

УДК 621.372

П.Г. Стахів, Ю.Я. Козак, В.Г. Гайдук

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ТЗЕ

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МАКРОМОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМІЗАЦІЇ

© Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Гайдук В.Г., 2001

На прикладі побудови математичної макромоделі електромеханічного перетворювача вентильного двигуна продемонстровано використання розбиття побудови на етапи при застосуванні оптимізаційного знаходження коефіцієнтів макромоделі. Проаналізовані і узагальнені методи проведення такого розбиття. Здійснений якісний аналіз факторів, на які впливає розбиття оптимізаційної задачі на частини.

The splitting of optimisation process is shown on the example of creation the model of electric engine. Some analysis of such a splitting is provided. The analysis and generalisation of methods of splitting of optimisation process is provided.

Одним із найскладніших завдань при побудові математичних макромоделей компонент електромеханічних систем із використанням оптимізації є саме проведення оптимізації. Практично завжди поставлена оптимізаційна задача є занадто складною, щоб її можна було розв'язати проведенням одноразової оптимізації із знаходженням відразу всіх невідомих коефіцієнтів. Для спрощення цієї операції побудову ділять на етапи, на кожному з яких знаходять частину невідомих коефіцієнтів. При цьому на кожному етапі оптимізаційна задача ставиться окремо так, щоб оптимізаційний пошук значення коефіцієнтів відбувався якнайпростіше.

У статті на прикладі побудови математичної макромоделі вентильного двигуна демонструється використання даного підходу, а також проводиться аналіз методів проведення розбиття великої оптимізаційної задачі на менші.

У статті розглядається вентильний двигун на основі електромеханічного перетворювача з пасивним вторинним елементом. Будована математична макромодель є моделлю такого електромеханічного перетворювача. За вхідні змінні було вибрано напруги на обмотках і момент навантаження, а за вихідні – струм в обмотках і частоту обертання ротора.

Математична макромодель вентильного двигуна. Модель будувалася у вигляді системи дискретних рівнянь у формі змінних стану

$$\begin{cases} \vec{x}^{(i+1)} = F \cdot \vec{x}^{(i)} + G \cdot \vec{v}^{(i)} + \Phi(\vec{x}^{(i)}, \vec{v}^{(i)}) \\ \vec{y}^{(i+1)} = C \cdot \vec{x}^{(i+1)} + D \cdot \vec{v}^{(i+1)} \end{cases}, \quad (1)$$

де $\vec{v}$ – вектор вхідних змінних (напруги на обмотках і момент навантаження); $\vec{y}$ – вектор вихідних змінних (струми в обмотках і частота обертання ротора); $\vec{x}$ – вектор змінних стану (розмірність даного вектора визначає розмірність моделі). F , G , C і D – матриці відповідних розмірів; Φ – нелінійна вектор-функція.

Компоненти вхідного й вихідного векторів виберемо так:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ M \end{pmatrix}, \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \omega \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Побудова математичної макромоделі вентиляного двигуна проводилася на основі експериментально знятих осцилограм його роботи. За вихідні дані для оптимізаційної побудови було взято перехідні процеси при раптовій зміні навантаження на роторі двигуна для різних значень напруги живлення.

Для двигуна існують такі залежності:

$$\bar{I}_{i+1} = \bar{f}_1(\bar{I}_i, \bar{U}_i, \omega_i); \quad (3)$$

$$\omega_{i+1} = f_2(\omega_i, M_i, P_i), \quad (4)$$

де $P_i = (\bar{U}_i, \bar{I}_i)$ – потужність електричного струму.

Крім того, якщо вважати модельований електромеханічний перетворювач строго симетричним, то систему рівностей (3) можна вважати такою, що складається з трьох симетричних рівностей з однаковими коефіцієнтами.

Отже, для модельованого електромеханічного перетворювача можна побудувати 4 підмоделі: 3 підмоделі фазових струмів і підмодель частоти обертання ротора.

Виходячи з вищенаведеного й апроксимуючи нелінійну функцію $\bar{\Phi}$ неповним кубічним поліномом, було вибрано форму запису моделі одного фазового струму у такому вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{i+1}^{(1)} &= F_{11}x_i^{(1)} + \gamma_1(U_i^{(1)})^2 + \gamma_2(U_i^{(2)})^2 + \gamma_3(U_i^{(3)})^2, \\ x_{i+1}^{(2)} &= x_i^{(2)} \left(F_{22} + \alpha_1 x_i^{(2)} + \alpha_2 \omega_i + (\bar{\alpha}_3, \bar{U}_i) + \beta_1 (x_i^{(2)})^2 + \beta_2 \omega_i^2 + \beta_3 \omega_i x_i^{(1)} \right) + \\ &\quad + (\bar{g}, \bar{U}_i) + \omega_i^2 (\bar{\beta}_4, \bar{U}_i) + \omega_i^2 x_i^{(1)} (\bar{\beta}_5, \bar{U}_i) + (x_i^{(2)})^2 (\bar{\beta}_5, \bar{U}_i), \\ I_{i+1}^{(1)} &= x_{i+1}^{(2)} + (\bar{g}, \bar{U}_{i+1}). \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Змінна $x^{(1)}$ була вибрана з метою введення залежностей від середнього значення вхідної напруги, без врахування яких макромодель побудувати не вдалося.

Треба підкреслити, що в розглядуваному підході вибір форми макромоделі є довільним, причому не ставиться жодних вимог щодо фізичного змісту елементів вектора змінних стану.

Під час побудови підмоделі фазових струмів спочатку знаходилися усереднені по фазах значення коефіцієнтів, для чого за вихідні дані брали перехідні процеси по струму для всіх трьох фаз. На наступному етапі знайдені значення коефіцієнтів уточнювалися для кожної фази окремо. Такий підхід дозволив не проводити тричі значну частину розрахунків.

Щодо підмоделі частоти обертання ротора, то її вигляд вибирався, виходячи із закону збереження енергії так:

$$\begin{cases} x_{i+1} = Fx_i + \mu\sqrt{x_i} + \eta(\bar{U}_i, \bar{I}_i) \\ w_{i+1} = \sqrt{x_{i+1}} \end{cases} \quad (6)$$

Треба зазначити, що при побудові підмоделей фазових струмів і частоти обертання ротора змінні w і I , які входять до їх складу, вважаються вхідними величинами, що значно спрощує побудову цих підмоделей.

Загальну макромодель модельованого електромеханічного перетворювача можна отримати з описаних вище підмоделей підстановкою змінних w і $I^{(i)}$ ($i = \overline{1,3}$), кожна з яких є вихідною величиною відповідної підмоделі.

Значить загальна макромодель модельованого електромеханічного перетворювача буде містити 5 змінних стану ($x^{(1)}$ з підмоделі струму (5), три змінні $x^{(2)}$ з тої самої підмоделі для різних фаз, і єдина змінна стану підмоделі частоти обертання ротора (6)) і 79 невідомих коефіцієнтів.

Початкові значення деяких коефіцієнтів вибиралися з евристичних міркувань з метою створити найкраще початкове наближення. Для виразу (5): $F_{11} = F_{22} = 0.9$, $\gamma_i = 0.0003$ ($i = \overline{1,3}$); для виразу (6): $F = 0.995$. Початкові значення решти коефіцієнтів приймали такими, що дорівнюють нулю.

За функцію мети при проведенні оптимізації використовували вираз

$$Q = \sum_i \|\bar{y}_i - \bar{y}_i^*\|^2, \quad (7)$$

де $\bar{y}_i$ – значення, розраховане за допомогою моделі, $\bar{y}_i^*$ – експериментально отримане значення.

Отримання коефіцієнтів моделі. Знаходження значень невідомих коефіцієнтів про- водилося з використанням оптимізації у декілька етапів:

- 1) усереднені для трьох фаз значення коефіцієнтів лінійної частини підмоделі (5): F_{22} , $\bar{g}$;
- 2) усереднені для трьох фаз значення усіх коефіцієнтів підмоделі (5) за винятком F_{11} , γ_i ($i = \overline{1,3}$);
- 3) усереднені для трьох фаз значення усіх коефіцієнтів підмоделі (5);
- 4) уточнення коефіцієнтів підмоделі (5) для кожної фази зокрема;
- 5) коефіцієнти підмоделі частоти обертання ротора (6);
- 6) виведення аналітично загальної макромоделі електромеханічного перетворювача;
- 7) уточнення коефіцієнтів підмоделі частоти обертання ротора в складі загальної макромоделі.

Як бачимо, на жодному з етапів побудови розмірність оптимізованої функції мети не перевищує 28 (28 коефіцієнтів підлягає одночасній оптимізації лише на третьому етапі), що є значно менше за загальну кількість невідомих коефіцієнтів – 79.

Порівняння реакцій отриманої моделі і модельованого об'єкта на тестові сигнали показано на рис. 1–4.

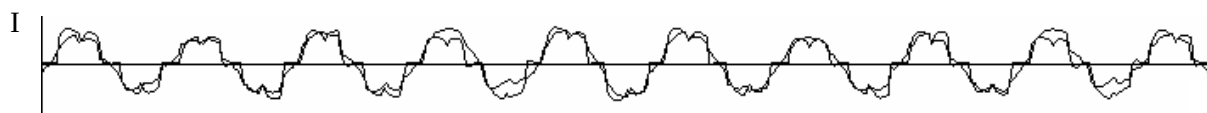


Рис. 1. Струм в обмотці двигуна в усталеному режимі без навантаження, виміряний експериментально і розрахований за допомогою моделі

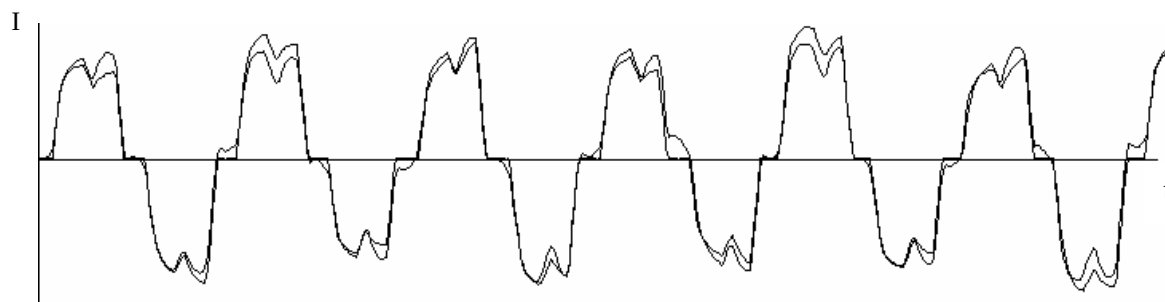


Рис. 2. Струм в обмотці двигуна в усталеному режимі з навантаженням, виміряний експериментально і розрахований за допомогою моделі

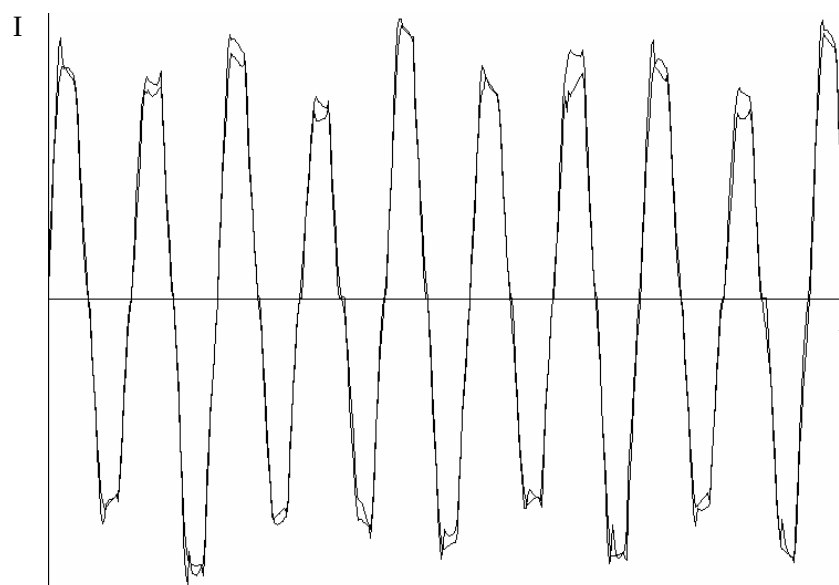


Рис. 3. Струм в обмотці двигуна в усталеному режимі при значному навантаженні, виміряний експериментально і розрахований за допомогою моделі

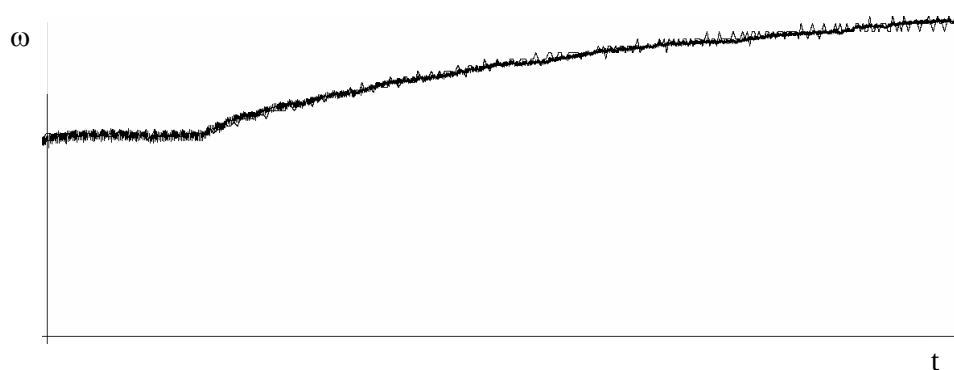


Рис. 4. Зміна частоти обертання ротора при скиданні навантаження, виміряна експериментально і розрахована за допомогою моделі

Методи розбиття побудови макромоделі на етапи. Спробуємо узагальнити підходи, які дозволяють спростити побудову загальної макромоделі. Одним з основних принципів, який виокремюється під час побудови макромоделі розглядуваного вентильного двигуна, є використання розбиття задачі на частини. Для цього застосовуються різні методи, серед яких можна виділити такі:

Розбиття за вектором змінних стану

У випадку, коли вектор вихідних змінних має розмірність більшу від одиниці, можна зробити розбиття по вихідних змінних. При цьому кожна з підмоделей має лише одну вихідну змінну, а всі інші вихідні змінні загальної моделі вважаються вхідними. Така перестановка дозволяє значно спростити побудову підмоделі, оскільки часто призводить до значного зменшення кількості змінних стану, необхідних для відтворення перехідних процесів.

Загальна макромодель у цьому разі виводиться з побудованих підмоделей аналітично і за необхідності її можна уточнити за допомогою додаткового етапу оптимізації.

Основним недоліком такого виду розбиття треба вважати можливість виникнення нестійкості загальної макромоделі після її аналітичного виведення. Цей процес є доволі складний для аналізу, оскільки в загальному невідома ні форма підмоделей, ні значення коефіцієнтів. Проте, в практичних випадках виникнення нестійкості можна уникнути, відповідно вибравши структуру підмоделей.

Побудова лінійної частини

Цей класичний підхід полягає в знаходженні на окремому етапі побудови коефіцієнтів, що входять до складу лінійної підмоделі модельованого об'єкта. Очевидно, що визначення значень таких коефіцієнтів доцільно робити на основі режиму малого сигналу, коли вплив нелінійностей є незначним.

Знаходження невідомих коефіцієнтів із незалежних міркувань

Цей вид розбиття можна здійснити у випадку, коли певні коефіцієнти будованої макромоделі мають досить чіткий фізичний зміст (який можна отримати як з фізичних міркувань, так і з аналізу математичної форми запису макромоделі). У такому разі значення згаданих коефіцієнтів можна з певною точністю знайти на основі спеціально підібраних вимірів чи відповідних розрахунків.

Відзначимо, що при використанні оптимізаційного визначення коефіцієнтів макромоделі, навіть, проведення досить поверхової оцінки коефіцієнтів може призвести до значного спрощення побудови, оскільки таким способом ми отримаємо краще початкове наближення, що може вивести стартову точку з області притягання небажаних локальних мінімумів.

Висновки. Отже, на прикладі побудови макромоделі електромеханічного перетворювача вентильного двигуна за експериментально знятими характеристиками, продемонстровано використання розбиття загальної оптимізаційної задачі на етапи, що дозволило значно спростити побудову згаданої макромоделі. Отримана з використанням вказаного розбиття макромодель вентильного двигуна, при порівняно малих затратах на побудову моделі, добре відображає його поведінку в різних режимах роботи. Треба відмітити, що спроби побудувати макромодель без використання розбиття виявилися невдалими внаслідок практичної неможливості успішного проведення оптимізації. Більше того, усі спроби

зменшити кількість етапів побудови спричиняли збільшення затрат машинного часу, а інколи взагалі негативні результати.

Використання розбиття в нашому прикладі дозволило обмежитися оптимізаційними задачами значно меншої розмірності (28) по відношенню до розмірності загальної оптимізаційної задачі (79). Крім того, проведення оптимізаційного пошуку невідомих коефіцієнтів групами у випадку, коли коефіцієнти, які відповідають за поперечну і поздовжню кривизну ярів загальної оптимізаційної задачі попадають в різні групи, зумовлює додаткове спрощення задачі внаслідок зменшення кількості і крутизни ярів. Аналогічно, внаслідок розбиття, може зменшуватися і кількість локальних мінімумів.

УДК 621.313.175.32

В.І. Ткачук, Л.В. Каша

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВЕНТИЛЬНОМУ РЕАКТИВНОМУ ДВИГУНІ З ПАРАЛЕЛЬНИМ БУФЕРОМ ЕНЕРГІЇ

© Ткачук В.І., Каша Л.В., 2001

Наведено математичну модель вентильного реактивного двигуна постійного струму з паралельним буфером енергії, яка враховує дискретну зміну схеми транзисторного комутатора, насичення сталі магнітопроводу, втрати в міді, в комутаторі, в сталі. Представлені результати розрахунку перехідного та квазі-усталеного режимів роботи електропривода на базі цього вентильного двигуна.

Switched Reluctance Motor is the simpler, more technological and cheaper then other known electrical motors. In the paper the average values mathematical model for SRM is proposed, which give a way to calculate its characteristics. Example of calculation its dynamic and static characteristics is presented.

Вентильні двигуни постійного струму – це електричні машини постійного струму, в яких щітково – колекторний вузол замінено напівпровідниковим комутатором (НК) – інвертором, який керується сигналами $f(\alpha)$ від датчика положення ротора (ДПР).

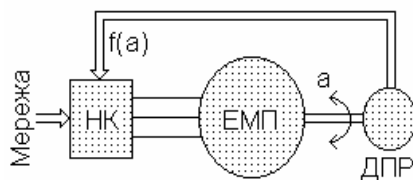


Рис. 1. Принципова схема вентильного двигуна

Електромеханічний перетворювач (ЕМП), на відміну від звичайних колекторних двигунів постійного струму, має нерухому обмотку якоря й обертову систему збудження (полюси).

По суті, вентильний двигун є синхронною машиною, частота струму в обмотках якого є функцією положення ротора (рис. 1).

Одним з найпростіших за конструкцією, технологічним і надійним є електромеханічний перетворювач з явнополюсним статором і зосередженими котушками його обмотки, яка