

kollar.laszlo.e_99_23

Magyar Tudományos Akadémia

doktori értekezés tézislevelei

**TÁVVEZETÉKEK LENGÉSE SZÉLSŐSÉGES
IDŐJÁRÁSI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT**

Prof. Dr. Kollár László E.

Szombathely, 2023

1. Bevezetés

Felfüggesztett vezetékek vagy más légkörben üzemelő szerkezetek gyakran vannak kitéve dinamikus terhelésnek légköri hatások vagy emberi beavatkozás következtében. Ilyen hatások az erős szél, a terhelés megszűnése (pl. hideg éghajlaton a vezetéken felhalmozódott jég lehullása), vagy egy másik tárgy ütközése, amik jelentősen lecsökkenthetik a szerkezet működési tartományát és élettartamát. Az ilyen problémák igazolják az erőfeszítéseket a dinamikus terhelések okainak, valamint a létrejövő lengéseknek a vizsgálataira, továbbá olyan módszerek kifejlesztésére, amelyek csökkentik a nem kívánt rezgések hatását. Az energia szállításának elterjedt módja a távvezetékek (vagy szabadvezetékek) alkalmazása. Ezek a szerkezetek hosszú, felfüggesztett vezetékeket tartalmaznak, amin a fent említett jelenségek nagy frekvenciájú vagy nagy amplitúdójú lengéseket okozhatnak. A nagy frekvenciájú lengések következménye a vezeték anyagának fáradása, míg a nagy kitérésű lengések, mint a szél hatására létrejövő gallopozó mozgás vagy a nagy mennyiségű jég lehullását követő lengés, nagy dinamikus erőkkel járnak együtt, és viszonylag rövid idő alatt kárt okozhatnak a távvezeték valamelyik elemében. A gallopozó mozgás és a jég lehullását követő lengés között az alábbi fontos különbség van. A gallopozó mozgás közben a nagy kitérésű lengést fenntartja a szél, ami egy külső hatás (pl. jég) miatt aszimmetrikus keresztmetszetűvé vált vezetéken periodikus gerjesztésként hat. A jég lehullását követő lengésnek viszont kezdetben nagy amplitúdója van, majd a kitérések egyre kisebbek lesznek a vezeték szerkezetének csillapítása valamint az aerodinamikai csillapítás következtében. Tehát a jég lehullása nagy kitérésű lengésekhez vezethet, de a jég fontos szerepet játszik a gallopozó mozgás létrejöttében is, mert a vezeték keresztmetszete elsősorban a jég miatt válik aszimmetrikussá.

Szabadvezetékeken és más légkörben álló vagy mozgó szerkezeteken felhalmozódó jég tehát komoly problémákat okozhat a berendezés üzemelésében és biztonságában. A villamos távvezetékeken kívül számos további szerkezet említhető, amelyek ki vannak téve légköri jegesedésnek. Ezek közül a legismertebbek a szélerőművek lapátjai, a repülőgépszárnyak, és a vonat vagy villamos áramszedői. A mindezek esetében felmerülő problémák indokolják az erőfeszítéseket annak megértésére, hogy milyen feltételek vezetnek jegesedéshez és hogyan zajlik le a jelenség.

A felfüggesztett kábeleknél a villamos távvezetékeken kívül további mérnöki alkalmazásai vannak, mint a kábelhidak vagy a tengeri vontatás. Ezeket a berendezéseket is érhetik olyan légköri hatások, amelyek komoly statikus terheléshez vezetnek vagy a kábel lengését okozzák. Az ilyen lengések gyakran párosulnak olyan nagy dinamikus erőkkel, amelyek a kábelt tartó szerkezet valamelyik elemében súlyos kárt okoznak. Azoknak a

körülményeknek a feltárása, amelyek ilyen lengésekhez vezetnek, valamint a lengés kialakulásának a folyamata mélyreható tanulmányt kíván, ami magában foglalja az elméleti, numerikus és kísérleti modellezést egyaránt. A kábel lengésének szimulációja fontos információt szolgáltat a lengés amplitúdójáról és frekvenciájáról, a kábelben ébredő feszültségekről, valamint a lengés közben a kábelre és a felfüggesztésre ható erőkről. A felfüggesztett kábel lineáris és nemlineáris dinamikájának elméletét évtizedekkel ezelőtt kidolgozták [5, 6]. Az elmélet megadja a felfüggesztett kábel statikus egyensúlyi helyzetét, az elmozdulást koncentrált erő vagy megoszló terhelés alkalmazása esetén, valamint a kábel szabad lengésének jellemzőit. Az elmélet jól kidolgozott egyetlen vezeték esetén, de a szabadvezetékek gyakran több feszítávnyi felfüggesztett vezetéket tartalmaznak, amelyek végpontja olyan szigetelőkhöz csatlakozik, amik szintén mozoghatnak lengés közben. Az ilyen szerkezetek mozgását numerikus és kísérleti modellek segítségével tanulmányozták.

Számos módszert kidolgoztak már kábel vagy vezeték légköri jelenségek által okozott lengéseinek csillapítására, valamint az ezek következményeként fellépő károk enyhítésére. Lengéscsillapítókat gyakran használnak távvezetéseken nagy frekvenciájú, kis amplitúdójú lengések csillapítására, amelyek passzív szabályozóként működnek [25]. A fázistávartók alkalmazása hozzájárul a vezetékek nagy kitérésű lengéseinek csillapításához, ezáltal a fázisok között biztonságos távolságot biztosítanak lengés közben is [23]. Aktív szabályozással kábellengetés csillapítására kábelhidak esetén próbálkoztak [1]. Az aktív szabályozás megvalósítása a kábel rögzítési pontjának transzverzális vagy axiális irányú mozgásával történhet. A kábel egy kiválasztott pontjának az elmozdulását vagy sebességét megfigyelve a szabályozás meghatároz egy választ a felfüggesztési pont, vagyis a kábel egyik végpontjának az elmozdulására vonatkozóan, aminek következményeképpen a kábel kitérése a megfigyelt pontban kisebb lesz. Időkésés mindig jelen van digitális szabályozásban a megfigyelt paraméter mintavételezése miatt, és ez a késés befolyásolja a szabályozás hatékonyságát, valamint a kábellengetést jellemző paramétereket. Növekvő időkésés a szabályozott rendszer instabilitásához vezet, és egy kritikus érték fölött stabilitásvesztést okoz [22]. A szabályozás mechanikus hajtáson keresztül való megvalósítása esetén megjelenik a kotyogás a hajtásnál, ami az egyensúlyi helyzet körüli kis kitérésű lengéseket eredményez. Időkésés és kotyogás együttesen bonyolult mozgáshoz vezet, ami bizonyos esetekben "marginálisan kaotikus"-nak is nevezhető [8, 17, 18, 19].

2. Célok és alkalmazott módszerek

A kutatás a távvezetékeknek a jegesedési körülmények között kialakuló lengéseihez, valamint a vezeték megóvása érdekében fejlesztett módszerekhez kapcsolódóan három fő területre osztható. Először meg kell érteni, hogyan alakul ki jég olyan szerkezeteken mint a vezeték. A jég típusa, tömege és alakja a környezeti feltételektől függ, ezért fontos tanulmányozni a tulajdonságait a felhőnek, ami a vezetéken a jég felhalmozódásának a forrása. Másrészt erőfeszítéseket kell tenni a távvezeték lengéseinek a leírására, amit olyan légköri jelenségek okoznak mint a szél vagy a jég lehullása a vezetékről. A lengés közben dinamikus terhelések hatnak a távvezeték különböző elemeire, és az ezek következtében fellépő alakváltozás és feszültség meghatározása segít megbecsülni, hogy milyen károkat okozhatnak ezek a terhelések. Végül pedig módszereket kell fejleszteni, amelyek hozzájárulnak a lengések csillapításához, és ezáltal azok káros hatásainak csökkentéséhez.

Az itt bemutatott kutatás az előző bekezdésben említett témákra fókuszál. Ahhoz, hogy a vezetéken a jég felhalmozódásának folyamatát becsülni lehessen, a jegesedést okozó felhő tulajdonságait, valamint az azokat befolyásoló tényezőket kell vizsgálni. A javasolt megközelítés a vízcseppek ütközését, párolgását, a gravitáció hatását és a turbulens diszperziót veszi figyelembe. A vízcseppek ütközésének modellezése során ki lett fejlesztve az ütközés két jellemző kimenetele közötti átmenet meghatározásához szükséges elméleti háttér. Az elméleti modellezésen túl kísérleti modell is volt alkalmazva húthető szélcsatornában a jegesedési folyamat megismerése érdekében. Ezek a modellek leírják a felhő tulajdonságait és azok változását áramlás közben, különös tekintettel a vízcseppek méretének eloszlására és a felhő folyékony víztartalmára [12, 14].

A kutatómunkának egy másik fő célja a távvezetéken a jég lehullását követően kialakuló lengéseknek a tanulmányozása. A jég lehullás különböző folyamatainak (pl. egyszerre, vagy vezeték mentén terjedően) numerikus és kísérleti vizsgálata történt. A fejlesztett numerikus modellek alkalmasak a vezeték legnagyobb kitérésének, valamint a lengés közben a felfüggesztésnél ébredő tranziens dinamikus erőknek a számítására. A numerikus modell megbízhatóságát kimutatta az eredmények kismintás laboratóriumi kísérleti megfigyelésekkel való összehasonlítása, illetve bizonyos eredmények valódi méretű távvezetéken végzett kísérletekkel is ellenőrizve voltak [24]. A kapott eredmények hozzájárulnak annak meghatározásához, hogy a lengő vezetékek milyen közel kerülnek egymáshoz, létrejöhet-e átütés, és keletkezik-e kár a felfüggesztésben vagy a távvezeték valamely más elemében [13, 15, 16].

A kutatás további célja a vezeték lengésének szabályozása. Számos

paraméter befolyásolja a lengést és a szabályozás eredményességét. A paraméterek hatásának vizsgálata kimutatja a digitális szabályozásban jelenlévő mintavételezési idő, valamint a gerjesztési frekvencia hatását. Az aktív szabályozás célja a felfüggesztett vezeték szél hatására létrejövő, kis kitérésű, nagy frekvenciájú lengésének csillapítása. A vezeték nemlineáris rugalmas anyagi viselkedésének figyelembevételével a módszer alkalmassá válik nagy kitérésű lengések csillapítására is, mint ami a jég lehullását is követi. Mechanikai hajtással megvalósított szabályozás esetén a kotyogás miatt a szabályozó erő nem továbbítódik akkor, amikor a hajtásnál a forgásirány változik. Az időkésés és kotyogás együttes jelenléte a szabályozásban bonyolult mozgáshoz vezethet, ami igazolja ilyen rendszerek dinamikájának részletes vizsgálatát [9, 10, 11].

3. Új tudományos eredmények

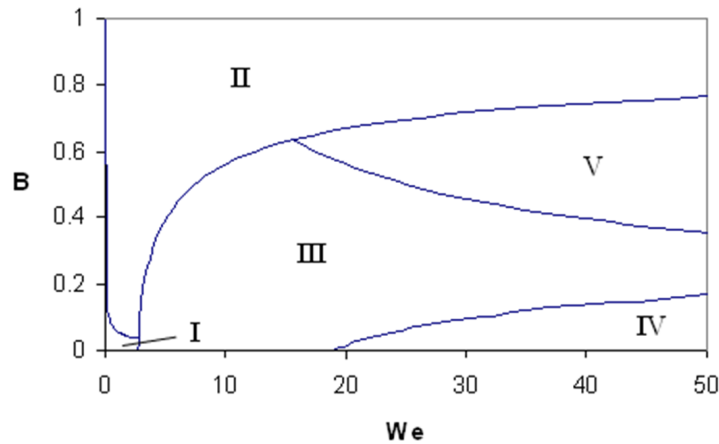
1. tézis

Levegő és vízcseppek által alkotott kétfázisú áramlásokban két vízcsepp ütközésének lehetséges kimeneteleit tartalmazó összetett modellt fejlesztettem. Az ütközések két lehetséges kimenetele, az összeolvadás kis deformációt követően és a szétpattanás, közötti határ feltétele lett újonnan kidolgozva, ami a folyamat fizikai hátterén alapul [14]. Összeolvadás kis deformációt követően két feltétel teljesülése esetén következik be. (1) A vízcseppek közé szorult gágrétegnek egy kritikus vastagságúra kell csökkennie ahhoz, hogy felszakadjon, ami a vízcseppek összeolvadásához szükséges. (2) Az összeolvadáshoz az is szükséges, hogy a vízcseppek az érintkezés során ne csússzanak el egymás mellett, mielőtt a gágréteg a kritikus vastagságúra csökken. A gágréteg minimális vastagságát a folyamatot leíró fizikai mennyiségek jellemző értékeinek használatával lehet becsülni, míg az idő, ami a gágréteg vastagságának kritikus értékre csökkenéséhez kell, időskálás analízissel ítéhető meg. Ezeket a feltételeket fejezik ki az (1) és (2) egyenletek

$$WeRe_d^3(1 - B^2)^{5/2} < 564.85 \frac{H_f \sigma \rho_a \rho_d}{\mu_a^4} \quad (1)$$

$$Re_d B \delta (\delta + 1) < 180 \frac{\rho_a}{\rho_d} \quad (2)$$

ahol We a Weber szám, Re_d a vízcsepp Reynolds szám, B az ütközési paraméter, $\delta = d_S/d_L$, vagyis a kisebb és a nagyobb vízcsepp átmérőinek az aránya, H_f a Hamaker állandó, σ a felületi feszültség, ρ_a és ρ_d a gáz, ill. a vízcsepp sűrűsége, és μ_a a gáz dinamikai viszkozitása. A kétfázisú



1. ábra. Ütközési kimenetek diagramja a $B - We$ síkon $\delta = 1$ és $d_S = 10 \mu\text{m}$ esetén; I: összeolvadás kis deformációt követően; II: szétpattanás; III: összeolvadás jelentős deformációt követően; IV: reflexív szétválasztás; V: nyújtó szétválasztás

áramlás modellje ellenőrzi a fenti két feltételt minden ütközés esetében. A vízcseppek ütközésének további kimenetelei közötti átmeneteket a modell korábban javasolt feltételek alapján határozza meg [2, 3, 4]. Egy diagram a kimenetekkel és köztük ezeknek a feltételeknek, valamint az (1) és (2) egyenleteknek, az alkalmazásával meghatározott határokkal a $B - We$ síkon az 1. ábrán látható víz-levegő rendszer esetén.

2. tézis

A légköri jegesedést okozó felhő tulajdonságai meghatározzák a szerkezeten felhalmozódó jég típusát, tömegét és alakját. A jegesedési körülményeket jellemző felhőt modelleztem elméleti modell fejlesztésével, valamint levegőből és vízcseppekből álló kétfázisú áramlás létrehozásával hűthető szélcsatornában. Az alkalmazott módszer számos tényezőt figyelembe vesz, ami hatással van a felhő tulajdonságaira, mint a vízcseppek ütközése és összeolvadása, párolgás és hűlés, ülepedés gravitáció hatására, és a turbulencia okozta szétszóródás [12]. A fő eredmények megadják a vízcseppek méretének és a felhő folyékony víztartalmának a függőleges és áramlás irányú változását jegesedési körülmények között. Ezek a paraméterek lettek összehasonlítva két lényegesen különböző jegesedési feltétel mellett: felhőn belüli jegesedés esetén, amit kis vízcseppek (térfogati középátmérő $27 \mu\text{m}$ a vizsgált példában) és nagyobb szélesség (20 m/s) jellemez; valamint ónos szitálás, amit nagyobb vízcseppek (térfogati középátmérő $62 \mu\text{m}$) és kisebb szélesség (10 m/s) jellemez. A megfigyelések azt mutatják, hogy a vízcseppek függőleges sebességkomponense és ennek következményeképpen a vízcseppek méret szerinti függőleges szétválasztódása

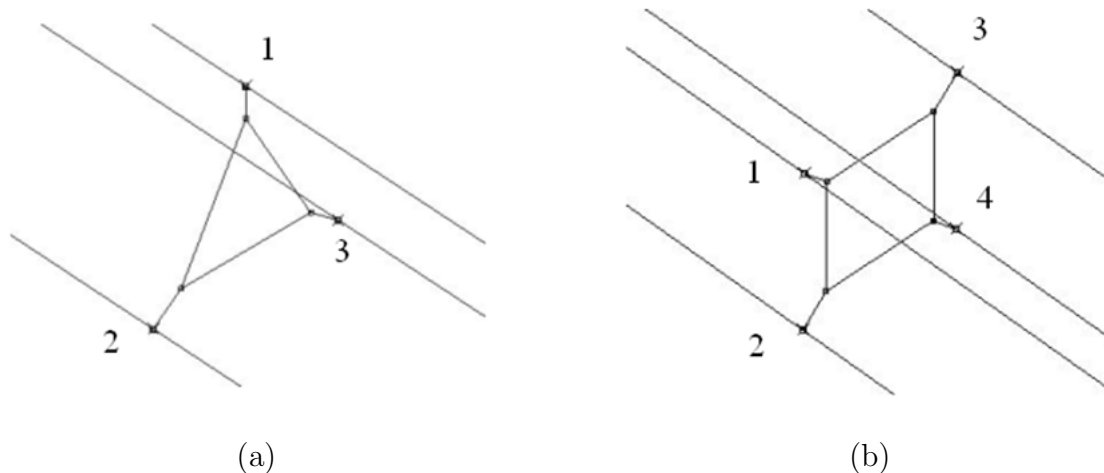
majdnem elhanyagolható felhőn belüli jegesedés esetén. A térfogati közép-
 átmérő csak $\pm 20\text{-}30\%$ -ot változik függőleges irányban a szélcsatorna mérő-
 térben a középmagasságban felvett értékhez képest. Ónos szitálás esetén
 azonban a vízcseppek mérete jelentősen növekszik a szélcsatorna alja felé
 haladva, a térfogati középátmérő 20 cm-rel a mérőtér középmagassága
 alatt akár a négyszeresét is elérheti a középmagasságban felvett értéknek.
 Másrészt a vízcseppek mérete egy adott függőleges pozícióban csökken az
 áramlás irányában haladva a mérőtérben, mert a nagyobb vízcseppek a
 szélcsatorna alja felé mozognak. A függőleges pozíciótól függően ennek
 a csökkenésnek a mértéke 10-30% lehet egy 1,5 m hosszú szakaszon az
 áramlás irányában. A mérőtérnek egy függőleges metszetében az átlagos
 térfogati középátmérő mindig nagyobb mint a kontrakciós szakasz előtt,
 ami elsősorban a vízcseppek ütközését követően lehetséges összeolvadás
 eredménye [14]. A turbulencia okozta szétszóródás erősíti az ütközések
 hatását és a vízcseppeknek egy szélesebb függőleges tartományban való
 megjelenéséhez vezet, a párolgás hatása pedig akkor válik jelentőssé, ha
 a levegő hőmérséklete növekszik, ezáltal közelíti a 0°C -ot, vagy a relatív
 nedvességtartalma csökken.

3. tézis

Kötegelt vezetékeken a jég lehullás dinamikus hatásainak vizsgálatára al-
 kalmas numerikus modellt fejlesztettem. Ez egy korábbi modell továbbfej-
 lesztését jelentette a távtartók figyelembevételével, amiken keresztül a ve-
 zetékek kapcsolódnak [7, 13, 21]. A távtartók numerikus modelljei ve-
 zetékek hármas és négyes kötegében a 2. ábrán láthatók. A távtartó anyagi
 viselkedését nemlineáris rugalmas anyagmodell jellemzi. Egy harmadfokú
 feszültség-alakváltozás kapcsolat veszi figyelembe a távtartók karjának vi-
 selkedését, amelyek elfordulhatnak egy csukló körül egyre növekvő ellenál-
 lással szemben egy határértékig. Ezután a távtartó karja csak alakváltozás
 esetén mozdulhat tovább, amit egy lineáris feszültség-alakváltozás kapcso-
 lat jellemez. Az erő-elmozdulás kapcsolatot az alábbi összefüggés fejezi
 ki

$$F_s = \begin{cases} c_{s3}\Delta l^3 & \text{ha } \Delta l < |\Delta l_{cr}| \\ c_{s0} + c_{s1}\Delta l & \text{ha } \Delta l \geq |\Delta l_{cr}| \end{cases} \quad (3)$$

ahol Δl_{cr} a távtartó hosszának a növekedése a kar maximális elfordulása
 esetén, és a c_{s0} , c_{s1} és c_{s3} állandók a távtartó rugalmassági moduluszából,
 keresztmetszetéből és hosszából kaphatók. A modell alkalmazásával ki-
 derül, hogy a távtartónak milyen hatása van a jég lehullását követően a
 vezeték lengésére és a köteg elfordulására [13, 15]. A részletes vizsgálatok
 tárgyát 200 m hosszú feszítávú Bersfort és Condor típusú vezetékek al-
 kották. A vezeték maximális ugrása és a benne ébredő erő növekszik



2. ábra. Távfutóvezetéseken alkalmazott távtartók modellje; (a) hármas kötegben; (b) négyes kötegben

a szomszédos távtartók közötti távolsággal, vagy másképpen, csökken a távtartók számának növelésével. Nagy mennyiségű jég (50 mm vastagságú) lehullása esetén, a távtartók számának növelése 1-ről 5-re (vagyis a szomszédos távtartók közötti távolság csökkentése 100 m-ről 33 m-re) a vezeték maximális ugrását annak terheletlen állapota fölött 2-3 m-ről 0,3 m alá csökkenti. A köteg elfordulása viszont nem csökkenthető a távtartók számának növelésével. A továbbra is jéggel terhelt vezeték maximális süllyedése páros számú távtartók esetén nagyobb, ugyanis ebben az esetben a maximális süllyedés a feszítáv közepén lép fel, ahol a vezeték elmozdulása a legnagyobb mértékű lehet. A terheletlen helyzet alatti maximális süllyedés vizsgálata azt mutatja, hogy annak értéke maximum 5%-kal változik páratlan számú, míg 5-15%-kal páros számú távtartó esetén. A kötegben belül a vezetékek számának növelésével egyre kisebb lengések alakulnak ki. Egyetlen vezeték esetén annak legnagyobb ugrása 5-10 m körül alakul a vizsgált esetekben nagy tömegű (50-60 mm vastagságú) jég lehullása után. Egy feszítáv mentén 3 távtartó alkalmazása esetén, a maximális ugrás 0,5-0,6 m-re csökken két vezetéket tartalmazó kötegben, és 0,3 m alá négyes kötegben. A vezetéket feszítő erő viszont valamivel kisebb (különbség 10% alatt) egyedülálló vezeték esetén, mert ekkor a vezetékre nem hat erő más vezetésekről. Annak a vezetéknek a maximális ugrása, amelyikről a jég lehullt, valamint annak a vezetéknek a maximális süllyedése, amelyik terhelt maradt, hatványfüggvényekkel közelíthetők a jég vastagságától és a szomszédos távtartók közötti távolságtól függően.

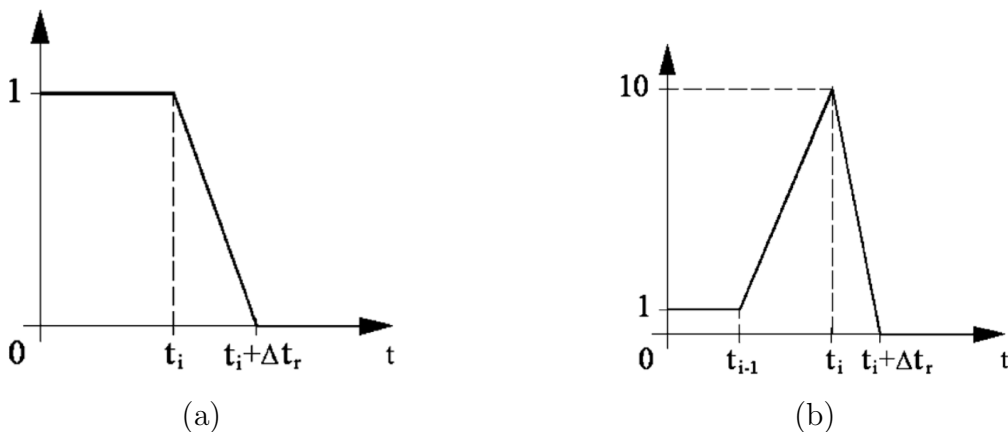
4. tézis

A jég lehullásának folyamata befolyásolja a létrejövő lengést. Kidolgoztam egy módszert különböző lehullási folyamatok szimulálására, ami a jéget modellező terhelések meghatározott sorrendben és idő alatt történő eltávolítását jelenti [16]. Minden egyes terhelést modellező erőhöz hozzá van rendelve egy időfüggvény, ami az adott erő eltávolításának az idejét jelenti. A számítás folyamán az erő meg van szorozva az időfüggvénynek az adott időpillanatban felvett értékével. Modellek a következő jég lehullás folyamatokra lettek kifejlesztve: (i) jég lehullása egyszerre a teljes fesztávnyi vezetékről vagy annak egy szakaszáról, (ii) jég lehullás terjedése fokozatosan a fesztáv mentén, és (iii) jég leválásának terjedése a jég azonnali törése nélkül, aminek következtében a leváló, de még le nem tört jégdarab egy többlet terhelést okoz a leválást megelőzően. Ha n terhelés van a fesztáv mentén és T_w jelöli a lehullás teljes fesztávon való végighaladásának idejét, akkor az időpillanat, amikor az előre meghatározott időfüggvényt az i -edik terhelésre kell alkalmazni, az alábbi összefüggésből állapítható meg

$$t_i = \frac{i}{n+1} T_w \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Az alkalmazott időfüggvények a 3. ábrán láthatók. A jég egyszerre történő lehullásához a 3a ábrán látható időfüggvényt kell alkalmazni $T_w = 0$ helyettesítéssel a (4) egyenletben. A Δt_r időintervallum rövidebb mint az időlépés hossza, ami azt jelenti, hogy az összes terhelés az első időlépésben megszűnik. Amikor a jég lehullása fokozatosan terjed a fesztáv mentén, akkor szintén a 3a ábrán látható időfüggvényt kell alkalmazni, de nem nulla T_w értékkel. Amikor pedig a jég leválása fokozatosan terjed a jég azonnali törése nélkül, azt a 3b ábrán látható időfüggvény tudja modellezni, mert figyelembe veszi a terhelés jelentős növekedését az eltávolítás előtt.

A numerikus modell továbbfejlesztett változata több fázist is figyelembe vesz, amelyek fázistávolságtartó szigetelőkkel kapcsolódnak egymáshoz, és ami kísérleti eredményekkel volt tesztelve [16, 24]. A modell olyan szabadvezetékekre volt alkalmazva, amelyek fesztávja 450 m hosszú és egyetlen vezeték tartalmaz vagy három vezeték fázistávolságtartókkal. A szimulációk eredményei azt mutatják, hogy a fázistávolságtartók alkalmazása közelítőleg felére csökkenti a vezeték legnagyobb kitérését annak terhelt pozíciója fölött (6 m körüli értékről 3 m körüli értékre). A fázistávolságtartók tehát jelentősen hozzájárulnak ahhoz, hogy a vezetékek közötti távolság ne csökkenjen le nagy mértékben, és ezáltal csökkentik az átütés kialakulásának veszélyét a nagy kitérésű lengések közben. A különböző lehullási folyamatok összehasonlítása egyetlen vezeték esetén kimutatja, hogy a vezeték legnagyobb ugrásai között nincs jelentős eltérés a



3. ábra. Teher eltávolítására alkalmazott időfüggvények, ahol t_i jelöli az eltávolítás időpillantát az i -edik terhelés helyén, Δt_r pedig az eltávolítás időtartama

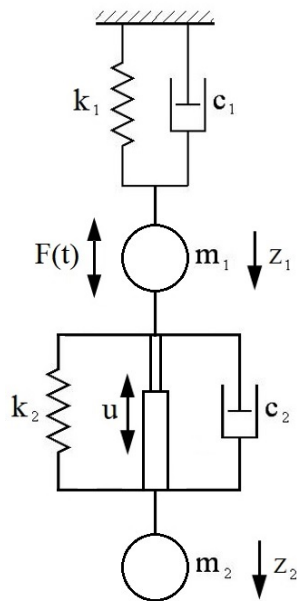
jég egyszerre történő és fokozatosan terjedő lehullása esetén, de 10-30%-kal nagyobb amikor a fokozatosan eltávolított jég nem törik el rögtön, hanem nagy darabban hull le. A fázistávolságtartókon keresztül kapcsolódó vezeték esetén viszont a fokozatosan terjedő eltávolítás azonnali törés nélkül a vezetéknek 10-30%-kal nagyobb ugrását okozza mint a jég fokozatosan terjedő lehullása, és ha az összes jég egyszerre hull le, az további 10-30%-kal megnöveli a vezeték legnagyobb ugrását.

5. tézis

Egy aktív szabályozási módszert dolgoztam ki, ami sikeresen csillapítja egy vezeték lengését a szabályozás alkalmazásának pozíciójában [9, 20]. A szabályozást alkalmazó modellnek két szabadsági foka van, ahogy azt a 4. ábra mutatja, és tartalmazza a vezeték redukálva a szabályozás helyén, valamint a szabályozható rezgéselnyelőt. A modell paraméterek meghatározásának alapja a felfüggesztett kábel statikájának és dinamikájának az elmélete [5, 6]. A paraméterek a vezeték és a feszítáv geometriai és anyagjellemzőiből számíthatók, míg a csillapítási tényező meghatározásánál a releváns végelem és kísérleti modellekben megfigyelt lengés jellemzőit is fel kell használni. A modellben a szél hatása periodikus gerjesztésként jelenik meg. A modell figyelembe veszi az időkésést, ami mindig jelen van digitális szabályozásban a mintavételezés miatt. A diszkrét idejű modellt az alábbi egyenlet írja le

$$\mathbf{z}_{j+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{z}_j + \mathbf{b}_d u_j + \mathbf{c}_d F_j \quad (5)$$

ahol a jobb oldal első tagja tartalmazza a rendszer paramétereit, a második tag a szabályozó erőt, a harmadik a gerjesztést, az időlépést pedig az



4. ábra. Vezeték és rezgéselnyelő egyszerűsített modellje; az 1 és 2 index a vezetékre, ill. a rezgéselnyelőre vonatkozik; $F(t)$ jelöli a gerjesztést, u pedig a szabályozást

időkésés határozza meg [9]. A fent leírt szabályozási módszer sikeresen csökkenti a lengések kezdeti kitérés csúcsát és amplitúdóját nagy frekvenciájú, kis amplitúdójú lengések esetén, amelyek a szél okozta lengések egyik nagy csoportját is jellemzik. Az ilyen lengések amplitúdója a vezeték átmérőjével összemérhető, frekvenciája pedig néhány Hz-től több 10 Hz-ig terjed. Az időkésés a digitális szabályozás alkalmazhatóságának korlátot szab, mert ahogy a gerjesztési frekvencia növekszik, csak egyre kisebb mintavételezési idő esetén működik, amit 1 ms alá kell csökkenteni 50 Hz fölötti gerjesztési frekvencia esetén.

A megközelítés egy lehetséges továbbfejlesztése a vezeték nemlineáris rugalmas anyagi viselkedésének figyelembevétele [10]. Ezzel a lengésszabályozás alkalmazhatóvá válik a vezeték nagy amplitúdójú lengésének csillapítására is. A modell a vezetékről a jég lehullását követő lengésre volt alkalmazva. Az ilyen lengés jellemzője a vezeték nagy ugrása (akár több m is lehet néhány 100 m hosszú fesztáv esetén), amit csillapodó lengés követ. A szimulációk eredményei kimutatták, hogy a szabályozással jelentősen lecsökkenthető a lengés kezdeti kitérés csúcsa. A vizsgált teljes méretű távvezeték esetén a kezdeti csúcs a szabályozás nélkül kapott érték kétharmad részére csökken, ill. közelítőleg a felére annak, ami akkor kapható, ha még passzív rezgéselnyelő sincs alkalmazva.

6. tézis

Digitálisan szabályozott szakaszonként lineáris rendszerekben bonyolult mozgások jelenhetnek meg. Vezeték lengésének aktív szabályozása ilyen rendszerrel írható le, amennyiben a mintavételezési időkézés és a hajtásnál jelentkező kotyogás figyelembe van véve [11]. Annak eldöntésére, hogy a rendszer a kotyogás tartományában van-e, két feltételt határoztam meg. Legyen a kotyogás értéke r_0 , és feltételezzük, hogy a két tömeg relatív elmozdulása $\Delta z = z_2 - z_1$ arányos a hajtómotor elfordulásának szögével.

- 1. feltétel: Ha a hajtómotor kerekének szögsebessége nulla, vagyis

$$\dot{z}_2 - \dot{z}_1 = 0 \quad (6)$$

akkor a forgásirány megváltozik, ami azt jelenti, hogy a rendszer belépett a kotyogás tartományába. Jelölje Δz_{bl} a relatív elmozdulást ebben a pillanatban.

- 2. feltétel: A rendszer mindaddig a kotyogás tartományában marad, amíg a Δz relatív elmozdulás az alábbi intervallumban van

$$\Delta z_{bl} - r_0 \leq \Delta z \leq \Delta z_{bl} \quad (7)$$

ha a relatív sebesség korábban pozitív volt; ill.

$$\Delta z_{bl} \leq \Delta z \leq \Delta z_{bl} + r_0 \quad (8)$$

ha a relatív sebesség korábban negatív volt.

Az (5) egyenlettel jellemzett rendszer ekkor a következő alakba rendezhető

$$\tilde{\mathbf{z}}_{j+1} = \begin{cases} \mathbf{S}\tilde{\mathbf{z}}_j + \tilde{\mathbf{c}}F_j & \text{kotyogáson kívül} \\ \mathbf{S}^*\tilde{\mathbf{z}}_j + \tilde{\mathbf{c}}F_j & \text{kotyogás tartománya} \end{cases} \quad (9)$$

ahol

$$\tilde{\mathbf{z}}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_j \\ u_j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{b}_d \\ \mathbf{D} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{b}_d \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \tilde{\mathbf{c}} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_j \\ 0 \end{bmatrix}.$$

A rendszerben bizonyos paraméter értékek mellett bonyolult mozgások figyelhetők meg, viszont ezek nem kaotikusak, hanem periodikus vagy kváziperiodikus mozgások, ami a következő eredmények alapján állítható [11]. Bár a közeli trajektóriák bizonyos esetekben nem vonzzák egymást, de nem is taszítják. A pályák nem sűrűek, a topologikus tranzitivitás feltétele nem teljesül. Továbbá az összes Lyapunov exponens kisebb mint nulla. Gyakorlati szempontból, megfelelően választott szabályozási paraméterek, mintavételezési idő és kotyogás esetén kiszámíthatatlan mozgás

nem várható. A mintavételezési idő és a kotyogás viszont határt szab a szabályozás hatékonyságának. A mintavételezési időnek elég kicsinek kell lennie a szabályozás sikerességéhez, ahogy azt az 5. tézis tárgyalja. A kotyogás jelenléte gyors váltásokat (akár néhány ms-onként) kívánhat meg a hajtómotor forgásában. A kotyogás nem befolyásolja jelentősen a mozgást, amennyiben értéke 0,1 mm körüli vagy kisebb, viszont bonyolult mozgások jelentkezhetnek, ha értéke 1 mm körülire nő.

4. Eredmények alkalmazása

A fent összefoglalt kutatási eredmények hozzájárulnak bizonyos tudományterületek háttérének fejlődéséhez, mint a kábel vagy kötél dinamikája és a szerkezetek jegesedése, de ipari alkalmazásokhoz is hasznos ajánlásokat nyújtanak.

A vízcseppek ütközésének összetett modellje és a felhőt jellemző paraméterek függőleges és áramlás irányú változásának leírása alapvető fontosságú a különböző légköri feltételek alatt beövetkező jegesedési események előrejelzésére. A fejlesztett modellek alkalmazása meghatározza a felhő legfőbb jellemzőit és azok változását. A felhő tulajdonságai, amikor az eléri a jegesedés tárgyát, döntő hatással vannak a jég képződésére. Következésképpen, a modell alkalmazásával kapott információk segítségével a megfelelő környezeti körülmények között várható jegesedés megbecsülhető.

A vezetékről a jég lehullását követő lengések szimulálására fejlesztett modell hozzájárul a különböző lehullási folyamatok megértéséhez, és az ilyen lengések következményeinek a meghatározásához. Az eredmények fontos információt szolgáltatnak a távvezetékek tervezőinek és üzemeltetőinek, mivel segítenek megbecsülni, hogy milyen problémák keletkezhetnek különböző jég lehullási események következtében.

Aktív szabályozás alkalmazása egy hatékony eszköz lehet kábellengetés csillapítására. Az ebben az irányban végzett kutatás az alapjait jelenti olyan fejlesztéseknek, amelyek célja a távvezetékek lengésének csillapítása. A javasolt módszer adaptálható a kábellengetés más alkalmazási területein is, elsősorban a kábelhidaknál. Olyan mechanikai rendszerek, amelyek digitálisan szabályozott, nagy elmozdulásokkal járó kábellengetést jellemeznek, geometriai nemlinearitást, időkésést és kotyogást tartalmaznak. Az ilyen rendszerekben létrejövő mozgásoknak a vizsgálata a nemlineáris rezgés tan fejlődéséhez is hozzájárul.

Hivatkozások

- [1] Y. Achkire. *Active Tendon Control of Cable-Stayed Bridges*. PhD dissertation, Active Structures Laboratory, Université libre de Bruxelles, 1997.
- [2] N. Ashgriz and J. Y. Poo. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops. *Journal of Fluid Mechanics*, 221:183–204, 1990.
- [3] P. R. Brazier-Smith, S. G. Jennings, and J. Latham. The interaction of falling water droplets: coalescence. *Proc. Royal. Soc. London A*, 326:393–408, 1972.
- [4] J.-P. Estrade, H. Carentz, G. Lavergne, and Y. Biscos. Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets - a model for droplet coalescence and bouncing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20:486–491, 1999.
- [5] H. M. Irvine. *Cable Structures*. MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
- [6] H. M. Irvine and T. K. Caughey. The linear theory of free vibrations of a suspended cable. *Proceedings of the Royal Society London A*, 341:299–315, 1974.
- [7] A. Jamaledine, G. McClure, J. Rousselet, and R. Beauchemin. Simulation of ice shedding on electrical transmission lines using ADINA. *Comput. Structures*, 47(4/5):523–536, 1993.
- [8] L. E. Kollár. *Dynamics of Digitally Controlled Unstable Mechanical Systems*. PhD dissertation, Department of Applied Mechanics, Budapest University of Technology and Economics, 2001.
- [9] L. E. Kollár. Digital control of cable vibration with time delay. *International Journal of Dynamics and Control*, 9:1223–1235, 2021.
- [10] L. E. Kollár. Ice-shedding-induced vibration of conductors with active vibration control. *Cold Regions Science and Technology*, 196:103504, 2022.
- [11] L. E. Kollár. Dynamics of digitally controlled forced vibration of suspended cables. *Meccanica*, 58:25–42, 2023.
- [12] L. E. Kollár and M. Farzaneh. Modeling the evolution of droplet size distribution in two-phase flows. *Int. J. of Multiphase Flow*, 33(11):1255–1270, 2007.

- [13] L. E. Kollár and M. Farzaneh. Vibration of bundled conductors following ice shedding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2):1097–1104, 2008.
- [14] L. E. Kollár and M. Farzaneh. *Modeling and Experimental Study of Variation of Droplet Cloud Characteristics in a Low-Speed Horizontal Icing Wind Tunnel*, pages 93–127. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, 2011.
- [15] L. E. Kollár and M. Farzaneh. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(2):604–611, 2013.
- [16] L. E. Kollár, M. Farzaneh, and P. Van Dyke. Modeling ice shedding propagation on transmission lines with or without interphase spacers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1):261–267, 2013.
- [17] L. E. Kollár, G. Stépán, and S. J. Hogan. Sampling delay and backlash in balancing systems. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, 44(1):77–84, 2000.
- [18] L. E. Kollár, G. Stépán, and J. Turi. Dynamics of delayed piecewise linear systems. *Electronic Journal of Differential Equations*, Conference 10:163–185, 2003.
- [19] L. E. Kollár, G. Stépán, and J. Turi. Dynamics of piecewise linear discontinuous maps. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 14(7):2341–2351, 2004.
- [20] Y. Meng and L. E. Kollár. Dynamic analysis of electrical vibration absorbers for suspended cables. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(24):7445–7455, 2021.
- [21] M. Roshan Fekr and G. McClure. Numerical modelling of the dynamic response of ice shedding on electrical transmission lines. *Atmospher. Res.*, 46:1–11, 1998.
- [22] G. Stépán. *Retarded Dynamical Systems: Stability and Characteristic Functions*. Longman, Harlow, UK, 1989.
- [23] P. Van Dyke and A. Laneville. Galloping of a single conductor covered with a D-section on a high-voltage overhead test line. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96:1141–1151, 2008.

- [24] P. Van Dyke and A. Laneville. Simulated ice shedding on a full-scale test line. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Cable Dynamics*, Paris, France, 2009.
- [25] H. Wagner, V. Ramamurti, R. Sastry, and K. Hartmann. Dynamics of stockbridge dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 30(2):207–220, 1973.