

Přehled techniky naklápění vozových skříní

Klíčová slova: *aktivní naklápění vozidlové skříně, nedostatek převýšení, aktivní řízené příčné vypružení.*

Tento příspěvek je zaměřen na prezentaci cílů a základní funkce naklápěcího systému. Pro zvýšení cestovní rychlosti na železnicích, zejména v osobní dopravě na střední vzdálenosti, jsou k dispozici dvě alternativy: buď investovat do nových vysokorychlostních systémů, včetně specializovaných tratí a specializovaných vozidel, která na běžných tratích mohou zaručit podobné chování jako vozidla stávající, nebo investovat převážně do vozidel využívajících naklápěcí techniku a tím omezit investice do infrastruktury a dopad na životní prostředí a zaručit podstatná zlepšení cestovní rychlosti.

Dále jsou popsány principy a základní teorie naklápěcích systémů, na základě skutečných čísel je kvantifikováno zlepšení cestovní rychlosti a jsou uvedeny okrajové podmínky pro bezpečnou aplikaci.

1. ÚVOD

Pro zlepšení výkonnosti železniční dopravy a zvláště atraktivity osobní dopravy je nezbytné nabídnout kratší jízdní doby a vyšší komfort, při zachování nebo zlepšení stávající úrovně bezpečnosti.

Zvláště v posledních čtyřiceti letech bylo vynaloženo mnoho úsilí k dosažení cíle, aby železniční doprava mohla konkurovat dopravě letecké, zvláště v oblasti kratších a středních vzdáleností do 600 až 700 km.

Tohoto cíle bylo dosaženo současným působením na infrastrukturu budováním nových vysokorychlostních tratí a na vozidla navrhovaná podle nejpřísnějších aerodynamických hledisek, s nízkou hmotností na nápravu, se zlepšenými trakčními a brzdícími výkony a stavěná na podvozcích schopných jezdit stabilně, bezpečně a komfortně až do požadované velmi vysoké provozní rychlosti.

Toto řešení bylo uplatněno pouze na omezeném množství hlavních tratí, zvláště kvůli velmi vysokým investičním nákladům nutným v oblasti infrastruktury a velkému dopadu na životní prostředí daného teritoria jak ve fázi výstavby, tak za provozu.

Alessandro Elia, Ing., narozen 1948, absolvoval Ingegneria c/o Politecnico di Torino v roce 1972. Zaměstnán jako vedoucí skupiny výpočtů a zkoušek naklápěcích systémů u firmy AlstomFerroviana, Savigliano, Itálie.

Federico Albert, Ing., narozen 1967, absolvoval Ingegneria Meccanica c/o Politecnico di Torino v roce 1994. Zaměstnán jako projekt-manážer zakázky jednotek s výkyvnými skříněmi pro ČD u firmy AlstomFerroviana, Savigliano, Itálie.

Přibližně ve stejném období bylo nejdříve na zkouškách prototypů v Kanadě a později v Evropě demonstrováno, že cestovní rychlost může být dokonce i na stávajících tratích významně zvýšena využitím naklápěcí techniky (viz obr.1) a vozidel s uspokojivým chováním v oblouku při zvýšené rychlosti a vyšším nedostatku převýšení, vyšší stabilitou chodu a uspokojivými chodovými vlastnostmi při požadovaných větších provozních nárocích.

2. NAKLÁPĚCÍ TECHNIKA – PROSTŘEDEK KE SNÍŽENÍ PŘÍČNÉHO ZRYCHLENÍ PŮSOBÍCÍHO NA CESTUJÍCÍHO PŘI JÍZDĚ OBLOUKEM

Jedním z nejvýznamnějších omezujících faktorů pro rychlost vlaku v oblouku je příčné zrychlení pociťované cestujícími, které z fyziologických důvodů nemůže překročit 1 m/s^2 , což odpovídá příčné síle působící na cestujícího rovnající se přibližně jedné desetíně jeho váhy.

Při jízdě v oblouku bez převýšení na vlak působí odstředivé zrychlení, které závisí na jeho rychlosti podle známého fyzikálního vztahu

$$V = \sqrt{a_c R}$$

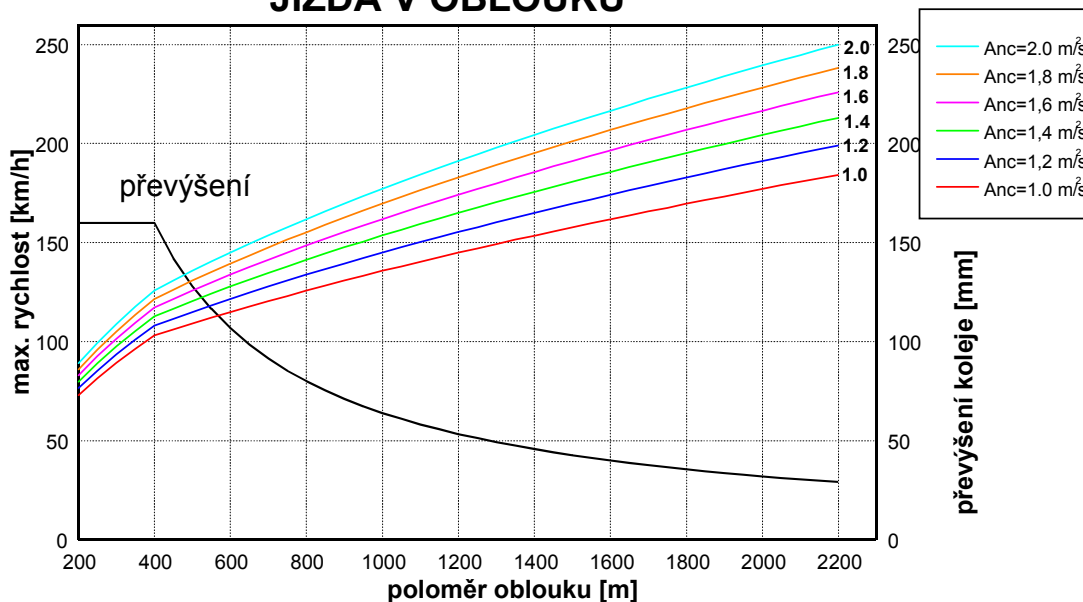
kde: V = rychlost vlaku [m/s]
 a_c = odstředivé zrychlení [m/s^2]
 R = poloměr oblouku [m]

Odstředivé zrychlení působí horizontálně.

AlstomFerroviaria S.p.A.

PENDOLINO®: Technické charakteristiky

JÍZDA V OBLOUKU



Obr.1 Rychlost jízdy v oblouku jako funkce poloměru oblouku a nevyrovnaného příčného zrychlení Anc

Při existenci převýšení o úhlu φ [°], které se normálně zřizuje v oblouku jako nadvýšení vnější kolejnici vůči kolejnici vnitřní, působí na vlak tzv. „nevyrovnané příčné zrychlení (A_{nc})“, které je

vektorovou složkou odstředivého zrychlení a_c , paralelní k rovině koleje (ke spojnici temen obou kolejnicových pásů).

V případě běžných vlaků (bez naklápěcích skříní) je úhel převýšení koleje jediným prostředkem pro snížení příčného zrychlení, působícího na vlak a rovněž na cestující.

Obr. 1 znázorňuje vztah poloměru oblouku, rychlosti vlaku a nevyrovnaného příčného zrychlení (A_{nc}) v hypotéze, že úhel φ je pro oblouky malých poloměrů konstantní velikosti 6° (což pro normální rozchod odpovídá zhruba 155 mm), zatímco pro poloměry oblouku (R) větší než 400 m se proporcionálně zmenšuje podle křivosti ($1/R$).

Odpovídající vzorec je

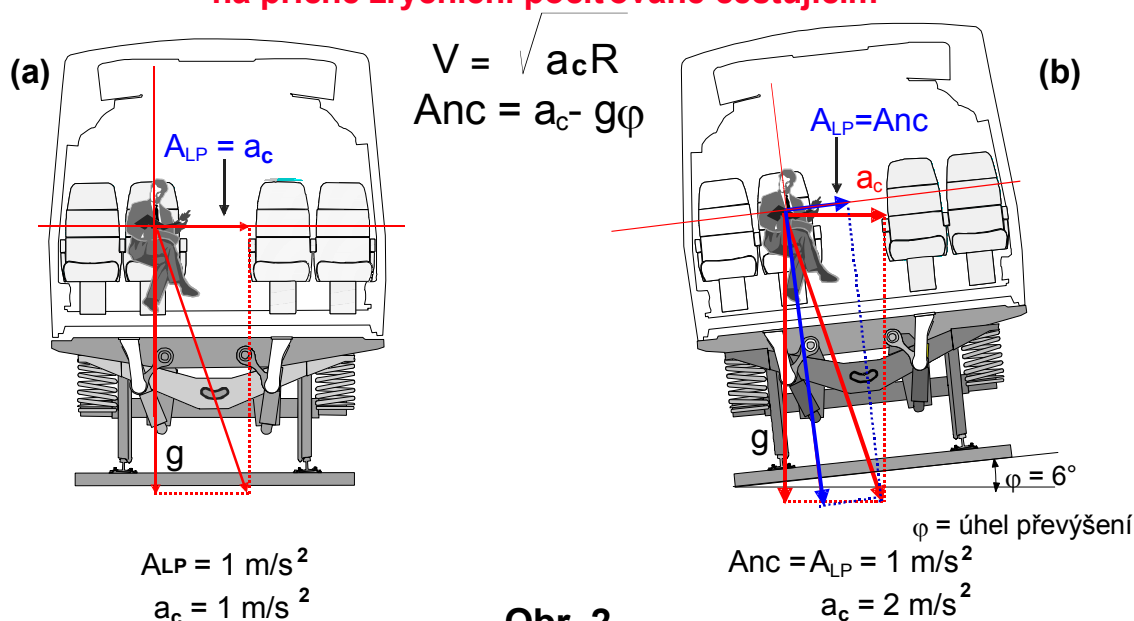
$$V = \sqrt{(A_{nc} + g \varphi)R}$$

kde: V = rychlost vlaku [m/s]
 A_{nc} = nevyrovnané příčné zrychlení [m/s^2]
 R = poloměr oblouku [m]
 φ = úhel převýšení [rad]

Z diagramů na obr. 1 je evidentní, že aby nedošlo k překročení meze pro nevyrovnané příčné zrychlení $1 m/s^2$, musí se v oblouku malého poloměru rychlost vlaku (V) vzhledem k potenciální maximální provozní rychlosti významně snížit (až na 75 – 100 km/h).

AlstomFerroviaria S.p.A.

Účinek úhlu převýšení koleje na příčné zrychlení pocíťované cestujícím



Obr. 2

a_c = odstředivé zrychlení

A_{nc} = nevyrovnané příčné zrychlení

A_{LP} = příčné zrychlení na cestujícího

E098.ppt Fiat Ferroviaria S.p.A All right reserved 2000

Page 1

Za těchto podmínek může rychlost vlaku při průjezdu obloukem, zvláště obloukem malého poloměru, zvýšit pouze naklápěcí technika.

Pro jasné porozumění účinku úhlu převýšení a úhlu naklopení na příčné zrychlení působící na cestujícího (A_{LP}), které nesmí nikdy překročit fyziologickou mez $1 m/s^2$, porovnáme dva scénáře.

První se bude týkat běžného vlaku bez naklápěcích skříní, druhý ukáže přínos úhlu naklonění na příčné zrychlení pociťované cestujícím.

Obr. 2a se vztahuje k běžnému vlaku bez naklápěcích skříní, jedoucím hypotetickým obloukem bez jakéhokoliv převýšení. V tomto případě zrychlení pociťované cestujícím odpovídá celkovému odstředivému zrychlení.

Obr. 2b ukazuje, že díky úhlu převýšení 6° je cestující vystaven příčnému zrychlení ekvivalentnímu nevyrovnanému příčnému zrychlení menšímu, než je odstředivé zrychlení.

Z porovnání obr. 2a a obr. 2b vyplývá, že zatímco příčné zrychlení působící na cestujícího je v obou případech 1 m/s^2 , odstředivé zrychlení vlaku je na obr. 2b vůči obr. 2a dvojnásobné.

Proto je rychlost vlaku znázorněného na obr. 2b zvýšena faktorem 1,4 (odpovídajícím odmocnině ze 2) vzhledem k vlaku, znázorněnému na obr. 2a.

Na obr. 2 je uveden matematický vztah nevyrovnaného příčného zrychlení k odstředivému zrychlení a k úhlu převýšení koleje.

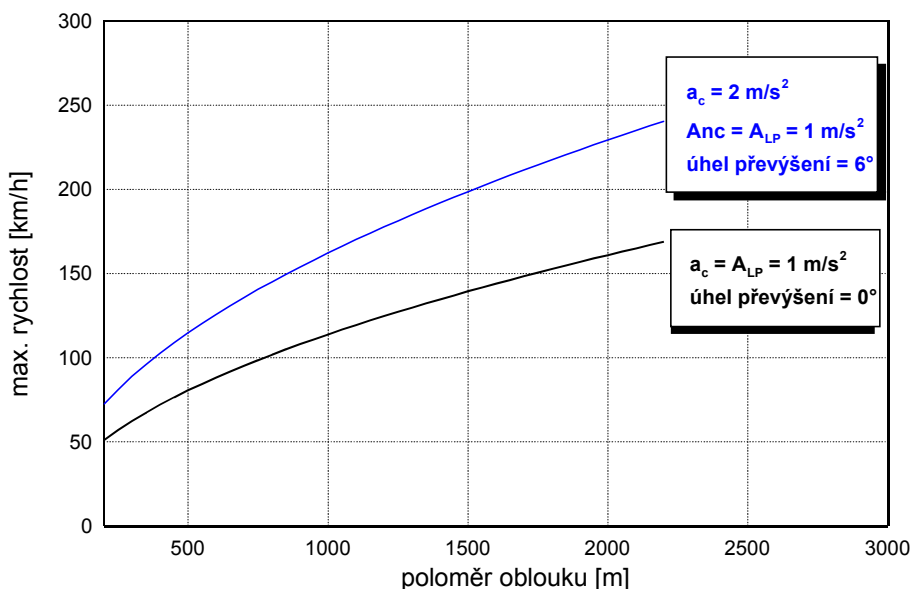
$$A_{nc} = a_c - g \varphi$$

- a_c = odstředivé zrychlení
- g = gravitační zrychlení
- φ = úhel převýšení

Pro zjednodušení a snadné pochopení matematického vzorce nebyl vzat v úvahu účinek flexibility vypružení vozidla.

AlstomFerroviaria S.p.A.

PENDOLINO®: Jízda v oblouku



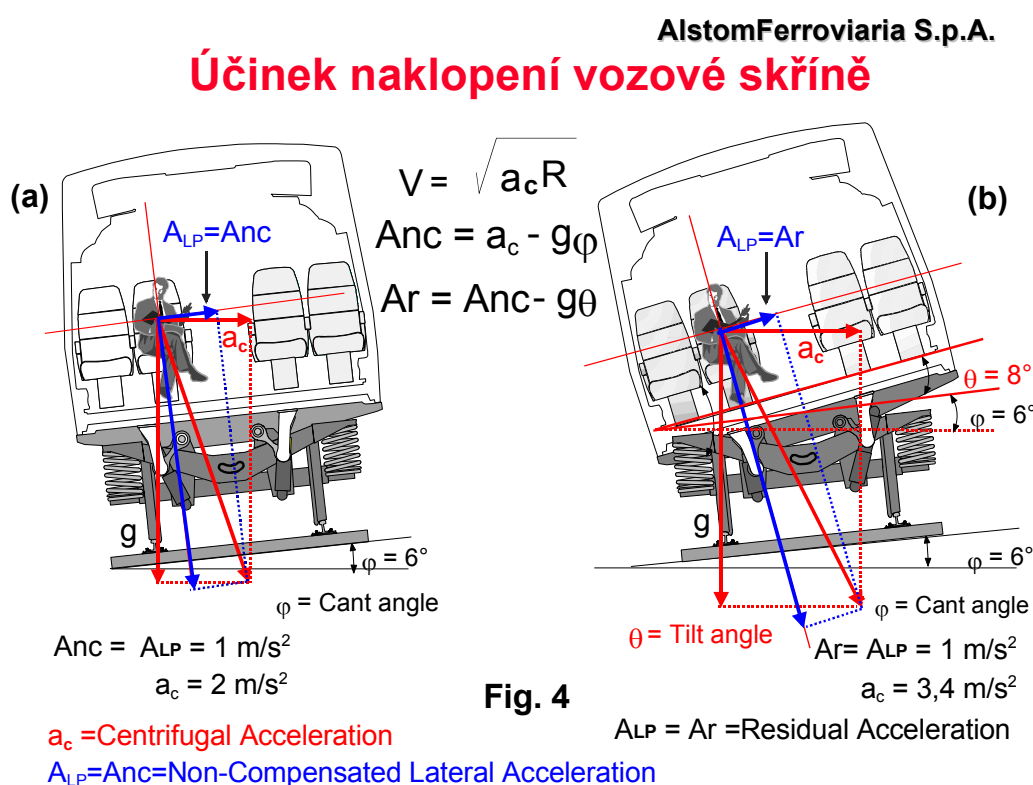
**Obr.3 Rychlost jízdy v oblouku jako funkce poloměru oblouku a daného $A_{LP}=1 \text{ m/s}^2$
Účinek převýšení koleje na maximální rychlost jízdy v oblouku**

Úhel převýšení nemůže z fyzikálních důvodů překročit maximálně přípustnou hodnotu 6° . Je to kvůli potřebě omezení dostředného zrychlení v případě, kdy vlak projíždí obloukem velmi nízkou rychlostí (v tomto případě $A_{nc} = -g \varphi$).

Příznivý účinek úhlu převýšení uvažovaného v hodnotě 6° na rychlost vlaku pro oblouky všech poloměrů je znázorněn v obr. 3.

Dva uvedené diagramy se vztahují ke dvěma běžným vlakům, jedoucím se stejným příčným zrychlením pocitovaným cestujícím v hodnotě 1 m/s^2 , ale jeden z nich na koleji bez převýšení a druhý na koleji s konstantním úhlem převýšení 6° .

Má-li se rychlost vlaku zvýšit nad hodnoty uvedené v obr. 3, stále při respektování meze maximálního příčného zrychlení působícího na cestujícího 1 m/s^2 , jediným dostupným technickým prostředkem je naklopit vozovou skříň, aby se účinek úhlu naklopení a úhlu převýšení koleje sčítal.



Obr. 4 ukazuje přínos naklopení vozové skříň pro příčné zrychlení, pocitované cestujícím.

V tomto případě reprezentuje příčné zrychlení pocitované cestujícím, tzv. „zbytkové zrychlení“, pouze vektorová složka odstředivého zrychlení paralelní s podlahou vozové skříň.

Z vektorových vztahů mezi odstředivým zrychlením, nevyrovnaným zrychlením, zbytkovým zrychlením a rovněž z matematických vzorců uvedených na obr. 4 je evidentní, že pro konečný účel, tj. zmenšit příčné zrychlení působící na cestujícího, působí úhel naklopení jako virtuální dodatečný úhel převýšení koleje.

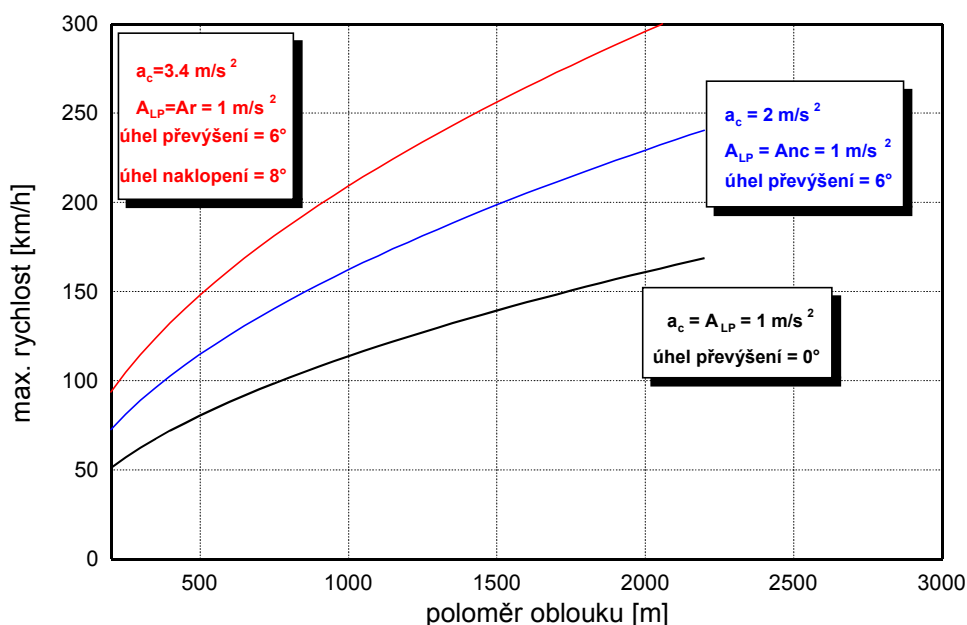
Z tohoto důvodu je možno na úhel naklopení pohlížet jako na prostředek pro kompenzaci „nedostatku převýšení“.

Rovněž v tomto případě porovnání mezi obr. 4a a obr. 4b demonstruje, že zatímco příčné zrychlení působící na cestujícího je v obou případech 1 m/s^2 , odstředivé zrychlení u nakloněného vlaku je $3,4 \text{ m/s}^2$ a u nenakloněného jen 2 m/s^2 .

Proto je u nakloněného vlaku zisk rychlosti asi o 30 % proti vlaku nenakloněnému (to je dáno druhou odmocninou z poměru obou hodnot odstředivého zrychlení).

AlstomFerroviaria S.p.A.

PENDOLINO®: Jízda v oblouku



**Obr.5 Rychlost jízdy v oblouku jako funkce poloměru oblouku a daného $A_{LP}=1 \text{ m/s}^2$
Kombinovaný účinek převýšení koleje a naklonění vozové skříně**

E098.ppt Fiat Ferroviaria S.p.A All right reserved 2000

Page 1

V obr. 5 jsou pro posouzení přírůstku rychlosti získaného v různých poloměrech oblouku u vlaku s naklápěcími skříněmi vzhledem k vlaku bez naklápění při jízdě se stejným příčným zrychlením působícím na cestujícího v hodnotě 1 m/s^2 uvedeny tři diagramy.

Dvě nižší čáry jsou totožné s čarami uvedenými v obr. 3 a vztahují se k běžnému vlaku bez naklápění, zatímco horní čára se vztahuje k vlaku s naklápěcími skříněmi, jedoucímu s konstantním úhlem naklonění 8° na koleji s úhlem převýšení 6° a využívajícímu zbytkové zrychlení působící na cestujícího 1 m/s^2 .

Z tohoto porovnání je zřejmé, že zisk rychlosti dosažitelný u vlaku s naklápěcími skříněmi při průjezdu obloukem je vůči běžnému vlaku bez naklápění řádově kolem 30 %.

Obecněji řečeno, zisk rychlosti v oblouku závisí na zvýšení dovoleného A_{nc} ze stávající hodnoty u běžných vlaků na hodnotu použitou u vlaku s naklápěním. Jako u prvního vzorce závisí % zisku rychlosti na druhé odmocnině z poměru odpovídajících hodnot a_c .

Pro dané hodnoty A_{nc} tento poměr klesá s nárůstem převýšení (tj. když je poloměr oblouku menší).

Například v případě nárůstu A_{nc} z $1,0$ na $1,8 \text{ m/s}^2$, je-li použito maximální dovolené převýšení (6° , 155 mm u normálního rozchodu), se poměr mezi zvýšenou rychlostí a současnou rychlostí mění od + 18 % (malé poloměry oblouků) do + 27 % (poloměr 1200 m , převýšení 2°).

3. NAKLÁPĚCÍ TECHNIKA – ŘEŠENÍ PRO OPTIMALIZACI VYŠŠÍ RYCHLOSTI V OBLOUKU A KOMFORTU CESTUJÍCÍCH

Jak bylo řečeno výše, naklápěcí technika je prostředek pro zajištění dobré úrovně komfortu cestujícího i v případech vysokého nevyrovnaného příčného zrychlení v důsledku vyšší rychlosti v obloucích.

Omezení zbytkového zrychlení pocíťovaného cestujícím pod maximálně přípustnou hodnotu 1 m/s^2 je však jen základní požadavek. Aby se zabránilo jakýmkoliv problémům v komfortu nebo vzniku „mořské nemoci“ cestujících, musí být zároveň kontrolovány ostatní velmi důležité dynamické parametry.

Tyto parametry jsou:

- úhlová rychlost v horizontální rovině
- úhlová rychlost ve vertikální rovině
- vertikální zrychlení
- rychlost změny vertikálního zrychlení (vertikální ráz)
- rychlost změny zbytkového zrychlení (příčný ráz působící na cestujícího).

Velmi sofistikované matematické modely, vycházející z ohromného množství počítačových simulací a z intenzivních zkoušek na skutečných kolejích, vzájemně propojují všechny výše uvedené fyzikální parametry a zavádějí pravidla kontroly rotace vozové skříně, zajišťující nejlepší komfort pro cestující.

Všechny tyto vstupy a zkušenosti byly firmou AlstomFerroviaria využity při vývoji naklápěcí techniky, známé pod názvem „Pendolino“[®].

Všechny fyzikální parametry ovlivňující dynamické chování Pendolina při naklápění v oblouku jsou měřeny snímači umístěnými na vozidle. Pendolino nevyžaduje žádné pozemní „majáčky“ nebo specializovaná signální zařízení v blízkosti oblouků, s drahou instalací a rovněž vysokými náklady na údržbu.

Standardní sada snímačů použitých na palubě Pendolina zahrnuje:

- snímače zrychlení na podvozcích a na vozové skříně pro měření nevyrovnaného příčného zrychlení a zbytkového příčného zrychlení uvnitř vozové skříně,
- podélná a vertikální gyra pro měření rychlosti rotace rámu podvozku kolem podélné a vertikální osy při průjezdu vlaku přechodnicí resp. plným obloukem a
- úhlové snímače pro měření aplikovaného úhlu naklopení.

Každý z výše uvedených snímačů zajišťujících měření fyzikálních parametrů potřebných pro matematické algoritmy uplatňující pravidla řízení naklápění vozové skříně je na Pendolinu zdvojen pro zajištění odpovídající úrovně redundance v případě, že by jeden z nich selhal.

Tím je získána velmi uspokojivá dostupnost funkce naklápění.

4. MÁ NAKLÁPĚCÍ TECHNIKA VLIV NA BEZPEČNOST VLAKU ?

Naklápěcí technika umožňující vlakům s naklápěcími skříněmi projíždět oblouky vyšší rychlostí než běžným vlakům, často vyvolává určité instinktivní obavy ve vztahu k možným selháním funkce naklápění.

Nejčastěji se opakující otázka v souvislosti s bezpečností vlaků s naklápěcí technikou je:

„Co by se mohlo stát vlaku s naklápěcími skříněmi, dojde-li v normálním provozu k poruše řídicího systému naklápění?“

První odpověď je: Objeví-li se jakákoliv závada, je to okamžitě zjištěno diagnostickým systémem, působícím v reálném čase na každé součásti naklápěcího systému (snímače, počítač a ovladače).

Za těchto okolností všechny ovladače naklápění, které dodávají sílu pro naklopení vozové skříně, jsou deaktivovány a každá vozová skříň je v důsledku působení gravitační síly automaticky přestavena do centrované polohy, což z vlaku s naklápěcí technikou učiní vlak podobný běžnému vlaku bez naklápěcích skříní.

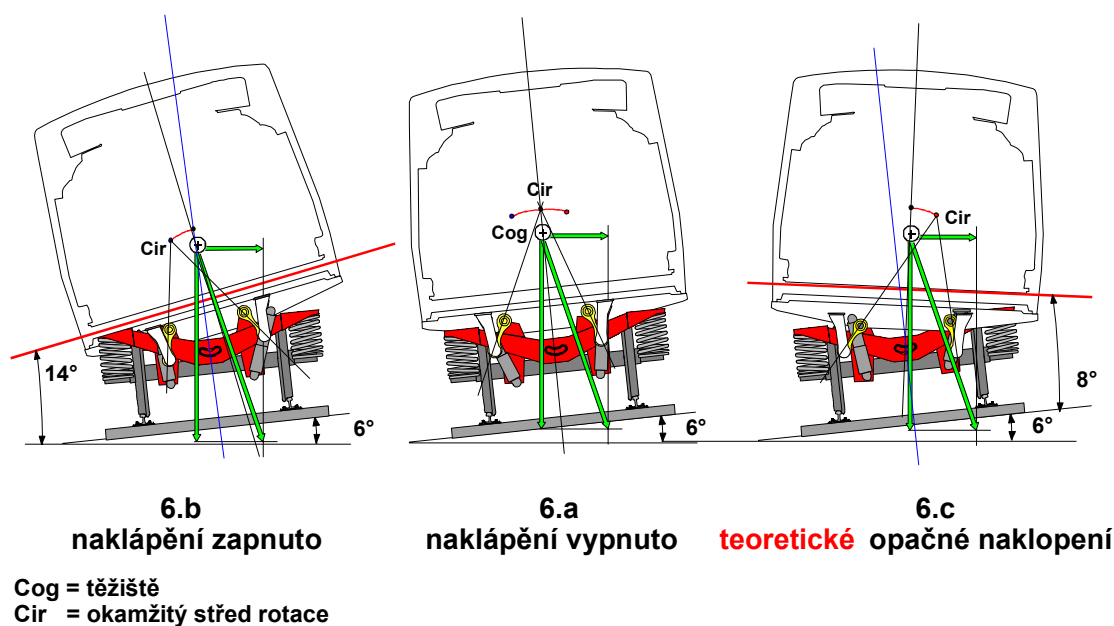
Vlak s naklápěcími skříněmi s naklápěcím systémem v poruše může být provozován stejnou rychlostí jako běžný vlak, který nikdy nepřekročí maximální dovolené nevyrovnané příčné zrychlení 1 m/s^2 .

Druhý pohled

Co by se mohlo stát vlaku s naklápěcími skříněmi, dojde-li k poruše naklápěcího systému při jízdě v oblouku s maximálním nevyrovnaným příčným zrychlením až do 2 m/s^2 ?

AlstomFerroviaria S.p.A.

PENDOLINO®: Bezpečnost se zřetelem k převrácení



Obr.6

Obr. 6b se vztahuje k naklopenému vlaku, jedoucímu obloukem s maximálním nevyrovnaným příčným zrychlením 2 m/s^2 při převýšení koleje 6° .

Vozová skříň je držena v naklopené poloze dokud na ni působí naklápěcí síla vyvozovaná ovladači naklápění.

Jestliže působení této naklápěcí síly v důsledku deaktivace ovladačů naklápění náhle pomine, na vozovou skříň bude působit síla jako výslednice vektorového součtu gravitace a odstředivé síly.

Jak je znázorněno na obr. 6b, výsledná síla působící v těžišti (Cog) vyvolává otáčivý moment kolem středu okamžité rotace (Cir), což automaticky natočí vozovou skříň opět do centrované polohy, jak je znázorněno na obr. 6a.

Centrovaná poloha vozové skříně znázorněná na obr. 6a je fyzikálně stabilní polohou dokonce i při nevyrovnaném příčném zrychlení 2 m/s^2 .

Třetí úvaha

Co by se mohlo stát vlaku s naklápěcími skříněmi, jestliže v důsledku poruchy počítače ovládajícího naklápění je při jízdě obloukem s maximálním nevyrovnaným příčným zrychlením až do 2 m/s^2 vozová skříň naklopena na druhou stranu, směrem od středu oblouku?

I když takováto situace pokud jde o podmínky protinaklopení nemůže u Pendolina nikdy nastat, jak dokazují nejen podrobná analýza způsobů selhání, ale i zkušenosti získané z provozu, je tato teoretická porucha analyzována jen za účelem potvrzení skutečné bezpečnosti Pendolina.

Obr. 6c znázorňuje vozovou skříň naklopenou na opačnou stranu při jízdě obloukem s maximálním nevyrovnaným příčným zrychlením 2 m/s^2 a s maximálním úhlem naklopení na opačnou stranu 8° .

Vozová skříň je teoreticky držena v této opačně naklopené poloze do té doby, dokud na ni působí chybná naklápěcí síla, vyvozovaná ovladači naklápění. Obr. 6c ukazuje, že ani v takovém stavu nemůže nikdy dojít k převrácení.

Když chybná síla vyvozující opačné naklopení přestane v důsledku deaktivace ovladačů naklápění působit, výsledná síla daná vektorovým součtem gravitační a odstředivé síly působí na vozovou skříň otáčivým momentem kolem středu okamžité rotace, který vozovou skříň natočí zpět do centrované polohy znázorněné na obr. 6a.

Z bezpečnostních důvodů je v každé vozové skříně Pendolina instalován zvláštní snímač zrychlení za účelem monitorování maximálního příčného zrychlení působícího na vozidlo.

V případě, že jedno z monitorovaných příčných zrychlení měřených na každé vozové skříně překročí mez 1 m/s^2 , všechny ovladače naklápění vlaku Pendolino jsou deaktivovány.

V důsledku toho všechny vozové skříně, jsou-li naklopeny, se automaticky působením gravitační síly naklopí zpět do centrální polohy a vlak může pokračovat jako běžný vlak bez naklápěcích skříní.

Z toho vyplývá závěr, že hodnocení vlaku Pendolino s naklápěcími skříněmi jako vnitřně bezpečného je konsistentní s fyzikálním principem, že žádná možná chyba funkce naklápěcího systému nemůže provozně bezpečnostní meze vlaku vůbec ovlivnit.

V Turíně, leden 2002

Překlad z angličtiny Ing. Ladislav Kopsa