

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЗМІННОГО АКТИВНО-ІНДУКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИКОНУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Смолянiнов В.Г.¹, к.т.н., доцент

Сухопара О.М.², к.т.н., зав. сектором

¹Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

²НВП ТОВ «МТІ», м. Київ, Україна

При проектуванні радіоелектронних засобів (РЕЗ) до складу яких входять електромагнітні виконуючі пристрої (ЕВП), механізми та двигуни, останні, при визначенні енергетичних та динамічних характеристик, що забезпечують безперервний режим роботи РЕЗ з максимальним ККД, враховуються як змінне активно-індуктивне ($R-L$) навантаження, яке в залежності від конструктивних параметрів ЕВП буде суттєво змінюватись при пересуванні рухомої ланки ЕВП.

Таким чином задача дослідження полягає в визначенні зв'язку змінного активно-індуктивного навантаження РЕЗ з конструктивними параметрами ЕВП, виборі функції апроксимації змінної індуктивності та її першої похідної магнітного ланцюга навантаження РЕЗ, отриманні аналітичних виразів для їх розрахунку, для покращення динамічних та енергетичних характеристик ЕВП РЕЗ.

Теоретичні викладки

Структура ЕВП РЕЗ розглядається як пристрій з рухомою ланкою циліндричної форми набрану з феромагнітних елементів, що чергуються по довжині і розділені немагнітними вставками. Зовнішній магнітопровід виконує роль статора ЕВП, що складається із секцій з кільцевими магнітними полюсами в яких розміщені обмотки збудження. Полюси своїми кінцями повернені у бік рухомої ланки. Немагнітні вставки розділяють феромагнітні елементи таким чином, що останні зміщені відносно секцій статора на величину яка відповідає лінійному кроку пересування рухомої ланки ЕВП РЕЗ. Полісний поділ секцій статора дорівнює довжині феромагнітного елемента, який займає всю її довжину в положенні магнітної рівноваги.

Відома залежність індуктивності навантаження від магнітного опору ланцюга навантаження: $L=W^2/R_m$, де $R_m=\sum_{k=1}^n R_{mk}=l_1/\mu_1s_1 + \dots + l_n/\mu_ns_n$ - магнітний опір ділянок ланцюга навантаження, μ_n - магнітна проникливість середи, S_n - площа перетину магнітного потоку, l_n - середня довжина маг-

нітної лінії кожної ділянки магнітного ланцюга, W - кількість витків обмотки збудження магнітного ланцюга.

Таким чином індуктивність $R-L$ навантаження без врахування впливу вихрових струмів і відсутності насичення магнітної системи, при незмінній кількості витків обмотки збудження, залежить лише від параметрів магнітного ланцюга.

Так як магнітний потік замикається через всі ділянки магнітного ланцюга, щоб знайти сумарний магнітний опір, визначимо магнітний опір на кожній ділянці. Вважаємо, що полюси статора однакові і однорідні. Визначимо середню довжину магнітної силової лінії на окремих ділянках та їх площу поперечного перетину через геометричні розміри секції статора ЕВП: $l_1 = l_5 = h_1$; $S_1 = S_5 = 2\pi b_n(\delta + r_1)$; $l_2 = l_4 = h_2$; $S_2 = S_4 = 2\pi h_3(\delta + r_1 + h_1)$; $l_3 = b_{cm} = h_3$; $S_3 = \pi h_4^2$, де δ – технологічний зазор між полюсними наконечниками та рухомою ланкою; b_n – ширина полюсного наконечника; h_1 – товщина полюсного наконечника; h_2 – довжина полюса секції статора ЕВП; $h_3 = h_4$ – товщина полюса та зовнішнього магнітопроводу (ярма) статора відповідно; r_1 – радіус рухомої ланки; b_{cm} – відстань між полюсами секції статора ЕВП. Також врахуємо в подальшому розгляді, що для обраної структури ЕВП: b – відстань між краями полюсних наконечників однієї секції; X_1 – відстань, що змінюється в напрямку пересування між феро-магнітним елементом рухомої ланки і краєм полюсного наконечника; $X = X_{max}$ – крок пересування, відстань яку проходить феромагнітний елемент рухомої ланки від середини ввімкнутої секції $b_{cm}/2$ до середини полюсного наконечника $b_n/2$, при досягненні положення магнітної рівноваги.

Знаходимо значення магнітного опору на п'яти ділянках магнітного ланцюга, параметри якого не змінюється при пересуванні рухомої ланки ЕВП, що складаються з довжини першого та другого полюсів з полюсними наконечниками та відстані між полюсами

$$R_{m1} = \sum_{k=1}^5 R_{mk} = \frac{1}{\mu\pi} \cdot \left[\frac{h_1}{b_n(\delta + r_1)} + \frac{h_2}{h_3(\delta + r_1 + h_1)} + \frac{b_{cm} + h_3}{h_4^2} \right].$$

Для запису магнітного опору на шостій ділянці параметри якої змінюється при пересуванні рухомої ланки ЕВП, скористаємося методикою представлення ліній магнітного поля дугами окружностей [1]. Дуги окружностей створюють елементарні трубки магнітної провідності. Краєві провідності між відповідними гранями знаходять інтегруванням елементарних трубок які визначають взаємне розташування граней полюсних наконечників та граней феромагнітного елемента в напрямку руху рухомої ланки ЕВП.

Визначення краєвих провідностей зробимо для трьох діапазонів зміни положення рухомої ланки ЕВП: перший діапазон, до початку пересування; другий діапазон, пересування на величину кроку спрацювання; третій діапазон, при досягненні положення магнітної рівноваги під полюсними наконечниками секції з ввімкнутою обмоткою збудження.

Враховуючи, що розрахунок проведено через крайові провідності, то загальний магнітний опір для шостої ділянки запишеться як

$R_{m2} = 1/G_1 + 1/G_2$, де G_1 – провідність першого полюса; G_2 – провідність другого полюса секції статора ЕВП.

Тоді для першого діапазону, до зміни положення рухомої ланки в межах $X_1 = b/2$, магнітний опір на шостій ділянці, запишеться через провідності граней першого (А), другого (В) полюсів і граней (С) феромагнітного елемента рухомої ланки [1,2]

$$R_{m21} = \frac{1}{G(B_1C_1) + G(B_2C_2) + G(B_3C_3) + G_\alpha + G_j} + \frac{1}{G(A_1C_1) + G(A_2C_2) + G(A_2C_1)}$$

де $G_{\alpha,j}$ – провідність в точках на поверхні феромагнітного елемента рухомої ланки під краями полюсних наконечників, силові лінії яких є концентричні кола з центром у цих точках [2].

Загальний магнітний опір ланцюга змінного R - L навантаження запишемо $R_{mI} = R_{m1} + R_{m21}$, тоді індуктивність для першого діапазону зміни положення рухомої ланки $L_I = W^2/R_{mI} = W^2/(R_{m1} + R_{m21})$. Значенню індуктивності L_I відповідає зміна струму на відрізку часу $0 - t_1$ [3].

Другий діапазон, при $0 \leq X_1 \leq b/2$ характеризує пересування рухомої ланки на величину кроку в напрямку полюсного наконечника ввімкнутої в цей час секції ЕВП, де індуктивність магнітного ланцюга збільшується, а струм обмотки збудження зменшується на відрізку часу $t_1 - t_2$ [3]. Тоді магнітний опір для шостої ділянки дорівнює

$$R_{m22} = \frac{1}{G(A_1C_1) + G(A_1C_2) + G(A_2C_2) + 2G_\alpha} + \frac{1}{G(B_2C_2) + G(B_1C_2) + G(B_1C_3) + G(A_3C_3) + 2G_\alpha}$$

Загальний магнітний опір ланцюга навантаження для другого діапазону визначиться як, $R_{mII} = R_{m1} + R_{m22}$, а індуктивність набуде вигляду

$$L_{II} = W^2/R_{mII} = W^2/(R_{m1} + R_{m22})$$

В третьому діапазоні, $X = X_{max}$ коли феромагнітний елемент рухомої ланки ЕВП зробив крок пересування і досяг положення магнітної рівноваги в секції ввімкнутої обмотки збудження. Зазначимо, що при його русі

можливе коливання біля положення магнітної рівноваги, інтервал часу $t_2 - t_3$ [3]. Магнітний опір для шостої ділянки при цьому положенні рухомої ланки буде

$$R_{m23} = \frac{1}{G(A_1C_1) + G(A_1C_2) + G(A_2C_2) + 2G_\alpha} + \frac{1}{G(B_2C_2) + G(B_1C_2) + G(B_1C_3) + G(A_3C_3) + 2G_\alpha},$$

а індуктивність визначиться як, $L_{III} = W^2/R_{mIII} = W^2/(R_{m1} + R_{m23})$.

Таким чином, знаючи зміну магнітного опору ланцюга $R-L$ навантаження, можна отримати величину індуктивності, для кожного положення рухомої ланки при пересуванні її на величину кроку спрацювання.

Для розрахунку динамічних та енергетичних характеристик ЕВП РЕЗ треба знайти апроксимуючі функції, зміни індуктивності та її першої похідної магнітного ланцюга $R-L$ навантаження РЕЗ.

При підключенні ЕВП до джерела живлення, рівняння електричного кола має вигляд [4]: $iR_n + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} = U_n$, або

$\frac{di}{dt} + i \frac{dL \cdot dx}{L \cdot dx \cdot dt} + i \frac{R_n}{L} = \frac{U_n}{L}$, де U_n - номінальна напруга джерела живлення,

R_n - активний опір обмотки збудження, i - струм обмотки збудження, L - індуктивність та її перша похідна, що враховує зміни параметрів магнітного ланцюга при пересуванні рухомої ланки ЕВП. На підставі аналізу експериментальних залежностей зміни індуктивності від положення рухомої ланки [1,2,5,6] її значення можна навести у наступному вигляді

$$L = L_{II} - \Delta L_I \cos\left(\frac{\pi(x-\sigma)}{b_{ст}+h_3-b_n-2\sigma}\right) \quad (1)$$

при $\sigma < x \leq (b_{ст} + h_3 - b_n)/2$

$$L = L_I + \Delta L_{II} \sin\left(\frac{\pi(2x+b_n-b_{ст}-h_3)}{2b_n}\right) \quad (2)$$

при $(b_{ст} + h_3 - b_n)/2 \leq x < (b_{ст} + h_3)/2$

де x - зміщення рухомої ланки вздовж секції статора під дією електромагнітної сили; σ - зміщення рухомої ланки відносно положення магнітної рівноваги; ΔL_I - прирощення індуктивності на ділянці від L_{min} до значення L в точці, коли феромагнітний елемент рухомої ланки підходить до полюсного наконечника включеної секції; ΔL_{II} - прирощення індуктивності від положення $x = b_n/2$ до положення магнітного рівноваги включеної секції; $L_I = L_{min}$ - мінімальна індуктивність, що визначається в момент включення секції до початку пересування рухомої ланки; $\Delta L_{II} = L_{max} -$

максимальна індуктивність в положенні магнітної рівноваги для включеної секції.

Похідну індуктивності знаходимо з виразів (1) та (2)

$$\frac{dL}{dX} = \frac{\pi}{2(b_{cm} + h_3 - b_n - 2\sigma)} \Delta L_I \sin \left(\frac{\pi(x - \sigma)}{b_{cm} + h_3 - b_n - 2\sigma} \right), \quad (3)$$

при $\sigma < x \leq (b_{cm} + h_3 - b_n)/2$,

$$\frac{dL}{dX} = \frac{\pi}{2b_n} \Delta L_{II} \cos \left(\frac{\pi(2x + b_n - b_{cm} - h_3)}{2b_n} \right), \quad (4)$$

при $(b_{cm} + h_3 - b_n)/2 \leq x < (b_{cm} + h_3)/2$.

За умови рівності апроксимуючих функцій на межі переходу між ділянками маємо: $\Delta L_I = (L_{II} - L_I) \cdot \frac{b_{cm} + h_3 - b_n - 2\sigma}{b_n - 2\sigma}$,

$$\Delta L_{II} = (L_{II} - L_I) \cdot \frac{b_n}{b_n - 2\sigma}, \quad \frac{\Delta L_I}{\Delta L_{II}} = \frac{b_{cm} + h_3 - b_n - 2\sigma}{b_n}.$$

Для скорочення обсягу обчислень при аналізі закономірностей процесів енергоперетворення в ЕВП наведемо рівняння і початкові умови у безрозмірному вигляді [6]. Оберемо наступні базисні величини. За базисне значення напруги - номінальну напругу джерела живлення $U_\delta = U_n$, базисного опору - активний опір обмотки збудження $R_\delta = R_n$, базисної індуктивності - мінімальну індуктивність магнітного ланцюга $L_\delta = L_{min} = L_I$, базисного переміщення - відстань до положення магнітної рівноваги, крок пересування $X_\delta = (b_{cm} + h_3)/2$. З обраних базисних величин знайдемо базисну величину струму і часу $i_\delta = U_\delta/R_\delta$; $t_\delta = L_I/R_n$.

Після відповідних перетворень рівняння (1)÷(4) для індуктивності та похідної індуктивності будуть мати наступний вигляд

$$L^* = L_{II}^* - \Delta L_I^* \cos \left(\frac{\pi(\varepsilon - \sigma^*)}{2(1 - k - \sigma^*)} \right), \quad (5)$$

$$\frac{dL^*}{d\varepsilon} = \frac{\pi}{2(1 - k - \sigma^*)} \Delta L_I^* \sin \left(\frac{\pi(\varepsilon - \sigma^*)}{2(1 - k - \sigma^*)} \right), \quad (6)$$

при $\sigma^* < \varepsilon \leq 1 - k$,

$$L^* = L_I^* + \Delta L_{II}^* \sin \left(\frac{\pi(\varepsilon + k - 1)}{2k} \right), \quad (7)$$

$$\frac{dL^*}{d\varepsilon} = \frac{\pi}{2k} \Delta L_{II}^* \cos \left(\frac{\pi(\varepsilon + k - 1)}{2k} \right), \quad (8)$$

при $1 - k \leq \varepsilon < 1$,

де коефіцієнти, що визначають зв'язок розмірних і безрозмірних величин: $L^* = L/L_I$; $\Delta L_I^* = \Delta L_I/L_I$; $\Delta L_{II}^* = \Delta L_{II}/L_I$; $\varepsilon = x/X_\delta$; $\sigma^* = \sigma/X_\delta$; $k = b_n/2X_\delta$.

Для побудови залежностей (5)÷(8) зміни індуктивності і похідної індук-

тивності від пересування рухомої ланки, необхідно знайти чисельні значення коефіцієнтів безрозмірних величин. Вихідні дані обирались у відповідності до параметрів ЕВП: $\delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $b_n = 16 \cdot 10^{-3}$; $h_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_2 = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_3 = h_4 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $X_1 = 10^{-2} \text{ м}$; $X = X_{max} = 18 \times 10^{-3} \text{ м}$; $\sigma = 5 \cdot 10^{-4}$; $r_1 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $w = 1,8 \cdot 10^3$; $b_{cm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. За відомих геометричних параметрів ЕВП та кількості витків обмотки збудження, знайдемо значення індуктивності до початку пересування рухомої ланки $L_I = 0,376 \text{ Гн}$ і в кінці руху пересування $L_{II} = 1,35 \text{ Гн}$. При цьому коефіцієнти, що визначають зв'язок розмірних і безрозмірних величин будуть дорівнювати: $\Delta L_I^* = 3,25$; $\Delta L_{II}^* = 2,77$; $\sigma^* = 0,03$; $k = 0,44$. Результати розрахунків наведені в таблиці.

Таблиця

$x \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	0,5	2	4	6	8	10	12	14	16	17	18
ε	0,03	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	0,94	1,0
L^*	1,0	1,08	1,49	2,04	2,28	2,73	3,02	3,38	3,49	3,68	3,7
$dL^*/d\varepsilon$	0	2,0	5,19	7,19	8,56	9,11	9,16	7,29	4,04	2,07	0

Середня похибка апроксимації не перевищує 5%, яку можна пояснити наявністю незначного зміщення за рахунок додаткового механічного опору при пересуванні рухомої ланки ЕВП РЕЗ. Аналізуючи залежність індуктивності і її похідної від пересування рухомої ланки ЕВП в безрозмірному вигляді знаходимо, що зміна індуктивності при пересуванні феромагнітного елемента під полюсний наконечник незначна, що призводить до різкого спаду похідної індуктивності, яка в положенні магнітної рівноваги приймає нульове значення, що пояснюється замиканням магнітного ланцюга змінного $R-L$ навантаження крізь ділянки з малим магнітним опором і досягненням індуктивності свого максимального значення.

Висновки

Зроблений аналіз та отримані аналітичні вирази, що враховують зміну індуктивності та її першої похідної в $R-L$ навантаженні в залежності від конструктивних параметрів магнітного ланцюга збудженої секції ЕВП, знайдені апроксимуючі функції, що відображають зміщення рухомої ланки ЕВП вздовж збудженої секції і враховують довжину пересування рухомої ланки ЕВП. Отримані аналітичні вирази для зручності розрахунків наведені у безрозмірному вигляді, що дозволяє систематизувати проектування та визначення енергетичних та динамічних характеристик ЕВП РЕЗ.

Література

1. Электромагнитный привод робототехнических систем / Афонин А. А., Билозер Р. Р., Гребеников В. В. и др. – Киев: Наук. Думка. - 1986. – 272с
2. Ротерс Г. Электромагнитные механизмы. – М.: : Госэнергоиздат. - 1949. – 523с.

3. Смолянінов В. Г., Сухопара О.М. Підвищення ефективності керування виконуючими пристроями радіоелектронних засобів / Вісник НТУУ «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2010. – Вип. 41. – с. 109-114.

4. Тер – Акопов А. К. Динамика быстродействующих электромагнитов. – М., Л. : Энергия. - 1965. – 168с.

5. Витенберг М.И. Расчет электромагнитных реле. – М.: Л.: Энергия. – 1966. – 720с.

6. Карпенко Б.К., Ларченко В.И., Прокофьев Ю.А. Шаговые двигатели. – Киев: Техніка. - 1976. – 143с.

Смолянінов В.Г., Сухопара О.М. Методика розрахунку змінного активно-індуктивного навантаження виконуючих пристроїв радіоелектронних засобів. Ефективність функціонування РЕЗ до складу яких входять електромагнітні виконуючі пристрої (ЕВП), механізми та двигуни, при визначенні енергетичних та механічних характеристик, що забезпечують неперервний режим роботи РЕЗ з максимальним КПД, повинні враховуватись як змінне активно-індуктивне навантаження РЕЗ. Наведена методика розрахунку зміни індуктивності магнітного ланцюга збудженої секції ЕВП в залежності від зміни магнітного опору при пересуванні рухомої ланки ЕВП. Отримані аналітичні вирази для розрахунку індуктивності та її першої похідної в змінному активно-індуктивному навантаженні РЕЗ, що враховують конструктивні параметри ЕВП, для зручності розрахунків наведені у безрозмірному вигляді. Отримані апроксимуючі функції зміни індуктивності та її першої похідної для активно-індуктивного навантаження РЕЗ в залежності від пересування рухомої ланки ЕВП на довжину кроку спрацювання.

Ключові слова: зміна індуктивності, апроксимуюча функція, конструктивні параметри

Смолянінов В.Г., Сухопара А.Н. Методика расчета изменяющейся активно-индуктивной нагрузки исполнительных устройств радиоэлектронных средств. Эффективность функционирования РЭС в состав которых входят электромагнитные исполнительные устройства (ЭИУ), механизмы и двигатели, при определении их энергетических и механических характеристик для обеспечения непрерывного режима работы с максимальным КПД, должны учитываться как изменяющаяся активно-индуктивная нагрузка РЭС. Представлена методика расчета изменения индуктивности магнитной цепи возбужденной секции ЭИУ, в зависимости от изменения магнитного сопротивления цепи при перемещении подвижного звена ЭИУ. Получены аналитические выражения для расчета индуктивности и ее первой производной при изменяющейся активно-индуктивной нагрузке РЭС, что учитывает конструктивные параметры ЭИУ, для удобства расчетов представленные в безразмерном виде. Получены аппроксимирующие функции изменения индуктивности и ее первой производной для активно-индуктивной нагрузки РЭС, в зависимости от перемещения подвижного звена ЭИУ на величину шага срабатывания.

Ключевые слова: изменение индуктивности, аппроксимирующая функция, конструктивные параметры

Smolyaninov V.G., Suchopara A.N. Method of calculating of the changing active-inductive loading executor's devices for the radio - electronics means. Effective functioning radio - electronics means (REM), comprising electromagnetic executive apparatus (ERA), the mechanisms and motors, enter in the complement of, at determination of their power and mechanical descriptions for providing of continuous office hours with maximal KPD, must be

taken into account as a changing active-inductive loading of REM. The method of calculation of change inductance of magnetic chain of the excited section of ERA is presented, depending on the change of magnetic resistance a chain at moving of mobile link of ERA. Analytical expressions are got for the calculation of inductance and its first derivative at the changing active-inductive loading of REM, that takes into account the structural parameters of ERA, for comfort of calculations presented in a dimensionless kind. The approximating functions of change inductance and its first derivative are got for the active-inductive loading of REM, depending on moving of mobile link of ERA to the size of step of wearing-out.

Keywords: *change inductance, approximating function, structural parameters*