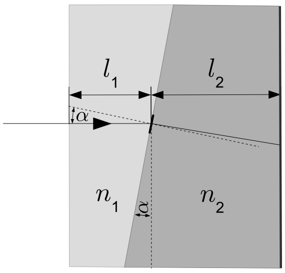
LXX OLIMPIADA FIZYCZNA

ZAWODY II STOPNIA

CZĘŚĆ TEORETYCZNA, 10.01.2021

Za każde zadanie można otrzymać maksymalnie 20 punktów.

Zadanie 1



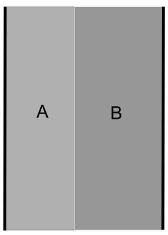
Siatka dyfrakcyjna o stałej siatki d znajduje się na granicy dwóch ośrodków (1) i (2) o współczynnikach załamania światła odpowiednio n_1 i n_2. Na siatkę pada od strony ośrodka (1) wiązka światła lasera o długości fali w próżni równej λ, przy czym $\lambda \ll d$. Kąt padania wynosi α. W odległości l_2 ($l_2 \gg d$) od siatki znajduje się ekran prostopadły do początkowego kierunku biegu wiązki – patrz rysunek. Brzeg ośrodka (1) znajduje się w odległości l_1 ($l_1 \gg d$) od siatki dyfrakcyjnej.

Uwzględniając, że kąt α jest na tyle mały, że można przyjąć

$\sin\alpha \approx \alpha$, $\cos\alpha \approx 1$, oraz pomijając odbicie światła na granicy ośrodków, wyznacz odległość między maksimami m – tego oraz zerowego prążka interferencyjnego. Rozważ tylko $m = \pm 1$, ± 2.

Podaj wyniki liczbowe dla $l_1 = 1$ m, $l_2 = 2$ m, $\lambda = 405$ nm, $d = 5000$ nm, $n_1 = 1{,}33$, $n_2 = 1{,}50$, $m = \pm 1$.

Zadanie 2



Między dwiema równoległymi, metalowymi płytkami A i B o powierzchni S każda znajdują się równoległe do nich warstwy materiałów: A, o module Younga Y_{A} oraz B, o module Younga Y_{B}. Opory właściwe tych warstw wynoszą odpowiednio ρ_{A} oraz ρ_{B}. Warstwy są przyklejone do siebie oraz do odpowiedniej płytki (jakikolwiek wpływ własności kleju można pominąć), a ich przenikalność elektryczna jest równa (w przybliżeniu) przenikalności elektrycznej próżni ε_0 (materiały mają strukturę porowatą, ale wielkość porów jest znacznie mniejsza niż grubość danej warstwy, więc każdą z nich można traktować jako jednorodną). Grubości warstw są znacznie mniejsze niż ich poprzeczne rozmiary. Jedna z płytek jest umocowana, natomiast druga płytka może się przesuwać i nie działają na nią żadne siły zewnętrzne. Początkowo płytki były nienaładowane, nie płynął między nimi prąd, a grubości odpowiednich warstw wynosiły d_{A0} oraz d_{B0}.

Płytki podłączono do stałego napięcia U. Przyjmując, że opór elektryczny warstw nie zmienia się w wyniku ściśnięcia lub rozciągnięcia, wyznacz zmianę odległości między płytkami (w porównaniu do sytuacji początkowej) po długim czasie.

Podaj wynik liczbowy dla $\rho_{\mathrm{A}} = 1{,}0 \cdot 10^{10}$ Ωm, $\rho_{\mathrm{B}} = 2{,}0 \cdot 10^{10}$ Ωm, $Y_{\mathrm{A}} = 1{,}0 \cdot 10^6$ Pa, $Y_{\mathrm{B}} = 2{,}0 \cdot 10^6$ Pa, $d_{\mathrm{A0}} = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ m, $d_{\mathrm{B0}} = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ m, $S = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^2, $U = 10000$ V.

Uwaga:

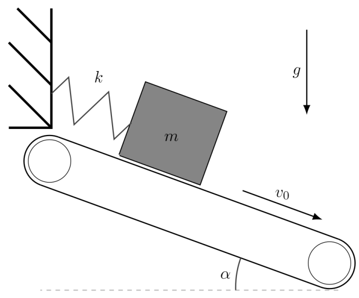
Moduł Younga jest zdefiniowany następująco

$$Y = \frac{F}{S}\frac{d}{\Delta d},$$

gdzie F jest siłą rozciągającą ($F > 0$) lub ściskającą ($F < 0$) warstwę, S – jej początkową powierzchnią, d – początkową grubością warstwy, Δd – zmianą tej grubości wywołaną ściskaniem lub rozciąganiem.

Przenikalność elektryczna próżni jest równa $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$.

Zadanie 3



Klocek o masie m jest przymocowany do nieruchomej ściany sprężyną o stałej sprężystości k i opiera się na pasie transmisyjnym tworzącym z poziomem kąt α. Sprężyna jest równoległa do pasa. Współczynnik tarcia klocka o pas wynosi μ_{k} dla tarcia kinetycznego oraz μ_{s} dla tarcia statycznego ($\mu_{\mathrm{k}} < \mu_{\mathrm{s}}$). Początkowo pas był nieruchomy, ale swobodny (tzn. mógł się przesuwać bez oporów), a klocek spoczywał względem ściany.

W chwili $t = 0$ napęd pasa został włączony i od tego momentu pas przesuwa się ze stałą prędkością v_0 ($v_0 > 0$, zwrot jak na rysunku). Po pewnym czasie ruch klocka ustalił się w formie okresowych drgań.

Opisz ruch klocka podczas tych drgań. Wyznacz skrajne wychylenia klocka względem położenia początkowego.

Podaj wyniki liczbowe tych skrajnych wychyleń, gdy $m = 1$ kg, $\alpha = 30^{\mathrm{o}}$, $k = 10$ N/m, $\mu_{\mathrm{k}} = 0{,}4$, $\mu_{\mathrm{s}} = 0{,}5$, $g = 9{,}81$ m/s^2 w dwóch przypadkach prędkości pasa transmisyjnego:

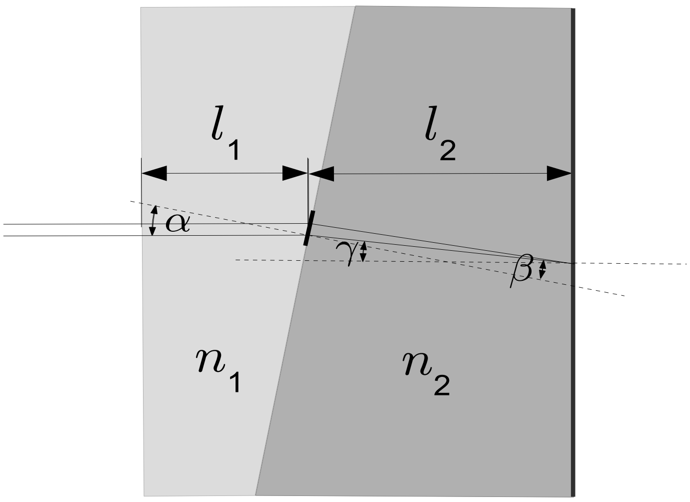
a) $v_0 = 1{,}5$ m/s,

b) $v_0 = 0{,}5$ m/s.

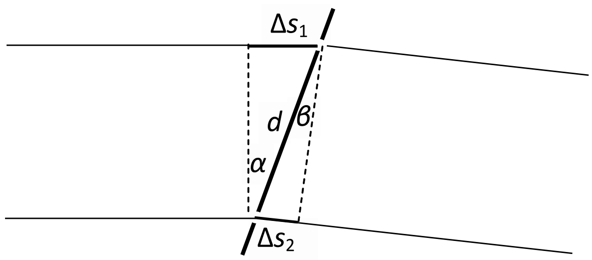
LXX OLIMPIADA FIZYCZNA
ROZWIĄZANIA ZADAŃ ZAWODÓW II STOPNIA
CZĘŚĆ TEORETYCZNA

Rozwiązanie zadania 1

Aby rozwiązać to zadanie, należy wyznaczyć różnicę faz dwóch fal dochodzących do tego samego punktu na ekranie a przechodzących przez sąsiednie szczeliny siatki dyfrakcyjnej. Drogi tych fal przedstawiono schematycznie na rysunku.



W ośrodku 1 fala docierająca do górnej szczeliny na rysunku musi pokonać drogę o $\Delta s_1 = d \sin\alpha$ większą od fali docierającej do dolnej szczeliny, patrz poniższy rysunek



Stąd wynika, że różnica faz miedzy tymi falami w ośrodku (1) jest równa

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}\Delta s_1 \approx \frac{2\pi d\alpha}{\lambda_1}$$

gdzie λ_1 jest długością fali w ośrodku (1), czyli $\lambda_1 = \lambda/n_1$. Zatem wzór na $\Delta\varphi_1$ przybiera postać

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi n_1 d \sin\alpha}{\lambda}. \tag{1}$$

W podobny sposób obliczamy różnicę faz wynikającą z tego, że dolna fala ma dłuższą niż górna drogę do tego samego punktu na ekranie. Zauważmy, że na odległościach rzędu wielokrotności d odcinki odpowiadające tym dwóm drogom można traktować jako równoległe. Oznaczmy przez β kąt jaki tworzą te odcinki z normalną do granicy ośrodków (1) i (2) – patrz rysunek. Różnica dróg jakie przebywają fale w ośrodku (2) po przejściu z ośrodka (1) do ośrodka (2) wynosi

$$\Delta s_2 = -d \sin\beta.$$

Minus odpowiada temu, że tutaj droga odpowiadające dolnej fali jest dłuższa, a poprzednio była krótsza.

Odpowiadająca tej różnicy dróg różnica faz wynosi

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi n_2 d \sin\beta}{\lambda}, \tag{2}$$

gdzie uwzględniliśmy, że w ośrodku (2) długość fali jest równa λ/n_2

Zatem całkowita różnica faz między rozważanymi falami wynosi

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi d}{\lambda}\left(n_1 \sin\alpha - n_2 \sin\beta\right). \tag{3}$$

Konstruktywna interferencja zachodzi gdy różnica faz jest wielokrotnością 2π, czyli gdy

$$\frac{2\pi d}{\lambda}\left(n_1 \sin\alpha - n_2 \sin\beta\right) = 2\pi m. \tag{4}$$

Z tego warunku możemy wyznaczyć $\sin\beta$

$$\sin\beta = \frac{n_1}{n_2}\sin\alpha - m\frac{\lambda}{n_2 d}. \tag{5}$$

Ponieważ α jest małe, λ/d jest małe, n_1, n_2 dla wszystkich znanych materiałów jest rzędu jedności, a m może być równe ± 1, ± 2, prawa strona powyższej równości jest mała, a zatem $\sin\beta$ jest małe i można przyjąć $\sin\beta \approx \beta$. Zatem powyższe równanie można zapisać jako

$$\beta = \frac{n_1}{n_2}\alpha - m\frac{\lambda}{n_2 d}. \tag{6}$$

Z rozważań geometrycznych kąt padania fali na ekran γ jest równy

$$\gamma = \alpha - \beta. \tag{7}$$

Przesunięcie pionowe punktu na ekranie (w porównaniu z przedłużeniem promienia biegnącego w ośrodku (1); przyjmujemy, że dodatnie przesunięcie jest w dół rysunku) jest dane wzorem

$$y = l_2 \operatorname{tg}\gamma. \tag{8}$$

Ponieważ z poprzednich wzorów wynika, że γ jest małe, możemy przyjąć $\operatorname{tg}\gamma \approx \gamma$ i rozważane przesunięcie będzie równe

$$y_m = l_2\left(\alpha - \frac{n_1}{n_2}\alpha + m\frac{\lambda}{n_2 d}\right). \tag{9}$$

Stąd szukana odległość między maksimum m – tego prążka a maksimum prążka zerowego $\Delta y_m = y_m - y_0$ wynosi

$$\Delta y_m = m\frac{\lambda}{n_2 d} l_2. \tag{10}$$

Podstawiając dane liczbowe otrzymamy

$$\Delta y_{\pm 1} = \pm 0{,}11 \text{ m}. \tag{11}$$

Rozwiązanie zadania 2

Ponieważ materiały są połączone szeregowo, to między płytkami płytami płynie prąd o natężeniu

$$I = \frac{US}{\rho_{\mathrm{A}} d_{\mathrm{A0}} + \rho_{\mathrm{B}} d_{\mathrm{B0}}}. \tag{12}$$

Spadki napięcia w warstwach wynoszą odpowiednio $U_{\mathrm{A}} = I\rho_A d_{\mathrm{A0}}/S$ oraz $U_{\mathrm{B}} = I\rho_{\mathrm{B}} d_{\mathrm{B0}}/S$. Zatem natężenie pola elektrycznego w obszarze odpowiednich materiałów wynoszą

$$E_{\mathrm{A}} = \frac{U_{\mathrm{A}}}{d_{\mathrm{A0}}} = \frac{I}{S}\rho_{\mathrm{A}}, \tag{13}$$

$$E_{\mathrm{B}} = \frac{U_{\mathrm{B}}}{d_{\mathrm{B0}}} = \frac{I}{S}\rho_{\mathrm{B}}. \tag{14}$$

Z prawa Gaussa wynika, że ładunki na płytkach wynoszą odpowiednio

$$Q_{\mathrm{A}} = \varepsilon_0 E_{\mathrm{A}} S, \tag{15}$$

$$Q_{\mathrm{B}} = -\varepsilon_0 E_{\mathrm{B}} S. \tag{16}$$

Ponieważ na zewnątrz kondensatora natężenie pola elektrycznego jest równe 0, zewnętrzne pole elektryczne, w którym znajduje się dana płytka ma natężenie odpowiednio $E_{\mathrm{A}}/2$ lub $E_{\mathrm{B}}/2$ Zatem siły elektrostatyczne, jakie działają na każdą z płytek wynoszą odpowiednio

$$F_{\mathrm{A}} = Q_{\mathrm{A}}\frac{E_{\mathrm{A}}}{2} = \frac{\varepsilon_0}{2}\left(\frac{I}{S}\rho_{\mathrm{A}}\right)^2 S, \tag{17}$$

$$F_{\mathrm{B}} = Q_{\mathrm{B}}\frac{E_{\mathrm{B}}}{2} = -\frac{\varepsilon_0}{2}\left(\frac{I}{S}\rho_{\mathrm{B}}\right)^2 S. \tag{18}$$

Zauważmy, że w ogólnym przypadku $F_{\mathrm{A}} + F_{\mathrm{B}} \neq 0$. Jest to spowodowane tym, że pomiędzy materiałami gromadzi się ładunek

$$Q_{\mathrm{AB}} = \varepsilon_0 \left(E_{\mathrm{B}} - E_{\mathrm{A}}\right) S. \tag{19}$$

Ten ładunek znajduje się w zewnętrznym polu elektrycznym $E_{\mathrm{AB}} = \left(E_{\mathrm{A}} + E_{\mathrm{B}}\right)/2$, a zatem działa na niego siła

$$F_{\mathrm{AB}} = Q_{\mathrm{AB}} E_{\mathrm{AB}} = -F_{\mathrm{A}} - F_{\mathrm{B}}. \tag{20}$$

To oznacza, że siła elektryczna rozciągająca warstwę A wynosi $-F_{\mathrm{A}}$ (będzie ona ujemna, czyli tak naprawdę będzie to siła ściskająca), a siła elektryczna rozciągająca warstwę B wynosi po prostu

F_{B} (F_{B} jest ujemne, zatem warstwa B też będzie ściskana). Te siły muszą być równoważone przez odpowiednie siły sprężystości, a zatem

$$F_{\mathrm{A}} = -Y_{\mathrm{A}} \frac{\Delta d_{\mathrm{A}}}{d_{\mathrm{A0}}} S, \tag{21}$$

$$F_{\mathrm{B}} = Y_{\mathrm{B}} \frac{\Delta d_{\mathrm{B}}}{d_{\mathrm{B0}}} S. \tag{22}$$

Czyli muszą być spełnione równości

$$\frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{I}{S} \rho_{\mathrm{A}} \right)^2 S = -Y_{\mathrm{A}} \frac{\Delta d_{\mathrm{A}}}{d_{\mathrm{A0}}} S, \tag{23}$$

$$\frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{I}{S} \rho_{\mathrm{B}} \right)^2 S = -Y_{\mathrm{B}} \frac{\Delta d_{\mathrm{B}}}{d_{\mathrm{B0}}} S. \tag{24}$$

Zatem zmiana odległości między płytkami wynosi

$$\Delta d = -\frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{U}{\rho_{\mathrm{A}} d_{\mathrm{A0}} + \rho_{\mathrm{B}} d_{\mathrm{B0}}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{\mathrm{A}}^2}{Y_{\mathrm{A}}} d_{\mathrm{A0}} + \frac{\rho_{\mathrm{B}}^2}{Y_{\mathrm{B}}} d_{\mathrm{B0}} \right). \tag{25}$$

Znak minus powyżej oznacza, że odległość między płytkami się zmniejszyła – warstwy uległy ściśnięciu. Dla podanych danych liczbowych otrzymujemy

$$\Delta d = 8{,}85 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}. \tag{26}$$

Zauważmy, że gdy $\rho_{\mathrm{A}} = \rho_{\mathrm{B}}$ otrzymamy

$$\Delta d = -\frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{U}{d_{\mathrm{A0}} + d_{\mathrm{B0}}} \right)^2 \left(\frac{d_{\mathrm{A0}}}{Y_{\mathrm{A}}} + \frac{d_{\mathrm{B0}}}{Y_{\mathrm{B}}} \right). \tag{27}$$

W powyższym wzorze wielkość

$$\frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{U}{d_{\mathrm{A0}} + d_{\mathrm{B0}}} \right)^2 = f \tag{28}$$

jest po prostu siłą, z jaką przyciągają się okładki kondensatora płaskiego, podzieloną przez powierzchnię tych okładek kondensatora, natomiast wielkości $-f \frac{d_{\mathrm{A0}}}{Y_{\mathrm{A}}}$ oraz $-f \frac{d_{\mathrm{B0}}}{Y_{\mathrm{B}}}$ odpowiadają zmianie grubości każdej z warstw.

Rozwiązanie zadania 3

Na klocek działają siły: ciężkości mg, sprężystości sprężynki, tarcia T oraz prostopadła do pasa siła reakcji pasa.

W kierunku prostopadłym do pasa transmisyjnego siły się równoważą; w kierunku równoległym do niego równanie ruchu ma postać

$$ma = -kx + T, \tag{29}$$

gdzie x jest odchyleniem od położenia początkowego, natomiast a jest przyspieszeniem klocka. Zauważmy, że nie występuje tu składowa siły ciężkości wzdłuż pasa transmisyjnego – x jest tak zdefiniowane, że dla $x = 0$ ta składowa i siła sprężystości się równoważą.

Siła tarcia jest równa

$$T = \mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha,\ \text{gdy}\ v < v_0, \tag{30}$$

$$-\mu_{\mathrm{s}} mg\cos\alpha \leqslant T \leqslant \mu_{\mathrm{s}} mg\cos\alpha,\ \text{gdy}\ v = v_0, \tag{31}$$

$$T = -\mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha,\ \text{gdy}\ v > v_0, \tag{32}$$

gdzie v jest prędkością klocka względem ściany. Skoro początkowo klocek jest w równowadze i nie porusza się, nie oczekujemy żeby zaszedł przypadek $v > v_0$.

Po uruchomieniu pasa klocek zaczyna się przesuwać zgodnie z kierunkiem ruchu pasa. Zachodzi $v < v_0$, a zatem równanie ruchu przyjmuje postać

$$ma = -kx + \mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha. \tag{33}$$

Zauważmy, że po podstawieniu $x = \widetilde{x} + \mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha/k$ otrzymamy w zmiennej $\widetilde{x}$ zwykłe równanie ruchu harmonicznego. Zatem ruch klocka jest ruchem harmonicznym wokół położenia równowagi $x = x_0$, gdzie

$$x_0 = \frac{\mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha}{k}, \tag{34}$$

z częstością

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{35}$$

Ponieważ w chwili początkowej klocek spoczywa i jest wychylony na odległość $\mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha/k$ od położenia równowagi, amplituda tych drgań jest równa właśnie x_0. Po uwzględnieniu warunków początkowych zależność położenia x od czasu t jest następująca

$$x = x_0\left(1 - \cos\omega t\right), \tag{36}$$

Teoretyczna maksymalna prędkość w takim ruchu wynosi

$$v_{\max} = x_0\omega = \sqrt{\frac{m}{k}}\mu_{\mathrm{k}} g\cos\alpha. \tag{37}$$

Można ją uzyskać z równania (36) lub z efektywnej zasady zachowania energii $mv_{\max}^2/2 = \frac{(\mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha)^2}{2k}$; „efektywnej" dlatego, że ze względu na występowanie tarcia poślizgowego energia mechaniczna nie jest zachowana, ale związana z nią siła jest stała i możemy tę siłę z punktu widzenia klocka traktować jako siłę zachowawczą.

Jeśli $v_{\max} < v_0$, to klocek będzie stale ślizgał się po pasie. Ruch będzie w tym przypadku zwykłym ruchem harmonicznym z okresem $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$; skrajne położenia klocka w tym ruchu są następujące

$$x_{\min} = 0, \tag{38}$$

$$x_{\max} = \frac{2\mu_{\mathrm{k}} mg\cos\alpha}{k}. \tag{39}$$

Jeśli $v_{\max} \geqslant v_0$, to rozwiązanie (36) (oraz równanie ruchu (33)) obowiązuje tylko do chwili, gdy $v = v_0$; oznaczmy odpowiednie położenie jako x_1. W tym momencie siła tarcia maleje do takiej wartości, która równoważy siłę sprężystości, a klocek zaczyna poruszać się z prędkością pasa transmisyjnego (czyli spoczywa względem niego). Ten ruch powoduje dalszy wzrost napięcia sprężyny, aż do momentu, gdy efektywna siła sprężystości kx będzie równa maksymalnej sile tarcia $\mu_\mathrm{s} mg\cos\alpha$. Zajdzie to przy wychyleniu

$$x_\mathrm{s} = \frac{\mu_\mathrm{s} mg\cos\alpha}{k}. \tag{40}$$

Ponieważ prędkość klocka jest niezerowa i dodatnia, klocek nadal będzie się oddalał od ściany, ale jego prędkość spadnie poniżej prędkości v_0, a zatem znowu będzie obowiązywać równanie ruchu (33) (ale już nie (36)). Maksymalną odległość x_max na jaką oddali się klocek wyznaczymy z efektywnej zasady zachowanie energii

$$\frac{mv_0^2}{2} + \frac{k\left(x_\mathrm{s} - x_0\right)^2}{2} = \frac{k\left(x_\mathrm{max} - x_0\right)^2}{2}. \tag{41}$$

czyli

$$x_\mathrm{max} = \sqrt{\frac{m}{k}v_0^2 + \left(x_\mathrm{s} - x_0\right)^2} + x_0 \tag{42}$$

lub w jawnej postaci

$$x_\mathrm{max} = \sqrt{\frac{m}{k}}\sqrt{v_0^2 + \frac{m}{k}\left(\mu_\mathrm{s} - \mu_\mathrm{k}\right)^2 g^2\cos^2\alpha} + \frac{m\mu_\mathrm{k} g\cos\alpha}{k} \tag{43}$$

Po osiągnięciu maksymalnej odległości klocek zacznie wracać w kierunku ściany; ponieważ zwroty prędkości klocka i pasa transmisyjnego są przeciwne, stale będzie obowiązywało równanie ruchu (33) – będzie to ruch harmoniczny z amplitudą $x_\mathrm{max} - x_0$ względem położenia x_0 z częstością ω. Biorąc pod uwagę warunki początkowe, zależność x od czasu będzie następująca

$$x = \left(x_\mathrm{max} - x_0\right)\cos\omega\left(t - t_\mathrm{max}\right) + x_0, \tag{44}$$

gdzie t_max odpowiada rozważanej chwili największego oddalenia klocka od ściany. Zgodna z powyższym równaniem zależność prędkości od czasu jest następująca

$$v = -\left(x_\mathrm{max} - x_0\right)\omega\sin\omega\left(t - t_\mathrm{max}\right) \tag{45}$$

Największe zbliżenie klocka do ściany odpowiada położeniu

$$x_\mathrm{min} = -x_\mathrm{max} + 2x_0, \tag{46}$$

czyli w jawnej postaci

$$x_\mathrm{min} = -\sqrt{\frac{m}{k}}\sqrt{v_0^2 + \frac{m}{k}\left(\mu_\mathrm{s} - \mu_\mathrm{k}\right)^2 g^2\cos^2\alpha} + \frac{m\mu_\mathrm{k} g\cos\alpha}{k}. \tag{47}$$

Po największym zbliżeniu klocek znowu zaczyna się oddalać od ściany. Sytuacja jest analogiczna, jak w pierwszym omawianym etapie ruchu; ruch jest harmoniczny aż do momentu, gdy $v = v_0$.

Odpowiednią odległość x_2 można wyznaczyć na podstawie równań (44), (45), efektywnej zasady zachowania energii $mv_0^2/2 + k\left(x_2 - x_0\right)^2/2 = k\left(x_\mathrm{max} - x_0\right)^2/2$, lub po prostu z faktu, że jest ona symetryczna do x_s względem x_0. Jest ona równa

$$x_2 = -x_\mathrm{s} + 2x_0. \tag{48}$$

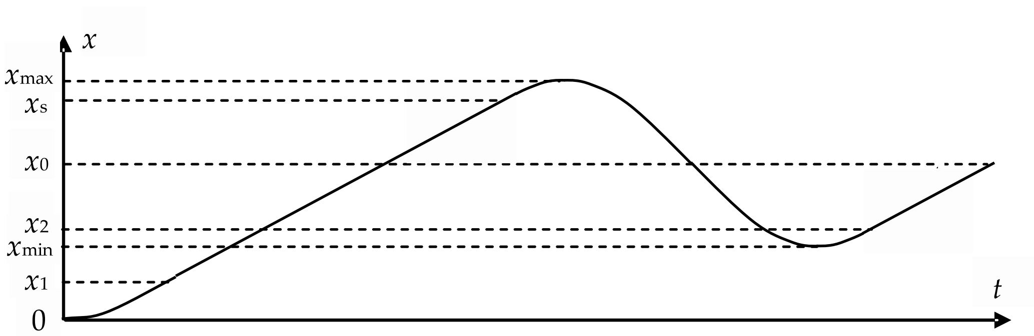
Ta wielkość musi być mniejsza od x_0, gdyż tuż przed rozważanym położeniem klocek przyspiesza. Zauważmy, że w tym punkcie wartość siły sprężystości $|kx_2| = |-\mu_\mathrm{s} + 2\mu_k|\, mg\cos\alpha$ jest na pewno mniejsza od maksymalnej siły tarcia $\mu_\mathrm{s} mg\cos\alpha$, a więc na pewno klocek przestanie przyspieszać.

Od tego momentu ruch zaczyna być okresowy: klocek porusza się z prędkością v_0 (przesuwając się razem z pasem transmisyjnym) aż do osiągnięcia odległości x_s, a potem znowu ruch jest harmoniczny, aż od osiągnięcia w trakcie oddalania od ściany położenia $x = x_2$.

Podsumowując

W przypadku $\sqrt{\frac{m}{k}}\mu_\mathrm{k} g\cos\alpha < v_0$ skrajne położenia klocka są dane wzorami (38), (39). Ruch jest zwykłym ruchem harmonicznym.

W przypadku $\sqrt{\frac{m}{k}}\mu_\mathrm{k} g\cos\alpha \geqslant v_0$ skrajne położenia klocka są dane wzorami (47), (43). Ruch jest częściowo ruchem harmonicznym, a częściowo jednostajnym, a okres tego ruchu jest dłuższy niż okres ruchu harmonicznego $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Przykładowy ruch w tym przypadku jest przedstawiony na rysunku poniżej. Zauważmy, że x_min może być dodatnie - tak jak na rysunku, ale może też być ujemne.



Dla podanych wartości liczbowych otrzymujemy ze wzoru (37) $v_\mathrm{max} = 1{,}07$ m/s. Zatem w przypadku a) mamy do czynienia z ruchem harmonicznym i otrzymujemy

$$x_\mathrm{min} = 0 \text{ m}, \; x_\mathrm{max} = 0{,}68 \text{ m}. \tag{49}$$

W przypadku b) zachodzi $v_0 < v_\mathrm{max}$ i mamy do czynienia z ruchem częściowo harmonicznym, częściowo jednostajnym. Otrzymujemy

$$x_\mathrm{min} = 0{,}16 \text{ m}, \; x_\mathrm{max} = 0{,}52 \text{ m}. \tag{50}$$