

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТРУМУ ТА НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ВИКОНУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Смолянiнов В. Г.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

Сухопара О. М.<sup>2</sup>, к.т.н., нач.вiддiлу

<sup>1</sup>Нацiональний технiчний унiверситет України

"Київський полiтехнiчний iнститут",

<sup>2</sup>ТЦ "ЄВРОПА", м. Київ, Україна

Ефективнiсть функцiонування радiоелектронних засобiв (РЕЗ) до складу яких часто входять електромагнiтнi виконуючi пристрої (ЕВП), механiзми та двигуни, в значнiй мiрi залежить вiд ефективного перетворення, передачi та розподiлення електроенергiї в ЕВП РЕЗ, для пiдвищення швидкостi спрацювання яких при зменшеннi енергетичних витрат використовують рiзнi методи та схеми керування.

Проектування джерел живлення та схем керування РЕЗ з виконуючими пристроями та без них, потребує розрахунку вiдповiдних електричних параметрiв, якi забезпечують безперервний режим роботи РЕЗ з максимальним ККД. Для пересування рухомої ланки виконуючого пристрою (ВП) РЕЗ, електромагнiтного механiзму або двигуна, необхідно визначити величину струму та напруги живлення, якi в залежностi вiд конструктивних параметрiв ЕВП та характеру приєднаного до нього навантаження, будуть суттєво змiнюватись.

Таким чином, задача дослiдження полягає в аналізi динамiчних процесiв в ЕВП РЕЗ, визначеннi зв'язку електричних параметрiв джерела живлення з конструктивними параметрами ЕВП та приєднаним до нього навантаженням, отриманнi аналітичних виразiв для їх розрахунку, для покращення динамiчнi та енергетичнi характеристики ЕВП РЕЗ.

### Теоретичнi викладки

Динамiчнi процеси в ЕВП РЕЗ вiдображаються диференцiйними рiвняннями якi суттєво нелiнiйнi i мають вигляд [1]

$$U = iR_{\text{н}} + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

$$F_{\text{ем}} = m \frac{d^2x}{dt^2} + r_{\text{мех}} \frac{dx}{dt} + kx, \quad (2)$$

де  $U$  – постiйна напруга, що додається до обмотки ЕВП;  $R_{\text{н}}$  - активний опiр обмотки ЕВП;  $i$  - струм в обмотцi ЕВП;  $m = m_{\text{р.л}} + m_{\text{пр}}$  - маса рухомої ланки ЕВП та приєднаного навантаження;  $F_{\text{ем}}$  - тягнуча сила рухомої ланки ЕВП;  $r_{\text{мех}}$  – опiр в'язкого тертя;  $k$  – жорсткiсть пружних елементiв;

$x$  – зміна положення рухомої ланки ЕВП;  $\Psi = \Phi \cdot w$  – потокощепплення обмотки, де  $\Phi = i w / R_m$  магнітний потік,  $w$  – кількість витків обмотки ЕВП,  $R_m$  – магнітний опір магнітного ланцюга при пересуванні рухомої ланки ЕВП.

Для визначення параметрів струму та напруги, що необхідно докласти для надійного пересування рухомої ланки ЕВП, розглянемо перетворення потужності в ЕВП при його функціонуванні.

При роботі ЕВП має місце баланс потужностей

$$P_{\text{ел}} = i^2 R_{\text{н}} + i \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3)$$

де перший член правої частини (3) – потужність, що перетворюється в тепло, а другий член – електромагнітна потужність, що додається в ЕВП і для початку руху рухомої ланки величини струму в обмотці ЕВП повинна досягти певного значення.

В створенні механічного зусилля  $F_{\text{мех}}$ , а відповідно і механічної потужності, приймає участь тільки електромагнітна потужність. З виразу (3) враховуючи, що  $\Psi = L \cdot i$ , де  $L = w^2 / R_m$  – індуктивність обмотки ЕВП, рівняння для електромагнітної потужності після відповідних перетворень має вигляд

$$P_{\text{ем}} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\Psi \cdot i) + \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dt} \left( \frac{\Psi}{i} \right). \quad (4)$$

Інтеграл від першого члена правої частини (4), це енергія магнітного поля, що запасается в індуктивності обмотки, а другий член характеризує механічну потужність, яка пов'язана зі зміною параметра  $L = \Psi / i$ , при пересуванні рухомої ланки ЕВП.

Механічна потужність через електромагнітну силу визначається відомим співвідношенням [2],  $P_{\text{мех}} = F_{\text{ем}} \cdot dx/dt = i^2 dL dx / 2 dx dt$ , що містить параметр, який характеризує динаміку пересування рухомої ланки ЕВП, її швидкість.

Зміну положення рухомої ланки подамо як рівняння:

$$x = \begin{cases} x_1 \left[ 1 - \left( \frac{t-t_1}{t_d} \right)^n \right] & \text{при } t > t_1, \\ x_1 & \text{при } t \leq t_1 \end{cases},$$

де  $x_1$  – величина кроку пересування рухомої ланки ЕВП;  $t_1$  – час зрушення;  $t_d$  – час пересування рухомої ланки ЕВП;  $n$  – показник ступеня.

Тоді функція, що описує пересування рухомої ланки ЕВП має вигляд

$$x(t) = x_1 - x = x_1 \left( \frac{t-t_1}{t_d} \right)^n. \quad (5)$$

Знаходження визначеного інтеграла з виразу (2), за час спрацювання –  $t_2$ , рухомої ланки ЕВП, враховуючи (5), після відповідних математичних перетворень має вигляд

$$\int_0^{t_2} \left( m \frac{d^2 x}{dt^2} + r_{\text{мех}} \frac{dx}{dt} + kx \right) dt = \frac{m x_1 n(n+1) + r_{\text{мех}} x_1 t_d (n+1) + k x_1 t_d^2}{t_d (n+1)}. \quad (6)$$

Для тягнучого зусилля, що створює ЕВП, має місце співвідношення [3]

$$F_{\text{ем}} = \frac{1}{2} i \frac{d\Psi}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} = \frac{1}{2} (i\omega)^2 \frac{dG_m}{dx}. \quad (7)$$

де  $G_m$  – магнітна провідність магнітного ланцюга рухомої ланки ЕВП.

Для визначення магніторушійної сили, що діє за час спрацювання  $t_2$ , вико-ристаємо критерій оптимальності для максимуму ККД [4], який встановлює, що середнє значення струму за час спрацювання дорівнює половині його сталого значення

$$\int_0^{t_2} i^2 dt = \frac{1}{4} I_{\text{н}}^2 t_2 \quad (8)$$

де  $I_{\text{н}}$  – сталє значення струму в обмотці ЕВП.

Розв'яжемо визначений інтеграл за час спрацювання від виразу (7) з врахуванням (8) та дорівнюємо (6), знайдемо сталє значення струму в обмотці

$$I_{\text{н}} = \frac{4}{w} \sqrt{\frac{[m x_1 n(n+1) + r_{\text{мех}} x_1 t_d (n+1) + k x_1 t_d^2] 2 x_1}{t_2 t_d (n+1) G_m}}, \quad (9)$$

де  $n = 3$  – показник ступеня, що визначається експериментально [1].

За умови відсутності опору в'язкого тертя та пружних елементів вираз (9) прийме вигляд

$$I_{\text{н}} = \frac{4}{w} \sqrt{\frac{2 m x_1^2 n}{G_m t_2 t_d}}. \quad (10)$$

Із рівняння електричної рівноваги (1), враховуючи допущення о незмінності струму в сталому режимі, визначимо напругу яку необхідно докласти, щоб відбулося пересування рухомої ланки ЕВП. Для цього представимо зміну потокощеплення від часу з рівняння (1) у вигляді

$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} = U_x + U_V, \quad (11)$$

де  $U_x$  – складова ЕРС самоіндукції, що залежить від положення рухомої ланки;  $U_V$  – складова ЕРС самоіндукції, що залежить від швидкості пересування рухомої ланки.

Перша складова з виразу (11) незначним чином впливає на величину електромагнітної потужності, що пов'язано з невеликим значенням індуктивності  $L$  до початку руху рухомої ланки ЕВП, а похідна  $di/dt$  швидко зменшується і перед початком руху досягає нульового значення. Після закінчення пересування рухомої ланки ЕВП, коли струм досягає свого сталого значення і його зміни в обмотці ЕВП не відбувається,  $di/dt = 0$ . Таким

чином  $U_x \ll U_v$ , внаслідок чого, складову ЕРС самоіндукції, що залежить від положення рухомої ланки ЕВП, можливо не враховувати.

Тоді рівняння для напруги, що додається до обмотки ЕВП має вигляд

$$U = (dLdx/dxdt + R_n) I_n \quad (12)$$

Швидкість пересування рухомої ланки  $dx/dt$  з рівняння (12), знаходимо як першу похідну з виразу (5), а похідну зміни індуктивності визначимо як похідну магнітної провідності  $(dG_m/dx)$  магнітного ланцюга рухомої ланки ЕВП з рівняння (7), враховуючи, що пересування рухомої ланки вже відбулось і похідна індуктивності досягла мінімального значення.

Після відповідних перетворень рівняння для напруги живлення ЕВП запишемо у вигляді

$$U = \left( \frac{w^2 x_1 n (t - t_1)^{n-1} dG_m}{t_d^n dx} + R_n \right) I_n \quad (13)$$

Таким чином, вирази (9) та (13) відображають зв'язок електричних параметрів живлення ЕВП з конструктивними параметрами ЕВП, що враховують динаміку пересування рухомої ланки ЕВП та характер приєднаного до нього навантаження, та пов'язані з динамічними та енергетичними характеристиками ЕВП.

Для перевірки отриманих виразів були зроблені розрахунки та отримані експериментальні дані, які для зручності порівняння наведені в таблиці.

Вихідні дані для розрахунку обирались у відповідності до параметрів ЕВП з якого знімались характеристики, де було враховано, що експериментальні дані напруги та струму для порівняння з розрахунковими були зняті для ЕВП який не мав в своєму складі гідравлічних, пневматичних, пружних та схожих на них приєднаних навантажень, тому розрахунок сталого значення струму в обмотці був виконаний за допомогою виразу (10) при наступних вихідних даних:  $w = 1,8 \cdot 10^3$ ;  $R_n = 10$  ом;  $m = m_{р.л} + m_{пр}$ , де  $m_{р.л} = 5$  кг,  $m_{пр}$  - приєднане навантаження яке обираємо на рівні, 1 кг, 3,5 кг;  $x_1 = 18 \cdot 10^{-3}$  м;  $G_m = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн;  $dG_m/dx = 5 \cdot 10^{-7}$  Гн/м, при цьому необхідні дані часових інтервалів  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_d$  при пересуванні рухомої ланки ЕВП були запозичені з [5].

Таблиця

$m_{пр}, \text{кг}$	1			3,5		
$U_{\text{задан}}, \text{В}$	30	40	50	30	40	50
$I_{н.розр.}, \text{А}$	2,73	3,35	4,21	2,93	3,68	4,49
$I_{н.експ.}, \text{А}$	2,60	3,50	4,30	2,60	3,60	4,30
$U_{н.розр.}, \text{В}$	31,66	38,86	48,83	33,98	42,68	53,08
$U_{н.експ.}, \text{В}$	32,00	40,00	49,00	32,00	40,00	49,00

Середня похибка для розрахункових та вимірних значень не перевищує 10%, яку можна пояснити наявністю втрат в електромагнітному ланцюзі при пересуванні рухомої ланки та додатковим механічним опором приєднаного навантаження ЕВП РЕЗ.

### Висновки

Зроблений аналіз та отримані аналітичні вирази для розрахунку сталого струму та напруги живлення ЕВП для пересування рухомої ланки ЕВП на величину кроку в залежності від конструктивних параметрів ЕВП та характеру приєднаного до нього навантаження, що враховують динаміку пересування рухомої ланки та дозволяють систематизувати проектування та визначення електричних параметрів джерела живлення РЕЗ, оцінити енергетичні та динамічні характеристики 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. Гумен В. Ф., Калининская Т. В. Следящий шаговый электропривод. Л. : Энергия. - 1980. – 168с.
3. Ратмиров В. А., Ивоботенко Б. А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления. – М.; Л. : Госэнергоиздат. - 1962. – 128с
4. Тер – Акопов А. К. Динамика быстродействующих электромагнитов. – М., Л. : Энергия. - 1965. – 168с.
5. 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.

*Смолянінов В.Г., Сухопара О.М. Методика розрахунку струму та напруги живлення виконуючих пристроїв радіоелектронних засобів. Ефективність функціонування РЕЗ до складу яких входять електромагнітні виконуючі пристрої (ЕВП), механізми та двигуни, залежить від вибору електричних параметрів для їх живлення. Наведена методика розрахунку сталого струму та напруги живлення ЕВП, що відображає зв'язок електричних параметрів з конструктивними параметрами ЕВП, враховує динаміку пересування рухомої ланки ЕВП та характер приєднаного до нього навантаження, отримані аналітичні вирази для їх розрахунку.*

**Ключові слова:** сталий струм, напруга живлення, конструктивні параметри

*Смолянінов В.Г., Сухопара А.Н. Методика расчета тока и напряжения питания исполнительных устройств радиоэлектронных средств. Эффективность функционирования РЭС в состав которых входят электромагнитные исполнительные устройства (ЭИУ), механизмы и двигатели, зависит от выбора электрических параметров для их питания. Представлена методика расчета установившегося тока и напряжения питания ЭИУ, которая отражает связь электрических параметров с конструктивными параметрами ЭИУ, учитывает динамику перемещения подвижного звена ЭИУ и характер присоединенной к ней нагрузки, получены аналитические выражения для их расчета.*

**Ключевые слова:** установившийся ток, приложенное напряжение, конструктивные параметры

*Smolyaninov V.G., Suchopara A.N. Method of calculating the current and supply voltage executor's devices for the radio - electronics means. Effective functioning radio - electronics means comprising electromagnetic executive apparatus (ERA), the mechanisms and motors, depends on the choice of electrical parameters for the source of their food. The technique of calculation steady current in the coil EIT and the supply voltage, which reflects the relationship between pairs electrical power supply design parameters of EIT, which take into account the dynamics of the movable unit EIT and the nature of acceding to the load, the analytical expressions for their calculation.*

**Keywords:** *steady current, supply voltage , design parameters*