

В.Б. САМОРОДОВ, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХП»;
М.О. МІТЦЕЛЬ, студент НТУ «ХП»

РОЗВИТОК ТРАНСМІСІЙНОГО МАТРИЧНОГО АНАЛІЗУ В ОБЛАСТІ АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ

У статті запропоновано розвиток методики матричного аналізу, для автомобілів з гібридною силовою установкою на прикладі Toyota Prius, виведені базисні матриці синхронних трифазних двигунів зі збудженням від постійних магнітів на різних режимах роботи.

В статье предложено развитие методики матричного анализа, для автомобилей с гибридной силовой установкой на примере Toyota Prius, выведены базисные матрицы синхронных трехфазных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов на разных режимах работы.

The article proposed the development of methods of matrix analysis, for vehicles with hybrid propulsion for the example of Toyota Prius, the basis matrices are derived three-phase synchronous motors with permanent magnet excitation in different modes.

Проблема забруднення навколишнього середовища автотранспортом на сьогодні дуже актуальна. На його частку припадає близько 40% всіх викидів в атмосферу, у великих містах цей показник досягає 60-80%. Великі автовиробники бачать вирішення цих проблем в переході на альтернативні джерела енергії і зменшенні частки роботи бензинових і дизельних двигунів в автомобілі, за рахунок застосування разом з ним електродвигунів різних конструкцій – гібридних силових установок (ГСУ) [1].

Аналіз публікацій [2], [3] свідчить про високу актуальність теми аналізу і синтезу ГСУ, зокрема висувається пропозиція розглядати сумарну потужність на ведучих колесах автомобіля як суму потужностей, що підводяться за окремими ланцюгами. Проте за наявності планетарного механізму в трансмісії такий підхід реалізувати важко, через те, що сталим завжди буде залишатись розподілення крутного моменту, а потужність, як добуток моменту та кутової швидкості буде змінюватись.

Розвиток існуючої методики трансмісійного матричного аналізу на автомобільні гібридні трансмісії, спираючись на основні принципи матричного аналізу ступінчатих механічних трансмісій (СМТ) та гідро-об'ємних механічних трансмісій (ГОМТ) [4], [5] дозволить отримувати математичні моделі для різних режимів роботи ГСУ. Практична цінність роботи полягає в можливості застосування розробленої методики на стадії дослідження існуючих трансмісій з ГСУ та при проектуванні нових, з достатнім рівнем достовірності результатів.

На сьогоднішній день найбільш поширеними електричними машинами в ГСУ є синхронні трифазні двигуни зі збудженням від постійних магнітів (СДПМ), зокрема вони встановлюються на автомобілях фірм Toyota, Honda

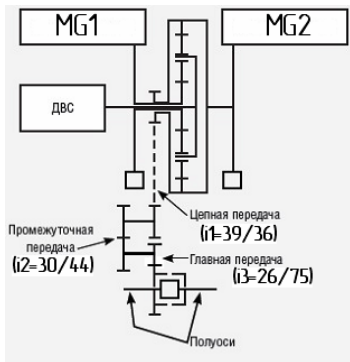


Рисунок 1 – Кінематична схема Toyota Prius II

та Nissan. В якості прототипу був обраний автомобіль Toyota Prius II, на рис. 1 наведена кінематична схема трансмісії. Мотор-генератори 1,2 – СПДМ максимальною потужністю 18 та 33 кВт відповідно, з'єднуються з високовольтною акумуляторною батареєю (ВВБ) через електричний перетворювач – інвертор. Будова, характеристики та опис режимів роботи ГСУ при проведенні дослідження, приймалися згідно даних керівництва з експлуатації автомобіля [6].

При подальшому розгляді робиться припущення, що автомобіль рухається прямолінійно, тиск в шинах однаковий, за таких умов, для спрощення матричного шаблону, можливо виключити зі структурної схеми диференціал головної передачі. На рис. 2 показана структурна схема трансмісії з позначенням кутових швидкостей та обертальних моментів на валах, а також можливі напрямки передачі потужності за ланцюгами «ВВБ – двигун», «генератор – ВВБ» та «генератор – двигун», що можуть бути реалізовані бортовим комп'ютером.

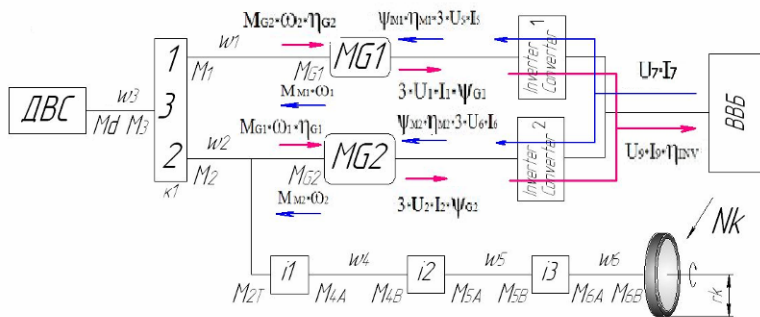


Рисунок 2 – Структурна схема трансмісії

В основу дослідження покладено складання балансу потужностей (тобто застосування закону збереження енергії) $N_{\text{мех}} = N_{\text{ел}}$ на валах та клеммах мотор-генераторів з врахуванням електродинамічних процесів, що протікають в них. Для електричних машин даного типу в режимі двигуна закон збереження енергії $M_M \cdot \omega_M = 3 \cdot \cos \varphi_M \cdot \eta_M \cdot U_M \cdot I_M$, а в режимі генератора $M_G \cdot \omega_G \cdot \eta_G = 3 \cdot U_G \cdot I_G \cdot \cos \varphi_G$. Кутові швидкості і механічні моменти і визначаються з умов руху автомобіля: лінійної швидкості колеса та кутової швидкості колінчастого валу двигуна, оскільки головна ціль ГСУ – зниження споживання пального, а це можливо лише за оптимального режиму

роботи ДВЗ. Невідомими при цьому залишаються струми і напруги в електросистемі живлення, для цього розглянемо схеми заміщення фази СДПМ, що приведені на рис. 3. Фаза електричної машини та ланцюг інвертора (конвертора) розглядається, як єдиний замкнутий контур, а індекси М та G свідчать про приналежність змінних до режиму двигуна чи генератора відповідно. За другим законом Ома рівняння для фазної напруги

$$U = R_S \cdot I + \frac{d}{dt} (\psi \cdot \hat{O}(t) \cdot e^{-i\omega t} + L_S \cdot I). \quad (1)$$

Зміна магнітного потоку передбачається гармонійною, якщо магнітний ротор обертається рівномірно з деякою частотою ω

$$\hat{O}(t) = B \cdot S_S = S_S \cdot k_{ob} \cdot B_m \cdot \sin(\omega t). \quad (2)$$

В формулах (1) і (2) L_S та R_S – реактивна і активна складові комплексного опору обмоток статора, Гн та Ом; k_{ob} – обмоточний коефіцієнт, він фігурує в формулі оскільки ми маємо справу з реальними машинами в яких застосовується вкорочення полюсів та розподілення обмотки; S_S – площа статора, через яку проходить магнітний потік в кожній фазі МГ1 та МГ2, м², B – величина магнітної індукції постійних магнітів ротора, Тл.

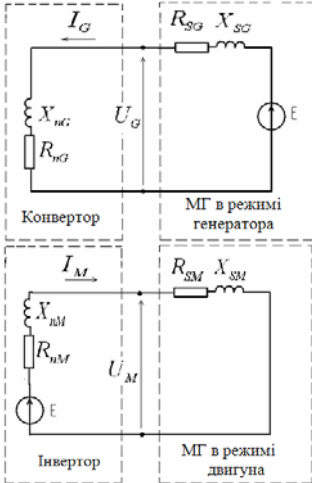


Рисунок 3 – Схеми заміщення фази

Попередньо підставивши (2) в (1) та вирішивши диференціальне рівняння отримаємо рівняння для фазних напруг двигуна та генератора:

$$U_G = \frac{\omega_G \cdot w \cdot S_S \cdot \sqrt{W_{mag} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot L_S \cdot k_{ob} \cdot k_{NS} \cdot k_p}}{2\sqrt{2} \cdot R_{nG}}, \quad (3)$$

$$U_M = \frac{\omega_M \cdot w \cdot S_S \cdot \sqrt{W_{mag} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot L_S \cdot k_p}}{2\sqrt{2} \cdot R_{nM} \cdot k_{ob} \cdot k_{NS}}, \quad (4)$$

де w – кількість витків обмотки статора машини; k_p – конструктивний коефіцієнт; k_{NS} – коефіцієнт, що враховує несинусоїдальність струмів; $\omega_{G,M}$ – кутова частота обертання вала ротора в режимі генератора і двигуна, с⁻¹. Активний і реактивний опір статора разом дають величину його комплексного опору $Z_S = R_S + iL_S$, це величина визначається з умов максимальної потужності машини і є константою. Комплексний опір інвертора(конвертора) $Z_n = R_n + iL_n$ буде змінюватись в залежності від режиму та навантаження. Для цього необхідно визначити ЕДС [7] на перехідних режимах $E(t) = (2 \cdot l \cdot v \cdot w \cdot B_m \cdot k_{NS} \cdot k_{ob} \cdot k_p \cdot e^{-i\omega t}) / \sqrt{3}$, де v – лінійна швидкість переміщення магнітного поля по колу статора, м/с; l – довжина

статора, м. В такому випадку модуль сумарного комплексного опору замкнутого кола $|Z| = \sqrt{(E^2 \cdot |Z_S|) / S_{G,M}}$, де $S_{G,M}$ – повна потужність, Вт. За формулою Ейлера можна переписати $Z = Z_n + Z_S = |Z| \cdot e^{i\varphi}$. В подальшому робляться наступні заміни, з метою більш компактної форми запису:

$$k_G = \frac{w \cdot S_S \cdot \sqrt{W_{mag} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot k_{ob} \cdot k_{NS} \cdot k_p}}{2\sqrt{2}}, k_M = \frac{w \cdot S_S \cdot \sqrt{W_{mag} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot k_p}}{2\sqrt{2} \cdot k_{ob} \cdot k_{NS}},$$

$$k_G^E = \frac{w \cdot S_S \cdot \sqrt{W_{mag} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot k_{NS} \cdot k_{ob} \cdot k_p}}{6\sqrt{6} \cdot \pi}, k_M^E = \frac{w \cdot S_S \cdot \sqrt{W_{mag} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot k_p}}{6\sqrt{6} \cdot \pi \cdot k_{NS} \cdot k_{ob}}.$$

На підставі вище наведених рівнянь можна вивести формули для знаходження активної складової опору інвертора (конвертора):

$$R_{nG} = \left| \frac{\sqrt{\frac{(k_G^E)^2 \cdot |\omega_G| \cdot |Z_S| \cdot \eta_G \cdot e^{i\varphi}}{|M_G|}}{1 + i \cdot \tan(\varphi)}}}{\left| \frac{Z_S}{1 + i \cdot \tan(\varphi)} \right|} \right|, \quad (5)$$

$$R_{nM} = \left| \frac{\sqrt{\frac{(k_M^E)^2 \cdot |\omega_M| \cdot |Z_{SM}| \cdot e^{i\varphi}}{|M_M| \cdot \eta_M}}{1 + i \cdot \tan(\varphi)}}}{\left| \frac{Z_S}{1 + i \cdot \tan(\varphi)} \right|} \right|. \quad (6)$$

В синхронних машинах застосовується частотне регулювання, звідси слідує що $\omega_{G,M} = 2\pi \cdot f / p$, де p – кількість пар полюсів. На підставі закону збереження енергії, формул (3), (4) запишемо базисні матриці СДПМ:

$$\begin{bmatrix} R_{nG} & 0 & 0 \\ 0 & (3 \cdot \cos \varphi_G \cdot \omega_G \cdot k_G \cdot L_S) / R_{nG} & 0 \\ 0 & 0 & 2\pi / p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_G \\ I_G \\ f_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\omega_G| \cdot k_G \cdot L_{S_G} \\ |M_G| \cdot |\omega_G| \cdot \eta_G \\ |\omega_G| \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} R_{nM} & 0 & 0 \\ 0 & (3 \cdot \cos \varphi_G \cdot \omega_M \cdot \eta_M \cdot k_M \cdot L_S) / R_{nM} & 0 \\ 0 & 0 & 2\pi / p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_M \\ I_M \\ f_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\omega_M| \cdot k_M \cdot L_{S_M} \\ |M_M| \cdot |\omega_M| \\ |\omega_M| \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Кутові швидкості та моменти взяті по модулю, оскільки потрібно компенсувати прийнятну аксіоматику, щодо врахування знаків «вхідних» та «вихідних» потужностей. В електричних машинах кінематичні змінні породжують електричні що і зумовлює вид матриць, тому пропонується матричний аналіз ГСУ проводити в два етапи: починати з вирішення суміщеної матриці кутових швидкостей та моментів і за отриманими даними формувати матриці та вести розрахунок електричних параметрів. Повна матрична система трансмісії має вид

$$\begin{pmatrix}
 0 & i_1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & i_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & i_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & -k & k-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 S_1 & 0 & -S_1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & i_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_3 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \\ \omega_6 \\ \omega_5 \\ \omega_{ei} \\ M_1 \\ M_{MG1} \\ M_2 \\ M_{MG2} \\ M_{21} \\ M_3 \\ M_{4,4} \\ M_{4B} \\ M_{5,4} \\ M_{5B} \\ M_{6,4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_{\dot{A}\dot{A}N} \\ \omega_{ei} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -M_{\dot{A}\dot{A}N} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Базисні матриці (7), (8) СДПМ розроблені для використання під час дослідження режимів роботи, включаючи розподіл потужностей по усіх ланках ГСУ в широкому діапазоні робочих режимів автомобіля. В подальшому планується уточнити методіку визначення коефіцієнтів електричних машин з метою покращення математичної моделі.

Список літератури: 1. Павлова Е.И. Экология транспорта: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 2000. 248 с. 2. Смирнов А.В. Определение необходимой мощности ДВС гибридных силовых установок транспортных средств // Вестник машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 32-35. 3. Александров И.К. Тяговый расчет транспортных средств с адаптивным приводным двигателем // Вестник машиностроения. – 2010. – № 2. – С. 18-21. 4. Самородов В.Б. Основы теории автоматизированной генерации математических моделей трансмиссий //Механика и машиностроение.– 1998. –№1. – С. – 109-115. 5. Самородов В.Б. Системный подход к генерации математических матричных моделей для планетарных механических и гидрообъемно-механических трансмиссий произвольного вида // Вестник ХГПУ.– 1999.– Вып.46.– С.51-54. 6. Тойота Приус. Модели 2003-2009 гг. выпуска. Устройство техническое обслуживание и ремонт. М.:Легион-Автодата, 2009. – 568с. 7. Кацман М.М. Электрические машины и трансформаторы. – М.:Высшая школа, 1970. – 468 с.

Надійшла до редколегії 13.04.2012