

## System Pendolino

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

*Cílem naklápěcích systémů je optimalizovat osobní dopravu, zkrátit jízdní doby a zlepšit komfort, se zřetelem na bezpečnost jízdy a stabilitu koleje.*

*Pro zvýšení traťové rychlosti v oblouku je nezbytné se spolehnout na naklápěcí techniku a na navrhování vozidel s vynikajícím chováním v oblouku, podle stávajících návrhových parametrů a kvality geometrie koleje. Pro zvýšení traťové rychlosti na přímé koleji je nutné zajistit uspokojivý trakční výkon, komfort a zvláště stabilitu chodu podle kvality geometrie koleje.*

*Naklápěcí systém musí se stejnou prioritou splňovat různé základní požadavky. Musí respektovat pravidla bezpečnosti jízdy, bezpečnost proti vykolejení, síly působící příčný posun koleje, maximální napětí v kolejnicích od příčných a svislých sil, stabilitu chodu, pravidla jakosti chodu, jízdní komfort, omezení opotřebení profilu kola a kolejnice a všechna provozní pravidla.*

*Tento příspěvek prezentuje výsledky a zkušenosti, získané s Pendolinem během 20 let zkoušení v celé Evropě.*

### 1. ÚVOD

Je známým a akceptovaným faktem, že zvýšení cestovní rychlosti na stávající koleji může být dosaženo ekonomicky zajímavým způsobem pouze obratnou kombinací zvýšení traťových rychlostí, s respektováním současného stavu koleje, možných zlepšení a odpovídajících nákladů jak v přímé koleji, tak v obloucích.

Pro zvýšení traťové rychlosti v oblouku je nezbytné se spolehnout na naklápěcí techniku a navrhování vozidel s uspokojivým chováním v oblouku, podle stávajících návrhových parametrů a kvality geometrie koleje.

Pro zvýšení traťové rychlosti na přímé koleji je nezbytné zajistit uspokojivý trakční výkon a zvláště stabilitu chodu podle kvality geometrie koleje.

---

**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 *AlstomFerroviaria, 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 *AlstomFerroviaria, Savigliano, Itálie*.

Výběr nejlepšího řešení závisí na různých faktorech, ke kterým patří:

- vlastnosti stávající koleje jako jsou návrhové parametry koleje, kvalita geometrie koleje, součásti koleje a odpovídající přípustné síly, přítomnost zvláštních bodů jako jsou výhybky, kolejové křižovatky atd.,
- vlastnosti stávajícího trakčního vedení a odpovídající konstrukční rychlost, typ sběračů,
- dopravní pravidla jako obrys vozidla, zabezpečovací zařízení, pravidla pro křižování vlaků atd.,
- provozní podmínky: jak silně je trať zatížená, jaký je typ vlaku a odpovídající rychlosti, jaká jsou omezení rychlosti atd.

Tento komplexní problém vyžaduje systémový přístup. Nejlepší řešení musí brát v úvahu na jedné straně stávající vlastnosti a současné provozní podmínky, na druhé straně pak výsledky marketingu a přepravní cíle a odpovídající investiční a provozní náklady.

Výrobce naklápačského systému musí na základě zkoušek a výsledků z provozu široké škály různých aplikací železniční správě demonstrovat schopnost svého produktu dosáhnout stanovených technických podmínek.

Při návrhu, předběžných výpočtech a zkouškách na trati se musí posuzovat dosažení výkonových kritérií vlaku v následujících bodech:

- zlepšení nedostatku převýšení ze současné hodnoty pro vozidla bez naklápění na cílovou hodnotu pro vozidla s naklápačskými skříněmi,
- schopnost vlaku s naklápačskými skříněmi zlepšit cílový nedostatek převýšení na nejvyšší možnou míru s ohledem na bezpečnost (ovlivněno kvalitou koleje a poloměry oblouků),
- úhel naklonění skříně vůči podvozku, který musí být dostatečně velký, aby snížil příčné zrychlení na úroveň akceptovatelnou cestujícím.

Tímto způsobem, při použití úhlů naklonění 8 - 9° a vyrovnání 70 – 80 % v úrovni koleje působícího nedostatku převýšení, je možno získat 25 – 35 % průměrné rychlosti v oblouku, se zbytkovým příčným zrychlením působícím na cestujícího nižším nebo stejným jako v běžných vlacích.

V případě převážně přímé koleje je pro zvýšení cestovní rychlosti velmi důležité zvýšení konstrukční rychlosti. U dlouhých úseků s maximální provozní rychlostí by byl zisk úměrný zvýšení konstrukční rychlosti.

Obzvláště při obtížných návrhových parametrech tratě bude nutné zdůraznit nejlepší kompromis mezi různými výkonovými charakteristikami (konstrukční rychlost, chování v oblouku, snížení dynamických účinků na místních závadách v geometrii koleje atd.), při optimalizaci komfortu, bezpečnosti, interakce vozidla a koleje, snížení opotřebení kol a kolejnic.

Naklápačský systém musí se stejnou prioritou splňovat různé základní požadavky:

- respektování zásad bezpečnosti jízdy: bezpečnost proti vykolejení, síly působící příčný posun koleje, maximální a průměrné napětí v kolejnici od příčných a svislých sil,
- respektování pravidel stability chodu pro definované jízdní obrysy kol a kolejnic,
- respektování pravidel jakosti chodu, podle typu požadovaných zkoušek,
- respektování jízdního komfortu lepšího nebo stejného jako u odpovídajících referenčních vlaků běžné konstrukce až do maximální provozní rychlosti, pro průměrný komfort i pro chování v oblouku,

- snížení opotřebenění kol a kolejnic, které může být výrazně dosaženo v obloucích malých poloměrů pomocí bezpečných a spolehlivých systémů radiálně nastavitelných dvojkolí a
- snížení potřebné údržby koleje co do četnosti a komplexnosti kontrolních úkonů a udržování provozních tolerancí nebo jejich opětovného dosahování.

## 2. NÁVRHOVÉ PARAMETRY KOLEJE

### 2.1 Obecně

Úvahy v této kapitole se odvolávají na evropské normy a zkušenosti. Doporučené hodnoty se vztahují k moderní koleji se šterkovým kolejovým ložem a k moderním vozidlům, která odpovídají standardům UIC.

Kolej z hlediska návrhových parametrů nebo geometrie tvoří následující geometrické prvky:

- přímé a ploché úseky koleje,
- oblouky, převýšení, přechodnice a vzestupnice v horizontálním směru,
- úseky ve sklonu a vertikální oblouky ve vertikálním směru.

### 2.2 Křivost a převýšení v horizontálních obloucích

V Evropě je běžné vyjadřovat geometrii horizontálních oblouků jako poloměr  $R$  nebo lépe jako křivost  $C = 1/R$ .

Na vozidlo jedoucí rychlostí  $V$  v oblouku o poloměru  $R$  působí odstředivá příčná síla  $F_c = mV^2/R$  a odpovídající zrychlení, což má řadu nežádoucích účinků: nepohodlí cestujících, převrácení vozidla, vykolejení, vysoké příčné síly na kolej.

Vysoké příčné síly vyvolávají opotřebenění kolejnic a kol, riziko posunutí koleje a poškození svršku a spodku.

Pro omezení těchto jevů je možné použít maximální možný poloměr oblouku, omezit rychlost nebo vytvořit převýšení pro kompenzaci (vyrovnání) příčného zrychlení.

Převýšení je nadvýšení vnější kolejnice v oblouku. Normálně se dělá u oblouků, kde je rychlost větší než 40 km/h.

Převýšení  $h$  vyrovnává část příčného zrychlení, protože zavádí úhel; jede-li vozidlo rychlostí  $V$ ,  $s$  je vzdálenost mezi kolejnicemi, příčné zbytkové (nebo nevyrovnané) zrychlení je:

$$anc = \frac{V^2}{R} - \frac{gh}{s}$$

Ideální (teoretické) převýšení se jeví při  $anc = 0$ . V tomto případě je výslednice  $V^2/R$  a  $g$  kolmá ke koleji a rovná se:

$$h_{id} = \frac{sV^2}{gR}$$

Namísto  $anc$  se obecně používá pojem nedostatek převýšení. Nedostatek převýšení je rozdíl mezi ideálním převýšením a skutečným převýšením. Jeho korelace s  $anc$  je dána vztahem:

$$I = \frac{s}{g} anc$$

## 2.3 Přejchodnice

Přejchodnice se používají mezi přímou kolejí a oblouky nebo mezi dvěma navazujícími oblouky pro umožnění postupné změny příčného zrychlení. Osa přejchodnice má tutéž tečnu v místech styku s navazujícími částmi koleje, přičemž se křivost plynule mění z hodnoty v jednom místě styku na hodnotu v druhém místě styku.

V přejchodnicích se uplatňuje rovněž převýšení pomocí vzestupnice, jejíž začátek a konec se zpravidla kryjí se začátkem a koncem přejchodnice.

Přejchodnice se používají vždy mimo případů, kdy je poloměr oblouku větší než 3000 m nebo je-li nespojitosť zrychlení omezena na  $0,2 - 0,3 \text{ m/s}^2$ .

Mezi přímou kolejí a obloukem musí křivost přejchodnice  $1/R$  postupně narůstat od nuly do hodnoty v kružnicovém oblouku. Toho je možno dosáhnout vycházejíce z lineárního vztahu:

$$\frac{1}{R} = ks$$

kde křivost lineárně narůstá po celé délce křivky  $s$  od jejího začátku. Na začátku je křivost nula, a proto je tento bod vybrán jako místo spojení s přímou kolejí. Rovnici přejchodnice  $y$  je možno nalézt jako funkci  $x$ . Přesná forma je:

$$\frac{d\phi}{ds} = \frac{1}{R}$$

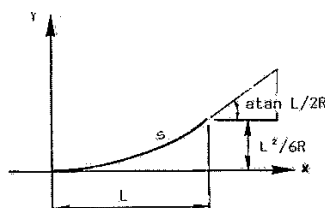
což je možno řešit následovně:

$$\phi = \int \frac{1}{R} ds = \frac{1}{2} ks^2$$

a pravoúhlé souřadnice  $x$ ,  $y$  jsou určeny takto:

$$x = \int \cos \phi ds = \int \cos \frac{ks^2}{2} ds \quad y = \int \sin \phi ds = \int \sin \frac{ks^2}{2} ds$$

Tato křivka proto může být popsána pouze v parametrickém tvaru, vyjádřeném jako Fresnelovy integrály. Křivka je známa jako klotoida. Kvůli matematicky obtížné formulaci se pro ruční výpočet obvykle používá jednodušší přejchodnice, známá jako kubická parabola.



Obr. 1: Kubická parabola

Pro získání této funkce přejchodnice se zavádějí dvě zjednodušení proti klotoidě. Křivka je aproximována jako

$$\frac{1}{R} = y'' = kx$$

a její délka je aproximována souřadnicí  $x$ . Po dvojí integraci a zavedení okrajových podmínek se nalezne vzorec pro kubickou parabolou:

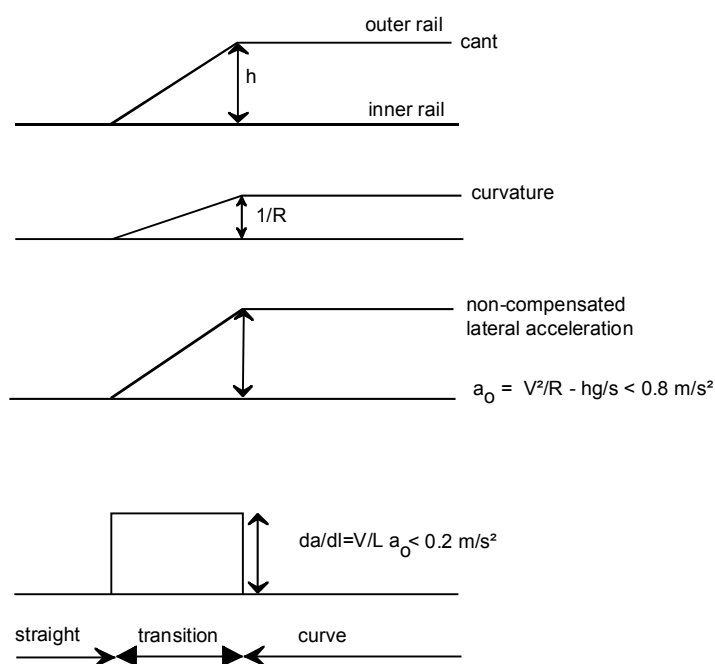
$$y = \frac{x^3}{6RL}$$

kde  $L$  je délka přechodnice promítnuté na osu  $x$ . Tento výraz je v souladu s prvním členem rozvoje řady pro klotoidu.

## 2.4 Vzestupnice

Pro umožnění přechodu z přímé koleje do oblouku s převýšením se používá vzestupnice, v níž se převýšení mění z nuly na hodnotu  $h$  v oblouku postupným zvedáním vnější kolejnice. Nevyrovnané příčné zrychlení se musí zvyšovat od nuly po hodnotu  $a_0$  v oblouku plynule, protože

- vzestupnice a přechodnice musí koincidovat a
- nárůst převýšení a nárůst křivosti musí probíhat podle stejné funkce.



Obr. 2: Vzestupnice a příčné zrychlení v oblouku

Nevyrovnané příčné zrychlení se v přechodnici mění lineárně. Tato změna představuje ráz a její hodnota je omezena z důvodů bezpečnosti.

Vyhláška UIC 703 R udává přípustná kvazistatická zrychlení a související hodnoty v obloucích pro běžné vlaky. U vlaků s naklápěcími skříněmi mohou být tyto hodnoty překročeny v souladu s novým souborem přípustných parametrů.

## 2.5 Přípustné parametry pro vlaky s naklápěcími skříněmi

Vyhláška UIC uvádí soubor hodnot pro 4 třídy vlaků, od vlaků jedoucích nízkou rychlostí po vlaky jedoucí velmi vysokou rychlostí. Tyto meze jsou normálně vztaženy k hlediskům komfortu; jiná situace je u vlaků s naklápěcími skříněmi, kde je mez komfortu ovlivněna úhlem naklopení.

Následující tabulka uvádí přehled pravidel, která jsou normálně používána pro umožnění provozu vlaků s naklápěcími skříněmi po koleji.

		BĚŽNÉ VLAKY				VLAKY S NAKLÁPĚNÍM			
		max.		výjimečně		max.		výjimečně	
	kolej	styk.	BK	styk.	BK	styk.	BK	styk.	BK
<b>parametry bezpečnosti</b>									
PŘEVÝŠENÍ	mm	150	150	160	160	150	150	160	160
SKLON VZESTUPNICE	mm/m	2	2	2.5	2.5	2	2	2.5	2.5
NEDOSTATEK PŘEVÝŠENÍ	mm	90	120	110	150	210	275	225	300
<b>parametry komfortu</b>									
ČASOVÁ ZMĚNA PŘEVÝŠENÍ V ÚROVNI KOLEJE	mm/s	55	55	85	85	70	70	105	105
ČASOVÁ ZMĚNA NEDOSTATKU PŘEVÝŠENÍ V ÚROVNI KOLEJE	mm/s	55	55	70	70	160	172	160	175
ÚHEL NAKLOPENÍ	stupně	0	0	0	0	8	8	8	8
PŘEVÝŠENÍ KOMPENSOVANÉ NAKLOPENÍM	mm	0	0	0	0	160	205	160	205
ČASOVÁ ZMĚNA NAKLOPENÍ	mm/s	0	0	0	0	70	70	105	105
NEDOSTATEK PŘEVÝŠENÍ NA VOZOVÉ SKŘÍŇI	mm	108	132	132	180	92	125	110	155
ČASOVÁ ZMĚNA NEDOSTATKU PŘEVÝŠENÍ NA VOZOVÉ SKŘÍŇI	mm/s	66	77	66	84	57	73	69	90

## 3. POŽADAVKY NA KOMFORT

### 3.1 Úvod

Dynamiccké chování železničního vozidla ve vztahu k bezpečnosti se hodnotí pomocí zvláštních kvalitativních indexů, zahrnujících kvantitativní měření jakosti chodu, stability vozidla a schopnosti vozidla projíždět oblouky.

Jakost chodu se obvykle interpretuje jako schopnost vypružení vozidla udržet pohyby vozové skříně v rozmezí komfortu pro člověka a/nebo v rozmezí nutném pro zajištění, že nedojde k poškození nákladu.

Pro posuzování jakosti chodu vozidla se obecně používají dva přístupy: metoda doby únavy a metoda indexu jakosti chodu. Pro vlaky s naklápěcími skříněmi byla vyvinuta zvláštní hodnotící metoda, založená na posuzování chování v oblouku.

### 3.2 Metody SNCF pro posuzování jakosti chodu

Zkušenosti ukázaly, že průměrná osoba cestující ve vozidle začne mít zřetelný pocit únavy na konci určité doby trvání cesty, která se nazývá *doba únavy*.

Tato koncepce byla původně vyvinuta německými a francouzskými státními drahami. Pro zjištění doby únavy bylo provedeno mnoho zkoušek. Příčná a vertikální zrychlení byla měřena na podlaze vozidel. Tato zrychlení byla filtrována mezi 0,5 a 5 Hz, s využitím pásmové propusti a komfort byl omezen na tento frekvenční rozsah.

Mělo se za to, že celková únava se skládá z příspěvků různých únav v každé kategorii, vážených jejich příslušnými počty. Je-li  $n_i$  počet cyklů průměrného zrychlení  $a_i$  a  $T_i$  odpovídající doba únavy, pak celková doba únavy  $T$  je

$$T = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_i}{\frac{n_1}{T_1} + \frac{n_2}{T_2} + \dots + \frac{n_i}{T_i}}$$

Výpočet každé doby únavy  $T$  byl vykonán s experimentálně zjištěnými daty a odpovídá vzorci

$$\frac{a}{(f - 5.2)^2 + 24.8} = k$$

kde  $a$  je špičkové zrychlení (v centimetrech za sekundu na druhou),  $f$  je frekvence kmitání a  $k$  je konstanta.

Vztah mezi známkou komfortu a velikostí zrychlení pro 1,4 Hz je v souladu se vztahem

$$T = \frac{280}{a_{1.4} - 8} - 0.71$$

Tato rovnice se používá pro nalezení parciální doby únavy  $T_i$ . Předpokládá se, že úroveň vertikálního zrychlení je o faktor  $\sqrt{2}$  vyšší než příčné zrychlení, dávající stejný komfort.

Pro hrubou představu lze uvést, že komfort se považuje za dobrý, když celková doba únavy  $T$  je 10 hodin v příčném a 20 hodin ve vertikálním směru.

### 3.3 Indexy jakosti chodu a komfortu $W_z$ podle Sperlinga

Sperlingův index jakosti chodu je určen pro posuzování chování vozidla, nikoliv komfortu a používá se hlavně u nákladních vozů. Pro komfort cestujících by měl být používán Sperlingův index komfortu. Při posuzování jakosti chodu je rozhodujícím samo vozidlo. Pro zjištění jízdního komfortu musí být vozidlo posuzováno podle účinků mechanických vibrací na cestující.

Pro oba indexy se běžně používají dvě alternativní definice:

$$W_z = \sqrt[10]{\int_{0.5}^{30} a^3 B^3 df} \qquad W_z = \sqrt[6.67]{\int_{0.5}^{30} a^3 B^2 df}$$

kde  $a$  je amplituda zrychlení ( $\text{cm/s}^2$ ) signálu frekvence  $f(\text{Hz})$  a  $B$  je frekvenční váhový faktor. Definice s  $B^3$  je původní a je třeba jí dávat přednost. Definice s  $B^2$  byla zavedena později, pro usnadnění výpočtu on-line. Frekvenční váhové faktory jsou definovány následovně:

*Jakost chodu vozidla*

$$B = 1.14 \left[ \frac{[(1 - 0.056f^2)^2 + (0.645f)^2 \cdot (3.55f)^2]}{[(1 - 0.252f^2)^2 + (1.547f - 0.00444f^3)^2] [1 + 3.55f^2]} \right]^{1/2}$$

Index je nezávislý na směru.

*Komfort, horizontální vibrace - příčně*

$$B = 0.737 \left[ \frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.00368f^3)^2} \right]^{1/2}$$

*Komfort ve vertikálním směru*

$$B = 0.588 \left[ \frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.00368f^3)^2} \right]^{1/2}$$

$$B_w = 1,25 B_s$$

Škála Sperlingova indexu jakosti chodu sahá od 1 – velmi dobrý po 5 – nebezpečný. Škála Sperlingova indexu komfortu sahá od 1 – sotva pozorovatelný po 4 – extrémně nepříjemný, delší expozice škodlivá.

### 3.4 Mezinárodní normalizační organizace ISO

Podle normy Mezinárodní normalizační organizace ISO je vliv vibrací na lidské tělo vyjádřen dobou únavy T. Existují tři úrovně T: únava – snížená výkonnost, expoziční limity a meze sníženého komfortu.

Jsou-li lidé průběžně vystaveni mechanickým vibracím, po nějaké době klesá kvůli únavě jejich schopnost pracovat. Při velmi nízkých frekvencích je vnímavost vůči horizontálním vibracím větší, než vůči vibracím vertikálním. Tento trend se však při vyšších frekvencích obrací. Křivky doby únavy jako funkce horizontálního zrychlení a frekvence mají tentýž obecný tvar jako křivka doby únavy coby funkce vertikálního zrychlení a frekvence kromě toho, že hodnoty zrychlení by se měly násobit faktorem 2. Překračování mezních křivek, získaných ze studií zahrnujících piloty letadel a řidiče automobilů, není bez zvláštních opatření žádoucí.

Návrh ISO obsahuje dvě metody měření pro zjištění dob únavy. U první metody se celkový frekvenční rozsah rozdělí do intervalů velikosti jedné třetiny oktávy. Nejkratší takto určená doba únavy se používá jako kritérium pro posouzení stresu působícího na člověka.

U druhé metody jsou různé frekvence váženy pomocí filtrů s pásmovou propustí v rozsahu od 1 do 80 Hz. Doby únavy určené druhou metodou jsou obecně kratší než doby, určené první metodou. Data obsažená v návrhu ISO nejsou postačující pro konstrukci filtru, protože frekvenční váhové křivky jsou definovány pouze v intervalu mezi 1 a 80 Hz. Je rovněž nutné definovat křivku filtru pod 1 a nad 80 Hz. Navíc by bylo nezbytné rozhodnout, zda by při posuzování konkrétního železničního vozidla byla rozhodující schopnost pracovat nebo komfort.

### 3.5 Metody UIC/CEN/ERRI pro posuzování chodu

Základem těchto metod je měření různých signálů zrychlení v pětiminutových blocích. Tyto signály se pak váží pomocí váhových filtrů W<sub>b</sub> a W<sub>d</sub>.

V dalším stádiu se z filtrovaných dat vypočítají hodnoty RMS pro 60 za sebou jdoucích pětivteřinových bloků. Hodnota potřebná jako vstup do vzorce pro posuzování komfortu je 95. percentil z těchto hodnot RMS, který se pro 60 bodů rovná 57. největší hodnotě.



Existují dvě různé třídy indexů pro průměrný komfort. „Zjednodušená“ metoda, povinná v normě CEN, je plně založena na zrychleních měřených na podlaze.

Index komfortu je dán

$$N_{MV} = 6 \sqrt{\left(\frac{W_d}{a_{XP95}}\right)^2 + \left(\frac{W_d}{a_{YP95}}\right)^2 + \left(\frac{W_b}{a_{ZP95}}\right)^2}$$

kde  $a$  představuje hodnotu zrychlení.

První dolní index X, Y nebo Z představuje podélný, příčný nebo vertikální směr.

Druhý dolní index P znamená měření na podlaze.

Třetí dolní index 95 znamená hodnotu 95. percentilu.

Horní indexy  $W_b$  nebo  $W_d$  indikují váhový filtr.

„Úplná“ metoda nabízí dva indexy – jeden pro sedící a druhý pro stojící cestující.

Pro sedící cestující je index komfortu dán

$$N_{VA} = 4 \left(\frac{W_b}{a_{ZP95}}\right) + 2 * \sqrt{\left(\frac{W_d}{a_{YA95}}\right)^2 + \left(\frac{W_b}{a_{ZA95}}\right)^2} + 4 * \left(\frac{W_c}{a_{XD95}}\right)$$

a pro stojící cestující je index komfortu dán

$$N_{VD} = 3 \sqrt{16 * \left(\frac{W_d}{a_{XP50}}\right)^2 + 4 \left(\frac{W_d}{a_{YP50}}\right)^2 + \left(\frac{W_b}{a_{ZP50}}\right)^2} + 5 \left(\frac{W_d}{a_{YP95}}\right)$$

kde  $a$  představuje hodnotu zrychlení.

První dolní index X, Y nebo Z představuje podélný, příčný nebo vertikální směr.

Druhý dolní index znamená měření na podlaze (P), na sedáku (A) nebo na opěradle sedadla (D).

Třetí dolní index 50 znamená hodnotu 50. percentilu, 95 znamená hodnotu 95. percentilu.

Horní indexy  $W_b$ ,  $W_c$  nebo  $W_d$  indikují váhový filtr.

### 3.6 Index komfortu pro vlaky s naklápacími skříněmi

Pro tratě s významným počtem oblouků se komfort cestujícího hodnotí pomocí indexů PCT a PDE. Tento index posuzuje komfort cestujícího pro všechny druhy vozidel a pro nízký nebo vysoký nedostatek převýšení.

Metoda dává hodnoty komfortu v přechodnicích (PCT) a na zvláštních bodech (PDE) bez kumulativních účinků. Hodnocený účinek na cestujícího je náhlá změna střední úrovně komfortu v přechodnicích v důsledku nízkofrekvenční dynamiky vozidla.

Tato metoda byla vyvinuta u BR s použitím běžných vozidel a vozidel s naklápacími skříněmi.

Měřené parametry jsou příčné zrychlení na vozové skříně nad prvním podvozkem a úhlová rychlost naklápění vozové skříně.

Pro výpočet indexu je třeba analogové filtrování dolní propustí, analýza klouzavým filtračním oknem, výpočet rázu a zjišťování špiček.

Zjišťování počátečního a koncového bodu přechodové fáze je nezbytné. Pro každou vstupní vzestupnici se PCT vypočítává jako (nepřichází v úvahu pro výstupní vzestupnice)

$$PCT = (A\ddot{y} + B\dot{y} - C) + D\dot{G}^{K1}$$

kde  $\dot{y}$  je maximální hodnota příčného zrychlení na vozové skříni mezi začátkem přechodnice a 1,6 sekund po konci přechodnice,

$\ddot{y}$  je maximální časová změna (ráz) příčného zrychlení na vozové skříni,

$\dot{G}$  je maximální rychlost naklápění v průběhu vzestupnice,

A, B, C, D, E, K1 jsou konstanty, různé pro sedící nebo stojící cestující.

Parametry musí být filtrovány pomocí zvláštních klouzavých průměrů.

Index komfortu PDE se používá pro obecné hodnocení komfortu cestujícího na diskretních bodech, jako jsou místní závady v koleji. Tato metoda je aplikovatelná na vlaky s naklápěcími skříněmi i vlaky bez naklápění a není kumulativní.

Měřené parametry jsou příčné zrychlení na vozové skříni uprostřed a nad prvním podvozkem. Hodnocené veličiny jsou zrychlení špička – špička a průměrná hodnota v průběhu 2 sekund.

Vyhodnocování může být korelováno se zvláštními místy v koleji, jako jsou mosty, výhybky atd.

Index PDE se počítá jako

$$PDE = a\ddot{y}p + b\dot{y}m - c$$

kde  $\dot{y}m$  je průměrná hodnota příčného zrychlení na vozové skříni,  $\ddot{y}p$  je hodnota špička – špička příčného zrychlení na vozové skříni v průběhu 2 sekund a

a, b, c, jsou konstanty definované pro sedící nebo stojící cestující.

## 4. POŽADAVKY NA BEZPEČNOST

### 4.1 Namáhání koleje a únava

Síly působící na kolej jako výsledek namáhání vlakem jsou značné a charakterizované rychlými změnami. Na namáhání je možno pohlížet ze tří hlavních směrů: vertikálního, příčného ke koleji a podélného, rovnoběžného s kolejí.

Obecně jsou namáhání rozložena nerovnoměrně na obě dvě kolejnice a je možno je rozdělit

- na kvazistatická namáhání v důsledku váhy, odstředivé síly, dostředné síly v obloucích a ve výhybkách a příčný vítr a
- na dynamická namáhání v důsledku závad v geometrii koleje a nespojitosti tuhosti koleje (nestejně sedání šterkového lože a podloží), nespojitostí ve svarech a na stycích, nepravidelností na pojižděné ploše kolejnice, vad vozidel jako jsou plochá kola nebo nestabilní chod.

Celková vertikální kolová síla je součtem následujících složek: statické kolové síly, zvýšení kolové síly na vnější kolejnici od odstředivé síly nebo příčného větru, dynamické kolové síly od vypružených a nevypružených hmot a nepravidelností koleje.

Příčná síla  $Y$  vyvozovaná kolem na kolejnici je vyvolána příčnou silou působenou okolkem proti vnější kolejnici, nevyrovnaným zrychlením a příčným větrem, dynamickou složkou od nepravidelností koleje v oblouku a nestabilním chodem v přímé.

## 4.2 Stabilita koleje

Celkové příčné síle vyvozované dvojkolím musí kolej odolávat prostřednictvím odporu proti příčnému posunu pražců v kolejovém loži a horizontální rámové tuhosti koleje.

V horizontální rovině je odpor koleje omezen; velké příčné síly mohou způsobit pohyb pražců v kolejovém loži a možná vyvolat trvalou deformaci.

Vyhláška UIC definuje pro bezpečnost koleje Prud'hommeovu mezní sílu jako

$$(\Sigma Y_{2m})_{\text{lim}} = \alpha \left( 10 + \frac{P_0}{3} \right)$$

kde  $P_0$  je síla na nápravu a  $\Sigma Y_{2m}$  je suma příčných sil na obou kolech, filtrovaná klouzavým průměrem na 2 m koleje. Koefficient  $\alpha$  je 1 pro motorové jednotky nebo osobní vozy a 0,85 pro nákladní vozy.

Tato praktická hodnota pro příčný odpor zatížené koleje, zajišťující její stabilitu, byla určena v padesátých letech u SNCF.

Mez je platná pro kolej na dřevěných pražcích s rozdělením pražců maximálně po 65 cm, s kolejovým ložem z drceného štěrku a kolejnicemi hmotnosti alespoň 46 kg/m, jejíž geometrie je udržována podbíjením.

Mezní hodnoty pro únavu koleje jsou uvedeny pro vertikální a příčné síly.

Mez pro vertikální sílu  $Q_{\text{lim}}$  je vztažena k rychlosti vlaku, maximální statická kolová síla je 112,5 kN. Zákon variace je  $Q_{\text{lim}} = 90 + Q_0$ , kde  $Q_0$  je statická kolová síla.

V závislosti na rychlosti vlaku  $V$  jsou meze

- 200 kN pro  $V \leq 160$  km/h,
- 190 kN pro  $160 < V \leq 200$  km/h,
- 180 kN pro  $200 < V \leq 250$  km/h,
- 170 kN pro  $250 < V \leq 300$  km/h a
- 160 kN pro  $V > 300$  km/h.

Konečná mezní hodnota se volí jako menší z hodnot získaných aplikací zákona variace a z omezení v závislosti na rychlosti.

Kvazistatická vertikální kolová síla v oblouku musí být menší než 145 kN.

Pro příčnou kolovou sílu existuje pouze kvazistatická mez 60 kN.

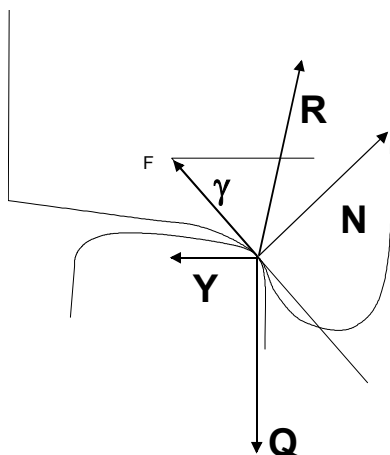
## 4.3 Riziko vykolejení

K vykolejení může dojít jestliže se hodnota poměru sil  $Y/Q$  zvýší v důsledku vysokých příčných sil  $Y$  nebo nízkých kolových sil  $Q$ ; v takovém případě okolek kola vyšplhá na kolejnici tak dalece, že je vykolejení nevyhnutelné.

Nadalovo kritérium, založené na poměru sil  $Y/Q$ , bylo navrženo v roce 1908 a dosud je široce používáno.

Nutnou podmínkou pro kvazistatické vykolejení kola je situace, kdy je kolo vystaveno působení v podstatě konstantního poměru  $Y/Q$ . Poměr  $Y/Q$ , nutný k umožnění šplhání okolku, je odvozen z prosté rovnováhy sil na nakloněné rovině kontaktního bodu.

Reakce vyvozované kolejnicí na kolo jsou normálová síla  $A$  a příčná třecí síla. Úhel kontaktní plošky na okolku vztahený k horizontále je  $\gamma$ .



Obr. 3: Síly na okolku při šplhání kola

Na základě rovnováhy sil v příčném a vertikálním směru je možno psát následující rovnici:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \gamma - \mu}{1 + \mu \tan \gamma}$$

kde  $\gamma$  je úhel okolku a  $\mu$  je součinitel tření.

K vykolejení dojde když vertikální složka síly  $R$  je větší, než kolová síla  $Q$ . Dále pak zkoušky realizované ORE ukázaly, že k vykolejení může dojít když poměr  $Y/Q$  překročí určitou mez na vzdálenosti více než 2 m.

Mez je možno vypočítat dosazením součinitele tření 0,36 s úhlem okolku  $70^\circ$ ; v tomto případě mez  $Y/Q$  je 1,2.

Nejnovější vyhláška UIC 518 mez snížila na 0,8 pro poloměr oblouku  $\geq 250$  m.

$$[(Y/Q)_{2m}]_{\text{lim}} = 0.8$$

#### 4.4 Nestabilita chodu

Nestabilita vlaku byla v minulosti definována pomocí příčného zrychlení na rámu podvozku. Vyhláška UIC 515 říká, že vozidlo se považuje za nestabilní tehdy, když příčné zrychlení rámu podvozku (v souladu s dvojkolím) překročí  $8 \text{ m/s}^2$  po více než 6 po sobě následujících vln ve frekvenčním pásmu od 4 do 8 Hz. Toto stanovisko je značně překonáno, protože do provozu byla uvedena nová generace vozidel.

Nové kritérium stability ve vyhlášce UIC 518 má nyní přímý vztah k silám vyvozovaným na kolej, totiž

$$\sigma(\Sigma Y)_{\text{lim}} = \frac{(\Sigma Y)_{\text{lim}}}{2}$$

Toto kritérium definuje, že směrodatná odchylka síly na koleji  $\Sigma Y$  musí být pod Prud'hommeovou mezí dělenou dvěma.

Součet  $\Sigma Y$  musí být filtrován ve frekvenčním pásmu mezi  $f_0-2$  Hz a  $f_0+2$  Hz, kde  $f_0$  je frekvence nestability. Pro kontrolu nestability je přijata zjednodušená metoda: směrodatná odchylka příčného zrychlení rámu podvozku nad nápravou musí být pod následující mezí:

$$\sigma(\ddot{y}_s^+)_{\text{lim}} = \frac{(\ddot{y}_s^+)_{\text{lim}}}{2}$$

kde  $(\ddot{y}_s^+)_{\text{lim}}$  je mez bezpečnosti pro příčný posun koleje při použití zjednodušené metody pomocí měření zrychlení:

$$(\ddot{y}_s^+)_{\text{lim}} = 12 - \frac{M_b}{5}$$

kde  $M_b$  je hmotnost podvozku včetně všech jeho částí v tunách.

## 5. JÍZDA OBLOUKEM

Jakost jízdy obloukem je u vlaků s naklápěcími skříněmi velmi důležitá kvůli posunu provozních charakteristik směrem k mezím bezpečnosti. Pro zvýšení traťové rychlosti v oblouku je nezbytné se spolehnout na naklápěcí techniku a konstruovat vozidla s uspokojivým chováním v oblouku podle stávajících návrhových parametrů a kvality geometrie koleje. Pro zvýšení traťové rychlosti v přímé koleji je nezbytné zvýšit konstrukční rychlost podvozku zajištěním uspokojivých chodových vlastností a zvláště stability chodu podle kvality geometrie koleje.

Zvyšování rychlosti na stávajících tratích závisí na různých faktorech a může být silně ovlivněno následujícím:

- stávajícími návrhovými parametry koleje: délkou a druhem jednotlivých úseků, zvláště přechodnic, které ovlivňují – většinou kvůli komfortu – rychlost, tj. maximální dosažitelnou rychlost naklápění a naklápění a maximální nedostatek převýšení,
- zabudovanými součástmi koleje: typy kolejnic, pražců a upevnění a odpovídajícími přípustnými silami,
- přítomností zvláštních bodů, jako jsou výhybky, křižovatky atd.,
- schválenými normami kvality geometrie koleje: mezními hodnotami závad v koleji a četností jejich dosahování,
- stávající kvalitou geometrie koleje, která ovlivňuje dynamické reakce mezi vozidlem a kolejí a limituje maximálně dosažitelné podmínky pokud jde o rychlost a nedostatek převýšení a
- stávajícími provozními pravidly, jako je ložná míra, zabezpečení, pravidla pro křižování vlaků atd., která mohou v určitých zvláštních úsecích koleje omezovat přípustné zvýšení rychlosti.

Výrobce naklápacích systémů musí na základě výsledků zkoušek a výsledků z provozu široké škály různých aplikací zákazníkovi demonstrovat nejen schopnost svého produktu dosáhnout stanovených technických podmínek, nýbrž také svůj vývojový potenciál v dané oblasti aplikací a v různých předvídatelných provozních podmínkách.

Konstruktor musí posoudit teoretický průběh naklápění v nominálních podmínkách stávajících návrhových parametrů koleje (tj. bez uvažování závad v koleji a relevantních dynamických účinků). Pro každou přechodnici podle průměrného rázu, rychlosti naklápění a změny nedostatku převýšení definuje příslušný index komfortu. Posoudí tedy nominální chování naklápění, přičemž bere v úvahu charakteristiky skutečného naklápacího systému (délka a setrvačnost vozidla, konstrukce a vlastnosti řídicího systému naklápění, pasivní reakce vypružení podvozku), vždy v podmínkách stávající koleje. Nakonec optimalizuje pasivní mechanické parametry podvozku a vozidla podle skutečných dat geometrie koleje. Cílem je, aby příčné síly na kolejnici byly v obloucích optimalizovány a citlivost vůči závadám v koleji byla malá.

Dobré chování v oblouku musí vyhovovat následujícím pravidlům a doporučením:

- respektování pravidel bezpečného chodu pokud jde o bezpečnost proti vykolejení, příčné síly působící posun koleje, maximální a průměrné napětí v kolejnici od příčných a svislých sil,
- respektování pravidel stabilního chodu pro definované profily dvojkolí a koleje,
- respektování pravidel jakosti chodu podle typu požadovaných zkoušek,
- respektování jízdního komfortu, který by měl být lepší nebo alespoň stejný jako u odpovídajících referenčních běžných vlaků do jejich nejvyšší provozní rychlosti, co do průměrného komfortu a chování v oblouku,
- snížení opotřebení profilů kola a kolejnice, které může být výrazně dosaženo v obloucích malých poloměrů pomocí bezpečných a spolehlivých systémů radiálně nastavitelných dvojkolí,
- snížení údržby koleje co do četnosti a komplexnosti kontrolních úkonů a udržování provozních tolerancí nebo jejich opětovného dosahování a
- respektování všech provozních pravidel; jako každý vlak, musí vlak s naklápacími skříněmi vyhovovat relevantním provozním pravidlům (jízda na koleji se zborcením, kritérium P2, ložná míra, atd.).

## **6. ZKUŠENOSTI ZE ZKOUŠEK VLAKŮ S NAKLÁPĚCÍMI SKŘÍNĚMI**

### **6.1 Bezpečnost chodu**

Pro snížení namáhání kol a kolejnic byla vyvinuta zvláštní konstrukce podvozku. Podvozky vlaku s naklápěním musí mít nízkou hmotnost na nápravu, optimalizované příčné vypružení a radiálně nastavitelná dvojkolí.

Zkoušky mají fundamentální důležitost pro ověření správnosti těchto řešení podvozku a zároveň pro ověření, zda byly respektovány všechny bezpečnostní požadavky.

Pravidla UIC vyžadují pro homologaci vozidla dvě metody analýzy: jednodimenzionální a dvojdimenzionální analýzu. Všechny parametry vyjmenované v kapitole 2 musí být pomocí vybrané metody porovnány se svými mezemi.

Jednodimenzionální metoda je vyhodnocení jedné zkušební jízdy, při které nesmějí být překročeny meze v žádném z úseků tratě (přímé úseky, přechodnice, oblouky). Porovnání

s mezemi se dělá v jednotlivých bodech, ale statistické vyhodnocení se dělá jen v oblouku tak, že se vypočítá střední hodnota plus třikrát směrodatná odchylka; výsledky musí být nižší než mez.

Na obr. 4 je příklad této analýzy pro ETR 470 v Chorvatsku na trati Rjeka – Moravice. Nedostatek převýšení byl velmi vysoký a kvalita koleje na této obloukovité trati byla velmi špatná. Pravidla vymezující bezpečnost byla respektována díky optimalizovaným charakteristikám podvozku.

Dvojdímní metoda se pro vozidla s vysokým nedostatkem převýšení považuje za úplnější a reprezentativnější.

Tato analýza je statistické zpracování po jednotlivých úsecích, při němž se vypočítávají centily odpovídající 0,15 % a 99,85 % kumulativního rozdělení, v každém oblouku a pro každý bezpečnostně relevantní parametr.

Tyto centily se vynášejí do grafu proti nevyrovnanému příčnému zrychlení a vypočítávají se predikční pásma při 99 %.

Pro certifikaci v rámci homologace se predikční pásma porovnávají s odpovídající mezí.

Vlaky AlstomFerroviaria s naklápěcími skříněmi byly zkoušeny a doladovány na mnoha tratích v Evropě, od Itálie po Švýcarsko, Německo, Francii, Španělsko, Portugalsko, Finsko, Polsko, Českou republiku, Chorvatsko a Slovinsko.

Zvláště obtížnou zkušební trať je Gothardská trať ve Švýcarsku, kde je množství oblouků o poloměru mezi 270 a 300 m.

Výsledky zkoušek vlaku ETR 470 na této trati jsou vyneseny na obr. 5.  $\Sigma Y1$  – suma příčných sil na prvním dvojkolí a  $\Sigma Y2$  – suma příčných sil na druhém dvojkolí jsou ve všech případech nižší než přípustná mez.

**ETR470 - TRENO 0**

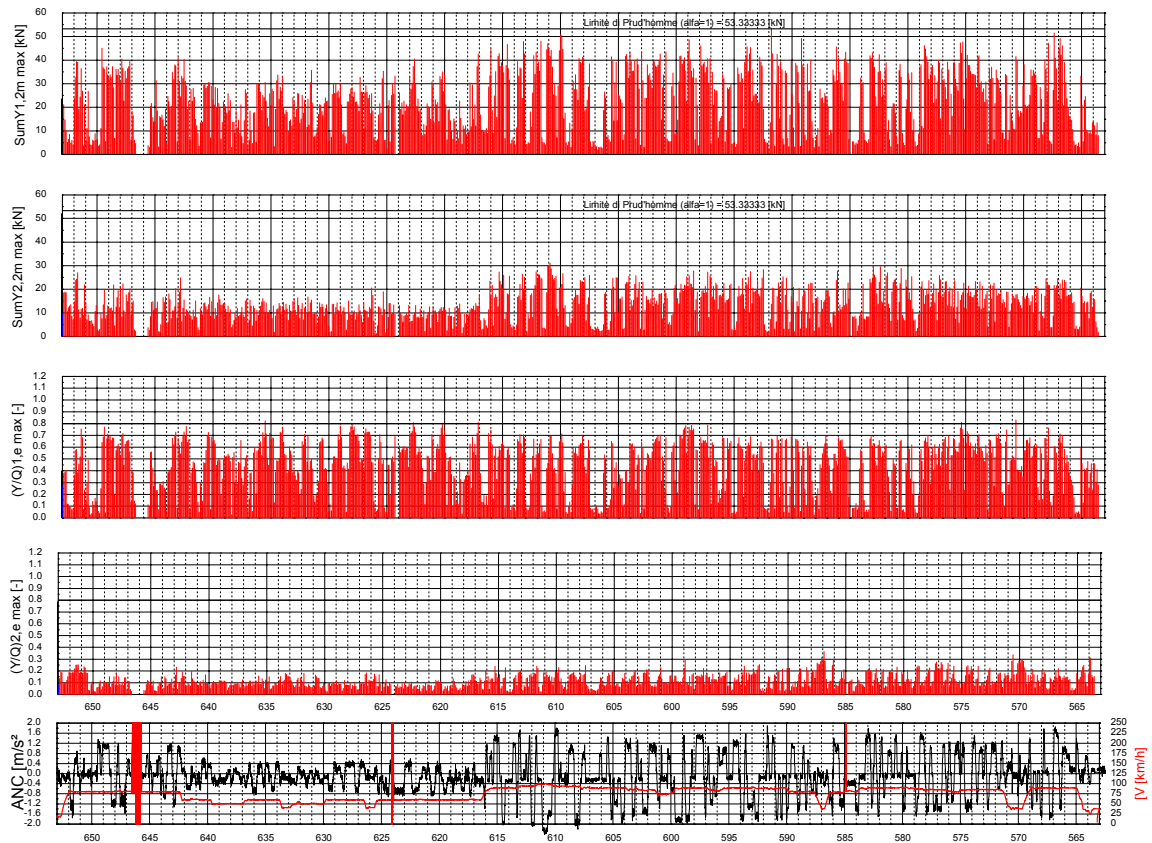
SumY\_2m max, Y/Q\_2m max, l.p. 30Hz  
Valore: Curve dx: 0.15% (-1) / Curve sx: 99.85%

**Rijeka-Moravice**

Rango P, O.d.M., BAC a.s.m.

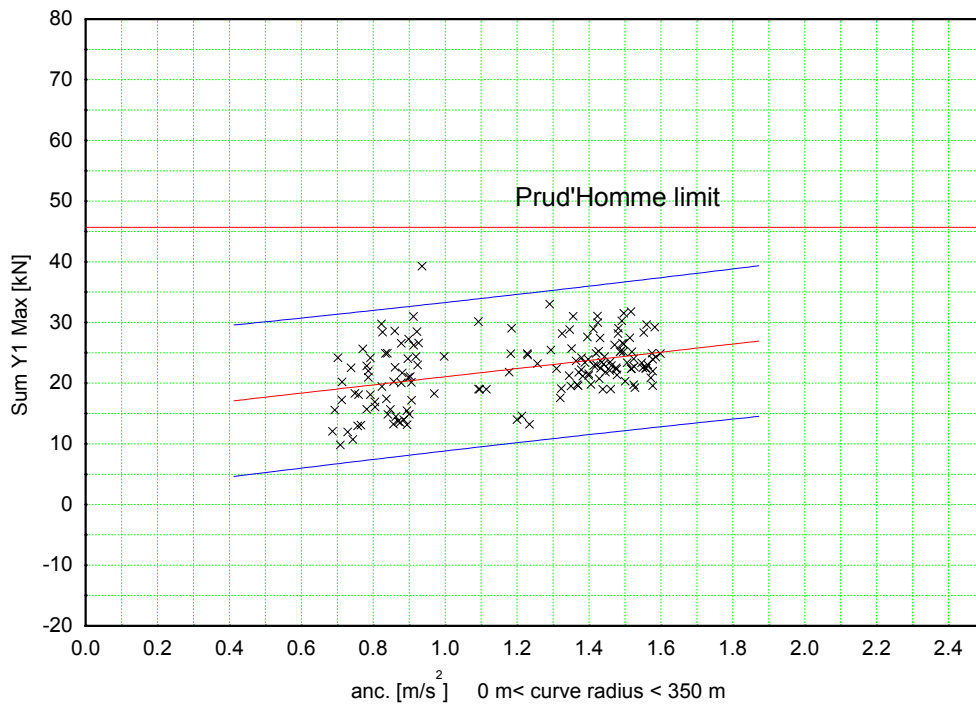
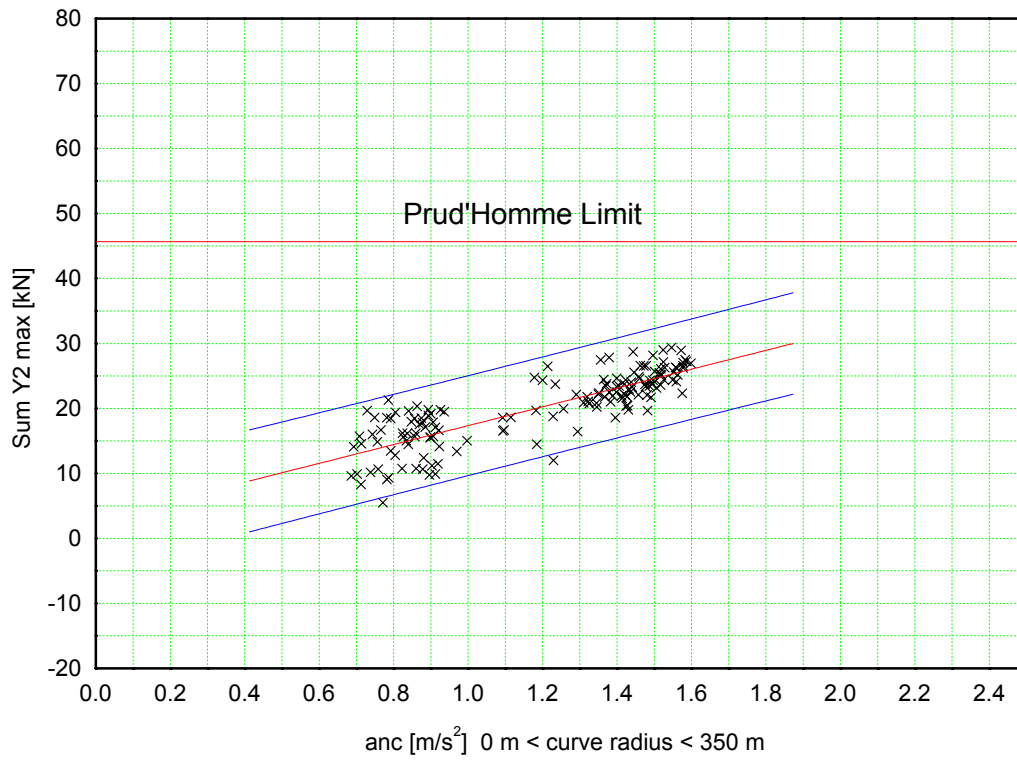
**Prova Num.: HZ05**

Fiat Ferroviaria  
20/06/1996



Obr. 4: ETR 470 v Chorvatsku. Maximální hodnoty suma Y filtrované klouzavým průměrem na délku 2 m a hodnoty Y/Q pro první a druhé dvojkolí





Obr. 5: Výsledky ETR 470 v obloucích malých poloměrů na Gothardské trati

## 6.2 STABILITA CHODU

Stabilita chodu vlaku s naklápěcími skříněmi je kompromisem mezi chováním v oblouku a chováním při vysokých rychlostech. Charakteristiky podvozku, nutné pro vysoké rychlosti, nejsou kompatibilní s charakteristikami pro dobré chování v oblouku.

Dynamická konstrukce podvozku je pro vlaky s naklápěcími skříněmi určené pro vysokorychlostní provoz kritická. Parametry kontaktní geometrie kola a kolejnice jsou u vozidla s naklápěcími skříněmi ve srovnání s vozidly pro standardní vysokorychlostní vlaky významnější (často proto, že standardní vysokorychlostní vlaky nejezdí po koleji s náročnými směrovými poměry).

U AlstomFerroviana byla získána hluboká znalost traťových podmínek, jako jsou profil kolejnice, rozchod, posuny a úhly mezi kolem a kolejnicí, aby se lépe porozumělo jevům nestability a bylo možno se pokusit je korigovat.

Ekvivalentní konicita v kontaktu kola a kolejnice je hlavním parametrem, který způsobuje nestabilní chod.

Vlaky AlstomFerroviana s naklápěcími skříněmi jsou schopny respektovat standardní hodnoty konicity, malá změna podmínek v koleji však často může hodnotu ekvivalentní konicity velmi zvýšit.

Komplexní kontrola opotřebení koleje a kol s využitím nejnovějšího vývoje v technice zjišťování tvarů může tento problém vyřešit.

## 6.3 Jízdní komfort

Naklápěcí technika je dobrým prostředkem k zajištění dobrého komfortu pro cestující i v případě vysokého nevyrovnaného příčného zrychlení, vznikajícího při vyšší rychlosti v obloucích.

Omezení zbytkového zrychlení působícího na cestujícího pod maximálně přípustnou mez  $1 \text{ m/s}^2$  je však jen základním předpokladem a aby se předešlo jakýmkoliv problémům s nepohodlím nebo s „mořskou nemocí“ cestujících, musí být kontrolovány i jiné velmi důležité dynamické parametry.

Tyto parametry jsou:

- úhlová rychlost v horizontální rovině,
- úhlová rychlost ve vertikální rovině,
- vertikální zrychlení,
- časová změna vertikálního zrychlení (vertikální ráz) a
- časová změna zbytkového zrychlení (příčný ráz na cestujícího).

Všechny tyto vstupy a zkušenosti byly společností AlstomFerroviana využity při vývoji její techniky naklápění.

Komfort je na stejné úrovni (nebo lepší) jako u běžných vlaků, hlavně v oblouku, kvůli sníženým hodnotám zrychlení.

Parametr komfortu PCT pro vlaky s naklápěcími skříněmi se vztahuje ke zkušebním jízdám vysokou rychlostí.

V obr. 6 jsou hodnoty PCT pro každou vstupní přechodnici vyneseny v závislosti na nevyrovnaném příčném zrychlení.

**SZ 310 - Train n° 1**

Values: Filters according to Pr Env 12299  
(PCT Seated)

**Vehicle CM2 - Middle Carbody**

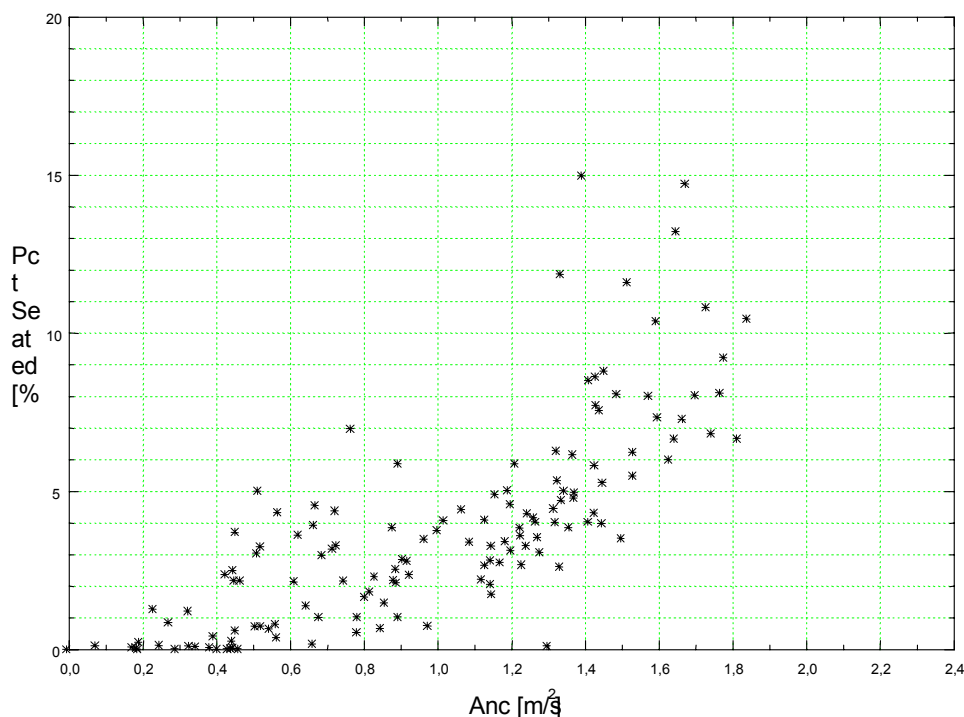
**Test Num.: 13\_07**

**Ljubljana - Maribor**

Speed E+2, Tare, CM2 Leading

**Fiat Industrie Ferroviarie**

03/08/2000



Nome File: SZ310ub\_maf3\_07essopj\_filePCT\_DATI01\_VER\_SCRE.OPJ  
FIF A. Zingarelli - TdM, B. Dotta - Esperienze

Data dell'analisi: 25/09/00 15:55:28 Pag.: A1 - 01  
Versione: 1.0

Obr. 6: Komfort PCT u vlaku s naklápěcími skříněmi

Hodnota PCT reprezentuje % nespokojených cestujících v oblouku; je zřejmé, že v mnoha případech je nespokojenost nižší než 5 % a v některých případech je kvůli zvláště špatné koleji dosaženo 10 %.

V případě vlaků bez naklápěcí techniky by měl účinek velkých zrychlení dávat vyšší hodnoty při omezeném nedostatku převýšení

V Turíně, leden 2002

Překlad z angličtiny Ing. Ladislav Kopsa