

УДК 621.876

Б.Гладьо

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ДИНАМІКА ЗАПУСКУ МАШИНИ ПРИ НАЯВНОСТІ ПЕРЕДЗАПУСКОВИХ ЩАБЛІВ

Визначаються динамічні навантаження, що виникають у попередньо затягнутій пружній ланці при розгоні машини, обладнаної двигуном постійного струму незалежного збудження. Рух двомасової системи з рівномірно розподіленою масою пружної ланки описується хвилюватим рівнянням, розв'язок якого отримуємо за методом Фур'є. Враховується рівняння в.р.с. в колі якоря двигуна.

У багатьох випадках при розгоні машин з електричним приводом використовуються пускові реостати, обладнані передпусковими (попередніми, проміжними) щаблями. На рис. 1 подане графічне зображення реостатного пуску при наявності передпускових щаблів 1, 2 і 3.

Один із щаблів відповідає статичному моменту опору M_0 , тобто моменту, який повинен розвинути двигун при усталеному русі. На щаблях 1 та 3 момент двигуна є менш або більш статичним. Щабель 1 забезпечує попередній натяг механізмів машини та вибір лофтів, щабель 3 використовується при рухові машини з малою "пливною швидкістю".

Як розрахункову схему використаємо двомасову систему з рівномірно розподіленою масою пружної ланки (рис. 2).

Припустимо, що використаємо щабель 1 характеристики, і до початку руху, частина моменту опору, а саме $(1 - \Theta)M_o$, сприймається пружною лапкою, а інша частина ΘM_o - опорою. Наприклад, під час піднімання вантажу з основи при послабленому канаті вантажопідіймальної машини частину вантажу прийматиме канат, а іншу - основа. Величина Θ може змінюватися від нуля до одиниці.

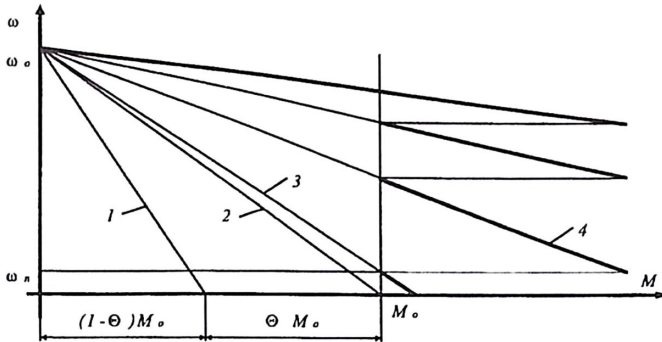


Рис. 1.

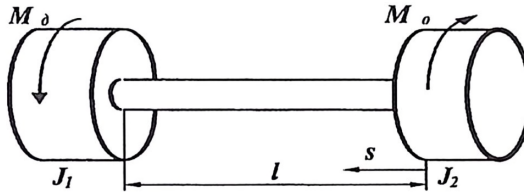


Рис. 2.

Процес розгону системи складається з двох періодів: перший - від початку руху маси J_1 до моменту відриву маси J_2 від опори, і другий період - після відриву маси J_2 від опори, тобто рух власне двомасової системи.

Розгляньмо перший період руху системи. Процес розгону починається увімкненням першої передпускової характеристики (крива 1, рис. 1). Для встановлення статичної рівноваги у механічній та електричній системах машина перебуває у такому стані певний час. Таким чином, частину моменту опору $M'_o = (1 - \Theta)M_o$ прийматиме загальмований двигун $M_{\text{пов}} = k_m I_{\text{пов}}$, а решта ΘM_o передається на опору.

Після увімкнення характеристики 2 надлишковий момент двигуна, прикладений до маси J_1 , дорівнюватиме:

$$M_{\text{над}} = k_m I - M'_o,$$

де I - сила струму якоря, $I_{\text{пов}}$ - початкове значення струму, яке відповідає характеристикі 1, k_m - коефіцієнт пропорційності.

Рух системи описується хвильовим рівнянням, яке розв'язується за методом Фур'є в узагальнених координатах [1]. У результаті для першого періоду руху отримуємо рівняння, перше з яких описує рух механічної системи, а друге - рівняння е.р.с. у колі якоря двигуна постійного струму незалежного збудження:

$$\ddot{q}_n + \mu_n^2 q_n = \lambda_n (k_m I - M'_o) X_n(l); \quad (1)$$

$$U = k_e \dot{q}_n X_n(l) + IR + L \frac{dI}{dt}, \quad (2)$$

$$\text{де} \quad \lambda = \frac{4\gamma_n K_n}{\rho l \sin \gamma_n} \quad (3)$$

У цих рівняннях q_n - узагальнена координата, яка залежить тільки від часу і описує рух елементарної ділянки пружної ланки у відносному русі;

$$\mu_n = \alpha \gamma_n / l,$$

де a - швидкість поширення пружної хвилі;

γ_n - власні числа системи, які визначаються з трансцендентного рівняння

$$\gamma_n \tan \gamma_n = \frac{1}{\alpha_1}, \quad (4)$$

де $\alpha_1 = J_1 / \rho l$ (ρ - маса одиниці довжини пружної ланки, l - довжина пружної ланки),

$$K_n = \frac{\sin \gamma_n}{2\gamma_n + \sin 2\gamma_n}; \quad (5)$$

$X_n(l) = \sin \gamma_n$ - значення власної функції системи (рис. 2) при $s=l$; U - напруга мережі; k_e - коефіцієнт пропорційності між с.р.с. двигуна і швидкістю обертання якоря; R - опір, що відповідає характеристиці 2 (рис. 1); L - індуктивність обмотки якоря; $T = L/R$ - електромагнітна постійна часу.

Перетворюючи систему рівнянь (1) і (2), отримаємо рівняння третього порядку:

$$\ddot{q}_n + \frac{1}{T} \dot{q}_n + \left(\mu_n^2 + \frac{\lambda_n k_e k_m X_n^2(l)}{TR} \right) \dot{q}_n + \frac{\mu_n^2}{T} q_n = \frac{\lambda_n X_n(l)}{TR} (Uk_m - M'_o R). \quad (6)$$

Характеристичне рівняння, складене за (6), дає один дійсний від'ємний корінь r_{1n} і два комплексно-спряжених корені $r_{2n} \pm z_n i$.

Розв'язком рівняння (6) буде:

$$q_n(t) = A_{1n} e^{r_{1n} t} + e^{r_{2n} t} (A_{2n} \cos z_n t + A_{3n} \sin z_n t) + A_{4n}. \quad (7)$$

Частинний розв'язок A_{4n} дорівнюватиме:

$$A_{4n} = \frac{\lambda_n X_n(l)}{\mu_n^2 R} (Uk_n - M'_o R). \quad (8)$$

Для визначення постійних інтегрування A_{1n} , A_{2n} і A_{3n} виберемо початкові умови, у яких перебувала система перед увімкненням шабля 2, тобто при $t = 0$,

$$q_n(0) = 0; \quad \dot{q}_n(0) = 0; \quad \ddot{q}_n(0) = 0. \quad (9)$$

Вимушені відносні переміщення перерізів системи [1]:

$$u(s, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n X_n(s). \quad (10)$$

Швидкість переміщення січень:

$$\omega(s, t) = \frac{\partial u(s, t)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{dq_n(t)}{dt} X_n(s). \quad (11)$$

Момент, який виникає в січеннях пружної ланки:

$$M_{np}(s, t) = c \frac{\partial u(s, t)}{\partial s} = c \sum_{n=1}^{\infty} q_n \dot{X}_n(s) \quad (12)$$

Перший період закінчується і відповідно настане початок другого тоді, коли момент у пружній ланці при $s = 0$ дорівнюватиме ΘM_o .

Час t_0 , який відповідає початкові руху другої маси, можна визначити за першим членом ряду, використовуючи (7) і (12).

Стан системи в момент $t=t_0$ визначимо величиною відносних переміщень січень і їх швидкістю за формулами (10) і (11):

$$u(s, t_0) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin \frac{\gamma_n}{l} s, \quad (13)$$

$$\omega(s, t_0) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin \frac{\gamma_n}{l} s, \quad (14)$$

де:

$$D_n = A_{1n} e^{\gamma_n t_0} + e^{\gamma_n t_0} (A_{2n} \cos z_n t_0 + A_{3n} \sin z_n t_0) + A_{4n};$$

$$E_n = A_{1n} r_{1n} e^{\gamma_n t_0} + e^{\gamma_n t_0} [(A_{2n} r_{2n} + A_{3n} z_n) \cos z_n t_0 + (A_{3n} r_{2n} - A_{2n} z_n) \sin z_n t_0]$$

Тепер початкові умови для другого періоду будуть при $t=0$:

$$\psi(s) = u(s, t_0) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin \frac{\gamma_n}{l} s - \frac{\Theta M_o}{c} s; \quad (15)$$

$$\varphi(s) = \left[\frac{\partial u(s, t)}{\partial t} \right]_{t=t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin \frac{\gamma_n}{l} s. \quad (16)$$

Динамічні навантаження у пружній ланці у другому періоді від власних коливань визначимо за формулою [1]:

$$M_{\text{вн}}^{\text{в}}(s, t) = c \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\dot{S}_n(s)}{W_n} (B_{1n} \sin v_n t + B_{2n} \cos v_n t), \quad (17)$$

де:

$$B_{1n} = \frac{1}{v_n} \int_0^l \frac{d\varphi(s)}{ds} \dot{S}_n(s) ds; \quad (18)$$

$$B_{2n} = \int_0^l \frac{d\psi(s)}{ds} \dot{S}_n(s) ds; \quad (19)$$

v_n - частота власних коливань системи.

Підставимо (15) і (16) у (18) і (19), після чого отримаємо:

$$B_{1n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_n \gamma_n}{l v_n} \int_0^l \dot{S}_n(s) \cos \frac{\gamma_n}{l} s ds; \quad (20)$$

$$B_{2n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_n \gamma_n}{l} \int_0^l \dot{S}_n(s) \cos \frac{\gamma_n}{l} s ds \quad (21)$$

Інтегруючи (20) і (21), остаточно отримаємо, з урахуванням першого члена ряду:

$$B_1 = \frac{E_1 \gamma_1 \beta_1}{2 l v_1} \xi_1; \quad (22)$$

$$B_2 = \frac{d_1 \gamma_1 \beta_1}{2 l} \xi_1 + \frac{\Theta M_o}{c} (1 - \cos \beta_1 + \alpha_2 \beta_1 \sin \beta_1), \quad (23)$$

де

$$\xi_1 = \frac{\cos(\beta_1 + \gamma_1) - 1}{\beta_1 + \gamma_1} + \frac{\cos(\beta_1 - \gamma_1) - 1}{\beta_1 - \gamma_1} - \alpha_2 \beta_1 \left[\frac{\sin(\beta_1 + \gamma_1)}{\beta_1 + \gamma_1} + \frac{\sin(\beta_1 - \gamma_1)}{\beta_1 - \gamma_1} \right]. \quad (24)$$

Тепер динамічні навантаження від власних коливань при $s=l$ дорівнюватимуть:

$$M_{\text{дин}}^{\text{ст}}(l, t) = \frac{c\dot{S}_1(l)}{W_1} (B_1 \sin v_1 t + B_2 \cos v_1 t) \quad (25)$$

Максимум динамічного навантаження визначимо за формулою:

$$M_{\text{дин}}^{\text{ст}}(l, t_{\text{max}}) = \frac{c\dot{S}_1(l)}{W_1} \sqrt{B_1^2 + B_2^2}. \quad (26)$$

Розглянуте дослідження дозволяє точніше визначити динамічні навантаження при розгоні машини, обладнаної електричним приводом.

Dynamic loadings appearing in preliminary tightened spring link in accelerating machine equipped with the direct current engine of separate excitation are determined. The movement of two-mass system with uniformly distributed spring link mass is described with the help of the wave equation solved by Fourier method. E.M.F. equation in armature circle is considered.

Література.

1. Столярчук В.Ф. Динамика вертикального подъема. – Львов, 1965. – 151 с.

Статтю подав до друку докт. техн. наук, проф. Рибак Т.І.