

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Josef Kolář, CSc.

**Vývojové trendy v řešení nízkopodlažních
článekových tramvají**

**Trends of development in conception
of sectioned low-floor tramways**

Summary

The lecture summarizes known standard types of concept solutions of partially and fully low-floor tramways which were used during their twenty-five years of development. In selected examples of foreign tramway vehicles are illustrated successful constructional designs of two-axle traction bogies (pivoting and non-pivoting) and their drive configuration (mechanical parts) of tramway wheels with independently rotating wheels (IRW) or conventional wheel set (CW), used in articulated low-floor trams. The lecture discusses advantages and disadvantages of particular structural design variants. Is present evaluation of developmental trends in construction of wagon body and solution for undercarriage and drive of low-floor trams. In the last part of the lecture is present contribution inaugural dissertation for development of low-floor trams in Czech.

Souhrn

Přednáška shrnuje známé základní typy koncepčních řešení částečně a plně nízkopodlažních tramvají, které byly použity v průběhu jejich cca pětadvacetiletého vývoje. Na vybraných příkladech zahraničních vozidel dokumentuje úspěšná konstrukční řešení dvounápravových trakčních podvozků (otočných a neotočných) a koncepční uspořádání jejich mechanické části pohonu tramvajových dvojkolí, tj. portálových náprav s volně otočnými koly nebo klasických dvojkolí, použitých u článkových nízkopodlažních vozidel. Komentuje výhody a nevýhody jednotlivých variant konstrukčních řešení. V přednášce je předloženo zhodnocení vývojových trendů, použitých ve stavbě vozových skříní a v řešení pojezdu a pohonu nízkopodlažních tramvají. V závěrečné části je představen přínos habilitační práce k vývoji nízkopodlažních tramvají v ČR.

Klíčová slova: Částečně nízkopodlažní tramvaje, plně nízkopodlažní tramvaje, koncepce článkových vozidel, uspořádání pojezdu, dvounápravové trakční podvozky, konstrukce otočných trakčních podvozků, konstrukce neotočných trakčních podvozků, pohon kol, koncepce pohonu, vývojové trendy, modulární stavba vozidla, obrys pro konstrukci vozidla, svislé zatížení podvozků, aktivní mezičlánková vazba.

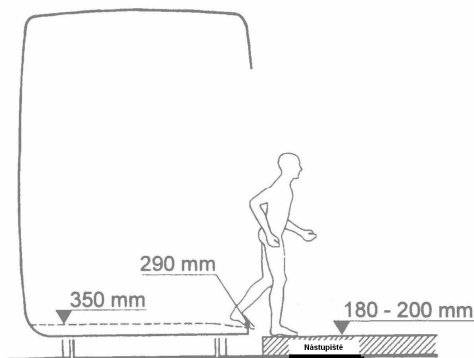
Keywords: Partially low-floor trams, fully low-floor trams, concept of articulated vehicles, arrangement of undercarriage, two-axle traction bogies, design of pivoting traction bogies, design of non-pivoting traction bogies, wheel drive, drive configuration, trends in development, modular construction of vehicles, vehicle gauge, vertical load of bogie, active inter-section coupling.

OBSAH

1.	ÚVOD	6
2.	ZÁKLADNÍ TYPY NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ	6
2.1.	ČÁSTEČNĚ NÍZKOPODLAŽNÍ TRAMVAJE	7
2.1.1.	OTOČNÉ PODVOZKY ČÁSTEČNĚ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ	9
2.2	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ PLNĚ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ	9
2.2.1	PODVOZKY PLNĚ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ	11
2.2.1.1.	PODVOZKY S PŘÍČNOU MECHANICKOU VAZBOU VOLNĚ OTOČNÝCH KOL	12
2.2.1.2	PODVOZKY S PODÉLNOU MECHANICKOU VAZBOU VOLNĚ OTOČNÝCH KOL	12
2.2.1.3	PODVOZKY S MECHANICKY NEZÁVISLÝM POHONEM VOLNĚ OTOČNÝCH KOL	13
2.2.1.4	PODVOZKY S KLASICKÝM DVOJKOLÍM	14
3.	HODNOCENÍ VÝVOJOVÝCH TRENDŮ	15
3.1	VÝVOJOVÉ TRENDY V ŘEŠENÍ SKŘÍNÍ	16
3.2	VÝVOJOVÉ TRENDY V ŘEŠENÍ PODVOZKŮ A POHONŮ	16
4.	PŘÍNOS HABILITAČNÍ PRÁCE K VÝVOJI NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ V ČR	16
4.1	VÝPOČTY KONSTRUKČNÍCH OBRYSŮ ČLÁNKOVÝCH TRAMVAJÍ	17
4.2	ANALÝZA ROZMĚRŮ MODULÁRNÍ ŘADY ČLÁNKOVÝCH TRAMVAJÍ	19
4.3	SVISLÉ ZATÍŽENÍ PODVOZKŮ A POUŽITÍ MEZIČLÁNKOVÉ VAZBY	20
4.4	NÁVRH TRAKČNÍCH PODVOZKŮ PRO MODULÁRNÍ ŘADU TRAMVAJÍ	24
	LITERATURA	26
	ŽIVOTOPIS	27

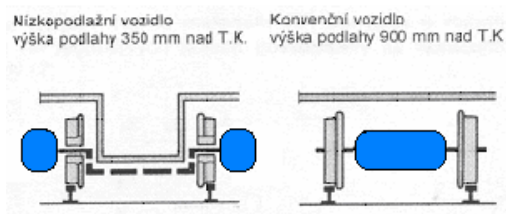
1. ÚVOD

Tramvajové vozidlo je při jízdě neseno a vedeno tramvajovou tratí, která je definována směrovými a sklonovými poměry a charakterizují ji základní konstrukční parametry (např. rozchod koleje, typ kolejnic, minimální poloměr oblouku, průjezdný průřez trati, maximální nápravové zatížení). Vývoj nízkopodlažních tramvají začal ve světě v polovině 80.let 20.století. Jeho snahou je umožnit pohodlný a bezpečný nástup a výstup z vozidla osobám se sníženou schopností pohybu (zdravotně handicapovaní cestující, starší lidi, matky s dětmi aj.), tj. vytvořit ve vozidle v prostoru pro cestující nízkou podlahu ve výšce cca 350 mm nad rovinou temene koleje (dále jen nad rovinou TK.) – viz obr. 1.



Obr. 1

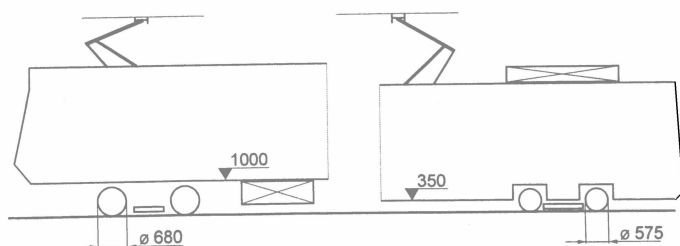
Nízká podlaha a její tvarové řešení u nástupních dveří



Obr. 2

Nízká podlaha a její tvarové řešení nad nápravou, změna polohy trakčních motorů

- Řešení nízkopodlažnosti si vyžádalo :**
- vyvinout zcela nové konstrukční uspořádání vozové skříně $\Rightarrow$ článková vozidla
 - použít tramvajová dvojkolí s menšími koly ($\varnothing 600$ mm, u nichž je vhodné, z důvodů zachování jejich životnosti, snížit maximální nápravové zatížení na 85 kN [1], [2]) nebo aplikovat novou koncepci řešení náprav (portálové nápravy nebo kyvná ramena s volně otočnými koly)
 - řešit zcela nové konstrukce tramvajových podvozků a nové způsoby pohonu tramvajových kol asynchronními nebo synchronními trakčními motory, neboť muselo dojít k uvolnění prostoru pro vytvoření nízkopodlažní průchozí uličky nad podvozky (viz obr. 2)
 - přemístit výzbroj vozidla ze spodku vozu na střechu (viz obr. 3) a řešit problematiku vedení kabelů k trakčním motorům včetně vytvoření jejich délkové rezervy, potřebné na pokrytí natáčení podvozku pod článkem vozidla.



Obr. 3

Porovnání koncepčního řešení klasické tramvaje (vlevo) a nízkopodlažní tramvaje (vpravo)

2. ZÁKLADNÍ TYPY NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ

Moderní nízkopodlažní tramvaje jsou řešeny pouze jako průchozí článková vozidla. Podrobnější komentář k jednotlivým typům je uveden v příloze „P1-Přehled konstrukčních řešení nízkopodlažních tramvají ve světě a v ČR“, která je součástí habilitační práce [3] nebo ve stručnější podobě v článku [4]. Obecně lze konstatovat, že nízkopodlažní tramvaje

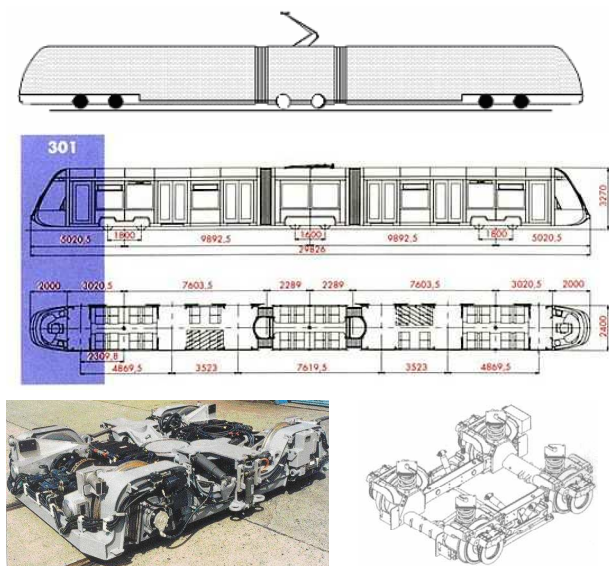
jsou, s přihlédnutím na požadavky zákazníka a cenu vozidla, rozvíjeny ve dvou základních trendech :

- **částečně nízkopodlažní tramvaje** (výška podlahy 600/350 mm)
- **„100 %“ nízkopodlažní tramvaje** (výška podlahy 350 mm)

2.1 ČÁSTEČNĚ NÍZKOPODLAŽNÍ TRAMVAJE

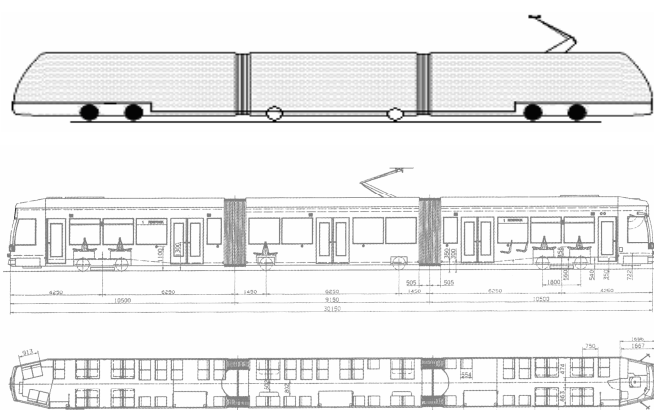
Při stavbě částečně nízkopodlažních tramvajových vozidel byly použity především tyto koncepční přístupy :

- **šestinápravová tříčlánková kloubová tramvaj s dlouhými krajními články a krátkým středním podvozkovým článkem** (viz obr. 4)
- **velkokapacitní šesti- nebo osminápravová tříčlánková tramvaj s dlouhými články**, koncepčně řešená tak, že mezi krajní, z části nízkopodlažní, články je vložen střední nízkopodlažní článek s jednonápravovými (obr. 5) nebo s dvounápravovými běžnými podvozky (obr. 6).



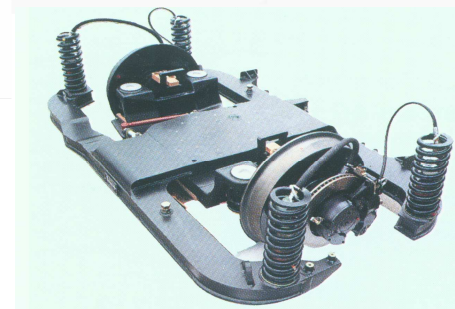
Obr. 4

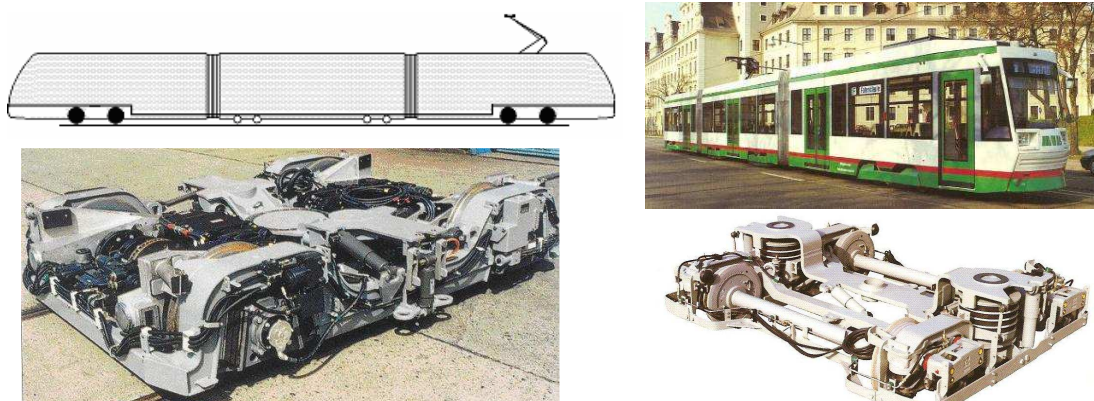
Částečně nízkopodlažní tramvaj **CITADIS 301** s otočnými trakčními podvozky pod krajními články a neotočným podvozkem Arpege pod středním článkem, tj. s uspořádáním pojezdu $B'_0 \ 2' \ B'_0$ (zdroj – firemní prospekty Alstom)



Obr. 5

Tříčlánková částečně nízkopodlažní tramvaj s otočnými trakčními podvozky pod krajními články skříňe vozidla a s běžnými jednonápravovými podvozky, tj. s uspořádáním pojezdu $B'_0 \ 1' \ 1' \ B'_0$. (zdroj – firemní prospekty Siemens)





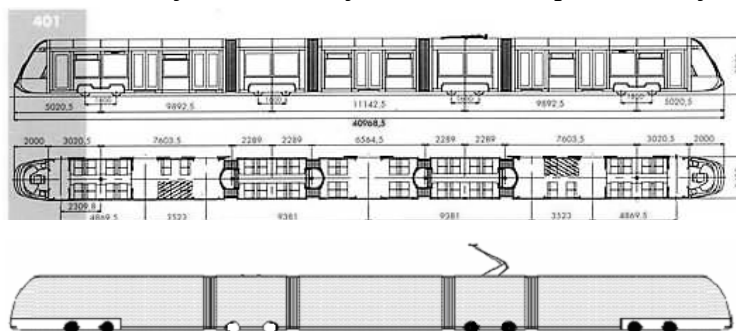
Obr. 6 Tříčlánková částečně nízkopodlažní tramvaj NGT 8D s otočnými trakčními podvozky pod krajními články skříňe vozidla a běžnými otočnými podvozky s malým rozvorem 1200 mm a s koly malého $\varnothing$ 450 mm pod středním článkem, tj. s uspořádáním pojezdu $B'_0 \overline{2'2'} B'_0$.

(zdroj – firemní prospekty Alstom)

Tyto velkokapacitní šesti- nebo osminápravové tříčlánkové tramvaje s uspořádáním pojezdu $B'_0 \overline{2'2'} B'_0$, $B'_0 \overline{1'1'} B'_0$ nebo $B'_0 \overline{2'2'} B'_0$ se **používají pro provoz v méně náročných traťových, směrových a sklonových poměrech**. Jejich nevýhodou je jednak použití rozdílných typů podvozků a dále ta skutečnost, že využívají k pohonu pouze cca 65 % adhezní hmotnosti vozidla.¹⁾

- **osminápravová pětičlánková tramvaj** s delšími krajními články **dvoubodově** uloženy na otočných podvozcích a třetím bodem jsou zavěšeny na středních podvozkových skříňových modulech s neotočně uloženými podvozky, mezi nimiž je zavěšen nesený článek – viz obr.7. Délka tramvaje se sice díky použití dalších dvou mezivozových přechodů prodlouží, ale dosáhneme cca **70 % nízké podlahy**.

K výhodám této koncepce patří možnost **vytvoření nízkopodlažní průchozí uličky v podvozkových modulech** a dále, díky použití otočných podvozků pod krajními články, **velmi dobré jízdní vlastnosti**, neboť střední podvozkové moduly s neotočnými podvozky výrazně nezhoršují jízdní vlastnosti.



Obr. 7

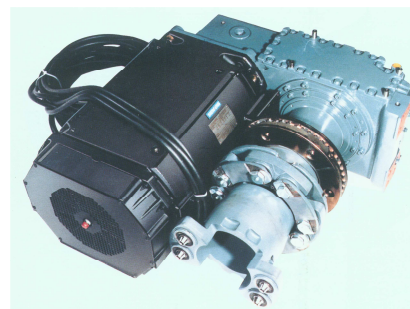
Pětičlánková, částečně nízkopodlažní tramvaj **CITADIS 401** s otočnými podvozky pod krajními články skříňe vozidla a s neotočnými podvozky pod středními podvozkovými moduly, tj. s uspořádáním pojezdu $B'_0 \overline{B'_0 2' B'_0}$.

(zdroj – prospekty Alstom)

¹⁾) Při požadavku vytvoření plně adhezního vozidla se čtyřmi trakčními podvozky, otočně uloženými pod jednotlivými články vozové skříňe, tj. při uspořádání pojezdu $B'_0 \overline{B'_0 B'_0}$ nebo $B'_0 \overline{B'_0 B'_0} B'_0$, se snižuje podíl nízké podlahy (≤ 50 %), vzrůstá nápravové zatížení vnitřních podvozků a v interiéru vozidla přibývá počet schodů, které zhoršují průchodnost vozidlem – viz nová pražská tramvaj Škoda 14 T.

2.1.1 OTOČNÉ TRAKČNÍ PODVOZKY ČÁSTEČNĚ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ

Normálněrozchodné podvozky používají buď **vnitřní** (viz obr. 5) nebo **vnější** (viz obr. 6) **rám, úzkorozchodné podvozky** pouze **vnější rám**. Jsou navrženy na **nápravové zatížení** $85 \div 100$ kN, mají rozvor 1800 mm a používají **dvoustupňové** (primární a sekundární) **vypružení**, doplněné hydraulickými tlumiči. **Primární vypružení**, zabudované mezi komoru nápravových ložisek a rám podvozku, je tvořeno **pryžkovými prvky** (Cheyronovy - MEGI nebo kuželové pružiny). **Sekundární vypružení**, umístěné v příčné ose souměrnosti podvozku, tvoří **ocelové šroubovitě válcové pružiny**, vhodně doplněné **pryžkovými pružinami**. Vzduchové pružiny se používají výjimečně, na přání zákazníka. Na sekundárním vypružení spočívá kolébka, sloužící k uložení vozové skříně (na obr. 5 není zobrazena). **Podélné síly z rámu podvozku na kolébku** přenáší dvě **podélné ojnice** a z kolébky na **skříň** vozidla je přenos řešen **otočným čepem** s plochou tornou nebo **valivou dráhou** se čtyřbodovým kuličkovým ložiskem .



Obr. 8 Integrovaný pohonný blok – výrobce Duewag - Siemens (zdroj – firemní prospekt Siemens)

Snížení výšky podlahy nad podvozkem (na cca 600 mm nad rovinu TK.) **si vyžádalo použití integrovaného pohonného bloku** (viz obr.8), zavěšeného na příčník rámu podvozku, skládajícího se ze vzduchem chlazeného asynchronního čtyřpólového motoru (vlastní ventilace) a převodovky (se **stálým dvoustupňovým převodem**). Pro snížení nevypuštěných hmot podvozku se stále častěji používá **plně odpružený pohon dvojkolí pomocí dutého hřídele**, objímajícího nápravu a ustupuje se od pohonů s nápravovou převodovkou, uloženou na nápravě dvojkolí a zavěšenou přes svislou závěsku na rám podvozku.

2.2 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ PLNĚ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ

Na počátku 90.let minulého století byly ve vývoji 100% nízkopodlažních tramvají s výškou podlahy 350 mm nad rovinou TK rozvíjeny tři vývojové tendence, které s označením jednotlivých typů tramvají dokumentuje diagram D1.

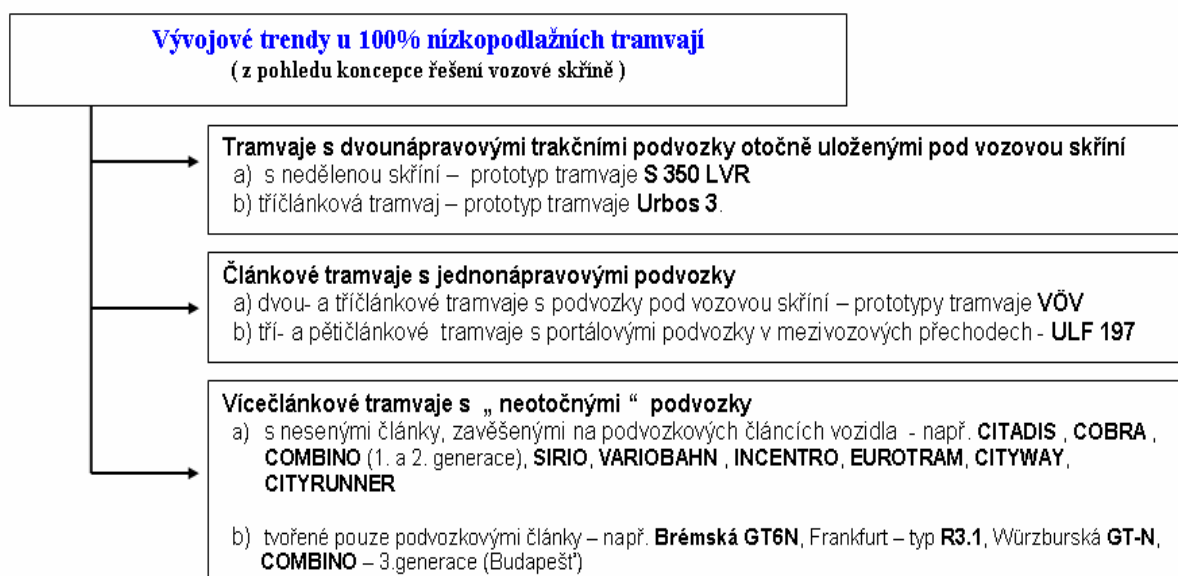
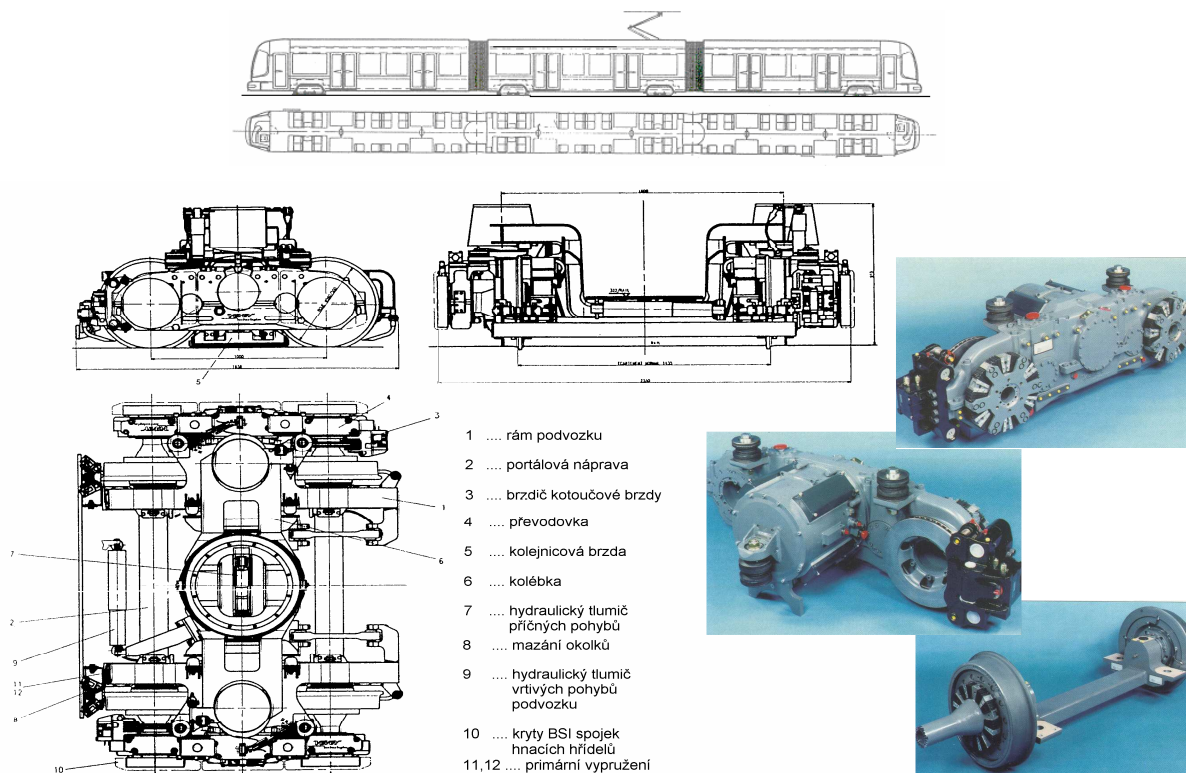


Diagram D1

Lze konstatovat, že **100% nízkopodlažní tramvaje s otočnými dvounápravovými podvozky** skončily vývoj ve fázi prototypů. Zajímavým konstrukčním řešením byl návrh podvozku s rozvorem 1000 mm pro tramvaje Urbos 3, u něhož je „skupinový“ pohon volně otočných tramvajových kol příslušné strany podvozku zajišťován zcela odpruženým integrovaným pohonným blokem - viz obr.9. Přestože jízdní zkoušky prototypu podvozku neprokázaly náchylnost k vykolejení a jeho chod byl klidný, stabilní, bez výrazného hluku a skřípění při průjezdu směrovými traťovými oblouky [5], byl vývoj tramvaje ukončen.



Obr. 9 Návrh osminápravové nízkopodlažní tramvaje Urbos 3 a řešení jejího trakčního otočného podvozku, odpruženého pohonného bloku a portálové nápravy s dutou hřídelí, opatřenou BSI spojkou (zdroj – VeVeY [5])

Z **článekových tramvají s jednonápravovými podvozky** se podařilo uspět pouze tramvaji **ULF 197** (Ultra Low Floor) – viz obr. 10, která je, s nejnižší podlahou na světě 207 mm, ve tří- a pětičlánekovém provedení provozována ve Vídni a patří mezi nejdražší tramvaje na světě.

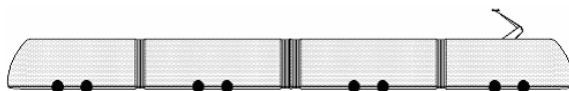


Obr. 10 Tříčláneková, čtyřnápravová nízkopodlažní tramvaj s jednonápravovými portálovými podvozky v uspořádání pojezdu $1'A_0\bar{A}_0'A_0$.

Nejpočetnější část 100% nízkopodlažních tramvají představují **vícečlánekové, kloubové nízkopodlažní tramvaje s „neotočnými“ podvozky pod skříní vozidla**. Jsou řešeny dvěma koncepčními přístupy:

- **tramvaj složená z přibližně stejně dlouhých článků** s podvozky „neotočné“ uloženými ve středu jednotlivých podvozkových článků, tj. tramvaj složená z několika

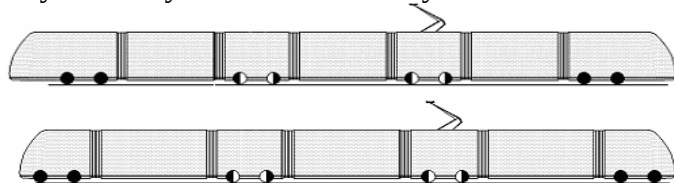
„dvouosých vozů“, které jsou navzájem spojeny klouby. Takto koncipované tramvaje mohou být teoreticky složeny z libovolného počtu článků (minimálně dvou) a mají z důvodu dlouhých představků užší skříň – viz obr. 11 .



Obr. 11

Schéma čtyřčlánekové, osminápravové nízkopodlažní tramvaje, tvořené pouze podvozkovými moduly s „neotočnými“ trakčními

- **kloubová modulární tramvaj s nesenými články** je tramvaj složená ze skříňových podvozkových modulů (krajní a prostřední články), mezi nimiž jsou přes spojovací klouby zavěšeny delší nesené články vozové skříně.



s delšími krajními články

s krátkými krajními články

Obr. 12 Schéma sedmičlánekových, osminápravových nízkopodlažních tramvají s neotočnými podvozky pod podvozkovými moduly a s nesenými články

Obecně lze konstatovat, že všechny tři úspěšné koncepce 100% nízkopodlažních tramvají jsou poměrně cenově drahé a za provozu vyžadují dodržení vysoké kvality tramvajové trati.

2.2.1 TRAKČNÍ PODVOZKY PLNĚ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ

Z hlediska koncepčního řešení pohonu můžeme 100% nízkopodlažní tramvaje s dvounápravovými hnacími podvozky, uloženými „neotočně“ pod skříní vozidla, rozdělit do čtyř základních skupin – viz diagram D2.

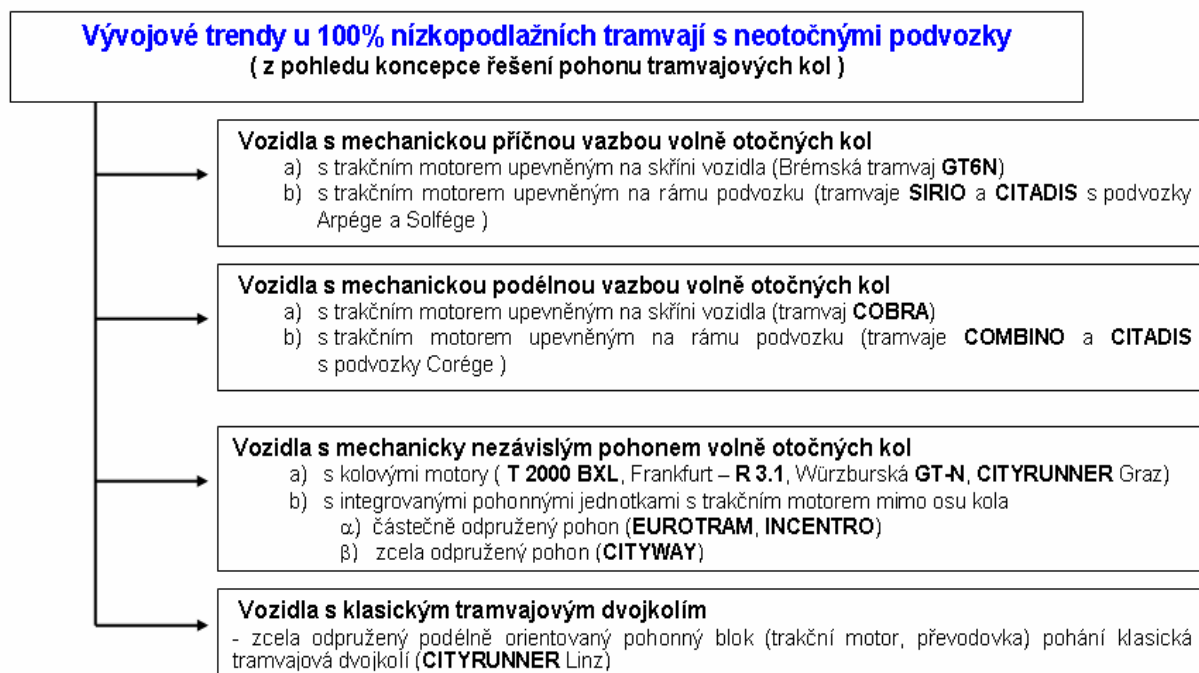
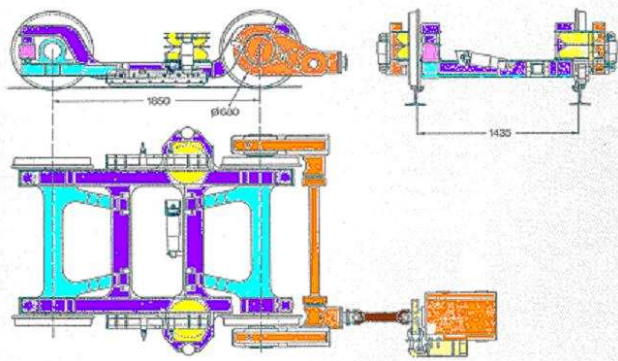


Diagram D 2

2.2.1.1 PODVOZKY S PŘÍČNOU MECHANICKOU VAZBOU VOLNĚ OTOČNÝCH KOL

Podvozek **tramvaje GT6N** (výrobce AEG) představuje nejstarší koncepce pohonu s příčnou mechanickou vazbou, jež byla vedena snahou zachovat při jízdě v přímé trati



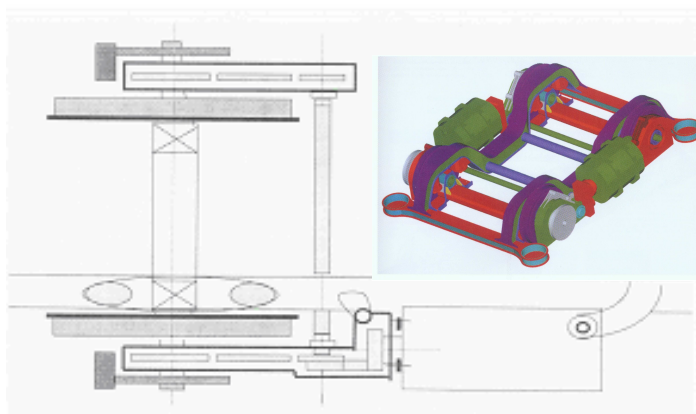
Obr. 13

Schéma podvozku tramvaje GT6N (zdroj AEG)

„vlnivý pohyb“ podvozku. Podvozek s vnitřním rámem, jednou hnací a jednou běžnou nápravou je řešený s cílem dosažení minimální hmotnosti podvozku a jeho neodpružených hmot (viz obr. 13), proto je trakční motor upevněn na skříni vozidla.

Vysoká torzní tuhost podvozku a nežádoucí přenos jalových výkonů si vyžádaly, pro zlepšení průjezdu obloukem, doplnění rozvodovky hydrostatickým, samosvorným, čelním diferenciálem.

Podvozek italské tramvaje **Sirio 7C4** je druhým, novějším představitelem pohonu s příčnou mechanickou vazbou volně otočných kol. Principiální řešení podvozku s pohonem dvou hnacích portálových náprav, pomocí dvou trakčních podélně orientovaných motorů, upevněných na rámu podvozku, je patrné z obr.14. **I toto řešení pohonu si vyžádalo použití uzavíratelného diferenciálu.**



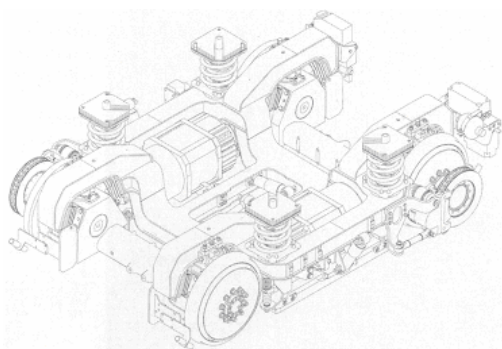
Obr. 14

Podvozek tramvaje **Sirio 7C4**, schéma řešení pohonu volně otočných kol příčnou vazbou u trakčního podvozku (zdroj – Ansaldo Breda a [8])

Příčná mechanická vazba volně otočných kol, pomocí tuhého hřídele procházejícího dutinou portálové nápravy, byla použita i u běžných (viz obr. 4) a trakčních **podvozků Arpege**

a Solfége nízkopodlažních tramvajů CITADIS.

Pohon podvozku **Solfége** (viz obr. 15) zajišťují dva podélně orientované, vzduchem chlazené, asynchronní trakční motory, které jsou upevněny na rám podvozku a přes dva krátké kloubové hřídele pohánějí kuželové převodovky přilehlých, volně otočných kol. Tyto převodovky jsou součástí těles ložiskových komor kolových čepů tramvajových kol a vytváří tak s portálovou nápravou jeden kompaktní, neodpružený celek.

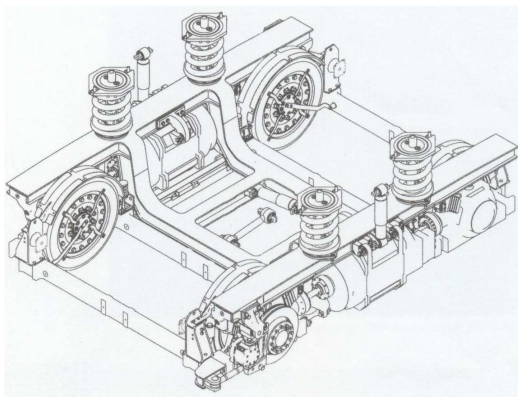


Obr. 15

Normálněrozchodný trakční podvozek **Solfége** (zdroj – Alstom [8])

2.2.1.2 PODVOZKY S PODÉLNOU MECHANICKOU VAZBOU VOLNĚ OTOČNÝCH KOL

Trakční podvozek **Corége** tramvaje **Citadis** patří do skupiny podvozků, které používají „skupinový“ pohon volně otočných, vypružených tramvajových kol. Pohon tvoří



Obr. 16
Trakční podvozek **Corège** pro tramvaje
Citadis 302 B, rozchod 1435 mm
(zdroj – Alstom [8])

řešení pohonu u **podvozku SF 30 TF**, používaného u **tramvají Combino**, které je společné i pro úzkorozchodný podvozek SF 30 MTF. Pohonný blok tvoří podélně orientovaný asynchronní motor a dvojice hypoidních kolových převodovek - viz obr. 17. Na oboustranný výstupní hřídel motoru je z jedné strany připojen ventilátor chlazení motoru, z druhé strany brzdový kotouč rychloběžné kotoučové brzdy. Třmen její brzdící jednotky je upevněn na přírubu statoru trakčního motoru. Přes hřídelové spojky výstupního hřídele motoru jsou poháněny pastorky hypoidních kolových převodovek. Jejich kuželové talířové kolo je uloženo na duté



Obr. 17
Integrovaný pohonný blok (zdroj – Siemens)

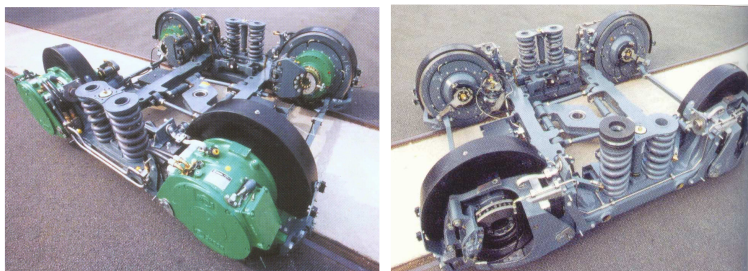


Obr. 18
Zmodernizovaný dvounápravový trakční
podvozek SF 30 TF pro rozchod 1435 mm
(zdroj – Siemens [11])

hřídeli, která je na vnější výstupní straně kolové převodovky opatřena unášecem BSI spojky. Přenos hnacího momentu na volně otočné tramvajové kolo je proveden **kloubovým hnacím hřídelem, opatřeným dvojicí BSI spojek**, procházejícím dutou hřídelí kolové převodovky. Zmodernizované trakční podvozky SF 30 TF používají k přenosu podélné síly pouze jednu ojnici a v sekundárním vypružení mají pryžokovové odvalovací pružiny - obr. 18. Svislé vypružení je doplněno dvojicí hydraulických tlumičů, které tlumí nejen houpání podvozkových článků vozidla, ale i jejich kývání.

2.2.1.3 PODVOZKY S MECHANICKY NEZÁVISLÝM POHONEM VOLNĚ OTOČNÝCH KOL

K mechanicky nezávislému pohonu vypružených tramvajových kol se používaly asynchronní nebo synchronní, vodou chlazené kolové motory nebo integrované pohonné jednotky z části nebo zcela odpružené. Z novějších realizovaných koncepcí pohonu **kolovým motorem** je zajímavé řešení podvozků (obr. 20) tramvaje **Cityrunner** pro rakouský **Graz**. Vodou chlazený, asynchronní trakční motor s planetovou převodovkou,



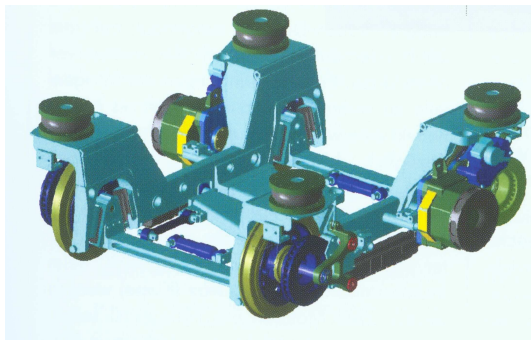
Obr. 20

Trakční a běžný podvozek tramvaje **GLT 6Nf** – Graz
(zdroj - Bombardier [12])

brzdový kotouč a volně otočné kolo tvoří jeden kompaktní pohonný celek, pohánějící speciálně vypružená kola o $\varnothing$ 710 mm. **Kostra motoru vytváří kyvnou vidlici**, zakotvenou přes válcový silentblok do čepového uložení na konci podélníku. Primární vypružení podvozku zajišťují pryžokovové bloky, které jsou

z jedné strany ukotveny na kostru trakčního motoru, z druhé strany se opírají o konzolu podélníku podvozku. Pro udržení stanoveného rozchodu jsou obě kostry motoru navzájem propojeny spojovací tyčí.

Zajímavé řešení pohonu volně otočných kol pomocí **integrované, zcela odpružené jednotky s příčně orientovaným motorem** (viz obr. 21) je použito u tramvaje **Cityway**. Synchronní, vzduchem chlazený motor je upevněn na skříň čelní převodovky, která je na výstupu opatřena dutou hřídelí. Na ní je z vnější strany převodovky upevněn brzdový



Obr. 21

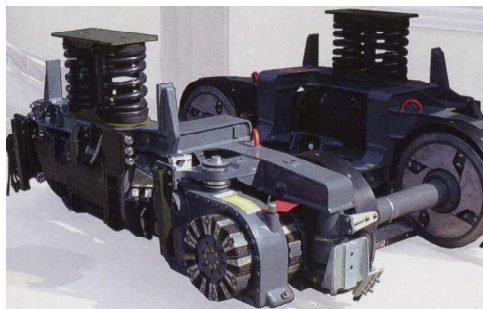
Podvozek pod krajní článek osminápravové jednosměrné tramvaje **Cityway** pro Turín s uspořádáním pojezdu (1A) $\overline{B_0} \overline{B_0}$ (A1)
(zdroj - Alstom Ferrovaria [8])

kotouč. Z vnitřní strany převodovky je na přírubu duté hřídele upevněna **ojníčková spojka**, přenášející hnací nebo brzdový moment na volně otočná vypružená tramvajová kola. Na skříň převodovky je dále ukotven brzdový třmen kotoučové brzdy. Pohonná jednotka je jednou stranou upevněna přes silentbloky na podélník podvozkového rámu. Druhou stranou je zavěšena pomocí závěsky na konzolu podélníku.

Podvozky s rozvorem 1750 mm používají volně otočná tramvajová kola o $\varnothing$ 680 mm. Rám podvozku je torzně poddajný a tvoří jej dva půlrámy tvaru nesymetrického písmene **T**, vzájemně spojené ve středové ose podvozku dvěma pryžokovovými klouby.

2.2.1.4 PODVOZKY S KLASICKÝMI TRAMVAJOVÝMI DVOJKOLÍMI

V předchozích částech jsem uvedl příklady 100% nízkopodlažních tramvají, kde z důvodu nízké podlahy, cca 350 mm nad rovinou TK., byly použity portálové nápravy. Připustíme-li, že v partiích nad trakčním podvozkem může být výška podlahy až 450 mm nad rovinou TK., když ve vozidle vytvoříme bezbariérovou, výškově tvarovanou průchozí uličku (bez schodů), nabízí se možnost použití klasických **tramvajových dvojkolí** s vypruženými koly o $\varnothing$ 560 mm i u 100% nízkopodlažních tramvají. Toto řešení je můžeme vidět u tramvaje **Cityrunner** v rakouském **Linzu** [13]. Úzkorozchodný trakční i běžný podvozek mají identický, torzně tuhý, vnější podvozkový rám o rozvoru 1850 mm.

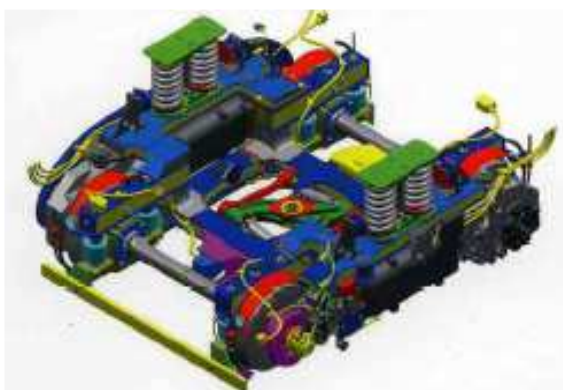


Obr. 22

Úzkorozchodný trakční podvozek tramvaje **Cityrunner** – Linz
(zdroj - Bombardier Transportation)

Primární vypružení podvozku a současně funkci vedení dvojkolí zajišťují pryžokovové válcové pružící prvky, vždy čtyři na jedné nápravě. Sekundární vypružení je realizováno čtyřmi šroubovitými válcovými flexi-coil pružinami, doplněnými pryžokovovými nárážkami a dvojicí hydraulických tlumičů. **Podvozek je pod skříní veden Z-mechanismem**, který je upevněn na malý otočný tažný čep – viz obr.23.

Pohonná jednotka je složená z trakčního, vzduchem chlazeného, asynchronního motoru a hypoidní převodovky s dutou výstupní hřídelí **vytváří zcela odpružený pohonný blok**, který je zavěšen přes tři silentbloky na podélníky rámu podvozku. Přenos hnacího momentu z výstupní duté hřídele převodovky na dvojkolí je zajištěn krátkým spojovacím hřídelem, procházejícím dutou výstupní hřídelí převodovky. Spojovací hřídel je opatřen dvojicí BSI spojek – viz obr. 22. U normálněrozchodného Cityrunneru, který má trakční podvozek s vnitřním rámem, je k pohonu dvojkolí použit nový kloubový hřídel – viz obr.23.



Obr. 23
Normálněrozchodný podvozek tramvaje
Cityrunner 3001
a jeho zabudování pod skříní vozidla
(zdroj - Bombardier Transportation [11])

3. HODNOCENÍ VÝVOJOVÝCH TRENDŮ

Provozovatelé požadují od výrobců nízkopodlažních tramvají nízkou pořizovací cenu vozidel, ekonomicky i časově přijatelnou údržbu a především aplikaci provozem osvědčené a spolehlivé moderní techniky (rekuperace, asynchronní pohon, protiskluzová a protismyková ochrana, diagnostika). Dále atraktivní design, pohodlná sedadla s protivandalskou úpravou, nízkou úroveň vnitřního hluku, kvalitní větrání a topení (případně klimatizaci), srozumitelné a přehledné informační systémy, vysokou úroveň bezpečnosti provozu a ekologickou nezávadnost. Cestující si přejí nízkou cenu jízdného, spolehlivost, pohodlný nástup a výstup z vozidla, pravidelnost a časovou návaznost, krátké jízdní intervaly a maximální dostupnost s minimem přestupování.

Vyhovět všem těmto požadavkům není jednoduché, proto se vývoj nízkopodlažních tramvají v posledním desetiletí přiklonil k **modulární stavbě vozidel** [14], neboť ta umožňuje :

- ✚ vytvořit stavebnici záměnných modulů jednotlivých komponentů vozidla (skříňových modulů, trakčních a běžných podvozků, trakčních a statických měničů, apod.)
- ✚ skládat skutečné vozidlo z těchto dílčích modulů a přizpůsobit jej požadavkům zákazníka (přepravní kapacita, podíl nízké podlahy, adhezní vlastnosti – pohon, brzda, klimatizace, průchodnost vozidlem apod.)
- ✚ dosáhnout velké variability v sortimentu vyráběných vozidel při zachování unifikace a větší sériovosti vyráběných dílů
- ✚ nabídnout zákazníkovi kvalitní a spolehlivé kolejové vozidlo za přijatelnou cenu .

3.1 VÝVOJOVÉ TRENDY V ŘEŠENÍ SKŘÍNÍ

Hrubá stavba skříně klasických čtyřnápravových tramvajových vozů byla stavěna v diferenciální ocelové stavbě, kdy hlavním nosným prvkem byl svařovaný spodek vozové skříně, který spolu s bočnicemi a lehkou konstrukcí střechy vytvářel základní kostru skříně vozidla. Snížení výšky podlahy, případně její rozdílná výška (u částečně nízkopodlažních tramvají) a přemístění elektrické výzbroje na střechu vozidla si u nízkopodlažních tramvají vyžádalo změnit dimenzování hrubé stavby, neboť střecha vozidla se, vedle spodku vozidla, stala významnou nosnou částí hrubé stavby skříně jednotlivých článků vozidla.

U nízkopodlažních tramvají se, vedle klasické diferenciální ocelové stavby, používající oceli se zvýšenou odolností proti korozi (NIROSTA), prosadila integrální stavba z lehkých slitin (AlMgSi), kdy jednotlivé komponenty skříně (spodek, střecha a bočnice) byly svařeny z protlačovaných profilů a panelů. Rozdíl v hmotnosti ocelové diferenciální hrubé stavby stejně rozměrné skříně a hliníkové integrální stavby je zanedbatelný a vzhledem k dosti častým kolizím tramvají s automobily se ukazuje, že uplatnění celosvařovaných Al-konstrukcí je z důvodů oprav, především u krajních článků tramvají, nevhodné. Lepším řešením pro exponovaná místa vozidla je použití výměnné technologie, tj. šroubovaných a lepených dílů. Špatné zkušenosti s uplatněním pouze šroubované konstrukce (tramvaj Combino, systém Alugrip) dokazují, že **hlavním vývojovým trendem je použití hybridní stavby skříní**, která představuje výhodnou kombinaci diferenciální a integrální stavby, doplněnou šroubovými nebo lepenými spoji a umožňuje optimálně kombinovat prvky ocelové, hliníkové, kompozitní a sendvičové panely na vnější opláštění. Z důvodu snížení hmotnosti skříně lze očekávat, především u nesených článků, výraznější uplatnění kompozitních materiálů.

Pro snížení následků střetu tramvaje s osobními automobily je dnes požadováno **použití sklopných čelních spřáhel**, schovaných pod čelem kabiny a vytvoření **deformační crash zóny na čele tramvaje, opatřené absorbery**, umístěnými za nárazníky krajního článku vozidla.

3.2 VÝVOJOVÉ TRENDY ŘEŠENÍ PODVOZKŮ A POHONU

Z uvedených příkladů řešení pojezdu tramvají vyplývá, že **nejvhodnějším řešením pojezdu** je použití **dvounápravových podvozků s dvoustupňovým vypružením a se zcela odpruženým pohonem**, kdy trakční motor, převodovka a kotoučová brzda vytváří zcela **odpružený integrovaný pohonný blok**, který je zavěšen na rámu podvozku a přes „kloubový hřídel“ nebo ojníčkovou spojku pohání volně otočná tramvajová kola portálové nápravy, případně klasické tramvajové dvojkolí. S ohledem na požadované výkony (cca 100 kW/nápravu) se prosazuje použití podélně orientovaných trakčních motorů. Z pohledu modularity, unifikace a větší sériovosti **je nutné zajistit, aby podvozky nízkopodlažních tramvají** (trakční, běžný, otočný, neotočný) **měly zachovány co nejvíce společných komponentů** (rám podvozku, řešení tramvajových kol, kolejnicových brzd, pružících prvků, systém vedení podvozku pod skříní vozidla). Lze očekávat, že se vedle asynchronních motorů budou stále více uplatňovat synchronní motory s permanentními magnety, které pro stejný výkon vykazují menší rozměry, hmotnost a vyšší účinnost.

4. PŘÍNOS HABILITAČNÍ PRÁCE K VÝVOJI NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ V ČR

Projektování nízkopodlažních článkových tramvají postavilo před konstruktéra, navrhujícího skřín a pojezdovou část vozidla, celou řadu nových technických problémů, se

kterými se při projektování klasických čtyřnápravových „sólo“ tramvají typu T3, T6A5 nesetkal, neboť pod vysokou podlahou skříně vozidla nebyl tak omezován prostorovými možnostmi a vozidla zpravidla neměla ani článkové provedení.

Habilitační práce obsahuje poznatky a zkušenosti, které jsem získal studiem této problematiky ([2], [15], [16]), jednak v rámci řešení **VZ MSM 21220008 – Rozvoj metod a prostředků integrovaného strojního inženýrství**, kde jsem byl v 6.sekci řešitelem Projektu č.4.4 – Integrovaný návrh kolejových vozidel pro městskou a příměstskou dopravu ([6], [14]) a dále v rámci své **odborné spolupráce s výrobcem tramvají - firmou ČKD Dopravní systémy a.s.** ([1], [7], [15], [17]).

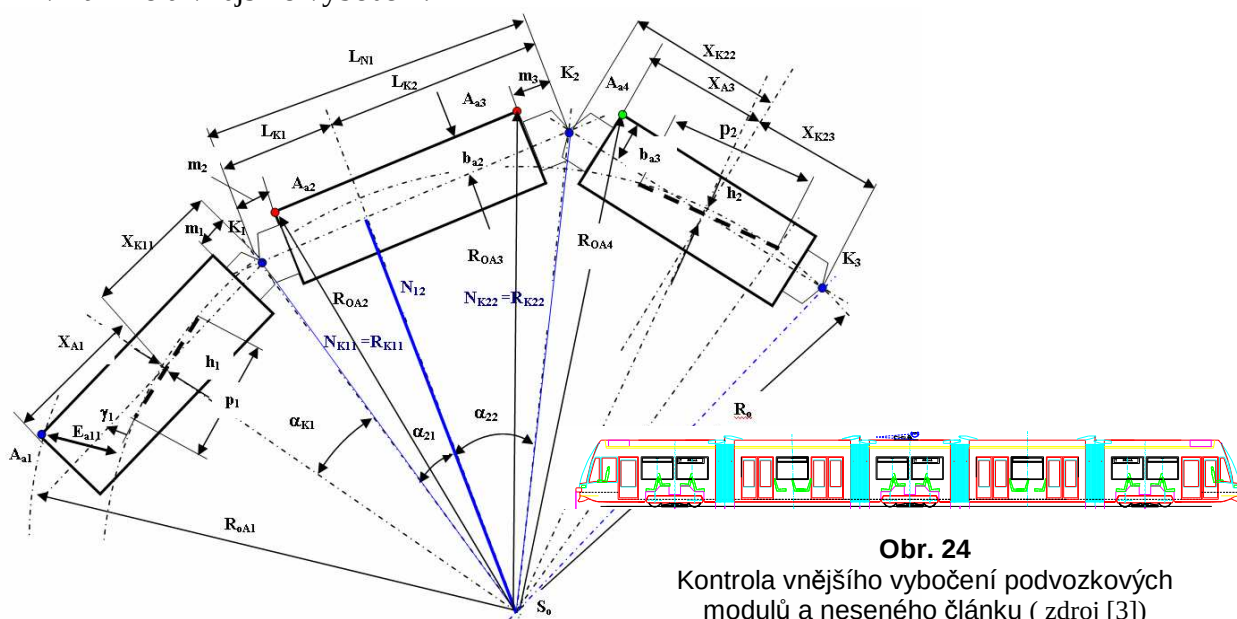
V habilitační práci jsem řešil některé teoretické a technické problémy, týkající se projektování článkových nízkopodlažních tramvají, vhodných pro provoz v podmínkách ČR. Jde především o otázky:

- **výpočtu konstrukčních obrysů článkových tramvají**, neboť tato problematika není ve stávající platné normě ČSN 28 0337 – *Obrysy pro tramvajová vozidla* odpovídajícím způsobem řešena
- **analýzy rozměrů modulární řady nízkopodlažních tramvají**, použitelných pro provoz nejen v Praze, ale i v celé ČR
- **svislého zatížení podvozků a použití mezičlánkové vazby** u šesti- a osminápravových tramvají při staticky určeném nebo neurčeném uložení skříně na podvozcích a při použití pasivní nebo aktivní mezičlánkové vazby
- **návrhu trakčních podvozků pro modulární řadu tramvají**.

4.1 VÝPOČTY KONSTRUKČNÍCH OBRYŠŮ ČLÁNKOVÝCH TRAMVAJÍ

Pro jednotlivé koncepce článkových nízkopodlažních tramvají jsem definoval metodiku výpočtu obrysu pro konstrukci skříně a obrysu pro konstrukci podvozku, tj. odvodil jsem výpočetní vztahy pro kontrolu mezních rozměrů (šířky a výšky) jednotlivých článků skříně vozidla a podvozku.

Kontrola maximální šířky skříně se u tramvajových vozidel provádí výpočtem vnitřního a vnějšího vybočení.



Jako příklad odvozených vztahů uvedu podmínku pro kontrolu **vnějšího vybočení** článků skříně u tramvaje s nesenými články (výpočtový model - viz obr. 24).

Pro vnější vybočení E_{aj} obecného bodu A_{aj} [x_{aj}, b_{aj}] , nacházejícího se na představku podvozkových modulů, musí být splněna podmínka

$$(k + \Delta_{a(R_0)}) \geq E_{a(x_{aj})} = \sqrt{R_0^2 - \frac{p_j^2}{4} + x_{aj}^2 + b_{aj}^2 + 2 \cdot x_{aj} \cdot \sin \gamma_j \cdot \sqrt{R_0^2 - \frac{p_j^2}{4} + 2 \cdot b_{aj} \cdot \cos \gamma_j \cdot \sqrt{R_0^2 - \frac{p_j^2}{4}}} - R_0, \quad (1)$$

kde $(k + \Delta_{a(R_0)})$ je mezní pološířka základní části statického obrysu pro vozidlo podle ČSN 28 0337 v příslušné výšce od roviny TK a v příslušném poloměru oblouku R_0 , x_{aj} je odlehlost příčného řezu od středové roviny „neotočného“ podvozku, b_{aj} je pološířka vozidla v kontrolovaném bodě A_j , p_j je rozvor podvozku a γ je úhel pootočení skříně podvozkového modulu.

Pro vnější vybočení E_{aA2} neseného článku v bodě A_2 musí být splněna podmínka

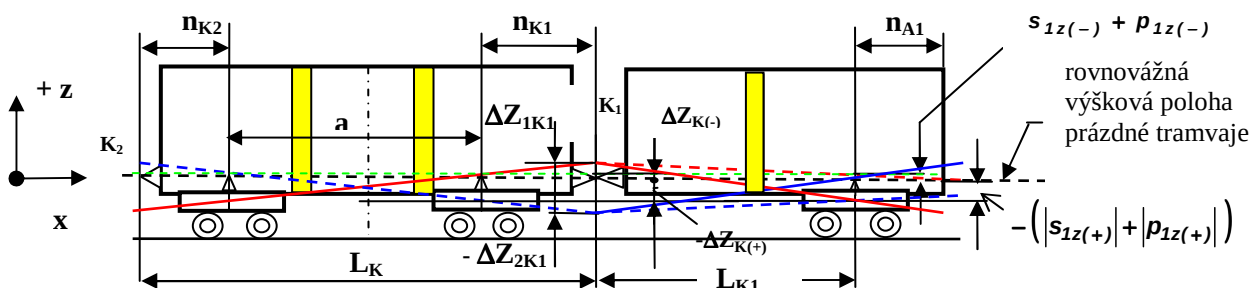
$$(k + \Delta_{a(R_0)}) \geq E_{aA2} = \sqrt{N_{12}^2 + 2 \cdot N_{12} \cdot b_{A2} + b_{A2}^2 + L_{K1}^2 - 2 \cdot L_{K1} \cdot m_2 + m_2^2} - R_0, \quad (2)$$

kde velikost společné normály N_{12} a její polohu od spojovacích kloubů stanovíme z vazebních podmínek $R_{K11}^2 - L_{K1}^2 = R_{K22}^2 - L_{K2}^2$ a $L_{N1} = L_{K1} + L_{K2}$. Jejich řešením, při znalosti

polohy spojovacích kloubů tj. poloměrů R_{K11} a R_{K22} , dostáváme $L_{K1} = \frac{R_{K11}^2 - R_{K22}^2 + L_{N1}^2}{2 \cdot L_{N1}}$,

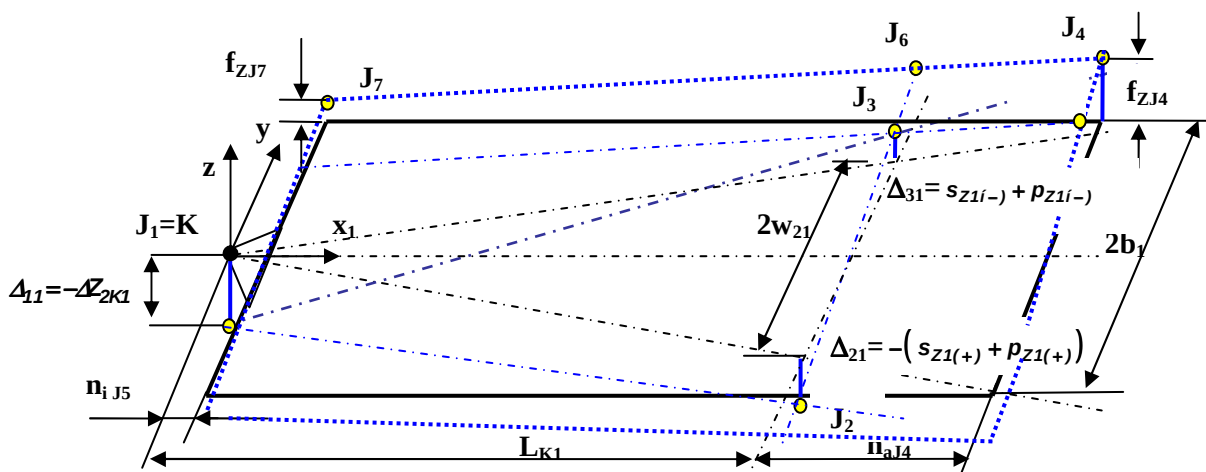
$$L_{K2} = \frac{R_{K22}^2 - R_{K11}^2 + L_{N1}^2}{2 \cdot L_{N1}}.$$

Kontrola výšky skříně vozidla spočívá ve výpočtu mezní výšky horní a spodní linie obrysu pro konstrukci v partiích uvnitř a vně oblasti sekundárního vypružení vozidla. Pro stanovení výšky je nutné provést **výpočet vnitřního (e_i) a vnějšího svislého zúžení (e_a)**. Ten je u článkových tramvají závislý na systému provedení kloubových spojení jednotlivých článků. Toto spojení musí, s ohledem na způsob uložení skříňových modulů na podvozcích (dvoubodové nebo čtyřbodové), zabezpečovat **minimalizaci změn zatížení** primárního a sekundárního **vypružení** a bezproblémovou **jízdu vozidla přes nivelační oblouky** (sedlo nebo vrchol). Z těchto důvodů mají vybrané spojovací klouby, umístěné v mezivozových přechodech, omezen počet stupňů volnosti, tj. mají zamezen relativní svislý pohyb (z) a natáčení kolem příčné osy (ϕ_y), a tím je vytvořeno segmentové uspořádání skříně – viz obr. 25.



- mezní poloha omezující při kývání krajního článku max. výšku na představku
- mezní poloha omezující při kývání krajního článku min. výšku na představku
- - - mezní poloha omezující při kývání krajního článku max. výšku zadního čela
- - - mezní poloha omezující při kývání krajního článku min. výšku zadního čela

Obr. 25 Segmentové uspořádání tramvaje (zdroj [3])



Obr. 26 Výšková poloha spojovacího kloubu a kývání krajního článku (zdroj [3])

Jako příklad, pro stanovení konstrukční výšky **spodku skříně vozidla vně oblasti sekundárního vypružení**, uvedu obecný výpočtový vztah, odvozený pro minimální výšku obrysu $h_{skř(a,j)}$ výpočtového bodu **Jj** pro konstrukci skříně na představku krajního článku vozidla

$$h_{skř(a,i)} = h_{OJj} + e_i = h_{OJj} + |(p_{z1(+)} + s_{z1(+)}| + \max(|\Delta f_{yJj}, \Delta f_{xJj}|) + \Delta r_K + \Delta h_{(i,a)Jj} \quad (3)$$

kde h_{OJj} je výška spodní linie bodu **Jj** statického obrysu, e_i je výsledné výškové zúžení dané součtem maximálního statického sednutí primárního $p_{z1(+)}$ a sekundárního vypružení $s_{z1(+)}$, maximem hodnoty dodatečné svislé výchylky, způsobené kýváním Δf_{yJj} nebo náklonem Δf_{xJj} , povoleným ojetím kola Δr_K a $\Delta h_{(i,a)Jj}$ představuje svislé zúžení, potřebné pro jízdu přes minimální nivelační oblouk (sedlo).

Přínos habilitační práce k vývojovým trendům v oblasti výpočtů konstrukčních obrysů spatřuji v následujících bodech :

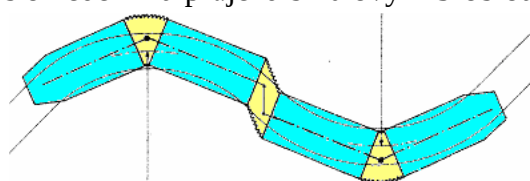
- pro jednotlivá koncepční uspořádání článkových nízkopodlažních tramvají byly definovány vztahy pro výpočty obrysu pro konstrukci skříně a obrysu pro konstrukci podvozku
- pro kvalifikované posouzení obrysu skříně jednotlivých variant článkových tramvají jsem vytvořil **program pro výpočet statických obrysů pro konstrukci tramvajových vozidel Obrys-tramvají.xls** [6]
- **nově navržená metodika výpočtu konstrukčního obrysu článkových tramvají z linie kinematického obrysu** vystihuje současné vývojové trendy, používané při výpočtech maximálních rozměrů skříní kolejových vozidel, určených pro městskou hromadnou dopravu.

4.2 ANALÝZA ROZMĚRŮ MODULÁRNÍ ŘADY ČLÁNKOVÝCH TRAMVAJÍ

Délka, šířka a výška jednotlivých článků, výška podlahy a rozmístění sedadel je u článkových tramvají závislá na typu použitého podvozku, který je pod skříní vozidla umístěn jako otočný nebo „ neotočný “, tj. s velmi omezenou možností natáčení podvozku kolem svislé osy. Na základě výpočtů obrysu pro konstrukci vozidla jsem při analýze rozměrů navržené modulární řady tramvají, provedených v [3] a [6], dospěl k následujícím závěrům:

- **šířka skříně 2480 mm** umožňuje, bez omezení požadavků (viz tab.1 – vstupní data), použít nad podvozky příčné uspořádání sedadel (2+2) a dodržet požadavek umístění všech nástupních dveří (pro cestující) do rovné části bočnice (neplatí pro typ NKT 38)

- šířku skříně u článkových tramvají s otočnými podvozky pod vozovou skříní, tj. typu KT 38, omezuje průjezd směrovým obloukem, přičemž kontrolu je třeba provádět v celém rozsahu směrových oblouků v normě ČSN 28 0337 uvedených, neboť limitujícím směrovým obloukem nemusí být minimální oblouk o poloměru 20 m
- šířku skříně u článkových tramvají s neotočnými podvozky, tj. NKT 56, NKT 78 a NKT 36, NKT 48 omezuje „rozvlnění“ článkové tramvaje při jízdě v přímé trati nikoliv průjezd vozidla obloukem
- u článkových tramvají s nesenými články, tj. typu NKT 56, NKT 78, vybavené pouze trakčními podvozky, je nutné optimalizovat rozměry krajních a nesených článků, nechce-li u prostředních podvozků překročit nápravové zatížení 100 kN [7]
- tramvaje tvořené pouze podvozkovými moduly, tj. typu NKT 36, NKT 48 sice vykazují rovnoměrnější zatížení podvozků a spojovací klouby jsou minimálně namáhány od svislých tíhových sil, avšak u čtyř- a vícečlánkových provedení tramvaje je nutné použít rozdílné koncepce řešení kloubů mezivozových přechodů s ohledem na průjezd směrovým S-obloukem a přejezd přes zaoblení lomu sklonu trati.

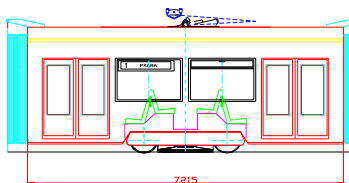


Obr. 27

Průjezd tramvaje NKT 48, tvořené pouze podvozkovými moduly S – obloukem (zdroj [3])

V lichých mezivozových přechodech je možné použít společný kloub. V sudých mezivozových přechodech je naopak nutné společný kloub příčně uvolnit nebo odstranit a provést spojení vozových článků přes mezivozové spráhlo, umístěné pod mezivozovým přechodem – viz obr. 27

- ke snížení dynamického namáhání vozidla a trati může u podvozkových modulů přispět optimalizace délky a hmotnosti článků a přechod od „neotočných podvozků“ k dynamicky natáčivým podvozkům, které mají, s ohledem na stabilitu jízdy a silové účinky působení vozidla na trať, optimalizované parametry vedení podvozku pod skříní (proměnná příčná vůle, úhlová tuhost a tlumení závislé na poloměru směrového oblouku) a tvarově řešenou skříň vozidla, kdy dlouhé podvozkové články už nebudou mít stálou šířku 2 480 mm, ale budou na představicích zúžovány – viz tab. 1.

Vstupní data výpočtu						
Rozvor podvozku	$p =$	1,900 [m]				
Maximální rozchod koleje za provozu v oblouku $R > 500$ m	$e_{Kolmax}(R > 500m) =$	1,445 [m]				
Maximální rozchod koleje za provozu v oblouku $R < 500$ m	$e_{Kolmax}(50 < R < 500m) =$	1,450 [m]				
Maximální rozchod koleje za provozu v oblouku $R < 50$ m	$e_{Kolmax}(R < 50m) =$	1,455 [m]				
Nepodrobitelná hodnota rozchodu dvojkoli	$e_{Dv opotr.} =$	1,410 [m]				
Příčná vůle ve vedení dvojkoli	$q =$	0,005 [m]				
Příčná vůle podvozek - skříní	$W_p =$	0,020 [m]				
Vypočtená data						
Maximální šířka skříně splňující podmínky pro obrys $b_{max.}$ [mm]						
Úhel natočení skříně proti podvozku γ_{exp} [deg.]	Podélná vzdálenost kontrolovaného bodu skříně od středové osy podvozku					
	1937,5 [mm]	2702,5 [mm]	3607,5 [mm]			
0,75	2555	2495	2440		Maximální šířka vozidla dle DP Praha	Minimální šířka vozidla dle DP Praha
1	2540	2472	2405		2500	2300
1,25	2523	2450	2378		2500	2300
1,5	2508	2425	2345		2500	2300
1,75	2490	2404	2315		2500	2300
2	2475	2382	2285		2500	2300

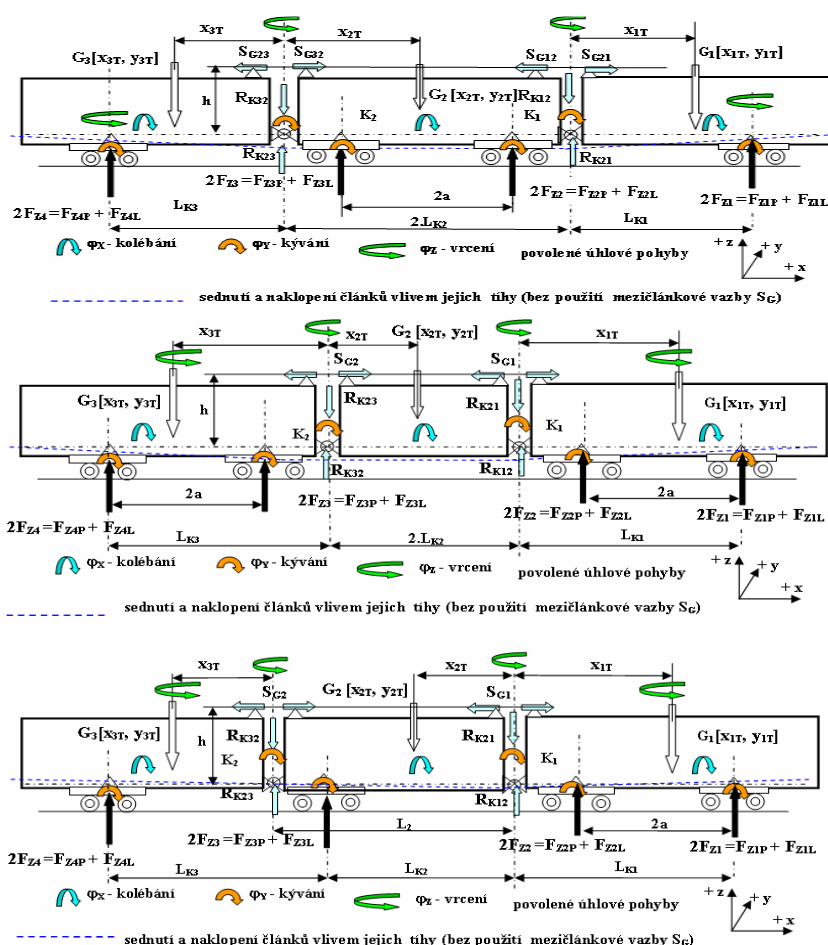
Tab. 1 Závislost šířky skříně podvozkového modulu na úhlu natočení podvozku (zdroj [3])

4.3 SVISLÉ ZATÍŽENÍ PODVOZKŮ A POUŽITÍ MEZIČLÁNKOVÉ VAZBY

Pro analýzu kvazistatického svislého zatížení sekundárního vypružení jednotlivých podvozků a spojovacích kloubů, různě koncipovaných článkových tramvají, jsem odvodil modely a vytvořil výpočetní programy KT 36, KT 38, KT 58, NKT 56, NKT 36, NKT 78 a pomocí nich jsem pro jednotlivé typy tramvají analyzoval vliv zavedení

mezičlánkových vazeb na vyrovnání kvazistatického zatížení sekundárního vypružení podvozků u obousměrných tramvají.

Jako dokumentační příklad vytvořených modelů uvedu modely pro analýzu koncepčních řešení osminápravových tříčlánkových tramvají typu KT 38 – viz. obr. 28.



KT 38 a
tramvaj s navěšenými
krajními články

KT 38 b
tramvaj
se zavěšeným
středním článkem

KT 38 c
tramvaj
s navěšeným
zadním a středním
článkem

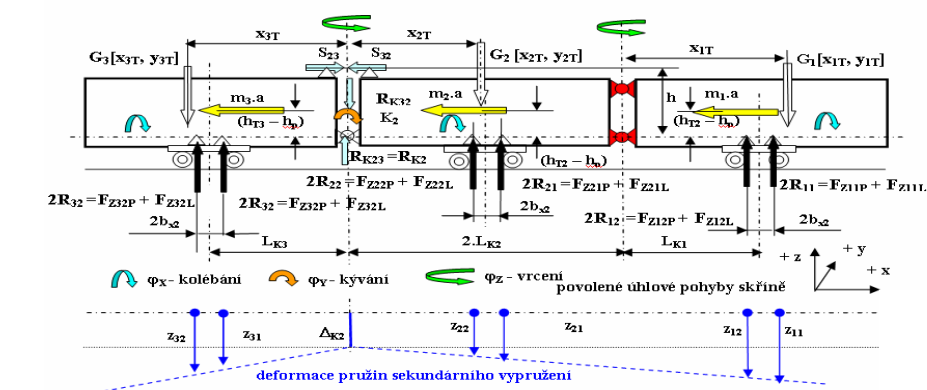
Obr. 28

Modely tří variant řešení tramvaje **KT 38** s otočnými podvozky pod vozovou skříní

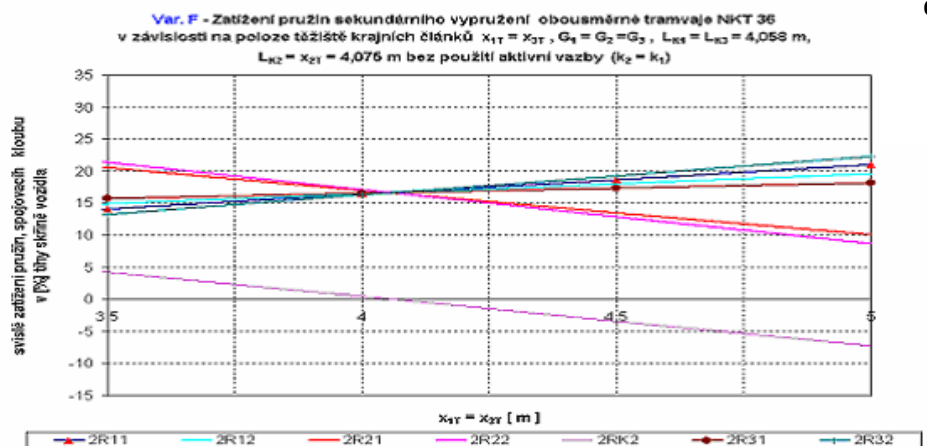
Z řešení modelů tříčlánkové tramvaje **KT 38** jsem dospěl k těmto závěrům:

- **KT 38 a** - představuje **nejvýhodnější koncepční uspořádání** s dostatečnou stabilitou jednotlivých článků. Pro rovnoměrné zatížení podvozků vyžaduje vyvodit nejmenší silové účinky v aktivních prvcích mezičlánkových vazeb
- **KT 38 b** - představuje méně vhodné koncepční uspořádání, u něhož je třeba věnovat pozornost stabilitě zavěšeného článku
- **KT 38 c** - představuje nejméně vhodné koncepční uspořádání. Pro rovnoměrné zatížení podvozků vyžaduje vyvodit největší silové účinky v aktivních prvcích mezičlánkových vazeb.

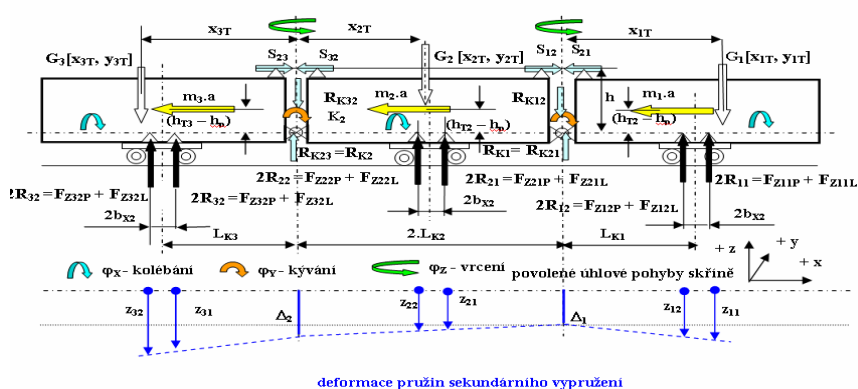
Vedle staticky určitých způsobů uložení skříně na podvozcích jsou v habilitační práci řešeny i případy staticky neurčitěho uložení. Jako příklad, dokumentující jedno z řešení, uvedu hodnocení uložení skříně na podvozcích a vlivu mezičlánkové vazby u tramvaje **NKT 36**, tj. u tramvaje tvořené pouze podvozkovými moduly. U této tramvaje můžeme použít, při čtyřbodovém uložení jednotlivých článků na podvozcích, dvou- nebo třísegmentové uspořádání.



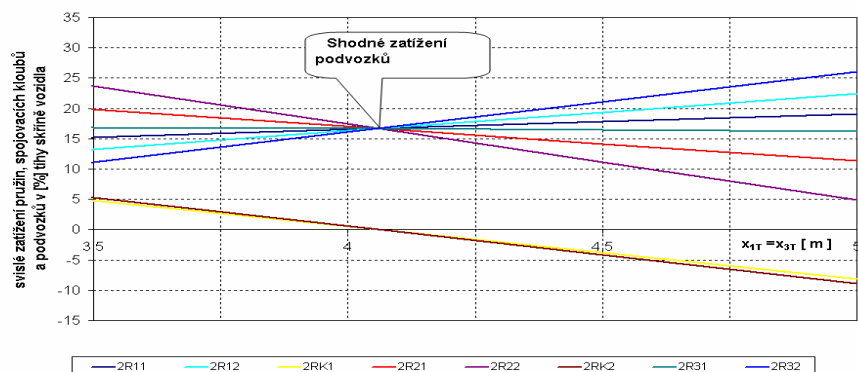
NKT 36 dvousegmentové uspořádání skříně



NKT 36 třísegmentové uspořádání skříně



Var. E - Průběh zatížení jednotlivých pružin sekundárního vypružení a podvozků obousměrné tramvaje KT 36 v závislosti na poloze těžiště krajních článků $x_{1T} = x_{3T}$, $G_1 = G_2 = G_3$, $L_{K1} = L_{K3} = 4,058$ m, $L_{K2} = x_{2T} = 4,075$ m



Obr. 29

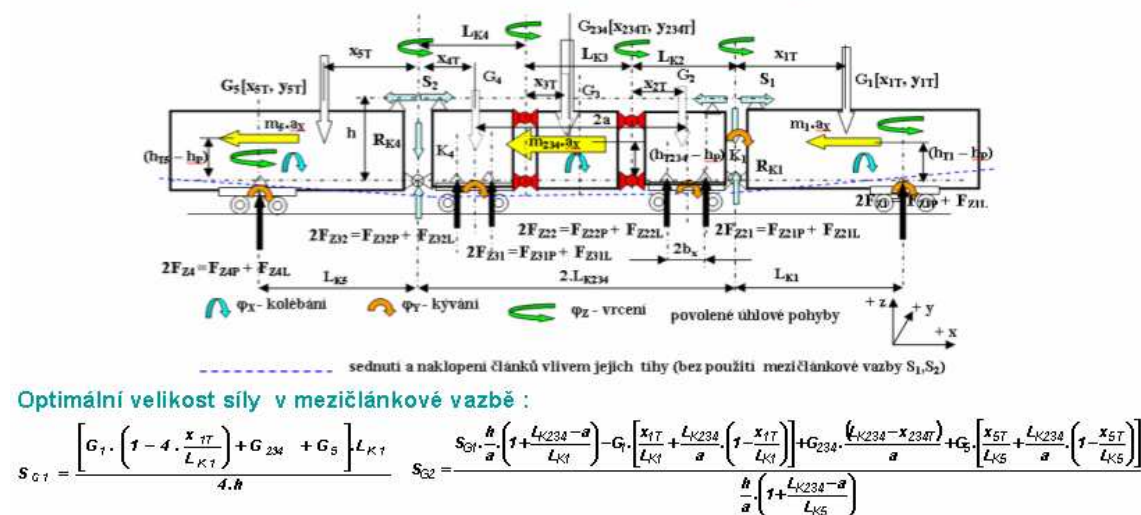
Ukázka modelů a výsledky výpočtu zatížení u tříčlánkové šestnápravové tramvaje NKT 36

Závěrem lze konstatovat, že **vhodnějším řešením uspořádání skříně tramvaje NKT 36 je dvousegmentové uspořádání**, neboť vykazuje menší rozdíly v zatížení sekundárního vypružení (viz obr. 29) a k vyrovnání zatížení podvozků lze použít jedné aktivní mezičlánkové vazby. Dvousegmentové uspořádání je vhodnější použít i u tramvají typu **KT 36** (tříčlánková, šestinápravová) nebo u tramvaje typu **NKT 56** (pětičlánková, šestinápravová).

PŘÍNOS POUŽITÍ AKTIVNÍ MEZIČLÁNKOVÉ VAZBY

Moderní nízkopodlažní tramvaje jsou stavěny v modulární stavbě jako článková vozidla, vzájemně spojená spojovacími klouby, umístěnými v mezivozových přechodech. Skutečné zatížení jednotlivých podvozků je u článkového vozidla závislé na okamžitém počtu a rozložení cestujících ve vozidle. Tato skutečnost ovlivňuje adhezni vlastnosti, koncepční řešení a účinnost pohonného systému vozidla. **Dnes nejčastěji používaný systém napájení trakčních podvozků, kdy každý podvozek je napájen ze samostatného střídače (měnič a regulátor), je především z hlediska hmotnosti elektrické výzbroje a optimalizace řízení hnací síly vozidla méně vhodný.** Z těchto důvodů jsem se v habilitační práci pokusil, pro jednotlivé koncepční varianty modulární řady šesti- a osminápravových článkových tramvají, analyzovat možnost **dosažení „shodného“ svislého zatížení u dvou po sobě následujících trakčních podvozků použitím aktivní mezičlánkové vazby.** Tento systém, **kdy dva trakční podvozky, používající skupinový, zcela odpružený pohon volně otočných kol (viz [17] , [18]), budou napájeny z jednoho výkonnějšího IGBT duo - měniče,** který je z hlediska hmotnosti lehčí než dva méně výkonné měniče, **umožňuje snížit hmotnost elektrické výzbroje vozidla a stavět vozidla plně adhezni,** tj. s uspořádáním pojezdu $B'_0 \bar{B}'_0 B'_0$ nebo $B'_0 \bar{B}'_0 \bar{B}'_0 B'_0$.

Jako příklad uvedu model třísegmentového uspořádání skříně tramvaje **KT 58** a vztahy odvozené pro velikost sil v mezičlánkové vazbě – viz obr. 30.



Pro tramvaj **KT 58** s **dvoubodovým uložením** krajních článků na otočných podvozcích a **čtyřbodovým uložením** skříně druhého a čtvrtého článku je nejvýhodnější koncepční uspořádání, **třísegmentové uspořádání**, které pro rovnoměrné zatížení podvozků vyžaduje v mezičlánkových vazbách nejmenší silové účinky S_{G1} a má dostatečnou úhlovou stabilitu jednotlivých článků vozové skříně.

Obr. 30 Ukázka modelu tramvaje KT 58 a výsledky řešení

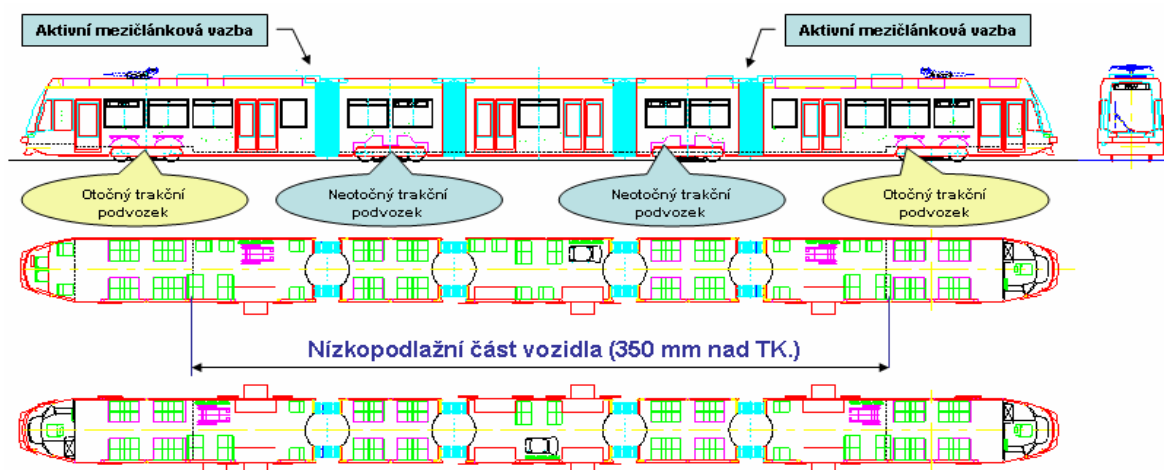
Použití aktivní mezičlánkové vazby umožňuje „vyrovnat“ zatížení jednotlivých podvozků vozidla [22] a tím lze optimálněji stanovit jmenovité parametry trakčních

motorů, neboť ty nemusí být tolik předimenzovány a budou za provozu méně často pracovat v oblastech částečného zatížení, které se projevuje nižší účinností a vyšším oteplením motorů a silových obvodů.

Tak lze lépe využít adhezních vlastností vozidla a dosáhnout hospodárnějšího využití instalovaného výkonu vozidla. **Vozidlo s aktivní mezičlámkovou vazbou by mělo mít v provozu celkově nižší energetickou náročnost** a lze očekávat, že vyšší pořizovací cena nové tramvaje, z hlediska pohonu plně adhezní, bude vykompenzována **sníženými provozními náklady, vyplývajícími z menšího opotřebení kol a trati**.

4.4 NÁVRH TRAKČNÍCH PODVOZKŮ PRO MODULÁRNÍ ŘADU TRAMVAJÍ

Optimální řešení skříně a pojezdu nízkopodlažních tramvají je výrazně závislé na základních provozních a technických podmínkách, ve kterých má být vozidlo provozováno. Zatímco **u článkové tramvaje, provozované na rovinatých tratích** se sklonem do 20 %, **stačí pohánět pouze polovinu tramvajových kol**, tj. v koncepci pojezdu vozidla **můžeme kombinovat trakční a běžné podvozky**, u tramvají, provozovaných **na tratích s náročnými směrovými** (malé oblouky bez přechodnic) a sklonovými poměry (sklon cca 80 ‰), je vhodné pohánět všechna tramvajová kola, tj. je **nutné použít pouze trakční podvozky**. Přitom by bylo vhodné, aby alespoň podvozky pod krajními články byly otočné [1]. Pro tratě s velkým počtem směrových oblouků malých poloměrů, které jsou bez přechodnic, jako např. v Praze, jsou koncepce tramvají s neotočnými podvozky pod krajními články méně vhodné, neboť oproti klasickým tramvajím s otočnými podvozky vykazují větší opotřebení tramvajových kol a kolejnic. Při nájezdu do oblouku dochází ke snížení míry bezpečnosti, neboť dlouhé předstávky krajních podvozkových článků s neotočnými podvozky vytvářejí poměrně velké momenty setrvačnosti skříňových modulů a tím způsobují zvýšené dynamické namáhání pojezdové části vozidla a trati [20, 21].²⁾



Obr. 31

KT 58 – částečně nízkopodlažní, pětičlámková tramvaj s uspořádáním pojezdu $B'_0 \overline{B'_0 B'_0} B'_0$

²⁾ Naopak použití velmi krátkých krajních článků způsobuje nerovnoměrné zatížení jednotlivých podvozků (přetížení prostředních podvozků) a vyžaduje pro dodržení komfortu kvality jízdy použití vzduchových pružin v sekundárním vypružení (tramvaj Eurotram). Další nevýhodou je, že při nehodě může velmi často dojít k poškození podvozku a vozidlo je nebezpečnější i pro člověka, při jeho pádu pod vůz.

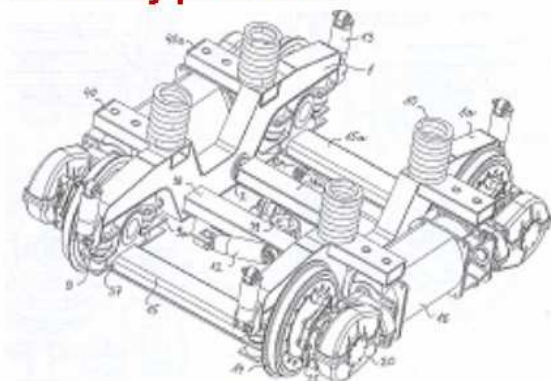
Domnívám se, že pro náročné traťové poměry je vhodnější použít, z hlediska pohonu a brzdy, plně adhezní částečně nízkopodlažní tramvaj se 70 % nízké podlahy - viz obr. 31, s účelně řešeným interiérem a s lepšími jízdními vlastnostmi, než-li tramvaj 100% nízkopodlažní s neotočnými podvozky pod krajními články [20] .

ŘEŠENÍ HNACÍCH NÁPRAV A VHODNÝ ZPŮSOB JEJICH POHONU

Odpověď na otázku: „Je výhodnější použít klasické hnací dvojkolí nebo portálovou nápravu s hnacími volně otočnými koly ? “ není jednoznačná a je závislá i na možnostech řízení trakčních motorů. **Výhodou** klasického **dvojkolí** zůstává zachování **vlivného „sinusového“ pohybu** při jízdě v přímé trati a možnost, že při poruše jednoho trakčního motoru nemusíme, při systému napájení, kdy každý motor má svůj měnič, odpojit druhý trakční motor, tj. druhé hnací dvojkolí v podvozku. **Nevýhodou je** nutnost **použití** vypružených tramvajových kol o $\varnothing$ 560 mm, které by měly být **zatíženy menší kolovou silou** a dále **zvýšení jízdních odporů při jízdě v oblouku** [2].

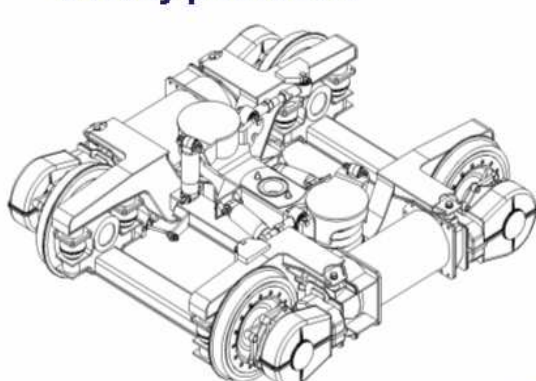
Použití **portálových náprav s volně otočnými koly** umožňuje zvětšit tramvajová kola (na $\varnothing$ 660 mm a více) a **snížit jízdní odpory z průjezdu vozidla obloukem**. Nevýhodou je, že **ztrácíme „ sinusový “ pohyb náprav a systém je výrazněji závislý na rozložení kolových sil** [19]. Použití individuálního pohonu volně otočných kol přináší velké množství trakčních motorů a měničů, složitější způsob jejich řízení a v případě výpadku jednoho trakčního motoru je nutné odpojit i druhý, pohánějící druhé kolo téže nápravy. **Zjednodušení řízení a napájení trakčních motorů přináší skupinový pohon volně otočných kol jedné strany podvozku**, avšak při výpadku jednoho motoru v podvozku je nutné, z důvodu bezpečné jízdy, vypnout i druhý motor, a tím vozidlo ztrácí výkon celého podvozku. I přes tyto „problémy“ se domnívám, že **použití zcela odpruženého skupinového pohonu volně otočných kol je správný vývojový trend**, který může přinést, při správném řízení trakčních motorů (elektrický diferenciál), snížení odporu z průjezdu vozidla obloukem, snížení opotřebení kol a kolejnic, zvýšení bezpečnosti při průjezdu obloukem a „sinusový pohyb“ nápravy při jízdě v přímé trati [2] , [20] , [21], a proto byl aplikován v návrhu trakčních podvozků [17] , [18] - viz obr. 32 .

Neotočný podvozek:



Patent CZ 286660 [17]

Otočný podvozek:



Patent 298520 CZ [18]

Obr. 32

Podvozky pro modulární řadu tramvají

LITERATURA

- [1] KOLÁŘ, J. Studie silových účinků tramvajových vozidel a jejich vliv na opotřebení kol a kolejnic ,[Výzkumná zpráva - SKV-EN-Z2002-01.]. Praha : Siemens - Společnost kolejových vozidel, 2002. 125 s.
- [2] KOLÁŘ, J. Opotřebení tramvajových kol nízkopodlažních tramvají, In: Třetí vědecká konference. Pardubice: Universita Pardubice, 2003, díl 1, s. 115-122. ISBN 80-7194-565-X.
- [3] KOLÁŘ, J. Modulární stavba nízkopodlažních tramvají , [habilitační práce], FS ČVUT, 2006
- [4] KOLÁŘ, J. Koncepce nízkopodlažních tramvají a jejich pohonů, In: NŽT – Nová železniční technika, 2007, ročník 15, číslo 4, s. 21-33. ISSN 1210-3942.
- [5] HONDIUS, Harry. Das Urbos 3–und Lowtrack-Drehgestell-Konzept. *Stadtverkehr*, 1998, roč. 43, č.5, str. 6-14
- [6] KOLÁŘ, J. Výpočet konstrukčního obrysu nízkopodlažních tramvají , In: Sborník ze semináře VZ MSM 212200008 [CD-ROM]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, 2004, díl 1, s. 185-187. ISBN 80-01-03105-5.
- [7] KOLÁŘ, J. Studie koncepčního řešení nízkopodlažních tramvají ČKD. [Technická zpráva]. Praha : ČVUT FS , Ú220.1, 1997. Z 97-08. 65 s.
- [8] HONDIUS, Harry. Systemstrassebahnwagen und ihre Antriebe. *ETR* ,2002, roč.51, č.1/2, str. 41-54
- [9] HONDIUS, Harry. Die Entwicklung Niederflur- und Mittelflur Strassen- und Stadtbahnen in der westlichen Welt. *Stadtverkehr*, 1998, roč. 43, č.10, str. 6-27
- [10] Siemens AG, D-91050 Erlangen, *Combino-Prototyp auf Duewag-Testgleis*,1996,
- [11] HONDIUS, Harry. Die Entwicklung der Niederflur- und Mittelflur Strassen- und Stadtbahnen in der westlichen Welt, Folge 19, Teil 2, *Stadtverkehr*,2006, roč. 51, č.1, str.6-18
- [12] HONDIUS, Harry. Die Bombardier – Cityrunner für die Grazer Verkehrsbetriebe, *Stadtverkehr*, 2001, roč. 45, č.6, str.8-11
- [13] HONDIUS, Harry. Die Entwicklung der Niederflur- und Mittelflur Strassen- und Stadtbahnen in der westlichen Welt, Folge 15, Teil 2, *Stadtverkehr*,2002, roč. 47, č.1, str.6-29
- [14] KOLÁŘ, J. Modulární stavba kolejových vozidel, In: Technik. 2003, roč. 11, č. 1, str. 10-11. ISSN 1210-616X.
- [15] KOLÁŘ, J. - KALIVODA, J.: Analýza možnosti konstrukčního řešení trakčního podvozku pro rozchod 1435 mm netočně uloženého pod skříní nízkopodlažní tramvaje ČKD. [Výzkumná zpráva]. Praha : ČVUT FS, Ú220.1, 1998. Z 98-15. 125 s.
- [16] KALIVODA, J. - KOLÁŘ, J.: Možnosti koncepčního řešení nízkopodlažních tramvají pro provoz v ČR. In: Druhá vědecká konference. Pardubice :Univerzita Pardubice, 1999, s. 29-34. ISBN 80-7194-208-1.
- [17] Siemens Kolejová vozidla s.r.o : Dvouosý trakční podvozek nízkopodlažního kolejového vozidla s podélně uloženými nezávislými pohonnými jednotkami. *Původci* : Kolář, J. - Kalivoda, J. - Míka, T. *Patent Úřad průmyslového vlastnictví*, 286 660 B6., 17.05.2000.
- [18] ČVUT v Praze : Dvounápravový otočný trakční podvozek částečně nízkopodlažního kolejového vozidla, *Původce*: Kolář, J.; Čapek ,J. ,*Užitný vzor – O.Č. 16 360, Česká republika.*,13.3.2006
- [19] KALIVODA,J. Vliv dvojkolí s volnými koly na chování dvounápravových podvozků kolejových vozidle v přímé trati,Disertační práce, ČVUT v Praze, 2006
- [20] ČAPEK, J.; KOLÁŘ, J. Optimal design of low-floor tram, *Proceedings of the Conference “From Horse – drawn Railway to High –speed Transportation System“*, Faculty of Transportation Science CTU, 2007, pp.27-30, ISBN: 978-80-01-03699-0
- [21] ČAPEK, J.; Simulační výpočty jízdních vlastností tramvají, In: Súčasný problémy v kolajových vozidlách - PRORAIL 2007. Žilina : VTS při ŽU, Diel I, s. 111-117. ISBN 8978-80-89276-06-6.
- [22] KOLÁŘ, J.; Použití aktivní mezičlánkové vazby u nízkopodlažní tramvají, In: Súčasný problémy v kolajových vozidlách - PRORAIL 2007. Žilina : VTS při ŽU, Diel I, s.307-314. ISBN 8978- 80-89276-06-6.

ŽIVOTOPIS

Ing. Josef Kolář, CSc.

Narozen: 10. září 1961 v Kutné Hoře.

Stav : ženatý

- manželka: Iva Kolářová – bankovní úřednice ČNB Praha

- děti: Hana Kolářová – žákyně 5.třídy ZŠ Jakutská

Michaela Kolářová – žákyně 4.třídy ZŠ Jakutská

Marie Kolářová – 4.třídy MŠ .

Vzdělání :

1977 - 1979: Odborné učiliště ČSAO Čáslav – vyučen s vyznamenáním v oboru automechanik

1979 - 1982: Střední průmyslová škola strojnická v Rychnově nad Kněžnou – maturita s vyznamenáním

1982 - 1987 Fakulta strojní ČVUT v Praze, obor Dopravní a manipulační technika

zaměření Kolejová vozidla – titul **Ing.**

září 1987 měsíční studijní pobyt na Katedře automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Fakulty strojní ČVUT v Praze - zaměření Kolejová vozidla

1987 – 1988 základní vojenská služba

1988 – 1991 interní aspirant na FS ČVUT, K 221

1992: Obhajoba disertační práce.: Matematické modelování vodících vlastností kolejových vozidel. v oboru Dopravní technika – titul **CSc.** (únor 1993)

Zaměstnání :

1991 - trvá: Odborný asistent na Katedře automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, později Odboru automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Ústavu vozidel a letadlové techniky a v současnosti Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Výuka předmětů v oborovém bakalářském a magisterském studiu Dopravní technika především ve specializaci Kolejová vozidla

- magisterské studium – *Úvod do dopravní techniky, Teorie vozidel, Základy konstrukce kolejových vozidel, Pohony kolejových vozidel, Konstrukce kolejových vozidel, Teorie kolejových vozidel a vedení konstrukčních projektů a diplomových prací.*

- bakalářské studium – *Základy dopravní techniky, Motorové dopravní stroje, vedení konstrukčních projektů a bakalářských diplomových prací.*

1996 - 1997: Výuka na FD ČVUT v Praze – cvičení předmětu *Úvod do dopravní a manipulační techniky a Projekt – vedení projektu a diplomové práce*

2002 - trvá: Tutor studijního oboru Dopravní a manipulační technika

Odborná zkušenost - vedlejší pracovní poměr :

- **samostatný projektant**, listopad 1995 – 31.12.1995 – ČKD Praha Holding, a.s.
- **vedoucí projektant**, 1.1.1996 – 31.12. 1997 - ČKD Praha Holding, a.s.
- **vedoucí projektant**, 1.1.1998 – 31.11.2001 - ČKD Dopravní systémy, a.s.
- **konstruktér – specialista**, 1.2.2002 – dosud – Siemens Kolejová vozidla s.r.o.

Podíl na řešení vědeckovýzkumných projektů:

- Grant GAČR č. 101/94/1841 (1994-98) – nositel grantu Prof. Ing. Jaroslav Šíba, DrSc. *Výzkum vodících vlastností kolejových vozidel* GA 101/05/252
- VZ MSM 212200008 – Prof.Ing.J.Talácko,CSc., sekce č. 6 - vedoucí prof. Ing. V.Vořtová,CSc., řešitel - Projektu č. 4.4 Integrovaný návrh kolejových vozidel pro městskou a příměstskou dopravu

Odborná specializace:

- Projektování kolejových vozidel
- Pevnostní a dynamické výpočty pojezdů kolejových vozidel