

# Využití systémů FRMCS v železniční dopravě, včetně vyhrazených kanálů v pásmech 900 MHz a 1900 MHz

Připraveno pro Ministerstvo  
průmyslu a obchodu

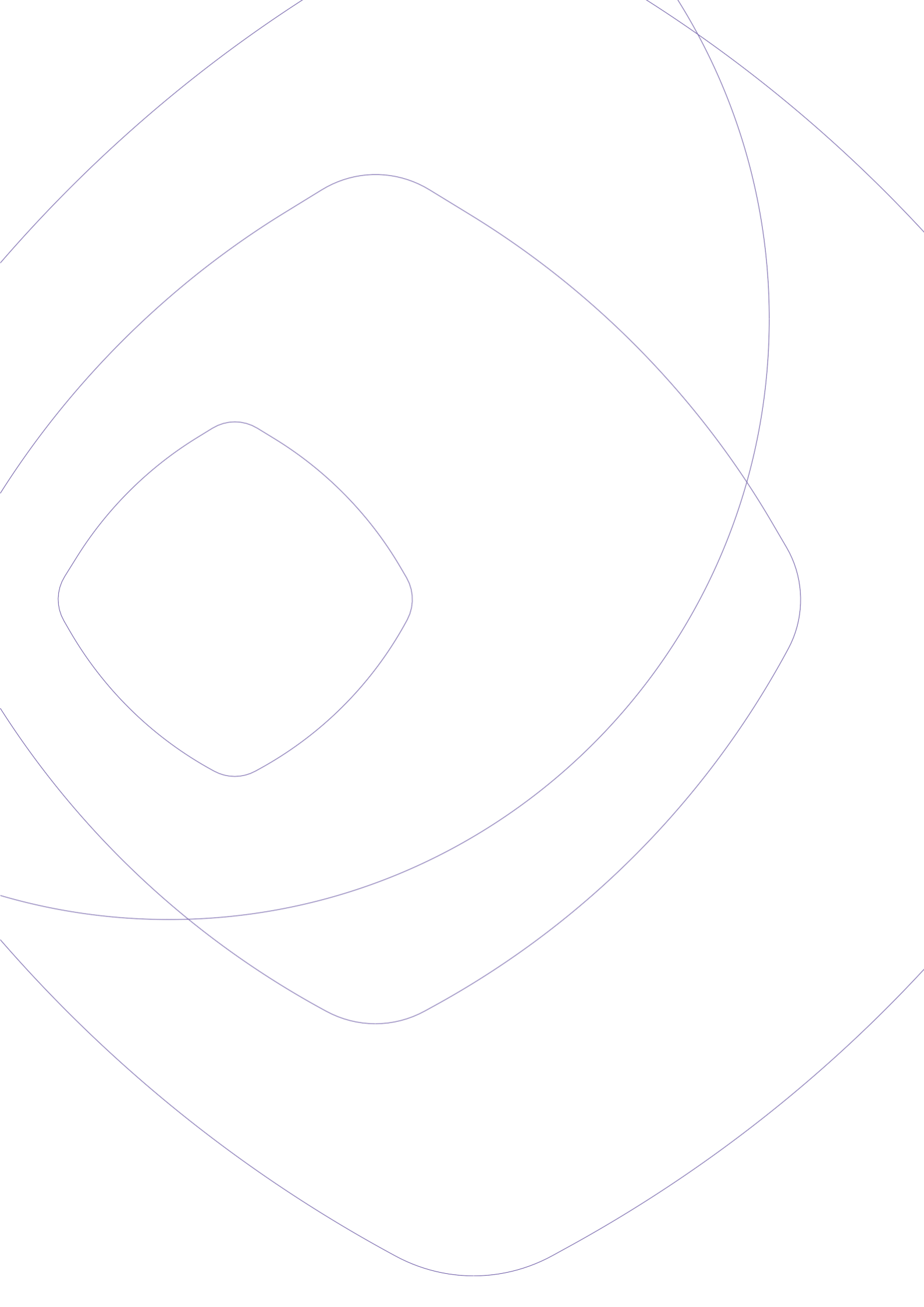
[Listopad 2024]



Národní  
plán  
obnovy

# Historie změn

Verze	Změna	Autor	Datum
A.3	Zadání a soupis podkladů, rozčlenění do kapitol, rozpracované kapitoly k využití 1900MHz a Migračním scénářům	Boček	28/7/2024
B.1	Přepracované kapitoly využití pásem, zárodek kapitoly k vyhodnocení perspektivy aplikací a naplnění kapacitních potřeb	Boček	10/9/2024
B.3	Draft po první kompletaci textu	Boček	2/10/2024
B.5	Obsahově kompletní draft pro recenzi	Boček	14/10/2024
B.6	Verze s komentovaným vypořádáním připomínek	Boček	23/10/2024
C	Zásadní změny scénářů na základě připomínek	Boček	28//10/2024
C.2	Čistopis bez komentářů recenzentů	Boček	28//10/2024



# Obsah

<b>Manažerské shrnutí .....</b>	<b>5</b>
<b>Management summary .....</b>	<b>6</b>
Použité zkratky .....	8
<b>1 Aplikace na podporu železničního provozu .....</b>	<b>12</b>
1.1 Aplikace FRMCS využívané v ČR .....	12
1.2 Návrhy na změny standardů .....	16
<b>2 Pokrytí systémem FRMCS .....</b>	<b>17</b>
2.1 Využití pásma 900MHz .....	17
2.1.1 Podmínky šíření signálu .....	18
2.1.2 Ovlivňování se sousedními pásmy .....	18
2.1.3 Koexistence GSM-R a 5G/FRMCS v pásmu .....	19
2.2 Využití pásma 1900MHz .....	20
2.2.1 Podmínky šíření signálu .....	21
2.2.2 Ovlivňování se sousedními pásmy .....	22
2.3 Možnosti využití pásem MNO .....	22
2.3.1 Schémata sdílení sítí .....	24
2.4 Využití satelitní komunikace .....	25
2.4.1 Non-3GPP varianty .....	25
2.4.2 Satelitní komunikace v rámci 5G .....	26
2.5 Non-3GPP technologie .....	28
2.6 Plnění komunikačních nároků .....	29
<b>3 Možné migrační scénáře .....</b>	<b>32</b>
3.1 Teoretické scénáře .....	33
3.2 Migrační plány konkrétních subjektů .....	35
3.3 Motivace zúčastněných subjektů .....	36
3.4 Konkretizovaný postup migrace v ČR .....	38
3.5 Načasování přechodu od GSM-R .....	41
3.5.1 Výsledky modelů .....	43
<b>4 Legislativní a organizační podmínky .....</b>	<b>46</b>
<b>5 Prameny .....</b>	<b>47</b>

# Manažerské shrnutí

Předkládaná studie se zabývá konkrétnějšími podmínkami implementace systému FRMCS na území ČR, zejména na síti majoritního správce železniční infrastruktury Správa železnic s.o., a to s ohledem na již existující strategické plány rozvoje železniční dopravy v ČR, technické a ekonomické podmínky výstavby systému GSM-R. Do studie byly kromě písemných a internetových pramenů, citovaných souborně v kap.5, **zpracovány názory členů pracovní skupiny, sestavené ze zástupců zpracovatele, nákladních a osobních dopravců sdružených v ŽESNAD a SVOD Bohemia, Správy železnic s.o., Ministerstva dopravy, Ministerstva průmyslu a obchodu a delegátů ČR v mezinárodních organizacích ERJU a UNIFE.**

Za reprezentativní stávajících i budoucích provozovaných aplikací pro podporu železničního provozu byl převzat **seznam aplikací definovaných v uživatelských požadavcích na systém FRMCS (FRMCS URS)**, zpracovaných UIC a tvořících základ standardizace FRMCS. Uživatelské požadavky zároveň klasifikují tyto aplikace z hlediska kritičnosti. Pro účel studie byl vypracován vlastní **překlad relevantních částí FRMCS URS**, zohledňující zavedenou českou železniční terminologii a věcná specifika českého železničního provozu, jak byla na pracovní skupině prezentována zástupci MD a sdružení SVOD/ŽESNAD. Vlastní překlad spolu s aktualizovaným slovníkem příslušných pojmů a definic je součástí příloh předkládané studie. Příloha bude předložena Překladačskému servisu EK v Lucemburku, kde bude sloužit **k zpřesnění překladu předpisů EK se železniční tematikou do národní jazykové verze.** Podrobnosti k tomuto výstupu jsou shrnuty v kap.1.2 předkládané studie. Na základě seznamu aplikací byl vypracován dotazník, mapující jejich perspektivu a význam pro železniční odvětví v ČR. Použitá metodika dotazníku je převzata ze starší studie vypracované pro ERA v roce 2016, takže jeho výstupy dovolí porovnat pohled zástupců české železnice s evropským kontextem. Vyhodnocení významu aplikací na základě dotazníku je věnována kap.1.1 předkládané studie.

Možnému cílovému pokrytí železniční sítě systémem FRMCS je věnována kap.2. V každé podkapitole, věnované jednotlivým pásmům RMR, pásmům MNO (kap.2.3) a dalším variantám radiového přístupu (kap.2.4) jsou shrnuty technické podmínky jeho využití, základní charakteristiky šíření signálu a vztahy s dalšími pásmy s ohledem na možné vzájemné ovlivnění. Specificky pro pásmo 900MHz (kap.2.1) je diskutována koexistence s GSM-R (kap.2.1.3), v rámci kap.2.2 k pásmu 1900MHz jsou diskutována specifika využití pásem s TDD, omezení a přínosy jeho případného využití. Hlavním závěrem rozboru je, že **zahuštění sítě základnových stanic (gNB) systému FRMCS pro nasazení pásma 1900MHz nutné je, ale nebude z dosahovat běžně uvažovaných 100 %** a s ohledem na dlouhodobější perspektivu využití FRMCS by využití tohoto pásma nemělo být z plánovaných postupů vyloučeno.

Požadavky na komunikace, konkrétně propustnost radiové přístupové sítě, byly převzaty z pracovních dokumentů a technických zpráv UIC a ERA a porovnány s výsledky simulací NR RAN, reportovanými v technické zprávě ETSI TR 103 554-2 [3]. Výsledky tohoto porovnání, prezentované v kap.2.6 předkládané studie ukazují, že **pro komunikační podporu celého souboru kritických aplikací nebude stačit samostatně z žádného z pásem RMR** a bude nutné systém FRMCS postupně dobudovat do překryvu obou pásem, resp. s přesunem části komunikace do pásem provozovaných MNO. Tento cílový stav bude výhodné zohlednit pro optimalizaci nákladů a logistiky počátečních migračních kroků.

Další část předkládané studie je věnována **hodnocení uvažovaných migračních scénářů.** Hodnocení postupuje od teoretických scénářů, převzatých ze starší studie vypracované pro ERA v roce 2016 k subvariantám reflektujícím nalezená specifika aktuální situace v ČR. Jednotlivé varianty postihují pořadí migrace infrastruktury a výbavy vozidel, přechod o pásem mimo 900 MHz a vliv nekompatibilit uvnitř FRMCS nebo ve vazbě na ETCS vyhodnocované pro jednu síť (kap.**Error! Reference source not found.**) a pořadí migrace vůči sousední větší železniční síti s ohledem na podmínky přeshraničního provozu (kap.3.5). Hodnocení scénářů zahrnuje i porovnání jejich nákladů pomocí modelu převzatého starší studie vypracované pro ERA a upraveného na konkrétní podmínky v české železniční síti 20. let. Hlavním závěrem porovnání je, že **scénář s duálními terminály FRMCS/GSM-R**, instalovanými na vozidlech, je sice investičně příznivější k dopravcům, a odolnější k vnějším vlivům, jako jsou věcné rozdíly a časové posuny migrace v sousedních železničních sítích, ale je **nepřůchozí díky chybějícím časovým rezervám** pro pilotování a schvalování palubní výbavy. Součástí hodnocení scénářů je v kap.3.3 **diskuse motivací jednotlivých účastníků** na základě jejich odpovědí na dotazník a porovnání těchto výsledků s průzkumem starší studie vypracované pro ERA mezi západoevropskými železničními správami a dopravci.

Z hodnocení variant a obsahu diskuse v pracovní skupině pro přípravu studie mimo jiné vyplývají **náměty ke změně legislativního rámce**, týkající se především **stabilizace prostředí technických předpisů, certifikace vozidel a podmínek veřejné finanční podpory migrace**, které jsou shrnuté v kap.4. Cílem těchto navrhovaných opatření je předejít negativním dopadům předešlých migračních kampaní – konkrétně zavedení výhradního provozu ETCS, které měly významné dopady do rentability migrace na straně dopravců a jsou jednou z příčin minimální motivace subjektů českého železničního odvětví k přechodu na FRMCS.

# Management summary

The study presented deals with more specific conditions for the implementation of the FRMCS system in the Czech Republic, especially on the network of the majority infrastructure manager Správa železnic s.o., with regard to the already existing strategic plans for the development of railway transport in the Czech Republic, as well as the technical and economic conditions for the construction of the GSM-R system. In addition to written and internet sources, cited in chapter 6, the **opinions of members of the working group, composed of representatives of the author, freight and passenger carriers associated in ŽESNAD and SVOD Bohemia, Správa železnic s.o., the Ministry of Transport, the Ministry of Industry and Trade and delegates of the Czech Republic in the international organizations ERJU and UNIFE have been incorporated.**

**The list of applications defined in the user requirements for the FRMCS system (FRMCS URS)**, processed by the UIC and forming the basis of the FRMCS standardization was taken as representative of the existing and future operated applications for the support of railway operations. At the same time, user requirements classify these applications in terms of criticality. For the purpose of the study, an **own translation of the relevant parts of the FRMCS URS** was prepared, taking into account the established Czech railway terminology and the factual specifics of the Czech railway operation, as presented at the working group by the representatives of the MD and the SVOD/ŽESNAD associations. The actual translation, together with an updated dictionary of relevant terms and definitions, is part of the appendices of the presented study. The attachment will be submitted to the EC Translation Service in Luxembourg, where **it will be used to refine the translation of the EC regulations on railways into the national language version.** The details of this output are summarized in chapter 1.2 of the presented study. Based on the list of applications, a questionnaire was drawn up, mapping their perspective and importance for the railway industry in CR. The methodology used in the questionnaire is taken from an older study prepared for ERA in 2016, so its outputs will allow us to compare the view of Czech railway representatives with the European context. Chapter 1.1 of the presented study is dedicated to evaluating the importance of applications based on the questionnaire.

Chapter 3 is devoted to the possible target coverage of the railway network by the FRMCS system. In each subsection, dedicated to individual RMR bands, MNO bands (Ch. 2.3) and other variants of radio access (Ch. 2.4), the technical conditions of its use, basic characteristics of signal propagation and relationships with other bands with regard to possible mutual influence are summarized. Specifically for the 900MHz band (chapter 2.1), coexistence with GSM-R (chapter 2.1.3) is discussed, within the framework of chapter 2.2 dedicated to the 1900MHz band, the specifics of the use of bands with TDD, limitations and benefits of its possible use are discussed. The main conclusion of the analysis is that the **densification of the network of base stations (gNB) of the FRMCS system for the deployment of the 1900MHz band** is necessary, but **it will not reach the commonly considered 100%**, and with regard to the longer-term perspective of the FRMCS, the use of this band should not be excluded from the planned procedures.

The communication requirements, specifically the throughput of the radio access network, were taken from the UIC and ERA working papers and technical reports and compared with the results of the NR RAN simulations, reported in the ETSI technical report TR 103 554-2 [3]. The results of this comparison, presented in chapter 2.6 of the presented study, show that for the communication support of the entire set of critical applications, any of the RMR bands alone will not be enough, and it will be necessary to gradually build the FRMCS system into an overlap of both bands, or with the transfer of part of the communication to the bands operated by the MNO. This target state will be beneficial to take into account to optimize the costs and logistics of the initial migration steps.

The next part of the present study is devoted to the **evaluation of the migration scenarios considered.** The evaluation proceeds from theoretical scenarios taken from an earlier study prepared for ERA in 2016 to sub-variants reflecting the specifics of the current situation in the Czech Republic. The individual scenarios cover the order of migration of infrastructure and vehicle equipment, the transition to bands outside of 900 MHz and the effect of incompatibilities within FRMCS or in connection with ETCS evaluated for a single network (chapter 3.4) and the order of migration in relation to the neighbouring larger railway network with regard to the conditions of cross-border traffic (chapter 3.5). The evaluation of the scenarios also includes a comparison of their costs using a model taken from an older study prepared for ERA and adapted to the current conditions in the Czech railway network in the 2020s. The main conclusion of the comparison is that **the scenario with dual FRMCS/GSM-R terminals**, installed on vehicles, is more investment-friendly for carriers and more resistant to external influences, such as material differences and migration time shifts in neighboring railway networks, but it is **impenetrable due to the lack of time reserves** for piloting and approval of on-board equipment. The evaluation of the scenarios includes a **discussion of the motivations of individual participants** based on their responses to the questionnaire in ch.4.3 and a comparison of these results with a survey of Western European railway administrations and carriers carried out for ERA in an earlier study.

The evaluation of the options and the content of the discussion in the working group for the preparation of the study lead, among other things, to **proposals for changes in the legislative framework**, mainly concerning the **stabilisation of the environment of technical regulations, vehicle certification and the conditions of public financial support for migration**, which are

summarised in Chapter 4. The aim of these proposed measures is to prevent the negative impacts of previous migration campaigns - specifically the introduction of exclusive operation of ETCS, which had significant impacts on the profitability of migration on the side of railway undertakings and are one of the reasons for the minimal motivation of the Czech railway sector subjects to switch to FRMCS.

## Použité zkratky

3GPP	<i>Third Generation Project Partnership</i> - sdružení subjektů vytvořené pro standardizaci 3. generace mobilní komunikace pokračující v činnosti i pro generace další
4G LTE	<i>Fourth Generation Long Term Evolution</i> - termín pro 4. generaci technologií mobilní komunikace
5G NR	<i>Fifth Generation New Radio</i> - označení pro přístupové radiové technologie 5. generace
5GC	<i>Fifth Generation Core</i> - souborné označení pro technické prostředky tvořící jádro sítě mobilní komunikace 5 generace
5GS	<i>Fifth Generation System</i> - souborné označení pro síť a technické prostředky mobilní komunikace 5 generace
5QI	<i>5G Quality Indicator</i> - prvek řídicího protokolu mobilního přístupu signalizující požadovanou třídu kvality přenosu
ACLR	<i>Adjacent Channel Leakage power Ratio</i> - parazitní vyzařování do sousedního kanálu
AP	<i>Access Point</i> - přístupový bod komunikační služby zde konkrétně prvek sítě WLAN komunikující s koncovými terminály
ATO	<i>Automatic Train Operation</i> - obecné označení pro technický systém pro automatické řízení jízdy vlaku
ATP	<i>Automatic Train Protection</i> - obecný termín pro aplikace zabezpečení jízdy vlaku
BL	<i>Baseline</i> - označení pro stabilní jádro funkcí výkonu a dalších charakteristik podsystémů ERTMS
BS	bázová stanice systému mobilních komunikací
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> - investiční náklady
CBA	<i>Cost-Benefit Analysis</i> - metodika vyhodnocení projektu
CCTV	<i>Closed Circuit Television</i> - označení televizního / video systému uzavřeného pro konkrétní soukromé využití obvykle pro bezpečnostní dohled
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i> - evropské sdružení poštovních a telekomunikačních správ, zajišťující obchodní, provozní a legislativní spolupráci a technickou standardizaci
CU	<i>Control Unit</i> - blok architektury 5G NR, realizující vzdáleně logickou vrstvu a řízení gNB pro lokálně nebo vzdáleně pracující DU
DCS	<i>Dynamic Channel Selection</i> - mechanismus výběru pracovní frekvence u systémů DECT
DL	<i>downlink</i> - směr od sítě k mobilnímu terminálu
DMR	<i>Digital Mobileland Radio</i> - označení úzkopásmového digitálního systému radiové komunikace podle standardu ETSI řady TS 102 361
DU	<i>Distributed Unit</i> - blok architektury 5G NR, realizující vzdáleně fyzickou vrstvu přenosu pro gNB
ECC	<i>Electronic Communications Committee</i> - sdružení zemí pod CEPT, zajišťující tvorbu politik a pravidel elektronických komunikací pro evropský prostor
EDOR	<i>ETCS Data Only Radio</i> - datový modem systému GSM-R sloužící pro komunikaci ETCS (obecně ATP)
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i> - vysílaný výkon radiového interface rozprostřený do všech směrů
EK	Evropská komise
eMBB	<i>Enhanced Mobile BroadBand</i> - označení pro služby sítě 4G/5G, optimalizované pro vysoké přenosové kapacity
EP	Evropský parlament
ERA	<i>European Union Agency for Railways</i> - agentura založená EU pro rozvoj a unifikaci evropské železnice, vykonává mj. funkci celoevropské instituce pro schvalování součástí dráhy
ERC	<i>European Research Council</i> - evropská organizace pro financování výzkumu

ERJU	<i>Europe's Rail Joint Undertaking</i> - společný podnik EU a soukromých firem, pověřený podporou výzkumu a vývoje inovativních řešení pro evropskou železnici, nástupce společného podniku Shift2Rail
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i> - komplex systémů pro řízení a zabezpečení jízdy vlaku, kritickou hlasovou komunikaci a radiové komunikační prostředí pro ně
ETCS	<i>European Train Control System</i> – jednotný evropskými normami definovaný Evropský systém řízení železniční dopravy zahrnující kritické služby hlasové a datové pro zabezpečení a řízení jízdy vlaku
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> - evropská nezisková organizace zajišťující tvorbu a správu telekomunikačních a radiokomunikačních standardů
EUSPA	<i>EU Space Programme Agency</i> - agentura EU pro rozvoj, provoz a podporu aplikací družicových technologií
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> - sob rozdělí směru přenosu frekvenčním multiplexem v pásmech s dostatečným odstupem
FR	Francie (mezinárodní zkratka podle ISO3166-1)
FR1/FR2	<i>Frequency Range 1 / 2</i> - rozsahy frekvencí využívaných pro železniční komunikace se zásadně rozdílnými vlastnostmi
FRMCS	<i>Future Railway Mobile Communication System</i> – nástupnický systém GSM-R v systému ERTMS, založený na 5. generaci mobilních sítí
FUP	<i>Fair User Policy</i> – mechanismus pro rozdělení omezené kapacity sítě mezi uživatele, typicky omezením jejich rychlosti po vyčerpání kvóty objemu dat
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i> - systém družic obíhající na geostacionární oběžné dráze
gNB	<i>Generalized Node B</i> - uzel v RAN 5G, který zajišťuje propojení mezi MT a jádrem sítě analog základnové stanice (BS) ve starších standardech
GNSS	<i>Global Navigation System on Satellites</i> - obecné označení pro systém družicové navigace abstrahující od jejího poskytovatele a detailních parametrů
GoA	<i>Grade of Automation</i> - stupeň automatizace u systému automatického řízení vlaku
GPS	<i>Global Positioning System</i> - konkrétní systém družicové navigace, provozovaný ministerstvem obrany USA
GS	<i>Ground Station</i> - součást družicového systému, zajišťující centrálně komunikace s pozemními součástmi systému a dalšími sítěmi
GSM-R	<i>Global Mobile Radio - Railway</i> - systém mobilní komunikace 2 generace modifikovaný pro využití v železniční dopravě
HAPS	<i>High-Altitude Platform Station</i> - prvek komunikačního systému umístěný na leteckém prostředku kromě družic
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Query</i> - mechanismus opravy blokových chyb přenosu, používající současně vyžádané opakování bloků se samoopravnými (dopřednými) kódy
HD	<i>High Density</i> - vysoká hustota, zde rozkladu televizního obrazu (1920 x 1024 bodů)
HV	hnací vozidlo
HW	<i>hardware</i> - technické prostředky infokomunikačního systému
ID	identifikátor
IM	<i>Infrastructure Manager</i> , správce železniční infrastruktury - obecné označení role subjektu v železničním odvětví
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i> - aplikační vrstva nad mobilním transportem zajišťující jednotně multimediální služby standardizovaná 3GPP
IoT	<i>Internet of Things</i> - termín pro komunikaci automatů po mobilní síti, odlišující se od komunikace lidských uživatelů
ISD	<i>Inter-Site Distance</i> - vzdálenost transceiverů sousedních buněk radiového komunikačního systému
ISL	<i>Inter-Satellite Link</i> - typ spoje využívající komunikaci mezi s družicemi na přímou viditelnost
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunication sector</i> - mezinárodní standardizační instituce, část se zodpovědností za radiokomunikace

LAN	<i>Local Area Network</i> - označení pro síť poskytující datové služby v lokálním měřítku specificky s řídicí i datovou rovinou podle standardů Ethernet
LEO	<i>Low Earth Orbit</i> - systém družic obíhajících na nízké oběžné dráze
LoS	<i>Line of Sight</i> - radiová komunikace na přímou viditelnost
MAC	<i>Medium Access Control</i> - proces přístupu ke sdílenému fyzickému nosiči komunikace zde specificky na rádiovém interface mobilních sítí
MCX	<i>Mission Critical Anything</i> - souborný název pro kritické služby poskytované sítí na bázi standardů 3GPP
MD	Ministerstvo dopravy ČR
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i> - systém družic obíhajících na střední oběžné dráze
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> - označení technologií prostorového dělení radiového přenosu
mMTC	<i>Massive Machine Type Communication</i> - označení pro služby sítí 4G/5G, optimalizované pro komunikaci vysokého počtu strojových uživatelů
MNO	<i>Mobile Network Operator</i> - provozovatel sítě mobilních komunikací zde specificky sítě poskytující veřejné služby
MOCN	<i>Multiple Operator Core Network</i> - architektura sdílené mobilní sítě se společným
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR
MT	mobilní terminál - účastnické zařízení radiového mobilního přístupu, v anglických textech pod zkratkou UE
NB-IoT	<i>Narrow Band IoT</i> - IoT provozovaný na úzkopásmovém rádiovém přenosu
NLoS	<i>Non-Line of Sight</i> - radiová komunikace na nepřímou viditelnost (odraženým paprskem)
NPV	<i>Net Present Value</i> - souborný ukazatel ekonomické hodnoty za delší období, ve studii pro označení pasiv používán bez záporného znaménka
NTN	<i>Non-Terrestrial Networks</i> - souborné označení po sítě jejichž BS / AP nejsou na zemském povrchu
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> - metoda modulace digitálních signálů na skupinu úzkopásmových nosných
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> - provozní náklady
P25	označení úzkopásmového digitálního systému radiové komunikace podle standardu APCO-25
PDCCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> - řídicí protokol pro datové toky přes radiový interface mobilní sítě
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i> - pozemní část sítě mobilních komunikací, poskytující veřejnou službu
PPDR	<i>Public Protection and Disaster Relief</i> - souborné označení pro složky řešení krizových situací
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> - označení pro modulaci s větším množstvím fázově-amplitudových stavů
QoS	<i>Quality of Service</i> – soubor ukazatelů pro vyjádření kvality přenosu
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> - typ modulace digitálního signálu na analogový nosič se 4 stavy
RAN	<i>Radio Access Network</i> - radiová přístupová síť
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> - speciální komunikace pro radiovou identifikaci s minimálními prostředky
RLC	<i>Radio Link Control</i> - řízení radiového spoje mobilní sítě na MT ve fyzické vrstvě,
RMR	<i>Railway Mobile Radio</i> - společné označení pro kmitočtová pásma vyhrazená doporučením ECC pro železniční využití v Evropě
RRB	<i>Radio Resource Block</i> - logická jednotka organizace signálů na rádiovém interface mobilní sítě
RRH	<i>Remote Radio Head</i> - blok architektury mobilní sítě, realizující vzdáleně fyzickou vrstvu přenosu pro BS

SIM	<i>Subscriber Identity Module</i> - elektronický prostředek ukládající zabezpečeným způsobem identifikační údaje uživatele mobilní komunikační služby
SINR	<i>Signal to Interference and Noise Ratio</i> - odstup signálu od šumu a interferujících signálů
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> - odstup signálu od šumu
SPOŽES	Sborník pro oceňování železničních staveb - metodika pro oceňování ve stupni studie proveditelnosti vypracovaná SFDI
SRCC	<i>Smart Rail Connectivity Campus</i> - centrum pro výzkum vývoj a testování inovací pro železniční odvětví, sídlící v saském Annaberg-Buchholz
SRS	<i>System Requirement Specifications</i> - dokument UIC popisující využití funkce FRMCS, součást příloh TSI CCS
SS-RSRP	<i>Secondary Synchronization Reference Signal Receive Power</i> - ukazatel síly přijímaného signálu před demodulací a dekódováním, měřený na synchronizační složce radiového signálu v sítích 4G/5G
SVOD	Svaz osobních železničních dopravců z.s.
SW	<i>software</i> - programové prostředky infokomunikačního systému
TC RT	<i>Technical Committee Rail Telecommunications</i> – komise ETSI odpovědná za železniční telekomunikace
TCMS	<i>Train Control and Management System</i> - systém pro řízení a správu technologií ve vlaku (míněno technologií pomocných, u trakce jen způsobem neovlivňujícím jeho jízdu)
TDD	<i>Time Division Duplex</i> - způsob rozdělení směru přenosu časovým multiplexem ve stejném pásmu frekvencí
TETRA	označení úzkopásmového digitálního systému radiové komunikace krizových složek podle standardu ETSI řady EN 300 392
TSI CCS	<i>Technical Specifications for Interoperability relating to the Control-Command and Signalling subsystems of the rail system in the European Union</i> - obecné označení pro Nařízení EK, stanovující pravidla pro interoperabilitu subsystémů pro řízení a zabezpečení železničního systému v Evropské unii
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i> – bezpilotní letoun
UIC	<i>Union Internationale des Chemins de fer</i> , Mezinárodní železniční unie – organizace sdružující státy pro koordinaci rozvoje a fungování železniční dopravy
UL	i - směr od mobilního terminálu do sítě
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> - obecné označení pro technologie mobilní sítě 3. generace
UNIFE	<i>Union des Industries Ferroviaires Européennes</i> - zájmové sdružení reprezentantů evropského železničního průmyslu
URS	<i>User Requirements Specification</i> - dokument UIC [35] popisující využití komunikací FRMCS z uživatelského pohledu
VLEO	<i>Very Low Earth Orbit</i> - systém družic obíhajících na velmi nízké oběžné dráze
VRT	vysokorychlostní trať
WG	<i>Workgroup</i> - pracovní skupina
WiFi	souborné označení konkrétních technologií a řady standardů WLAN, původně obchodní značka pro standard implementující výrobky
WLAN	<i>Wireless LAN</i> - LAN pracující přes radiový interface
ŽESNAD	Sdružení železničních nákladních dopravců České republiky, z.s.

# 1 Aplikace na podporu železničního provozu

## 1.1 Aplikace FRMCS využívané v ČR

Veřejně diskutované strategické plány rozvoje železniční dopravy v ČR v tuto chvíli konkrétnější strategii ohledně nasazení FRMCS – nástupce systému GSM-R jako komunikační složky ERTMS, ani jeho vztahu k aplikacím neobsahuje stávající Strategický dokument Národní implementační plán ERTMS [26] ani v poslední verzi z roku 2024

- Ve formální kapitole k FRMCS pouze konstatuje že jeho nasazení nelze zodpovědně plánovat, protože nejsou ukončeny jeho technické specifikace a na trhu nejsou dostupné odpovídající produkty;
- aplikacemi na podporu železničního provozu, s výjimkou ETCS – aplikace pro zabezpečení jízdy vlaku, se nezabývá. Navíc pojem aplikace ve standardech FRMCS je používán jinak než v obvyklé ICT praxi, spíše ve smyslu „komunikační úloha sloužící aplikacím“. Samy aplikace jsou tímto mechanismem spíše tříděny do skupin podle svého účelu s předpokladem, že jednotlivé jejich implementace budou mít z principu podobné komunikační nároky.

Názor na takto pojatý soubor aplikací a jeho část, která bude podporována během přechodné etapy (migrace) z GSM-R na FRMCS se postupem tvorby standardů FRMCS měnil. Tabulka 1 zachycuje různé pohledy na důležitost kritických aplikací komunikace, jednotlivé sloupce ukazují zdroj hodnocení:

- **Aplikace podle UIC URS** je reference na definici aplikací v příloze 1 této studie
- **Podpora v GSM-R** reprezentuje základní soubor aplikací podporovaných v aktuálním systému EIRENE ERTMS (GSM-R plus ETCS, nově ATO do GoA2). Podpora všech těchto aplikací je základní podmínkou migrace. Podpora ATO je přitom vázána na paketovou službu (PS) GSM-R, která v některých zemích dosud není provozována.
- **Report 74** reprezentuje pohled z r.2020 a udává fázi, ve které [5] započítává potřebnou kapacitu do požadavků na FRMCS (Migr je migrační fáze s paralelní podporou FRMCS i GSM-R, Cíl je cílový stav po odstavení GSM-R, který se odvolává na ještě starší dokument UIC z roku 2018). Do souboru určeného již pro období migrace přidává z tehdejšího pohledu provozně perspektivní aplikace Nouzového volání do veřejné sítě, dálkového řízení HV, kritického videa a podpůrné aplikace lokalizace vlaku, nutné pro funkci zejména hlasových aplikací. Do souboru patřila i Inteligence a sensorika na vozidle – skupina aplikací, která se postupem vývoje rozpadla na menší celky a z definic UIC se prakticky vytratila.
- **Plánování FRMCS** plány podpory jednotlivých aplikací v rámci standardů FRMCS V2 a V3 podle vybraných plánovacích dokumentů (konkrétně [27] a poslední zatím sestavený plán, který je součástí kap.9.2 draftové verze [28] V1.1). Vznikly po vydání TSI CCS 2023, reprezentujícího specifikaci FRMCS V1, určenou k jeho legalizaci v pokusném nasazení. V2 reprezentuje aplikace tvořící základ interoperability a je proto určena pro provozní testování v rámci programu MORANE 2, Spolu aplikacemi zařazenými do V3 tvoří soubor určený pro standard TSI CCS 2027 (FRMCS Baseline 1), která bude dostatečně kompletní, aby umožnila výrobu, nákup a instalaci komponent FRMCS na vozidlech i infrastruktuře, což je podmínkou provedení migrace. Cca třetina aplikací zatím nemá v rámci FRMCS definované ani funkční požadavky a bude předmětem standardizace až ve V4 a vyšších. Jejich zavedení může vyžadovat dodatečný upgrade výbavy FRMCS instalované během migrace.
- **Průzkum v ČR** reprezentuje názory sebrané v anketě předložené účastníkům pracovní skupiny přípravy této studie – dvěma nákladním dopravcům různé velikosti, menšímu osobnímu dopravci a SŽ jako reprezentantu správce infrastruktury. Zájem o aplikace je hodnocen podobně jako motivace respondentů v kap. Ve škále od 0 (irelevantní) do 5 (klíčová pro provoz). U dopravců je uveden průměr hodnocení, v závorce jsou hodnoty, které nemají kvůli velkému rozptylu hodnocení vypovídací schopnost. Rozdíly jsou pak v detailu komentovány v dalším textu.

Tabulka 1 – Komunikace pro kritické aplikace ve struktuře UIC URS

Aplikace podle UIC URS		Podpora v GSM-R	Report 74	Plánování FRMCS	Průzkum dopravci	IM
5.1	Odchozí hlasová komunikace ve vlaku od strojvedoucího směrem k výpravčímu příslušnému vlaku	ano	Migr	V2-V3	5,0	5
5.2	Příchozí hlasová komunikace ve vlaku od výpravčího směrem ke strojvedoucímu	ano	Migr	V2-V3	5,0	5
5.3	Hlasová komunikace mezi strojvedoucími různých vlaků, případně pozemními uživateli	ano	Migr	V2-V3	5,0	5
5.4	Hlasová komunikace při postrku	ano	Migr	V2-V3	5,0	5
5.5	Hlasová komunikace traťové údržby				(2,3)	4
5.6	Hlasová komunikace pro posun	ano	Cíl	(V2) V3	5,0	5
5.7	Veřejné tísňové volání		Migr	nedefinována	5,0	4
5.8	Hlasová komunikace pozemního personálu			--	3,7	5
5.9	Komunikace pro automatické zabezpečení vlaku (ATP) (ETCS)	ano	Migr	V2	5,0	5
5.10	Komunikace Automatického vedení vlaku (ATO)	PS	Migr/Cíl	V2-V3	4,3	5
5.11	Datová komunikace pro řízení výlukových prací			nedefinována	(2,3)	3
5.12	Komunikace výstražného systému traťové údržby			nedefinována	(3,3)	5
5.13	Komunikace dálkového ovládní lokomotiv		Migr	nedefinována V2-V3	5,0	2
5.14	Monitorování a řízení důležité infrastruktury			--	(2,7)	4
5.15	Železniční tísňová komunikace	ano	Migr	V2	5,0	5
5.16	Komunikace mezi bezpečnostním zařízením ve vlaku a pozemním systémem		Cíl	V3	5,0	0
5.17	Veřejná nouzová komunikace s vlakem			nedefinována	3,0	1
5.18	Osamělý pracovník			nedefinována	(2,7)	4
5.19	Hlasový záznam a přístup k zaznamenaným datům			--	5,0	5
5.20	Záznam dat a přístup k záznamům			--	5,0	4
5.21	Datová komunikace pro posun			--	4,0	0
5.22	Datová komunikace monitorování integrity vlaku		Cíl	V3	4,3	0
5.23	Veřejné nouzové varování		Migr	V2-V3	4,3	4
5.24	Odchozí hlasová komunikace vlakového personálu směrem k pozemnímu uživateli			nedefinována	(2,7)	0
5.25	Příchozí hlasová komunikace od pozemního uživatele směrem k vlakovému personálu			nedefinována	(2,7)	0

Aplikace podle UIC URS		Podpora v GSM-R	Report 74	Plánování FRMCS	Průzkum dopravci	
						IM
5.26	Nouzová komunikace železničního personálu			nedefinována	5,0	5
5.27	Kritické živé video		Migr	V2-V3	(3,7)	0
5.28	Systém včasného varování – související s bezpečností		Cíl	V2-V3	4,7	5
5.29	Datová komunikace virtuálního svěšování		Cíl	V3	3,3	0
5.30	Zabezpečení odstavených souprav			nedefinována	4,7	0

U již provozovaných aplikací – hlasových, nouzové komunikace a zabezpečení jízdy vlaku, a také u pořizování záznamu dat a přístupu k němu (5.27) panuje shoda mezi všemi účastníky na vysoké důležitosti takové aplikace. V dalších případech se z různých příčin hodnocení rozcházejí, nicméně každá aplikace má pro některého z účastníků alespoň střední význam:

- Sedm aplikací je **relevantních pouze pro dopravce**, u kterých má vysoké hodnocení, zatímco IM je označil jako pro něj irelevantní (0).
- U pěti aplikací – Monitorování a řízení důležité infrastruktury (5.14), Hlasové komunikace pozemního personálu (5.8), Osamělého pracovníka (5.18), Hlasové komunikace traťové údržby (5.5) a Komunikace výstražného systému traťové údržby (5.12) je situace opačná – jsou **málo relevantní pro dopravce**, ale vysoce hodnocené u IM. U posledních tří, **souvisejících s traťovou údržbou**, je navíc velký rozptyl mezi pohledy dopravců. Na jedné straně obecně uznávají její důležitost pro bezpečnost personálu, na druhé straně se obávají zatažení strojvedoucího do odpovědnosti za tuto bezpečnost a signalizují, že taková komunikace není věcí dopravce.
- Velké rozdíly vykazují i pohledy dopravců na **Datovou komunikaci pro řízení výlukových prací** (5.11) a **Hlasovou komunikaci mezi vlakovým personálem a pozemními uživateli** (5.24 a 5.25). Využití takové komunikace u dopravců je řídké (např. jen pro pracovní vlaky), resp. žádné (nákladní doprava bez vlakového personálu), obecně je však stejně jako v předchozím případě uznávána její užitečnost pro jiné železniční služby (hodnocení 3-4). IM vyjadřuje zájem pouze o první z nich.
- Podobný pohled je i na **Kritické video** (5.27), které je stejně největším očekávaným konzumentem přenosové kapacity, nedostupné ve frekvenčních pásmech pod 2GHz (viz kap. 2.6). Názor na obecnou užitečnost tak u dopravců doplňuje nezdůvodnitelnost nákladů na komunikaci i IT infrastrukturu, IM nevidí využití žádné.

Podobně jako předchozí shrnuje tabulka 2 pohled na důležitost nekritických aplikací, klasifikovaných standardy FRMCS jako **výkonnostní** (performance). Tyto aplikace jsou určeny pro služební potřebu a jejich cílem je zvýšit efektivitu železničního provozu. Aplikace jsou ve standardech FRMCS většinou klasifikovány i jako **neinteroperabilní**, a to v tom smyslu, že jsou využívány provozovatelem (případně vlastníkem nebo výrobcem) vozidla pro interní účely, nejsou přístupné dalším subjektům, a tedy interoperabilní v technickém smyslu **být nemusí**. Komunikační schéma takových aplikací je jiné, než aplikací interoperabilních – vozidlo se ze všech FRMCS domén připojuje k doméně domovské (zemí registrace nebo sídla využívajícího subjektu).

Podporu v GSM-R nemá z těchto aplikací žádná, jsou provozovány za komerčních podmínek na sítích MNO. Význam ostatních sloupců je stejný, jako u tabulky 1. Většina aplikací zatím nemá v rámci FRMCS definované ani funkční požadavky, bude předmětem standardizace až ve V4 a vyšších.

Tabulka 2 – Komunikace pro výkonnostní aplikace ve struktuře UIC URS

Aplikace podle UIC URS		Report 74	Plánování FRMCS	Průzkum dopravci	
					IM
6.3	Hlasová komunikace mezi strojvedoucími více vlaků mimo pozemní uživatele	--	nedefinována	5,0	0
6.4	Hlasová komunikace ve vlaku	--	nedefinována	4,0	0
6.5	Traťová telefonie	--	nedefinována	3,0	5
6.6	Hlasová komunikace ve vlaku směrem k cestujícím (vlakový rozhlas)	--	--	(3,3)	0
6.7	Staniční hlášení	--	nedefinována	2,3	2

Aplikace podle UIC URS		Report 74	Plánování FRMCS	Průzkum	
				doprovci	IM
6.8	Komunikace ve stanicích a zařízeních služeb	--	nedefinována	4,3	4
6.9	Telemetrická komunikace vlaku	Cíl	V2-V3	5,0	5
6.10	Infrastrukturní telemetrické komunikace	--	nedefinována	(3,3)	5
6.11	Dálkové ovládání zařízení ve vlaku	Cíl	nedefinována V2-V3	5,0	0
6.12	Monitorování a řízení nekritické infrastruktury	--	nedefinována	(2,7)	4
6.13	Nekritické živé video	--	nedefinována	3,8	2
6.14	Bezdrátová datová komunikace pro vlakový personál	--	nedefinována	4,0	0
6.15	Bezdrátová datová komunikace pro železniční personál na nástupištích	--	nedefinována	(2,7)	5
6.17	Nápověda strojvedoucímu – výkon vlaku	--	nedefinována	4,3	2
6.18	Datová komunikace pro odjezd vlaků	--	nedefinována	5,0	0
6.19	Služby zasílání zpráv	--	--	5,0	5
6.20	Přenos dat	--	--	5,0	5
6.21	Záznam a vysílání informací	--	nedefinována	5,0	5
6.22	Přenos archivů CCTV	--	nedefinována	(3,3)	0
6.23	Živý videohovor	--	nedefinována	(2,7)	3
6.24	Přenos informací rozšířené reality	--	nedefinována	3,3	0
6.25	Překlad řeči v reálném čase	--	nedefinována	4,3	4

Rozdíly v hodnocení jsou podobné, jako u kritických aplikací:

- Osm aplikací je opět **relevantních pouze pro dopravce**, ne všechny ale mají pro dopravce klíčový význam. Hlasová komunikace ve vlaku směrem k cestujícím (vlakový rozhlas) (6.6) je relevantní jen pro dopravce osobní, i někteří nákladní dopravci ji ale označili jako (obecně) užitečnou.
- **Přenos archivů CCTV** (6.22) je hodnocen podobně, někteří nákladní dopravci ale považují vzniklé objemy dat (příklad viz níže) příliš velké pro systematickou centrální archivaci, neodůvodňující náklady na potřebné IT prostředky, a preferují selektivní off-line přenosy. Podobně rozdílné je hodnocení **Přenosu informací rozšířené reality** (6.24), který část respondentů nedokáže zařadit do svých procesů.
- Čtyři aplikace – Traťová telefonie (6.5), Infrastrukturní telemetrické komunikace (6.10), Monitorování a řízení nekritické infrastruktury (6.12) a Bezdrátová datová komunikace pro železniční personál na nástupištích (6.15) jsou opět **málo relevantní pro dopravce**, ale vysoce hodnocené u IM. Rozptyl mezi pohledy dopravců je opět dán rozdílem mezi obecně uznávanou důležitostí ale faktickou irelevantí pro nákladní dopravce.
- Systematicky nízký (a nejnižší u IM) je zájem o **živé video** (aplikace 6.13 a 6.23), které je stejně jako u kritických aplikací největším očekávaným konzumentem přenosového pásma, vyžadujícím komunikaci ve frekvenčních pásmech 5G nad 2GHz se zásadními dopady na potřebnou pozemní infrastrukturu takové komunikace.
- Překvapivě vysoký u všech je naopak zájem o **Překlad řeči v reálném čase** (aplikace 6.25), protože řeší reálné problémy ve stále se rozšiřující přeshraniční přepravě nákladní i osobní, kde navrhovaným alternativním opatřením je (pravděpodobně velmi nepopulární) návrh na zavedení jednoho celoevropského dopravního jazyka.

**Shoda na vysokém významu** mezi dopravci i IM panuje u aplikací, které se pro svůj obecný význam již široce používají – Telemetrická komunikace vlaku (6.9), Služby zasílání zpráv (6.19), Přenos dat (6.20) a Záznam a vysílání informací (6.21). Součástí první z nich je i měření spotřeby elektrických HV, požadované TSI, které je jako jedna z mála nekritických aplikací provozována i na GSM-R.

Za aplikace s krajními nároky je v současné době považováno všechno **využití videa**. Ilustračním příkladem může být konkrétní systém záznamu situace okolo hnacího vozidla, diskutovaný během průzkumu s jedním z nákladních dopravců. Záznam je u něj průběžně pořizován až ze 4 HD kamer na vozidle a přestavuje kontinuální tok 4MB/s, podstatně vyšší, než jsou

předpokládané kapacity dostupné ve FRMCS v RMR pásmech (viz kap.2.6). Pro náhledy situace v reálném čase proto jsou i budou přenášeny jen vzorky záznamu po 1s. Kompletní lokální záznam reprezentuje 20 – 40GB denně na každém vozidle, tedy 2 – 4TB dat denně za celý park HV. Skutečné využití pro řešení incidentů však má z tohoto objemu zlomek – 50 5minutových záznamů o objemu 15GB, tj. 0,4 - 0,7 %. Přenos jednoho záznamu do ještě přijatelných 20 minut vyžaduje rychlost 2Mb/s a vyšší z libovolného místa na trati.

Klasifikace aplikací podle UIC zahrnuje aktuálně ještě 4 **aplikace obchodní** (business), reprezentující bezdrátový přístup pro personál a cestující v různých prostorech železnice. Tyto aplikace **nejsou předmětem** předkládané studie.

## 1.2 Návrhy na změny standardů

V diskusích nad definicemi skupin aplikací podle FRMCS URS se ukázalo, že neexistuje jejich v odvětví obecně akceptovaný český ekvivalent. Důvodů pro tento stav je více:

- Samotný dokument FRMCS URS se nestal přílohou vydaných TSI CCS 2023 (Nařízení EK 2023/1695), takže nedošlo k jeho oficiálnímu překladu. U jiných dokumentů, které v rámci TSI (a dalších celoevropských železničních předpisů) přeloženy byly, se navíc ukazuje, že překlady zajišťované v rámci legislativního procesu orgány EK a EP nerespektují zažitou českou železniční terminologii.
- Oficiálně dostupné lexikony dopravní terminologie včetně železniční nereflektují současný vývoj odvětví, protože v posledních 10 letech nebyly aktualizovány – národní Slovník dopravní terminologie [33] byl vydán 2010, RailLexic UIC [34] má poslední dostupnou aktualizaci na verzi 4.0 z 2011.
- Stručné definice aplikací v FRMCS URS se i věcně významně odchyľují od železniční praxe v ČR a nejspíše i praxe jiných států, protože terminologicky nerozlišují některé zásadní provozní jevy a kategorie. Příkladem toho mohou být společný termín „train“ pro vlak i vozovou soupravu, termín „driver“ bez přívlastků, z něž a ani z jeho kontextu v definicích nelze rozlišit, zda se jedná o strojvedoucího vedoucího HV vlaku nebo obsluhu dalších HV do vlaku zařazených, zúžení pojmu postrk („banking“) pouze na provozně méně využívaný nezavěšený postrk nebo termín „controller“, nerozlišující jednotlivé provozní role výpravčích/dispečerů.

V diskusích v pracovní skupině studie byl proto vypracován ve shodě zástupců MD a účastných sdružení dopravců vlastní český překlad a k němu přidružený anglicko-český výkladový slovník použitých pojmů, který pracovní skupina navrhuje uplatnit u Překladačského servisu EK v Lucemburku jako standard pro překlady textů železniční legislativy těchto orgánů do češtiny, např. cestou MD odboru 130 a dopravního ataše u Stálého zastoupení ČR u EK. Překlad definic FRMCS URS a slovník jsou obsahem přílohy 1 studie.

# 2 Pokrytí systémem FRMCS

**Pokrytí signálem** FRMCS (5G NR) je podle [8] složitější, než v případě GSM-R. Na rozdíl od něj je nelze vyjádřit pomocí prahové síly signálu, protože kvalita přenosu je ovlivněna mnoha faktory, jako jsou dynamicky volená schémata modulace, různá schémata MIMO, multiplexní poměr TDD (u pásma 1900MHz), adaptační mechanismy linky a funkční blok ne plně standardizované, jako třeba scheduler, a další. Kvalita signálu v konkrétním místě je proto určena více parametry – RSRP, RSRQ a SINR, vyčíslované navíc z několika referenčních signálů. Protože sousedící buňky mohou vysílat na stejných frekvencích (radio resource block RRB), je v mnoha případech omezujícím faktorem interference signálu vlastní buňky se signály (gNB i MT) z buněk sousedních. Konečným ukazatelem z hlediska uživatele je dosažitelná rychlost přenosu, různá ve směru do sítě (UL) a k MT (DL), a rozhodujícím parametrem signálu pro její určení je odstup signálu od šumu a interference (SINR).

Pro **výběr pásma** jsou rozhodující tyto faktory:

- dosažitelná rychlost komunikace,
- případná potřeba zahuštění gNB (zmenšení průměrů buňky) oproti stávající infrastruktuře GSM-R pásma 900MHz (n100), ovlivněná různými specifiky šíření závislými na frekvenci, jako jsou směrové charakteristiky antén, módy vícecestného šíření a způsobená interference;
- vzájemné ovlivňování se sousedními (dalšími) využívanými pásmy a prostředky pro jejich omezení.

Kritickým místem vzájemného ovlivňování komunikace ve všech diskutovaných pásmech je **interference mezi anténami** umístěnými na relativně malém prostoru střešy vozidla. Pásma RMR se navzájem významně neovlivňují, to ale platí při zajištění alespoň základních podmínek izolace, daných rozmístěním jednotlivých antén na střeše vozidla. Zajištění těchto podmínek ale není triviální pro vysoký počet antén jak na straně nahrazovaného systému (typická konfigurace GSM-R s 1x vozidlovým hlasovým MT a dvěma EDOR pro ETCS), tak systémů nového (akceptovatelné komunikační kapacity ukazují simulace [3] s konfiguracemi MIMO 1x4 a 4x2, tedy min. 2 anténami na vozidle). a útlum daný prostorovým uspořádáním obvykle není dostatečný, Možná opatření podle [29] např. počítají se vzdáleností antén jen 2m a dosažení potřebného potlačení nežádoucích signálů staví na zařazení slučovacíků filtrů mezi společné širokopásmové antény FRMCS a radiové moduly jednotlivých pásem. U rozsáhlejšího nasazení filtrů je přítom obava [6] z vysoké ceny a také hmotnosti na vozidle instalovaných komponent. Antény i jejich svody pro GSM-R přítom vždy zůstávají oddělené.

## 2.1 Využití pásma 900MHz

Pásmo RMR pro výhradní využití železničními komunikacemi, běžně označované jako „900MHz“, přesněji n100 podle CEPT, je duální pásmo (pro využití FDD) v rozsazích 874,4-880,0MHz a 919,4-925,0MHz, rozšířených oproti původnímu pásmu pro GSM-R (876,0-880,0MHz a 921,0-925,0MHz) o 2x 1,6MHz. Předpokládaná možnost národního rozšíření až o 3MHz (na 873-880 a 918 - 925MHz) není pro ČR aktuální. Rozšířené pásmo se předpokládá využívat podle [5]:

- během migrace paralelně pro stávající systém GSM-R a nástupce FRMCS, možní způsoby jsou rozebrány v odst.2.1.3;
- cílově širokopásmovými kanály technologií NG až 5MHz, případně doplněnými o několik kanálů 200kHz NB-IoT, provozovaných za podmínek podle ECC Reportu 318, určených např. pro radiovou komunikaci prvků infrastruktury nebo výstražný systém traťové údržby.

Pro využití pásma n100 širokopásmovými modulacemi jsou v reportu CEPT [4] stanoveny tyto podmínky ve formě masky vysílaného spektra pro oba směry přenosu, nevyžadující další koordinaci se službami v sousedních pásmech:

- Povoleno (ekvivalentní izotropně vyzářený, EIRP) vysílací výkon pro BS (v terminologii 5G gNB) je v novém rozšíření pásma kvůli ochraně provozu v pásmu 880 – 915MHz snížen oproti hodnotám v původním GSM-R pásmu (širokopásmový vysílač pracuje se stejným výkonem v celém použitém pásmu, takže vysílací výkon je omezen dolním okrajem použitého pásma). Národně je možné povolit i výkony vyšší, pokud nebudou příčinou interferencí s jinými službami v pásmu do 915MHz, nebo naopak dodatečně omezit vysílací výkon na 65dBm bez ohledu na šířku pásma a polohu kanálu v pásmu n100.
- Pro koordinaci na hranicích sítí stanovuje Doporučení ECC (08)02 na hranici a v její blízkosti konkrétní maximální úroveň signálu cizí sítě (59, resp.41dBuV/m, tj. pod -66dBm).

- Povolený vysílací výkon EIRP pro vozidlové MT je 23 až 31dBm s útlumem do sousedního kanálu (ACLR) aspoň 37dB a emisní maska vyhovuje požadavkům 3GPP na LTE/NR, pro ruční terminály pak pouze 23dBm s ACLR 30dB. MT musí mít v obou případech funkční a aktivované řízení vysílacího výkonu.

## 2.1.1 Podmínky šíření signálu

Podle [7] FRMCS na rozdíl od GSM-R nevykazuje stejné pokrytí v obou směrech přenosu, pokrytí je v zásadě určeno podmínkami pro UL, a to i při zvýšeném výkonu vysílače MT (31dBm, tj. méně než 39dBm u GSM-R, navíc při výrazně širším pásmu). Složitější způsob přenosu je citlivější na podmínky na okraji pokrytí (buňky), kde již nestačí pouhé dodržení minimální úrovně VF signálu jako u GSM-R. Přesto vše se považuje využitelné u pokrytí systémů GSM-R a FRMCS v pásmu 900MHz přibližně stejně.

V ETSI byly několika různými simulačními nástroji provedeny poměrně rozsáhlé simulace šíření, jejichž výsledky shrnuje [3]. Každý ze 3 použitých nástrojů se ukázal vhodnější pro modelování jiných aspektů přenosu – zatímco dva modely dovolily simulaci za různých konfigurací MIMO (při dost odlišných výsledcích v přenosové rychlosti), třetí z modelů dokázal modelovat vliv rozdílných přidělů spektra sousedním buňkám (reuse factor) a rychlosti jízdy (Dopplerův efekt).

Modelování ukazuje pro pásmo 900MHz tyto podmínky:

- UL má v městském prostředí i v otevřené krajině parametry významně ovlivněné vysílacím výkonem, takže prakticky použitelné jsou MT jen s vysílacím výkonem 31dBm. Pro DL simulace v obou prostředích dále ukázala významnou anomálii v chování v blízkosti BS (gNB), kde díky interferenci se signálem zadních laloků antén na druhé straně téhož stožáru a vysoké směrovosti přenosů MIMO klesají v blízkosti (prakticky do 300m od) BS (gNB) SINR i přenosová rychlost na hodnoty blízké okraji buňky ve volné krajině (ve vzdálenosti 1 - 2km).
- Přenosové poměry uplinku v městském prostředí jsou horší než ve volné krajině, přestože buňky jsou plánované jen poloviční. SINR na přijímacích anténách gNB klesá pro polovinu MT na okraji buňky pod 2dB (v otevřené krajině pod 7dB). Podle očekávání je důvodem větší podíl NLoS šíření i vyšší útlum LoS šíření (nižší antény a vyšší zástavba).
- Modelování ukázalo zřetelné optimum v konfiguracích MIMO, zkoumaných v rozsahu od 1x2 do 2x4 (výjimečně 4x4). Nejlepší výsledky pro parametry uplinku dávaly konfigurace 2x4 (s lepším potlačením interference, směrovostí a ziskem z prostorového multiplexu a efektivní plochy přijímací antény), zatím je ale jejich využití nereálné, protože standardy i v Rel18 dovolují na MT pouze 1 anténu vysílací. Konfigurace 4x2 dobře vyhovují i pro downlink (instalace 4 antén na vozidle by sice poměr dále zlepšila, ale není z prostorových důvodů reálná). Stejně výsledky ohledně MIMO dávají simulace pro volnou krajinu, a i městské prostředí.
- Konfigurované (pevné) rozdělení pásma mezi sousední buňky (Frequency Reuse), jehož cílem je omezit interferenci na okraji buňky za cenu snížení rychlosti v jejím středu nedal jednoznačné výsledky a studie doporučila organizaci pásma ponechat na automatických mechanismech 5G NR.

Dobrym ilustrujícím příkladem rozdílných podmínek příjmu u GSM-R a FRMCS je **výsledek předběžného plánování** pro okolí žst. Thionville (FR), uvedený v [8], pracující pro pásmo 900MHz s průměrem buňky do 8km v ploché krajině s předměstskou zástavbou, stožáry cca 23m vysokými a ziskem antény BS 17dBi:

- Výsledek srovnávacího plánování GSM-R ukázal v na okraji takové buňky úroveň -95dBm, splňující standardy EIRENE.
- Úroveň signálu pro FRMCS (SS-RSRP) ve stejném místě byla -115dBm a SINR okolo 0dB. V takových podmínkách (na hranici použití modulace QPSK a 16QAM) je teoreticky dosažitelná přenosová rychlost shodně podle [8] i [3] okolo 2Mb/s, v konkrétním citovaném případě rádiové plánování předpovědělo minimálně 480kb/s (downlink s diverzitou MIMO 2x2 i uplink).

## 2.1.2 Ovlivňování se sousedními pásmy

Pro pásmo RMR 900MHz (n100) [5] řeší vzájemné možné ovlivnění s následujícími pásmy radiové komunikace:

- Příjem BS (uplink) sítí v pásmu do 915MHz je chráněn úpravou masky povolených vysílacích výkonů podle odst.2.1 (snížením výkonů kanálů zasahujících pod 921MHz). Vozidlové stanice (obecně MT) systému FRMCS naopak musí být dostatečně odolné proti vysílačům sítí v tomto pásmu.
- Vozidlové stanice (obecně MT) systému FRMCS musí být dostatečně odolné i proti vysílačům sítí v pásmu nad 925MHz, což splňují již přijímače GSM-R konstruované podle ETSI TS 102 933-1, jehož většina požadavků bude platit i pro FRMCS.
- Vozidlové stanice (obecně MT) systému FRMCS musí být navíc dostatečně odolné i proti krátkodosahovým vysílačům (RFID nebo přenosu dat, WiFi 802.11ah) pracujícím v pásmu 915,0-919,4MHz, což bude zajištěno. Splněním požadavků v ECC Reportu 313, povinných pro přijímače FRMCS.

- Stejně tak přijímače BS (gNB, uplink) FRMCS musí být podle ECC Reportu 313 odolné proti krátkodosahovým vysílačům (datovým) pracujícím v pásmu 874,0-874,4MHz, harmonizaci spektra pro tento případ představují nařízení EU 2022/180 a doporučení ERC 70-03 z 6/2019, aktuálně v ČR již implementovaná.

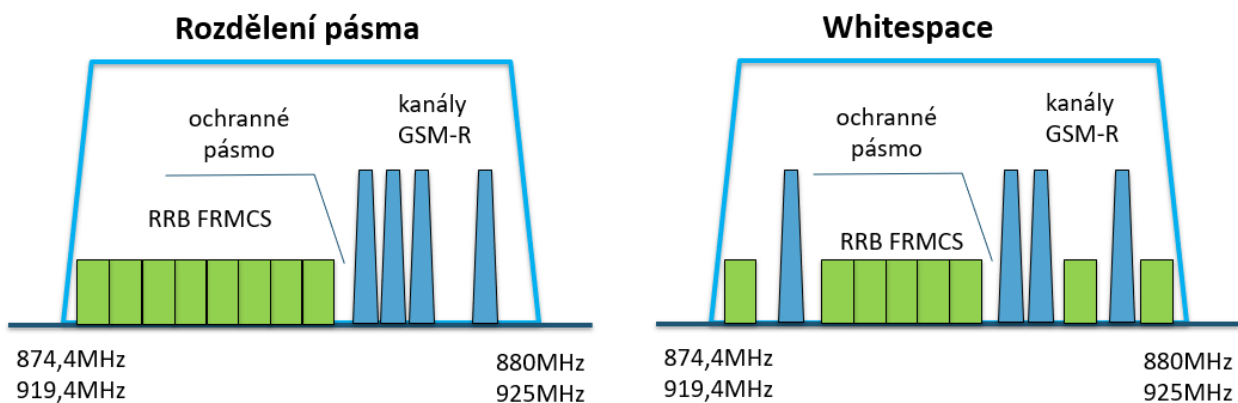
### 2.1.3 Koexistence GSM-R a 5G/FRMCS v pásmu

Původní záměr využití, citovaný ještě v [5], by umožňoval v novém rozšíření provozovat plnohodnotný kanál LTE s šířkou 1,4MHz včetně odstupu 0,1MHz od stávajícího pásma pro GSM-R. Rozhodnutím UIC využít pro evropské implementace pouze technologie 5G je taková koexistence znemožněna, protože minimální šířka kanálu 5G je podle aktuálních standardů 3GPP vyšší.

Scénář se současným využitím pásma 900MHz pro oba systémy má za těchto podmínek dvě základní varianty [7]:

- kmitočtové rozdělení pásma na část ponechanou pro provoz GSM-R (s ohledem na ovlivňování různých sousedících pásem souvislý přiděl u horního konce obou párových pásem) a FRMCS (zbytek u dolního konce pásem včetně nového rozšíření o 1,6MHz)
- překryvný provoz obou systémů v tomtéž pásmu, při kterém díky pokročilým technikám modulace 5G NR je možné využít i nesouvislé úseky pásma v konkrétním místě neobsazené provozem GSM-R (tzv. whitespace).

Obrázek 1 – Varianty sdílení pásma 900MHz



**Rozdělení pásma** na souvislé části pro GSM-R a FRMCS má tato omezení a provozní důsledky:

- Příděl pásma pro FRMCS je omezen šířkou pásma, kterou je nutné ponechat pro provoz GSM-R. Obvyklým výsledkem radiového plánování je potřeba minimálně 10 kanálů (vedlejší trati s nízkým provozem), typicky však 12-14 kanálů (běžně zatížená trať), se započtením oddělovacího pásma 2x100kHz tedy minimálně 2,2MHz, většina správců však v minulosti využila při plánování všech původních 19 kanálů, tedy 4MHz.
- Pro provoz FRMCS tedy zbývá pásmo 1,4 – 3,2MHz (maximálně 15 RRB), které je menší než standardy 5G NR podporovaných 5MHz. Pro práci v užších pásmech jsou nutné změny standardů 3GPP, na kterých pracovaly 3GPP WG4 (síťová infrastruktura) a WG5 (terminál). Výsledkem je definice nového schématu modulace pro kanál 3MHz ve specifikaci Rel18.
- Ve většině sítí bude takové rozdělení potřebovat radiové přepínání systému GSM-R, které s vysokou pravděpodobností vyvolá měřicí kampaně pokrytí a nutnost přesvědčení včetně na GSM-R nasazené aplikace ETCS, které budou představovat dodatečné náklady a časové prodlevy a tvořit úzké hrdlo např. pro nedostatek kvalifikovaného personálu. Scénář přesto počítá se změnami během celé migrační periody, při kterých bude postupně přiděl pro GSM-R redukován tak, jak se objem provozu bude přesouvat na FRMCS. Odhadnout přesnější průběh tohoto přesunu ale není možné, protože podmínky koexistence GSM-R a FRMCS podle aktuálního TSI CCS 2023 dovolují uživatelům dělit provoz mezi obě sítě (např. ATP/ETCS na FRMCS, ale hovorovou službu ponechat na GSM-R).

**Překryvný způsob sdílení** (whitespace) je rozpracováván na půdě ETSI TC RT jako iniciativa firmy Kontron. Systém FRMCS při něm

- využívá přiděl pásma o šířce 5MHz na dolním okraji pásma n100, který ale není souvislý, lokální konfigurací gNB jsou v něm vynechány kanály využívané kolokovanou BS GSM-R včetně potřebných ochranných úseků. Možnost takového nasazení

byla zatím ETSI TC RT potvrzena testy na technologii 4G LTE, očekává se ale jejich potvrzení i pro standardní modulační techniky 5G NR R17, konkrétně v testech v rámci projektu 5G-RACOM, rozplánovaného do 2025.

- Minimální interference obou systémů lze dosáhnout, pokud bude síla signálu obou v každém místě využívaného pokrytí srovnatelná. Z toho vyplývá nutnost kolokace gNB FRMCS a BS GSM-R při přibližně stejných EIRP obou vysílačů.

Tabulka shrnuje hlavní rozdíly mezi oběma variantami koexistence:

Tabulka 3 – Hlavní rozdíly v předpokládaných způsobech sdílení pásma 900MHz

Rozdělení pásma	Překryvné sdílení (whitespace)
Pro FRMCS úzký kanál (RB) max. 3,2MHz	Pro FRMCS plný kanál (RB) 5MHz
Vyžaduje 5G NR Rel18	Postačí 5G NR Rel17
EIRP určen na základě prací 3GPP	EIRP v úzkých mezích ekvivalentní GSM-R
Souvislé přiděly pásem pro FRMCS a GSM-R	Překryv, pásmo pro FRMCS nesouvislé
Konfigurace gNB řešená plošně	Konfigurace každé gNB individuální

## 2.2 Využití pásma 1900MHz

Pásmo RMR, běžně označované jako 1900MHz TDD, přesněji podle CEPT jako n101, je pásmo nově od r.2021 přidělené pro výhradní využití železničními komunikacemi. Pásmo zatím není v ČR pro železniční rádiové komunikace přiděleno, Celý úsek 1900 - 1920MHz je v ČR **aktuálně přidělen pro pohyblivou službu, krátkodobé nebo experimentální využití**, pro železniční rádiové komunikace bude přiděleno od 2025, kdy o ně může IM na základě strategické a ekonomické rozvahy požádat.

Hlavní odlišností pásma je využití časového duplexu (TDD), který má tato konkrétní omezení a provozní důsledky nejen pro fázi migrace, ale pro celou dobu využití tohoto pásma:

- Sousední buňky sítě vyžadují pro zamezení interference vzájemnou synchronizaci (časovou a rámcovou), a to i mezi sousedními buňkami různých sítí. Synchronizace zahrnuje i přizpůsobení duplexních poměrů (schémat) sousedních buněk, nebo naopak plnou izolaci buněk při zásadní změně duplexního schématu, což omezuje jinak vysokou pružnost rozdělení kapacit mezi uplink a downlink.
- Pokrytí (dosah) je díky podstatně vyšší frekvenci menší a vyžaduje zahuštění lokalit pro gNB proti pásmu 900MHz (tj. proti stávajícímu systému GSM-R). Rovněž rádiové plánování v tomto pásmu bude složitější, protože stejně jako u pásma 900MHz už není založeno na limitech přijímacích úrovní, a zahrnuje volbu vysílacího výkonu MT. Zahuštění gNB proto není plošné, ale týká se jen stávajících buněk s velkým ISD (tedy buněk v otevřené krajině s malým stávajícím provozním zatížením). Detailněji jsou podmínky rozebrány v kap.2.2.1.

Kromě plošného nasazení FRMCS v pásmu 1900MHz (při nemožnosti využití pásma 900MHz) má významné přínosy nasazení selektivní pro pokrytí konkrétních potřeb, vedoucích na různé hybridní scénáře, např. [7]:

- navýšení kapacity v místech vyšší potřeby, jako jsou velká seřadiště a železniční uzly, husté městské sítě nebo geomorfologicky složité oblasti se zvýšenou potřebou pokrytí. Taková situace často nastává ve velkých uzlech, spojujících jednotlivé trati obsluhované v pásmu 900MHz (např. pro ETCS L2), kde může být pokrytí zajištěno samostatně v pásmu 1900MHz, případně i v překryvu s FRMCS nasazeným i v pásmu 900MHz;
- na hranici sítě se sítí, která stále využívá pásmo 900MHz pro GSM-R bez možnosti koordinace využití ve smyslu kap.2.1.3. V takovém případě mohou být pro zamezení interference příhraniční úseky pokryty v pásmu 1900MHz.

Pro úplnost je nutno uvést že jsou i situace, kde je naopak vyžadováno dokrytí plošné sítě 1900MHz instalací v pásmu 900MHz, jako jsou místa nedostatečného pokrytí kvůli nemožnosti doplnit pasivní infrastrukturu (stožár) nebo dokrytí tunelů různými technologiemi na bázi opakovačů, které nedokážou šířit signál v tomto pásmu nebo zajistit potřebnou synchronizaci pro TDD.

Pro využití pásma n101 jsou v reportu CEPT [4] stanoveny tyto podmínky ve formě masky vysílaného spektra pro oba směry přenosu:

- Povolený (ekvivalentní izotropně vyzářený, EIRP) vysílací výkon pro BS (v terminologii 5G gNB) bez koordinace s ostatními sítěmi je při šířce kanálu 10MHz až 65dBm, národně je teoreticky možné povolit i výkony vyšší, ale jen při koordinaci s dotčenými sítěmi.

- Není-li možná specifická koordinace na hranici sítí, stanovuje Zpráva ECC 353 a související Doporučení ECC 23-01 výchozí strukturu rámce TDD a sílu pole v místě hranice.
- Povolený vysílací výkon EIRP pro vozidlové MT je až 31dBm s útlumem do sousedního kanálu (ACLR) aspoň 37dB, pro ruční terminály pak 23dBm, resp. 30dB. MT musí mít v obou případech funkční a aktivované řízení vysílacího výkonu.

Pro výsledný efekt zavedení pásma 1900MHz jsou rozhodující tyto faktory:

- dosažitelná rychlost komunikace u tohoto TDD pásma je kromě přidělené šířky pásma a dosažitelného SINR dána nastaveným poměrem RRB UL/DL (oproti sítím MNO atypicky nastavovaným ve prospěch uplinku v poměrech 50:50 až 90:10), překryvem využitého pásma v sousedních buňkách (staticky konfigurovaný nebo dynamicky uplatňovaný jen na hranici pokrytí), schématem MIMO (s různým efektem v UL a DL) a dalšími;
- pokud využití pásma 1900MHz volí obě sousedící sítě, musí pro zamezení interference v příhraničních úsecích navíc řešit vzájemnou časovou synchronizaci a koordinovat vzorce duplexu TDD. Postupy takové koordinace blíže řeší dokumenty vydávané UIC UGFA;
- je nutné zahuštění gNB (zmenšení průměru buňky) v určitém poměru oproti pásmu 900MHz (n100), i když ne přímo dané poměrem frekvencí.

## 2.2.1 Podmínky šíření signálu

Modelování ve třech různých simulačních nástrojích stejně jako pro pásmo 900MHz (viz 2.1.2), [3] ukazuje pro pásmo 1900MHz tyto podmínky:

- Vliv konfigurací MIMO, zkoumaných v rozsahu od 1x2 do 2x8, se ukázal jako protichůdný. Nejsložitější konfigurace s 8portovými anténami na gNB ukázaly jen minimální přínos pro parametry UL, zatímco u DL byly jednoznačně kontraproduktivní (vyšší směrovost vysílací antény díky limitu EIRP omezuje celkový vysílací výkon). Stejně výsledky ohledně MIMO dávají simulace pro volnou krajinu, a i městské prostředí. V pásmu 1900MHz, využívajícím TDD, nelze konfiguraci mimo pro UL a DL oddělit, a proto její volba bude kompromisem, vyžadujícím další výzkum a testování.
- V porovnání s pásmem n100 (900MHz) ukázaly simulace významně menší (o 5dB) útlum na okraji buňky v otevřeném terénu (což je způsobeno převažujícím NLoS šířením) a větší zisk antén u 1900MHz.
- Uplink má v městském prostředí výrazně horší parametry, významně ovlivněné vysílacím výkonem, takže prakticky použitelné jsou MT jen s vysílacím výkonem 31dBm. Podobná situace je i v downlinku pro velké buňky v otevřené krajině (v simulaci s průměrem 8km), kde je vyslání gNB maximálním povoleným výkonem 63dBm EIRP nutností.
- Ve většině simulovaných scénářů byla omezujícím faktorem interference na okraji buňky, takže funkce pro její omezení, implementované v technologii 5G, jsou pro provoz stěžejní. Statické rozdělení frekvencí mezi dvojice (trojice) sousedních buněk ale omezuje přenosovou rychlost v celé buňce, takže i zde se potvrdilo smysluplnější je použití dynamických technik.
- Pásmo 1900MHz se v simulacích ukázalo jako citlivější na pohyb MT (Dopplerův jev), než pásmo 900MHz.

Ilustrujícím příkladem přenosových podmínek FRMCS je opět výsledek předběžného plánování pro okolí žst. Thionville (FR), uvedený v [8]. Úroveň signálu pro FRMCS (SS-RSRP) na hranici buněk pro toto pásmo byla dokonce -120dBm a SINR místy až -5dB. I v takových podmínkách zůstala přenosová rychlost pro DL díky diverzitě (MIMO 2x2) minimálně 480kb/s, pro uplink ale v některých místech klesla pod 70kb/s. I tady výsledek plánování potvrdil obecně přijímané pravidlo, že při přechodu na pásmo 1900MHz bude nutné zahuštění BS (gNB), tj. zmenšení ISD buněk a že FRMCS přenos je kritický především na podmínky v uplink.

Představu o plnění podmínek pokrytí pásmem 1900MHz z místa stávajících BS GSM-R dávají výsledky předběžného rádiového plánování pro trať Brno – Břeclav – st. hranice SR – Kúty – Bratislava, popsané v [25] část C. Na úseku o celkové provozní délce 133km má systém GSM-R (na české straně v provozu, na slovenské částečně jen v plánu) 23 BS (na rozdíl od pramenu je do pokrytí započtena i BS CD31601 Hrušky na 2. koridoru) s průměrným ISD buněk 6,0km. Pro dokrytí v pásmu 1900MHz předběžné plánování indikuje dalších 21 gNB, zahušťujících síť na průměrné ISD 3,2km. Nárůst počtu BS (gNB) pro toto pásmo by tedy byl 91 %. 8 z těchto lokalit je ale v blízkém pásmu 1800MHz pokryto ze stožárů MNO (blíže viz kap.2.3) a je tedy šance využít formou sdílení infrastrukturu MNO i pro FRMCS. Nárůst počtu BS (gNB) stavebně zajišťovaných IM by pak byl jen 56 %. Nasazení FRMCS v pásmu 1900MHz bude tedy i při realizaci sdílení pasivní infrastruktury mezi SŽ a MNO představovat nezanedbatelné náklady ve stavební části.

## 2.2.2 Ovlivňování se sousedními pásmy

Přes omezující podmínky pro vysílací výkon v pásmu dochází ke vzájemnému ovlivňování se sousedními přidělenými pásmy 1805 – 1880MHz (downlink pásma n8) a 1920 – 1980MHz (uplink pásma n1), využívaným systémem LTE MNO s FDD a se šířkou kanálu 5MHz [4] [5].

- Důvodem ovlivnění provozu v těchto pásmech je především to, že i základní (nekoordinovaná) maska vysílače BS (gNB) FRMCS předpokládá vyšší selektivitu přijímačů v dotčených pásmech, než požadují dnešní Harmonizované evropské standardy (viz též [5]). Předpokládá se, že vyšší požadavky na selektivitu budou postupem času do Harmonizovaných evropských standardů promítnuty, do té doby provozovatelé mobilních sítí v pásmu 1920 – 1980MHz nevyhovujících této podmínce na svých zařízeních budou provádět úpravy proti možné interferenci jen po dohodě se IM, protože česká legislativa předpokládá postup pouze na základě výzvy (oznámení) IM nedovoluje.
- Přijímače vozidlových stanic (obecně MT) systému FRMCS musí být naopak dostatečně odolné proti vysílačům sítí pracujících v pásmu do 1880MHz a přijímače BS (gNB) proti vysílačům MT těchto sítí, pracujícím v pásmu nad 1920MHz.
- V pásmu 1880 - 1920MHz se očekává harmonizace spektra pro využití drony (UAS) silových složek s možným dopadem v podobě změny požadavků na FRMCS.
- V těsné blízkosti pásma n101 jsou rovněž přiděly pro provoz DECT (1880 - 1900MHz). Systematická interference se v tomto případě nepředpokládá kvůli sporadickému využití pásma DECT a jeho algoritmu dynamického výběru kanálu (DCS), opatření proto budou nutná jen ve výjimečných případech, např. objektech dispečinků v obvodu železničního uzlu.

## 2.3 Možnosti využití pásem MNO

„Využitím pásma MNO“ pro železniční aplikace se běžně označuje využití prostředků sítě MNO pro železniční komunikace. Mohou sloužit pro různé účely:

- Pro využití jako základní komunikační systém **pro kritické služby** musí podle [5] odpovídající část sítě MNO plnit striktní požadavky železnice na pokrytí, dostupnost služby, výkonnost, podmínky přechodu hranic / roamingu, úroveň podpory QoS (včetně prioritizace a preempe komunikace), kybernetické bezpečnosti, údržby a SLA doložené certifikací [5], což sítě MNO typicky dodnes neplní.
- Pro využití jako **záložní prostředek** pro kritickou komunikaci platí v podstatě tytéž požadavky, nižší mohou být nároky na výkonnost. Požadavky na přechod hranic / roamingu mohou být aplikovány na vstup / výstup do sítě IM, pracující v pánech RMR.
- Sítě MNO, které to požadavky neplní, mohou být využívány jen **pro nekritické** (a aktuálně i neinteroperabilní) **komunikace**. Tento způsob už reprezentuje současné využití sítí veřejných MNO technologií 4G LTE.

Odpovědnost a rozhodovací pravomoc o využití MNO pásem pro kritické aplikace nebo dokonce pro FRMCS obecně je v EU principiálně na jednotlivých členských zemích a stávající V1 FRMCS standardů (v rámci CCS TSI 2023) zatím rovněž oporu nedává. V zemích EU jsou zatím stanovena pravidla pro licencování vyhrazených železničních pásem (RMR) aktuální situace v ČR je popsána u diskuse těchto pásem v kap.2.1 a 2.2. Použití konkrétního pásma (nejen MNO) pro aplikace železničních komunikací je dále limitováno

- **pokrytím železniční sítě** signálem dostatečné kvality pro tu kterou aplikaci,
- v případě provozu vlastní technologií **provozními náklady**, v případě roamingu nebo MOCN dohodnutými podmínkami a **tarify** využití,
- **vzájemným ovlivňováním** se sítěmi v pásmech RMR (FRMCS i GSM-R) včetně sítí za hranicemi vlastní železniční infrastruktury a nežádoucími vazbami anténních systémů na střeše vozidla.

**Stav pokrytí** hlavních tratí v ČR reprezentuje výsledek předběžného rádiového plánování a jeho následná kontrola měření pro traťový úsek Brno – Břeclav – st. hranice – Kúty – Bratislava, provedené v rámci studie [25] část C. Simulace pokrytí byly provedeny v rámci rádiového plánování jedním zúčastněným MNO pro pásma 700MHz (n28) a 2100 MHz (n1) a ověřeno měření pro pásma 700MHz (n28), 800MHz (n20) a 1800MHz (n3). Do simulace bylo zahrnuto cca 80 existujících BS v okolí tratí. Výsledky měření pro všechny operátory vyjadřuje tabulka procenty měřících vzorků, spadajících do uvedených rozsahů RSRP:

Tabulka 4 – Rozsahy pokrytí z předběžného radiového plánování pásem MNO ve studii [25]

Rozsah RSRP	-130 až -104dBm	-104 až -90dBm	více než -90dBm
<b>Pásmo 700MHz (n28)</b>			
česká strana, 2 operátoři	21 – 94 %	6 – 24 %	0 – 54 %
slovenská strana, 1 operátor	5 %	31 %	64 %
<b>Pásmo 800MHz (n20)</b>			
česká strana, 3 operátoři	0,2 – 0,4 %	7 – 12 %	88 – 93 %
slovenská strana, 2 operátoři	3 – 4 %	28 – 30 %	67 – 69 %
<b>Pásmo 1800MHz (n3)</b>			
česká strana, 3 operátoři	27 – 31 %	37- 47 %	26 – 32 %
slovenská strana, 2 operátoři	78 – 80 %	9 – 22 %	0,2 – 11 %

Výsledky měření byly v dobré shodě s výsledky simulace, horší stav ukázaly pouze na slovenské straně v pásmu 1800MHz. Konkrétně, že pásmo 700MHz je na české straně efektivně pokryto pouze jedním operátorem a pásmo 1800MHz všemi slabě, na Slovensku potom, že pásmo 1800MHz není v dobré kvalitě pokryto žádným. Pro dokrytí v pásmu 700MHz plánování identifikovalo celkem 4 lokality a pro dokrytí i v pásmu 2100MHz dalších 13. Buňky po dokrytí měly ISD maximálně 4,5km (průměrně jen 2,3km). 17 BS (z toho jedna nově navržená dokrytím) je ve stejné nebo blízké lokalitě, jako stávající nebo plánované BS systémů GSM-R, resp. FRMCS a tvoří potenciál pro sdílení pasivní infrastruktury, zejména stožárů, sítěmi FRMCS a MNO.

Nejsilnější z hlediska **ovlivňování sítí v RMR pásmech** je interference mezi vysílačem v pásmu MNO (uplink) a přijímačem v pásmu RMR (downlink), které jsou instalovány a pracují současně na vozidle v těsné blízkosti. Vysílač v pásmu MNO v takové situaci nesmí blokovat přijímač v RMR pásmu ani ho ovlivňovat parazitním vyzařováním (*spurious emissions*) nebo vyzařováním mimo pásmo (*out-of-band emissions*). Tabulka 5 shrnuje pro jednotlivá pásma MNO kombinace, vyžadující podle [30] na vozidle specifická opatření, protože zajistit potřebné potlačení pouze vzdáleností antén už není na omezeném prostoru střechy vozidla možné.

Tabulka 5 – Přehled pásem MNO relevantních pro železniční využití

Rušící MNO pásmo		Rušené RMR pásmo	Minimální potřebné potlačení	Využití v ČR
Označení	Rozsah frekvencí			
n28	703 MHz - 733 MHz / 758 MHz - 788 MHz	obě	malé (>20dB)	LTE, 3 přiděly MNO po 10MHz
n20	832 MHz - 862 MHz / 791 MHz - 821 MHz	obě	malé (>20dB)	LTE, 3 přiděly MNO po 10MHz
n8	880 MHz – 915 MHz / 925 MHz – 960 MHz	900MHz	střední (>43dB)	v ČR přiděl jen pro 2G
n3	1710 MHz – 1785 MHz / 1805 MHz – 1880 MHz	1900MHz	střední (>43dB)	LTE, 3 přiděly MNO 20 – 28MHz
n1	1920MHz -- 1980MHz / 2110MHz -- 2170MHz	1900MHz	vysoké (>72dB)	LTE, 3 přiděly MNO po 20MHz
n7	2500 MHz – 2570 MHz / 2620 MHz – 2690 MHz	1900MHz	střední (>43dB)	LTE, 4 přiděly MNO 10 – 20MHz
n78	3300 MHz – 3800 MHz (TDD)	1900MHz	střední (>43dB)	přiděl části pásma 3 MNO 100 – 160MHz

Vzájemné ovlivnění je pro pásma n1 a n3 blíže popsáno v odst. □ a pro pásmo n8 v odst.2.1.2. MNO pásma n28 (700MHz) a n20 (800MHz) provoz v pásmech RMR významně neovlivňují.

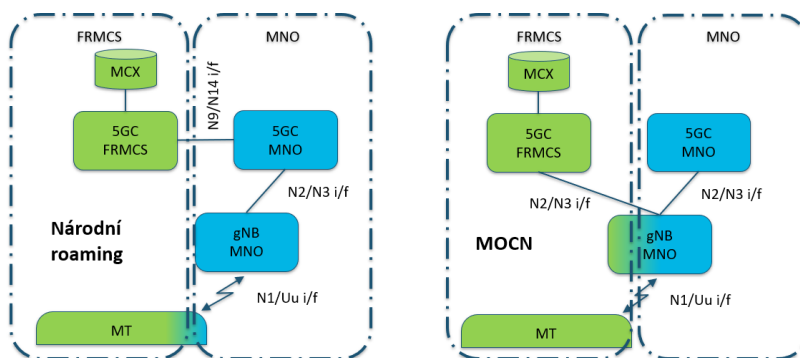
## 2.3.1 Schémata sdílení sítí

Využití přístupové infrastruktury (RAN) MNO provozem IM je technicky možné ve dvou úrovních:

- **Národní roaming** je schéma, ve kterém IM provozuje část nebo kompletní 5GC. Vozidla (terminály v terénu) jsou opatřeny SIM IM a v síti MNO jsou registrovány jako navštěvující (visiting). Provoz je přes Core MNO směřován do 5GC IM jako do cizí sítě. Nevýhodou tohoto uspořádání je zprostředkované spojení mezi 5G RAN a 5GC IM, který tak nemá plnou vládu nad QoS poskytovanou jednotlivým službám. Komplikovaný je i vnitrostátní přechod mezi sítěmi MNO a IM (jeho vlastní RAN v RMR pásmech) doprovázený např. IP přeadresováním MT a novou autentizací.
- **MOCN** (Multiple Operator Core Networks) neboli **sdílení RAN** pracuje s připojením 5GC IM vlastní přenosovým systémem přímo na gNB spolupracujícího operátora. gNB pro komunikaci nabízí paralelně PLMN ID MNO i IM a společné seznam sousedních buněk, možnost připojení k nim je dána účastnickými oprávněními. Terminály IM komunikující v této architektuře logicky zůstávají v doméně FRMCS, i když jsou fyzicky připojeni přes gNB MNO.

Třetí dnes nejrozšířenější způsob je využití sítě MNO jen jako uživatel – na SIM poskytnutých MNO provozuje IM nebo dopravce komunikace proti přístupovým bodům (AP) do své privátní sítě, kde jsou umístěny serverové prostředky realizující službu. Takto jsou dnes typicky provozovány telemetrické služby na principech IoT, např. sběr elektroměrových údajů z vozidel nebo dálkový monitoring a řízení sekundárních systémů vozidel (TCMS). Bez dodatečných opatření QoS pro tyto služby nevybočuje z běžné komerční úrovně a pro náročnější aplikace není dostatečná.

Obrázek 2 – Varianty sdílení 5G NR / RAN



Sdílení RAN principy MOCN lze považovat za prověřené řešení s konkrétními přínosy [22]:

- Architektura potřebná pro realizaci MOCN je dána otevřeným standardem (konkrétně 3GPP TS 23.251). Principy sdílení vycházejí z více než dvacetileté praxe MNO, využívajících ho už od standardu UMTS
- Sdílení 5G NR RAN mezi IM a MNO redukuje náklady na nejrozlehlejší, a tedy nejdražší část 5GS. Důsledkem je nejen finanční úspora, ale především potenciál urychlení výstavby a zavedení potřebných služeb.
- RAN MNO typicky pracující ve vyšších pásmech než RMR, může zajistit větší špičkovou přenosovou kapacitu než vlastní RAN IM. I když sítě MNO jsou typicky orientovány na maximální kapacitu downlinku, může sdílení pomoci lepšímu využití sítě provozem IM s přesně opačnými preferencemi
- Konkrétními režimy sdílení sítí může být zvýšena dostupnost služby, i když nejčastěji uváděné schéma s eliminací poruch v Core a gNB privátní sítě nemusí být založeno na správných předpokladech.
- Přímé propojení Core a RAN dává IM možnost přímo řídit QoS služeb z konce na konec a komunikace není závislá na průchodnosti a dostupnosti přenosových systémů a prvků Core MNO, které jsou dimenzovány na běžnou komerční úroveň služby. Mechanismy řízení QoS mohou využívat pouze prioritizaci pomocí značek 5QI stejnými postupy jako v RAN RMR nebo využívat část kapacity (RRB) vyčleněné v RAN MNO pomocí slicingu.

Všechny aspekty sdílení samozřejmě vyžadují dohodu o provozních postupech mezi MNO a IM. Ta musí regulovat minimálně úroveň pokrytí sítě MNO vyhovující pro železniční aplikace dostupnost / spolehlivost infrastruktury poskytované IM, což představuje zvýšené náklady na straně MNO. Z hlediska odpovědnosti je při MOCN MNO subdodavatelem IM, který pak jediný ručí za výslednou podobu a kvalitu služby.

Jako příklad pro úspěšné nasazení MOCN jsou obvykle uváděny sítě bezpečnostních a krizových složek, zřízené tímto způsobem v některých zemích (FirstNet v USA, Eriisverket ve Finsku nebo Radio Network of the Future ve Francii). Podobné nasazení pro železnici ale musí řešit následující odlišnosti:

- Provozní zájem bezpečnostních a krizových složek se kryje s oblastmi vyšší hustoty osídlení, které jsou sítěmi MNO pokryty hustě a s dostatečnou kapacitou, takže provoz na RAN MNO může dosahovat potřebné QoS. Takové pokrytí ale není dost

souvislé z hlediska podpory kritických železničních aplikací. Pokrytí železničních tratí, zejména těch s malým provozem, je naopak zatím nízké a pro operátory nezajímavé. Na hlavních tazích je řešeno rozvojovými programy, jako je „5G Strategic Deployment Agenda“ EU s plánem pokrytí až 75 000 km hlavních tratí, a tam může mít sdílení očekávaný efekt. Příklad takové situace, i když v tuto chvíli plánované využít jen jako sdílení pasivní infrastruktury (stavebních částí gNB), je v kap.2.2.1.

- Kritická komunikace pro bezpečnostní a krizové složky je v detailech odlišná a často funkčně jednodušší než pro železniční aplikace. Zatímco pro první použití byly určeny již první fáze standardizace 3GPP v Rel14, všechny požadavky železnice nebudou zohledněny ani v aktuálně rozpracované Rel19. Rozdíly samozřejmě řeší samostatné MCX Core IM, které je pro funkčnost rozhodující, ale na rozdíl od řešení pro bezpečnostní a krizové složky specifické produkty pro FRMCS na trhu zatím chybí.

Rizika využívání MOCN především následující:

- MNO může zásadně změnit technické podmínky provozování – rozsah rezervovaných prostředků systému během jeho rekonfigurací, upgrade na verze standardu, které neodpovídají požadavkům železnice nebo mění podmínky za kterých byly různé prvky komunikačního systému certifikovány měnit z provozních nebo jiných důvodů pokrytí nebo v krajním případě
- plánovat odstavení společně využívané technologie a/nebo podmínit její další provozování neúnosnými obchodními podmínkami,
- kybernetické zabezpečení sdílených prostředků operátora nebude na úrovni vyžadované pro kritickou infrastrukturu. Očekávaným následkem napadení sdílené NG RAN by bylo především vyřazení ze služby (Denial of Service, DoS) s fatálním dopadem na železniční provoz. Náležité kybernetické zabezpečení je tedy dalším parametrem sdílené RAN, podmiňujícím její použití pro MOCN.

## 2.4 Využití satelitní komunikace

Satelitní služby pro silové a krizové složky i pro civilní (komerční) využití poskytující on-line obousměrnou komunikaci lze rozdělit na:

- úzkopásmové služby hovorové a datové,
- širokopásmové služby internetového přístupu a
- satelitní přístup integrovaný do 5GS.

Další satelitní služby, jako je služba určování polohy a šíření rozhlasového / televizního vysílání jsou služby jednosměrné a nelze je tedy považovat pro účely FMCS za komunikační. To neznamená že nemohou být v železničním provozu využívány, konkrétně GNSS je podle FRMCS SRS aktuálně hlavním zdrojem lokalizační informace MT. Příkladem takového balíku nekomunikačních služeb jsou služby EUSPA, zahrnující službu určování polohy (GNSS, konkrétně EUSPA provozovaný systém Galileo) a službu EGNOS (augmentační systém doplňující informaci k základním službám Galileo nebo GPS sloužící ke zpřesnění lokalizace) a Copernicus (služba satelitního sledování zemského povrchu) [23]. Tyto služby ale nejsou předmětem předkládané studie.

### 2.4.1 Non-3GPP varianty

**Úzkopásmová komunikace**, původně určená pro hovorovou službu silovým a krizovým složkám, nouzovou komunikaci a pod se časem rozšířila o komerční využití v lodní dopravě letectví a profesionální využití v odlehých oblastech. Pro integraci do FRMCS obecně nejsou vhodné z několika důvodů:

- Specifické služby, jako je hovor různých kategorií nebo přenos textových zpráv, využívají specifické protokoly slučující jednotlivé protokolové vrstvy, čímž jsou nekompatibilní s architekturou FRMCS, striktně oddělující transportní, servisní a aplikační vrstvy. Specifické protokoly nemusí plnit všechny na FRMCS kladené nároky, jako je podpora QoS, resp. preempce služeb, autorizace uživatelů a MT, zabezpečení přenosu (např. pro ETCS), požadavky na latenci apod. Takové služby mohou existovat jen vně FRCS, připojené odpovídajícími bránami.
- Úzkopásmový transparentní paketový přenos dat není použitelný jako transportní vrstva pod servisní vrstvou FRMCS/MCX, protože její přenosová kapacita není dostatečná ani pro režijní datové toky, jakými je signalizace (řídící rovina) IMS/MCX nebo nadbytečnost šifrování.
- Série projektů ověřujících vhodnost satelitních systémů pro železniční využití zatím prokázala nedostatečnou dostupnost služby na jedoucím vozidle, způsobovanou zastíněním terénními útvary a zástavbou, a to i pro silně úzkopásmové systémy jako GNSS.

**Širokopásmový satelitní přístup** je běžně nabízen jako internetový přístup B2C s rychlostmi do 150Mb/s s obvyklými omezeními u tohoto typu služby – kontrakty na dobu určitou, FUP po dosažení datového limitu (řádu desítek GB měsíčně) [13]. Služby jednotlivých poskytovatelů se liší rychlostí, latencí, stabilitou a samozřejmě tarifními podmínkami. Poskytovatelů je poměrně málo - (pro Severní Ameriku) Starink (LEO), Viasat a Hughesnet (GEO). Využití tohoto typu satelitní komunikace v rámci FRMCS brání

- naprosto minimální, pro MCX/FRMCS nedostatečné prostředky řízení služby (řízení relace, podpora QoS, zabezpečení).
- využití pevně směřovaných parabolických antén o až 0,75m [31], které nejsou instalovatelné na železniční vozidlo. Přenos s nejvyšší pravděpodobností není připraven na rychlé úniky, případně dopplerovské jevy, způsobené pohybem MT a zastíněním terénními útvary a zástavbou, stejně jako u úzkopásmových přijímačů.

## 2.4.2 Satelitní komunikace v rámci 5G

Satelitní komunikace v rámci 3GPP byla rozpracována již od studií Rel14 a prvních standardů Rel15 především jako alternativa pozemní RAN (4G LTE a 5G NR) pro oblasti nepokryté nebo pro které je pozemní pokrytí neekonomické (např. řídké osídlené) a jako spoje s vyšší resiliencí než pozemní infrastruktura, mj. pro kritické komunikace [12]. V podobě, v jaké je postupně od Rel17 standardizována [14], plní požadavky na mobilní komunikaci IMT-2020 podle ITU-R. Uplatnění satelitního přístupu pro kritické (MCX) služby je připravováno od nejbližší Rel19. Přínosy satelitní komunikace se očekávají především pro kritické služby a průmyslové aplikace, vyžadující souvislé pokrytí. V rámci standardů UIC FRMCS FRS a SRS ji tedy lze považovat za jednu z variant přístupu 3GPP a měla by tedy být využívána jako začleněná do 5GS, v reálné implementaci na vozidle jako satelitní radiový modul FRMCS GW s přímou komunikací na satelitní převaděč.

Další use-case jako satelitní přípojka (backhaul) pozemní gNB, satelitní přístup pro IoT, reléování satelitního provozu mezi MT, služby šíření (broadcast / multicast) obsahu, podpora nesouvislého družicového pokrytí, Edge Computing na satelitu a provoz se směřováním mezi MT přímo na satelitní gNB (nepoužitelnou pro nadřazenou servisní vrstvu IMS/MCX) (vše Rel18) nejsou pro využití v rámci FRMCS relevantní. Stejně tak s ohledem na povinné začlenění GNSS lokalizace do FRMCS nejsou potřeba mechanismy umožňující i připojení MT bez její podpory, plánované od Rel19.

Standardizační práce 3GPP se týkají obecněji „nepozemních“ sítí (Non-terrestrial Networks, **NTN**) jsou sítě s komunikačními prostředky umístěnými na satelitech s různým typem (výškou a tvarem) oběžné dráhy, ale také umístěné na bezpilotních leteckých prostředcích těžších nebo lehčích než vzduch (**HAPS**) operujících ve výškách 8 – 50km. V rámci FRMCS, rozsahu frekvencí FR1 (0,4 – 7,1GHz) mají význam především satelity s nízkou oběžnou dráhou (**LEO**, případně velmi nízkou oběžnou dráhou **VLEO**) 500 – 2000km pro svou malou latenci a geostacionární systémy (**GEO**) s oběžnou dráhou ve výšce 35 768km pro svou stacionární polohu nad obsluhovaným územím.

Ve studiích 3GPP [12] a následně v projektu SATIS5 [14] byly rozpracovány architektury s přístupovou linkou mezi MT, družicí (převaděčem na HAPS) a pozemní základnovou stanicí (gateway) ve dvou variantách

- bez regenerace signálu (**transparentní spoj**, bentpipe), při kterém je signál na satelitu zpracován jen analogově (filtrace, změna frekvence, zesílení), kde v rámci 5G NR architektury pracuje jako DU nebo RRH. Tento typ spoje je používán především u GEO satelitů a do Rel17 byl jediný rozpracovaný do konkrétních standardů.
- Alternativou je **regenerativní spoj** (netransparentní), kde na satelitu kromě předchozích analogových operací dochází k demodulaci a dekódování signálu, jeho přepínání nebo směřování a opětovnému zakódování a modulaci a satelit vykonává funkce plnohodnotné gNB (DU i CU). Tento typ je využíván především pro LEO spoje v pásmu S (1 – 6GHz), kde dovoluje potřebnou retranslaci spojů (Inter Satellite Links, ISL) mezi satelity sdruženými v konstelacích o velkém počtu, z něhož jen část má přímou viditelnost z pozemní stanice (GS), tvořící bránu do pozemních sítí. Do standardů 3GPP bude plně zakotvený od Rel19.

Pásmo do 7,1GHz (v rozsahu FR1), určená pro využití ve standardu 3GPP a aplikovatelná na železniční komunikace shrnuje tabulka 6 Všechna tato pásma jsou duální s provozem FDD:

Tabulka 6 – Pásmo určená pro železniční satelitní komunikaci

Označení	Rozsah frekvencí UL / DL	Podpora 3GPP	Aktuální přidělení v ČR	Poznámka
n256	1980 – 2010MHz / 2170 – 2200MHz	Rel17	Pohyblivá družicová služba IMT, 2x 15MHz, podružné využití radarovými systémy	v těsné blízkosti pozemního pásma n1 (2100MHz), přednostně pro HAPS (nízké elevace)
n255	1626,5 – 1660MHz / 1525 – 1559MHz	Rel17	Pohyblivá družicová služba, podružné využití úseků 1 – 20MHz různými službami včetně necivilních, v downlinku přednostní využití námořní nouzovou komunikací (GDMSS)	rozšířený kanál 30MHz od Rel18
n254	1610 – 1626MHz / 2483,5 – 2500MHz	Rel18	Pásmo přednostně využívané pro leteckou navigaci, sdílené s dalšími službami, downlink přednostně pro průmyslové, vědecké a lékařské využití	downlink v těsné blízkosti pozemního pásma n7 (2600MHz)

Studie 3GPP [12] a do větší hloubky následně testy v projektu SATis5 [14] odhalily i hlavní technické problémy spojené s integrací satelitních spojů do 5GS:

- Radiový signál u všech satelitních spojů více podléhá vlivům atmosférických dějů při průchodu troposférou (pro frekvence nad 6GHz a nízké elevace) nebo ionosférou (do 6GHz).
- Buňky pokrytí satelitním signálem jsou mnohonásobně větší než pozemní a pokrytí je tak daleko nerovnoměrnější než u pozemní 5G NR. Buňky mohou mít rozsah přesahující hranice státu nebo konkrétní sítě a jedna buňka tak může náležet k několika 5GC s různými komerčními nebo i legislativními podmínkami využití. Kvůli těmto omezením musí být velké oblasti typicky rozdělené na oblasti menší. Ve fyzické vrstvě je rozdělení reprezentováno vyzařovacími laloky, v logické konfiguraci mapovanými virtuálními buňkami s rozměrem podobným buňkám pozemních systémů, což usnadňuje napojení satelitní RAN na 5GC, stejně jako standardy požadovaná pevná tracking area.
- Využití GEO satelitů je náročné především na řešení fyzické vrstvy spoje. Kvůli velké vzdálenosti spoje pracují s minimální odstupem signálu od šumu (SNR) a stejně jako u non-3GPP spojů vyžaduje satelitní transceiver pevně směřovanou parabolickou anténu, která není instalovatelná na železniční vozidlo. Přenos není schopen kompenzovat rychlé úniky, způsobené pohybem MT. Spoje na GEO satelity se proto nevyužívají pro přímé spojení s MT, ale pro napojení (backhaul) sekundárních pozemních gNB.
- Vysoká latence spojů (u GEO spojů několika desetin sekundy) jednak nevyhovuje některým typům služeb, ale vyžaduje i adaptaci některých vnitřních řídicích mechanismů sítě, popsanych dále.
- U ostatních typů satelitů se jejich pozice oproti zemskému povrchu mění v čase a tento (předvídatelný) pohyb musí být různými prostředky kompenzován, aby byly minimalizovány jím vynucené handovery. Pokrytí satelitním vysílačem je buď pohyblivé (spolu s pohybem satelitu) nebo je pokrytá oblast stabilizována pomocí formování paprsku během pohybu satelitu nad obzorem. Řízení přenosu s ohledem na pohyb družice, pokrytí MT konkrétním vysílacím lalokem, do kterých je pokrytá oblast rozdělená, vyžaduje **znalost polohy MT**, který ji musí zjišťovat prostředky mimo vlastní satelitní systém. Zdrojem polohy je podle aktuálních standardů zásadně služba GNSS s požadovanou přesností cca 2km, od Rel18 ověřovanou samotným 5GS s přesností 5-10km pomocí měření zpoždění. Satelitní terminál takto určuje nejen svoji polohu, ale i další parametry přístupového satelitu (dráhu družice a časový předstih), potřebné pro ustavení spoje s náhodným přístupem k médiu (MAC), směrování provozu vůči 5GC (výběr PLMN) a jeho účtování, podporu nouzových služeb, typicky závislých na poloze, shodě s místní legislativou apod.
- Satelity LEO se navíc pohybují vůči povrchu vysokými rychlostmi, které vnášejí další efekty – dopplerovský posuv frekvence a rychlé změny zpoždění.
- Všechny popsane důsledky větších vzdáleností a pohybu družic vyžadují **protokolová rozšíření** hlavních protokolů radiového interface – vrstvy Medium Access Control (MAC), Radio Link Control (RLC) ve fyzické vrstvě, a Packet Data Convergence Protocol (PDCP) o doplňkové informace o pozici MT a dráze satelitu, rozšířenou identifikaci buňky, komplexnější řízení handoveru, modifikované časování HARQ nebo řízení vysílacího výkonu, ošetřující důsledky vzdálenosti a pohybu družice jako je vysoká latence nebo dopplerovský posuv frekvence. U spojů terminovaných na MT musí všechna tato rozšíření podporovat přímo MT.
- Důsledkem požadované mobility mezi satelitním a ostatními druhy 5G přístupu jsou i doplnění některých zmíněných prvků (např. rozšířená lokalizace satelitních buněk v seznamu sousedních buněk) do protokolů pozemní 5G NR. Při využití satelitní komunikace v rámci FRMCS budou muset být tato doplnění promítnuta do jeho technických standardů a podporována MT na vozidlech případně i ostatních uživatelů.

Na rozdíl od komunikace RMR satelitní přístup nebude systémem ve vlastnictví / provozu IM, ale bude nakupován jako služba od **komerčních nebo veřejno-právních subjektů**, krajní variantou je využití satelitních spojů vázaných na služby **cloudu**, jejímž příkladem jsou pozemní stanice Amazonu AWS-GSN na území USA, zapojené do projektu SATis5 [14].

Satelitní služby integrované do 5GS však aktuálně nejsou na trhu dostupné. Technologie je stále ve fázi pilotování a zkoušek v rámci různých programů soustředěných kolem demonstračního programu SATis5, začleněného pod projekt ESA ARTES [32], kde železniční aplikace spadají pod use-case satelitního připojení pro pohybující se MT (jako vlaky a speciálně VRT) [11], řešeného v 3GPP od Rel16, resp. pokročilá širokopásmová mobilní komunikace (Enhanced Mobile Broadband, eMBB - Communications on-the-Move, COTM) nebo use-case 1 komunikace s vysokou spolehlivostí (High Reliability Communications, HRC, demonstrovaný s využitím komerční GEO družice ASTRA 2F provozované operátorem SES) [14]. Poslední use case váže na vícenásobnou konektivitu přes pozemní i satelitní síť, využitelnou rovněž pro navýšení kapacity nebo load balancing mezi sítěmi. Plánované komunikace prvků infrastruktury (aplikace URS 6.10 a 6.12 viz kap.1.1) reprezentuje use-case masivní komunikace mezi stroji (Massive machine type communications, mMTC) - lokální služby internetu věcí (Local area IoT services).

Příkladem satelitního systému provozovaného částečně veřejno-právním subjektem – přímo EU je **IRIS<sup>2</sup>** (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite) budovaná za účasti ESA, EUSPA a soukromého sektoru reprezentovaného konsorciem operátorů SES a Eutelsat [17] jako smíšená s využitím LEO MEO i GEO satelitů, určená **především pro využití vládními institucemi** a silovými složkami v rámci EUSPA GOVSATCOM [15]. Toto její určení se promítá i do technických charakteristik – poskytování především úzkopásmových služeb, silně zabezpečených kvantovou kryptografií EuroQCI. Nicméně v systému mají být v maximální míře **uplatněny principy 5G NTN** a její pozdější komerční část počítá s fixními i mobilními službami širokopásmového přístupu včetně služeb pro odvětví dopravy (zatím blíže nespecifikovaných), komunikačních propojů pro B2B a napojením na cloudové služby [16] Služby pro vládní instituce (Hardgov) mají dosáhnout plného provozu a celosvětového pokrytí v r.2027.

Návaznost satelitního přístupu ve všech uvedených variantách na typicky IM vlastněné 5GC bude odpovídat schématu podle kap.2.3.1. Sdílení prostředků satelitní RAN by mělo podobně jako u pozemních sítí MNO (kap.2.3) být přednostně řešeno slice určeným pro využití železnicí nebo alespoň roamingem. Rizika využívání satelitních spojů pro IM jsou pro různé typy propojení s MNO podle kap 2.3.1 následující:

- Provozovatel satelitní sítě poskytující pouze službu (vlastní SIM) nebo roaming může zásadně změnit obchodní podmínky provozování zejména cenu služby, která i tak je / bude několikanásobkem ceny analogických služeb pozemní sítě
- Zahraniční provozovatel satelitní sítě nemusí nabídnout sdílení nebo roaming za přijatelných obchodních podmínek nebo vůbec
- Provozovatel satelitní sítě poskytující roaming nebo spolupracující na MOCN může měnit technické podmínky – rozsah rezervovaných prostředků systému během jeho rekonfigurací, upgrade na verze standardu, které neodpovídají požadavkům železnice nebo mění podmínky za kterých byly různé prvky komunikačního systému certifikovány.
- Dostupná komerční satelitní RAN nemusí svými parametry odpovídat požadavkům železničních standardů zejména na souvislost pokrytí (zejména pro LEO sítě jsou zatím aktivovány jen zlomky cílového počtu družic), řízení QoS (včetně preempce) a zabezpečením.
- U každé služby bude nutné individuálně posuzovat dosahované latence. V přístupu přes GEO satelity testy na polygonu SATis5 ukázaly hodnoty přes 200ms, nevyhovující limitům pro hlasovou službu a řízení komunikace (signalizaci) podle FRMCS SRS. Vyhovující hodnoty lze očekávat jen u služeb založených na LEO satelitech. Propustnosti spoje lze naopak při šířce kanálu 15 – 30MHz a dosahovaných spektrálních hustotách podle [32] očekávat přes 10Mb/s, tedy srovnatelné s propustnostmi RMR pásem pozemního systému.
- Stejně jako u úzkopásmových systémů a GNSS lze očekávat vysoký vliv zastínění terénními útvary a zástavbou, které mohou znemožnit využití satelitních spojů v městském prostředí a prostorách stanic.
- Specificky v ČR je pro tento typ satelitní komunikace vyčleněno jen pásmo n256 bezprostředně sousedící s pozemním mobilním pásmem n1. Využití obou pásem na vozidle nebude z důvodu nedostatečného oddělení možné. Bude nutné zmapovat situaci v sousedních zemích / sítích, zda bude toto pásmo využíváno i tam a tedy interoperabilní.

## 2.5 Non-3GPP technologie

Další standardy rádiové komunikace, potenciálně využitelné nebo historicky využívané pro podporu železničního provozu, zahrnují úzkopásmové pozemní rádiové přenosy analogové nebo digitální, přenosové technologie zahrnované pod souborné označení WiFi a satelitní spoje (non-3GPP typu), již samostatně rozebrané v kap.2.4.1.

**Perspektiva začlenění úzkopásmových systémů do prostředí 5G / FRMCS je velmi nízká:**

- Analogové systémy jsou bez dalších zásadních opatření (specifické brány) s digitálním / paketovým prostředím neslučitelné. Přínos takové složité integrace je minimální, protože analogové systémy poskytují v základu jen hovorovou službu, případně přenos dat rychlostmi do 5kb/s, jenž nemá v prostředí FRMCS využití.
- **Digitální úzkopásmové standardy** jako DMR, P25 nebo TETRA poskytují specifické služby, jako je hovor různých kategorií nebo přenos textových zpráv, k čemuž využívají specifické protokoly slučující jednotlivé protokolové vrstvy a nejsou tak přímo kompatibilní s architekturou FRMCS. Na úrovni servisní vrstvy (MCX) je možné je integrovat přes brány, standardizované v rámci MCX architektury 3GPP (standard 3GPP TS23.283 a navazující), které zajistí i minimální nutné začlenění do mechanismů preempce služeb, autorizace uživatelů a MT, zabezpečení přenosu atd. Hlasové i datové služby mají nicméně výrazně nižší funkcionalitu než u nativních MT FRMCS a pro **nebudou nikdy plně interoperabilní**.
- Úzkopásmový transparentní paketový přenos dat poskytovaný těmito systémy není použitelný jako transportní vrstva pod servisní vrstvou FRMCS/MCX, protože jeho **přenosová kapacita není dostatečná** ani pro režijní datové toky, jakými je signalizace (řídící rovina) IMS/MCX nebo nadbytečnost šifrování.

Systémy **radiového datového přístupu** (wireless access, WLAN), souborně označované jako **WiFi**, jsou systémy standardizované souborem norem IEEE 802.11. Jsou určeny primárně pro pozemní stacionární přístup k paketovým službám na linkové úrovni (LAN), maximálně přizpůsobený navazující pevné síti na bázi standardů Ethernet (IEEE 802.1). Několik generací těchto standardů se vyznačuje teoretickými přenosovými rychlostmi jednotek až stovek Mb/s dosahovanými modulací OFDM nebo podobnou na kanálech širokých 20 – 40MHz [18]. Kvůli takové šířce pásma jsou až na výjimky standardizovány pro pásma v rozsahu 2 – 6GHz (FR2), pro komunikace FRMCS [SRS1.2.0] se konkrétně předpokládá využití WiFi pásem

- 2,4GHz (2,400GHz až 2,4835GHz),
- 5GHz (5,150GHz až 5,350GHz, 5,470GHz až 5,725GHz a 5,735GHz až 5,875GHz) a
- 6GHz (5,945GHz až 6,425GHz).

Díky takto vysokým pracovním kmitočtům, vysoké používané hustotě modulace a z ní vyplývajících vysokých potřebných hodnot odstupu šumu (SNR) a ve srovnání s mobilními sítěmi nízkým vysílacím výkonům pracuje WiFi jak ve vnitřním, tak ve vnějším prostředí s poměrně krátkým dosahem jen stovek metrů. Poměrně vysoké přenosové rychlosti WiFi ve srovnání s komunikací NR v pásmech RMR (kap.2.6) mohou být pro železniční provoz přínosem, využití se ale omezuje na specifické podmínky:

- Při zmíněném krátkém dosahu komunikace WiFi je souvislé pokrytí železniční trati velmi problematické, i když např. komunikační scénáře pro VRT s takovými schémata (realizovanými ale spíše 5G NR v pásmu 3,5GHz) počítají. U konvenčních tratí ale investičně náročná stavební část nebude ekonomicky odůvodnitelná a AP WiFi budou instalovány pouze v místech gNB v pásmech RMR. **Pokrytí** tak bude v principu **bodové, nepřesahující 20 % délky trati**, s pravidelnými výpadky spojení řádu desítek sekund. Takové komunikační prostředí **není použitelné pro kritické aplikace**, a i aplikace nekritické musí být na takový režim připraveny (akumulací dat pro přenos, mechanismy rychlé autentizace a autorizace apod). Část těchto úkolů mohou převzít mechanismy řízení WLAN [21], stavící na firemních i otevřených standardech, ale dávkový charakter komunikace v takovém uspořádání zůstane zachován.
- Komunikace WiFi je určena pro stacionární nebo nomadické použití. Uvedený dosah pro vnější prostředí typicky platí pro spoje na přímou viditelnost (LOS). Na spoj proto bude mít **vliv pohyb vlaku** a s ním spojené dopplerovské posuvy signálu a rychlé úniky. Zejména na druhý z efektů není mechanismus přenosu WiFi navržený a výkon spoje bude silně degradovaný. Může proto nastat varianta, kdy AP WiFi budou využitelné jen v místech s nízkou rychlostí vlaku jako jsou **velké železniční stanice, seřadiště a depa**. Kilometrické pokrytí trati v takovém případě bude jen zlomky procenta i když časové pokrytí bude příznivější – řádu jednotek procent. Specifické podmínky komunikace aplikací uvedené výše budou v takovém případě ještě daleko náročnější.

Z uvedeného vyplývá, že komunikace pomocí standardů WiFi na vozidla může mít pro železniční prostředí jen **okrajový význam pro vybrané nekritické aplikace**, z aplikací klasifikovaných podle FRMCS URS (kap.1.1) např. Komunikace ve stanicích a zařízeních služeb (6.8), Telemetrická komunikace vlaku (6.9), Datová komunikace pro odjezd vlaků (6.18) nebo Přenos archivů CCTV (6.22).

## 2.6 Plnění komunikačních nároků

Komunikační potřeby pro soubory aplikací předpokládané pro migraci a pro cílový rozsah kritické komunikace po FRMCS vyčísluje např. [5] na základě modelu UIC z roku 2018. Podobné údaje v užším rozsahu – pro základní aplikace, migrované z GSM-R – hlasové služby, ATP/ETCS a ATO (do GoA2) udává i [8] Potřeby byly vyčísleny ve 4 variantách, ze kterých jsou pro účel této studie vybrány jen některé:

- **Pkg #2** - plný cílový soubor aplikací podle [5] včetně kritického videa, který sice stále není úplný ve srovnání s plnými požadavky URS (viz kap.1.1), ale pokrývá dobře tu jejich část, která je navazujícími standardy UIC dostatečně definována a je tedy předmětem reálného zájmu dopravců a IM. Teoreticky v [5] uvažovaný plný soubor bez kritického videa je sice zvláštní

tím, že jediný vykazuje vysokou nesymetrii ve prospěch UL a optimální by pro něj bylo využití přenosu s TDD s možností volby poměru UL/DL 90:10, tedy v pásmu 1900MHz, není ale součástí nejpravděpodobnějšího scénáře Pkg #1R > doplnění videa kritického videa > rozšíření na Pkg #2. Pro ten není asymetrie poskytovaná pásmem 1900MHz TDD až tak významná, lze ji ale (s nastavením jiného poměru, např. 70:30) využít např. pro podporu cílového souboru Pkg #2.

- **Pkg #1** - soubor aplikací požadovaný podle [5] již během migrace z GSM-R,
- **Pkg #1R** – tentýž soubor, ale zredukovaný o přenosovou kapacitu pro nejnáročnější aplikaci kritického videa (URS kap.5.27). Oproti odhadu potřeb stávajícího souboru provozovaného na GSM-R (hlasové služby, ATP/ETCS a ATO do GoA2) podle Annexu [28] je přibližně dvojnásobný, protože i bez videa zahrnuje aplikace dnes provozované mimo GSM-R (nouzové volání do veřejné sítě, dálkové řízení hnacích vozidel, základní telematiku vozidel).

Tabulka 7 porovnává tyto potřeby s dostupnými přenosovými kapacitami 5G transportu, vyčíslenými simulacemi v [3]:

- **Požadavky na přenosovou kapacitu** jsou vyčísleny pro jednotlivý vlak a pro buňku RAN. Parametry provozu (pro různé uvažované segmenty průměr buňky RAN 8km a hustota 0,33 až 0,67 vlaků na km, tj. 2,6 až 5,4 vlaku přihlášeného k jedné buňce) přibližně odpovídají některým variantám simulací, slouží ale pouze pro výpočet celkové potřebné kapacity buňky a požadavky jednoho vlaku neovlivňují.
- **Simulované přenosové kapacity** naopak na průměru buňky a počtu vlaků v ní přihlášených silně závisí, počty vlaků připadající průměrně na buňku při simulaci jsou proto v tabulce uvedeny. Hodnoty vybrané pro simulaci ale dobře odpovídají realitě na síti SŽ, jak byly detailněji vyčísleny např. pro účely studie [25]. Tam hustoty provozu dosahují blízké hodnoty 0,4 vlaku na km, a i průměry buněk ISD jsou v dobré shodě – 4 – 9km pro GSM-R (pásmo 900MHz), navrhované hodnoty pro 1900MHz pak jsou 1,8 – 4,9km.

Pro hodnoty dostupné přenosové kapacity použité v porovnání dále platí:

- Z výsledků simulace jsou pro porovnání vybrány hodnoty 50% percentilu rozložení přenosové rychlosti, stanoveného pro velký soubor vlaků, pohybujících se simulovanými buňkami. Dá se očekávat, že (pohybující se) vlak bude mít aspoň takovou přenosovou rychlost k dispozici v polovině času jízdy. Pro úplnost jsou uvedeny i hodnoty na okraji každého typu buňky, reprezentované v simulacích 5% percentilem. Průměrné hodnoty přenosové rychlosti, které by byly relevantnější pro výpočet přeneseného objemu dat, publikované výsledky simulací nezahrnují.
- Dosažitelné rychlosti jsou všude brány pro nastavení s maximálním povoleným vysílacím výkonem (uplink až 31dBm, downlink 1900MHz 63dBm, downlink 900MHz 46dBm). V místech, kde budou podmínky pokrytí příznivější, lze vysílací výkon downlinku snížit, výkon uplinku bude snížen automaticky povinným řízením.
- Ze simulovaných variant MIMO byly pro porovnání vybrány ty, které jsou podle [8] realizovatelné na vozidlech v souběhu s GSM-R s nejvyšší pravděpodobností. Omezení je zde především na straně vozidla, kde z prostorových důvodů nelze předpokládat více, než 2 antény, z toho v rámci standardů Rel18 pouze jedna vysílá. Schémata MIMO jsou proto omezena na 1xN pro uplink a Nx2 pro downlink. Protože simulace v [3] ukázaly minimální přínos konfigurací Nx8, je i počet antén na gNB omezen na 4. Výsledně jsou proto konfigurace MIMO vybrané pro odhad dosažitelných propustností 1x4 pro uplink a 4x2 (případně 2x2, kde dává lepší výsledky) pro downlink.

Tabulka 7 – Porovnání potřebných a dostupných přenosových kapacit v pásmech RMR

Potřebná kapacita pro jednotlivý vlak	Vlaků/buňku	Uplink [Mb/s]	Downlink [Mb/s]
Potřebná kapacita Pkg #1R pro jednotlivý vlak	do 6	0,19	0,2
Potřebná kapacita Pkg #1 pro jednotlivý vlak	do 6	3,49	3,5
Potřebná kapacita Pkg #2 pro jednotlivý vlak	do 6	7,42	4,38
<b>Dosažitelné kapacity v pásmu 1900MHz</b>			
v otevřené krajině, ISD 8km	4	1,3 – 2,2/2,3*	0,2*/1,2 – 3,3
na okraji takové buňky	4	0,4 – 0,8/1,4*	0,2*/0,8 – 1,2
v otevřené krajině, ISD 4km	2	4,3 – 5,4/10,0*	1,2* – 6,0
na okraji takové buňky	2	2,9 – 3,3/6,2*	0,4* – 1,8
v městském prostředí (zástavbě), ISD 2km	2	1,4 – 4,6/8,6*	0,4*/2,2 – 8,7
na okraji takové buňky	2	0,5 – 1,6/2,9*	0,3*/1,3 – 3,5
<b>Dosažitelné kapacity v pásmu 900MHz</b>			
v otevřené krajině, ISD 8km	4	2,1 – 2,5	2,2 – 3,0
na okraji takové buňky	4	1,0 – 1,6	1,1 – 1,4
v městském prostředí (zástavbě), ISD 4km	4	0,7 – 1,7	1,0 – 2,7

na okraji takové buňky	4	0,2 – 0,4	0,4 – 1,1
v městském prostředí (zástavbě), ISD 2km	2	2,5 – 4,6	2,6 – 6,1
na okraji takové buňky	2	1,6 – 3,3	0,8 – 2,1

Přestože hodnoty dosažitelných přenosových rychlostí vykazují při různých metodách simulace velké rozptyly, jsou z tabulky patrné následující závěry:

- **V počáteční fázi migrace**, bude FRMCS schopné s vysokou pravděpodobností poskytovat **potřebnou kapacitu za všech provozních okolností** pro aplikace v rozsahu dnes podporovaném GSM-R (tj. s požadavky pod úrovní Pkg #1R), ve kterém IM včetně českého plánují migraci provést. To platí oproti obecnému očekávání i pro buňky 1900MHz s ISD 8km, tedy provoz 1900MHz na nezahuštěné síti gNB.
- Už ale s **nasazením prvních aplikací kritického videa** (Pkg #1) lze očekávat omezení na okrajích buňky, projevující se u jedoucího vlaku zahlcováním a nestabilitou spoje, v lepším případě kolísáním latence přenosu v časových intervalech, které pro využívající aplikaci nebudou akceptovatelné. Situace bude horší v pásmu 900MHz, kde ani síť gNB s ISD 4km, tj. zahuštěná proti GSM-R, nemusí tyto požadavky naplnit, především v uplinku. V pásmu 1900MHz lze vhodným nastavením multiplexního poměru DL/UL kapacitu optimalizovat, krajní simulovaný poměr 90:10 (hodnoty v tabulce označené \*) ale zase snižuje neúměrně garantované kapacity v downlinku a není tedy univerzálním řešením. Příchodem dalších aplikací, reprezentovaných Pkg #2 se situace dále zhorší a splnit požadavky bude možné jen ve speciálních případech (v tabulce pole s podtiskem). Řešením pak bude jedině rozdělení komunikace do více pásem s využitím technik Multipath / Application specific path selection podle [30], tj. existence překryvné sítě v obou pásmech RMR nebo přechod části provozu na síť MNO, a to i kritického, protože Pkg #2 z nekritických aplikací zahrnuje jen telemetrii a dálkové řízení technologií ve vlaku (URS kap.6.9 / 6-11). Doplnění vybraných pásem MNO do specifikací FRMCS (především TOBA) musí proběhnout ještě v rámci V3 FRMCS, protože pro podporu kritických aplikací musí být jejich využití interoperabilní.

# 3 Možné migrační scénáře

Nutnost i časový rámec migrace existujících mobilních železničních komunikací jsou dány ukončením podpory GSM-R po roce 2035, kdy podle [1] budou největšími problémy udržení kvalifikace personálu a pořízení / udržení náhradního HW pro zajištění jeho provozu. Přitom základní kameny pro nástupnickou technologii FRMCS – přiděl vyhrazených pásem (RMR) doporučením ECC 20/02 a aktualizace TSI CCS, zahrnující standardy FRMCS V1 v roce 2023 se považují za položené.

Postupy migrace jsou podle [7] ve shodě s výsledky diskuse se zástupci železničního sektoru omezeny následujícími podmínkami:

- Služba GSM-R musí být dostupná po celou plánovanou dobu přechodu v oznámeném rozsahu (ukončení a/nebo zásadní omezení provozu musí IM oznámit dotčeným dopravcům v poměrně dlouhém, legislativně v TSI CCS daném předstihu) při zachování kvality i původního pokrytí.
- Podíl vozidel komunikujících v konkrétním standardu je vždy vyšší než podíl tohoto standardu v infrastruktuře. To platí jak pro nasazovaný systém FRMCS, tak pro nahrazovaný GSM-R. Důsledkem toho je, že při časovém překryvu migrace vozidel a migrace infrastruktury bude potřeba určitý podíl vozidel komunikujících v obou standardech.
- Komunikace standardem FRMCS může sdílet pásmo 900MHz s provozem GSM-R (detaily jsou rozebrány v kap.2.1), může být nasazena v pásmu 1900MHz při ponechání provozu GSM-R v pásmu 900MHz v plném rozsahu až do jeho ukončení (varianta detailně diskutovaná v kap.2.2), mohou být nasazeny různé kombinace obou postupů, využívající případně dočasně nebo trvale pásma MNO i pro kritické aplikace.
- Délka migrační periody je jak na straně IM (výstavba pozemní části systému), tak na straně dopravců (instalace nových palubních částí systému) ovlivněna komerční dostupností potřebných komponent, instalačních stavebních a dílenských kapacit, možným objemem / dostupnými zdroji financování a provozně akceptovatelným rozsahem výluk, resp. odstávek vozidel pro nutné úpravy. V prvním případě je mj. rozhodující, nakolik lze využít již existující pasivní infrastrukturu (stavební část systému); ve druhém jsou významnou položkou finanční a časové náklady na schvalování typových změn, které instalace vyžaduje a s přechodem schvalovacích proces na ERA nejspíš dále porostou. Některé ze jmenovaných faktorů jsou vzájemně závislé, např. pořizovací ceny typicky rostou se zkrácením požadovaných termínů pod určitou mez, pokud jsou takové termíny vůbec věcně splnitelné.
- Tempem zavádění (nebo nárůstu potřeb) nových aplikací, které již nelze systémem GSM-R, resp. jinými stávajícími komunikačními prostředky z různých důvodů komunikačně pokrýt. To sice platí pro výkonnosti, resp. neinteroperabilní aplikace (kap.1.1), nicméně ty předmětem migrace mezi GSM-R a FRMCS nebudou a budou do systému FRMCS integrovány až v dalších etapách,
- Legislativní podmínkou je splnění požadavků TSI CCS Annex I §7.3.1.2, podle kterých musí být ukončení provozu na jednotlivých úsecích oznámeno IM **zápisem do RINF s pětiletým předstihem**.

Preferovaná délka migrační periody u každého subjektu závisí na preferované nebo možné skladbě nákladů:

- Z hlediska **investice** je výhodnější spíše **delší doba**. Objem investice na jednotlivé roky může být různými faktory omezen a pořizovací náklady na technologie jejich instalaci a zprovoznění a případně stavební část se zkracováním termínů výstavby rostou díky reakci výrobců a dodavatelů na převis poptávky, vyšším čerpáním omezených instalačních kapacit apod. U výbavy HV k tomu přistupuje větší podíl obnovovaného parku během delší migrace, kde cena komunikační výbavy nových HV se podle běžných postupů do nákladů na výměnu technologie nezapočítává.
- Z hlediska **provozních nákladů** je výhodnější **doba kratší**. Je to výrazné zejména u těch subjektů, které v jednotlivých scénářích budují a postupně spouštějí do provozu svou část v předstihu a po zbytek migrace nesou dvojí provozní náklady staré i nové technologie.
- **Dřívější začátek i konec migračního období jsou výhodné pro obě strany**. Jednak se během útlumu technologie GSM-R na straně dodavatelů po roce 2030 očekává významný růst provozních nákladů GSM-R (především nákupů / předzásobení a skladování náhradních dílů, služeb podpory od výrobců), navíc se u sítí, ve kterých se začátkem migrace plánované pokrytí systémem GSM-R nebude dokončeno, přidává úspora nenávratně investice do krátkodobě provozovaných součástí GSM-R, u jejichž většiny se nedá použití v rámci FRMCS předpokládat.

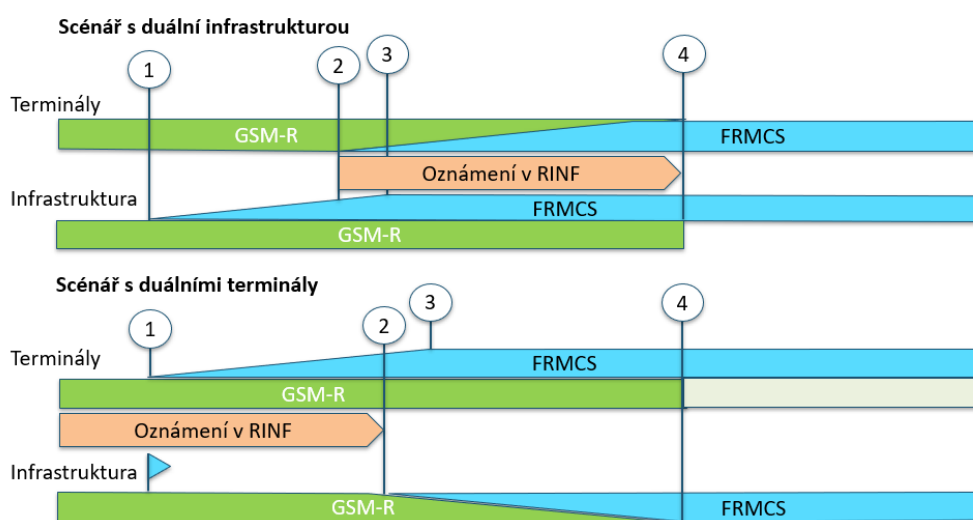
## 3.1 Teoretické scénáře

Teoreticky byly možné scénáře studovány na popud ERA už v roce 2015 [2], tedy v etapě, kdy ještě nebyly známy ani základní technické charakteristiky nástupnického systému FRMCS – využívaná pásma, ani detailnější architektura. Ekonomickým modelem byly oproti „nulové variantě“ vyhodnocovány různé varianty dvou základních postupů migrace:

- postupu s relativně dlouhým (v několika variantách) **překryvem obou systémů na infrastruktuře**, během kterého dopravci postupně implementují novou technologii na vozidlech, případně dalších terminálech vázaných na pracovníky (mobilní ruční) nebo infrastrukturu (stacionární);
- postupu s **využitím duálních terminálů**, při kterém je technologie infrastruktury obměněna (v lokálním nebo celosíťovém měřítku podle konkrétní varianty) v krátké době (v podstatě přechodem z jedné na druhou). Dopravci při ní s předstihem vybaví svá vozidla terminály schopnými komunikovat v obou standardech a jsou tedy schopni je využívat na modernizované i nemodernizované části sítě. Do této základní varianty spadá i varianta s obměnou technologie terminálů paralelně s infrastrukturou (v krátké době za velmi těsné koordinace s IM), která se dalším vývojem ukázala jako nerealistická.

Oba scénáře jsou studovány jako plošné – na infrastruktuře jsou podle příslušného časového plánu uplatňovány homogenně na všech traťových úsecích. Kromě těchto plošných přístupů k migraci existují i postupy využívající odlišné postupy specificky podle místa. Sem patří např. dokrytí sítě 900MHz ostrovy s gNB 1900MHz nebo přechodové úseky 1900MHz na hranicích domény, jejichž příklady jsou uvedené v kap.2.2 a [7]. Scénáře pro tento účel neobsahovaly přípravné kroky, jako jsou testy na polygonech, pilotní povelky nebo náhrady komunikačních systémů třídy B, které jsou typickou součástí konkrétních scénářů železničních subjektů (viz kap.0).

Obrázek 3 – Základní teoretické scénáře migrace



Teoretický postup **migrace s duální infrastrukturou** zahrnuje tyto kroky:

- 1: Počáteční etapa  
Infrastruktura i dopravci provozně využívají GSM-R. IM v předstihu buduje (v celé nebo na části sítě) systém FRMCS, může jej však spustit do provozu jen v omezeném rozsahu, nutném pro vlastní otestování a přípravu migrace vozidel – pilotování, testování a typové schvalování. Dopravci mohou tuto dobu využít pro obchodní a technickou přípravu následného přezbrojení vozidel (výběr dodavatelů, prototypové zástavby a testování).
- 2: IM spouští do provozu FRMCS v celé nebo na významné části sítě, nicméně infrastruktura GSM-R zůstává v provozu. Nejpozději v tomto kroku musí IM oznámit první termíny ukončení provozu GSM-R podle TSI CCS Annex I §7.3.1.2. Dopravci spouští sériové přezbrojení svých vozidel (a dalších komunikačních terminálů) na systém FRMCS. Náklady na udržení GSM-R v provozu v tomto kroku podle všech předpokladů postupně porostou, tempo růstu se k avizovanému konci podpory v 2035 bude zvyšovat.
- 3: IM dokončuje výstavbu infrastruktury FRMCS, kterou modernizovaná vozidla a terminály využívají bez omezení, podpora GSM-R už na nich není nutná. Náklady na udržení výběhového systému GSM-R u IM v tomto kroku dále rostou.
- 4: Přezbrojení parku vozidel relevantních dopravců je dokončeno, všechna vozidla (další uživatelé) využívají infrastrukturu FRMCS. IM ukončuje provoz GSM-R, protože již není využíváno. CAPEX FRMCS v tomto kroku zůstává na určité úrovni výstavbou / vybavováním dalších tratí, resp. vybavováním nových vozidel

Migrace s **využitím duálních terminálů** se skládá z následujících základních kroků:

- 1: Přípravná etapa  
Infrastruktura i dopravci provozně využívají GSM-R, IM však zastavuje její rozvoj. IM musel s dostatečným předstihem oznámit první termíny ukončení provozu GSM-R podle TSI CCS Annex I §7.3.1.2. Dopravci v tomto kroku v předstihu dovybavují svoje vozidla terminály s podporou FRMCS, resp. přezbrojují na terminály s podporou obou technologií. Během kroku musí proběhnout všechny přípravné fáze pro toto přezbrojení, jako je výběr dodavatelů, prototypové zástavby a jejich typové schvalování. IM pro to musí zajistit minimální podmínky vybudováním pro testy dostatečného pilotního úseku FRMCS.
- 2: Spuštění výstavby FRMCS  
Významná část vozidel je přezbrojena na nový FRMCS. IM začíná zpravidla po částech síť spouštět do provozu FRMCS a ukončuje provoz GSM-R. Možnost uplatnění nepřezbrojených vozidel strmě klesá (podíl vozidel vybavených FRMCS obecně musí být vyšší, než podíl FRMCS v síti IM).
- 3: Dopravci dokončují výstavbu vozidel pro podporu FRMCS, IM pokračuje v přestavbě infrastruktury na FRMCS. V modernizované části sítě dopravci využívají infrastrukturu FRMCS, na kterou jsou již jejich vozidla vybavena. Náklady na udržení výběhového systému GSM-R v tomto kroku podle všech předpokladů postupně porostou, tempo růstu se po avizovaném konci podpory v 2035 bude zvyšovat.
- 4: IM dokončil výstavbu a zprovoznění FRMCS v celém rozsahu sítě a ukončuje provoz GSM-R. CAPEX FRMCS v tomto kroku zůstává na určité úrovni výstavbou / vybavováním dalších tratí.

Podmínky realizace a její výsledky se u obou scénářů liší v mnoha aspektech:

- Různé fáze a podmínky, za kterých **IM avizuje termíny ukončení GSM-R**, jak požadují TSI CCS v Annexu I, §7.3.1.2. V každém postupu migrace musí být časové rezervy pro dodržení požadované pětileté lhůty předstihu oznámení tyto **časové rezervy jsou větší u scénáře s duální infrastrukturou**, ve které přezbrojování vozidel nastává až v dalších krocích. Začátek přezbrojování vozidel před oznámením IM prakticky nelze očekávat, protože dopravci začínají proces migrace pouze s perspektivou zvýšených provozních nákladů na duální výstavbu vozidel. Starší i aktuální průzkumy (kap.3.3) totiž ukazují, že vlastní **motivace dopravců chybí**. Pro scénář s duálními terminály, který je pro dopravce náročnější a časově kritický, musí proto od začátku existovat pobídky, účast na migraci zvýhodňující. Takové pobídky musí mít podobu nejen finanční podpory, ale také pilotních projektů pro testování instalované palubní výbavy FRMCS, které je podmínkou jejího včasného schválení.
- **Dostupnost potřebných komponent** na trhu bude různá pro infrastrukturu a pro vozidla. Přestože součástí přípravy standardu je společné prototypování a testování, výrobci vozidlové výbavy, kteří se těchto kampaní neúčastnili, mohou být ve skluzu s potřebným objemem výroby HW, vývojem SW odpovídajících funkcí a jeho schvalováním. Podmínky pro zástavbu do vozidel jsou daleko různorodější, počet účastnících subjektů a prototypů vyžadujících schválení daleko vyšší a proces významně delší. Riziko nedostupnosti schválených řešení je proto pro dopravce vyšší než pro IM. **Scénář s duálními terminály**, ve kterém migrační postup dopravci zahajují, je z tohoto pohledu minimálně pro ně **vysoce rizikový**.
- Oba scénáře dovolují částečný časový **překryv migrace vozidel a infrastruktury**, čímž může být celý proces migrace mírně zkrácen a dosažena např. úspora na významně rostoucích provozních nákladech nahrazovaného GSM-R. Podíl vozidel podporujících (využívajících) daný způsob komunikace je však významně vyšší než podíl sítě, na které je tato komunikace podporována (využívána). Poměry uvedené v tabulce 8 jsou zjištěny z modelu sítě založeného na náhodném vedení cest různých délek grafem, jehož příklady výpočtových tabulek jsou v příloze 2 studie.
- Scénář s duální infrastrukturou silně závisí na skutečných možnostech **koexistence GSM-R a FRMCS v pásmu 900MHz** (kap.2.1.3), které zatím nejsou definitivně prověřeny. Obě varianty do určité míry omezují pásmo, a tedy i přenosovou kapacitu sítě GSM-R a pro její optimalizaci předpokládají během migrace postupné kmitočtové přeplánování. S tím jsou spojena **rizika** nedostatečné kapacity GSM-R pro zbývající vozidla v tomto standardu a rizika chyb a následných provozních výpadků během zásahů do konfigurace systému. Z tohoto pohledu bezpečnější varianta s nasazením FRMCS v pásmu 1900MHz (nebo v dalších uvažovaných pásmech) je náročnější o úpravy pasivní infrastruktury, které budou v podmínkách ČR nutné (kap.2.2), a také závisí na včasném přidělu dotčeného pásma pro železniční použití.
- Důležitým hlediskem je i možnost **koexistence obou systémů z hlediska umístění** na vozidle, resp. na stožárech infrastruktury (gNB). V obou případech jsou to problémy prostorové (zaplnění prostoru stávajícími ne vždy efektivně využívanými anténními systémy), které nedovolí potřebný odstup úrovní signálů mezi dotčenými systémy a vyžaduje dodatečné prvky selektivity, u stožárů infrastruktury navíc problémy statické únosnosti především při namáhání velkých ploch víceprvkových zářičů větrem. Zatímco problémy stožárů jsou řešitelné jejich výměnou za cenu zvýšených investičních nákladů a prodloužení výstavby, u vozidel ani tato možnost velmi často není
- Představa o možném termínu začátku migrace osciluje díky nejasným termínům dokončení standardizace FRMCS alespoň do baseline 1 (V3) a navazující komerční dostupnosti komponent mezi roky 2029 (připravená investiční rozvaha) a 2032 (pesimistická varianta doporučení ERA). Národní pilotní projekty, ačkoli jsou teoreticky plánovány už do souběhu s celoevropským testováním MORANE 2 od 2025 [37], jsou reálné až v tomto rozmezí, protože pro období před V3 nebudou k dispozici v potřebném rozsahu národních pilotů ani prototypy přestavované pro MORANE 2, natož sériová produkce komponent FRMCS. Časové harmonogramy technické přípravy migrace sítí proto budou velmi napjaté se všemi souvisejícími riziky.
- Dosavadní **postup standardizace** pod velkým časovým tlakem a z něj plynoucí omezený rozsahu budoucích standardů FRMCS V3 nese riziko, že následující verze FRMCS nebudou zpětně kompatibilní a během migračního období (2027 –

2050) se může opakovat situace vzniklá při zavádění ETCS, u kterého vynucená výbava vozidel BL2 instalovaná před r.2020 musí být do r.2030 upgradována na BL3 a její životnost tak bude 13 a méně let.

Tabulka 8 srovnává význam některých z těchto faktorů, resp. hraničních hodnoty u obou hlavních scénářů:

Tabulka 8 – Hlavní rozdíl teoretických migračních scénářů

	Scénář s duální infrastrukturou	Scénář s duálními terminály
Časové rezervy pro oznámení ukončení provozu GSM-R podle TSI CCS	větší	malé až žádné
Dostupnost komponent FRMCS na trhu	důležitější pro IM	kritická pro dopravce
Překryv migrace vozidel a infrastruktury (migrovaná část)	>69 % sítě pro 20 % vozidel	>66 % vozidel při 20 % sítě
Dopad omezení koexistence GSM-R a FRMCS v pásmu 900MHz	zásadní	minimální (bez dlouhodobé koexistence)
Omezení koexistence systémů z hlediska umístění	riziko výměny stožárů gNB pro nedostatečný prostor a únosnost	často neřešitelná prostorová omezení na střeše vozidla

V celkové **preferenci scénářů** je z pramenu [2] i z diskusí vedených v pracovní skupině této studie patrná jasná **snaha IM i dopravců přesunout současný provoz obou technologií na druhou stranu** – zatímco jediná jasně formulovaná preference na straně dopravců byla scénář s překryvem obou systémů na infrastruktuře, 45 % evropských dotazovaných IM se v průzkumu přiklonilo k migračnímu scénáři s využitím duálních terminálů, případně smíšenému pro speciální podmínky. V podmínkách ČR zatím preferuje variantu s jednorázovým rychlým přechodem na FRMCS (tedy variantu s plošnou instalací duálních terminálů na vozidlech), nejen SŽ, ale i MD. Z aktuálního rozboru ale vyplývá, že **scénář s duálními terminály**, časově náročnější na dopravce a kritický z pohledu dostupnosti komponent a schvalování úprav vozidel je **v potřebném časovém horizontu pravděpodobně nerealizovatelný**, zatímco hlavním rizikem pro duální infrastrukturu je jen koexistence obou systémů v pásmu 900MHz.

## 3.2 Migrační plány konkrétních subjektů

Z dostupných pramenů je dostatečně konkrétní jen **migrační plán DB InfraGO [1]**. Ve výchozím stavu je GSM-R u DB InfraGO klíčovým komunikačním systémem zabezpečení (ETCS) a řešením služební hlasové komunikace pro vozidla s BS průměrně po 7,6km, dispečerským pracovištěm připadajícím na 9,2km trati, jedním radiovým terminálem vozidla (kabinové rádio nebo EDOR) a 2,5 ručního terminálu (HHT) připadajícími na 1km trati.

Migrační plán DB InfraGO o 7 konkrétních krocích předpokládá migraci po jednotlivých tratích a jednotlivých aplikacích, což vyžaduje paralelní provoz systémů GSM-R a FRMCS po určité období **a duální výbavu vozidel** pro GSM-R i FRMCS.

- Plán začíná ostrovními pilotními provozy na tratích doposud vybavených analogovým rádiem (1 lokalita, konkrétně testovací polygon SRCC na hranicích Saska a ČR), kde budou společně testovány infrastruktura, výbava vozidel i provozní modely. Pokračovat bude v ostrém provozu na regionálních linkách (2 lokality), kde bude do provozu zapojeno více dopravců a budou optimalizovány procesy plánování, výstavby a provozu součástí FRMCS i samotného železničního provozu v tomto prostředí.
- Dalšími kroky bude nasazení FRMCS paralelně s GSM-R nejdříve na regionálních (1 lokalita) a později na hlavních tratích (2 lokality), kde budou testovány / optimalizovány spolupráce FRMCS a GSM-R a odpovídající provozní postupy. Na hlavních tratích pak přibudou faktory větší hustoty provozu více dopravců a vysokých rychlostí.
- V dalších krocích dojde na rozšíření za hranice sítě DB InfraGO, nejdříve přes jednotlivé hraniční přechody, doposud provozované pod GSM-R. Přibudou tak otázky spolupráce se zahraničními železničními správami a MNO včetně mezinárodního roamingu a provozních postupů pro síť a uživatele FRMCS. V plánu je v tomto kroku i první nasazení ATO GoA2.
- Sedmým a posledním krokem je postupná ostrá migrace jednotlivých tratí postupy odladěnými v předchozích krocích.

Paralelní provoz systémů (resp. náklady na něj) mají být podle možností (opět po jednotlivých tratích) co nejrychleji redukovány a bude snaha co nejdříve realizovat výhody provozu přes FRMCS pro IM i dopravce. Časování jednotlivých činností při přípravě, výstavbě a přechodu provozu na FRMCS se předpokládá následující:

- **Vývoj a zkoušky prototypů** v podmínkách laboratoří výrobců a na vyhrazené testovací dráze (Digitales Testfeld Bahn) jsou již v běhu nezávisle na TSI CCS 2023, rozplánované do začátku 2026.

- **Návrh, schvalování, plánování a výstavba** core sítě a pilotních tratí navazuje bezprostředně na vydání TSI CCS (9/2023) s plánovaným ukončením ke konci 2028. Zahrnuje i přípravu plošné výstavby. S pilotními provozy se počítá v období 2027 - 2028 v návaznosti na vydání TSI CCS 2026 (standardy FRMCS V3).
- Pilotování a výstavba na síti DB InfraGO má začít **přípravou lokalit** (období 2024 - 2025), na ni a na ukončení zkoušek prototypů pak navazuje **realizace core sítě a jejích služeb a výbava pilotních tratí**, obojí plánované opět do konce 2028. Spolu s předchozím bodem tvoří **Fázi 1** migračního plánu DB InfraGO.
- V návaznosti na vydání TSI CCS 2026 (standardy FRMCS V3) rovněž začíná plánovaná plošná výstavba FRMCS a začíná běžet 5leté období pro implementaci FRMCS na straně dopravců (vozidel).
- Vlastní **migrační období** paralelního provozu FRMCS a GSM-R navazuje na úspěšné ukončení pilotních provozů (plán 2029 - 2035). V jeho rámci po uplynutí období pro přípravu na straně dopravců započne postupně **vypínání sítě GSM-R** (plán 2032 – 2035)

Plán DB InfraGO počítá se zapojením sítí MNO pro účely zálohy podobně jak ji zajišťuje dnešní komunikační prostředí GSM-P.

S podobným uspořádáním počítá i Norsko v migračním plánu vypracovaném společně státním Ředitelstvím železnic (Jernbanedirektoratet – ministerský poradní orgán odpovědný za dlouhodobé plánování a koordinaci odvětví) a národním IM Bane NOR. Náklady na tuto variantu v norské síti o 11 000 km tratí a 8000 současných terminálech GSM-R odhaduje na 85mil.€.

Stejně tak **plán francouzské SNCF Reseau** [36] předpokládá náhradu GSM-R už do roku 2035

- na alespoň 97 % své sítě TEN-T vlastní infrastrukturou v pásmech RMR, kde očekává především vyšší dostupnost spojů pro ETCS L2 a pro síť regionálních tratí pomocí FRMCS v pásmech MNO,
- migraci realizovat v letech 2032 – 2035 jednorázovým (teoreticky v noční výluce) přepnutím po oblastech dispečinků (6 oblastí) ve 2 – 3 krocích, tedy v **extrémní podobě scénáře s duálními terminály**. To předpokládá přezbrojení rozhodující části vozidel v krátké periodě 3 – 6 let.

### 3.3 Motivace zúčastněných subjektů

Studie [2] se už v roce 2015 snažila zmapovat motivace, které k migraci povedou u hlavních subjektů reprezentujících železniční provoz – správců infrastruktury (IM) a dopravců. Vypovídací schopnost byla ale omezená, zejména na straně dopravců pro nízký počet respondentů průzkumu, kterým tyto motivace byly zjišťovány.

Motivace subjektů **železničního odvětví v ČR** byla v rámci předložené Studie zmapována dotazníkem s podobnou strukturou. Hlavní odlišností bylo, že minulé migrační projekty v něm jsou namísto zavedení GSM-R reprezentovány zavedením ETCS L2, které mělo menší časový odstup od studovaného období a v předběžných konzultacích bylo vnímáno jako daleko reprezentativnější příklad migračního projektu. Vyhodnocení odpovědí navíc proti původní studii proběhlo s rozlišením osobních a nákladních dopravců, jejichž podnikatelské podmínky a způsoby financování jsou v ČR diametrálně odlišné, a proto lze předpokládat zásadně jiné pohledy na ekonomiku jakýchkoli technických změn včetně zavedení FRMCS.

Výsledky, reprezentované průměrným hodnocením síly motivace ve škále od 1 (marginální) do 5 (nejdůležitější) shrnuje tabulka pro původní soubor respondentů (Evropa) a pro subjekty oslovené průzkumem v rámci této studie (ČR). Hodnoty uvedené v závorce měly u respondentů velký rozptyl nebo malou četnost uvedení a nejsou tedy reprezentativní:

Tabulka 9 – Možné motivace IM a dopravců k přechodu na FRMCS

Aspekt motivace	správci (IM)		doprovci	
	Evropa	ČR	Evropa	ČR
Degradace spolehlivosti instalované báze zařízení	(2)	3	(2,5)	(1,0)
Nárůst nákladů na údržbu	(3)	2	(2,5)	0,5
Perspektiva snížení nákladů	(3)	-	(2,5)	-
Potenciál zavedení nových služeb a aplikací	3	3	(3)	(2,5)
Konec životního cyklu klíčových technologií (konkrétně GSM-R)	4,5	2	(2,5)	2,5
Regulace ze strany EU	4	4	4,5	5
Návaznost na jiné záměry – výstavbu nových tratí, pořízení vozidel, zavedení ETCS apod.	4	2	(3)	0,5

Aspekt motivace	správci (IM)		dopravci	
	Evropa	ČR	Evropa	ČR
Standardizace a komerční dostupnost nových produktů	(1,5)	2	-	-
Jiné důvody, jako jsou <ul style="list-style-type: none"> <li>• národní požadavky</li> <li>• výměna síťové infrastruktury</li> </ul>	(0,5)	-	(1,5)	-

Detailněji lze jednotlivé motivační faktory hodnotit takto:

- **Degradace spolehlivosti instalované báze zařízení** i při jeho regulérní údržbě bude časem důvodem pro jeho fyzickou náhradu, která může být příležitostí pro přechod na nástupnickou technologii. Tato motivace je ale v Evropě shodně IM i dopravci vnímaná jako nedůležitá, v ČR silněji IM než dopravci.
- **Nárůst nákladů na údržbu** se jako motivace kryje s obavou z konce podpory GSM/GSM-R. Kromě rostoucích obtíží s opatřením náhradních dílů zahrnuje i postupný úbytek specialistů na 2G technologii, schopných ji udržovat. Jako motivační prvek je mírná nebo nejistá, u dopravců ČR minimální, protože i uváděný objem nákladů je oproti Evropě nápadně malý.
- **Perspektiva snížení nákladů** se v Evropě liší podle typu subjektu: Zatímco IM očekávají u nástupnické technologie nižší náklady na **údržbu**, než u GSM-R, dopravci doufají v nižší **pořizovací náklady**. Do snížení nákladů na straně IM principiálně patří i možnost sdílet (paralelně vznikající) sítě pro kritickou komunikaci 4G/5G, určené pro záchranné a bezpečnostní složky (PPDR). V ČR tato motivace úplně chybí na obou stranách.
- **Potenciál zavedení nových služeb a aplikací** je vnímán shodně v Evropě i v ČR střední motivace, obvykle jako potenciál lepších (rychlejších) komunikačních služeb, umožňujících IM vyšší provozní využití trati, nových aplikací, které povedou na výrazné snížení nákladů provozu, případně jako šance pro služby a aplikace, které na GSM-R není možné provozovat. Jediné ale uváděné konkrétnější příklady jsou přenesení (kritického) ATO a (výkonnostních) TCMS, diagnostiky apod. z dnes jediné možné komunikace MNO na FRMCS, další možné přínosy už jsou skrývány pod vágní heslo „žádoucí digitalizaci železnice“ [1]. Očekávané aplikace jsou vesměs aplikace nekritické. K nasazení aplikací kritických, řešících bezpečnost, nejsou dopravci motivováni ani objednateli služeb, jen nuceni legislativou a ji provádějícími orgány. U osobních dopravců sem spadá i zájem zajistit nové širokopásmové služby a služby pro cestující, které jsou ale mimo náplň této studie. Některé z těchto aplikací už z různých důvodů větší a/nebo osobní dopravci provozují na technologii 4G LTE MNO. U malých dopravců tato motivace chybí, protože investice do IT spojené s takovými aplikacemi pro ně nejsou rentabilní, rentabilnější je pro ně při menším rozsahu provozu pokračovat ve starších způsobech řízení procesů bez podpory IT. Navíc FRMCS pro aplikace sice zajistí nadstandardní kvalitu komunikací, ale ne levnější provoz a ve svých počátcích pouze v pásmech RMR ani dostatečnou kapacitu (viz kap.2.6). Zjištění vlastního průzkumu v tomto bodě jsou blíže diskutována v kap. 1.1.
- **Konec životního cyklu klíčových technologií (konkrétně GSM-R)** z pohledu IM významně zvýší náklady na provoz a v podstatě znemožní další rozvoj sítě (nasazení na další trati). Z časového hlediska určuje konec předpokládané migrační periody. **Pro evropské IM je jasně vedoucí motivací**, u některých správ posílenou očekávaným koncem provozu GSM (2/2,5G) u veřejných operátorů, u kterých využívají roaming v železniční řídké pokrytých oblastech nebo pro zálohu komunikace. V ČR je jako motivace vnímán slaběji, zejména u IM.
- **Regulace ze strany EU** byla a je vnímána především jako zákonná povinnost implementovat nový systém. Byla **jedinou shodně vysoce hodnocenou motivací** mezi všemi zkoumanými subjekty – IM i dopravci, a to v evropském měřítku i v ČR. V praxi se projevuje jako **legislativní požadavky přenesené** IM na dopravce, kterým hrozí omezení přechodnosti jejich vozidel, doprovázené ztrátou výnosů, poklesem efektivitu provozu, případně sankcemi. Již detailnější studie [5GBB-D] potvrdila, že za těchto podmínek např. není možné vyčíslit benefity obvyklými metodami CBA.
- **Návaznost na jiné záměry**, konkrétně výstavbu ETCS L2, má u evropských IM nejen podobu absence vhodného rádiového nosiče, ale i nedostatečnosti (kapacitní, funkční) stávající instalace GSM-R. V tom případě je upgrade na nástupnickou technologii platnou variantou řešení. U evropských dopravců v tomto bodě převládá jediný zájem – záruky, že nově instalované technologie na vozidlech, zejména nově pořízených, nebude nutné v rozumném horizontu znovu měnit. Subjekty v ČR zprvu uváděly tento prvek motivace slabší než v evropském průměru, nicméně otázky **vazby komunikační technologie na ETCS** a špatná zkušenost se změnami instalované technologie i na nově pořízených vozidlech se v diskusích nakonec **ukázaly jako stěžejní**.
- **Standardizace a komerční dostupnost nových produktů** je v evropském měřítku i v ČR motivace nízká, u dopravců žádná. Minimálně u dopravců v ČR je to opět způsobeno špatnou zkušeností z minulých případů migrace technologií, jako byly přechody od národních rádiových systémů tř. B na GSM-R nebo na zabezpečení provozu ETCS ve výhradním provozu. Kromě problémů s realizací a financováním, popsanych níže, šlo o různé národní přístupy a specifika (např. vyvolané přednostním nasazením GSM-R v příhraničních úsecích v návaznosti na rozsáhlejší výstavbu v sousední síti), které vedly k ne plně interoperabilním implementacím a omezením přechodnosti vozidel.

Přestože respondenti touto studií provedeného průzkumu explicitně neuvedli „jiné“ zdroje motivace přechodu na FRMCS, ve volné diskusi uváděli několik opakujících se faktorů **demotivujících především dopravce** při studované změně technologie, potvrzených i starší **společnou analýzou DB a SNCF** z [1]:

- **Proces schvalování vozidel** – na jedné straně komplexní a administrativně a finančně náročný, na druhé straně devalvovaný tlaky na zkracování a formalizaci ověřovacích provozů, jejichž výsledky pak nejsou reprezentativní a interoperabilitu negarantují. Společná analýza DB a SNCF z [1] sice naznačila řešení v nezávislé připravenosti HW a SW pro FRMCS, kdy HW kompatibilní s FRMCS bude dostupný tak, že bude možné vozidla vybavovat v předstihu, během ostré migrace implementovat jen upgrady SW a migrační období tak u dopravců prodloužit. Podmínkou takového postupu ale je, že SW úpravy bude možné na vozidlech provádět bez recertifikací, což se minimálně v českých podmínkách ukazuje jako nereálné. Otázkou rovněž je, nakolik bude úpravám HW (alespoň modernizaci kabeláže, pasivních prvků a mechanických částí apod.) bránit možná neúplnost specifikací FRMVS i ve V2 a V3.
- Stále fakticky **monopolní postavení výrobců** technologií specifických pro železnici a závislost postupu včetně certifikace na výrobcu vozidla, který může účinně blokovat retrofity zejména malých sérií starších vozidel, o které nemá (komerční) zájem. Přitom integrace nových technologií je náročná na instalační fázi a úpravy vozidla zejména u vozidel starších. K pomalému inovačnímu cyklu výrobců (i přes 7 let), případně úplnému zastavení inovací přistupují **omezené kapacity** projekce, dílen a zkušeben, pravděpodobně nedostatečné pro velký předpokládaný objem prací v krátkém období (2029 – 2035 s prvními odstávkami GSM-R z provozu během 2032) za souběhu migrace prakticky na všech evropských železničních (cca 10000 vozidel ročně). Všechny tyto faktory budou příčinou **cen podstatně vyšších**, než u obdobných komoditních technologií a s nimi spojeného servisu, díky kterým přechod na novou technologii nevychází ekonomicky.
- **Nezajištěné financování** poměrně velkých potřebných investic, především na straně dopravců, které potvrzují i zjištění [1]. Podle zkušenosti dopravců v ČR jsou to **nedostatečné nástroje finanční podpory**, které mají tento problém řešit, ale dopravce nemotivují, protože skutečná úroveň podpory z různých důvodů nedosahuje indikovanou úroveň. Jednou z příčin je i průběžná změna požadavků a předpisů, kdy odběratel není schopen specifikovat požadavek nebo dodavatel nemá hotový produkt. Dojde tak k rozdělení dodávek na etapy, z nichž ty pozdější už předmětem finanční podpory být nemohou a skutečný podíl podpory na nákladech se z nárokových 80 % sníží např. až na 50 %. Podíl podpory je přitom pro ekonomickou průchodnost rozhodující, protože reálné způsoby financování nutí dopravce promítnout vynucené náklady do zdražení služeb, a to je poškozující v konkurenční soutěži – u nákladní dopravy obecně nežádaným přechodem odběratelů na silniční dopravu, u osobní ztrátou kontraktů s veřejnými objednateli dopravní obslužnosti.

Aktuální TSI CCS 2023 stejnou cestou zakládají **nucený přechod na System Version 3.0 (Baseline 4)**, zavedenou jako první FRMCS kompatibilní, která ale zároveň mění funkce zabezpečení (Safety Function). Přitom její komerční dostupnost se nepředpokládá před rokem 2032, do kterého poroste počet provozovaných nebo dodávaných vozidel s podporou starších verzí (k roku 2032 převážně BL 3). Objem vozidel vyžadujících upgrade pak nemusí být v daném období zvládnutelný. Především pro dopravce by proto byly daleko přijatelnější alternativy TSI CCS 2023 s významně menším rozsahem potřebné recertifikace – řešení přidavným funkčním blokem k existujícímu ETCS BL 3 (tzv. FRMCS **adaptérem**) nebo tzv. **light verze**, která realizuje Coordinating function a FRMCS Communication Function podle specifikace TSI CCS 2023, ale nemění funkce zabezpečení a vlastní aplikace ETCS zůstává BL 3 (SV 2.1).

## 3.4 Konkretizovaný postup migrace v ČR

Stejně jako v případě aplikací podporu železničního provozu v kap.1.1 Strategický dokument Národní implementační plán ERTMS [26] neobsahuje žádný bližší plán ani časový rámec přechodu k FRMCS, existuje však pracovní dokument Správy železnic, s.o. zpřístupněný v rámci pracovní skupiny pro přípravu studie, zahrnující zhruba období 2020 – 2040 a předpokládající 10letou periodu souběžné migrace infrastruktury i vozidel. Vstupní podmínky na hlavních tratích ČR je možné podle výsledků [25] a diskusí v pracovní skupině charakterizovat takto:

- Migrace realizovaná pouze v pásmu 900MHz (kap.2.1.3) se obecně považuje za technicky proveditelnou, i když jí výsledky rozboru komunikačních nároků nedávají dlouhodobější perspektivu. Pro tuto variantu se podle [25] část C počítá se stejným pokrytím, jako pro stávající systém GSM-R s průměrnou vzdáleností gNB (ve staničení trati) 3,9km v rámci sítě (z údajů SŽ poskytnutých v průzkumu), resp. až 5,8km v rovinných úsecích hlavních tratí [25] část C.
- Vzhledem k paralelně řešenému pokrytí tratí signálem MNO pro komerční aplikace, pro které se využívají pásma 800MHz (n20) a 1800MHz (n3), je pasivní infrastruktura (stožáry, napájecí přípojky, IP přenosové a komunikační prostředí) z části připravená i pro případné nasazení FRMCS v pásmu 1900MHz za předpokladu, že bude IM a MNO sdílená. Rozhodující jsou pro to prostorové a zátěžové podmínky stožárů, zajišťující montáž nových anténních systémů v potřebné výšce, v rezervě návětrné plochy (náhodného zatížení stožáru) a prostorového odstupu antén pro potřebné odstínění (pro pásma RMR alespoň 2m vertikálně při různých nárocích [24] [6]). Pravděpodobně ne všechny stožáry těmto podmínkám vyhoví (studie [25] např. předpokládá zvýšení stožáru na cca 1/3 stávajících lokalit, což fakticky znamená jejich výměnu).
- Nedostatkem stávající pasivní infrastruktury je vyčerpaná kapacita optické kabelové sítě SŽ, která bude vyžadovat obnovu, s jejímiž náklady citované modely nepočítaly a bude potřebné ji zahrnout do nákladů na úpravy pasivní infrastruktury v poloze optické přípojky s výpichem z DOK na vzdálenosti stovek metrů).

- Pro ČR je oproti dalším zemím daleko silnější vazba plánované migrace FRMCS na již probíhající migraci mezi různými BL ETCS. **Historická zkušenost dopravců** s projekty migrace technologie je přitom **špatná a** příkladem nezvládnuté dlouhodobé (v podstatě permanentní) migrace v minulosti bylo a je právě zavádění ETCS namísto národního zabezpečovače LS. Motivací v tomto případě byl jednoznačně jen požadavek IM, bez viditelných přínosů pro dopravce. Ambiciózní plán prováděný až s 10letým předstihem proti ostatním státům byl doprovázen neustálou změnou předpisů pravidel a požadavků (Baseline ETCS) během implementace, nedostupností cílových technologií / produktů a služeb na trhu. Zatímco zpočátku bylo možné nasazení jediné komerčně dostupné Baseline 2, po r. 2021 následoval tlak na upgrade všech vozidel na Baseline 3. Speciálně menší dopravci s malými počty vozidel jednotlivých řad nebo provozující starší vozidla naráželi na nezájem dodavatelů o takové projekty retrofitů, zneužívání šibeničních termínů pro nákup potřebných součástí, instalace, školení uživatelů a dalších kroky nutné pro uvedení do provozu, které vyústily v enormní náklady. V důsledku nejasné a v konečném výsledku nenaplněné politiky finanční podpory, zůstaly tyto náklady nepokryté, protože reálná výše podpory byla nakonec významně menší než očekávaná.

Tabulka 10 porovnává různé charakteristiky a položky nákladů obou teoretických variant na modelu s parametry maximálně se blížícími situaci v ČR, jak vyplynuly z dotazníkového průzkumu. Pro vyčíslení nákladů byl opět použit ekonomický model ze studie [2], který ale pracoval s některými aktuálně už neakceptovatelnými zjednodušeními. Model byl proto pro účely této studie v detailech modifikován tak, aby lépe popisoval realitu konkrétní sítě:

- Původní model počítal s dokončeným pokrytím sítě GSM-R a migrací v rozsahu 1:1, což v případě ČR nebude splněno. OPEX v úvodních krocích migrace měl v takovém případě stagující charakter, investice se omezovaly na prostou obnovu technologie v rozsahu několika málo procent. Modifikovaný model počítá s pokrytím částečným a plynulým rozšiřováním sítě GSM-R u IM podle původních plánů rozvoje až do zahájení výstavby sítě FRMCS.
- Původní model nepočítal s investicí do pasivní části infrastruktury, která měla být beze změny využita pro nastupující technologii FRMCS. Důsledkem bylo, že studované scénáře byly omezeny na náhradu GSM-R v pásmu 900MHz, kde se pokrytí starou a novou radiovou technologií významně neliší (viz kap.2.1). V konkrétních podmínkách této studie předpoklad splnění není minimálně proto, že jednou ze studovaných variant je nasazení pásma 1900MHz s jinou strukturou buněk (menšími ISD), vyžadující rozšíření pasivní infrastruktury o další objekty v rozsahu desítek procent. Model byl proto modifikován tak, že obsahuje pasivní infrastrukturu jako samostatnou složku s vyjádřenými objemy investic (CAPEX) a provozních nákladů (OPEX).
- Původní model u dopravců nepočítal s obnovou výbavy GSM-R kvůli konci její životnosti. Modifikovaný model tuto obnovu započítává do provozních nákladů dopravce až do startu kampaně výměny palubního zařízení za duální a/nebo podporující FRMCS. Stejně tak neindexoval provozní náklady GSM-R výbavy vozidel progresivním nárůstem cen GSM-R kolem konce podpory. Modifikovaný model započítává do OPEX dopravců i tuto progresi z důvodů uvedených v kap.3.3.
- Kvůli shora uvedené silné vazbě mezi migračními projekty FRMCS a ETCS jsou scénářem vyčíslovány i náklady na vynucený upgrade ETCS, a to u všech scénářů spojený s instalací FRMCS (minimálně podpora Coordinating function a komunikačního stacku podle UNISIG Subsetu 037-3). Po zkušenostech s dosavadní produkcí komponent ETCS je takový upgrade zahrnut ve scénáři s duálními terminály i opakovaně v souběhu s přechodem infrastruktury na FRMCS, kdy se očekávají přípravnými fázemi neodhalené nedostatky rané produkce ETCS BL4, vyžadující další úpravy.
- Z údajů poskytnutých SŽ se ukázalo, že náklady na výstavbu infrastruktury jsou v původní studii [2] na české poměry silně podhodnocené. V modelu jsou proto použité hodnoty odvozené od v rámci rozpočtů nástrojem SPOŽES používané kilometrické investiční náročnosti nové výstavby GSM-R – stavební část / pasivní infrastruktura 40 %, doplnění FRMCS na stávající pasivní infrastrukturu 72 %.
- Po zkušenostech s implementací ETCS je migrační období IM i dopravců ve scénářích prodlouženo oproti původnímu modelu na mnohem reálnějších 10 let. Druhá fáze migrace proto ve všech scénářích spadá **do období po avizovaném konci podpory GSM-R**, zohledněném zde 100% nárůstem všech nákladů na jeho obnovu i údržbu s rizikem, že v tak dlouhém období (morální stáří komunikační technologie přes 50let!) bude **progrese nákladů ještě daleko větší**.
- V modelu jsou nastaveny pro českou ekonomiku aktuálnější hodnoty inflace (2 %) a diskontní sazby (4,25 %).

Detailní vstupy modelu včetně modelových cen komponent a položek provozních nákladů jsou uvedeny v příloze 2 studie. Výstupy takto jednoduchého modelu jsou pouze orientační, pro přesnější porovnání variant konkretizovaných v dalších krocích přípravy migrace bude potřebné provést kompletní analýzu nákladů a výnosů (Cost-Benefit Analysis, CBA) a podrobnější analýzu věcných rizik.

Tabulka 10 – Modelové ekonomické srovnání postupů migrace

Scénář migrace	A (dual infra)	B (dual terminal)	C (překryv 1900MHz)	D (problémy interoperability)
Sumární délka tratí, vybavených GSM-R na začátku scénáře	2269km	2269km	2269km	2269km
Cílová délka tratí s instalovaným FRMCS	2569km	2569km	2569km	2569km
Počet vozidel vybavených hovorovým terminálem GSM-R (cab rádio)	4370	4370	4370	4370
Počet vozidel vybavených EDOR pro ETCS	2190	2190	2190	2190
Podíl pasivní infrastruktury vyžadující kvůli nasazení FRMCS výměnu nebo doplnění	5 %	5 %	61 %	5 %
Ukončení výstavby a obnovy systému GSM-R na infrastruktuře	2050	2039	2050	2039
Budování systému FRMCS na infrastruktuře v období	2030 - 2040	2040 - 2050	2030 - 2040	2040 - 2050
Kampaň přezbrojení vozidel na výbavu FRMCS	2040 - 2050	2030 - 2040	2040 - 2050	2030 - 2040
Provoz GSM-R na infrastruktuře do	2050	2040 - 2050	2050	2040 - 2050
Investice IM do FRMCS (roky x mld.Kč/rok)	11 x 0,75 mld.Kč	11 x 0,94 mld.Kč	11 x 0,96 mld.Kč	11 x 0,94 mld.Kč
Související investice IM do ETCS (roky x mld.Kč/rok)	11 x 0,69 mld.Kč	11 x 0,84 mld.Kč	11 x 0,69 mld.Kč	11 x 0,84 mld.Kč
Investice dopravců do FRMCS (roky x mld.Kč/rok)	11 x 0,27 mld.Kč	11 x 0,22 mld.Kč	11 x 0,27 mld.Kč	21 x 0,26 mld.Kč
Související investice dopravců do ETCS (roky x mld.Kč/rok)	11 x 3,0 mld.Kč	11 x 2,5 mld.Kč	11 x 3,0 mld.Kč	11 x 2,5 mld.Kč
Modelem započtené provozní náklady IM za sledované období (včetně nutné obnovy GSM-R)	24 mld.Kč	12 mld.Kč	24 mld.Kč	12 mld.Kč
Celkové náklady v současných cenách (NPV) za období 2025 – 2050 (IM i dopravci)	51 mld.Kč	43 mld.Kč	52 mld.Kč	47 mld.Kč

Všechny vyčíslené varianty předpokládají provedení migrace ve stejném období 2030 – 2050, které je voleno tak, aby podle dosavadních předpokladů již byly na trhu komponenty pro migraci potřebné a bylo dostatečně dlouhé pro provedení migrace u dopravců a na infrastruktuře bez časového překryvu. Parametry jako vybavenost vozidel, předpokládané životnosti a ceny komponent jsou pro všechny varianty stejné. Celkové náklady v současných cenách (NPV) jsou vyčísleny za období 2025 – 2050, mimo které se varianty už věcně neliší. Údaje o CAPEX a OPEX jsou vyčíslovány v současných cenách s uplatněním konstantní míry inflace za celé zkoumané období. Do hodnot NPV je navíc zakalkulována diskontní úroková sazba, rovněž konstantní za celé zkoumané období.

- **Varianta A** představuje scénář **migrace s duální infrastrukturou**. Pro instalaci technologie v infrastruktuře (krok 1) a pro vybavení vozidel (krok 3) jsou plánovány dva bezprostředně na sebe navazující 11leté intervaly. Investice IM do technologií GSM-R jsou ukončeny rokem 2029, provoz zatížený rostoucími náklady včetně nutné obnovy plného rozsahu pokrytí ale pokračuje až do roku 2050. Nově budovaná síť je do svého dokončení využívána jen pro testovací účely a provozována s minimálními náklady. Obnova technologie GSM-R u dopravců končí rokem 2039, kdy kulminují i její celkové náklady na úrovni o polovinu větší než následné investice do FRMCS, pak klesají jen na úroveň běžné údržby a s ubýváním této technologie na vozidlech postupně mizí. Z pohledu NPV je tato varianta dražší oproti variantě s duálními terminály, rozdíl představují hlavně náklady údržby a obnovy GSM-R na straně IM.
- **Varianta B** představuje scénář **s využitím duálních terminálů**. Pro vybavení vozidel (krok 1) a pro instalaci technologie v infrastruktuře (krok 3) jsou opět plánovány dva bezprostředně na sebe navazující 11leté intervaly. Investice IM do rozvoje

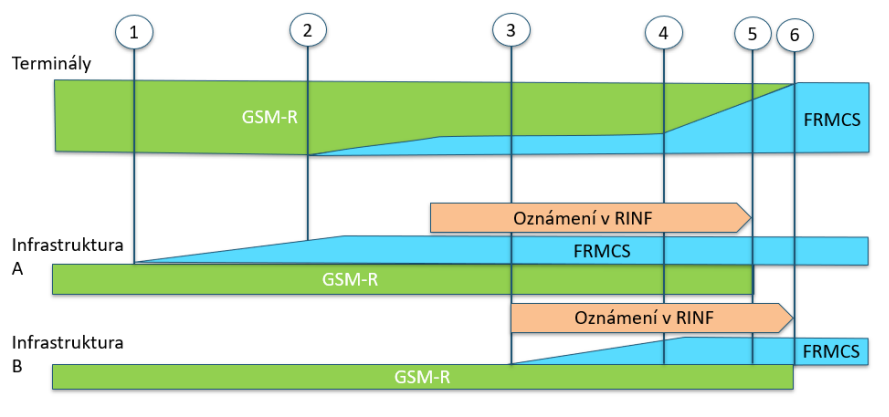
technologií GSM-R jsou sice ukončeny rokem 2029. Provoz pokračuje až do roku 2050, ale po roce 2039 provozní náklady klesají díky zastavení obnovy GSM-R a následném odstavení v úsecích, kde je nahrazeno FRMCS. Obnova technologie GSM-R u dopravců končí hned rokem 2029 a její zbývající provozní náklady od roku 2036 klesají až do jejího odstavení v roce 2040. Investiční náročnost je u IM oproti předchozí variantě vyšší, u dopravců (s předpokladem finanční podpory pro ně reprezentující rovněž potřebu veřejného financování) je ale významně nižší, a i celkové náklady IM a dopravců v hodnotě NPV jsou u této varianty minimální. **Rozhodující nákladovou položkou je jako u všech variant investice dopravců do vyvolaných úprav ETCS**, druhou nejvyšší pak náklady IM spojené s udržením provozu GSM-R.

- **Varianta C** reprezentuje výstavbu **FRMCS v pásmu 1900MHz** s vytvořením **duální infrastruktury**, kdy síť GSM-R je provozována v pásmu 900MHz beze změny. Nasazení pásma 1900MHz kromě výměny některých částí pasivní infrastruktury zahrnuje navýšení počtu gNB o 56 % (maximální hodnota, určená rozбором výsledků studie [25] viz kap.2.2.1, která ale v počátcích provozu nebude muset být dodržena viz kap.2.6) pro potřebné snížení ISD buněk. Ostatní náklady na výbavu vozidel i infrastruktury jsou pro nedostatek přesnějších dat uvažovány stejně jako u varianty A v pásmu 900MHz. Výsledek modelu pak potvrzuje, že tato změna v pasivní infrastruktuře představuje hlavní rozdíl – navýšení cca 2 mld. Kč v investici IM (v celkovém NPV migrace díky vysokému započtenému diskontu 1 mld.Kč).
- **Varianta D** představuje opět scénář **s využitím duálních terminálů**, tentokrát ale v případě, že specifikace pro implementaci nebudou ustálené nebo nebudou pro implementaci na vozidlech k dispozici verze plně interoperabilní s infrastrukturou nebo aktuální BL ETCS. Z pohledu IM je tato varianta stejná jako varianta A a i související investice dopravců do úprav ETCS je stejná, nasazení ne plně interoperabilních verzí palubní výbavy FRMCS si však podle zkušenosti s ETCS vyžádá pokračování investic do vozidlových částí po celé migrační období 21 let, představující pro dopravce navýšení o 2,5 mld.Kč. Přes toto navýšení je ale i scénář D v celkovém NPV výhodnější, než věcně průchodnější (viz kap.3.1) scénář s duální infrastrukturou. Výsledek modelu **potvrzuje pohled dopravců**, že stabilita specifikací a **plná interoperabilita komponent FRMCS navzájem a zejména s ETCS je klíčová** pro udržení nákladů na migraci v rozumných mezích. Scénář zahrnující úpravy instalací ETCS by oproti vyčíslenému byl díky poměru nákladů na FRMCS a ETCS ještě daleko nepříznivější.

## 3.5 Načasování přechodu od GSM-R

Součástí studie [2] byly rovněž scénáře zahrnující více (sousedních) zemí s různým načasováním migrace k FRMCS. Varianty vycházejí opět ze základního rozdělení na postup s překryvem systémů na infrastruktuře a s využitím duálních terminálů podle kap.3.1. Postup **migrace s duální infrastrukturou** ve dvou provázaných sítích zahrnuje tyto kroky (IM A rozdílně od citované studie značí síť zahajující migraci, B síť opožděnou bez ohledu na jejich velikost):

Obrázek 4 – Scénář migrace dvou sítí s duální infrastrukturou

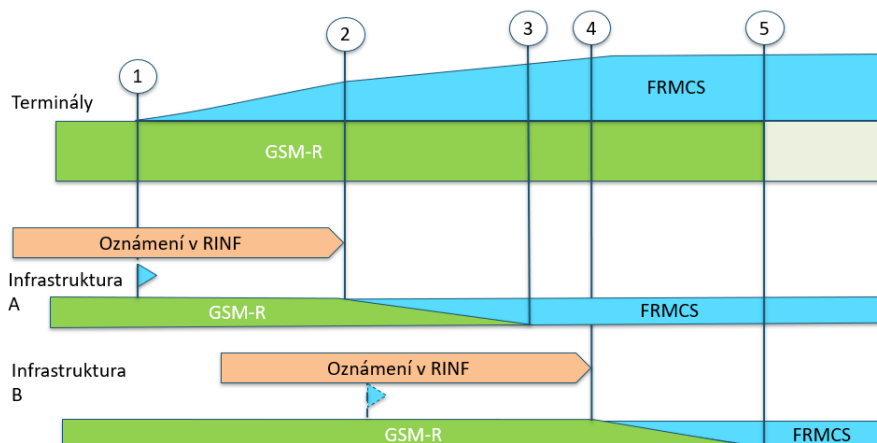


- 1: Počáteční etapa  
Infrastruktura i dopravci obou sítí provozně využívají GSM-R. IM A v předstihu buduje systém FRMCS, u dopravců probíhá obchodní a technická příprava migrace (výběr dodavatelů, testování a schvalování prototypů s využitím fragmentů infrastruktury FRMCS vybudovaných IM A).
- 2: IM A spouští do provozu systém FRMCS na významné části svojí infrastruktury. Dopravci spouští sériové přezbrojení svých vozidel (a dalších komunikačních terminálů) na systém FRMCS, ale jen části využívající pouze infrastrukturu A, protože modernizovaná vozidla už nepodporují GSM-R a ztrácejí tak přechodnost na infrastrukturu B, Dopravci proto u značné části vozidlového parku **vyčkávají** spuštění migrace na síti B. Rovněž infrastruktura GSM-R sítě A ale zůstává v provozu kvůli vozidlům přechodným do / ze sítě B, avšak na náklady IM A. Tento OPEX s končící podporou GSM-R postupně roste. IM A někdy v tomto kroku oznamuje termín ukončení provozu GSM-R podle TSI CCS Annex I §7.3.1.2.
- 3: IM B buduje systém FRMCS a nejpozději v tomto kroku oznamuje termín ukončení provozu GSM-R.

- 4: IM A spouští do provozu systém FRMCS na významné části svojí infrastruktury a dopravci mohou pokračovat v modernizaci zbylých vozidel na FRMCS, která využívala pouze infrastrukturu B.
- 5: Vozidla sítě B, zajiždějí na infrastrukturu B jsou modernizována a IM A může ukončit provoz GSM-R.
- 6: Migrace vozidel jsou ukončené i na síti B i její IM proto může ukončit provoz GSM-R.

Kroky postupu s využitím **duálních terminálů** jsou naopak následující:

Obrázek 5 – Scénář migrace dvou sítí s duálními terminály



- 1: Počáteční etapa  
Infrastruktura i dopravci provozně využívají GSM-R. IM A musel podle TSI CCS Annex I §7.3.1.2 s dostatečným předstihem oznámit první termíny ukončení provozu GSM-R, spadající do kroku 2. Dopravci v předstihu dovybavují všechna vozidla využívající infrastrukturu A terminály s podporou FRMCS, resp. přezbrojují na terminály s podporou obou technologií. Během kroku musí proběhnout otestování a typové schválení přezbrojovaných vozidel, pro což musí IM zajistit podmínky (pilotní traťový úsek).
  - 2: Spuštění výstavby FRMCS  
Vozidla využívající infrastrukturu A jsou z významné části vybavena pro provoz FRMCS a IM A buduje a postupně spouští do provozu FRMCS. Dopravci pokračují v přezbrojování vozidel – ale nadále využívají infrastrukturu GSM-R na síti B. OPEX GSM-R s končící podporou roste. IM B musí s dostatečným předstihem oznámit první termíny ukončení provozu GSM-R, spadající do kroku 4 a případně zajistit pilotní infrastrukturu pro testování a schvalování výbavy vozidel.
  - 3: IM A ukončuje provoz GSM-R na celé síti a dopravci využívají FRMCS, na který jsou již jejich vozidla vybavena. Na infrastrukturu B pokračuje provoz GSM-R, jeho OPEX dále roste.
  - 4: Dopravci dokončují výbavu terminály s podporou FRMCS u vozidel využívajících výhradně infrastrukturu B a IM B postupně buduje s spouští do provozu FRMCS.
  - 5: IM B dokončil výstavbu a zprovoznění FRMCS a ukončil provoz GSM-R v celém rozsahu sítě. Výbava vozidel pro GSM-R nadále není nutná a její obnova u údržba může skončit.
- K podmínkám a rizikům diskutovaným v kap.3.1 přibývají s přeshraničním provozem rizika další:

- **Změny specifikací** během migračního období, které jsou při dosavadním postupu standardizace velmi pravděpodobné, nesou riziko, že implementace v sousedních sítích nebudou, byť dočasně, plně interoperabilní – migrace podle specifikací sítě A nezaručí přechodnost na síť B. Může se pak opakovat současná situace, kdy vozidla jsou vybavována národně specifickými subsystémy nebo funkcemi nebo jsou v souběhu s instalací FRMCS na obou infrastrukturách upgradována. Oba zmíněné postupy migraci vozidel prodraží a zkomplikují schvalování.
- Prvky **národních specifik** mohou být skryty v samotných jednotných standardech. Aktuálním příkladem je obsah FRMCS profilů (ekvivalent GSM-R SIM), který je na vozidle plánován samostatný pro každou projížděnou síť a musí být poskytnut jejím IM. Nejasná situace kolem změn a schvalování profilů může přechodnost vozidel alespoň v počátcích migrace silně omezit.
- Postup migrace v později migrované síti **zpětně ovlivňuje** postup v síti s migrací dřívější. U scénáře s duální infrastrukturou např. zdržení migrace v infrastrukturu B zastaví migraci terminálů dopravců v síti A a následně prodlužuje nucený provoz GSM-R na infrastrukturu A. Jednostranné ukončení podpory GSM-R na infrastrukturu A má naopak dopad na dopravce sítě B, reprezentující prodražení migrace nebo omezení jejich přechodnosti na síť A. Pro omezení takových efektů by byla potřebná **koordinace mezi IM**, pro kterou zatím nejsou odpovídající nástroje.
- Riziko nízké mezinárodní koordinace rovněž je, že různí IM zvolí **různé typy migrace**. Postup s duálními terminály je v tomto ohledu bezpečnější, podmínky pro dopravce jsou v podstatě stejné bez ohledu na to, který scénář zvolí IM B. Kritická je naopak kombinace scénáře s duální infrastrukturou v síti A a předpokladem duálních terminálů v síti B. V takovém případě

mohou dopravci sítě A přezbrojit jen vozidla určená pro vlastní síť a další musí vybavovat dvousystémovými terminály, ačkoli to jejich síť nevyžaduje. Zvýšené provozní náklady u IM A na provoz duálních systémů jsou tak z části zmařené.

- Společným extrémním případem obou výše jmenovaných nekoordinovaných postupů jsou **země, které migraci k FRMCS neplánují** vůbec, např evropské země mimo EU. Dopravci, kteří chtějí v jejich síti operovat, budou pak muset na svých vozidlech prodloužit na neurčito podporu GSM-R nebo dokonce národních systémů typu B a přes technické problémy diskutované v kap.2.1.3 i postup vlastních IM jít cestou multistandardních terminálů.

Tabulka 11 shrnuje velikost těchto rizik u obou hlavních scénářů

Tabulka 11 – Význam různých rizik pro scénáře přeshraničního provozu

	Scénář s duální infrastrukturou (na síti A)	Scénář s duálními terminály
Změny standardů během migračního období	Prodražují nebo zdržují migraci u dopravců	Prodražují migraci u dopravců
Vliv tempa migrace v síti B	Citlivější, zpožďuje postup u IM i dopravců sítě A	Bezpečnější, zvyšuje pouze OPEX dopravců
Následky různých typů migrace v obou sítích	Rizikový vícenásobný a prodlevou u dopravců sítě A	Bezpečnější, nezávisí na volbě IM B

Scénář s využitím duálních terminálů, přestože je finančně náročnější zejména na dopravce, je v mnoha směrech méně náročný na koordinaci mezi zúčastněnými subjekty – pro dopravce sítě A dá v podstatě stejné podmínky bez ohledu na to, který scénář zvolí IM B, resp. v jakém časovém horizontu. Takový rozdíl obou základních scénářů v nárocích na koordinaci potvrdila obecně i původní studie [2]. V reálných postupech migrace pro bude určitý podíl využití duálních vozidel vysoce pravděpodobný.

### 3.5.1 Výsledky modelů

Hlavním výsledkem simulací provedených ve studii [2] bylo vyčíslení očekávaných nákladů v současných cenách (NPV) pro všechny studované varianty. Pro účely modelování byly ve železniční síti studií rozděleny do tří kategorií podle velikosti. Přes časový odstup a některé původně učiněné zjednodušující předpoklady (podíly přeshraničního provozu, stejná cenová úroveň pro všechny účastníky, délka migračních období apod.) lze kromě závěrů prezentovaných přímo v citované studii z vyčíslených NPV vyvodit i další závěry ohledně vlivu časování migrace na FRMCS v různých sousedících sítích na její náklady nesené zúčastněnými IM a dopravci:

- V případě **migrace střední sítě opožděné** za migraci sousední velké sítě (vyčíslený případ dobře odpovídá případu Německa a ČR) byl dopad na větší zahajující síť indiferentní (do  $\pm 5\%$ ) a navýšení nákladů celé nese menší opožděná síť (IM o  $>10\%$ , výraznější u migrace s duálními terminály, dopravci o asi  $20\%$ ).
- Procentní údaje je ve všech případech nutné korigovat o celkové navýšení nákladů migrace ve dvou propojených sítích oproti dvěma izolovaným migracím, které podle konkrétní varianty činí  $3 - 15\%$ . Přitom poměr nákladů migrace IM je proti dopravcům několikanásobný (je podle varianty 5:1 až 10:1), takže navýšení jde zpravidla beze zbytku na vrub IM.

Pro zpřesnění výsledků na aktuální podmínky sítě ČR byl využit model zmíněný v kap.3.4 v režimu zahrnujícím přeshraniční provoz do sítě s odlišným časovým harmonogramem migrace. Stejně jako modelování situace v izolované síti byl model v několika detailech aktualizován:

- Původní model předpokládal, že podíl modernizovaných vozidel při souběhu implementace FRMCS na vozidlech a v infrastruktuře je stejný jako podíl modernizované infrastruktury. Detailnější modely provozu sítí ukazují, že tento předpoklad je mylný a podíl vozidel komunikujících v konkrétním standardu je vždy vyšší než podíl tohoto standardu v infrastruktuře. Konkrétní příklady rozdílů byly již uvedeny v kap.3.1.
- Původní model přeshraničního provozu vyčísloval očekávané náklady obou sítí za zjednodušujícího předpokladu stejné cenové úrovně v obou zemích. Z průzkumu provedeného v rámci této studie vyplývá, že takový předpoklad není správný. Protože konkrétnější údaje z dalších sítí nebylo možné ve lhůtě pro vypracování studie získat, byl model zjednodušen tak, že vyčísluje jen náklady jedné sítě, kterou je modelována síť česká. Důsledkem zjednodušení je, že výsledky modelu nezávisí na velikosti cizí sítě, takže diskuse variant s různými poměry velikostí sítí, poměrně obsáhlá v pramenu [2], je zde bezpředmětná.

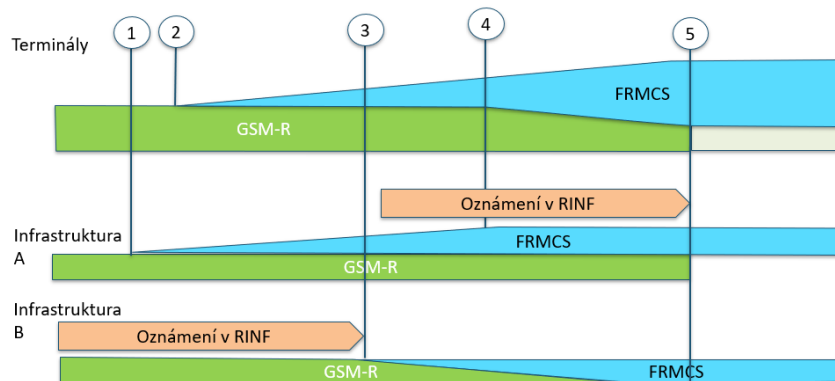
Modelování se proto soustředilo na ekonomické vyhodnocení vybraných rizik z kap.3.5 Výsledky jsou zachyceny v následující tabulce ve stejné struktuře jako u výsledků pro izolovanou síť v kap.3.4:

Tabulka 12 – Modelové ekonomické srovnání postupů vybraných migrace pro dvě sousední sítě

Scénář migrace	E (raná migrace)	F (pozdější migrace)	G (různé migrace)
Sumární délka domácích tratí, vybavených GSM-R, instalací FRMCS, počty vozidel a podíl obnovy pasivní infrastruktury viz Tabulka 10 kap.3.4			
Ukončení výstavby a obnovy systému GSM-R na vlastní infrastrukturu	2050	2050	2050
Budování systému FRMCS na vlastní infrastrukturu v období	2030 - 2040	2032 - 2042	2030 - 2040
Kampaň přezbrojení vozidel na výbavu FRMCS	2040 - 2050	2042 - 2050	2037 - 2047
Provoz GSM-R na vlastní infrastrukturu do	2050	2050	2050
Výstavba systému FRMCS v sousední síti	2041 - 2046	2030 - 2035	2041 - 2048
Ukončení provozu GSM-R v sousední síti	po 2050	2045	2041 - 2048
Investice IM do FRMCS (roky x mld.Kč/rok)	11 x 0,77 mld.Kč	11 x 0,8 mld.Kč	11 x 0,77 mld.Kč
Související investice IM do ETCS (roky x mld.Kč/rok)	11 x 0,69 mld.Kč	11 x 0,72 mld.Kč	11 x 0,69 mld.Kč
Investice dopravců do FRMCS (roky x mld.Kč/rok)	9 x 0,32 mld.Kč	9 x 0,35 mld.Kč	11 x 0,25 mld.Kč
Související investice dopravců do ETCS (roky x mld.Kč/rok)	9 x 3,7 mld.Kč	9 x 3,9 mld.Kč	11 x 2,9 mld.Kč
Modelem započtené provozní náklady IM za sledované období	24 mld.Kč	24 mld.Kč	24 mld.Kč
Celkové náklady v současných cenách (NPV) za období 2025 – 2040 (IM i dopravci)	50 mld.Kč	51 mld.Kč	51 mld.Kč

- **Varianta E** modeluje z diskusí očekávaný pravděpodobnější přístup bude **migrace české infrastruktury** zahájena **dříve** než u sousedních zemí. Mezi různými důvody pro to je i omezení následně nevyužitých investic do systému GSM-R jehož plánovaná dostavba se zatím překrývá s předpokládaným obdobím migrace. Varianta je konstruována nad typem scénáře s duální infrastrukturou, který se předchozími rozbory ukázal jako věcně reálnější a také citlivější na různé vnější vlivy. Ke zprovoznění infrastruktury FRMCS v síti B v této variantě dojde až 2046, takže domácí dopravci mohou kvůli přechodnosti na síť B modernizovat jen cca 40 % parku vozidel (pokud je nevybaví duálními terminály) tak, aby k 2046 stále zůstal potřebný podíl vozidel přechodných na infrastrukturu B. To je modelováno přerušením investic u dopravců v letech 2045-46 a následnou urychlenou migrací tak, aby k přezbrojení došlo do 2050, kdy bude v obou sítích ukončen provoz GSM-R. Z pohledu IM je tato varianta nákladově stejná, jako varianta A v kap.3.4. Varianta svými výsledky zároveň pokrývá riziko zpomalení postupu migrace v sousedních sítích, protože i v tom případě je rozhodující zprovoznění významné části infrastruktury FRMCS na síti B.
- **Varianta F** modeluje za stejných podmínek opačný postup – **česká infrastruktura** bude **migrována později** než infrastruktura sousedních sítí. Zatímco výstavba a zprovoznění infrastruktury FRMCS ve vlastní síti bude za variantou A z kap.3.4 opožděno o 2 roky, plné pokrytí sousední sítě bude již od 2035 a provoz GSM-R na ní ukončen už 2045. Dopravci budou muset kvůli přechodnosti na domácí síť s instalací FRMCS vyčkávat a po jejím plném zprovoznění urychleně přezbrojit tak, aby neomezili přechodnost část vozidel zajišťující na sousední síť. Další postup přezbrojování vozidel je sice pomalejší, ale celkové zkrácení a zpoždění migrace u dopravců s intenzivními investicemi zejména v prvních letech povedou na zvýšení nákladů a další věcná rizika. Výsledek pro IM je víceméně stejný jako u základní varianty, i tady povede opoždění migrace na prodražení následkem započítané inflace.
- **Varianta G** modeluje opět oproti variantě E dopady situace, kdy IM sousední sítě zvolí pro pozdější migraci **opačný postup – migraci s duálními terminály**. Situaci ilustruje obrázek 6. Dopravci vlastní sítě tak musí na vozidlech přechodných na síť cizí instalovat v předstihu terminály duální (2), což vede na zvýšenou investici v počátku migračního kroku. Instalace terminálů s podporou jen FRMCS (4) může probíhat na vozidlech provozovaných pouze na vlastní síti a to až po plném zprovoznění vlastní infrastruktury FRMCS. Dopravci cizí sítě naopak mohou využívat GSM-R, které i po plné migraci na FRMCS (4) zůstává v provozu. Zatímco dopady v nákladech na domácího IM nejsou žádné, urychlená investice u dopravců v počátku migračního kroku může vést na celkové prodražení a další věcná rizika. Výbava různých vozidel různými druhy terminálů se pravděpodobně promítne i do OPEXu dopravců (zde pro nedostatek přesnějších dat modelovaná nárůstem nákladů údržby o 1/2).

Obrázek 6 – Scénář s odlišným typem migrace ve druhé síti



Z vyhodnocení je patrné že významnější rozdíly v termínu a způsobu migrace v sousedních zemích nejsou žádoucí. **Postup i časový průběh migrace** u dopravců diktuje IM síť, která přistoupí k migraci jako druhá (poslední). Rozdíly v termínu přináší zkrácení doby migrace využitelné dopravci s kumulací nákladů na jejím začátku. Pro menší síť, realizující migraci opožděně, existuje **riziko, že IM větší sousední síť nebude ochotna koordinovat** ukončení provozu GSM-R a omezí tak zřetelně přechodnost vozidel na jeho síť. IM volící bez koordinace se sousedními sítěmi raný postup s duální infrastrukturou zakládá riziko svým dopravcům, že budou muset pro přechodnost na sousední síť **instalovat duální terminály** a zvýšené náklady na obou stranách budou částečně zmařené.

# 4 Legislativní a organizační podmínky

V kap 3.3 byly diskutovány překážky a demotivující faktory očekávané při budoucí implementaci FRMCS které mají z části příčiny i v existujícím právním rámci. Ten tvoří

- Technické specifikace pro interoperabilitu v tomto konkrétním případě TSI CCS reprezentované Nařízením EK 2023/1695,
- pravidla pro postup schvalování (autorizace) železničních vozidel a jejich typu reprezentovaná Nařízením EK 2018/545 v aktuálním znění a
- podmínky programů veřejné podpory jako jsou např. Specifické podmínky programu veřejné podpory „Zajištění interoperability v železniční dopravě v období 2023-2028“.

Ve vztahu k těmto a navazujícím předpisům by měli na mezinárodní úrovni zástupci ČR v orgánech EK a standardizačních institucích tvořících evropskou železniční legislativu prosazovat

- pružnější strukturu **legislativy, která nebude přímo ukládat** kontroverzní **věcné povinnosti** (příkladem takové iniciativy je plán ERJU na změnu statutu TSI, jejichž obsáhlé povinné technické přílohy mají být nahrazeny harmonizovanými technickými normami, na něž bude Nařízení TSI pouze odkazovat);
- technické standardy **minimalizující vzájemnou vazbu a funkční závislost komponent systému ERTMS mezi sebou** (příkladem je návrh DB a SNCF [1] rozdělení specifikace a HW a SW pro FRMCS, dovolující kompatibilním HW vybavovat vozidla v předstihu a finální specifikace FRMCS implementovat jen upgrady SW) a
- při zapracování technických inovací jednotlivých komponent dbát na maximální zpětnou kompatibilitu, kterou je dále omezen vliv změn v komponentě na komponenty související (příkladem jsou přijatelnější alternativy TSI CCS 2023 s významně menším rozsahem potřebné recertifikace – řešení přídatným funkčním blokem k existujícímu ETCS BL 3 (tzv. FRMCS **adaptérem**) nebo tzv. **light verze**, která realizuje Coordinating function a FRMCS Communication Function podle specifikace TSI CCS 2023, ale nemění funkce zabezpečení a vlastní aplikace ETCS zůstává BL 3 (SV 2.1));
- prosadit **uvolnění schvalovacích postupů železničních vozidel**, v tom, aby předmětem schvalování v odůvodněných případech nebylo vozidlo jako celek, ale jen jednotlivé komponenty (příkladem jsou opět samostatně specifikované HW komponenty podle návrhu DB a SNCF [1]), aby schválení komponenty ve vozidle a zejména posudky vypracováváné oznámenými / určenými subjekty byly přenositelné na její integrace do vozidel podobné konstrukce a určení;

na úrovni národní pak **uvolnění podmínek finanční podpory** v železničním odvětví tak, aby

- za způsobilé výdaje takových programů byla akceptováno nejen instalace vyjmenovaných komponent, ale i jejich modernizace včetně obnovy SW, pokud je jejím důvodem změna technických předpisů, případně aby na tuto následnou podporu byl zákonný nárok, pokud byla přiznána pro daný komponent při jeho instalaci (taková úprava by řešila selhání veřejné podpory, kdy se průběžná změna požadavků a předpisů nestačí promítnout do komerční dostupnosti produktů a projekt v daném časovém rámci nesplní konečný cíl);
- byly uvolněny podmínky pro dobu udržitelnosti projektu a omezení převodů vlastnictví s ní související, zejména aby tato doba mohla skončit při významné změně technických předpisů, s nimiž má projekt zajistit soulad.

# 5 Prameny

- [1] Kolektiv autorů: *WS 8: How to successfully introduce FRMCS on EU network and the vehicles? Migration Strategies and Challenges*, ERTMS 2024 Conference, Valenciennes, France, 23-25/4/2024
- [2] *STUDY ON MIGRATION OF RAILWAY RADIO COMMUNICATION SYSTEM FROM GSM-R TO OTHER SOLUTIONS*, SYSTRA 2016 dostupné na <https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Study%2520on%2520migration%2520of%2520railway%2520radio%2520communication%2520from%2520GSM-R%2520to%2520other%2520solutions%2520by%2520Systra.pdf>, navštíveno 5.5.2024
- [3] *ETSI TR 103 554-2*, RT; Next Generation Communication System; Radio performance simulations and evaluations in rail environment; Part 2: New Radio (NR), V1.1.1, ETSI 2/2022
- [4] *CEPT Report 76*, Report B: EU-harmonised technical conditions for the future railway mobile radio communications system (Task 5), CEPT 11/2020
- [5] *CEPT Report 74*, Report A: Spectrum needs and feasibility (tasks 1 to 4), CEPT 7/2020
- [6] *Maier F.: FRMCS Onboard Coexistence – discussion paper*, DB InfraGO 2/2024
- [7] *O-8856: UGFA Whitepaper on migration scenarios*, v1.2.1, UIC UGFA, 5/2024
- [8] *O-8868: UGFA Report technical aspects FRMCS RAN for migration and beyond related to SRS v2.0*, UIC UGFA, 5/2024
- [9] Přehled využití spektra, web ČTU, <https://spektrum.ctu.gov.cz/kmitocty/1900-1930-mhz?filter%5BfrequencyFrom%5D=1900&filter%5BfrequencyFromUnit%5D=MHz&filter%5BfrequencyTo%5D=1910&filter%5BfrequencyToUnit%5D=MHz>
- [10] Rothbaum, D.: Field Trial Results for Uplink Receiver Diversity / Uplink SIMO and Uplink CoMP at 1.9 GHz
- [11] Chuberre N., Michel C.: Satellite components for the 5G system, web 3GPP, publikováno 24.1.2018, navštíveno 25.9.2024
- [12] Krause J.: Non-Terrestrial Networks (NTN), web 3GPP, publikováno 14.5.2024, navštíveno 25.9.2024
- [13] Paul T.: Best Satellite Internet Providers for 2024, web Cnet, publikováno 2024, navštíveno 25.9.2024
- [14] M. Nguyen et.al: A Review of SATis5: Perspectives on Commercial and Defense 5G SATCOM Integration, MDPI Encyclopedia 2022, 2, <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2030087>, navštíveno 25.9.2024
- [15] Breton, Th.: IRIS<sup>2</sup> Industry Information Day 30 March 2023, prezentace k informačnímu dni projektu, ESA březen 2023,
- [16] IRIS<sup>2</sup>: INFRASTRUCTURE FOR RESILIENCE, INTERCONNECTIVITY AND SECURITY BY SATELLITE, informační leták ESA, dostupný na [https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/b57d68a0-bb1f-4fb6-a64e-2e544731eef9\\_en?filename=IRIS%C2%B2\\_Factsheet%20%28EN%29.pdf](https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/b57d68a0-bb1f-4fb6-a64e-2e544731eef9_en?filename=IRIS%C2%B2_Factsheet%20%28EN%29.pdf) publikováno 23.3.2023, navštíveno 25.9.2024
- [17] Forrester, Ch.: SES and Eutelsat selected for IRIS2, <https://advanced-television.com/2024/01/17/ses-and-eutelsat-selected-for-iris2/>, publikováno 17.1.2024, navštíveno 25.9.2024
- [18] Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements, firemní materiál Tektronix, 2013, dostupné na [https://shop.cnrood.com/media/solutions/Wi-Fi\\_Overview\\_of\\_the\\_802.11\\_Physical\\_Layer.pdf](https://shop.cnrood.com/media/solutions/Wi-Fi_Overview_of_the_802.11_Physical_Layer.pdf), navštíveno 25.9.2024
- [19] Khaled E. et.al: WiFi coverage range characterization for smart space applications, sborník IEEE/ACM 1st International WS on SW Engineering Research & Practices of IoT, 2019 dostupné na <https://fabiopetrillo.com/publication/2019khaled/2019khaled.pdf> navštíveno 25.9.2024
- [20] Utpal P. et.al: Characterizing WiFi Link Performance in Open Outdoor Networks, Conference Paper 2011, dostupné na ResearchGate [https://www.researchgate.net/publication/220865876\\_Characterizing\\_WiFi\\_link\\_performance\\_in\\_open\\_outdoor\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/220865876_Characterizing_WiFi_link_performance_in_open_outdoor_networks), publikováno 8.4.2014, navštíveno 25.9.2024
- [21] Howard: What Is Wi-Fi Roaming and How Does It Work?, dostupné na <https://community.fs.com/article/what-is-wifi-roaming-and-how-does-it-work.html> , publikováno 21.11.2023, navštíveno 25.9.2024
- [22] Rothbaum D.: Multi-operator core networks - a highly effective path to the future of railway communications, dostupné na <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/7/mocn-a-highly-effective-path-to-frmcs> publikováno 7.7.2023, navštíveno 24.9.2024
- [23] EU SPACE FOR RAIL, Driving the digitisation of the rail sector, informační leták, EUSPA, 2023

- [24] Nosiri O.C.et.al: Mechanisms and Industry Solutions for RF Interference in a Co-located Network, Journal of Communications Engineering and Networks, July. 2014, Vol. 2
- [25] IMPLEMENTACE 5G/FRMCS NA ŽELEZNIČNÍM KORIDORU BRNO (CZ) – BRATISLAVA (SK), studie SUDOP Praha a.s., 6/2024
- [26] Národní implementační plán ERTMS, aktualizace 2024, MD ČR 2024,
- [27] ERIG's view on FRMCS roadmap, pracovní dokument E-4286 v1.0, UIC ERIG, 12/2022
- [28] Future Railway Mobile Communication System Functional Requirements Specification, FU-7120 v1.1.0, pracovní dokument UIC FRMCS Functional Working Group, 3/2024
- [29] GSM-R & FRMCS technologies working simultaneously => OnBoard train antenna system study, Kontron 12/2020, pracovní dokument UNITEL
- [30] Future Railway Mobile Communication System System Requirements Specification, AT-7800 v1.2.0, pracovní dokument UIC FRMCS Functional Working Group, 5/2024
- [31] Quick and easy satellite internet installation, <https://www.viasat.com/satellite-internet/satellite-installation/>, publikováno 2024, navštíveno 25.9.2024
- [32] Corici M., et.al: Satellite is 5G, SATis5 Whitepaper, ESA 2020 – prospekt programu SATis5 s tehdejšími výsledky testovacího polygonu
- [33] Příbyl P. et.al: Slovník dopravní terminologie, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010
- [34] RailLexic online, dostupné na <https://uic.org/support-activities/terminology/>, publikováno 26.9.2011, prohlédnuto 22.10.2024
- [35] Future Railway Mobile Communication System, User Requirements Specification, FU-7100 v5.0, pracovní dokument UIC FRMCS Functional Working Group, 2/2020
- [36] Session 4 FRMCS Panel Discussion, ERTMS Conference, Valenciennes, ERA, duben 2024
- [37] Towards a stable FRMCS V2 for testing, Session 2.3, ERTMS Conference, Valenciennes, ERA, duben 2024