

Секція 4

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ЕЛЕМЕНТИ ПРИВОДІВ ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

УДК 621.921

Б.Д. БІЛОУС, S. KRZYŻAK

Національний університет “Львівська політехніка”,
Wyższa szkoła informatyki i zarządzania w Przemysłu

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТУ МАЯТНИКОВОГО ВІБРАТОРА ДВИГУНА

Ї Б. Білоус, S. Krzyżak, 2011

Висвітлено результати моделювання динаміки двигуна з маятниковим вібратором за силового збурення. Запропоновано методику розрахунку електромагніту маятникового вібратора двигуна.

Article highlights the results of modeling the dynamics of the pendulum motor vibrator in force disturbance. The proposed method of calculation electromagnet pendulum vibrator motor.

Постановка завдання досліджень. Основними вузлами вібраційного електродвигуна є маятниковий вібратор і механізм вільного ходу (МВХ). Методика розрахунку МВХ з метою досягнення оптимальних характеристик відома і доволі повно висвітлена у літературі. Однак відсутність достовірної інженерної моделі двигуна з маятниковим вібратором за силового збурення є істотним стримувальним чинником в реалізації методики розрахунку електромагніту маятникового вібратора.

Розрахунок електромагнітних систем розглядається у [1–3], в яких наведені математичні моделі процесів, що відбуваються під час експлуатації котушок електромагнітів. Розробку методів розрахунку електромагнітних вібраторів розглядають роботи [4–6]. Ці методики моделювання та розрахунку дають змогу з достатньою для практичних потреб точністю розраховувати електромагнітні вібратори з незмінними параметрами рухомих частин. Однак для випадку змінних параметрів рухомих частин застосування цих моделей фактично неможливе.

У випадку двигунів з маятниковими вібраторами параметри вібратора змінюються за один період його коливань двічі. Ця особливість роботи вібратора у складі вібраційного електродвигуна накладає особливості на розрахунок і конструювання електромагнітів маятникового вібратора. Методика розрахунку електромагнітів вібратора двигуна фактично відсутня і завдання її створення є актуальним.

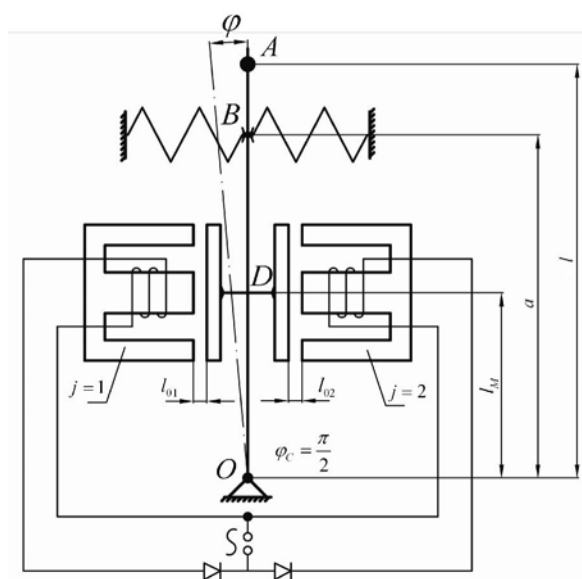
Мета і результати досліджень. Метою досліджень є розроблення методики розрахунку електромагнітів вібраційного електродвигуна з маятниковим вібратором на основі моделі динаміки двигуна за силового збурення.

Модель динаміки двигуна з одним маятниковим вібратором та МВХ має вигляд [7]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[(I + I_b f(t)) \ddot{\varphi} + l \ddot{\varphi} = mgl \sin \varphi - ca^2 \varphi + ml \left[\ddot{\alpha} (\cos \varphi \sin \varphi_C + \sin \varphi \cos \varphi_C) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \ddot{\alpha} (\sin \varphi \sin \varphi_C - \cos \varphi \cos \varphi_C) \right] + \frac{l_M}{2m_b S_j} F_j^2 - M_C(t) f(t); \right. \\ & \left[I_b \ddot{\alpha} + M_C(t) \right] s(f(t)) = 0; \quad F_j = \frac{m_b w_j(i_j) S_j}{(l_{0j} - l_M j)}; \\ & \left[w_j \frac{dF_j}{dt} + i_j R_j - u_j(t) \right] s_j(t) = 0. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де $f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} [s(t - t_1 - iT_f) - s(t - t_2 - iT_f)]$; $s(t)$; $s(f(t))$; $s_j(t)$ – одиничні функції Хевісайда;

t_1, t_2 – моменти зміни параметрів рухомих частин вібратора за час одного періоду T_f коливань вібратора; φ – кут відхилення маятника вібратора від положення рівноваги; I, m, I_b – масові характеристики маятника вібратора та веденої системи двигуна відповідно; c – жорсткість пружної системи вібратора; a, l, l_M, φ_C – геометричні характеристики маятника вібратора; $I, M_C(t)$ – характеристики внутрішнього та зовнішнього опорів рухові рухомих частин вібраційного електродвигуна; $j = 1, 2$ – формальний індекс j -го електромагніту вібратора; F_j, i_j, R_j – магнітний потік, струм та активний опір j -ї котушки електромагніту вібратора; S_j, l_{0j} – площа сердечника та статичний зазор між якорем та сердечником j -го електромагніту вібратора; $u_j(t) = u_0 \sin kt$ – напруга живлення j -го електромагніту вібратора; k – частота зміни напруги живлення; $s_j(t)$ – функція, що описує почерговість роботи електромагнітів маятникового вібратора зі зміною часу t ; $x = d \cos nt$; $y = b \sin(nt + a)$ – вібраційне поле кінетичного збурення вібратора; d, b, n, a – параметри кінетичного збурення; $j_b = j$ за $\dot{\varphi} > 0$ – робочий хід маятникового вібратора; $j_b = j^*$ за $\dot{\varphi} < 0$ – неробочий хід вібратора; j_b – кут повороту веденої системи двигуна; m_b – магнітна проникність повітря.



Розрахункова схема маятникового вібратора двигуна

Зазвичай під час використання вібраційних електродвигунів на звичайному, не вібраційному обладнанні, вібраційне поле, що утворюється під час роботи обладнання, характеризується мізерними амплітудами коливань. Це дає змогу покласти $d = b = 0$. Експериментальні дослідження та практика експлуатації вібраційних електродвигунів дає змогу ввести до розгляду залежність моменту опору $M_C(t)$ рухові веденої системи двигуна як функцію її швидкості руху. За умови, що за робочого ходу вібратора $j_b^* = j$, отримаємо $M_C(t) = I_C j$, а за неробочого ходу вібратора $j_b = j_b^*$ $M_C(t) = I_C j_b^*$. Тут I_C – коефіцієнт опору рухові веденої системи. Конструктивно маятникові вібратори виконуються як однокітні з двома тяговими електромагнітними котушками робочого та неробочого ходу. Амплітуди коливань вібратора за робочого та неробочого ходів є доволі малими, щоб покласти в рівняннях моделі (1) $\sin j \approx j$, а $\cos j \approx 1$. З врахуванням викладеного введемо позначення

$$(I + I_b f(t)) = I'; \quad (I + I_C f(t)) = I''; \quad (ca^2 - mgl) = c' \quad (2)$$

та перетворимо модель (1) до вигляду:

$$I' j'' + I'' j'' + c' j = \frac{l_M}{2m_b S_j} F_j^2; \quad (3.1)$$

$$F_j = \frac{m_b w_j(i_j) S_j}{(l_{0j} - l_{Mj})}; \quad (3.2)$$

$$\left[w_j \frac{dF_j}{dt} + i_j R_j - u_j(t) \right] s_j(t) = 0; \quad (3.3)$$

$$[I_b j_b'' + I_C j_b''] s(f(t)) = 0. \quad (3.4)$$

Модель (3) є спрощеною інженерною моделлю динаміки двигуна з маятниковим вібратором та МВХ та розглядається як основа методики розрахунку електромагнітів вібратора. Фактично модель (3) дає змогу зводити розрахунок маятникового вібратора до відомого розрахунку однокітного електромагнітного вібратора без підмагнічування [4, 5, 6]. Для цього вважатимемо, що маятниковий вібратор містить в собі два однокітні електромагніти, один з яких ($j=1$) працює за робочого ходу, а другий ($j=2$) працює за неробочого ходу вібратора (рисунок). Для розроблення методики розрахунку електромагнітів вібратора використаємо сумісний розв'язок рівнянь (3.1), (3.2), (3.3) моделі (3) методом гармонічного балансу. Розв'язок рівнянь (3.1), (3.3) шукатимемо у вигляді:

$$i_j = I_j \sin(kt - g_j), \quad (4)$$

$$j = A_j \sin(kt - g_j).$$

Рівняння (3.3) шляхом інтегрування приводимо до вигляду

$$R_j \int i_j dt = u_0 \int \sin ktdt - w_j F_j + E_j, \quad (5)$$

де E_j – стала інтегрування, яка в нашому випадку $E_j = 0$. Використовуючи рівняння (3.2), співвідношення (5) перетворимо до вигляду:

$$R_j \int i_j dt = -\frac{u_0}{k} \cos kt - \frac{m_b w_j^2 S_j}{(l_{0j} - l_{Mj})} i_j. \quad (6)$$

Підставляючи в цей вираз співвідношення (4), отримаємо:

$$-R_j \frac{I_j}{k} \cos(kt - g_j) = -\frac{u_0}{k} \cos kt - \frac{m_b w_j^2 S_j I_j \sin(kt - g_j)}{\left[l_{0j} - l_M A \sin(kt - g_j) \right]} \quad (7)$$

або

$$\begin{aligned} -l_{0j} R_j \frac{I_j}{k} \cos(kt - g_j) + l_M A_j R_j \frac{I_j}{k} \cos(kt - g_j) \sin(kt - g_j) = \\ = -\frac{u_0}{k} l_{0j} \cos kt + l_M A_j \frac{u_0}{k} \sin(kt - g_j) \cos kt - m_b k w_j^2 S_j I_j \sin(kt - g_j). \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (7) розпадається на два, що є результатом балансу коефіцієнтів за $\sin(kt - g_j)$ та $\cos(kt - g_j)$:

$$\begin{aligned} -l_{0j} R_j \frac{I_j}{k} \cos g_j + \left(\cos(2g_j) - \sin(2g_j) \right) \frac{1}{2} l_M A_j R_j \frac{I_j}{k} + \frac{u_0}{k} l_{0j} - \\ - \left(\sin g_j + \frac{1}{2} \cos g_j \right) l_M A_j \frac{u_0}{k} + m_b k w_j^2 S_j I_j \sin g_j = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} -l_{0j} R_j \frac{I_j}{k} \sin g_j - \frac{1}{2} l_M A_j R_j \frac{I_j}{k} \left(\sin(2g_j) + \cos(2g_j) \right) + \\ + \frac{1}{2} l_M A_j \frac{u_0}{k} \cos g_j - m_b k w_j^2 S_j I_j \cos g_j = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Для операцій з рівнянням (3.1) подамо рівняння (5) у вигляді:

$$F_j = \left[R_j I_j \cos(kt - g_j) - \frac{u_0}{k} \cos kt \right] \frac{1}{w_j k}. \quad (11)$$

Підставляючи цей вираз і співвідношення (4) у рівняння (11), отримаємо:

$$\begin{aligned} I' A_j k^2 \sin(kt - g_j) + I' A_j k \cos(kt - g_j) + c' A_j \sin(kt - g_j) = \\ = \frac{l_M}{2 m_b S_j w_j^2 k^2} \left[R_j I_j \cos(kt - g_j) - \frac{u_0}{k} \cos kt \right]^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Знову скористаємось балансом коефіцієнтів за $\sin(kt - g_j)$ та $\cos(kt - g_j)$ в рівнянні (12) і як його результати запишемо рівняння вигляду:

$$\begin{aligned} \left(-I' A_j k^2 + I' A_j k + c' A_j \right) \cos g_j = \frac{l_M R_j I_j \sin(2g_j)}{2 m_b S_j w_j^2 k^2} + \\ + \left(\frac{l_M R_j I_j u_0}{m_b S_j w_j^2 k^3} + \frac{l_M R_j I_j}{2 m_b S_j w_j^2 k^2} \right) \sin g_j; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{l_M R_j I_j \sin(2g_j)}{2 m_b S_j w_j^2 k^2} - c' A_j - \frac{l_M R_j I_j u_0}{m_b S_j w_j^2 k^3} \right) \sin g_j + \left(I' A_j k + \frac{l_M R_j I_j u_0}{m_b S_j w_j^2 k^3} \right) \cos g_j = \\ = \frac{l_M R_j I_j}{2 m_b S_j w_j^2 k} \cos^2 g_j + \frac{l_M u_0^2}{2 m_b S_j w_j^2 k^4} + \frac{l_M R_j I_j}{2 m_b S_j w_j^2 k^2} \sin(2g_j). \end{aligned} \quad (14)$$

Отже, отримані чотири рівняння (9), (10), (13), (14), які пов'язують геометрично масові параметри вібраційного електродвигуна з параметрами розв'язку.

Отримані рівняння доволі складні за своєю структурою і важко піддаються безпосередньому аналізу. Однак система рівнянь (9), (10), (13), (14) доволі просто використовується в синтезі вібраційних електродвигунів з маятниковими вібраторами. Нехай необхідно забезпечити коливання маятникового вібратора з кутовою амплітудою A_j та частотою коливань k . Приведена жорсткість c' пружної системи маятникового вібратора вібраційного електродвигуна приймається з умови забезпечення дорезонансного режиму коливань вібратора. Задаються габаритні розміри сердечників електромагнітів і площі S_j . Величина статичного зазора l_{0j} обирається, враховуючи рівень його використання і переважно приймається в межах:

$$l_{0j} = (1,7 \div 1,8) A_j l_M. \quad (15)$$

Амплітудна напруга мережі живлення u_0 вважається відомою. Активний опір R_j електричної мережі задають одним з двох способів:

вважають його сталим і таким, що не залежить від кількості витків w_j ;

вважають опір R_j лінійно пропорційним до кількості витків w_j з деяким коефіцієнтом пропорційності.

Шуканими величинами за синтезу вважаємо струм I_j , кут зсуву фаз g_j , кількість витків котушки w_j і величину залишкового зазора $(l_{0j} - A_j l_M)$. За величиною діючого значення струму I_j вибирають та перевіряють поперечний переріз обмотки котушок електромагніту.

Висновок. Запропонована методика розрахунку електромагніту маятникового вібратора двигуна доволі проста і, як показує практика її використання, може бути рекомендована для ескізного проектування вібраційних двигунів за вибору їх вихідних характеристик для подальшого проектування та дослідження динаміки з метою обчислення механічних характеристик.

1. *Баланс энергий в электрических цепях / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др.; отв. ред. И.В. Волков; АН Украины. Ин-т проблем энергосбережения. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.* 2. *Величко Ю.Т. Анализ напряжений, токов и мощностей в линейном многополюснике // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1969. – XII, №8. – С. 767 – 768.* 3. *Бучковский И.А. Инвариантность мощности многополюсника // Изв. вузов. Энергетика. – 1977. – №9. – С. 125 – 128.* 4. *Левин Л.П. – В кн.: Применение вибротехники в горном деле. – М.–Л.: Госгортехиздат, 1960.* 5. *Крюков Б.И. Динамика вибрионных машин резонансного типа. – К.: Наук. думка, 1967. – 210 с.* 6. *Taniguchi O., Sakata M., Suzuki M. – Bull. ASME, 1960.* 7. *Білоус Б.Д., Мандзюк М.Ф., Петрушевський Р.П. Модель динаміки вібраційного двигуна та механізму вільного ходу за кінетичного збурення / Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”. – Вінниця, 2011. – №1(61). – С. 6–8.*