

4. Budnick F.S., McLeavey D., Mojena R. Principles of Operations Research for Management. – Homewood, Illinois: Irwin 1988. – 988 p.
5. Buzacott J.A., Shanthikumar J.G. Stochastic Models of Manufacturing Systems, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
6. Gershwin S.B. Manufacturing Systems Engineering. Prentice Hall, New Jersey, 1994.
7. Дудюк Д.Л., Максимів В.М., Соколовський Я.І. Основні висліди моделювання й оптимізації автоматизованих ліній// Наук. вісник.: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2002, вип.12.3. – С. 221-223.
8. Дудюк Д.Л. Місткість нагромаджувача між двома верстатами або дільницями// Наук. вісник. Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2002, вип.12.3. – С. 232-236.
9. Дудюк Д.Л. Оптимізаційні моделі автоматизованих ліній// Наук. вісник. Зб.наук.-техн.праць. – Львів: УкрДЛТУ, 2000, вип.10.1. – С. 236-244.

УДК 621.313.3:621.314.5

Доц. Т.В. Рудий, канд. техн. наук – УкрДЛТУ;
С.А. Гаранджа¹; І.П. Піщора²

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПРИВОДУ ЛІСОПИЛЬНОЇ РАМИ ТА АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ НА ЕОМ

Розглядається підхід до формування математичної моделі керованої електромеханічної системи приводу лісопильної рами на основі теорії моделювання електромашинно-вентильних систем. Подається алгоритм розв'язання задачі на ЕОМ.

T.V. Roudyj, S.A. Harandzha, I.P. Piciura

The mathematical model of the saw-mil frame system and the algorithm of its outcome with PC

The article deals with the procedure of forming a mathematical model of a managed electromechanical system of the saw-mil frame, based on the theory of modifying electro-machine-ventilate system. The algorithm of solving this tats with PC is given.

1. Загальна характеристика математичної моделі

Квазіусталеними режимами роботи приводу лісопильної рами будемо називати такі, які відповідають постійній швидкості обертання валу асинхронної машини, а перехідні процеси, пов'язані зі збуренням у системі, можна вважати закінченими. Таким чином, момент лісопильної рами може бути представленим однією з залежностей $M = f(M(\omega))$. Математична модель електромеханічної системи, включаючи систему автоматичного керування, формується на основі теорії моделювання електромашинно-вентильних систем [1].

Згідно з даною теорією у квазіусталених режимах відбуваються швидкоплинні процеси, пов'язані з комутацією вентилів перетворювача частоти. Тому, на основі досвіду моделювання процесів у керованих електромеханічних системах з напівпровідниковими перетворювачами впливає, що дослідження квазіусталених режимів роботи частотно-керованого приводу лісопильної рами доцільно проводити у фазних координатах.

¹ головний інж. – ТЗОВ "ЛАС-Автохім"

² зав. денним відділенням – Технологічний коледж УкрДЛТУ

Рівняння, які описують квазіусталені електромеханічні процеси у частотно-керованих приводах лісопильних рам, утворюють систему нелінійних диференційних, інтегральних, алгебричних і логічних рівнянь. Їх розв'язок можливий тільки числовим способом. Для розв'язання нашої задачі скористаємось явними методами інтегрування диференційних рівнянь типу Рунге-Кутта. Зауважимо, що інтегральні рівняння, які мають місце в описуваній системі керування, зводяться до диференційних рівнянь і їх розв'язання здійснюється також методом Рунге-Кутта.

Вважаємо, що при формуванні математичної моделі системи слід дотримуватись принципу універсальності, який дає змогу застосовувати однотипний підхід до формування моделі. Об'єкт дослідження будемо розглядати як з'єднання структурних елементів, кожен з яких є функціональним пристроєм, призначеним для виконання відповідних фізичних функцій. Такими структурними елементами у силовій частині привода лісопильної рами є: електрична мережа, керований випрямляч, реактор (ланка постійного струму), конденсатор, автономний інвертор напруги, асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором.

Кожен із зазначених елементів може працювати як у системі привода лісопильної рами на базі автономного інвертора напруги, так і в будь-якій іншій керованій електромеханічній системі. Тому математична модель, взята для цього, повинна мати застосування не тільки при дослідженні системи приводів лісопильних рам, а також і при дослідженні довільних керованих електромеханічних систем.

Математична модель привода лісопильної рами формується із моделей структурних елементів на основі рівнянь зв'язку, які визначаються топологією силових частини схеми.

Для об'єднання моделей структурних елементів в модель системи у частині електричної схеми використовуються закони Кірхгофа – прямі, або видозмінені (метод контурних струмів або вузлових потенціалів [1]). Зауважимо, що для схеми, яка розглядається, доцільним є використання методу вузлових потенціалів для розрахунку перехідних процесів в електричних колах з індуктивностями у вітках схеми. Цей метод знайшов широке застосування в математичних моделях керованих електромеханічних систем з напівпровідниковими перетворювачами у фазних координатах.

Таким чином, пропонується така узагальнена "технологія" формування математичної моделі [1].

Систему привода лісопильної рами умовно поділяємо на структурні елементи за функціональною ознакою.

Для структурних елементів формуємо математичні моделі як для багатополосників, полюсами яких є точки під'єднання структурних елементів у силовій частині системи.

Вибираємо спосіб (метод) визначення полюсів, значення яких дозволяють розрахувати процеси в окремих структурних елементах.

Враховуючи те, що математичні моделі структурних елементів є системами диференційних рівнянь, вибираємо числовий метод інтегрування диференційних рівнянь.

На основі вибраного методу обчислення числових значень потенціалів полюсів структурних елементів, як багатополісників, і методу числового інтегрування диференційних рівнянь, розробляємо алгоритм знаходження числових значень полюсів структурних елементів і приведення диференційних рівнянь до нормальної форми Коші числовим способом. Останнє представляє собою обчислення похідних змінних, що входять у диференційні рівняння, які використовуються в методі числового інтегрування диференційних рівнянь для обчислення цих змінних на кожному кроці інтегрування.

Виходячи з умови орієнтації алгоритму на використання сучасних програмних середовищ, розробляємо "технологію" підготовки вхідної інформації та обробки результатів розрахунку.

На основі функціонування програми, що забезпечує моделювання процесів, розробляємо методику постановки математичного експерименту на ЕОМ з дослідження процесів і характеристик у системі.

Згідно з описаним вище, математична модель електромеханічної системи приводу лісопильної рами для дослідження квазіусталених процесів є наступною.

2. Принцип формування математичної моделі електромеханічної системи приводу лісопильної рами у фазних координатах

Предметом дослідження є силова схема приводу лісопильної рами, яка подана на рис. 1. На цьому рисунку виділені структурні елементи, функціональне призначення яких є очевидним.

Структурний елемент, як багатополісник, описується узагальненим векторним рівнянням

$$p\vec{i} + \vec{G} \cdot \vec{\varphi} + \vec{C} = 0, \quad (1)$$

де: $\vec{i} = (i_1, \dots, i_n)_t$, $\vec{\varphi} = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)_t$ – вектори струмів віток і потенціали вузлів, якими під'єднується структурний елемент у систему; $\vec{G}, \vec{C}$ – відповідно матриця ($n \times n$) і вектор розмірності n , що визначаються параметрами структурного елемента (кількістю незалежних потенціалів системи і віток структурного елемента); n – кількість точок можливого з'єднання структурного елемента у системі.

Це рівняння називається зовнішнім і служить для "під'єднання" математичної моделі структурного елемента в модель системи. "Під'єднання" математичних моделей структурних елементів з використанням методу вузлових потенціалів для розрахунку перехідних процесів в електричних схемах з індуктивностями у вітках забезпечується рівняннями:

$$\vec{\varphi}_j - \vec{P}_{\varphi j} \cdot \vec{\varphi}_C = 0, \quad (j = 1, \dots, m),$$

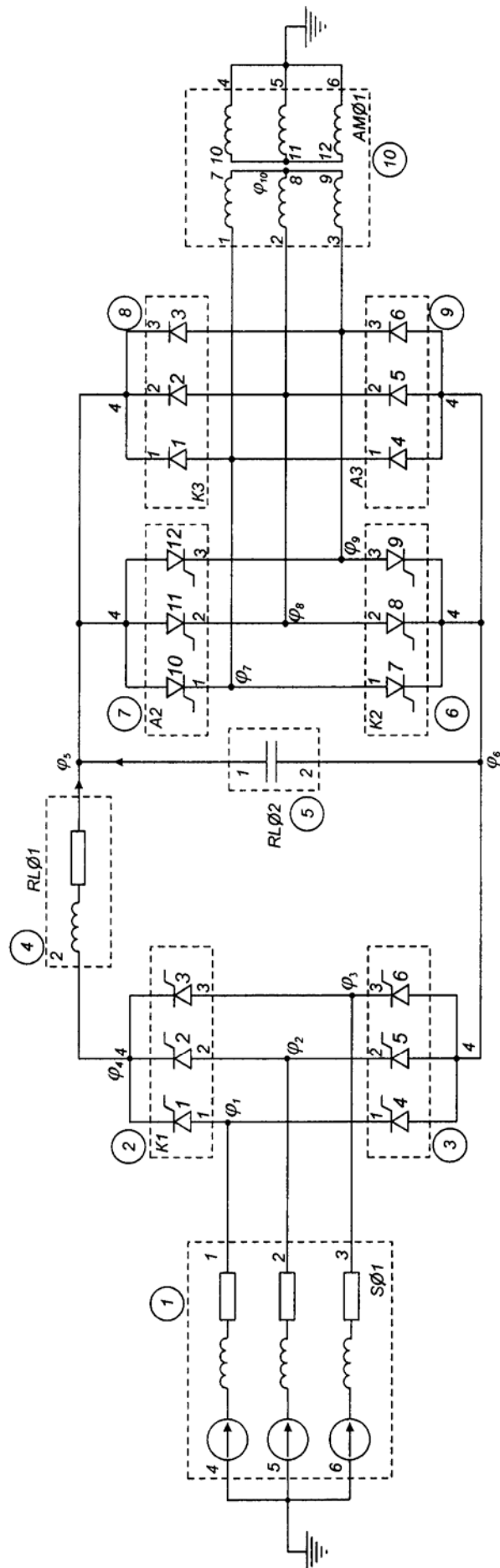


Рис. 1. Силова схема електроприводу лісопильної рами

$$\sum_{j=1}^m \vec{P}_j \cdot p\vec{i}_j = 0, \quad (2)$$

де: m – кількість структурних елементів; $\vec{P}$ – матриця інциденцій (під'єднань структурного елементу у системі); $\vec{P}_\varphi$ – матриця, транспонована у відношенні до матриці $\vec{P}$; $\vec{\varphi}_C$ – вектор потенціалів незалежних вузлів системи, точок під'єднання структурних елементів у системі.

З рівнянь (1), (2) виведено вузлове векторне рівняння електромеханічної системи

$$\vec{G}_C \cdot \vec{\varphi}_C + \vec{C}_C = 0, \quad (3)$$

$$\vec{G}_C = \sum_{j=1}^m \vec{P}_j \cdot \vec{G}_j \cdot \vec{P}_{\varphi j}, \quad \vec{C}_C = \sum_{j=1}^m \vec{P}_j \cdot \vec{C}_j, \quad (4)$$

де $\vec{G}_C, \vec{C}_C$ – матриця і вектор вузлового векторного рівняння електромеханічної системи.

Математичні вирази (1-4) описують електромеханічну систему ззовні, тобто в місцях з'єднань структурних елементів, як багатополіусників, у систему. У деяких випадках цих рівнянь є достатньо для того, щоб вичерпно описати систему. Проте, крім цих математичних виразів існують рівняння для визначення величин, які характеризують внутрішнє середовище структурних елементів. У загальному випадку вони мають вигляд:

$$p\vec{y}_1 = f_1(\vec{i}, p\vec{i}, \vec{y}_1), \quad \vec{y}_2 = f_2(\vec{i}, p\vec{i}, \vec{y}_1), \quad (5)$$

де: $\vec{y}_1$ – вектор змінних, які входять у рівняння структурного елементу у вигляді похідних, які, у свою чергу, входять в рівняння (1); $\vec{y}_2$ – вектор змінних, які не потребують визначення похідних.

Зауважимо, що потенціали зовнішніх вузлів – $\vec{\varphi}_C$ в електромеханічній системі (рис. 1) визначаються тільки для силової частини схеми.

Отже, математична модель електромеханічної системи, у загальному вигляді, подана математичними виразами (1-5).

Для обчислення невідомих у цих математичних виразах з використанням явного числового методу інтегрування диференціальних рівнянь пропонується наступний алгоритм.

Задаємось, або визначаємо початкові умови, які характеризують стан системи у деякий момент часу.

Обчислюємо параметри структурних елементів і на їх основі матриці $\vec{G}$ і вектори $\vec{C}$.

За рівняннями (4) обчислюємо матрицю $\vec{G}_C$ і вектор $\vec{C}_C$.

Розв'язуємо рівняння (3) відносно вектора $\vec{\varphi}_C$ методом Гауса – розв'язання систем лінійних алгебричних рівнянь.

Обчислюємо за допомогою першого рівняння (2) вектори потенціалів $\vec{\varphi}$, а за допомогою математичних виразів (5) – вектори $p\vec{y}_1$ і $\vec{y}_2$.

Формуємо вектори похідних змінних структурних елементів, названих в [1] векторами інтегрування:

$$p\vec{y} = (p\vec{i}, p\vec{y}_1). \quad (6)$$

Вектор похідних змінних електромеханічної системи складається з векторів змінних структурних елементів

$$p\vec{y}_C = (py_1, \dots, py_m)_t. \quad (7)$$

На основі числового методу розв'язання диференціальних рівнянь обчислюємо прирости і нові значення змінних, які стають початковими умовами для розрахунку на наступному кроці числового інтегрування диференціальних рівнянь.

Результатом розрахунку є розрахункові залежності від часу

$$\vec{y}_C = \vec{y}_C(t), \quad \vec{y}_{2j} = \vec{y}_{2j}(t), \quad (j = 1, \dots, m). \quad (8)$$

Описаний алгоритм розрахунку ілюструється блок-схемою, поданою на рис. 2.

На цьому рисунку блоки геометричних фігур відповідають таким обчисленням:

- 1) **ЧИ** – основний блок, який забезпечує числове інтегрування диференціальних рівнянь і керує послідовністю роботи решти блоків;
- 2) **ВВІ** – блок вводу вхідної інформації;
 α_j ($j = 1, \dots, m$) – блоки визначення констант для математичних моделей структурних елементів;
 β_j ($j = 1, \dots, m$) – блоки визначення параметрів і коефіцієнтів зовнішніх рівнянь структурних елементів;
- 3) – блок визначення коефіцієнтів незалежних вузлів – точок з'єднання структурних елементів у систему;
 γ_j ($j = 1, \dots, m$) – блоки визначення потенціалів полюсів, похідних внутрішніх змінних, які не потребують визначення похідних структурних елементів;
- 4) **ОРР** – блок обробки та аналізу результатів розрахунку.

Для забезпечення розв'язання рівнянь, які входять в математичну модель системи, необхідно сформувані матриці інцидентій структурних елементів. У зв'язку з тим, що структурні елементи розглядаються як багатоплюсники, в яких сигнали мають напрямки до вузла, елементами матриць інцидентій є одиниці зі знаком плюс і нулі.

Сформуємо матриці інцидентій для структурних елементів, які входять у систему рівнянь, подану на рис. 1.

Відносно структурних елементів, поданих на рис. 1, необхідно сформувати матриці інцидентій для електричної мережі – $\check{P}_{EM}$, перетворювача частоти, який складається з вентильних катодних груп випрямляча – $\check{P}_{BKB}$ і анодних груп – $\check{P}_{BAB}$, реактора – $\check{P}_R$, конденсатора – $\check{P}_C$, вентильних анод-

них і катодних груп інвертора – $\check{P}_{BKI}$, $\check{P}_{BAI}$, зворотних діодів – $\check{P}_{BKD}$, $\check{P}_{BAD}$, асинхронної машини – $\check{P}_{AM}$.

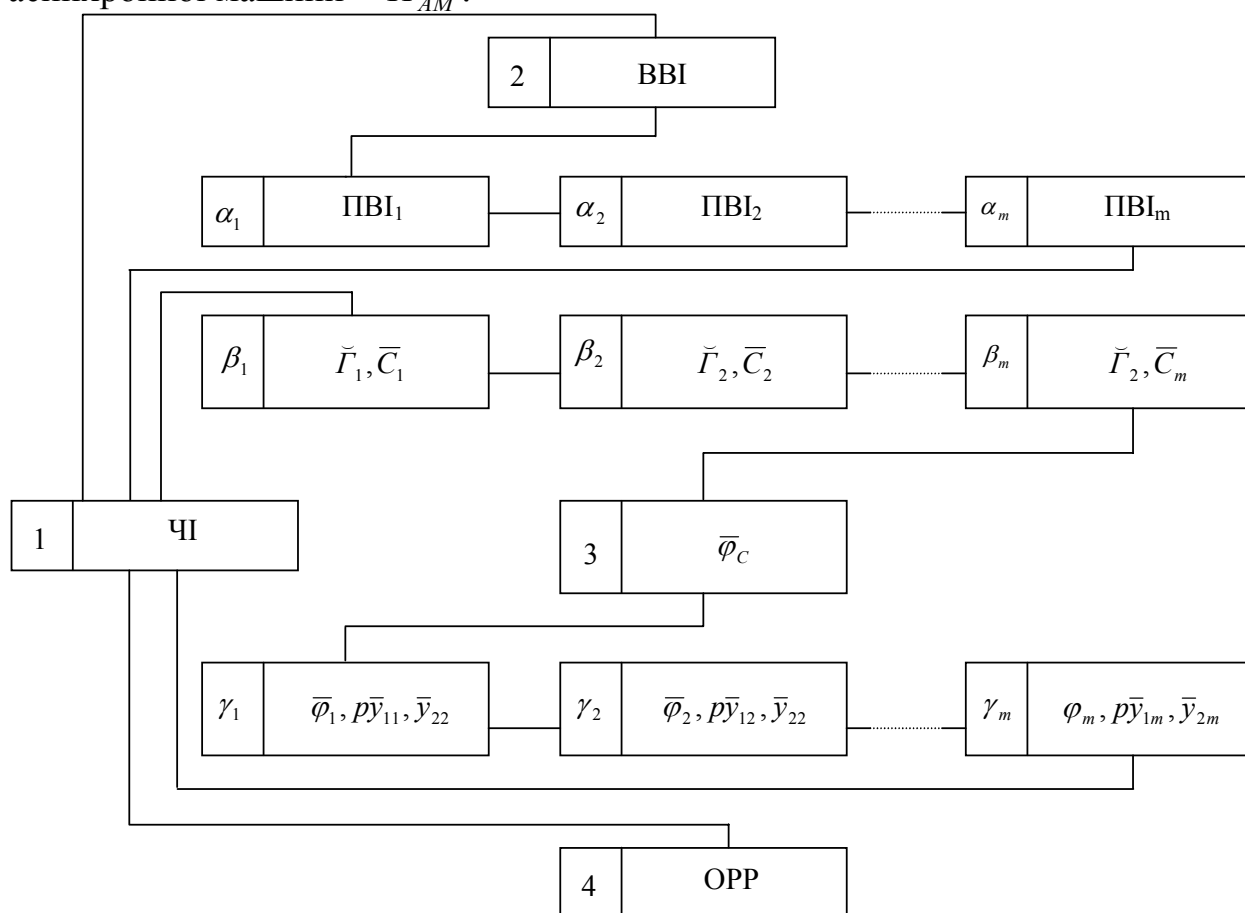


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку

З огляду на специфіку формування цифрової моделі системи ці матриці задаємо у вигляді порядкових номерів елементів матриць, які є одиницями. Номери вказаних елементів визначаємо за формулою:

$$N = (j - 1) \cdot n + k, \quad (9)$$

де: n – кількість стовпців матриці; j, k – номери рядка і стовпця, на перетині яких розміщена одиниця.

Матриці інцидентів (під'єднання) структурних елементів у числовому вигляді задані таким чином:

$$\check{P}_{EM} = (1, 8, 15); \quad \check{P}_{BKB} = (1, 6, 11, 16); \quad \check{P}_{BAB} = (1, 6, 11, 24);$$

$$\check{P}_R = (8, 9); \quad \check{P}_C = (9, 12); \quad \check{P}_{BKI} = (24, 25, 30, 35);$$

$$\check{P}_{BAI} = (20, 25, 30, 35); \quad \check{P}_{BKD} = (20, 25, 30, 35); \quad \check{P}_{BAD} = (24, 25, 30, 35);$$

$$\check{P}_{AM} = (73, 86, 99, 115, 116, 117, 130, 131, 132).$$

3. Алгоритм розв'язання задачі на ЕОМ

У загальних рисах алгоритм розв'язання задачі на ЕОМ відповідає блок-схемі, поданій на рис. 2. Проте в цій схемі не відтворено нюансів, які виникають за наявності напівпровідникового перетворювача. В останньому параметри змінюються дискретно, згідно з фізичними особливостями роботи вентилів. Тому ці особливості варто передбачити в алгоритмі розв'язання задачі.

Інтегрування диференційних рівнянь згідно з блок-схемою (рис. 2) відбувається в межах неперервності похідних, тобто елементів вектора інтегрування системи $\vec{p}_C$. Напівпровідниковий перетворювач вносить розриви (скачкоподібну зміну) у вектор інтегрування в моменти вмикання і вимикання кожного з вентилів електричної схеми.

Вмикання вентиля, згідно з фізикою його роботи, відбувається за наявності сигналу на його сітці і додатної напруги на аноді. Вимикання відбувається в момент переходу його струму через нуль з додатного значення на від'ємне. Виходячи з цього, слід передбачити два програмні модулі, один з яких змінював би параметри вентилів для закритого стану на параметри вентилів для відкритого стану, а інший – навпаки, тобто модуля відкривання вентилів і модуля закривання вентилів.

Розглянемо алгоритм, який відповідає модулю відкривання вентилів на прикладі вентилів керованого випрямляча.

1. Розв'язується система рівнянь відносно похідних, тобто, згідно з рис. 2 виконуються модулі β_j, γ_j ; ($j = 1, \dots, m$), і обчислюються при цьому напруги на анодах вентилів, які є функціями струмів і похідних струмів у вентилях.
2. Визначається наявність сигналу на сітці вентиля, який є функцією е.р.с. електричної мережі або кута вектора основної гармоніки напруги, прикладеної до анода, кута керування і ширини імпульсу, що подається на сітку. Зокрема, якщо кут керування або кут вектора напруги відповідної фази перебуває у межах $[\alpha_K, \alpha_K + \alpha_{III}]$, де α_K – кут керування, α_{III} – ширина імпульсу, який подається на сітку, тоді вважається, що на сітці є сигнал.
3. Перевіряється умова

$$Z_C \wedge Z_U \wedge Z_B = true, \quad (10)$$

де: Z_C – умова наявності сигналу на сітці ($Z_C = true$ відповідає наявності сигналу, $Z_C = false$ відповідає відсутності сигналу); Z_U – умова наявності додатної напруги на аноді ($Z_U = true$ – напруга додатна, $Z_U = false$ – напруга від'ємна або дорівнює нулю); Z_B – умова стану вентиля ($Z_B = true$) – вентиль закритий, $Z_B = false$ – вентиль відкритий).

Якщо умови (10) виконуються, тоді параметрам вентиля присвоюються значення, які відповідають його відкритому стану, а Z_B присвоюється значення $false$ (вентиль переводиться у відкритий стан).

Зміна стану вентиля призводить до скачкоподібної зміни вектора інтегрування, а значить напруги на вентилях, тому у даному випадку слід повернутись до п.1.

Якщо ж умова (10) не виконується, тоді для наступних вентилів, згідно з їх нумерацією, виконуються пункти 2, 3. Вихід з модуля відбувається після опрацювання (визначення параметрів) кожного вентиля схеми.

Після виходу з модуля відкривання вентилів система рівнянь має розв'язок відносно похідних, значить на даний момент відомі вектори $\vec{y}_C, p\vec{y}_C$, які використовуються як початкова інформація, а також для числового інтегрування диференціальних рівнянь на наступному кроці.

При закриванні вентилів необхідно знати момент часу, коли струм відкритого вентиля стає рівним нулю. Операція знаходження точки переходу струму відкритого вентиля через нуль виконується після виходу з модуля числового інтегрування диференціальних рівнянь у кінці кроку інтегрування. Модуль закривання вентилів, який визначає точку переходу струму відкритого вентиля через нуль, базується на числовому способі інвертування диференціальних рівнянь і реалізується за таким алгоритмом:

1. Беруться значення вектора інтегральних змінних y_C на початку і у кінці кроку інтегрування диференціальних рівнянь. У зв'язку з тим, що на кроці інтегрування не може бути скачкоподібної зміни похідної, і на початку кроку інтегрування параметри вентилів визначені, і на основі фізичного принципу роботи вентилів струми в них не можуть протікати у зворотному напрямку, струми вентилів, що відповідають вектору інтегральних змінних на початку кроку інтегрування, є додатними. У кінці кроку інтегрування деякі з них можуть бути від'ємними.
2. У циклі перевіряється знак струмів всіх вентилів вектора інтегральних змінних у кінці кроку інтегрування. При цьому, якщо має місце від'ємне значення струму, ігнорується значення вектора інтегральних змінних у кінці кроку інтегрування, здійснюється повернення до вектора інтегральних змінних на початку кроку, як до нових початкових умов і інтегрується загальна система диференціальних рівнянь за аргументом струму вентиля, який у кінці кроку інтегрування за часом був від'ємним. Назвемо цей обчислювальний процес операцією повернення. Кроком інтегрування при цьому береться значення струму вказаного вентиля з від'ємним знаком з вектора інтегральних змінних на початку кроку. Для реалізації обчислень необхідні похідні змінних за струмом вентиля. Вони обчислюються шляхом ділення похідних за часом на похідну струму вентиля за часом. Крім цього, знаходиться похідна часу за струмом вентиля, як обернена величина до похідної струму вентиля за часом. У решті процес інтегрування за струмом вентиля такий самий, як і за часом. Час у даному випадку є функцією струму вентиля. У кінці кроку інтегрування за струмом вентиля струм цього вентиля дорівнює нулю, а величина часу відповідає моменту переходу струму вентиля через нуль.

Операція перевірки знаків струмів і повернення назад при від'ємному значенні здійснюється для кожного вентиля, тому в результаті у векторі інтегральних змінних у кінці кроку інтегрування будуть відсутні від'ємні значення струмів у відкритих вентилях.

3. Якщо в циклі відбулись одна або декілька операцій повернення назад, то змінюються параметри з відкритого стану – на закритий того вен-

тиля, для якого операція повернення, яка відбулась в описаному циклі, була останньою. Відсутність повернення (наявність від'ємного знаку у струмі відкритого вентиля) не призводить до зміни параметрів вентилів напівпровідникового перетворювача.

Крім описаних модулів, слід виділити модулі формування розрахункової бази даних, які представляють собою залежності від часу всіх змінних, що можуть мати інтерес для дослідника чи проектанта електромеханічної системи приводу лісопильної рами. Також слід виділити окремо модуль, який реалізує числовий метод інтегрування диференціальних рівнянь.

З використанням описаних модулів алгоритм розв'язання задачі на ЕОМ може бути поданий блок-схемою, поданою на рис. 3.

Блок 1 відповідає запуску.

Блок 2 реалізує ввід початкової інформації структурних елементів, це модулі вводу та обробки початкової інформації α_j (рис. 2).

Блок 3 реалізує ввід початкової інформації з файлу даних, яка є загальною і не може бути віднесена до початкової інформації структурних елементів.

Блок 4 забезпечує підготовку до циклічного процесу розв'язання задачі, визначає константи моделі.

Блок 5 здійснює відкривання вентилів, згідно з описаним вище алгоритмом.

Блок 6 формує файл результатів розрахунків і передає керування на закінчення процесу розрахунку, здійснивши при цьому вивід необхідної інформації.

Блок 7 реалізує числове інтегрування диференціальних рівнянь.

Блок 8 реалізує числовим способом інвертування диференціальних рівнянь точку переходу струму через нуль у відкритому вентилі, згідно з описаним вище алгоритмом.

Блок 9 передає керування на блок 10, якщо струм відкритого вентиля на кроці інтегрування перейшов через нуль струмів відкритих вентилів.

Блок 10 забезпечує закривання вентиля, струм якого став дорівнювати нулю в результаті числового інвертування диференціальних рівнянь.

Блок 11 здійснює обчислення вектора інтегрування $p\bar{u}_c$, виконуються обчислювальні операції, згідно з блоками β_j, γ_j ; ($j = 1, \dots, m$), (рис. 2).

Блок 12 завершує розрахунок на ЕОМ, згідно з описаною вище математичною моделлю.

Зауважимо, що блоки 5, 7, 8 здійснюють звернення до блоку визначення вектора інтегрування, а блок 8 звертається до блоку числового інтегрування диференціальних рівнянь. Блок числового інтегрування диференціальних рівнянь інтегрує їх як за часом, так і за струмом відповідного вентиля.

Поданий циклічний обчислювальний процес відпрацьовано в результаті багаторічної практики моделювання процесів в електромеханічних системах з напівпровідниковими перетворювачами. Алгоритм, поданий на рис. 3, на нашу думку, є оптимальним, він не може призводити до зациклювання обчислювального процесу.

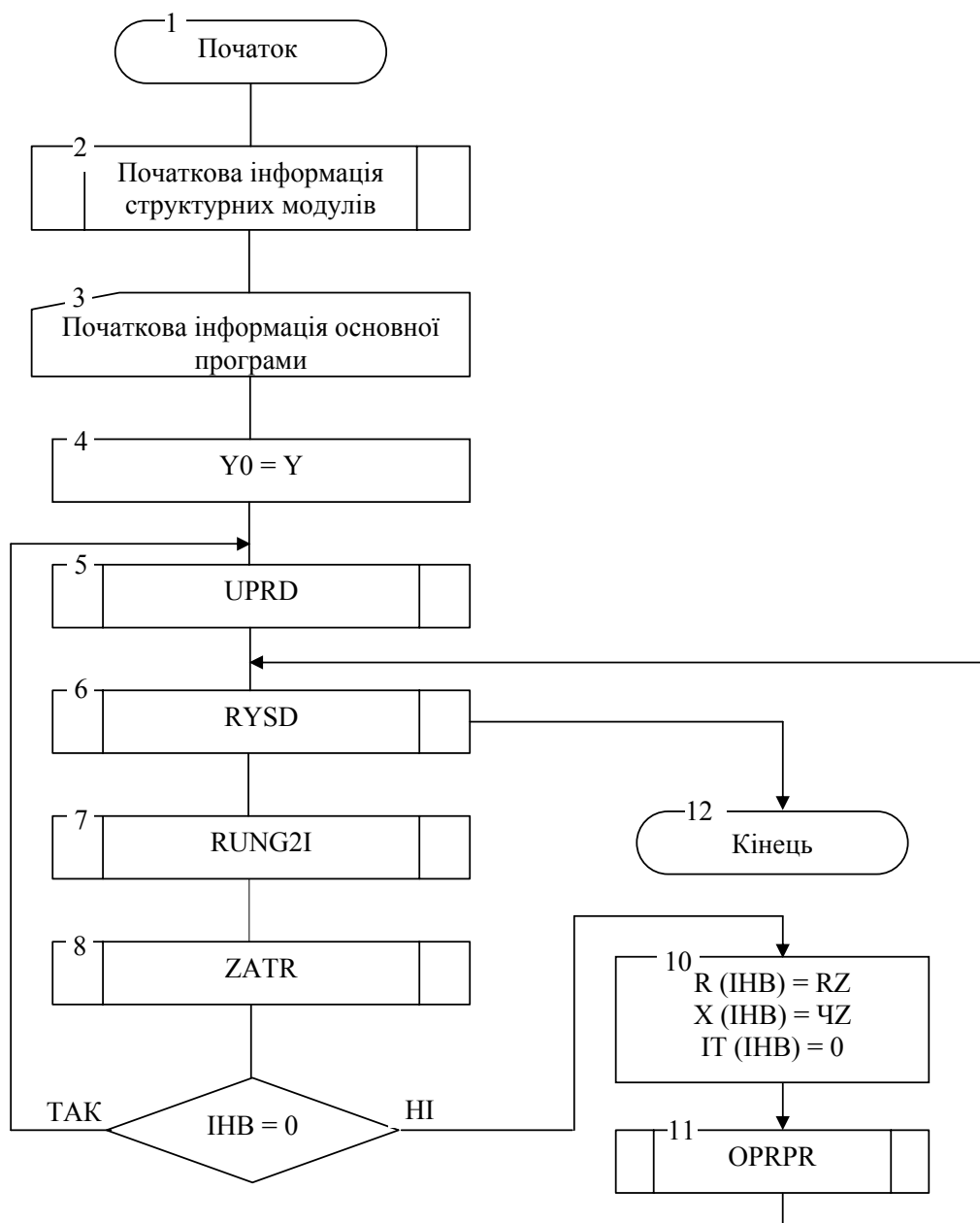


Рис. 3. Блок-схема основного програмного модуля, що відповідає алгоритму розв'язування задачі на ЕОМ

Література

1. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.

УДК 628.511

Проф. А.І. Дубинін, д-р техн. наук,
В.В. Майструк, канд. техн. наук – УкрДЛТУ

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ ПИЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОФОТОСЕДИМЕНТОМЕТРА

Наведено схему і принцип роботи електрофотоседиментометра, виготовленого авторами. Описано методику проведення аналізу дисперсного складу пилу за допомогою електрофотоседиментометра. Результати аналізів перевірені з використанням електрофотоседиментометра "Седиграф 5000Е".