theta_5 \frac{\theta_1 A B x_2 - 2 D x_1 F}{F D^2}; \tag{13}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \theta_5 \frac{\theta_1 A B x_1 x_2^3 - 2 D x_3^2 F}{x_2^3 F D^2}; \tag{14}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_3} = \theta_5 x_3 \frac{2 D F G - \theta_1 A x_2^2}{x_2^2 F G D^2}; \tag{15}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_1} = -\frac{x_2}{F} \left[\theta_3 \theta_4 B^{\theta_1} E + (\theta_2 + \theta_3 B^{\theta_1}) \theta_1 B \right]; \tag{16}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2} = -\frac{1}{F} \left[\theta_3 \theta_4 B^{\theta_1} x_1 E + (\theta_2 + \theta_3 B^{\theta_1}) (\theta_1 x_1 B + F) \right]; \tag{17}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_3} = \frac{x_3}{F G} \left[\theta_3 \theta_4 B^{\theta_1 - 1} E + (\theta_2 + \theta_3 B^{\theta_1}) \theta_1 \right]; \tag{18}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_1} = \frac{T_0 U_0^2 x_2 x_3}{L P_0 F^2}; \quad \frac{\partial f_3}{\partial x_2} = \frac{T_0 U_0^2 x_1 x_3}{L P_0 F^2};$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_3} = -\frac{T_0 (P_0 R F + U_0^2)}{L P_0 F}. \tag{19}$$

Матриця Якобі $\partial h/\partial x \in R^{m \times n}$ похідних правих частин системи рівнянь виходу по змінним стану визначається співвідношеннями:

$$\frac{\partial h_1}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial h_1}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial h_1}{\partial x_3} = 1;$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial x_1} = -\frac{x_2 x_3}{F^2}; \quad \frac{\partial h_2}{\partial x_2} = -\frac{x_1 x_3}{F^2}; \quad \frac{\partial h_2}{\partial x_3} = \frac{1}{F}. \tag{20}$$

Оскільки вектор правих частин h системи рівнянь виходу не залежить від параметрів, то матриця Якобі $\partial h/\partial \theta \in R^{m \times p}$ похідних правих частин системи рівнянь виходу по параметрах – нульова:

$$\partial h/\partial \theta = 0. \tag{21}$$

Нехай $X_\theta = \partial x/\partial \theta \in R^{n \times p}$ – матриця чутливості змінних стану, а $Y_\theta = \partial y/\partial \theta \in R^{m \times p}$ – матриця чутливості вихідних змінних.

Модель чутливості (у формі завдання Коші) у просторі станів (у векторно-матричній формі запису):

а) Модель стану

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_\theta}{dt} &= \frac{\partial f}{\partial x} X_\theta + \frac{\partial f}{\partial \theta} \\ \frac{dx}{dt} &= f(x, t, \theta). \end{aligned} \right\} \tag{22}$$

б) Початкові умови (які залежать від вектора параметрів θ)

$$X_\theta(0) = \partial x_0/\partial \theta, \quad x(0) = x_0(\theta); \tag{23}$$

в) Модель виходу

$$\left. \begin{aligned} Y_\theta &= \frac{\partial h}{\partial x} X_\theta, \\ y &= h(x). \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

Модуль j -го стовпця матриці чутливості Y_θ відображає ступінь впливу варіацій j -го параметру θ_j на вихідні змінні моделі.

5. 2. Формування набору початкових значень величин для розрахунку моделі чутливості

При дослідженні чутливості і проведенні параметричної ідентифікації на сталих режимах, при постійній або синусоїдальній напрузі зовнішнього живлення, початкові умови розраховуються, виходячи з експериментальних значень вихідних змінних $y_{eуст} = (y_{e1уст} \ y_{e2уст})^T$ при відповідному режимі в деякий фіксований момент часу. Відповідні розрахункові фор-

мули витікають з початкової диференціальної моделі та мають вигляд:

$$x_{01} = x_{1\text{уст}} = \frac{y_{e1\text{уст}}}{y_{e2\text{уст}} x_{2\text{уст}}} = \frac{y_{e1\text{уст}}}{y_{e2\text{уст}} [1 + \theta_1 (|y_{e2\text{уст}}| - 1)]}; \quad (25)$$

$$x_{02} = x_{2\text{уст}} = 1 + \theta_1 (|y_{e2\text{уст}}| - 1); \quad x_{03} = x_{3\text{уст}} = y_{e1\text{уст}}. \quad (26)$$

Тут $x_{1\text{уст}}$, $x_{2\text{уст}}$, $x_{3\text{уст}}$ – відповідні значення змінних стану.

Матриця Якобі $\partial x_0 / \partial \theta \in \mathbb{R}^{n \times p}$ похідних початкових умов по параметрах визначається співвідношеннями:

$$\frac{\partial x_{01}}{\partial \theta_1} = - \frac{y_{e1\text{уст}} (|y_{e2\text{уст}}| - 1)}{y_{e2\text{уст}} [1 + \theta_1 (|y_{e2\text{уст}}| - 1)]^2};$$

$$\frac{\partial x_{01}}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{2,5}; \quad (27)$$

$$\frac{\partial x_{02}}{\partial \theta_1} = |y_{e2\text{уст}}| - 1; \quad \frac{\partial x_{02}}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{2,5};$$

$$\frac{\partial x_{03}}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{1,5}. \quad (28)$$

Отримані на етапі дослідження сталих режимів оцінки параметрів θ_j , $j = \overline{1,p}$ приймаються як початкові на етапі дослідження всього комплексу нестационарних режимів.

5. 3. Початкові умови ідентифікації параметрів моделі

Початкові умови параметричної ідентифікації визначаються, спираючись на експериментальні оцінки безрозмірної провідності G_{e0} “холодної” лампи і теоретичні розрахунки безрозмірного коефіцієнта пропорційності $\beta = x_2$ при нульовій напрузі на лампі. Початковий струм при включенні “холодної” лампи приймається нульовим. Відповідні розрахункові формули витікають з початкової диференціальної моделі і мають вигляд:

$$x_{01} = G_{e0} / (1 - \theta_1); \quad x_{02} = 1 - \theta_1; \quad x_{03} = 0. \quad (29)$$

Матриця Якобі $\partial x_0 / \partial \theta \in \mathbb{R}^{n \times p}$ похідних початкових умов по параметрах визначається співвідношеннями:

$$\frac{\partial x_{01}}{\partial \theta_1} = G_{e0} / (1 - \theta_1)^2; \quad \frac{\partial x_{01}}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{2,5}; \quad (30)$$

$$\frac{\partial x_{02}}{\partial \theta_1} = -1. \quad \frac{\partial x_{02}}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{2,5}; \quad \frac{\partial x_{03}}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = \overline{1,5}. \quad (31)$$

Для представлення моделі чутливості у векторній формі проводиться векторизація матриці чутливості X_θ , Y_θ та матриці Якобі $\partial f / \partial \theta$. При цьому кожна матриця M замінюється блоковим вектором $\text{vec } M$, компонентами якого служать стовпці матриці M в

порядку їх нумерації. Модель чутливості у векторній формі має вигляд:

а) Модель стану

$$\left. \begin{aligned} \frac{d \text{vec } X_\theta}{dt} &= \left(I_p \otimes \frac{\partial f}{\partial x} \right) \text{vec } X_\theta + \text{vec } \frac{\partial f}{\partial \theta}, \\ \frac{dx}{dt} &= f(x, t, \theta). \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

б) Початкові умови

$$\left. \begin{aligned} \text{vec } X_\theta(0) &= \text{vec } \frac{\partial x_0}{\partial \theta}, \\ x(0) &= x_0(\theta). \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

в) Модель виходу

$$\text{vec } Y_\theta = \left(I_p \otimes \frac{\partial h}{\partial x} \right) \text{vec } X_\theta.$$

Тут \otimes – знак прямого (кронекерівського) множення, I_p – одинична матриця розміру $p \times p$.

Векторне представлення моделі чутливості дозволяє безпосередньо застосувати стандартні математичні пакети вирішення систем ОДУ.

5. 4. Основні етапи проведення параметричної ідентифікації

Обчислення значень квадратичного функціоналу якості моделювання і вектора коефіцієнтів чутливості – градієнта функціоналу якості. Критерієм якості моделі, яка підлягає мінімізації, служить зважений функціонал квадратів відхилень (нев’язок) модельних значень у вихідних змінних від їх експериментальних значень y_e :

$$S(\theta) = \int_{t_0}^{t_k} (y - y_e)^T \Lambda (y - y_e) dt, \quad (34)$$

де $[t_0; t_k]$ – відрізок часу спостереження;

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$$

– діагональна матриця ваги спостережень $\lambda_i > 0$, $i = \overline{1,m}$. Прийнято $\lambda_i = 1$, $i = \overline{1,m}$.

Ступінь близькості оцінок параметрів моделі $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_p)^T$ до їх дійсних оптимальних значень визначається величиною градієнта $\nabla S(\theta)$ квадратичного функціонала $S(\theta)$ – вектору коефіцієнтів чутливості розміру $p \times 1$:

$$\nabla S(\theta) = 2 \int_{t_0}^{t_k} (\partial y / \partial \theta)^T \Lambda (y - y_e) dt. \quad (35)$$

Враховуючи, що коефіцієнти θ_2 і θ_3 , що визначають абсолютну величину правої частини другого рівняння диференціальної системи простору станів, на два-три порядки більше останніх, адекватнішою мірою близькості служитиме вектор $\tilde{R}(\theta)$ відповідних відносних величин:

$$\tilde{R}_i(\theta) = \nabla S_i(\theta) / |\theta_i|, \quad i = \overline{1, m}, \quad (36)$$

де $\tilde{R}_i(\theta)$ – відносний коефіцієнт чутливості для параметра θ_i , який характеризує напрям і ступінь відхилення параметра θ_i від його дійсного оптимального значення.

Відповідно сумарним критерієм близькості оцінок параметрів моделі $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_p)^T$ до їх дійсних оптимальних значень є модуль вектора $\tilde{R}_i(\theta)$:

$$|\tilde{R}(\theta)| = \sqrt{\sum_{i=1}^m \tilde{R}_i^2(\theta) / \theta_i^2}. \quad (37)$$

Параметрична ідентифікація за методом найменших квадратів

Критерієм якості моделі служить зважений квадратичний функціонал $S(\theta)$. Проте диференціальна система простору станів є сингулярно-збуреною, оскільки значення похідної dx_2/dt у другому рівнянні, що враховує інерційність зміни електронної температури, істотно перевершують значення dx_1/dt і dx_3/dt . Це обумовлено тим, що коефіцієнти θ_2 і θ_3 , що визначають абсолютну величину правої частини другого рівняння, на два-три порядки більше останніх. Тому при пошуку оптимальних значень параметрів $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_p)^T$ необхідно проводити регуляризацію за Тихоновим функціоналу $S(\theta)$, що враховує різномасштабність коефіцієнтів $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_p)^T$. Регуляризований функціонал, що мінімізується, має вигляд:

$$S_r(\theta) = \int_{t_0}^{t_k} (y - y_e)^T \Lambda (y - y_e) dt + \epsilon_r (\theta - \theta_0)^T W_\theta (\theta - \theta_0), \quad (38)$$

де ϵ_r – параметр регуляризації;

$$W_\theta = \text{diag}(w_{\theta_1}, w_{\theta_2}, \dots, w_{\theta_p})$$

– діагональна матриця ваг параметрів $w_{\theta_i} > 0, \quad i = \overline{1, p}$.
Прийнято

$$w_{\theta_i} = \omega_i |\theta_{0i}|^{-2}, \quad i = \overline{1, p}; \quad \epsilon_r = 0,001 \cdot S(\theta_0). \quad (39)$$

Тут $\theta_0 = (\theta_{01} \theta_{02} \dots \theta_{0p})^T$ – вектор початкових оцінок параметрів моделі; $\omega_i, \quad i = \overline{1, p}$ – позитивні постійні коефіцієнти, призначені для завдання відносному ступеню «прив'язки» шуканих значень параметрів моделі до їх початкових оцінок. Велике значення ω_i стабілізує відповідний параметр θ_i , що дозволяє організувати пошук локального оптимуму поблизу спочатку вибраного (з урахуванням фізичних передумов) значення параметру θ_{i0} .

Слід зазначити, що з фізичних міркувань $x_1 > 0$ і $x_2 > 0$, тому параметр θ_1 задовольняє умові $0 < \theta_1 < 1$. Параметр θ_3 виражається через експериментально визначувану для даного типу лампи усереднену величину Λ_d , дійсне значення якої для конкретного екземпляра лампи схильне до статистичного розкиду та дещо збільшується в процесі її старіння. Тому параметр θ_3 задовольняє нерівності $0,5\theta_{30} < \theta_3 < 1,5\theta_{30}$. Перший співмножник $\theta_2 + \theta_3 \left(\sqrt{x_3^2 + \delta} / (x_1 x_2 + \epsilon) \right)^{\theta_4}$ у другому рівнянні диференціальної системи відповідає добре відомому у фізиці електричних процесів емпіричному закону «ступеню три других», тому показник ступеню θ_4 задовольняє умові $1 < \theta_4 < 2$.

Вказані обмеження параметрів $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ та режимні змінні x_1, x_2 дозволяють звужити зону пошуку в процедурах параметричної ідентифікації.

Гradient $\nabla S_r(\theta)$ регуляризованого функціоналу $S_r(\theta)$ визначається співвідношенням:

$$\nabla S_r(\theta) = \nabla S(\theta) + 2\epsilon_r W_\theta (\theta - \theta_0). \quad (40)$$

Для вирішення завдання параметричної ідентифікації використовуються ітераційні методи, де на кожній ітерації проводиться мінімізація локальної квадратичної апроксимації $S_i(\theta)$ регуляризованого функціоналу $S_r(\theta)$:

$$\min S(\theta) = \min \theta^T H \theta. \quad (41)$$

Тут H – симетрична позитивно визначена матриця Гессе других похідних функціонала $S_r(\theta)$ по параметрах розміру $p \times p$. θ – вектор початкових оцінок параметрів моделі.

Для вирішення вказаного завдання локальної оптимізації застосовуються наступні два ітераційні квазіньютонівські методи із загальною розрахунковою схемою кроку мінімізації:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \rho_k H_k^{-1} \nabla S_k, \quad (42)$$

де k – номер ітерації; θ_k – оцінка вектора параметрів; ρ_k – довжина кроку (визначається допоміжною процедурою одновимірної оптимізації на основі параболічної інтерполяції); H_k – оцінка матриці Гессе; ∇S_k – оцінка градієнта функціонала $S_r(\theta)$.

а) В пакеті MATLAB реалізована модифікація методу зв'язаних градієнтів – PCG (Preconditioned Conjugate Gradients). Оцінки зворотної матриці перераховуються по формулі:

$$H_{k+1}^{-1} = H_k^{-1} - \alpha_k H_0^{-1} g_k \nabla S_k^T H_k^{-1}, \quad (43)$$

де $\alpha_k = (\nabla S_k^T H_0^{-1} \nabla S_k)^{-1}$, $g_k = \nabla S_k - \nabla S_{k-1}$, $H_0^{-1} = I_p$.

б) В пакеті Matlab реалізований квазіньютонівський метод BFGS (по прізвищах його авторів: Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno). Оцінки матриці Гессе H_k перераховуються по формулі:

$$H_{k+1} = H_k + \beta_k g_k g_k^T - \gamma_k H_k q_k q_k^T H_k, \quad (44)$$

де

$$g_k = \nabla S_k - \nabla S_{k-1}; \quad q_k = \theta_k - \theta_{k-1};$$

$$\beta_k = (g_k^T q_k)^{-1}; \quad \gamma_k = (q_k^T H_k q_k)^{-1}; \quad H_0 = I_p.$$

Умови зупинки розрахунку ідентифікації значень коефіцієнтів

Призначені для виключення можливості безкінечності часу розрахунку та досягнення необхідної точності при відносно низькій тривалості розрахунку.

Процес розрахунку зупиняється при виконанні хоча б однієї з наступних умов:

1) виконання максимально допустимого числа ітерацій k_{max} ;

- 2) досягнення заданої точності по функціоналу: $S_r(\theta_k) < \epsilon_f$, де $\epsilon_f > 0$ – заданий рівень точності;
- 3) досягнення заданої точності по градієнту: $|\nabla S_k| < \epsilon_g$, де $\epsilon_g > 0$ – заданий рівень точності.

Сформовано наступну методику (послідовність) визначення параметрів моделі:

- 1) визначення початкових умов за даними експериментів для розрахунку моделі лампи та моделі чутливості, формування масивів характерних величин лампи, що далі порівнюються з розрахованими;
- 2) розрахунок моделі лампи (8) та чутливості моделі (11)–(20);
- 3) розрахунок стартового значення мінімізованого функціоналу (34);
- 4) визначення відносного коефіцієнту чутливості по параметрам, який характеризує напрям і ступінь відхилення кожного параметра від його дійсного оптимального значення (36);
- 5) визначення нового (пробного) набору значень параметрів моделі;
- 6) розрахунок математичної моделі та моделі чутливості з новими значеннями параметрів;
- 7) розрахунок функціоналу суми відхилень (38);
- 8) оцінка якості опису моделлю лампи з новими параметрами;
- 9) якщо необхідно – визначення нового набору значень параметрів моделі та запуск розрахунку моделі (зациклення на етапах 2–8), поки не будуть досягнуті умови зупинки.

5. 5. Реалізація методики та пробний обчислювальний експеримент

Методика ідентифікації параметрів моделі розрядної лампи високого тиску реалізована в пакеті математичних розрахунків та моделювання MATLAB. З використанням мови програмування MATLAB створено серію підпрограм:

- 1) програму формування даних для розрахунку;
- 2) програму формування початкових даних для розрахунку математичної моделі з масиву експериментальних даних;
- 3) програму формування початкових даних для розрахунку моделі чутливості;
- 4) програму розрахунку математичної моделі та моделі чутливості;
- 5) програму параметричної ідентифікації.

Над усіма підпрограмами є головна – «сценарій» – «Сценарій параметричної ідентифікації параметрів моделі».

Попередньо проведено порівняння ефективності математичної моделі, при розрахунку моделі лампи ДРЛ–250 з початковим набором значень параметрів моделі ($\theta_1=0,6$, $\theta_2=300$, $\theta_3=600$, $\theta_4=1,5$, $\theta_5=45$), показало, що похибка опису моделлю падіння напруги на лампі ДРЛ–250 складає 4.7 %.

Значення похибки нижче за 5 % достатньо для технічних розрахунків, але для проведення наукових досліджень слід мати кращий математичний опис досліджуваного об'єкту.

Проведений розрахунок програми ідентифікації параметрів моделі привів до наступного набору параметрів моделі: $\theta_1=0,154$, $\theta_2=212.56$, $\theta_3=613.38$, $\theta_4=6,32$, $\theta_5=41.16$ (рис. 1). При цьому похибка опису

моделлю лампи ДРЛ складала 3.6 %, що на 23 % нижче за попередню оцінку (якщо 4.7 відсотки прийняти за 1).

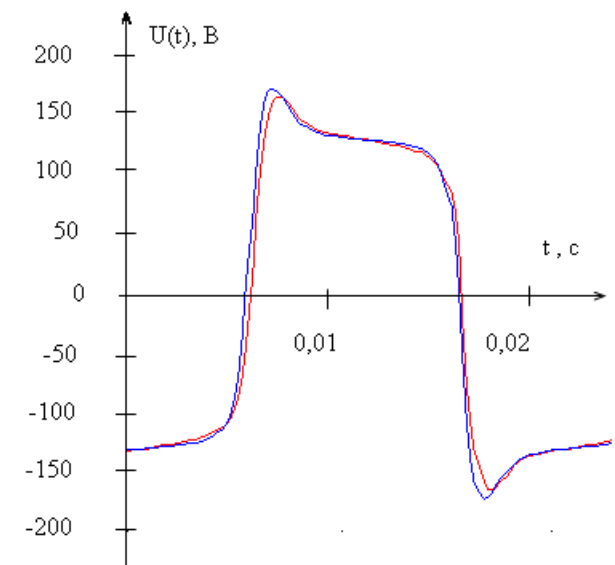


Рис. 1. Порівняння падінь напруги на лампі ДРЛ-250 $U(t)$ після уточнення значень параметрів моделі: червоним кольором – за фізичним експериментом; синім – розраховане за моделлю.

В результаті порівняння розрахованих похибок 4.7 % та 3.6 % можна сказати що досягнуте 23 % зниження похибки опису моделлю лампи типу ДРЛ (відносно пробного розрахунку) обнадійливе. Сподіваємось в подальшому досягти більш значущого покращення якості опису моделлю об'єкту.

6. Обговорення створеної методики визначення параметрів моделі та передумов подальших досліджень

При створенні методики ідентифікації (визначення) параметрів моделі використовувалась теорія ідентифікації керованих систем [12, 14], та розроблена раніше математична модель [4]. Прикладення даних підходів до конкретної моделі та направленість на подальший розвиток отриманих моделей показує цілеспрямованість та наукову впевненість дослідника.

Відкрите освітлення проведених досліджень (розробленої методики) сприяє поширенню інформації, знань, та дає можливість перевірки зроблених висновків та припущень.

Використання сучасних комп'ютерних програм математичного розрахунку та моделювання надає широкий спектр можливостей по дослідженню моделей, вибір методів вирішення систем рівнянь та функцій пошуку мінімуму.

Приведені математичні викладки та розроблена методика ідентифікації стали передумовами створення комп'ютерної програми визначення параметрів моделі. В подальших публікаціях планується привести етапи створення програми, алгоритм роботи та детальний аналіз отриманих даних, з оцінкою ступеню відповідності знайдених коефіцієнтів необхідному рівню якості опису об'єкту. В першу чергу в подаль-

шому ставимо собі завдання вирішення двох завдань: уточнення відомих параметрів моделі, для кращого (з меншою похибкою) опису нею РЛВТ-ку типу ДРЛ; та визначення набору параметрів для опису РЛВТ-ку типу ДНАТ. Не виключаємо виникнення необхідності в подальшому покращенні моделі та (або) методики ідентифікації параметрів моделі й програми ідентифікації параметрів моделі.

Приведена в статті методика реалізована в пакеті комп'ютерних математичних розрахунків та моделювання MSTLAB. Реалізація розрахунку з використанням пакету математичних розрахунків та моделювання MATLAB надає широкий спектр функцій та можливостей для розробки та аналізу математичних моделей.

Для підтвердження приведених викладок проведено пробний обчислювальний експеримент, що показав що методика працює, досягнуто 23 % зниження похибки опису моделлю РЛВТ типу ДРЛ, відносно оцінки опису моделлю з початковими значеннями параметрів.

При аналізі даних математичного моделювання та параметричної ідентифікації виникло питання стосовно обґрунтування фізичного сенсу коефіцієнтів моделі, так як припущення стосовно незначної зміни параметрів не виправдалось стосовно θ_1 та θ_4 , які програма параметричної ідентифікації пропонує змінити не на декілька відсотків, а в рази.

Освітлення етапів створення відповідної програми розрахунку, подальшого покращення моделі, методики параметричної ідентифікації планується проводити в подальших публікаціях.

7. Висновки

Актуальність задач ідентифікації коефіцієнтів моделі обумовлюється необхідністю якомога найточ-

нішого опису моделлю досліджуваного об'єкту, що дозволить проводити дослідження з високою якістю, якість моделі також впливає на якість роботи керуючих приладів, робота яких базується на розрахунку моделі керованого об'єкту, та в кінцевому випадку на якість роботи об'єкту керування.

Проведений аналіз літератури показав, що існують різні підходи до моделювання РЛ. Перспективним вважаємо використання моделі, що базуються на представленні РЛ як нелінійного навантаження, що характеризується складною ВАХ. Така модель загалом охоплює весь спектр процесів що проходять в лампі не вдаючись в опис подробиць горіння дуги між електродами.

Створена модель чутливості виходу математичної моделі РЛВТ до зміни значень параметрів, що побудована шляхом диференціювання моделі лампи по параметрах використовується при розрахунку мінімуму розходження.

Створено функціонал розходження модельних та експериментальних даних, який доповнено відносним коефіцієнтом чутливості та градієнтом функціоналу.

На базі розроблених виразів сформульовано методику визначення параметрів моделі, основою якої є ітераційний підбір функцією мінімізації таких значень параметрів моделі, що відповідають поставленим вимогам.

Приведені формули легко реалізувати в програмах комп'ютерного математичного розрахунку, для виключення зациклення програми сформульовано умови зупинки розрахунку. Приведена в статті методика реалізована в пакеті MATLAB.

Пробний експеримент показав що приведена методика дієва: якість опису моделлю за новими коефіцієнтами краще від попередньої оцінки майже на 23 %.

Література

1. Yan, W. A universal PSpice model for HID lamps [Text] / W. Yan, S. Y. R. Hui // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2005. – Vol. 41, Issue 6. – P. 1594–1602. doi: 10.1109/tia.2005.857458
2. Böttcher, R. Numerical modelling of a dynamic mode change of arc attachment to cathodes of high-intensity discharge lamps [Text] / R. Böttcher, W. Böttcher // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34, Issue 7, – P. 1110–1115. doi: 10.1088/0022-3727/34/7/313
3. Anton, J. C. An Equivalent Conductate Model for High Intensity Discharge Lamps [Text] / J. C. Anton, C. Blanco, F. Ferrero, P. Roldan, G. Zissis // Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record. – 2002. – Vol. 2, Issue 3. – P. 1494–1498. doi: 10.1109/ias.2002.1042753
4. Харченко, В. Ф. Модификация модели комплекта «ДРЛ-ПРА» для пусковых режимов [Текст] / В. Ф. Харченко, А. А. Якунин // Проблемы перспективи та нормативно правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві: Матеріали V міжнародної науково-практичної конф. – Алушта: ХО НТТ КГ та ПО, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013. – С. 123–127.
5. Yan, W. Genetic algorithm optimised high-intensity-discharge lamp model [Text] / W. Yan, S. Y. R. Hui, H. Chung, X. H. Cao // Electronics Letters. – 2002. – Vol. 38, Issue 3. – P. 110–112. doi: 10.1049/el:20020080
6. Lin, D. Methodology for developing a low-pressure discharge lamp model with electron density variation and ambipolar diffusion [Text] / D. Lin, W. Yan, G. Zissi, S. Y. R. Hui, // IET Science, Measurement & Technology. – 2012. – Vol. 6, Issue 4. – P. 229–237. doi: 10.1049/iet-smt.2011.0146
7. Tlili, M. Conductivity Polynomial Model Parameters identification based on Particle Swarm Optimization [Text] / M. Tlili // Journal of Control Engineering and Applied Informatics. – 2013. – Vol. 15, Issue 4. – P. 58–65.
8. Бабенко, В. О. Задача ідентифікації параметрів моделі управління інноваційними процесами переробних підприємств АПК [Текст] / В. О. Бабенко // Моделі менеджменту та маркетингу. – 2013 – № 1(79) – С. 43–50.
9. Авдеенко, Т. В. Проблемы параметрической идентификации в математическом моделировании процессов [Текст] / Т. В. Авдеенко // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 1(4). – С. 115–124.

10. Володарский, Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента [Текст] / Е. Т. Володарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 280 с.
11. Харченко, В. Ф. Розробка експериментального стенду та планування досліджень освітлювального комплексу [Текст] / В. Ф. Харченко, О. А. Якунін, В. Г. Воропай // Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник. – 2014. – № 116. – С. 81–88
12. Якунін, О. А. Сучасні осцилографи: особливості роботи, переваги та недоліки [Текст] / О. А. Якунін // Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник. – 2014. – № 118. – С. 183–186.
13. Мелса, Дж. Л. Идентификация систем управления [Текст] / Дж. Л. Мелса, Э. П. Сейдж. – М.: Наука, 1974. – 248 с.
14. Штейнберг, Ш. Е. Идентификация в системах управления [Текст] / Ш. Е. Штейнберг. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.

У даній статті розроблено математичну модель системи управління мобільним роботом на основі нечітких алгоритмів. Математичну модель створено з використанням математичного апарату алгебри предикатів у вигляді системи алгебропредикатних рівнянь. На основі отриманих рівнянь було створено АП-структури, які, у свою чергу, реалізовано у вигляді асоціативно-логічних перетворювачів. Побудовано АП-структури розпізнавачів нечітких підмножин вхідних і вихідних лінгвістичних змінних

Ключові слова: нечіткі алгоритми, алгебра предикатів, алгебропредикатні структури, асоціативно-логічні перетворювачі

В данной статье разработана математическая модель системы управления мобильным роботом на основе нечетких алгоритмов. Математическая модель создана с использованием математического аппарата алгебры предикатов в виде системы алгебропредикатных уравнений. На основе полученных уравнений были созданы АП-структуры, которые, в свою очередь, реализованы в виде ассоциативно-логических преобразователей. Построены АП-структуры распознавателей нечетких подмножеств входных и выходных лингвистических переменных

Ключевые слова: нечеткие алгоритмы, алгебра предикатов, алгебропредикатные структуры, ассоциативно-логические преобразователи

УДК 004.825
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44536

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

В. И. Булкин

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра общеэкономических
дисциплин и
информационных технологий
Макеевский экономико-
гуманитарный институт
ул. Островского, 16,
г. Макеевка, Украина, 86157
E-mail: bulkin01@mail.ru

1. Введение

При решении задач искусственного интеллекта возникают проблемы, связанные с технологией обработки данных традиционными универсальными компьютерами фон Неймановского типа. На современном этапе развития вычислительной техники наблюдается трудности, связанные со спецификой архитектуры и принципов действия неймановских компьютеров с использованием последовательных алгоритмов работы и исключительно двоичного кодирования данных. Эти проблемы требуют разработки новых принципов организации архитектуры вычислительных систем, в том числе и систем искусственного интеллекта (ИИ). Ведь согласно одному из основных законов кибернетики, закону необходимого разнообразия (сложности) для нормальной работы *управляемой системы*, при которой обеспечивается полное использование ее потенциала, необходимо, чтобы сложность (другой синоним термина «разнообразие») управления соответствовала слож-

ности системы. [1]. Исходя из выше сказанного, можно утверждать, что двузначная элементная и структурная база не отвечает по сложности задачам ИИ и должна быть дополнена универсальной k-значной элементной и структурной базой, которая по своей сложности (разнообразию) стоит значительно выше [2].

Системы искусственного интеллекта (СИИ) условно можно разделить на два вида: реальные СИИ и виртуальные СИИ. Полагают, что реальные СИИ имеют материальный носитель интеллекта, а виртуальные СИИ материального носителя интеллекта в своем составе не имеют. Реальные СИИ делят на биологические интеллектуальные системы (человек и высшие животные) и интеллектуальные системы на основе сетевых структур, в частности – искусственных нейронных сетей (ИНС). К виртуальным СИИ относятся интеллектуальные системы, построенные на основе компьютеров фон Неймана. Для создания СИИ используют три метода: алгоритмический, структурно-функциональный и функцио-