

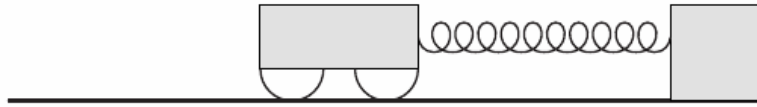
Tentamen Fysische Systemen voor TBK

5 - april - 2012, 9.00-12.00 uur

AANWIJZINGEN

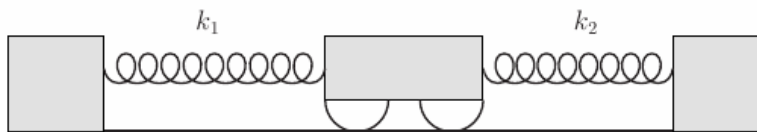
1. *Maak de vijf opgaven op vijf losse bladen*
2. *Vermeld naam en studentnummer duidelijk rechts bovenaan ieder ingeleverd blad, samen met welke vraag op dit blad beantwoord wordt.*
3. *Uitwerkingen, die bij een ander blad op staan worden niet meegenomen in de beoordeling.*
4. *Binnen de opgave kan het van belang zijn om de vragen in de gegeven volgorde te beantwoorden.*
5. *Ga systematisch te werk en controleer steeds uw antwoord. Indien u vermoedt dat u een rekenfout hebt gemaakt, geef dit aan.*
6. ***Schrijf leesbaar! Onleesbare tekst wordt niet beoordeeld!***

Vraag 1 Mechanische oscillaties zonder demping (20pt)



Een karretje met een massa van 1 kg zit met een veer verbonden aan een vast punt. De veer heeft een veerconstante $k = 25 \text{ N/m}$ (Zie figuur) Neem aan dat er geen wrijving is. We brengen dit systeem uit de evenwichtspositie door het karretje 0.5 m naar rechts te duwen en los te laten.

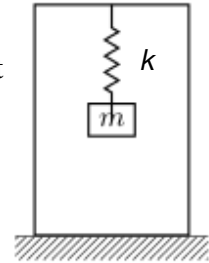
- Geef de balans van de krachten, die op het karretje werken. Schrijf dit als een differentiaalvergelijking. (4 pt)
- Laat zien dat $x(t) = A \cos(\omega_0 t)$ een oplossing is van de differentiaalvergelijking. Wat is de waarde voor de eigenfrequentie ω_0 ? (4pt)
- Geef de maximale versnelling, die het karretje ondergaat. Op welk punt in de periode van de trilling vindt dit plaats? (4 pt)



- Beschouw nu de situatie in het bovenstaande figuur. Geef opnieuw de balans van de krachten in de vorm van een differentiaalvergelijking. Neem $k_1 = 25 \text{ N/m}$ en $k_2 = 11 \text{ N/m}$. Wat is nu de eigenfrequentie ω_0 ? (4 pt)
- Bepaal de totale energie van dit systeem. (4 pt.)

Vraag 2 Mechanische trilling met demping – de Seismograaf (20pt)

De Seismograaf is een instrument dat bewegingen van de aardkorst registreert. Deze bewegingen kunnen trillingen zijn, veroorzaakt door bijvoorbeeld een aardbeving, vulkanische activiteit of een passerende vrachtwagen. In de afbeelding hiernaast is een simpele seismograaf schematisch weergegeven. Deze bestaat uit een rigide raamwerk dat in de aarde is verankerd, een veer met veerconstante k . Aan de veer hangt een gewicht met massa m . Volgens de tweede wet van Newton zal, gezien vanuit de aarde, een beweging van de aardkorst resulteren in een kracht op de massa, gegeven door



$$F = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (1)$$

Hierbij is y de uitwijking van de aardkorst in de verticale richting. Door deze kracht wordt de massa in beweging gebracht. De uitwijking van de massa in de verticale richting ten opzichte van het raamwerk noemen we x . Deze voldoet aan de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0 x(t) = -\frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2)$$

In deze opgave nemen we aan dat de uitslag van de aardkorst de cosinus volgt, $y(t) = B_0 \cos(\omega t)$. Een oplossing voor de bovenstaande differentiaalvergelijking is dan:

$$x(t) = A(\omega) \cos(\omega t - \alpha) \quad (3)$$

- Wat is de eigenfrequentie ω_0 voor dit systeem? En wat is de dimensie van ω_0 ? U hoeft geen afleiding te geven. (2 pt)
- Een typische lange golf seismograaf heeft een periode van 30 seconden en een kwaliteitsfactor $Q = 20$. Schets het verloop van de amplitude s voor een lange golf seismograaf. (3 pt)

Hint: Maak gebruik van het feit de breedte van de curve op $A = \frac{A_{\max}}{\sqrt{2}}$ gelijk is aan $\frac{\omega_0}{Q}$.

- Wat is de grote van de dempingsfactor van de lange golf seismograaf? Vergeet niet de eenheid te vermelden. (2 pt)

Hint: De kwaliteitsfactor voor een massa-veer systeem is gelijk aan $Q = \frac{\omega_0}{2\gamma}$

- Noem een bron van demping voor dit systeem. (1 pt)
- De amplitude van de bovenstaande oplossing is gegeven door

$$A(\omega) = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2}} \quad (4)$$

Gebruik Newton's tweede wet om aan te tonen dat A te schrijven is als (3 pt)

$$A(\omega) = \frac{-\omega^2 B_0}{m\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2) + 4\gamma^2 \omega^2}} \quad (5)$$

- f) Een aardbeving veroorzaakt een seismische trilling met een periode van 40 seconden en een amplitude van $3.0 \cdot 10^{-6}$ m. Hoe groot is de uitslag van de veer? (2 pt)
- g) In de buurt van de seismograaf ontploft een gasfles. Dit veroorzaakt een uitslag van het aardoppervlak van $1.0 \cdot 10^{-5}$ m. Hieronder staan twee mogelijke oplossingen voor de uitslag van de massa. Welke van de twee oplossing zal de seismograaf registreren als gevolg van de ontploffing? Motiveer je antwoord. (2 pt)

$$x(t) = A(\omega) \cos(\omega t - \alpha) \quad (6)$$

$$x(t) = A(\omega) \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad (7)$$

- h) Wat is de maximale uitslag van de seismograaf? Op welk tijdstip is de amplitude $1.0 \cdot 10^{-6}$ m? (2 pt)

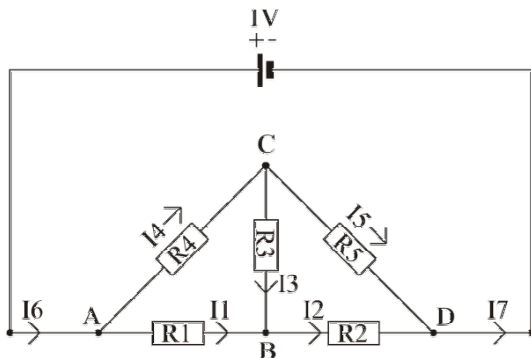
Vraag 3 Elektrisch circuit - gelijkspanning (20pt)

Voor deze vraag ga je een elektrisch circuit analyseren. Schrijf steeds duidelijk op hoe je aan je antwoord komt en vermeld steeds duidelijk alle tussenstappen.

- a) Geef de eerste en de tweede wet van Kirchhoff en leg in een paar korte zinnen uit wat ze betekenen. (2 pt.)

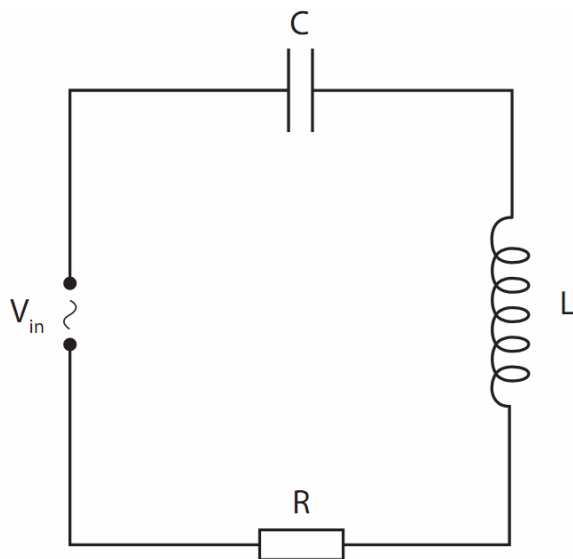
Gebruik voor de volgende vragen het onderstaande schema. Gegeven is dat $R_4=R_5=4\Omega$ en $R_1=R_2=R_3=2\Omega$. De batterij geeft een spanning $V_{in}=1$ volt. Met deze gegevens zijn alle stromen en spanningen te berekenen.

- b) Gebruik de van toepassing zijnde wet van Kirchhoff om vergelijkingen af te leiden voor de spanningen in de volgende stroomkringen: lus ABCA en lus BDCB.
- c) Gebruik de van toepassing zijnde wet van Kirchhoff om vergelijkingen af te leiden voor de stromen in punt B en C. (3 pt.)



- d) Gebruik de antwoorden van deelvragen b en c om aan te tonen dat de stroom $I_3=0$.
HINT: Vul in alle opgestelde vergelijkingen van vraag b en c de gegeven waarden voor de weerstanden in en werk de vergelijkingen (voor zover je dat nog niet gedaan had) om naar vergelijkingen die links van het is-gelijk-teken alleen de stroom I_3 hebben staan.
- e) Bereken de spanning in het punt B, gebruik makend van het feit dat $I_3=0$. Als dit niet lukt probeer dan tenminste te beredeneren wat de spanning in punt B zou kunnen zijn om een deel van de punten te behalen. (3 pt)
- f) Leg uit wat er gebeurt als de waarden van R_1 en R_2 beide twee keer zo groot worden terwijl de rest van het circuit hetzelfde blijft. Vermeld hierbij in ieder geval wat het gevolg hiervan is voor de stromen I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 en voor de spanningen V_B en V_C . (3 pt)
- g) Bereken de waarde van de vervangingsweerstand tussen punt A en punt D, waardoor alle vijf weerstanden kunnen worden vervangen en tegelijkertijd de stroom door de batterij hetzelfde blijft. (3 pt.)

Vraag 4 Elektrisch circuit - wisselspanning (20pt)



Beschouw het bovenstaande elektrische circuit (LRC circuit). DE verschillende componenten hebben de respectievelijke waarden: $R=10\ \Omega$, $L= 150\ \text{mH}$, $C= 15\ \mu\text{F}$, $V_{in} = 10 \cdot e^{i\omega t}$ en V_{in} oscilleert met een frequentie van 100Hz.

- a) Bereken de totale impedantie, Z , van het bovenstaande circuit. (4 pt.)
- b) Bereken de spanningsoverdracht $|A_R| = |V_R / V_{in}|$ (4 pt.)

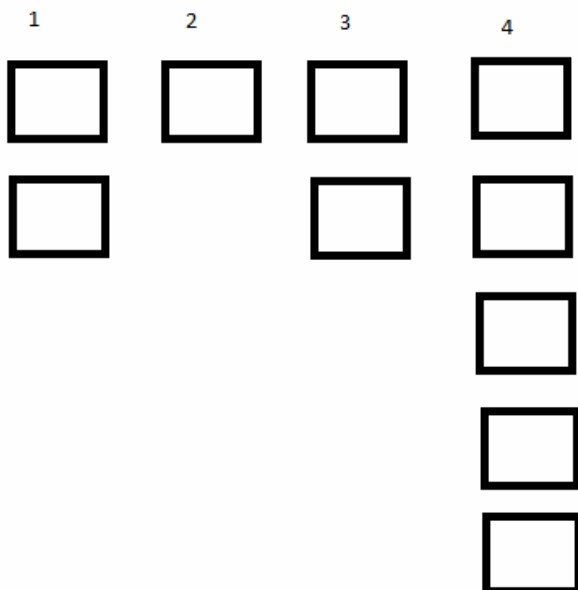
- c) Pas de tweede wet van Kirchhoff toe op het hierboven getekende circuit met de spanningsbron uitgeschakeld. In andere woorden $V_R(t)+V_C(t)+V_L(t)=0$ en leid daaruit de differentiaalvergelijking af, die analoog is aan $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$ voor het mechanische systeem. Wat vind je vervolgens voor γ en ω_0 in deze differentiaalvergelijking? (4 pt.)
- d) Laat zien dat $I = I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \sin(\omega t)$ een oplossing is voor de in c) gevonden differentiaalvergelijking onder de voorwaarde dat $\omega = \omega_{res} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L}\right)^2}$ (4 pt.).

We hebben nu twee maal hetzelfde elektrische circuit zoals hierboven gegeven.

- e) Gebruik de in d) gevonden uitdrukking voor ω om het verschil in eigenfrequenties (**in Hz!**) te berekenen, tussen bovenstaand circuit en een tweede circuit, waarin de spoel L vervangen wordt door één van 375 mH. (4 pt.)

Opgave 5 Bedrijfsdynamica (20 pt.)

Een fietsenfabriek bestaat uit 4 stations, zoals te zien in onderstaande figuur. De stations 1,2, 3 en 4 hebben een bewerkingstijd van respectievelijk 3, 2, 5 en 8 uur.



- a) Geef de definitie van de bottleneck rate. Bereken de productiesnelheid per station en geef aan welk station is het bottleneck station? (3 pt.)
- b) Wanneer het proces draait op de snelheid van de bottleneck (bottleneck rate), welk station heeft de langste rij? Bereken per station de wachtrij. Welke formule wordt gebruikt om lengte van de rij uit te rekenen? Hoe heet deze formule? (4 pt.)

- c) Geef of leidt af de formules voor de best case performance voor zowel de doorlooptijd (CT) als de maximale productie (TH). (Let op de formules voor een WIP-waarde (w) boven en onder de kritische WIP (W0) verschillen.) Bereken dit ook voor deze lijn getalsmatig (alleen w blijft een parameter). (4 pt)

De fietsenfabriek maakt deel uit van een supply chain. Als we de directe omgeving van de fietsenfabriek beschouwen, zien we dat dat zij T toeleveranciers hebben. Daarnaast worden producten geleverd aan K klanten.

- d) Teken een blokschema, waarmee dit deel van de supply chain beschreven kan worden. Maak je beschrijving zo abstract mogelijk. Geef in het diagram de termen aan, die de goederenstroom vertegenwoordigen. Om welke grootheden gaat het, benoem deze. (3 pt.)

Oscillatie die in dit systeem op kan treden is weer te geven in de volgende formule:

$$\frac{d^2 q_i(t)}{dt^2} + \frac{(\beta + \varepsilon)}{T} \frac{dq_i(t)}{dt} + \frac{\alpha}{T} q_i(t) = \frac{1}{T} \left(\alpha \cdot q_{i+1}(t) + \beta \frac{dq_{i+1}(t)}{dt} \right)$$

- e) Waar staat q_i voor? Wat vertegenwoordigt de term rechts van het isgelijktteken? Is dit een logische aandrijving van een bedrijfskundig systeem? Motiveer je antwoord. (3 pt.)
- f) Geef drie voorbeelden van analogieën tussen een bedrijfskundig systeem en een elektrisch circuit (mag ook in termen van parallellen in wetten). Geef concrete voorbeelden. (3 pt.)

Uitwerking opgave 1:

a) $F_k + F_{kin} = 0$, dus: $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$

b) $x(t)$ invullen in de differentiaal vergelijking. De eigenfrequentie $\omega_0 = \sqrt{k/m} = \sqrt{25/1} = 5 \text{ rad s}^{-1}$.

c) $a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t)$ is maximaal voor $\cos = 1$, dus $a_{max} = A\omega_0^2 = 0.5 * 25 = 12.5 \text{ m s}^{-2}$.

Dit vindt plaats wanneer de uitwijking maximaal is ($t = 0 + 2n\pi/\omega_0$, met n een geheel getal).

d) $F_{k1} + F_{k2} + F_{kin} = 0$, dus: $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k_1 + k_2}{m}x = 0$. De eigenfrequentie

$$\omega_0 = \sqrt{(k_1 + k_2)/m} = \sqrt{36/1} = 6 \text{ rad s}^{-1}.$$

e) $E_{tot} = E_{kin} + E_{pot}$. Wanneer E_{kin} maximaal is, is $E_{pot} = 0$. Dus $E_{tot} = 1/2 m v_{max}^2$. $v_{max} = A\omega_0 = 3 \text{ m/s}$.

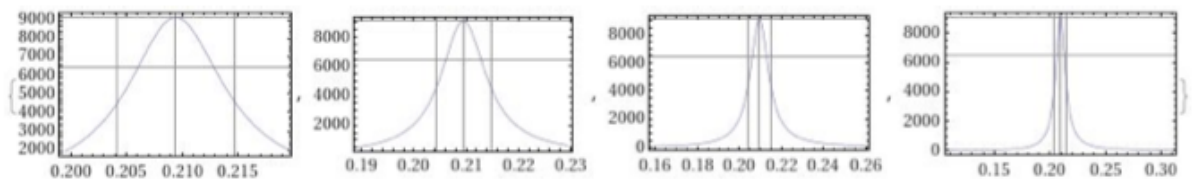
Dus $E_{tot} = 1/2 * 1 * 3^2 = 4.5 \text{ kg m}^2\text{s}^{-2}$.

Uitwerking opgave 2:

a) $\omega_0 = \sqrt{k/m}$

dimensie s^{-1}

b)



c)

$$\gamma = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{0.209}{40} = 5.23 * 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

d) Interne wrijving in de veer, wrijving van de massa en/of veer met de lucht, absorptie van de trillingen in het raamwerk, absorptie van de trillingen door de aarde.

e)

$$F = m \frac{d^2y}{dt^2} = -m\omega^2 B_0 \cos(\omega t - \alpha)$$

$$\frac{F_0}{m} = -\omega^2 B_0$$

f)

$$\omega = \frac{2\pi}{40} = 0.157 \text{ rad/s}$$

$$B_0 = 3.0 * 10^{-6} \text{ m Invullen geeft } A(\omega) = 66.5 * 3 * 10^{-6} = 2.00 * 10^{-4} \text{ m}$$

g) De seismograaf registreert een trilling van de tweede vorm. Er is geen sprake van aandrijving omdat de gasfles de aarde slechts kort in beweging brengt, korter dan de periode van het instrument.

h) 10^{-5} m en $\log(10)=2.3$ s

Uitwerking opgave 3:

a) Eerste wet van Kirchhoff: $\sum I = 0$

Tweede wet van Kirchhoff: $\sum V = 0$

b) We willen de spanningsvallen weten, dus we gebruiken KH#2:

1. ABCA: $I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_4 R_4 = 0$

2. BDCB: $I_2 R_2 - I_5 R_5 + I_3 R_3 = 0$

c) We tellen gewoon de stromen op in punt B, C:

3. Node C: $I_3 = I_4 - I_5$ of ook $I_4 = I_3 + I_5$

4. Node B: $I_3 = I_2 - I_1$ of ook $I_2 = I_3 + I_1$

d) Uitwerken door bovenste drie vergelijkingen handig te combineren:

Invullen van $R_4 = R_5 = 4\Omega$ en $R_1 = R_2 = R_3 = 2\Omega$ geeft:

5. ABCA: $2I_1 - 2I_3 - 4I_4 = 0$

6. BDCB: $2I_2 - 4I_5 + 2I_3 = 0$

7. Node C: $I_3 = I_4 - I_5$

8. Node B: $I_3 = I_2 - I_1$

Alles omwerken naar $I_3 = \dots$:

9. ABCA: $I_3 = I_1 - 2I_4$

10. BDCB: $I_3 = 2I_5 - I_2$

11. Node C: $I_3 = I_4 - I_5$

12. Node B: $I_3 = I_2 - I_1$

Nu bovenstaande vergelijkingen optellen:

13. $4I_3 = I_1 - 2I_4 + 2I_5 - I_2 + I_4 - I_5 + I_2 - I_1$

14. $I_3 = (I_5 - I_4)/4$

Maar, we hadden direct uit Kirchhoff al (7): $I_3 = I_4 - I_5$.

Je kan dus meteen zien dat $I_3 = 0$. Als je wilt kan je ze nog optellen:

$$5I_3 = 4 \cdot (I_5 - I_4) / 4 + I_4 - I_5 = 0, \text{ oftewel } I_3 = 0.$$

Je kan ook direct naar de oplossing door gebruik te maken van de symmetrie. Dat zou een puntje waard zijn. Meer punten wellicht als de student ook duidelijk maakt dat dit komt omdat, indien $R_3 = \infty$ (eg, weggelaten), dat dan de punten C, B het midden vormen van een spanningsdeler met gelijke armen waardoor geldt dat $V_C = V_B$.

- e) $I_3 = 0$. De spanning in punt B word dan alleen beïnvloed door de spanning V_{AD} en de weerstanden R_1 en R_2 . Dat is een simpele spanningsdeler met twee gelijke armen:

$V_{BD} = V_{AD} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 0.5 V_{AD} = 0.5 \text{ V}$. Dit kan uiteraard ook beredeneerd worden uit de symmetrie, aangezien alles links van punt B het zelfde is als rechts van punt B.

- f) Als zowel R_1 als R_2 met gelijke factor veranderd worden dan veranderd er niks aan de spanning in punt B. Als $R_3 = \infty$ dan is meteen in te zien dat de spanning $V_{CD} = V_{BD} = V_{IN} / 2$. Het aan elkaar knopen van de bovenste helft met de onderste door R_3 zal geen effect hebben omdat de spanningen in B en C toch al hetzelfde waren. Het enige dat veranderd is de stroom $I_1 = I_2$. Die gaat door de helft. Dus:

Gelijk blijven: I_3, I_4, I_5, V_C, V_B

Veranderen: $I_2' = 0.5 \cdot I_2^0, I_1' = 0.5 \cdot I_1^0$.

- g) Heel fundamenteel kan je met Kirchoff #1 in punt A beginnen:

$$15. I_6 = I_1 + I_4$$

Dan merk je op dat:

$$16. I_4 = I_5$$

$$17. I_1 = I_2$$

Gebruik makend van

$$18. V_{AD} = I_1 \cdot (R_1 + R_2) \rightarrow I_1 = V_{AD} / (R_1 + R_2)$$

$$19. V_{AD} = I_4 \cdot (R_4 + R_5) \rightarrow I_4 = V_{AD} / (R_4 + R_5)$$

Dit combineren met (15) geeft:

$$20. I_6 = V_{AD} \cdot (1 / (R_1 + R_2) + 1 / (R_4 + R_5))$$

Oftewel:

$$21. R_V = (1 / (R_1 + R_2) + 1 / (R_4 + R_5))^{-1}$$

Invullen:

$$22. R_V = 1 / (1/4 + 1/8) = 1 / (3/8) = 2 + (2/3) \Omega = 2.67 \Omega$$

In de praktijk merk je natuurlijk gewoon op dat het systeem bestaat uit twee gelijke delen (links/rechts) elk bestaande uit weer 2 parallele weerstanden: 4 en 2 ohm. De twee parallele weerstanden geven samen 1.33Ω , totaal 2.67Ω .

Uitwerkingn opgave 4:

a) $Z = R + i\omega L - i/(\omega C)$

$$Z = 10 + i(200\pi \cdot 150e-3 - 1/(200\pi \cdot 15e-6)) = 10 - 11,9i$$

b) $V_R/V_{in} = Z_R / (Z_C + Z_L + Z_R) = i\omega L / (R + i(\omega L - 1/(\omega C)))$

$$\omega = 2\pi \cdot f = 200\pi \text{ rad/s}$$

$$= 10 / (10 + i(200\pi \cdot 150e-3 - 1/(200\pi \cdot 15e-6)))$$

$$= 10 / (10 - 11,9i) = (100 + 119i) / (100 + (11,9)^2)$$

$$= (100 + i \cdot 119) / (241,6)$$

$$|V_R/V_{in}| = ((100/241,6)^2 + (119/241,6)^2)^{1/2} = 0.64$$

c) $I \cdot R + \frac{Q}{C} + L \frac{dI}{dt} = 0$

$$I \cdot R + \frac{1}{C} \int I dt + L \frac{dI}{dt} = 0$$

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = 0$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = 0$$

$$\gamma = \frac{R}{2L} = \frac{10}{2 \cdot 150E-3} = 33,3 \frac{\Omega}{H} \quad \text{en} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = 666,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

d) $\frac{dI}{dt} = -\frac{R}{2L} \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \sin(\omega t) + \omega I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \cos(\omega t)$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} = \left(\frac{R}{2L}\right)^2 \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \sin(\omega t) - \frac{R}{2L} \cdot \omega I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \cos(\omega t)$$

$$- \omega I_0 \cdot \frac{R}{2L} \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \cos(\omega t) - \omega^2 I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \cdot \sin(\omega t)$$

Invullen in de differentiaal vergelijking geeft de volgende twee vergelijkingen:

$$\left[\left(\frac{R}{2L}\right)^2 \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} - \omega^2 I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} - \frac{R^2}{2L^2} \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} + \omega_0^2 \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \right] \cdot \sin(\omega t) = 0$$

$$\left[\frac{R\omega I_0}{L} \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} - \frac{R}{L} \cdot \omega I_0 \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}} \right] \cdot \cos(\omega t) = 0$$

De tweede vergelijking is inderdaad gelijk aan 0.

Uit de eerste vergelijking krijgen we:

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \omega^2 - \frac{R^2}{2L^2} + \omega_0^2 = 0$$

geeft:

$$-\frac{R^2}{2L^2} - \omega^2 + \omega_0^2 = 0 \quad \rightarrow \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \frac{R^2}{2L^2} \quad \rightarrow \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{R}{L}\right)^2}$$

$$e) \omega_{\text{verschil}} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{R}{L_1}\right)^2} - \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{R}{L_2}\right)^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$F_{\text{verschil}} = 38.8 \text{ Hz}$$

Uitwerking opgave 5:

- a) Snelheid van het station met de hoogste bezettingsgraad of utilisatie
Station 1 0,67

Station 2 0,5

Station 3 0,4 bottleneck

Station 5 0,625

- b) Station 1 1,2
Station 2 0,8

Station 3 2,0

Station 4 3,2 langste rij

WIP = CT.TH

Wet van Little

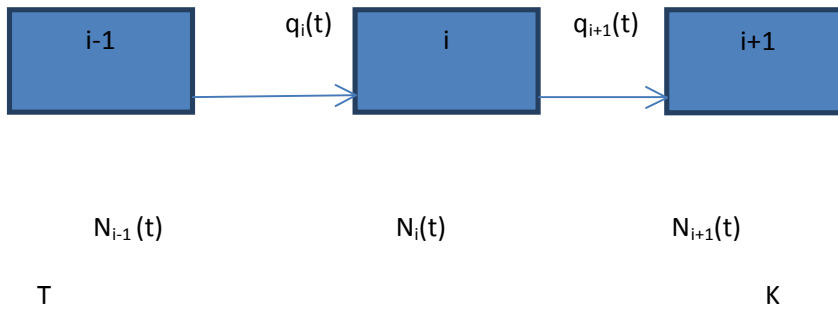
- c) $CT_{\text{best}} = T_0 w_{\leq} W_0$
 w/r_b anders

$TH_{\text{best}} = w/T_0 w_{\leq} W_0$

r_b anders

$T_0 = 18$, $r_b = 0,4$. Nog en keer invullen in bovenstaande vier formules

d)



Of stapeling van T blokjes

Voorraad & leversnelheid

e) Verandering in leversnelheid t.o.v. evenwichtssituatie

De klantvraag en veranderingen daarin. Ja, MTO

f) Meerder mogelijkheden:

Voorbeeld: $V=I.R$ & $WIP = CT.TH$

Bottleneck die functioneert als een weerstand in het systeem