

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 681.5.015+62-83:629.433

МЕТОД ІНТЕГРАЛЬНО-ГАРМОНІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ЯК НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНІСТЮ, ОХОПЛЕНОЮ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

О. Б. Мокін, к. т. н., доц., Б. І. Мокін, д. т. н., проф.

Анотація Показано, що електричні транспортні засоби відносяться до класу нелінійних динамічних систем з нелінійністю, охопленою зворотнім зв'язком. Побудовано метод інтегрально-гармонійної ідентифікації (МІГІ) вказаного класу нелінійних динамічних систем, в основу якого покладено ідеологію Фур'є-інтегрального методу ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, але з зовсім іншим алгоритмом визначення параметрів математичної моделі.

Ключові слова: метод ідентифікації, ФІМІ, МІГІ, нелінійність, зворотній зв'язок.

Анотация Показано, что электрические транспортные средства относятся к классу нелинейных динамических систем с нелинейностью, охваченной обратной связью. Построен метод интегрально-гармонической идентификации (МИГИ) указанного класса нелинейных динамических систем, в основу которого положено идеологию Фурье-интегрального метода идентификации нелинейных динамических объектов, но с совершенно другим алгоритмом определения параметров математической модели.

Ключевые слова: метод идентификации, ФИМИ, МИГИ, нелинейность, обратная связь.

Abstract There had been shown electric vehicles belonging to the class of nonlinear dynamic systems with nonlinearity covered by feedback. There had been created the method of integrally-harmonic identification (MIHI) of this class of nonlinear dynamical systems based on the ideology of the Fourier-integral method of identification of nonlinear dynamic objects but with a completely different algorithm for determining the parameters of the mathematical model.

Keywords: method of identification, FIMI, MIHI, nonlinearity, feedback.

Вихідні передумови та постановка задачі

В роботі [1] запропоновано алгоритм ідентифікації нелінійних динамічних систем, які можуть бути представлені у вигляді послідовного з'єднання лінійної динамічної частини та безінерційної нелінійності, Фур'є-інтегральним методом.

В роботах [2, 3] показано, що математичну модель електричного транспортного засобу під час прямолінійного руху в горизонтальній площині можна представити у вигляді

$$m \frac{dV(t)}{dt} = F_T(t) - F_{\Gamma}(V, t) = k_F n I \Phi(I) - \mu_0 - \mu_1 V(t) - \mu_2 (V(t))^2, \quad (1)$$

де m – маса електричного транспортного засобу з вантажем, $F_T(t)$, $F_{\Gamma}(V, t)$ – відповідно, сила тяги транспортного засобу та гальмівна сила, що діє на транспортний засіб під час руху, $V(t)$ – лінійна швидкість руху транспортного засобу, $I(t)$ – струм в кожній із n паралельних якірних гілок електроприводу, $\Phi(I)$ – магнітний потік тягового електродвигуна, що є функцією від цього струму, k_F – коефіцієнт, який обраховується через паспортні дані електродвигуна та радіус колеса електровоза, μ_0 – складова гальмівної сили, яка, як показано в роботі [4], залежить від ваги електричного транспортного засобу та коефіцієнту тертя кочення колеса по залізничній рейці, μ_1 – параметр моделі, який враховує залежність гальмівної сили від лінійної швидкості руху електричного транспортного засобу, а μ_2 – параметр моделі, який враховує залежність гальмівної сили від квадрату лінійної швидкості цього транспортного засобу.

Якщо позначити символом D оператор диференціювання, а символом $\frac{1}{D}$ оператор інтегрування, то легко бачити, що математичній моделі (1) відповідає математична модель

$$V(t) = \frac{1}{mD} k_F n I \Phi(I) - \frac{1}{mD} (\mu_0 + \mu_1 V(t) + \mu_2 (V(t))^2) = V^* - V^{**}, \quad (2)$$

яка дозволяє структуру нелінійної динамічної системи, що розглядається, представити у вигляді, показаному на рисунку.

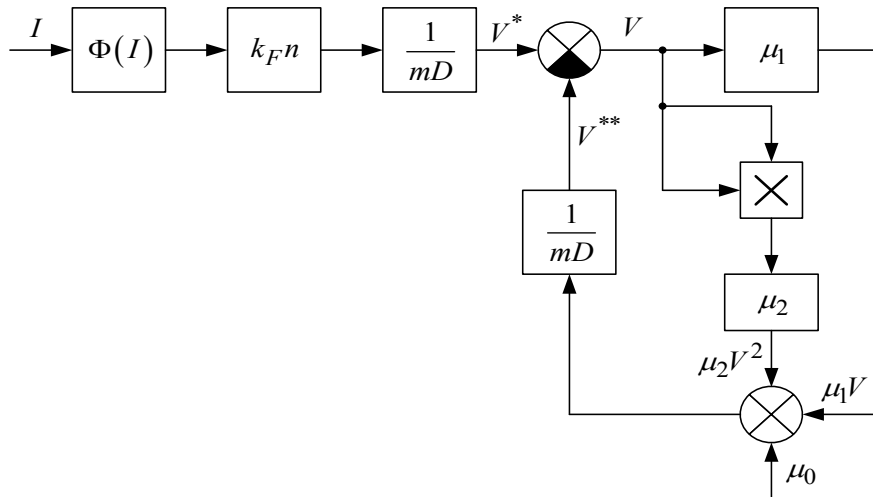


Рисунок – Структура електричного транспортного засобу як нелінійної динамічної системи

Із цього рисунка видно, що в структуру електричного транспортного засобу як нелінійної динамічної системи одна безінерційна нелінійність входить в прямий канал проходження вхідного сигналу послідовно з лінійною частиною, а друга — в канал зворотнього зв'язку. Тож здійснити ідентифікацію математичної моделі такої системи методом, запропонованим в роботі [1], неможливо.

На розробку методу ідентифікації електричного транспортного засобу як нелінійної динамічної системи, що має структуру, наведену на рисунку, і направлена дана робота.

Для отримання математичних виразів, за допомогою яких можна визначити конкретні значення параметрів математичної моделі (1), виставимо в якості основної вихідної умову, що ми ідентифікуємо завантажений електричний транспортний засіб. А це, як показано в роботі [5], дає нам право задавати математичну модель магнітного потоку $\Phi(I)$ тягового електродвигуна у вигляді

$$\Phi(I) = a_1 + b_1 I . \tag{3}$$

Виведення основних розрахункових співвідношень

Припустимо, що електричний транспортний засіб рухається прямолінійно в горизонтальній площині з лінійною швидкістю V_0 , якій відповідає в якірних колах електродвигунів тягового електроприводу струм I_0 . Накладемо на цей струм синусоїдальну гармоніку з амплітудою I_1 та круговою частотою $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$, де T – вибраний відрізок часу, тобто сформуємо в якірних колах тягових електродвигунів струм

$$I = I_0 + I_1 \sin \omega_1 t . \tag{4}$$

Для визначення лінійної швидкості в момент часу t^* , яка відповідатиме струму (4), підставимо (4) в (3), а результат підстановки разом з (4) підставимо в (2). Після відповідних перетворень, інтегрування та перенесень отримаємо:

$$\begin{aligned} V(t^*) + \frac{\mu_0 t^*}{m} + \frac{1}{m} \int_0^{t^*} (\mu_1 V(t) + \mu_2 (V(t))^2) dt = \\ = \frac{k_F n}{m} \left(a_1 I_0 + b_1 I_0^2 + \frac{b_1 I_1^2}{2} \right) t^* - \frac{k_F n}{m \omega_1} (a_1 I_1 + 2b_1 I_0 I_1) \cos \omega_1 t^* - \\ - \frac{k_F n b_1 I_1^2}{4m \omega_1} \sin 2\omega_1 t^* . \end{aligned} \tag{5}$$

Нехай множина значень t^* має такий вигляд:

$$t^* \in \left[\frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}, T \right]. \quad (6)$$

Виберемо конкретне значення параметра дискретності часу у розмірі Δt . У цьому випадку множина кількості дискрет швидкості матиме вигляд

$$\frac{t^*}{\Delta t} \in [l, 2l, 3l, 4l], \quad (7)$$

де

$$l = \frac{T}{4\Delta t}. \quad (8)$$

Здійснюючи дискретизацію швидкості руху електричного транспортного засобу на проміжку часу від умовного нуля до t^* з кроком Δt та враховуючи множини (6) і (7), із рівняння (5) отримаємо систему чотирьох рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & V\left(\frac{T}{4}\right) + \frac{\mu_0 T}{4m} + \frac{\mu_1}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{l-1} V(t_i) + \frac{\mu_2}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{l-1} (V(t_i))^2 = \\ & = \frac{k_F n T}{4m} \left(a_1 I_0 + b_1 I_0^2 + \frac{b_1 I_1^2}{2} \right), \\ & V\left(\frac{T}{2}\right) + \frac{\mu_0 T}{2m} + \frac{\mu_1}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{2l-1} V(t_i) + \frac{\mu_2}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{2l-1} (V(t_i))^2 = \\ & = \frac{k_F n T}{2m} \left(a_1 I_0 + b_1 I_0^2 + \frac{b_1 I_1^2}{2} \right) + \frac{k_F n}{m \omega_1} (a_1 I_1 + 2b_1 I_0 I_1), \\ & V\left(\frac{3T}{4}\right) + \frac{3\mu_0 T}{4m} + \frac{\mu_1}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{3l-1} V(t_i) + \frac{\mu_2}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{3l-1} (V(t_i))^2 = \\ & = \frac{3k_F n T}{4m} \left(a_1 I_0 + b_1 I_0^2 + \frac{b_1 I_1^2}{2} \right), \\ & V(T) + \frac{\mu_0 T}{m} + \frac{\mu_1}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{4l-1} V(t_i) + \frac{\mu_2}{m} \Delta t \sum_{i=0}^{4l-1} (V(t_i))^2 = \\ & = \frac{k_F n T}{m} \left(a_1 I_0 + b_1 I_0^2 + \frac{b_1 I_1^2}{2} \right) - \frac{k_F n}{m \omega_1} (a_1 I_1 + 2b_1 I_0 I_1) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

— з чотирма невідомими m, μ_0, μ_1, μ_2 , розв'язуючи яку відносно них, знайдемо конкретні значення $m^*, \mu_0^*, \mu_1^*, \mu_2^*$ параметрів математичної моделі (1) електричного транспортного засобу, тобто здійснимо його ідентифікацію.

Оскільки розрахункові співвідношення запропонованого методу ідентифікації нелінійних динамічних систем, що містять нелінійність не лише в каналі прямого перетворення вхідного сигналу, але і в контурі зворотнього зв'язку, виведені з використання гармонійного вхідного сигналу та операції інтегрування, то ми його назвали методом інтегрально-гармонійної ідентифікації (МІГІ).

Алгоритм методу інтегрально-гармонійної ідентифікації

Розпишемо алгоритм МІГІ як послідовність операцій, які потрібно виконати для ідентифікації електричного транспортного засобу.

1. Заносимо в бортовий комп'ютер електричного транспортного засобу значення параметрів k_F, n його системи транспортного електропривода та систему рівнянь (9) у загальному вигляді.

2. До початку руху електричного транспортного засобу зі сталою лінійною швидкістю прямолінійним відрізком колії, якій відповідає значення струму якоря тягових електродвигунів I_0 , визначаємо той момент часу t_* , в якому через якийсь час ми будемо задавати точку відносного нуля на осі часу, тобто прийматимемо, що

$$t_* = 0, \quad (10)$$

а також задаємо значення кроку Δt дискретизації графіка швидкості у часі та довжину T періоду і амплітуду I_1 гармоніки струму, яку ми в момент часу t_* збираємось накладати на струм I_0 згідно з виразом (4), і заносимо усі ці параметри в бортовий комп'ютер електричного транспортного засобу.

3. Здійснюємо розрахунки множин (6), (7), кругової частоти ω_1 та усіх тих коефіцієнтів системи рівнянь (9), які не потребують знання сум дискрет швидкості та сум квадратів цих дискрет, а також формуємо у бортовому комп'ютері сигнал за виразом (4).

4. Під час руху електричного транспортного засобу зі сталою лінійною швидкістю прямолінійним відрізком колії, якій відповідає значення струму якоря тягових електродвигунів I_0 , в момент часу t_* , якому присвоюємо значення згідно з виразом (10), за допомогою транзисторного регулятора струму якоря тягових електродвигунів та бортового комп'ютера формуємо цей струм згідно з математичною моделлю (4). Одночасно за допомогою бортового тахометра та аналого-цифрового перетворювача формуємо дискрети лінійної швидкості V_i , $i = 0, 1, 2, \dots, 4l$, які подаємо в бортовий комп'ютер, формуючий з них суми і суми квадратів на відрізьку від 0 до $\frac{T}{4}$, потім на відрізьку від 0 до $\frac{T}{2}$, потім від 0 до $\frac{3T}{4}$, потім від 0 до T .

5. Бортовий комп'ютер, використовуючи всі необхідні цифрові дані, які тепер у його пам'яті уже є, конкретизує систему рівнянь (9).

6. Розв'язуючи систему рівнянь (9), бортовий комп'ютер знаходить конкретні значення параметрів m^* , μ_0^* , μ_1^* , μ_2^* , роблячи цим самим математичну модель (1) придатною для подальшого використання в задачах оптимізації та автоматичного керування.

Два важливих зауваження:

1. Легко бачити, що домноженням обох частин усіх чотирьох рівнянь в системі (9) на параметр m вона зводиться до системи чотирьох лінійних алгебраїчних рівнянь з чотирма невідомими, розв'язання якої не вимагає ні значних витрат часу, ні значних об'ємів пам'яті, а тому завжди може бути реалізованим в бортовому комп'ютері, яким комплектується кожний сучасний електричний транспортний засіб.

2. Якщо електричний транспортний засіб укомплектований не транзисторним регулятором струму, а транзисторним регулятором напруги U , як це має місце в електричних транспортних засобах попередніх випусків, яка підводиться до якорів двох послідовно-з'єднаних тягових електродвигунів, то це дещо ускладнює задачу формування гармонійного закону зміни струму (4), але не суттєво. У цьому випадку у зв'язку з малими значеннями індуктивностей обмоток якорів двох послідовно-з'єднаних тягових електродвигунів з активними опорами обмоток R_1, R_2 та обмоточно-полюсними коефіцієнтами $k_{\omega 1}, k_{\omega 2}$, які легко обраховуються за паспортними даними цих електродвигунів, справедливою є залежність:

$$I = \frac{1}{R_1 + R_2} (U - (k_{\omega 1} + k_{\omega 2})\omega), \quad (11)$$

у якій ω – кутова швидкість обертання якорів електричних двигунів.

Порівнюючи вирази (11) і (4), бачимо, що в разі, якщо транзисторний регулятор напруги формує закон її зміни у вигляді

$$U = U_0 + U_1 \sin \omega t, \quad (12)$$

то I_0 для нашої задачі ідентифікації необхідно сформулювати за виразом

$$I_0 = \frac{U_0 - (k_{\omega 1} + k_{\omega 2})\omega}{R_1 + R_2} = \frac{U_0 - (k_{\omega 1} + k_{\omega 2})V}{(R_1 + R_2)R}, \quad (13)$$

де R – радіус колеса електричного транспортного засобу, а I_1 за виразом —

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1 + R_2}. \quad (14)$$

Висновки

1. Запропоновано новий метод ідентифікації нелінійних динамічних систем, в яких нелінійність знаходиться не лише в прямому каналі проходження вхідного сигналу, але і в контурі зворотнього зв'язку — метод названо методом інтегрально-гармонійної ідентифікації (МІГІ), оскільки в ньому використовується гармонійний сигнал на вході системи і операція інтегрування.

2. Побудовано алгоритм МІГІ для розв'язання задачі ідентифікації електричного транспортного засобу.

3. Вказано, що потрібно врахувати при реалізації алгоритму МІГІ у випадку, коли в системі тягового електропривода транспортного засобу використовується не регулятор зміни струму якоря тягових електродвигунів, а регулятор зміни напруги, прикладеної до якорів цих електродвигунів

Список літератури

1. Мокін Борис Іванович. Метод ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів з екстремальними статичними характеристиками [Електронний ресурс] / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Англ., рос. та укр. мовами. – 2009. – №2. – С.1-8. – Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-2/2009-2.files/uk/09bimesc_ua.pdf.

2. Мокін Олександр Борисович. Особливості моделювання руху електричних транспортних засобів з врахуванням залежності навантаження від рельєфу місцевості [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – №1. – С. 1-6.– Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e%2Djournals/VNTU/2010-1/uk/10mbidot_uk.pdf.

3. Мокін Олександр Борисович. Відносні моделі руху електричного транспортного засобу по горизонтальному прямолінійному відрізку колії / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №2. – С. 20–24.

4. Мокін Борис Іванович. Математичні моделі багатомасових розподілених динамічних систем для задач оптимізації (частина 2) / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – №1. – С. 28–33.

5. Мокін Борис Іванович. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами постійного струму. Монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с.

Відомості про авторів

Мокін Олександр Борисович – к.т.н., доцент, кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, директор Інституту енергетики та електромеханіки, e-mail: abmokin@gmail.com, тел: (0432) 59-85-57.

Мокін Борис Іванович – акад. НАПНУ, д.т.н., професор, кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, ректор ВНТУ, тел.: (0432) 56-08-48.

УДК 004.89+519.216.3+656.2

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

доцент, к.т.н., Савчук Т. О., Козачук А.В.

Анотація: У статті поставлено задачу автоматизованого прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті. На підставі проведеного аналізу підходів до прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій