

12.ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛОГО РУХУ МЕХАНІЗМІВ

- 12.1. Режими руху механізмів.
- 12.2. Коефіцієнт корисної дії механізму та системи механізмів.
- 12.3. Коефіцієнт нерівномірності ходу машини.
- 12.4. Регулювання руху механізмів.

Наступна важлива задача динаміки машин - задача визначення найсприятливіх співвідношень між силами, масами і швидкостями ланок механізмів.

12.1. Режими руху механізмів.

Вивчаючи розділи кінематики і кінетостатики плоских важільних механізмів, ми користувалися методами визначення прискорень, вважаючи, що ведуча ланка рухається з постійною кутовою швидкістю, тобто вважали, що $\omega_1 = \text{const}$. Це значно спростило розв'язування цих задач.

Але в реальних механізмах ведуча ланка, як правило, рухається нерівномірно. Це наочно показує *тахограма* руху головного вала машини (діаграма залежності кутової швидкості ω_1 від часу руху t).

На осі абсцис тахограми при роботі машини від моменту початку руху до моменту зупинки можна виділити три характерні проміжки: *розбігу* t_p (пуску в рух), *усталеного руху* $t_{y.p.}$ (робочий режим механізму) і *вибігу* t_v (зупинки) механізму (**рис.8.1**).

Під час розбігу кутова швидкість головного вала зростає від нуля до ω_c , під час усталеного руху коливається від ω_{\max} до ω_{\min} , проходить через середнє значення, змінюючись періодично, а під час вибігу зменшується до нуля.

Відповідно розрізняють і три режими роботи машини: розбігу, усталеного руху і вибігу; на відміну від режиму усталеного руху, два інших називаються перехідними.

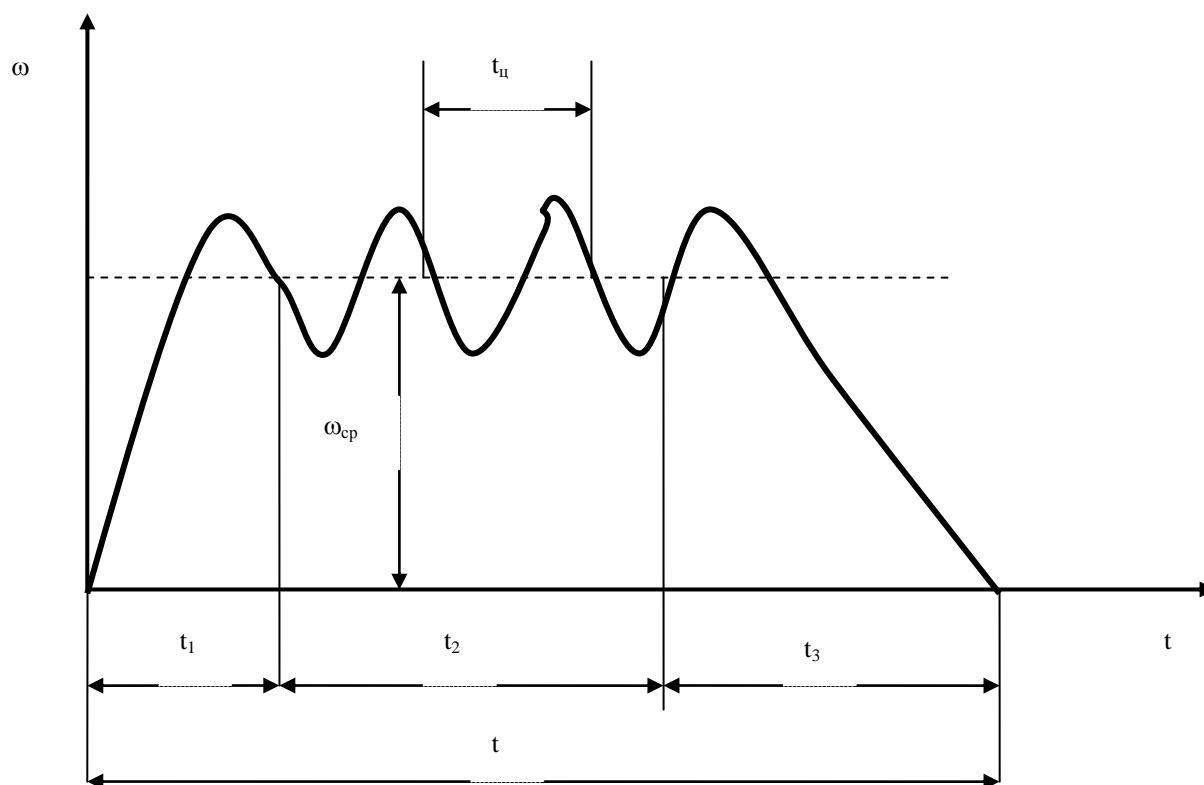


Рис.8.1. Тахограма руху головного вала машини.

Повний час руху машини

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_p + \mathbf{t}_{\text{v.p.}} + \mathbf{t}_B \quad (8.1)$$

З іншого боку, час установленого руху можна визначити як добуток

$$\mathbf{t}_{\text{v.p.}} = k \mathbf{t}_{\text{II}} \quad (8.2)$$

де k - кількість циклів; $t_{\text{ц}}$ - час циклу.

Час циклу – це проміжок часу, протягом якого кутова швидкість головного вала досягає свого початкового значення, пройшовши через ω_{\max} і ω_{\min} . Час

циклу може відповідати одному або двом обертам кривошипа (залежно від того, дво- чи чотиритактний двигун).

Режими руху машини залежать від діючих сил і мас машин. Багато машин, механізмів і приладів працюють тільки в двох режимах: розбігу та вибігу (вантажопідйомні машини, екскаватори, реле, контактори тощо).

12.2. Коефіцієнт корисної дії механізму та системи механізмів.

З рівняння руху механізму для періоду усталеного руху видно, що

$$A_p = A_{к.о.} + A_{ш.о.}$$

Тобто вся енергія рушійних сил, яка витрачається у машині, поділяється на дві частини: одна йде на перемагання сил виробничих (корисних) опорів, а друга – на перемагання шкідливих опорів (сил тертя, опору середовища). Механізм вважається тим досконалішим, чим більша частина енергії (за рівних інших умов), що підводиться до неї, йде на перемагання корисних опорів. Ефективність використання енергії в машині характеризується так званим механічним ККД.

Механічним ККД η називають відношення роботи сил корисного опору до роботи рушійних сил за цикл усталеного руху, тобто

$$\eta = \frac{A_{к.о.}}{A_p} < 1 \quad (8.3)$$

У реальних машинах механічний ККД завжди менший за одиницю. Це пояснюється тим, що робота сил корисного опору завжди менша, ніж робота рушійних сил. Механічний ККД може дорівнювати нулю, якщо робота рушійних сил дорівнює роботі всіх невиробничих опорів, які є у механізмі. З таких умови рух механізмів можливий, але без виконання будь-якої корисної роботи. Такий рух механізму звичайно називають рухом вхолосту. ККД не може бути меншим

від нуля, оскільки для цього треба, щоб відношення робіт $\frac{A_{ш.о.}}{A_p} > 1$ або $A_{ш.о.} > A_p$. У таких випадках настає явище самогальмування машини або механізму.

Отже, ККД машини або механізму може змінюватися у межах $0 \leq \eta \leq 1$.

Слід зауважити, що механічний ККД не дає повної характеристики машини, він нічого не говорить про її продуктивність, надійність, безпеку праці, вартість, якість продукції, яку вона випускає. ККД характеризує тільки ефективність використання енергії та годиться тільки для порівняння машин і пристроїв однакового призначення. У деяких машинах корисне навантаження дуже мале (наприклад, у поліграфічних і текстильних машинах, машинах швейної промисловості тощо), тому ККД невеликий.

ККД можна виразити і через відношення відповідних потужностей.

Під час руху машини ККД не залишається постійним, оскільки під час руху машини змінюються сили, які діють на її ланки, а значить, змінюються сили тертя та робота сил шкідливого опору (робота сил корисного опору також може змінюватися). На практиці, як правило. Обмежуються визначенням середнього ККД для якого-небудь проміжку часу, частіше всього для одного циклу періоду усталеного руху. Такий ККД називають цикловим. При обчисленні ККД даного положення механізму одержуємо миттєвий ККД.

Для кожної машини існує деяка найвигодніша швидкість, при якій її ККД досягає максимального значення. Найбільш високий ККД мають механізми і машини з чисто обертальним рухом ланок – ротаційні машини. Машини зі зворотно-поступальним рухом ланок – поршневі машини, механізми періодичної дії – мають частіше всього низькі ККД через несприятливу дію динамічних сил (сил інерції).

12.3. Коефіцієнт корисної дії механізму та системи механізмів.

ККД послідовного з'єднання механізмів.

Нехай маємо машину, яка складається з n послідовно з'єднаних механізмів, кожний із яких має відповідно ККД $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$. Робота або потужність, що підводиться до першого механізму, послідовно проходить через усі інші механізми і губить деяку частину в кожному з них.

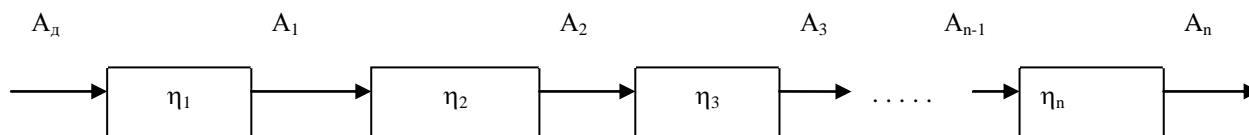


Рис.8. 2. *Схема послідовного з'єднання механізмів.*

Перший механізм приводиться у рух рушійними силами, що виконують роботу A_p . оскільки корисна робота A_1 першого механізму буде роботою рушійних сил другого механізму і відповідно у всьому ланцюгу механізмів корисна робота кожного попереднього механізму буде роботою рушійних сил для кожного наступного механізму, то ККД кожного механізму

Для механізмів групи можна записати відношення робіт сил корисного опору і рушійних сил:

$$A_1 = \eta_1 A_p; \quad A_2 = \eta_2 A_1 = \eta_1 \eta_2 A_p; \quad \dots; \quad A_n = \eta_n A_{n-1} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n A_p = A_{k.o.}$$

Підставляючи в останнє рівняння значення A_{n-1} з попереднього, отримаємо

$$A_{k.o.} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_{n-1} \eta_n A_d = \eta_n A_d$$

Звідки загальний ККД машини

$$\eta = \frac{A_{k.o.}}{A_p} = \frac{A_1}{A_d} \frac{A_2}{A_1} \frac{A_3}{A_2} \dots \frac{A_n}{A_{n-1}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n$$

або

$$\eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n = \frac{A_1}{A_p} \frac{A_2}{A_1} \frac{A_3}{A_2} \dots \frac{A_n}{A_{n-1}} = \frac{A_n}{A_p} = \eta$$

Отже, загальний механічний ККД послідовно сполучених механізмів дорівнює добуткові механічних ККД окремих механізмів, що утворюють одну машину, тобто

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n \quad (8.4)$$

З формули (8.4) видно, що чим складніша машина, тим більші втрати енергії і тим нижчий ККД. Причому загальний ККД машини при послідовному з'єднанні механізмів завжди менший від найменшого ККД механізмів, що входять до його складу. Це свідчить про те, що при послідовному з'єднанні механізмів необхідно дуже старанно виконувати кожний механізм, кожний вузол машини, інакше не можна добитися високого ККД машини.

Наприклад, при послідовному з'єднанні шести механізмів з окремими ККД 0,9, загальний ККД дорівнює

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_6 = 0,9^6 = 0,53.$$

Отже, з цього витікає повна неможливість побудувати *perpetuum mobile* – вічний двигун, який би виконував роботу без притоку енергії із зовні, при всіх відомих нам джерел механічної енергії.

ККД паралельного з'єднання механізмів.

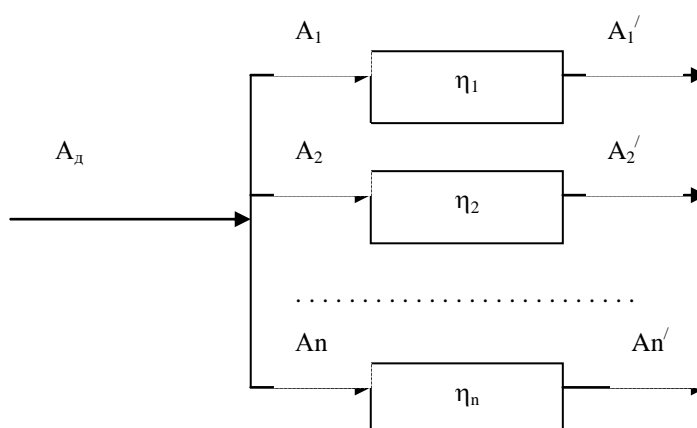


Рис.8.3. Схема паралельного з'єднання механізмів.

Робота рушійних сил A_p , яка підводиться до машини, розподіляється між окремими механізмами відповідно $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, які є для кожного механізму рушійними роботами, а значить,

$$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = \sum_{i=1}^n A_i$$

Кожний механізм відповідно виконує роботу

$$A_1' = A_1 \eta_1; \quad A_2' = A_2 \eta_2; \quad A_3' = A_3 \eta_3; \quad \dots; \quad A_n' = A_n \eta_n;$$

Загальна корисна робота всієї машини рівна сумі корисних робіт усіх механізмів, тобто

$$A_{к.о.} = A_1' + A_2' + A_3' + \dots + A_n' = A_1 \eta_1 + A_2 \eta_2 + A_3 \eta_3 + \dots + A_n \eta_n = \sum_{i=1}^n A_i \eta_i$$

Тоді загальний ККД машини при паралельному з'єднанні механізмів має вигляд

$$\eta = \frac{A_{к.о.}}{A_p} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{A_1 \eta_1 + A_2 \eta_2 + A_3 \eta_3 + \dots + A_n \eta_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (8.5)$$

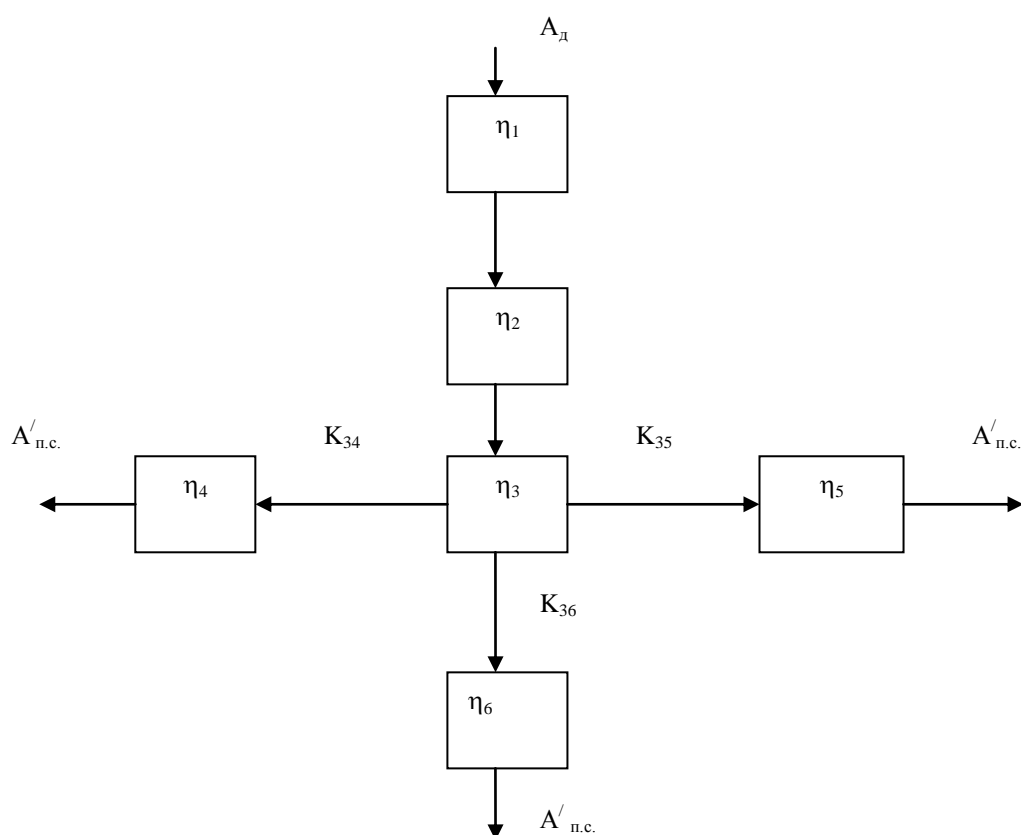
З цієї формули випливає, що механічний ККД машини при паралельному з'єднанні механізмів залежить не тільки від ККД окремих механізмів, а й від характеру розподілу роботи рушійних сил між механізмами. Очевидно, чим більша частина всієї затраченої роботи знаходитиме в механізм із найбільшим ККД, тим ККД усієї машини буде більшим, і, навпаки, ККД машини буде тим меншим, чим більша частина A_p буде надходити в механізм із найменшим ККД.

Загальний ККД машини при послідовному з'єднанні механізмів завжди менший від найменшого ККД механізмів, що входять до його складу.

ККД змішаного з'єднання механізмів.

При складному (змішаному) з'єднанні механізмів для визначення загального ККД машини користуються загальною формулою. Остаточні формули ККД залежать від схеми сполучення механізмів, у якій завжди можна виділити послідовні та паралельні ланцюги з'єднаних між собою механізмів. При наявності одного колектора потужності (ланки, від якої відгалужуються силові потоки) спочатку визначають ККД послідовних, а потім паралельних з'єднань.

Приклад. Визначити ККД змішаного з'єднання механізмів: κ_{34} , κ_{35} , κ_{36} – коефіцієнти, що розподіляють енергію по кінематичним групам 3-4, 3-5, 3-6.



Розв'язання.

Визначимо ККД паралельного ланцюга:

$$\eta_{4,5,6} = \kappa_{34} \cdot \eta_4 + \kappa_{35} \cdot \eta_5 + \kappa_{36} \cdot \eta_6$$

Загальний ККД дорівнює

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot (\kappa_{34} \cdot \eta_4 + \kappa_{35} \cdot \eta_5 + \kappa_{36} \cdot \eta_6)$$

ККД кінематичних пар

ККД похилої площини і гвинтової пари.

ККД похилої площини визначимо як відношення корисної роботи при підніманні вантажу **Q** на висоту **h** до затраченої роботи при переміщенні його по похилій площині силою **P** на відстань **S** (рис.8.4)

$$\eta = \frac{A_{к.о}}{A_p} = \frac{Qh}{PS \cos \gamma} = \frac{QS \sin \alpha}{PS \cos(90^\circ - \beta - \alpha)} = \frac{Q \sin \alpha}{P \sin(\beta + \alpha)}$$

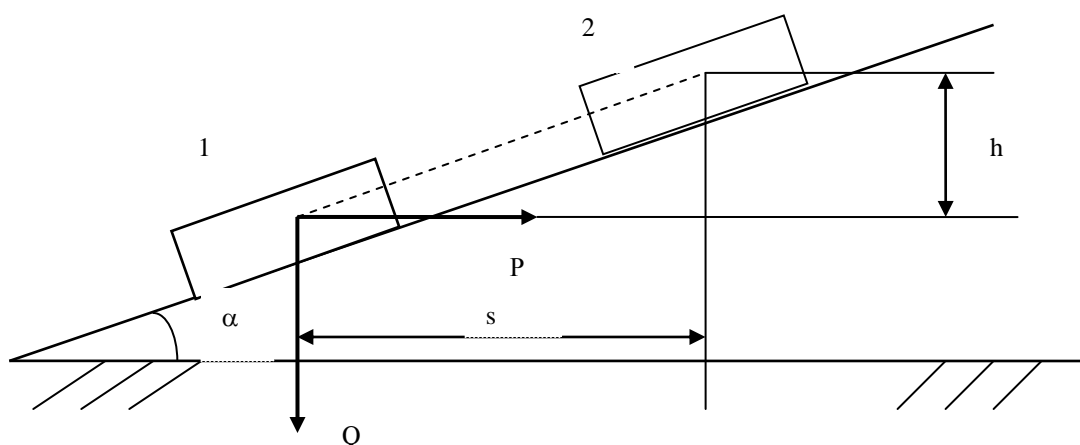


Рис.8.4. До визначення ККД похилої площини.

Із трикутника сил за теоремою синусів

$$P = Q \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\sin(\alpha + \beta + \rho)}$$

Коли кут $\beta=90^\circ$

$$P = \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\alpha + \rho)} = Q \operatorname{tg}(\alpha + \rho)$$

Після підстановки P дістанемо

$$\eta = \frac{A_{к.о}}{A_p} = \frac{Q \sin \alpha}{Q \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \sin(90^\circ + \alpha)} = \frac{Q \sin \alpha}{Q \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \cos \alpha}$$

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \rho)} \quad (8.6)$$

При рівномірному опусканні вантажу Q сили опору і рушійні сили поміняються місцями: Q буде рушійною, а P – силою опору. Тоді

$$\eta = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \rho)}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (8.7)$$

Для визначення максимального значення ККД візьмемо першу похідну за α від виразу (8.6)

$$\frac{d\eta}{d\alpha} = \frac{(\operatorname{tg} \alpha)' \operatorname{tg}(\alpha + \rho) - [\operatorname{tg}(\alpha + \rho)]' \operatorname{tg} \alpha}{[\operatorname{tg}(\alpha + \rho)]^2} = \frac{1/\cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho) - 1/\cos^2(\alpha + \rho) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \rho)} = 0$$

Дріб дорівнює нулю, якщо чисельник дорівнює нулю:

$$\frac{\operatorname{tg}(\alpha + \rho)}{\cos^2 \alpha} - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos^2(\alpha + \rho)} = \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\alpha + \rho) \cos \alpha \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha \cos(\alpha + \rho) \cos(\alpha + \rho)} = 0$$

Скоротивши на $\cos(\alpha + \rho)$, дістанемо

$$\frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha + \rho)} = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha + \rho)}$$

Добуток крайніх членів пропорції, як відомо, дорівнює добутку середніх, тому

$$\sin(\alpha + \rho) \cos(\alpha + \rho) = \sin \alpha \cos \alpha$$

Помножимо і поділимо праву і ліву частини на 2:

$$\frac{2}{2} \sin(\alpha + \rho) \cos(\alpha + \rho) = \frac{2}{2} \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \sin 2(\alpha + \rho) = \frac{1}{2} \sin 2\alpha$$

Оскільки $\alpha + \rho \neq 2\alpha$, бо $\rho \neq 0$, а $\sin 2\alpha = \sin(\pi - 2\alpha)$, то $2(\alpha + \rho) = \pi - 2\alpha$. Звідки $4\alpha = \pi - 2\rho$, а отже кут похилої площини, коли ККД її дорівнює максимуму:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \quad (8.8)$$

ККД гвинтової пари з прямокутною різьбою.

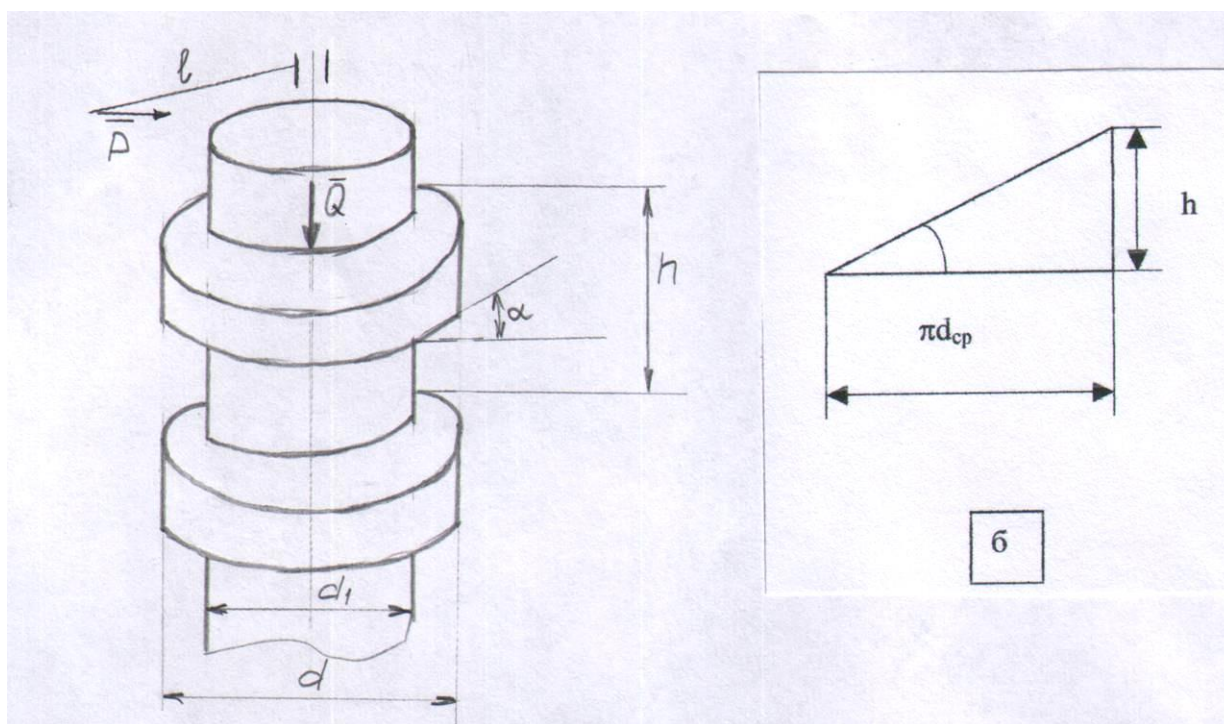


Рис. 8.5. Гвинтова пара з прямо кутовою різьбою.

Якщо розглядати розгортку гвинтової лінії чи витка черв'яка як похилу площину, в якій кути підйому гвинтової лінії дорівнює куту нахилу α похилої площини, то за формулами (8.6) і (8.7) можна скористатися для визначення ККД гвинтової пари і ККД черв'ячної зубчастої передачі:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{\pi d_{CP}} = \frac{zp}{\pi d_{CP}}$$

де h – хід гвинта (черв'яка); p – крок; z - число витків; d_{CP} – середній діаметр гвинта (черв'яка).

ККД кривошипно -повзуного механізму.

Знайдемо миттєвий ККД кривошипно-повзуного механізму (рис.8.7).

Рахуємо, що в наслідок проведення силового аналізу відомі тиски в кінематичних парах R_A, R_B, R_C і $R_{пост}$, а також радіуси цапф r_A, r_B и r_C шарнірів и коефіцієнти тертя f' і f в шарнірах і напрямних повзуна.

Величини сил тертя в кінематичних парах будуть дорівнювати

$$F_A = f' \cdot R_A, \quad F_B = f' \cdot R_B, \quad F_C = f' \cdot R_C \quad \text{і} \quad F_{пост} = f \cdot R_{пост}$$

Для визначення миттєвих потужностей, що затрачуються на тертя в різних кінематичних парах, треба визначити відносні кутові швидкості в них. Тому що вал **A** обертається в нерухомому підшипнику, то кутова швидкість ланки **1** відносно стояка дорівнює заданій кутовій швидкості ω_1 . З побудованого плану швидкостей визначаємо кутову швидкість ланки **2**.

$$\omega_2 = \frac{V_{CB}}{l_{BC}} = \frac{\mu_v \cdot (bc)}{l_{BC}}$$

где μ_v - масштаб плану споростей; l_{BC} - длина звена **2**.

Кутова швидкість ланки **2** відносно ланки **1** буде

$$\omega_{21} = \omega_1 - (-\omega_2) = \omega_1 + \omega_2$$

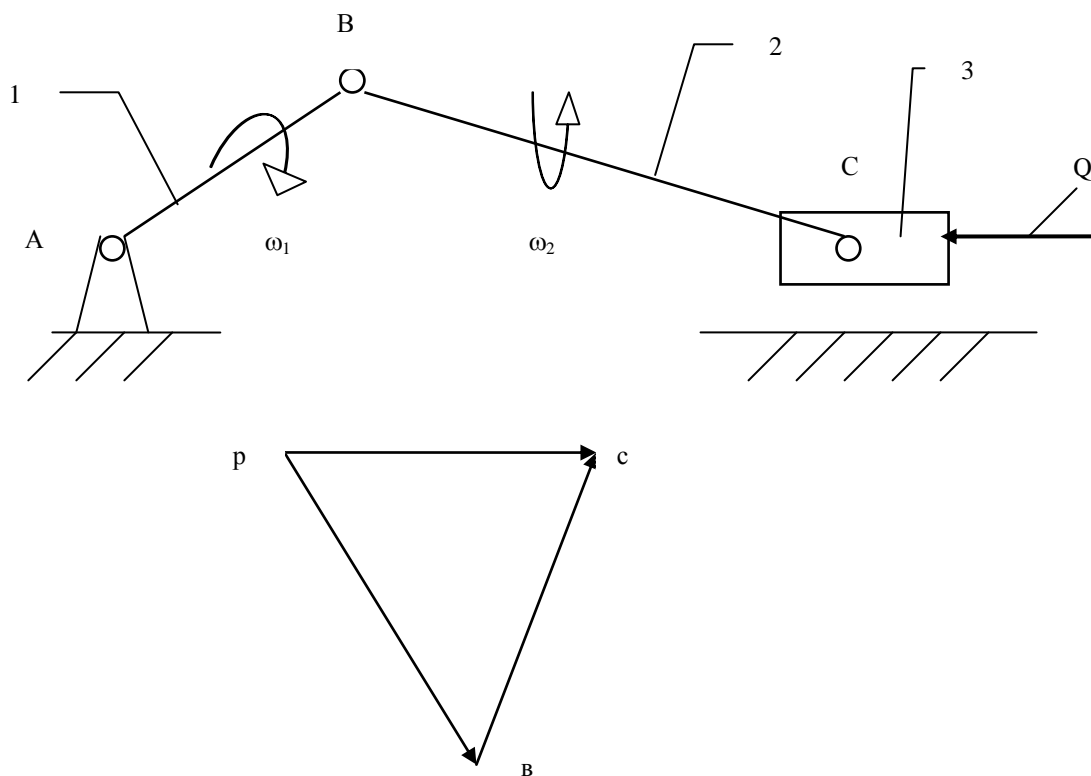


Рис.7. Кривошипно-повзунний механізм.

Оскільки ланка **3** здійснює поступальний рух, то відносна кутова швидкість ω_{32} дорівнює абсолютній кутовій швидкості ланки **2**, тобто $\omega_{32} = \omega_2$.

Миттєві потужності, що витрачаються на тертя в кінематичних парах, дорівнюють

$$N_A = F_A \cdot r_A \cdot \omega_1, \quad N_B = F_B \cdot r_B \cdot \omega_{21}, \quad N_C = F_C \cdot r_C \cdot \omega_2 \quad \text{и} \quad N_{\text{ном}} = F_{\text{ном}} \cdot V_C$$

Загальна миттєва потужність сил тертя буде

$$N_{\text{мп}} = N_A + N_B + N_C + N_{\text{ном}}$$

Потужність рушійних сил визначиться по формулі

$$N_d = Q \cdot V_C$$

де **Q** - рушійна сила.

Тоді миттєвий ККД даного механізму дорівнює

$$\eta = 1 - \frac{N_{\text{мп}}}{N_d}$$

Підрахував для 12-ті положень одного циклу і взявши середнє арифметичне отримаємо цикловий ККД.

12.4. Коефіцієнт нерівномірності ходу машини

Якщо робота рушійних сил машини за будь який проміжок часу дорівнює роботі всіх сил опору, і відповідно, рух машини не супроводжується зміною її кінетичної енергії E , то такий рух називається усталеним рухом.

Усталений рух на відміну від інших періодів характеризується сталістю швидкості ведучої ланки. Проте, в дійсності ідеальну сталість швидкості руху ведучої ланки здійснити трудно. Такий режим можливий, як що в будь який момент часу $A_p = A_{к.о.} = \text{const}$ (рис. 8.6.а) і називається *рівномірно усталеним рухом*. Це можливо в машинах ротаційного типу, де всі ланки мають тільки обертовий рух, а передаточні відношення між ними постійні.

Проте багаточленні причини, що пов'язані з конструкцією машини, режимом її руху, викликають неперервні коливання швидкості ведучої ланки. Тому миттєва кутова швидкість ведучої ланки безперервно змінюється проміжком кожного циклу руху, зберігаючи сталим лише своє середнє значення $\omega_{\text{ср}}$.

В механічних системах коливання кутової швидкості ведучої ланки можуть бути *періодичними* (періодично нерівномірний рух; рис.8.6.б) і *аперіодичними* (нерівномірний рух; рис.8.6.в).

Як установлено раніше, навіть у періоді усталеного руху машини кутова швидкість ведучої ланки не є сталою. Вона коливається біля середнього робочого значення, досягаючи за час циклу мінімуму і максимуму. Пояснюється це тим, що за час циклу змінюються зведені до ведучої ланки рушійні сили, сили корисного та шкідливого опору, змінюється також зведена до ведучої ланки маса, бо всі ці параметри є функціями положення ланок механізму.

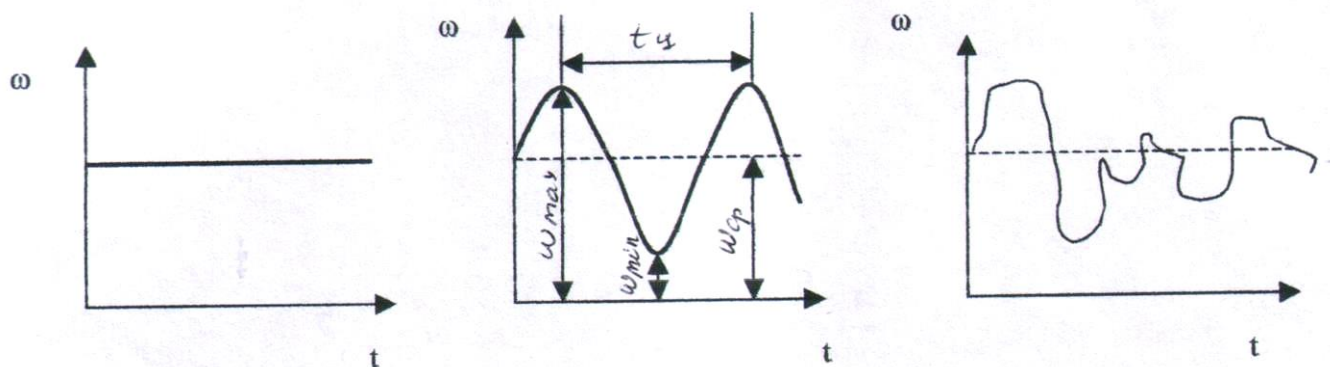


Рис.8.6. Колювання кутової швидкості ведучої ланки механізму:

а – рівномірно усталені; *б*- періодичні; *в* –неперіодичні.

Як уже говорилося, усталений режим роботи машини характеризується тим, що всі механічні параметри (швидкість, прискорення, сили, моменти сил), виражені в функції часу, змінюються періодично, досягаючи за час циклу (іноді так званого періоду усталеного руху) початкового значення. Але, якщо зв'язувати час циклу з кількістю обертів головного вала машин, то не в усіх машин один оберт кривошипа відповідає одному циклу.

Якщо для кулісного механізму поперечно-стругального верстата період усталеного руху (час циклу), дорівнює часу одного оберту кривошипа, то в одноциліндровому чотиритактному двигуні внутрішнього згорання час одного циклу дорівнює часу двох обертів кривошипа, бо тільки за два оберти кривошипа рушійна сила (сила тиску газів у циліндрі) досягне свого початкового значення, пройшовши через максимум і мінімум.

Колювання швидкостей машин, за яких швидкості всіх ланок машини в усіх положеннях мають цілком визначенні цикли, після закінчення яких ці швидкості досягають свого початкового значення, називаються *періодичними колюваннями швидкостей* (рис.8.6.б).

Крім періодичних колювань швидкостей, при роботі машини виникають *неперіодичні колювання* (рис.8.6.в) швидкостей, що викликаються раптовим скиданням навантаження чи включенням нового. Ці колювання особливо відчутні,

коли від одного двигуна приводиться в рух кілька технологічних машин, які то вмикаються, то вимикаються і при цьому то зростають, то зменшуються сили технологічного опору, збільшуються або зменшуються рухомі (а отже, і зведені) маси. Такі коливання виникають через нерівномірність технологічних процесів (неоднорідність гірничих порід чи інших матеріалів, що транспортуються, коли матеріали поступають або скидаються нерівномірно). Коливання швидкостей обох типів небажані з причин, тому мають регулюватись в межах допустимих значень, щоб забезпечити надійну роботу машини, з точки зору її динаміки і виконання технологічних процесів.

◆ Періодичними називаються такі коливання, коли середня швидкість ω_{cp} ланки зведення є періодичною функцією часу (миттєва кутова швидкість ведучої ланки механізму змінюється у проміжку кожного циклу руху, зберігаючи сталим лише своє середнє значення ω_{cp}); сили, що діють на ланки, змінюються у визначеній залежності від кута повороту ведучої ланки; $\omega_1 = \omega_0$, $A_d = A_c$, $I_{np} = I_{np.0}$ – за цикл. Такий рух називається *періодично нерівномірно усталеним рухом* (рис.8.6.б). Періодичні коливання кутової швидкості наглядаються в механізмах і машинах, в яких сили, що діють на ланки, змінюються в визначеній залежності від кута повороту ведучої ланки. Цей режим найбільш поширений в машинах (верстати., преси, прокатні стани, текстильні; механізми, що не мають постійних передаточних відношень, наприклад при наяві не круглих коліс або при кривошипно-повзунній схемі механізму, поршневі насоси).

◆ Аперіодичні коливання кутової швидкості ведучої ланки не мають ніякого визначеного циклу, обумовлені раптовою зміною корисних або шкідливих опорів. При цьому сума робіт всіх діючих в машині сил за деякий постійний проміжок часу вже не буде дорівнювати нулеві. Такий вид руху називається *неперіодичним нерівномірним рухом* (рис.8.6.в). Неперіодичний рух має місце в дробарках, розмелюваних машинах та інших, де сили опорів можуть раптово збільшуватися при попаданні крупних і твердих кусків матеріалу, що перероблюється, та навпаки, значно знижуватися при припиненні подачі сировини в машину. Очевидно, такий характер руху машини у всіх випадках є наслідком не

тільки змінних за величиною або по циклу сил, що діють в машинах, але і складних законів їх зміни.

Зміна (коливання) кутової швидкості зумовлює виникнення додаткових (динамічних) реакцій у кінематичних парах, бо при нерівномірному русі є прискорення, а також з'являються й сили інерції. Виникають коливання окремих ланок машини і всієї машини на фундаменті. Ці коливання кутової швидкості, прискорень і ланок перешкоджають нормальному виконанню технологічних процесів. У ткацьких і прядильних машинах це призводить до обривання нитки, у верстатах може виникати поломка або викришення ріжучої кромки різця, а з цим і погіршення якості оброблюваної поверхні деталі; при нерівномірному русі двигуна або генератора струму виникають коливання напруги і сили струму. Мають місце збої в роботі автоматичних пристроїв, а отже, і технологічних процесів, виникає мерехтіння світла тощо. Усі ці явища не бажані як з точки зору виконання технологічних процесів, так і з точки зору динаміки, роботи машини.

Отже, одною з задач регулювання ходу машин є обмеження коливань швидкості руху в заданих межах.

Нерівномірність руху машини характеризується *коефіцієнтом нерівномірності руху* δ – відношенням абсолютної нерівномірності до середньої кутової швидкості

$$\delta = \frac{\Delta}{\omega_{\text{cp}}} = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{\omega_{\text{cp}}} \quad (8.9)$$

де ω_{max} і ω_{min} - найбільше та найменше значення кутової швидкості ведучої ланки;

ω_{cp} – середня кутова швидкість за розглядаємий період.

З рівняння (8.9) видно, що δ характеризує розмах коливань кутової швидкості по відношенню до її середнього значення. Чим менше δ , тим відносно менший розмах коливань, тим спокійніше обертається ланка зведення.

Практикою встановлено допустимі для машин даного типу значення коефіцієнта нерівномірності руху машини, що подаються в технічних довідниках:

Насоси	- 1/5...1/30
Металорізальні верстати	- 1/5...1/50
Сільськогосподарські машини	- 1/5...1/50
ДВЗ	- 1/80...1/100
Компресори	- 1/50...1/100
Електричні генератори постійного струму	- 1/100...1/200
Електричні генератори змінного струму	- 1/200...1/300

Оскільки, коефіцієнт нерівномірності ходу – величина дуже мала, середню кутову швидкість приблизно можна прийняти як середньо арифметичне

$$\omega_{cp} = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \quad (8.10)$$

Звичайно в паспорті машини вказується номінальна частота обертів n ведучої ланки. В такому разі

$$\omega_{cp} = \frac{\pi n}{30} \quad (8.11)$$

Спільне вирішення рівнянь (8.9) і (8.10) дає величини максимальної і мінімальної кутової швидкостей

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает величины максимальной и минимальной угловой скорости

$$\omega_{\max} = \omega_{cp} \left(1 + \frac{\delta}{2}\right); \quad \omega_{\min} = \omega_{cp} \left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \quad (8.12)$$

Як видно з (8.12), відміна ω_{\max} від ω_{\min} складає $\pm \frac{\delta}{2}$, тобто звичайно не більш $\pm 2\%$. Отже амплітуда коливань кутової швидкості ω не перевищує у більшості випадків 2% від його середнього значення ω_{cp} .

Коливання кутової швидкості ведучої ланки викликають додаткове динамічне навантаження, внаслідок чого знижується довговічність і надійність

машин. Окрім того, коливання швидкості погіршують робочий процес машини. Так, в металообробних верстатах знижується точність обробітку; в текстильних машинах може мати місце обрив ниток; електрогенераторі, що працюють на освітлення, дають нерівне, а мигаюче світло і т.д.

Отже, оскільки коливання швидкості, що обумовлені періодичною дією сил повністю усунути неможливо, то треба хоч би по можливості укоротити їх розмах.

Іншими словами, величину коефіцієнта нерівномірності ходу δ треба зробити прийнятно малою. Розглянемо якими засобами можна вирішити цю задачу.

12.5 Регулювання руху механізмів.

Регулювання періодичних коливань швидкості машини.

Кутова швидкість ланки зведення може бути визначена за формулою

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \int_{\varphi_0}^{\varphi} (M_p - M_o)}{I_{36}} + \frac{I_{36} \omega^2}{I_{36}}}$$

Як видно, величина зміни кутової швидкості спричиняється двома причинами:

- Різними законами зміни сил рушійних і опору;
- Несталістю зведеного моменту інерції.

Регулювання швидкості (задачу забезпечення заданого δ) можна проводити по двом напрямкам:

- Зближенням законів зміни зведених моментів сил рушійних і опору);
- Збільшенням зведеного моменту інерції механізму.

У першому випадку задача вирішується шляхом вибору схеми механізму в режимі роботи (наприклад, автомобільний двигун при переміщенні по горизонтальній дорозі працює на сталий опір. З'єднання в один блок декількох

циліндрів зі зміщенням такту має метою зближення крутячого моменту двигуна до характеру зведеного моменту сил опору. На підйомах водій збільшує крутячий момент, підсилюючи подачу). Слід зазначити, що лише в рідких випадках зближення характеристик рушійного моменту і моменту опору можна досягнути результатів.

Тому частіше йдуть за другим шляхом – збільшують зведений момент інерції механізму - за допомогою встановлення додаткової маси – *маховика*.

Розглянемо, як впливає маховик при періодичному регулюванні руху машини. Маховик, як правило, встановлюють на ланці зведення (у більшості випадків – ведучій) чи головному валу машини.

Призначення маховика – зменшення коефіцієнта нерівномірності руху до наперед заданої, допустимої для даної машини, величини.

Для вивчення можливих засобів зменшення коефіцієнта нерівномірності руху машини при заданому законі зміни зовнішніх сил скористаємось основним рівнянням руху машини (у вигляді зміни кінетичної енергії):

$$I \frac{\omega^2}{2} - I_0 \frac{\omega_0^2}{2} = A_p - A_0 = \int_0^\varphi M_p d\varphi - \int_0^\varphi M_0 d\varphi = \int_0^\varphi (M_p - M_0) d\varphi = A_H(\varphi) \quad (8.11)$$

де $A_H(\varphi)$ – надлишкова робота.

Якщо знехтувати зміною зведеного моменту інерції, тобто покласти $I_0 = I = \text{const}$, можна вважати, що найбільші та найменші кінетичні енергії відповідають максимальному ω_{\max} і мініимальному ω_{\min} значенням кутових швидкостей ланки зведення. Тоді основне рівняння руху машини матиме вигляд

$$I \frac{\omega_{\max}^2}{2} - I \frac{\omega_{\min}^2}{2} = I \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2}{2} = I \left(\frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \right) \left(\frac{\frac{\omega_{\max}^2 + \omega_{\min}^2}{2}}{\frac{\omega_{\max}^2 + \omega_{\min}^2}{2}} \right) (\omega_{\max} - \omega_{\min}) =$$

$$I \left(\frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \right)^2 \left(\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_c} \right) = I \omega_c^2 \delta = \int_0^\varphi (M_p - M_0) d\varphi = A_{\max}(\varphi)$$

де $A_{\max}(\varphi)$ - найбільше значення надлишкової роботи, що перетворюється на кінетичну енергію механізму і залежить від законів зміни роботи рушійних сил та сил його опору, тому для даного режиму роботи машини вважається незмінним;

$I \omega_c^2 \delta$ - найбільша зміна кінетичної енергії.

Оскільки середня кутова швидкість ω_c і надлишкова робота $A_{\max}(\varphi)$ задані для даної машини та даного режиму її роботи, єдиним вільним параметром, який можна міняти для забезпечення встановленого практикою коефіцієнта нерівномірності руху машини, є зведений момент інерції

$$\delta = \frac{A_{\max}(\varphi)}{I \omega_c^2} \quad (8.12)$$

Якщо коефіцієнт нерівномірності руху машини виявиться більшим за допустимий для машини даного типу, треба збільшити момент інерції машини, встановлюючи на ведучій ланці додаткову масу у вигляді маховика.

Коли кутова швидкість головного вала машини значно зростатиме, кінетична енергія маховика також зростатиме (маховик нагромаджуватиме й акумулюватиме кінетичну енергію, кутова швидкість не досягне рівня, що був без маховика). Коли ж кутова швидкість почне падати, нагромаджена енергія повертатиметься до системи, і кутова швидкість не впаде до такого низького рівня, як було без маховика.

Проте досягти рівномірного руху машини за допомогою маховика не вдається, та й прагнути до цього не треба. Дійсно, робота рушійних сил і сил опору

$$\int_0^{\varphi} (M_p - M_0) d\varphi = I\varepsilon$$

де ε - кутове прискорення.

Кутове прискорення при рівномірному русі дорівнює нулю:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\varphi} (M_p - M_0) d\varphi}{I} = 0$$

Зрозуміло, що ε прямуватиме до нуля, коли I прямуватиме до нескінченності ($\varepsilon \rightarrow 0$ при $I \rightarrow \infty$), що практично здійснити неможливо. Тому момент інерції маховика треба вибирати такого мінімального значення, за якого коефіцієнт нерівномірності руху стає допустимим для цих машин.

Регулювання аперіодичних коливань швидкості машини.

Згладити коливання кутової швидкості при аперіодичному русі з допомогою маховика не можна, бо для зменшення великих амплітуд коливань потрібна велика махова маса, на розкручування якої витрачається багато енергії. Тому регулювання аперіодичних коливань здійснюють з допомогою особливих пристроїв - регуляторів. Зараз відокремилася ціла галузь науки з регулювання машин і процесів. Основи теорії регулювання руху механізмів закладені в працях російського вченого І.В.Вишнеградського. У курсі ТММ розглядається відцентровий регулятор, яким Уатт уперше здійснив практичне регулювання роботи парової машини. (Проробити самостійно: література – И.И. Артоболевский. Теория механизмов и машин., М., 1988; § 89 с. 397-410.)

Резюме:

♦ При роботі машини розрізняють три режими роботи: розбіг, усталений рух і вибіг; на відміну від режиму усталеного руху, два інші називаються перехідними.

Основними характеристиками усталеного руху машин є ККД і коефіцієнт нерівномірності ходу.

Ефективність використання енергії в машині характеризується механічним ККД, що є однією з основних характеристик усталеного режиму руху машини..

Загальний ККД машини при послідовному з'єднанні механізмів завжди менший від найменшого ККД механізмів, що входять до його складу.

При паралельному з'єднанні загальний ККД більше найменшого і менше найбільшого ККД механізмів, що входять до його складу.

При паралельному з'єднанні механізмів загальний ККД більше за послідовного з'єднання.

◆ Рівномірність руху ланок машини є однією з важливих умов найвигіднішого використання механізмів.

Зміна (коливання) кутової швидкості ведучої ланки зумовлює виникнення додаткових (динамічних) реакцій у кінематичних парах. Нерівномірність руху машини характеризується коефіцієнтом нерівномірності руху δ – відношенням абсолютної нерівномірності до середньої кутової швидкості.

Регулювання періодичних змін кутової швидкості ведучої ланки здійснюється з допомогою маховика.

Призначення маховика – зменшення коефіцієнта нерівномірності руху до наперед заданої, допустимої для даної машини, величини.

