

Ловейкін В'ячеслав Сергійович, доктор технічних наук, професор

Народився 14 квітня 1950 року в с. Велика Левада Городоцького району Хмельницької області. Навчався в Київському інженерно-будівельному інституті, який закінчив з відзнакою в 1972 р. за спеціальністю “Будівельні машини та обладнання”. Працював на виробництві, а з 1976 р. до теперішнього часу науковий співробітник і викладач Київського національного університету будівництва і архітектури. Автор трьох монографій, підручника, шести навчальних посібників та біля трьохсот наукових статей та патентів на винаходи

УДК 621.01

КРИТЕРІЇ СИНТЕЗУ РЕЖИМІВ РУХУ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН

Для оцінки динамічної досконалості механічних систем на основі фундаментального поняття дії [1] запропоновані інтегральні критерії [2-5], які представлені одиничними критеріями в формі критеріальних і питомих дій [2], безрозмірних питомих дій [3], розширеного набору коефіцієнтів корисної дії [4] та комплексними безрозмірними критеріями [5]. В роботі [5] на основі запропонованих критеріїв розроблена методика оптимізації режимів руху механізмів і машин, яка дозволяє вибирати режими, що забезпечують найменші енергетичні витрати та зводять до мінімуму дію динамічних навантажень [6]. Однак в запропонованих критеріях враховуються тільки динамічні властивості механізму або машини і не враховуються характеристики сил опору, що діють на окремі ланки. В той же час дія цих сил на режими руху механізмів і машин має значний вплив.

Тому метою цієї роботи є розробка критеріїв оцінки режимів руху механізмів і машин з урахуванням їхніх динамічних властивостей та сил опору, що діють на окремі ланки.

Режими руху механізмів і машин являють собою функціональні залежності переміщень, швидкостей та прискорень різних порядків окремих точок і ланок від просторового та часового аргументів протягом усього циклу руху механізму і машини, тому критерій оптимальності приймається у вигляді інтегрального функціоналу в формі дії. Крім того, процедура порівняння припустимих режимів руху можлива тільки в тому випадку, коли критерій має вигляд скалярної величини і для кожного режиму приймає конкретне число. У процесі руху механізмів і машин функціональні залежності режимів руху та діючих сил в конкретні моменти часу можуть приймати як додатні, так і від’ємні значення, тому у вирази підінтегральних функцій вони повинні входити в квадратичному вигляді.

Усім перерахованим вимогам до критеріїв оцінки якості режимів руху механізмів і машин відповідає структура критерію у вигляді дії

$$I_n = \int_{t_0}^{t_1} F_n(t, q_k, \dot{q}_k, \dots, q_k^{(n)}, Q_k, \dot{Q}_k, \dots, Q_k^{(n-2)}, a_r) dt, \quad (1)$$

де t – час; t_0, t_1 – початковий і кінцевий моменти часу закінченого циклу руху механізму або машини; F_n – функція “енергії” прискорень $(n-1)$ -го порядку машини чи її

механізму; $q_k, \dot{q}_k, \dots, q_k^{(n)} - k - a (k=1,2,\dots,s)$ узагальнена координата системи та її похідні включно до (n) -го порядку; $Q_k, \dot{Q}_k, \dots, Q_k^{(n-2)}$ – складові узагальнених сил, що враховують сили опору і відповідають узагальненим координатам q_k та їхні похідні включно до $(n-2)$ -го порядку; s – кількість узагальнених координат; a_r -й $(r=1,2,\dots,l)$ конструктивний параметр машини чи механізму, що впливає на режим їхнього руху; l – кількість конструктивних параметрів.

Назву “енергія” прискорень [1] взято за аналогією із записом кінетичної енергії, але вона є цілком умовною і не відповідає відомому поняттю енергії. У функції F_n за аналогією з кінетичною енергією замість швидкостей використовуються умовні прискорення різних порядків, які складаються з суми дійсного та уявного прискорення. Під уявним прискоренням розуміємо прискорення, яке стіснене силами опору, тобто таке прискорення, яке могла б мати система, якби сили опору були б відсутніми, а рушійні сили були б такими, що долають ці сили опору.

Для випадку, коли $F_n=1$, одержуємо критерій у вигляді часу руху, який використовується для розв’язку задач оптимального керування рухом механізмів на максимальну швидкодію, що приводить до підвищення продуктивності. Якщо $n=1$, то функція $F_n=F_1$ являє собою енергетичну функцію, яка складається з кінетичної енергії дійсного руху та енергії уявного руху, що йде на подолання сил опору. В цьому випадку критерій (1) оцінює енергетичні витрати для створення руху з урахуванням його тривалості. При $n=2$ функція $F_n=F_2$ відповідає “енергії” прискорень першого порядку, в яку входять складові дійсного та уявного прискорень. Для функції F_2 критерій (1) відображає ефективну потужність системи для здійснення руху при наявності сил опору. При $n=3$ функція $F_n=F_3$ являє собою “енергію” прискорень другого порядку або “енергію” ривків з урахуванням дійсного та уявного рухів. В цьому випадку критерій (1) оцінює дію статичних і динамічних навантажень, зважених по ривках окремих ланок системи. Оцінка режимів руху може бути здійснена шляхом використання критерію (1) з підінтегральними функціями у вигляді “енергії” прискорень більш високих порядків (третього, четвертого тощо) дійсного та уявного рухів. Такі критерії використовуються при виборі режимів руху механізмів і машин з урахуванням пружних властивостей ланок. Це дає можливість досягти неперервності швидкостей та прискорень ланок системи, що приводить до значного зменшення їхніх коливань. Аналіз режимів руху механізмів і машин з основною координатою руху та s пружними координатами дозволив встановити закономірність використання запропонованих критеріїв для мінімізації пружних коливань всієї системи. Згідно цієї закономірності критерії синтезу режимів руху повинні включати в себе “енергію” прискорень основного до $2s$ -го порядку. Кожний з розглянутих критеріїв оцінює окремі властивості механізму або машини. Для синтезу режимів руху за декількома критеріями одночасно можна використати комплексний критерій, який включає в себе окремі критерії, наприклад, у вигляді лінійної згортки [5].

Наведені критерії являють собою інтегральні функціонали, що відображають небажані властивості системи, тому підлягають мінімізації в процесі синтезу режимів руху. Мінімум критерію (1) досягається на функціях $q_k(t)$, які є розв’язком рівняння Пуассона

$$\frac{\partial F_n}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F_n}{\partial \dot{q}_k} + \dots = (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial F_n}{\partial q_k^{(n)}} = 0, k=1,2,\dots,s. \quad (2)$$

Покажемо використання запропонованих критеріїв для оптимального синтезу режимів руху технологічної машини з одним приводним механізмом, представленою механічною системою з одним ступенем вільності та абсолютно твердими ланками, до яких прикладені сили технологічного опору, сили тяжіння ланок та сили тертя в



кінематичних парax. За узагальнену координату такої механічної системи прийемо кутову координату ротора приводного двигуна φ . Зведемо до ротора двигуна маси ланок зі зведеним моментом інерції J_0 та всі діючі сили зі зведеним моментом сил опору M_0 . В загальному випадку зведений момент інерції є функцією узагальненої координати, тобто $J_0 = J_0(\varphi)$, а зведений момент сил опору – часу t , координати φ та швидкості $\dot{\varphi}$, тобто $M_0 = M_0(t, \varphi, \dot{\varphi})$. Розглянемо випадок, коли $J_0 = \text{const}$, а $M_0 = M_c + \mu\dot{\varphi}$. Тут $M_c, \mu\dot{\varphi}$ – стала та зміна складові зведеного моменту сил опору, а μ – коефіцієнт пропорційності.

Для розглянутого зведеного механізму визначимо оптимальні режими пуску за критерієм (1) при різних значеннях n .

При $n = 1$ підінтегральна функція критерію (1) має вигляд

$$F_1 = \frac{1}{2} J_0 (\dot{\varphi} + \dot{\varphi}^*)^2 = \frac{1}{2} J_0 \left(\dot{\varphi} + \frac{d^{-1} M_0}{dt^{-1}} \right)^2 = \frac{1}{2} J_0 \left(\dot{\varphi} + \frac{M_c t + \mu \varphi}{J_0} \right)^2, \quad (3)$$

де $\dot{\varphi}, \dot{\varphi}^*$ – дійсна та уявна швидкість ротора приводного двигуна; d^{-1} / dt^{-1} – символ першого інтегралу по часу, який записано в формі диференціювання з показником степені -1 .

Підставивши залежність (3) в рівняння (2), отримуємо умову мінімуму критерію (1), що відображає витрати енергії-часу на процес пуску

$$\ddot{\varphi} - k^2 \varphi = k^2 v t - k v,$$

де $k = \mu / J_0$; $v = M_c / \mu$.

В результаті розв'язку цього рівняння, маємо:

$$\varphi = A_1 e^{kt} + A_2 e^{-kt} + v/k - vt; \quad \dot{\varphi} = k(A_1 e^{kt} - A_2 e^{-kt}) - v; \quad \ddot{\varphi} = k^2(A_1 e^{kt} + A_2 e^{-kt}). \quad (4)$$

Тут A_1, A_2 – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов процесу пуску: $t = 0, \dot{\varphi} = 0$; $t = t_1, \dot{\varphi} = \omega_c$; t_1 – тривалість процесу пуску; ω_c – кутова швидкість усталеного руху ротора двигуна. Для цих крайових умов постійні інтегрування визначаються залежностями:

$$A_1 = A_2 + \frac{v}{k}; \quad A_2 = \frac{\omega_c - v e^{kt_1}}{k(e^{kt_1} - e^{-kt_1})}. \quad (5)$$

Кінематичні характеристики ротора двигуна (4) з урахуванням залежностей (5) забезпечують оптимальний енергетичний режим пуску приводного механізму технологічної машини, в якій сили опору змінюються за лінійним законом відносно швидкості руху.

При $n = 2$ підінтегральна функція критерію (1) визначається залежністю

$$F_2 = \frac{1}{2} J_0 (\ddot{\varphi} + \ddot{\varphi}^*)^2 = \frac{1}{2} J_0 \left(\ddot{\varphi} + \frac{M_c + \mu \dot{\varphi}}{J_0} \right)^2, \quad (6)$$

де $\ddot{\varphi}, \ddot{\varphi}^*$ – дійсне та уявне прискорення ротора приводного двигуна. Після підстановки виразу (6) в рівняння (3), отримуємо умову мінімуму критерію (1), що відображає потужність, необхідну для процесу пуску $\varphi^{IV} - k^2 \ddot{\varphi} = 0$. Розв'язок цього рівняння для крайових умов процесу пуску: $t = 0, \varphi = \dot{\varphi} = 0$;

$t = t_1, \dot{\varphi} = \omega_c, \ddot{\varphi} = 0$ має вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi &= B_1 + B_2 t + B_3 e^{kt} + B_4 e^{-kt}; & \dot{\varphi} &= B_2 + k(B_3 e^{kt} - B_4 e^{-kt}); \\ \ddot{\varphi} &= k^2(B_3 e^{kt} - B_4 e^{-kt}). \end{aligned} \quad (7)$$

Тут $B_1 = B_3 - B_4$; $B_2 = k(B_4 - B_3)$; $B_3 = -B_4 e^{-2kt_1}$;

$$B_4 = -\omega_c / (k(e^{kt_1} - 1)(e^{-2kt_1} + 1)). \quad (8)$$

Залежності (7) з урахуванням виразів (8) являють собою кінематичні характеристики ротора двигуна, що забезпечують оптимальний потужнісний режим пуску приводного механізму.

При $n = 3$ підінтегральна функція критерію (1) набуває виразу

$$F_3 = \frac{1}{2} J_0 (\ddot{\varphi} + \ddot{\varphi}^*)^2 = \frac{1}{2} J_0 \left(\ddot{\varphi} + \frac{\mu}{J_0} \dot{\varphi} \right)^2, \quad (9)$$

де $\ddot{\varphi}, \ddot{\varphi}^*$ - дійсний та уявний ривок (швидкість зміни прискорення) ротора приводного двигуна. В результаті підстановки залежності (9) в рівняння (2), будемо мати умову мінімуму критерію (1), що відображає дію динамічних навантажень зважених за ривками $\varphi^{VI} - k^2 \varphi^{IV} = 0$. Загальний розв'язок отриманого рівняння виражається залежностями:

$$\begin{aligned} \varphi &= C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 e^{kt} + C_6 e^{-kt}; \\ \dot{\varphi} &= C_2 + 2C_3 t + 3C_4 t^2 + k(C_5 e^{kt} - C_6 e^{-kt}); \\ \ddot{\varphi} &= 2C_3 + 6C_4 t + k^2(C_5 e^{kt} + C_6 e^{-kt}), \end{aligned} \quad (10)$$

де C_1, C_2, \dots, C_6 - постійні інтегрування, які для крайових умов руху на ділянці пуску $t = 0, \varphi = \dot{\varphi} = \ddot{\varphi} = 0$ та $t = t_1, \dot{\varphi} = \omega_c, \ddot{\varphi} = \ddot{\varphi} = 0$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} C_1 &= -C_5 - C_6; \quad C_2 = k(C_6 - C_5); \quad C_3 = -k^2(C_5 + C_6)/2; \\ C_4 &= -\frac{k^3}{6}(C_5 e^{kt_1} - C_6 e^{-kt_1}); \quad C_5 = C_6 \frac{1 - e^{-kt_1}(1 + kt_1)}{e^{kt_1}(1 - kt_1) - 1}; \\ C_6 &= \frac{\omega_c}{k} \left/ \left\{ \frac{1 - e^{-kt_1}(1 + kt_1)}{e^{kt_1}(1 - kt_1) - 1} \left[e^{kt_1} - 1 - kt_1 \left(\frac{kt_1}{2} + 1 \right) \right] + 1 - e^{-kt_1} + kt_1 \left(\frac{kt_1}{2} - 1 \right) \right\} \right. \end{aligned} \quad (11)$$

Кінематичні характеристики (10) разом з залежностями (11) забезпечують оптимальний ривковий режим пуску, який мінімізує пружні коливання ланок механізму або машини.

Для одномасової динамічної моделі машини з параметрами: $J_0 = 4,0 \text{ кг.м}^2$; $M_c = 200 \text{ Н.м}$; $\mu = 2,0 \text{ Н.м/(рад/с)}$; $\omega_c = 100 \text{ рад/с}$; $t_1 = 4 \text{ с}$ визначено оптимальні енергетичний, потужнісний та ривковий режими пуску.

Запропоновані критерії є найбільш загальними динамічними критеріями удосконалення механізмів і машин та їхніх режимів руху. Вони універсальні в тому розумінні, що містять у собі геометрію мас, кінематичні характеристики руху, конструктивні параметри системи, діючі сили та відображають її динаміку.

Література

1. Кильчевский Н.А. Курс теоретической механики, т.2.- М., 1977. - 544 с.
2. Горский Б.Е. Динамическое совершенствование механических систем. - К., 1987. - 200 с.
3. Горский Б.Е., Ловейкин В.С. Критерии динамического совершенствования механических систем // Теория машин металлургического и горного оборудования.- Свердловск, 1989.- Вып. 13.- С. 98-102.
4. Горский Б.Е., Ловейкин В.С. Расширение понятия коэффициента полезного действия на все удельные действия // Динамика и прочность тяжелых машин.- Днепропетровск, 1982.- Вып. 6.- С. 13-20.
5. Ловейкин В.С. Оптимизация режимов движения механизмов и машин // Теория механизмов и машин. - Харьков, 1990.- Вып. 49.- С. 3-11.
6. Ловейкин В.С., Нестеров А.П. Динамічна оптимізація підйомних машин. - Харків: ХНАДУ, 2002.- 291 с.



7. *Ловейкин В.С.* Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. – К.: УМК МВО Украины, 1990. – 166 с.
8. *Ловейкин В.С.* Оптимизация режимов движения манипуляционных систем роботов по комплексному критерию. – М.: Машиностроение, 1988. – № 2. – С. 9-13.
9. *Ловейкин В.С.* Оптимизация режимов движения роботов и манипуляторов // Теоретична и приложена механіка. – Софія, 1990. – С. 313-317.
10. *Ловейкин В.С.* Управление производительностью механизмов подъемно-транспортных машин // Подъемно-транспортное оборудование. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1991. – Вып. 22. – С. 19-24.
11. *Ловейкін В.С., Ловейкін А.В.* Синтез оптимального за швидкодією режиму повороту екскаватора // Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. – К.: КДТУБА, 1996. Вип. 50. – С. 17-21.
12. *Ловейкін В.С.* Синтез оптимальних режимів руху приводних механізмів машин // Зб. наукових праць НАУ. – К.: НАУ, 1997. – С. 47-51.
13. *Григоров О.В., Ловейкін В.С.* Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідйомних машин. Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1997. – 264 с.
14. *Ловейкін В.С.* Критерії оцінки режимів руху механізмів і машин // Зб. наукових праць НАУ. – К.: НАУ, 1998. – С. 8-12.
15. *Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г.* Теорія технічних систем. Навч. посібник. – К.-Полтава: ПДТУ, 1998. – 200 с.
16. *Ловейкін В.С., Нестеров А.П.* Синтез оптимальних режимів руху механічних систем // Доповіді НАН України, 1997. – № 7. – С. 14-21.
17. *Ловейкін В.С.* Оптимізація режимів руху машин і механізмів // Машинознавство, 1999. – № 7. – С. 24-31.
18. *Ловейкін В.С.* Синтез оптимальних режимів руху механізмів і машин у перехідних процесах // Машинознавство, 2001. – № 8(50). – С. 17-20.
19. *Ловейкін В.С.* Якість машин. – К.: КНУБА, 2001. – 102 с.
20. *Городжа А.Д., Лемешко В.О., Ловейкін В.С.* Матеріалознавство та електротехнічні матеріали. Підручник. – К.: КНУБА. – 2002. – 280 с.
21. *Ловейкин В.С., Нестеров А.П.* Динамическая оптимизация подъемных машин. Монография. – Луганск: Изд-во СНУ, 2002. – 368 с.
22. *Бондаренко Л.М., Довбня М.П., Ловейкін В.С.* Деформаційні опори в машинах. Монографія / За ред. В.С. Ловейкіна. – Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-VAL”, 2002. – 200 с.
23. *Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В.* Методи оптимізації режимів руху машин і механізмів // Сб. научных трудов ХНАДУ “Автомобильный транспорт”. Совершенствование машин для земляных и дорожных работ. – Харьков, 2003. – Вып. 11. – С. 55-61.
24. *Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г., Пастушенко С.І.* Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин. Монографія.- К.- Миколаїв: Вид.-во РВВ МДАУ, 2004.- 286 с.
25. *Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г.* Синтез режимів руху механізмів вантажопідйомних машин за прискореннями вищих порядків на початковій стадії проектування// Зб. наукових праць ПНТУ ім. Юрія Кондратюка "Галузеве машинобудування і будівництво",- Полтава, 2005.- Вип.16.- С.126-130.
26. *Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В.* Застосування класичних методів варіаційного числення у створенні ієрархії комплексних динамічних критеріїв оцінки механізмів і машин // Вібрації в техніці та технологіях, 2004.- № 2(34).- С.6-11.