

Válasz
Dr. Béda Péter bírálata

MTA doktori értekezés:
Dr. Kollár László E.

Távvezetékek lengése szélsőséges időjárási körülmények között

Köszönöm Dr. Béda Péternek, az MTA doktorának, alapos bíráló munkáját, az értekezés véleményezését, és a tézisek pozitív értékelését.

Válasz a bíráló formai észrevételeire, a tézisek értékelésére

Bíráló megjegyzi, hogy a tézisek terjedelmesek, sok esetben több oldalasak. Elképzelhető, hogy könnyebben érthető lett volna a tézisek rövidebb megfogalmazása, de arra figyeltem, hogy egy tézis ne legyen több oldalas. A 2. 3. és 4. fejezet mindegyikének végén 2-2 tézis szerepel, és a 2 tézis együttesen nem hosszabb 1,5 oldalnál. Az igaz, hogy a kisebb méretű téziszüzetben a tézisek hosszabbak, de ott a tézisek kibővített verziója található, esetenként ábrákkal vagy egyenletekkel. Megköszönöm a bírálónak a tézisek rövid összegzését, amelyek lényegében jól emelik ki a tézisek lényegét.

Bíráló nem foglal állást az 1. és 2. tézis elfogadására vonatkozóan, viszont pozitívan értékeli az alkalmazott modell számítási eljárásának bemutatását és a kísérletek leírását, és ez alapján támogatni tudja a tézisek elfogadását. Megköszönöm az 1. és 2. tézissel kapcsolatos pozitív véleményeket.

A 3. tézis bíráló általi megfogalmazása jól rövidíti le az értekezésben szereplő szöveget, lényegében a számszerű eredmények elhagyásával. A magyar szaknyelvben nem mindig egyértelmű a távvezetékekre vonatkozó magyar megfelelőt megtalálni, pl. tudomásom szerint a magyar szaknyelv nem használja az „alvezető” kifejezést, de az „ugrási magasság” kifejezéssel sem találkoztam. Ezek figyelembevételével az alábbi pontosítással fogalmazom meg a 3. tézis rövidített összefoglalóját. *“Numerikus modellt fejlesztettem a kötegeltekt vezetékeken a jéglehullás dinamikus hatásainak vizsgálatára. Ez egy meglévő modell továbbfejlesztését jelenti, abban nemlineáris rugalmas tulajdonságokkal rendelkező távtartó modell bevezetésével. A távtartók számának növelése csökkenti a vezető maximális ugrását a terheletlen helyzet felett, de a köteg elfordulását nem. A páros számú távtartók nagyobb maximális süllyedést eredményeznek a terheletlen pozíció alá, míg a páratlan számú távtartók alkalmazása esetén ez az elmozdulás minimális eltérést mutat. Több vezető egy kötegben csökkenti a rezgés kitérését, viszont a vezetőket feszítő erő valamivel alacsonyabb az egyedülálló vezetőknél rezgés közben. A maximális ugrás és süllyedés a terheletlen helyzet felett és alatt közelíthetők a jégvastagság és a távtartók közötti távolság hatványfüggvényeiként.”* Bíráló jól látja, hogy a kismintás kísérletek szerepe a numerikus modell validálása volt, és elfogadom, hogy egy rövidített tézist megelőző hosszabb megfogalmazásban szerepelhettek volna a kísérleti eredmények is. Bár hozzá kell tenni, hogy az csak közvetve ad információt a teljes méretű távvezetékek dinamikus viselkedéséről.

A 4. tézis rövidített verziója is összefoglalja a lényegét, egy mondatot gondolok még fontosnak, ami arra utal, hogy milyen jég lehullási folyamatokat modelleztem. *„Kidolgoztam egy módszert különböző jég lehullási folyamatok szimulálására, ezek a (i) hirtelen leválás, (ii) terjedő*

leválás, és (iii) terjedő leválás nagy jégdarabok későbbi lehullásával, ami többlet terhelést okoz. A szimulációs eredmények azt mutatják, hogy a fázisok közötti távtartók használatával körülbelül felére csökkenthető a vezetők visszapattanási magassága a terhelt helyzetük felett. A különböző leválási jelenségeket összehasonlítva azt találtam, hogy egyetlen vezeték esetén nincs jelentős különbség a visszapattanási magasságok között a hirtelen leválás és a terjedő leválás esetén. A visszapattanási magasság azonban 10-30%-kal magasabb a terjedő leválás után, amelyet nagy jégdarab lehullása követ. A fázisok közötti távtartókkal összekapcsolt vezetékeknél, ha a terjedő leválást nagy jégdarab lehullása követi, akkor a visszapattanási magasság 10-30%-kal magasabb mint a terjedő leválás esetén, és további 10-30%-kal magasabb hirtelen leválás után.”

Az 5. és 6. tézis bíráló által javasolt rövidítése szintén jól foglalja össze a tézisekben közölt eredmények lényegét. Köszönöm bírálónak a tézisek pozitív értékelését.

Válasz a részletes bírálatban megfogalmazott észrevételekre, kérdésekre

Teljesen igaz a bíráló megjegyzése arra vonatkozóan, hogy a szélsőséges időjárási körülmények alatt nemcsak a jegesedést, hanem a szél hatását is értjük. Az is igaz, hogy a 3. fejezetben a szél hatását csak összefoglaltam, és a fejezet benne a numerikus modellezés leírásával a jég lehullását követő lengésekre fókuszál. Az általánosabb címválasztás oka az, hogy viszont a 4. fejezetben a kis kitérésű, nagy frekvenciájú lengéseket a szél okozza, és a 4.1 valamint a 4.3 alfejezet is az ilyen lengések csillapítását tárgyalja.

1. kérdés

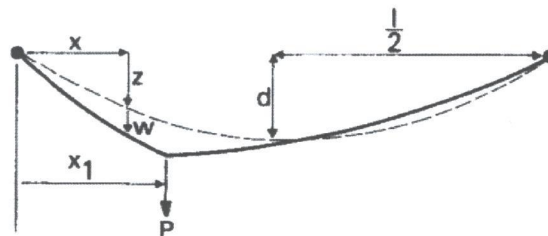
A 4.1.1 alfejezetben bevezetésre kerül a vizsgálatokban alkalmazott modell, egy egyszerű két szabadságfokú rezgőrendszer (4.1 Ábra). A benne szereplő rugómerevség származtatása, ha jól értem, a szakirodalomból átvett (4.1), (4.2), (4.3) és (4.4) képletekből történik. Vázzon, hogy hogyan jutunk ezekhez a képletekhez.

Válasz

A (4.1) egyenlet Irvine, 1981 ([47]-es hivatkozás az értekezésben) 2.3 fejezete alapján kapható. Az 1. ábrán látható felfüggesztett kábelre P koncentrált erő hat x_1 távolságra a bal oldali felfüggesztési ponttól. Feltéve, hogy a profil kis belógású marad, a kábel függőleges irányú egyensúlyát az alábbi egyenlet jellemzi a $0 \leq x \leq x_1$ tartományban

$$(H + h) \frac{d}{dx} (z + w) = P \left(1 - \frac{x_1}{l} \right) + mg \left(\frac{l}{2} - x \right)$$

ahol H és h a kábelt feszítő erő vízszintes komponense kezdetben, illetve a növekmény a P koncentrált erő alkalmazásakor, mg a kábel egységnyi hosszra eső súlya, a geometriai paraméterek pedig az 1. ábrán láthatók.



1. ábra: Felfüggesztett kábel geometriája, amelyre P koncentrált erő hat x_1 távolságra az egyik felfüggesztési ponttól [47]

Felhasználva, hogy a vezeték saját súlyát tartalmazó tagok kiesnek, az alábbi egyenlet kapható

$$(H + h) \frac{dw}{dx} = P \left(1 - \frac{x_1}{l} \right) - h \frac{dz}{dx}$$

Hasonlóképpen az $x_1 \leq x \leq l$ tartományban

$$(H + h) \frac{dw}{dx} = -P \frac{x_1}{l} - h \frac{dz}{dx}$$

Ezeknek az egyenleteknek az integrálásával kapható az értekezés (4.1) egyenlete, ami [47] (2.13) és (2.14) dimenziótlan egyenleteinek felel meg. Megjegyzem, hogy néhány különbség van az itt, ill. az értekezésben közölt összefüggésekben szereplő paraméterek jelölése között, de célszerűnek tartottam a válaszban megtartani [47] jelöléseit, mert így megfelelnek az onnan vett 1. ábrán és az ott közölt további összefüggésben használt jelölésrendszernek.

A (4.2) egyenlet szintén [47]-ben van levezetve, az ottani (2.15)-(2.21) egyenletek alapján kapható a (2.22) egyenlet, ami az értekezés (4.2) egyenletének dimenziótlan alakja (szintén néhány jelölésbeli különbségtől eltekintve). A terjedelem miatt itt a részletek nélkül mutatom be, amit [47] kábel egyenletnek nevez. Ez Hooke törvényét alkalmazza, és kapcsolatot ad meg a kábelt feszítő erő változása és a kábel geometriájának változása között, amikor a kábel elmozdul az eredeti egyensúlyi helyzetéből.

$$\frac{h(ds/dx)^3}{EA} = \frac{du}{dx} + \frac{dz}{dx} \frac{dw}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2$$

ahol u és w az x és z irányú elmozdulás, E és A pedig a kábel rugalmassági modulusa és keresztmetszete. Ebből kapja [47] egy hosszas levezetés után h -ra a harmadfokú (2.22) egyenletet, és itt definiálja a λ_c paramétert is, ami az értekezésben a (4.3) egyenlet. Ez egyébként egy jelentős fontosságú paraméter, amit más irodalomban Irvine paraméternek is neveznek [47] szerzője után.

A (4.4) egyenlet egy közelítés. A (4.1) egyenlet egy összefüggést ad a P_z erő és a w_p elmozdulás között. Kis elmozdulás esetén ez a kapcsolat közelítőleg lineáris, vagyis az összefüggést egy egyenessel közelítve, annak meredeksége a k_1 .

2. kérdés

Részletezze, miként számolja a c_1 és m_2 paramétereket.

Válasz

A c_1 paraméter meghatározásánál szimuláltuk a 0,2 N koncentrált erő eltávolítását követő lengéseket a két szabadságfokú modellel a c_1 csillapítási tényező különböző értékei mellett, valamint a korábban validált, Kollár & Farzaneh, 2013 ([71]-es hivatkozás az értekezésben) végeelem modelljével. A terhelés eltávolítása után 8-10 ciklust figyelembe véve meghatároztuk a logaritmikus dekrementumot mindkét modell alkalmazásával, és a csillapítási tényezőnek azt az értékét választottuk, amikor a két szabadságfokú modell esetén kapott logaritmikus dekrementum megegyezett (néhány %-os eltéréssel) a végeelem modellel végzett szimuláció esetén kapott értékkel.

Az m_2 paraméter értéke inkább egy választott mint pontosan számolt érték. Készítettünk egy végeelem modellt, ami a kis, laboratóriumi méretű felfüggesztett vezeték modellje, és egy olyan tömeget választottunk, hogy a vezeték és a rezgéscsillapító (vagy rezgéselnyelő) tömegeinek aránya közelítőleg megfeleljen a kisméretű és a nagyméretű vezeték esetén kapható aránnyal. Várhatóan a kapott érték valamelyest alulbecsli egy laboratóriumi modellben alkalmazható rezgéscsillapító tömegét.

3. kérdés

Vázolja, hogy hogyan jutunk a (4.5), (4.6) és (4.7) képletekhez, melyeket az m_1 és a k_2 értékek számításához használ.

Válasz

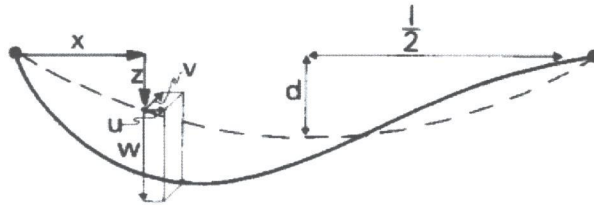
A (4.5)-(4.7) képletek is Irvine munkáján [47, 48] alapulnak. Két azonos magasságú pontban felfüggesztett, kis belógású kábel megzavarása esetén bekövetkező mozgást az alábbi egyenletek írják le

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dx}{ds} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) \right] = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dz}{ds} + \frac{\partial w}{\partial s} \right) \right] = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - mg$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \frac{\partial v}{\partial s} \right] = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

ahol T és τ a kábelt feszítő erő kezdetben, illetve a növekmény a mozgás közben, a geometriai paraméterek pedig a 2. ábrán láthatók.



2. ábra: Felfüggesztett kábel geometriája, u , v és w elmozdulás komponensekkel [47]

Kis belógás esetén a mozgás longitudinális komponense elhanyagolható, a mozgásegyenletek másik két komponense pedig az alábbi alakba hozható

$$H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + h \frac{d^2 z}{dx^2} = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

$$H \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

A függőleges síkban a mozgás antiszimmetrikus komponense esetén feltételezhető, hogy a kábelt feszítő erő vízszintes komponensének növekménye nulla ($h = 0$), és

$$w(x, t) = \tilde{w}(x) e^{i\omega t}$$

Ekkor a mozgásegyenlet megfelelő komponense

$$H \frac{d^2 \tilde{w}}{dx^2} + m\omega^2 \tilde{w} = 0$$

Peremfeltételek

$$\tilde{w}(0) = \tilde{w}\left(\frac{l}{2}\right) = 0$$

Ezek felhasználásával kaphatók a sajátfrekvenciák

$$\omega_{n,a} = \frac{2n\pi}{l} \sqrt{\frac{H}{m}} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Ez felel meg az értekezésben a (4.5) egyenletnek. A jelölésben ismét vannak eltérések, a válaszban viszont célszerűnek tartottam megtartani [47] jelöléseit, mert a 2. ábrát is onnan vettem, így az egyenletekben és az ábrán használt szimbólumok megfelelnek egymásnak.

A függőleges síkban a mozgás szimmetrikus komponense esetén az alábbi helyettesítéseket végezzük el a mozgásegyenletben

$$w(x, t) = \tilde{w}(x) e^{i\omega t}; \quad h(t) = \tilde{h} e^{i\omega t}; \quad \frac{d^2 z}{dx^2} = -\frac{8d}{l^2}$$

Ekkor a mozgásegyenlet megfelelő komponense

$$H \frac{d^2 \tilde{w}}{dx^2} + m\omega^2 \tilde{w} = \frac{8d}{l^2} \tilde{h}$$

Peremfeltételek

$$\tilde{w}(0) = \tilde{w}(l) = 0$$

Az adott peremfeltételek mellett kapott megoldás és a kábel egyenlet felhasználásával a levezetés részleteinek mellőzésével kapható az alábbi transzcendens egyenlet

$$\tan\left(\frac{1}{2} \beta_n l\right) = \frac{1}{2} \beta_n l - \frac{4}{\lambda_c^2} \left(\frac{1}{2} \beta_n l\right)^3$$

amiből a $\omega_{n,s}$ sajátfrekvenciák számíthatók

$$\omega_{n,s} = \beta_n \sqrt{\frac{H}{m}} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

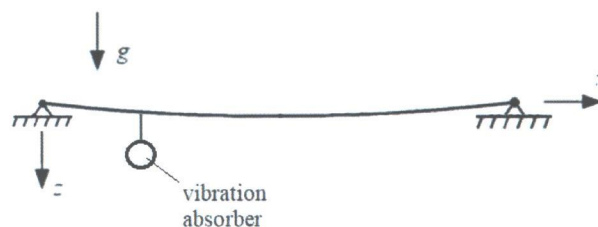
Ezek felelnek meg az értekezésben a (4.6) és (4.7) egyenletnek. Az itt bemutatott levezetés részletesebben megtalálható [48]-ban, a (3)-(19) egyenletek tárgyalásánál, ill. [47]-ben a 3.2 fejezetben.

4. kérdés

Miért hagyható figyelmen kívül a horizontális rezgés?

Válasz

A szakirodalom alapján [47, 48] a longitudinális irányú rezgés elhanyagolható, ha a belógás és feszítáv aránya 1:8 vagy kevesebb (ezt értjük „kis belógás” alatt). A transzverzális irányú rezgés (ez a másik horizontális irány) általában nem hanyagolható el (ennek megoldása benne is van a szakirodalomnak a 3. válaszban említett, erre vonatkozó részében). Pl. galoppozó mozgás (szél hatására kialakuló nagy kitérésű, kis frekvenciájú lengés) esetén tipikusan a függőleges és transzverzális irányok által meghatározott síkban egy ellipszis alakú pályán mozog a vezeték egy pontja. Viszont pl. a szél okozta kis kitérésű, nagy frekvenciájú rezgés („aeolian vibration”) esetén általában a transzverzális komponens is olyan kicsi, hogy jó közelítéssel elhanyagolható.



3. ábra: Felfüggesztett vezeték rezgéselnyelővel

Bíráló szerint szerencsés lett volna közölni egy ábrát az x, y, z irányokkal. A 4.1 ábra a modellt mutatja, rajta a z iránnyal, de valóban nem szerepel olyan ábra, ami kapcsolatot teremtene a felfüggesztett vezetékkel és ott az említett irányokkal. A 3. ábra mutat egy ilyen vázlatot, rajta az x és z irányokkal, az y irány pedig az ábra síkjára merőleges. Az x, y, z irányok a

longitudinális (vagy axiális), transzverzális és függőleges irányok. Tulajdonképpen a longitudinális és transzverzális irányok is vízszintesek (merőlegesek a g nehézségi gyorsulás irányára), de a transzverzális irányú rezgések lehetnek jelentősek bizonyos esetekben kis belógás esetén is, ahogy az előző paragrafus tárgyalja.

5. kérdés

A (4.13) képlet a szöveg szerint (66. oldal) mozgásegyenlet. Kérdezem, hogy itt mi áll a bal és a jobb oldalon?

Válasz

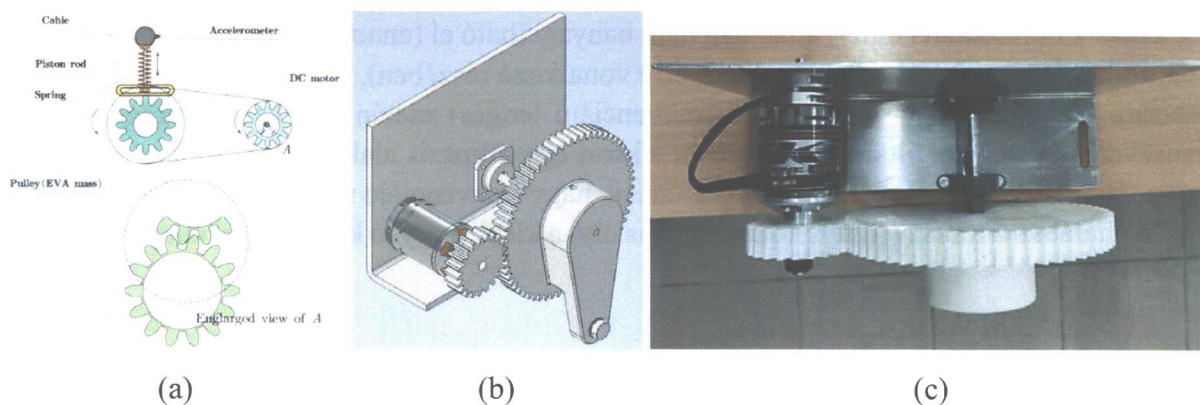
A (4.13) egyenlet bal oldala tartalmazza a $\mathbf{z}(t)$ vektor $\dot{\mathbf{z}}(t)$ idő szerinti deriváltját. A jobb oldal van kétféleképpen felírva. A jobb oldal az utolsó $\mathbf{Az}(t) + \mathbf{Bz}(t - \tau) + \mathbf{f}(t)$ formában az elsőből $\mathbf{Az}(t) + \mathbf{bu}(t) + \mathbf{cF}(t)$ a (4.10) és (4.11) egyenletek felhasználásával kapható. Ebben a három tagban az első tartalmazza a rendszer paramétereit ($m_1, k_1, c_1, m_2, k_2, c_2$ alkotják az \mathbf{A} mátrix elemeit), a második tag tartalmazza a szabályozást (P, D szabályozási paraméterek alkotják a \mathbf{D} sorvektor elemeit), és a harmadik tag tartalmazza a gerjesztést.

6. kérdés

A 4.3 alfejezet feltételezi, hogy a vezérlő erőt egy motor biztosítja mechanikus meghajtással, és a motor hajtásakor holtjáték lép fel. Milyen konkrét gépészeti konstrukcióra gondol a jelölt ebben az esetben?

Válasz

Egy ilyen szabályozó terve Meng & Kollár, 2021 ([88]-as hivatkozás az értekezésben) publikációban merült föl először. A 4(a) ábra (Fig. 2 [88]-ban) mutatja az ötletet, de ez megépítve nem volt. Azóta egy hallgatói szakdolgozat projekt keretében készült egy laboratóriumi modellhez tervezett hajtás (ld. 4(b) és 4(c) ábra), ami teljesen új, egyelőre a tesztelésre vár.



4. ábra: Szabályozott rezgéselnyelő (a) fogasszíjhajtás DC motorral tervének vázlata [88]; (b) fogaskerék-hajtás összeállításának 3D nézete; (c) fogaskerék-hajtás felülnézetből

Szombathely, 2024. július 24.

Dr. Kollár László
Dr. Kollár László