

УДК 621.314.2

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОЇ МАШИНИ

А. Куцик

*Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, Львів 79013, Україна*

З використанням теорії об'єктно-орієнтованого проектування та теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем розроблено об'єктно-орієнтовану математичну модель синхронної машини. Описано загальні принципи застосування математичних моделей елементів електромеханічних систем у формі об'єктів згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу для формування математичної моделі електромеханічної системи.

Ключові слова: математичне моделювання, синхронна машина, об'єктно-орієнтований підхід.

Використання методів математичного моделювання дає змогу не лише дослідити складні електротехнічні чи електромеханічні системи з мінімальними матеріальними затратами, а й отримати повну інформацію про поведінку об'єкта дослідження в аварійних чи близьких до аварійних режимах роботи, що не можливо шляхом фізичних експериментів на установках. Шляхом математичного моделювання можна також отримати інформацію про координати об'єкта, які не підлягають безпосередньому вимірюванню під час фізичного експерименту.

Водночас у випадку використання методів математичного моделювання виникає проблема розробки математичних моделей, які, з одного боку, були б максимально прості у використанні, а з іншого, – давали б змогу отримати повну інформацію про поведінку об'єкта дослідження у всіх можливих режимах роботи. Ця проблема особливо актуальна в разі побудови моделей складних елементів, якими, наприклад, є моделі електричних машин, загалом, і синхронної машини, зокрема.

Сьогодні часто використовують спрощені моделі синхронної машини на основі передатних функцій другого чи третього порядків, які дають змогу виконати певні аналітичні розрахунки в процесі синтезу систем автоматичного регулювання в околі певної робочої точки, для якої провадять лінеаризацію. Однак використання таких моделей неможливе у випадку значного діапазону зміни координат синхронної машини, що буває в багатьох режимах її роботи.

Тому доцільне використання уточнених моделей на основі електромагнітних параметрів, які б давали повну інформацію про координати синхронної машини у

всіх режимах роботи. Такі моделі, звичайно, є достатньо складними і потребують комп'ютерної реалізації.

Зазначимо, що згідно з [3], математичною моделлю є наближений опис певного класу явищ, виражений за допомогою математичної символіки, під якою розуміють символічний, формальний опис причинно-наслідкових відношень між абстрактними об'єктами і поняттями, також виражених символами. Такий опис можна навести у різних виглядах: аналітичному (як система рівнянь різних типів) чи структурних схем, блок-схем, діаграм та ін.

З огляду на складність математичних моделей елементів електротехнічних систем та неможливість отримати з їхнім використанням результатів розрахунку в аналітичному вигляді, необхідна реалізація цих моделей у комп'ютерному вигляді. В більшості сучасних засобів комп'ютерного моделювання, зокрема, таких як Matlab, MicroCap та інші, для спрощення процедури моделювання моделі складних елементів реалізують у вигляді окремих об'єктів, з яких і формується комп'ютерна модель системи в цілому. В цьому випадку користувач під час створення моделі оперує не окремими рівняннями та алгоритмами, а готовими моделями елементів, що є в складі модельованої системи.

Ми мали на меті розробити модель синхронної машини в об'єктно-орієнтованій формі, придатну для використання в процесі формування моделей електромеханічних систем з застосуванням об'єктно-орієнтованого методу.

Використання такого підходу покликане спростити процес формування комп'ютерних моделей систем, у яких є складні з погляду математичного опису елементи, оскільки користувач для побудови такої моделі оперуватиме вже готовою моделлю елемента як об'єктом, а не окремими рівняннями, які його описують.

Модель синхронної машини у формі об'єкта розроблена поєднанням теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем професора О.Г. Плахтини [4] та теорії об'єктно-орієнтованого проектування, описаної в [1, 2].

Використання теорії об'єктно-орієнтованого проектування (ООП) дає змогу створювати моделі елементів систем як об'єктів відповідно до принципів об'єктно-орієнтованого підходу на засадах об'єктно-орієнтованої композиції з подальшим формуванням із цих об'єктів моделі системи в цілому. Модель у цьому випадку є сукупністю об'єктів (а не окремих рівнянь), які взаємодіють між собою, причому кожний розглядають як екземпляр певного класу.

Одним з найважливіших принципів об'єктно-орієнтованого підходу є абстрагування, яке полягає у виділенні абстракцій – таких важливих характеристик об'єкта або групи об'єктів, які відрізняють їх від усіх інших видів об'єктів і чітко визначають особливості цих об'єктів з погляду їхнього подальшого розгляду, аналізу та моделювання. В теорії ООП абстрагування виявляється у формуванні класів, що описують типи об'єктів, операції, які можна виконати над об'єктами, і операції, що їх можуть виконати самі об'єкти. Класи будують за ієрархічним принципом, а головний тип відношень між класами є успадкування, коли один клас (нащадок) використовує структуру чи функціональну частину одного або декількох інших класів (відповідно, проста та множинна спадковості).

Метод математичного моделювання, який ґрунтується на теорії ООП, оперує з об'єктами, як з певною реальністю, якій притаманний стан, поведінка й

індивідуальність. Структуру і поведінку подібних об'єктів визначає спільний для них клас, а терміни “об'єкт” і “екземпляр класу” ідентичні.

Стан об'єкта характеризують переліком усіх можливих параметрів (іншими словами – властивостей) цього об'єкта і значенням цих властивостей. До властивостей об'єкта можна зачислити притаманні йому характеристики, які роблять об'єкт унікальним (індивідуальним) і які в процесі існування об'єкта набувають певних значень.

Згідно з підходом, реалізованим у теорії моделювання електромашинно-вентильних систем [4], синхронну машину уявимо восьмиполюсником (рис. 1). Демпферну обмотку синхронної машини відтворимо двома короткозамкненими індуктивностями, зорієнтованими по осях d і q синхронної машини.

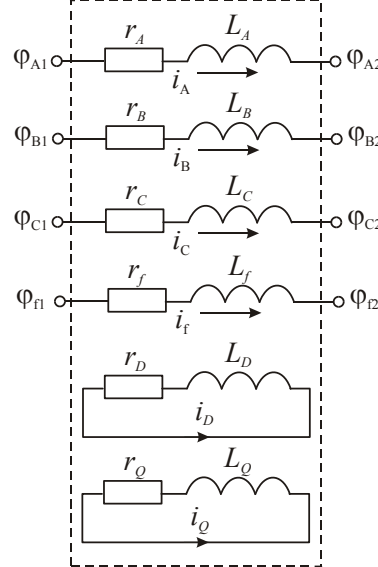


Рис. 1. Розрахункова схема синхронної машини.

Система рівнянь, яка описує явнопольосну синхронну машину (СМ), зображену на рис. 1, має вигляд

$$\vec{\varphi}_1 - \vec{\varphi}_2 - p\vec{\psi}_{ee} - \vec{R}_{ee} \cdot \vec{i}_{ee} = 0, \quad p\vec{\psi}_{ii} - \vec{R}_{ii} \cdot \vec{i}_{ii} = 0, \quad (1)$$

де $\vec{\varphi}_1 = (\varphi_{A1}, \varphi_{B1}, \varphi_{C1}, \varphi_{f1})$, $\vec{\varphi}_2 = (\varphi_{A2}, \varphi_{B2}, \varphi_{C2}, \varphi_{f2})$ – вектори потенціалів у вузлах приєднання; $\vec{i}_{ee} = (i_A, i_B, i_C, i_f)$ – вектор струмів статора й обмотки збудження; $\vec{i}_{ii} = (i_D, i_Q)$ – вектор струмів внутрішніх контурів; $\vec{\Psi}_{ee} = (\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f)$ – вектори потокозчеплень; $\vec{R}_{ee} = \text{diag}(r_A, r_B, r_C, r_f)$ – матриця активних опорів фазних обмоток і обмотки збудження; $\vec{R}_{ii} = \text{diag}(r_D, r_Q)$ – матриця активних опорів демпферних обмоток.

Оскільки

$$\bar{\psi}_{ee} = \psi_{ee}(\bar{i}_{ee}, \bar{i}_{ii}, \gamma), \quad \bar{\psi}_{ii} = \psi_{ii}(\bar{i}_{ee}, \bar{i}_{ii}, \gamma),$$

$$p\bar{\psi}_{ee} = \frac{\partial \bar{\psi}_{ee}}{\partial \bar{i}_{ee}} \cdot p\bar{i}_{ee} + \frac{\partial \bar{\psi}_{ee}}{\partial \bar{i}_{ii}} \cdot p\bar{i}_{ii} + \frac{\partial \bar{\psi}_{ee}}{\partial \gamma} \cdot p\gamma = \bar{L}_{ee} \cdot p\bar{i}_{ee} + \bar{L}_{ei} \cdot p\bar{i}_{ii} + \bar{\psi}'_{ee} \cdot p\gamma;$$

$$p\bar{\psi}_{ii} = \frac{\partial \bar{\psi}_{ii}}{\partial \bar{i}_{ee}} \cdot p\bar{i}_{ee} + \frac{\partial \bar{\psi}_{ii}}{\partial \bar{i}_{ii}} \cdot p\bar{i}_{ii} + \frac{\partial \bar{\psi}_{ii}}{\partial \gamma} \cdot p\gamma = \bar{L}_{ie} \cdot p\bar{i}_{ee} + \bar{L}_{ii} \cdot p\bar{i}_{ii} + \bar{\psi}'_{ii} \cdot p\gamma. \quad (2)$$

Коефіцієнти рівнянь системи (2) визначені так:

$$\bar{\psi}'_{ee} = \bar{L}'_{ee} \cdot \bar{i}_{ee} + \bar{L}'_{ei} \cdot \bar{i}_{ii}, \quad \bar{\psi}'_{ii} = \bar{L}'_{ie} \cdot \bar{i}_{ee}, \quad (3)$$

де $\bar{L}'_{ee}, \bar{L}'_{ei}, \bar{L}'_{ie}$ – похідні матриць $\bar{L}_{ee}, \bar{L}_{ei}, \bar{L}_{ie}$ за кутом повороту ротора;

$$\bar{L}_{ee} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} \end{bmatrix}, \quad \bar{L}_{ei} = \begin{bmatrix} L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CD} & L_{CQ} \\ L_{fD} & L_{fQ} \end{bmatrix}, \quad \bar{L}_{ie} = \begin{bmatrix} L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} \end{bmatrix};$$

\bar{L}_{ee} – матриця (4×4) взаємних і власних індуктивностей фазних обмоток статора та обмотки збудження, де діагональні елементи $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{ff}$ – власні індуктивності фазних обмоток і обмотки збудження, а всі інші – взаємні індуктивності відповідних обмоток; $\bar{L}_{ei}, \bar{L}_{ie}$ – матриці взаємних індуктивностей демпферних обмоток та обмоток фаз статора і збудження машини; $\bar{L}_{ii} = (L_{DD}, L_{QQ})$ – матриця власних індуктивностей демпферних обмоток.

Система рівнянь (1) після підстановки виразів з (2) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 - \bar{\varphi}_2 - \bar{L}_{ee} \cdot p\bar{i}_{ee} - \bar{L}_{ei} \cdot p\bar{i}_{ii} - \bar{\psi}'_{ee} \cdot p\gamma - \bar{R}_{ee} \cdot \bar{i}_{ee} &= 0, \\ \bar{L}_{ie} \cdot p\bar{i}_{ee} + \bar{L}_{ii} \cdot p\bar{i}_{ii} + \bar{\psi}'_{ii} \cdot p\gamma + \bar{R}_{ii} \cdot \bar{i}_{ii} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Знайдемо з другого рівняння системи (4) вираз для $p\bar{i}_{ii}$ і підставимо його в перше рівняння, отримаємо

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 - \bar{\varphi}_2 - \left(\bar{L}_{ee} - \bar{L}_{ei} \cdot \bar{L}_{ii}^{-1} \cdot \bar{L}_{ie} \right) \cdot p\bar{i}_{ee} - \\ - \left(\bar{\psi}'_{ee} \cdot p\gamma + \bar{R}_{ee} \cdot \bar{i}_{ee} - \bar{L}_{ei} \cdot \bar{L}_{ii}^{-1} \cdot \left(\bar{\psi}'_{ii} \cdot p\gamma + \bar{R}_{ii} \cdot \bar{i}_{ii} \right) \right) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

З урахуванням того, що $p\gamma = p_0\omega$, де γ – кут повороту ротора в електричних градусах; p_0 – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість обертання ротора, та з уведенням позначення

$$\begin{aligned}\tilde{L} &= \tilde{L}_{ee} - \tilde{L}_{ei} \cdot \tilde{L}_{ii}^{-1} \cdot \tilde{L}_{ie}; \\ \tilde{E} &= \tilde{\psi}_{ee}^{\gamma} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{ee} \cdot \tilde{i}_{ee} - \tilde{L}_{ei} \cdot \tilde{L}_{ii}^{-1} \cdot \left(\tilde{\psi}_{ii}^{\gamma} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{ii} \cdot \tilde{i}_{ii} \right)\end{aligned}$$

запишемо систему рівнянь (4) в такому вигляді:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}_1 - \tilde{\varphi}_2 - \tilde{L} \cdot p\tilde{i}_{ee} - \tilde{E} &= 0, \\ p\tilde{i}_{ii} &= -\tilde{L}_{ii}^{-1} \cdot \left(\tilde{L}_{ie} \cdot p\tilde{i}_{ee} + \tilde{\psi}_{ii}^{\gamma} \cdot p_0\omega + \tilde{R}_{ii} \cdot \tilde{i}_{ii} \right).\end{aligned}\quad (6)$$

Додамо до системи рівнянь (6) рівняння механічного стану:

$$M + M_n = Jp\omega, \quad (7)$$

де M – електромагнітний момент машини; M_n – момент, прикладений до вала ротора; J – момент інерції ротора, одержимо математичну модель явноплюсної синхронної машини, яку надалі необхідно перетворити до об'єктно-орієнтованого вигляду.

У процесі існування об'єкти зазнають впливів або самі впливають на інші об'єкти. Поведінка об'єкта визначена його діями і характеризує те, як об'єкт впливає або підпадає під впливи інших об'єктів з погляду зміни стану цих об'єктів і передавання інформації між ними. В об'єктно-орієнтованих мовах програмування дії або операції, які може виконати об'єкт, або які можна виконати над об'єктом, називають методами, або функціями.

В одному об'єкті, згідно з принципом інкапсуляції (який є фундаментальним принципом об'єктно-орієнтованого проектування), поєднуються методи, що визначають його поведінку та властивості. Принцип інкапсуляції передбачає також обмеженість доступу до властивостей та методів класу чи об'єкта як екземпляра класу. Згідно з цим принципом, елементи об'єкта поділяють на відкриті (публічні), доступ до яких з боку інших об'єктів необмежений, і які формують інтерфейс об'єкта (класу), та закриті (приватні), доступ до яких можливий лише елементам заданого класу чи об'єкта.

Структуру об'єкта – синхронної машини, а також принцип його роботи показано на рис. 2. Завданням цього об'єкта, як і інших об'єктів – моделей структурних елементів, з яких складається електромеханічна система, відповідно до запропонованого об'єктно-орієнтованого методу моделювання, є визначення змінних, які описують цей об'єкт, а саме: визначення значень похідних змінних, які інтегрують (надалі такі змінні будемо називати інтегральними), та значень змінних, які не інтегрують, а визначають за алгебричними рівняннями. Інтегральними змінними для синхронної машини є струми обмоток $\tilde{i}_{ee}, \tilde{i}_{ii}$; кут повороту ротора та кутова швидкість γ, ω . Змінними, які не інтегрують, є електромагнітний момент M , потік ψ та кут навантаження θ .

До відкритих даних-елементів синхронної машини як об'єкта, доступ до яких необмежений для інших об'єктів у складі моделі електромеханічної системи, належать: інтегральні змінні синхронної машини $\vec{Y}_{cm} = (\tilde{i}_{ee}, \tilde{i}_{ii}, \gamma, \omega)$; вектор інтегрування, елементами якого є похідні інтегральних змінних $p\vec{Y}_{cm} = (p\tilde{i}_{ee}, p\tilde{i}_{ii}, p\gamma, p\omega)$; електромагнітний момент синхронної машини, потік,

кут навантаження, момент на валу синхронної машини M_n , а також матриця \tilde{P} , яка задає спосіб з'єднання синхронної машини з іншими об'єктами-структурними елементами в складі модельованої системи.

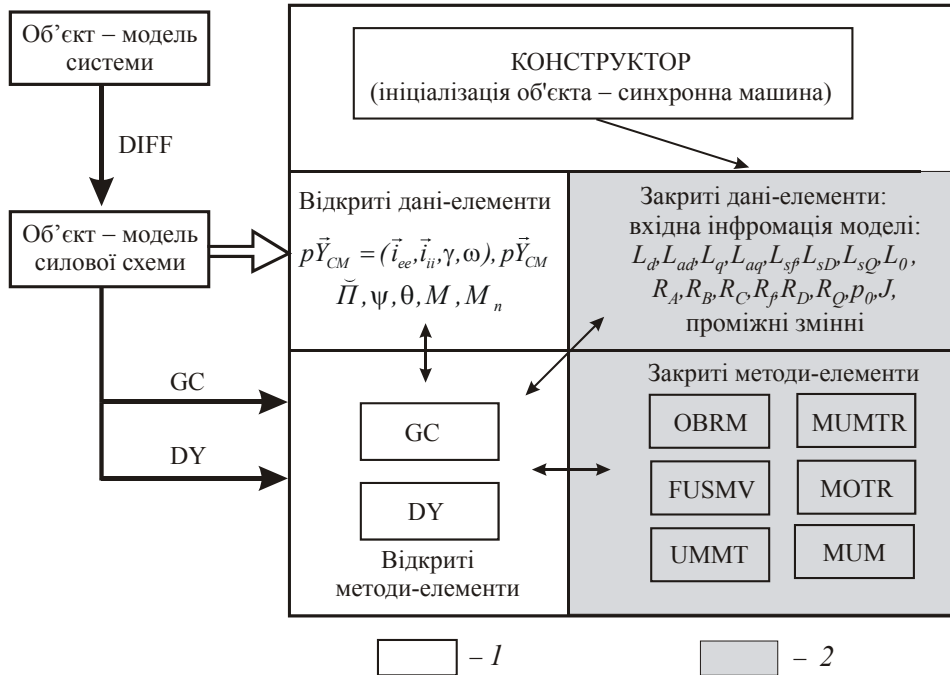


Рис. 2. Структура об'єкта-моделі синхронної машини;

1 – інтерфейс об'єкта; 2 – закрита частина об'єкта.

Закритими даними-елементами об'єкта “синхронна машина” є параметри синхронної машини, необхідні для розрахунку, а саме: індуктивність синхронної машини по осі d L_d ; індуктивність реакції якоря синхронної машини по осі d L_{ad} ; індуктивність синхронної машини по осі q L_q ; індуктивність реакції якоря синхронної машини по осі q L_{aq} ; індуктивність розсіювання обмотки збудження L_{sf} ; індуктивність розсіювання демпферної обмотки по осі d L_{sD} ; індуктивність розсіювання демпферної обмотки по осі q L_{sQ} ; індуктивність нульової послідовності L_0 ; активні опори обмотки статора R_A, R_B, R_C ; активний опір обмотки збудження R_f ; кількість пар полюсів p_0 ; момент інерції ротора J , а також проміжні змінні, необхідні для розрахунку.

До закритих методів-елементів синхронної машини як об'єкта належать методи, що реалізують різноманітні матричні операції, необхідні для його роботи, а саме: OBRM (знаходження оберненої матриці шляхом розв'язування системи рівнянь методом Гауса), MUM (множення прямокутних матриць за формулою $\tilde{C} = \tilde{A} \times \tilde{B}$), MUMTR (множення прямокутної матриці на транспоновану матрицю за формулою $\tilde{C} = \tilde{A} \times \tilde{B}_t$), MOTR (знаходження різниці двох матриць за формулою $\tilde{C} = \tilde{A} - \tilde{B}$), FUSMV (обчислення на основі коефіцієнтів зовнішніх рівнянь вигляду

(8) структурних елементів та матриць з'єднання структурних елементів коефіцієнтів рівняння для знаходження потенціалів незалежних вузлів системи), УММТ (обчислення потенціалів зовнішніх гілок структурних елементів на основі потенціалів незалежних вузлів електромеханічної системи).

Створення об'єкта-моделі синхронної машини виконує конструктор, для якого задають джерело введення вхідної інформації, необхідної для моделювання. Ця інформація автоматично визначає різновид моделі синхронної машини, наприклад, з урахуванням нелінійності характеристики магнітопроводу чи без, що можливо завдяки використанню явища поліморфізму, тобто зміни поведінки об'єкта залежно від ситуації.

Відкритими методами-елементами синхронної машини як об'єкта є методи-елементи GC та DY. Ці методи визначають поведінку заданого об'єкта і його взаємодію з іншими об'єктами, які є в складі моделі системи.

Метод GC. Цей метод визначає такі дії об'єкта-моделі синхронної машини:

- формування зовнішнього вузлового векторного рівняння вигляду

$$p\vec{i}_{CM} + \vec{G}_{CM} \cdot \vec{\varphi}_{CM} + \vec{C}_{CM} = 0, \quad (8)$$

яке визначає зв'язок між потенціалами зовнішніх вузлів $\vec{\varphi}_{CM} = (\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2)_t$ і струмами зовнішніх гілок $\vec{i}_{CM} = (\bar{i}_{ee}, -\bar{i}_{ee})_t$ синхронної машини як восьмиполюсника і внутрішніх рівнянь, що дають змогу разом з (8) визначати вектор інтегрування $p\vec{Y}_{CM}$. Коефіцієнти рівняння (8) обчислюють за формулами

$$\vec{G}_{CM} = \begin{pmatrix} \tilde{L}^{-1} & -\tilde{L}^{-1} \\ -\tilde{L}^{-1} & \tilde{L}^{-1} \end{pmatrix}, \quad \vec{C}_{CM} = \begin{pmatrix} \tilde{L}^{-1} \\ -\tilde{L}^{-1} \end{pmatrix} \times \vec{E};$$

- на підставі матриці приєднання \tilde{L} та коефіцієнтів рівняння вигляду (8) визначають складові коефіцієнтів рівняння для обчислення потенціалів вузлів електромеханічної системи, у складі якої працює синхронна машина;

- на підставі відомих інтегральних змінних синхронної машини визначає інші змінні, зокрема модуль потокозчеплення ψ , електромагнітний момент M та кут навантаження θ :

$$\psi = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}, \quad M = -\frac{3}{2} p_0 [(L_d - L_q) \dot{i}_d i_q + L_{ad} (i_f i_q + i_D i_q - i_Q i_d)], \quad \theta = \arctg \left(\frac{\psi_q}{\psi_d} \right),$$

де $\psi_d = L_d i_d + L_{ad} i_f + L_{ad} i_D$, $\psi_q = L_q i_q + L_{aq} i_Q$ – потокозчеплення в осях d, q ;

$$i_d = \frac{2}{3} [i_A \cos(\gamma) + i_B \cos(\gamma - \rho) + i_C \cos(\gamma - 2\rho)],$$

$$i_q = \frac{2}{3} [i_A \sin(\gamma) + i_B \sin(\gamma - \rho) + i_C \sin(\gamma - 2\rho)] - \text{струми статора в осях } d, q.$$

Метод DY. Цей метод визначає дії об'єкта-моделі синхронної машини зі знаходження вектора інтегрування синхронної машини на основі вектора потенціалів незалежних вузлів електромеханічної системи. Алгоритм його роботи такий:

• за відомими потенціалами незалежних вузлів електромеханічної системи, у якій працює синхронна машина, та матрицею приєднання визначають вектор потенціалів зовнішніх вузлів синхронної машини як восьмиполосника:

$$\vec{\varphi}_{CM} = P^T \vec{\varphi}_C;$$

• з рівняння (8) визначають вектор $p\vec{i}_{CM} = (p\vec{i}_{ee}, -p\vec{i}_{ee})_t$, елементами якого є похідні струмів обмоток статора і збудження, з рівняння (6) обчислюють струми внутрішніх контурів $p\vec{i}_{ii}$, з рівняння механічної рівноваги (7) – похідну швидкості $p\omega$ і за формулою $p\gamma = p_0\omega$ – похідну кута повороту ротора синхронної машини.

Принцип роботи об'єкта -“синхронна машина”. Робота об'єкта-моделі синхронної машини полягає у взаємодії з іншими об'єктами у складі моделі електромеханічної системи, зокрема, з об'єктом-моделлю силової схеми. Така взаємодія, згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу [2, 3], відбувається шляхом посилання повідомлень від одного об'єкта до іншого. Повідомлення ініціалізує відповідний відкритий метод об'єкта, якому це повідомлення адресоване. Цей метод визначає реакцію об'єкта-приймача на повідомлення.

Функції і принцип роботи об'єкта-моделі синхронної машини, показано на рис. 2. Вони полягають у такому:

• об'єкт-модель системи, який виконує координувальні функції у складі моделі конкретної електромеханічної системи з синхронною машиною, посилає повідомлення DIFF, адресоване об'єкту-моделі силової схеми, яке активізує роботу цього об'єкта з визначення похідних інтегральних змінних, які описують електромеханічну систему;

• об'єкт-модель силової схеми надсилає повідомлення GC об'єкту-моделі синхронної машини, відповідь на яке формується однойменним методом у складі цього об'єкта (див. його опис, наведений вище);

• після надсилання повідомлень GC всім іншим об'єктам-моделям структурних елементів, які є в складі модельованої системи, і отримання відповідей від них, коефіцієнти векторного рівняння для визначення потенціалів незалежних вузлів електромеханічної системи: $\vec{G}_C \vec{\varphi}_C + \vec{C}_C = 0$ будуть сформовані;

• об'єкт-модель силової схеми розв'язує отримане рівняння відносно вектора потенціалів незалежних вузлів системи $\vec{\varphi}_C$;

• об'єкт-модель силової схеми надсилає повідомлення DY об'єкту-моделі синхронної машини. Відповіддю на це повідомлення є значення похідних інтегральних змінних, які описують синхронну машину. Дії об'єкта-моделі синхронної машини з формування такої відповіді визначають відкритим методом DY цього об'єкта, який описано вище;

• після надсилання об'єктом-моделлю силової схеми повідомлень DY всім іншим об'єктам-моделям структурних елементів, які є в складі системи, і отримання відповідей від них, похідні всіх інтегральних змінних, які описують систему, будуть визначені. Значення цих похідних повертаються об'єкту-моделі системи, як відповідь на повідомлення DIFF;

- об'єкт-модель системи виконує числове інтегрування та отримує значення інтегральних змінних, які описують систему, на підставі яких об'єкти-моделі структурних елементів визначають усі інші змінні (якщо такі є). Наприклад, об'єкт-модель синхронної машини на основі значень інтегральних змінних синхронної машини визначає потокозчеплення та кут навантаження (див. опис методу GC);

- описаний процес є циклічним.

Описаний вище алгоритм визначає процес моделювання будь-якої електромеханічної системи з використанням об'єктно-орієнтованого методу. У випадку використання в електромеханічній системі вентильних перетворювачів модель системи доповнюється об'єктом-моделлю системи керування, яка визначає стан та параметри вентилів перетворювачів.

Отже, процес побудови математичної моделі складної електромеханічної системи доцільно розбити на процеси формування математичних моделей її окремих типових елементів з подальшим формуванням із них моделі системи в цілому. Математичні моделі складних елементів електромеханічних систем, наприклад, синхронної машини, доцільно уявляти як об'єкти, згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу.

Новизною статті є пропонування модель синхронної машини як об'єкта на підставі теорії об'єктно-орієнтованого проектування та теорії моделювання електромашинно-вентильних систем.

Розроблена математична модель синхронної машини на підставі її електромагнітних параметрів як об'єкта, дає змогу врахувати всі визначальні чинники, а саме: вплив масиву ротора, нелінійність характеристики намагнічування магнітопроводу, несиметрії, і може бути використана з прийнятною точністю у більшості випадків моделювання. Якщо потрібний ґрунтовніший аналіз процесів у синхронній машині (наприклад, аналіз розподілу магнітного поля всередині машини), то можна використати уточнену математичну модель синхронної машини на підставі теорії поля. Використання принципу поліморфізму, реалізованого в об'єктно-орієнтованому підході, дає змогу автоматично вибрати під час моделювання тип моделі за вхідною інформацією, що задана.

1. *Гради Буч.* Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения / Пер. с англ. М.: Конкорд. 1992. 519 с.
2. *Грэхем Иан.* Объектно-ориентированные методы. Принципы и практика. 3-е изд. / Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 880 с.
3. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1988.
4. *Плахтина Е.Г.* Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. Львов: Вища шк., 1986. 164 с.

**OBJECT-ORIENTED MATHEMATICAL MODEL
OF SYNCHRONOUS MASHINE**

A. Kutsyk

*National University "Lviv Polytechnic"
St. Bandery Str., 12, Lviv 79013, Ukraine*

For development of mathematical models of complicate elements of the electromechanics systems the object-oriented method is proposed. The object-oriented model of synchronous machine and the principles of modeling of the electromechanics systems with the use of offered approach are described in the paper.

Key words: synchronous machine, mathematical model, object-oriented method.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2005
Прийнята до друку 01.09.2005