

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ВИКОНУЮЧИМИ ПРИБОРАМИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Смолянiнов В.Г., Сухопара О.М.

До складу радіоелектронних засобів (РЕЗ) часто входять електромагнітні виконуючі пристрої (ЕВП), механізми та двигуни, для підвищення швидкості спрацювання яких при зменшенні енергетичних витрат використовують різні методи та схеми керування.

Із аналізу відомих режимів роботи ЕВП [1], розімкнута схема керування при всій своїй достатній простоті не дозволяє отримати високі характеристики. Значно кращі результати дає замкнута схема, коли переміщення рухомої ланки відслідковується за допомогою датчиків положення [2], які спільно з електронним комутатором, дозволяють забезпечити автоматичний вихід ЕВП РЕЗ на сталий режим роботи з максимальною швидкістю. Для нормальної роботи таких ЕВП РЕЗ при зміні зовнішніх параметрів необхідно вводити зворотні зв'язки для контролю за навантаженням, швидкістю т.ін., що значно ускладнює власну схему керування, збільшує приєднану масу рухомої ланки, погіршує динамічні та енергетичні характеристики.

Покращити швидкодію та енергетичні характеристики ЕВП РЕЗ можливо без додаткових датчиків при використанні в якості функції керування зміну величини струму в обмотці ЕВП РЕЗ, що відображає електромагнітні процеси, які відбуваються у внутрішній структурі ЕВП при пересуванні рухомої ланки.

Таким чином, задача дослідження полягає в аналізі струму в обмотці ЕВП РЕЗ, оцінці взаємозв'язку між змінами величини струму з положенням рухомої ланки, визначенні часових інтервалів, що характеризують ці зміни при пересуванні рухомої ланки, отриманні аналітичних виразів для їх розрахунку та організації ефективного керування для поліпшення енергетичних та динамічних характеристик.

Теоретичні викладки

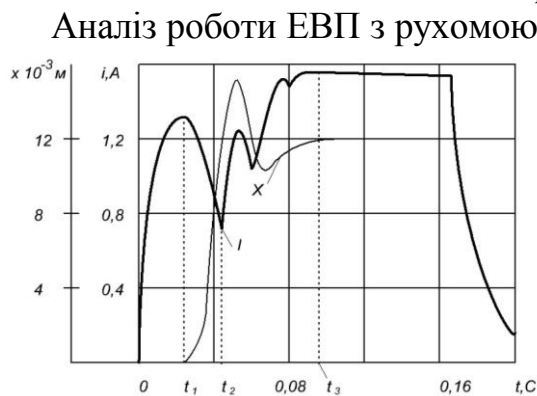


Рис.1.

свідчить, що під дією електромагнітних сил відбувається зміна індуктивного опору на кроці пересування, а відповідно і повного опору обмотки ЕВП, що відображається у зміні величини струму в обмотці ЕВП. Таким чином струм в обмотці ЕВП можна використати в якості функції керування, яку формує сам ЕВП, що відображає електромагнітні

тні процеси у його внутрішній структурі при пересуванні рухомої ланки.

При дослідженні форми та часових інтервалів осцилограми струму – I , та відповідної осцилограми пересування рухомої ланки – x , на рис.1, можна визначити, що на інтервалі від $0 - t_1$ ланка не рухається, потужність джерела живлення йде на накопичення електромагнітної енергії для початку її пересування. На інтервалі від t_1 до t_2 здійснюється пересування рухомої ланки, потужність джерела живлення перетворюється в механічну енергію. Після часу спрацювання t_2 , що дорівнює часу зрушення t_1 та часу пересування t_d , рухома ланка досягає положення магнітної рівноваги, струм в обмотці починає зростати і до часу t_3 досягає сталого значення. На інтервалі від t_2 до t_3 , коли пересування скінчилося, спожита потужність витрачається на нагрів обмотки та структури ЕВП та повністю перетворюється в потужність втрат. Для ефективного керування ЕВП РЕЗ потрібно

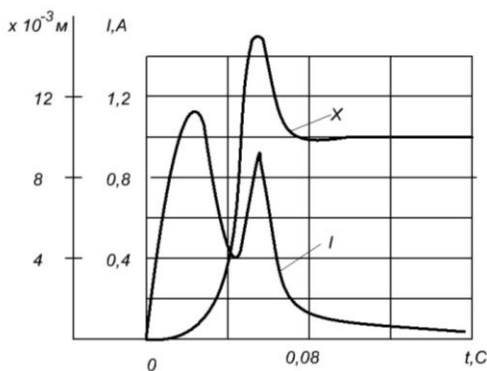


Рис.2

значно зменшити часовий інтервал $t_2 - t_3$, а також інтервал t_1 . Інтервал $t_2 - t_3$ можливо скоротити, коли довжина імпульсів керування формується відповідно до зміни форми струму в обмотці і відключення ЕВП відбувається після часу t_2 з невеликою затримкою для надійного спрацювання ЕВП, як показано на осцилограмах, рис. 2. Ефективність керування також підвищується при зменшенні інтервалу t_1 ,

за допомогою ланцюгів форсування струму [5] в обмотці ЕВП РЕЗ.

Розглянемо форму струму в обмотці ЕВП, рис. 1, та визначимо часові інтервали, які характеризують її зміни. До моменту часу t_1 , струм змінюється по експоненціальному закону з постійною часу кола навантаження $\tau_n = L_{min} / R_n$, де L_{min} - індуктивність обмотки перед спрацюванням рухомої ланки; R_n - активний опір обмотки.

Запишемо повний опір ланцюга навантаження в операторній формі:

$$Z_n(p) = R_n + pL_{min} \quad (1)$$

При нульових початкових умовах, використаємо безперервне перетворення Лапласа та визначимо перехідний струм на інтервалі $0 - t_1$

$$i(t) = Res \frac{U}{p(R_n + pL_{min})} e^{p_1 t_1} + Res \frac{U}{p(R_n + pL_{min})} e^{p_2 t_1}, \quad (2)$$

де $p_1 = 0$ та $p_2 = -R_n / L_{min}$ - корені характеристичного рівняння навантаження, визначеного з (1) за умови $Z_n(p) = 0$; U - напруга джерела живлення постійного струму.

Рішення рівняння (2), після диференціювання та відповідних матема-

тик-них перетворень, прийме вигляд $i(t) = \frac{U}{R_H} (1 - e^{-\frac{R_H}{L_{min}} t_1})$, звідки визначимо час зрушення t_1

$$t_1 = \frac{L_{min}}{R_H} \ln \frac{I_H}{I_H - i(t)}, \quad (3)$$

де $I_H = U/R_H$ – стале значення струму навантаження.

На кривій струму (I , рис.1), в час t_1 , струм сягає значення $i(t_1)$, при якому сила тяжіння долає момент опору та рухома ланка ЕВП починає пересуватися. Рівняння балансу сил для ЕВП: $F_{EM} = m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{пр}(x, \frac{dx}{dt})$, де $m = m_{р.л} + m_{пр}$ – маса рухомої ланки та приєданого навантаження; F_{EM} – тягова сила; $F_{пр}(x, \frac{dx}{dt})$ – протидіюча сила, залежна, як від положення, так і від швидкості рухомої ланки.

В мить зрушення рухомої ланки має місце рівняння $d^2x/dt^2 = 0$, що відповідає рівнянню сил $F_{EM} = F_{пр}$. Зусилля, що створює ЕВП:

$$F_{EM} = (iw)^2 \frac{dG_m}{2dx} = \frac{\Phi^2 dG_m}{2G_m^2 dx}, \quad (4)$$

де G_m – магнітна провідність ланцюга рухомої ланки; x – довжина пересування рухомої ланки; w – кількість витків обмотки ЕВП.

З урахуванням того, що в мить зрушення t_1 , тягова та протидіюча сили рівні, з (4) отримаємо вираз для магнітного потоку

$$\Phi = \sqrt{\frac{2F_{пр} G_m^2 dx}{dG_m}}. \quad (5)$$

Із рівняння для потокозчеплення, з врахуванням (5), визначимо струм в момент зрушення рухомої ланки

$$i(t_1) = \frac{\Psi}{L_{min}} = \frac{\Phi w}{L_{min}} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2F_{пр} dx}{dG_m}}. \quad (6)$$

Визначимо час зрушення t_1 (3), враховуючи вираз (6)

$$t_1 = \frac{L_{min}}{R_H} \ln \frac{1}{1 - i(t_1)/I_H} = \frac{w^2 G_m}{R_H} \ln \frac{1}{1 - \frac{R_H}{wU} \sqrt{\frac{2F_{пр} dx}{dG_m}}}. \quad (7)$$

З часу t_1 до часу t_2 , відбувається пересування рухомої ланки (x -рис.1), завдяки чому індуктивність обмотки збільшується, а струм зменшується.

Для визначення часу пересування t_d , використаємо рівняння балансу напруги

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U}{w} - \frac{iR_H}{w} = \frac{U}{w} - \frac{\Phi R_H}{L_{max}}, \quad (8)$$

та рівняння балансу сил

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_{EM}}{m} - \frac{F_{пр}}{m} = \frac{dG_m}{2mG_m^2 dx} \Phi^2 - \frac{F_{пр}}{m}. \quad (9)$$

Приблизне аналітичне рішення виразів (8) та (9) можливо отримати, якщо диференціальні рівняння подати ступеневим рядом [1], що сходиться. Враховуючи, що в час t_1 пересування та швидкість рухомої ланки дорівнює нулю, рівняння руху можна апроксимувати ступеневою функцією, параболою n – порядку

$$x = k \cdot t^n, \quad (10)$$

де k - коефіцієнт пропорційності.

З аналізу кривих пересування рухомої ланки ЕВП [3,4] можна визначити, що $n = 3$. Вирішивши це рівняння, відносно часу t , знайдемо час пересування t_d . Для визначення коефіцієнта k візьмемо другу похідну від (10) та підставимо рівняння потоку в рівняння балансу сил

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 6kt = \frac{dG_m}{2m G_m^2 dx} (\Phi + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 \dots)^2 - \frac{F_{пр}}{m}.$$

За умови рівності коефіцієнтів при однакових ступенях після відповідних перетворень отримаємо

$$k = \frac{\alpha_1 \Phi dG_m}{6m G_m^2 dx},$$

де коефіцієнт $\alpha_1 = \frac{U}{w} - \frac{R_H}{L_{max}} (\Phi + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 \dots)$ визначається підставкою рівняння потоку та його першої похідної в рівняння балансу на пруги.

За умови рівності коефіцієнтів при однакових ступенях після відповідних перетворень отримаємо $\alpha_1 = \frac{U}{w} - \frac{R_H}{w^2} \sqrt{\frac{2F_{пр} dx}{dG_m}}$.

Враховуючи вираз для α_1 , вираз для коефіцієнта k має вигляд

$$k = \frac{U}{3 m w} \sqrt{\frac{F_{пр} dG_m}{2G_m^2 dx}} - \frac{R_H F_{пр}}{3 m w^2 G_m}.$$

Визначимо час пересування t_d рухомої ланки ЕВП

$$t_d = \sqrt[3]{\frac{x}{k}} = \sqrt[3]{\frac{3 m w x G_m}{U \sqrt{\frac{F_{пр} dG_m}{2dx} - \frac{R_H F_{пр}}{w}}}}. \quad (11)$$

Для перевірки отриманих виразів для часу зрушення t_1 - (7), часу пересування t_d - (11), та часу спрацювання $t_2 = t_1 + t_d$, були зроблені розрахунки та отримані експериментальні дані, які для зручності порівняння наведені в таблиці.

Вихідні данні для розрахунку обирались у відповідності до параметрів ЕВП, з якого знімались характеристики, з величинами напруги живлення U_B , що співпадають з використаними в експерименті. Вихідні дані: $w=1,8 \cdot 10^3$; $R_n=10$ Ом; $F_{пр}=10$ н; $m = m_{р.л} + m_{пр}$, де $m_{р.л}=5$ кг, $m_{пр}$ - приєднане навантаження - 1кг і 3,5 кг; $x=18 \cdot 10^{-3}$ м. Для розрахунку часу t_1 , до початку пересування рухомої ланка, $G_m=1,2 \cdot 10^{-7}$ Гн; $dG_m/dx = 5 \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Для розрахунку часу пересування t_d , коли рухома ланка зайняла положення магнітної рівноваги $G_m=4 \cdot 10^{-7}$ Гн; $dG_m/dx = 390 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Таблиця

$m_{пр}$, кг	1			3,5		
U , в	30	40	50	30	40	50
$t_{1розр.}$, сек	-	0,0815	0,0465	-	0,0815	0,0465
$t_{1експ.}$, сек	0,13	0,083	0,0535	0,13	0,083	0,0535
$t_{dрозр.}$, сек	0,0863	0,0774	0,0713	0,0969	0,083	0,08
$t_{dексп.}$, сек	0,0925	0,076	0,0576	0,1225	0,0869	0,0625
$t_{2розр.}$, сек	-	0,1589	0,1178	-	0,1645	0,1265
$t_{2експ.}$, сек	0,223	0,159	0,1106	0,252	0,1608	0,1155

Середня похибка для розрахункових та вимірних значень не перевищує 10%, яку можна пояснити наявністю втрат в електромагнітному ланцюзі навантаження та додатковим механічним опором рухомої ланки. Як видно з таблиці, розрахункові дані часу зрушення t_1 , при $U = 30$ в відсутні, внаслідок невизначеності логарифма з виразу (7). Це обумовлено тим, що при заданих параметрах навантаження та напруги живлення, потужність, що додається до ЕВП недостатня для початку пересування його рухомої ланки. Це положення підтвердилось експериментально, коли при збільшенні напруги живлення до 32в відбулось пересування рухомої ланки. Таким чином з похибкою біля 10% можливо визначити нижню межу напруги живлення при якій починається пересування рухомої ланки, що може слугувати критерієм непрямой оцінки енергетичних характеристик використаного джерела живлення ЕВП.

Для реалізації ефективного керування з вибором в якості функції керування струму в обмотці ЕВП, з точки зору підвищення надійності та адаптивності роботи, при зміні механічного навантаження та зменшенні споживання енергії, необхідно використати напівпровідниковий перетворювач, який здатний відслідковувати зміни струму, при пересуванні рухомої ланки, формувати імпульси керування комутуючими елементами перетворювача. Для роботи такої системи керування не потрібні громіздкі датчики положення, пересування та швидкості, які потребують складної конструктивно - технологічної реалізації та власної системи керування.

Висновки

Струм в обмотці ЕВП можна використати в якості функції ефективного керування, яку без додаткових датчиків формує сам ЕВП. Зроблений аналіз та отримані аналітичні вирази для розрахунку часових інтервалів зміни струму в обмотці ЕВП показують, що формування імпульсів напруги потрібної амплітуди та довжини на інтервалі часу t_2 , дозволяє організувати ефективне керування при максимумі швидкодії та мінімумі енергоспоживання. Розрахунок часу зрушення t_1 , дає можливість визначити напругу живлення при якій починається пересування рухомої ланки, що дозволяє непрямым чином обрати параметри джерела живлення, а ефективність керування підвищити при зменшенні інтервалу t_1 , за допомогою ланцюгів форсування струму. Конструювання ЕВП з властивостями, що дозволяють організувати ефективне керування без додаткових датчиків, за рахунок контролю електромагнітних процесів у власній конструкції, є перспективним напрямком проведення розробок в межах більш широкого кола застосування, наприклад, в робототехніці.

Література

1. Ратмиров В.А., Ивоботенко Б.А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления. – М.; Л. : Госэнэргоиздат. - 1962. – 128с..
2. Гумен В.Ф., Калининская Т.В. Следящий шаговый электропривод. Л. : Энергия. - 1980. – 168с.
3. Тер-Акопов А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов. – М., Л. : Энэргия. - 1965. – 168с.
4. Электромагнитный привод робототехнических систем / Афонин А., Билозер Р.Р., Гребеников В.В. и др. – Киев: Наук. Думка. - 1986. – 272с.
5. Зіньковський Ю.Ф., Смолянінов В.Г., Біденко В.А. Інженерна методика розрахунку ємнісного накопичувача радіоелектронних засобів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2008. – Вип. 36. – С. 89-95.

Смолянінов В.Г., Сухопара О.М. Підвищення ефективності керування виконуючими пристроями радіоелектронних засобів. Показана можливість побудови ефективного керування за допомогою контролю струму в обмотці ЕВП РЕЗ. Зроблено оцінку взаємозв'язку між змінами величини струму з положенням рухомої ланки, визначені часових інтервалах, отримані аналітичні вирази для їх розрахунку.

Ключові слова: ефективне керування, зміна струму, часові інтервали

Смолянінов В.Г., Сухопара А.Н. Повышение эффективности управления исполнительными устройствами радиоэлектронных средств. Показана возможность построения эффективного управления с помощью контроля тока в обмотке ЭИУ РЭС. Сделана оценка взаимосвязи между изменениями в кривой тока с положением подвижного звена, определены временных интервалах, получены аналитические выражения для их расчета.

Ключевые слова: эффективное управление, изменение тока, временные интервалы

Smolyaninov V.G., Suchopara A.N. The raising effective of the operation executor's devices for the radio electronics apparatus. The consideration of development and design of the electronics devices for the effective operation with use shape of the electric current. The presents of calculation of the time intervals variation current with the help of simple analytical equations.

Key words: effective of the operation, variation current, time intervals