

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE****KLOKNERŮV ÚSTAV**
Oddělení stavebních materiálů
Šolínova 7, 166 08 Praha 6***Dokumentace funkčního vzorku Gfunk CK03000125-V4******Název: Sestava měřící cely a analyzátoru dat pro měření aktuálního stavu patiny prostřednictvím elektrochemické impedanční spektroskopie***

Popis: Nová sestava měřící cely a analyzátoru dat z měření elektrochemické impedanční spektroskopie (EIS) bude zahrnovat set přitlačných cel s nedestruktivním uchycením na horizontální i vertikální ocelový povrch s komponenty pro aplikaci konvenčního neagresivního elektrolytu (Na_2SO_4). Sestava bude obsahovat popis elektrochemického zapojení pro exteriérové použití EIS v režimu měření komplexního spektra. V současnosti se princip měření používá v laboratořích, ale je zcela nedostupné pro měření in-situ.

Datum: 31. prosince 2025

Vlastník výsledku: ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

IČ vlastníka: 68407700

Stát: Česká republika

Lokalizace: ČVUT v Praze, Kloknerův ústav
Šolínova 7, 16608 Praha

Licence: ano

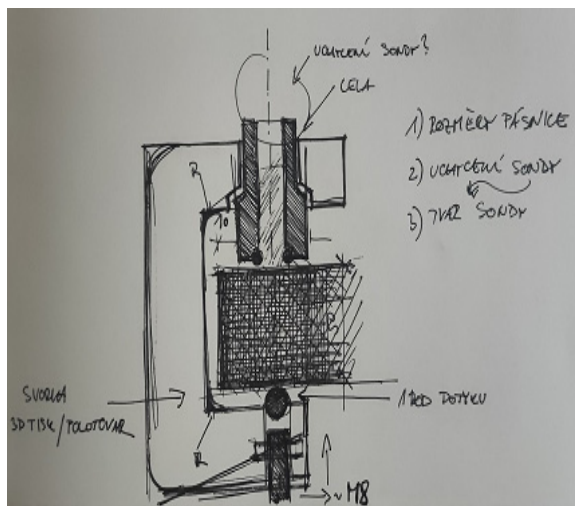
Licenční poplatek: stanoven na základě licenční smlouvy

Kategorie nákladů: $\leq 100\,000$ Kč

KONCEPČNÍ NÁVRH, POPIS VZORKU

Metodika přípravy funkčního vzorku Gfunk byla založena na koncepční realizaci celkem dvou přitlačných cel s možností přímého použití na přístupném povrchu ocelové mostní konstrukce z libovolné patinující oceli. V českých podmínkách byla možnost in-situ měření

bariérových ochranných vlastností patiny realizována na patinujících ocelích ATMOFIX. Prvotně byla vytvářena cela na měření EIS charakteristik pro dolní povrch dolní pásnice. Nejdříve bylo rozpracováno obrazové schéma (viz **Obr. FV 1.**) a na základě tohoto koncepčního schématu byla vytvořena prostřednictvím 3D tisku vlastní funkční cela (viz **Obr. FV 2.**). Vlastní tělo cely bylo vytvořeno z PP a víčko pro uchycení solného mostu pro vlastní měření potom z polyakrylátu. Pro aplikační měření přímo na povrchu mostní konstrukce nelze využít čtyřbodového konvenčního zapojení kvůli lokální destrukci přilnavé patiny v místě měření. Na základě této skutečnosti byla tato cela integračně spojena se svorkou, která byla ze spodní strany (PPE) čelisti svorky uměle vystlána tvarovanou pryží, aby při mechanickém vytvoření přitlaku nedošlo k porušení integrity a bariérových ochranných vlastností patiny na dolním povrchu dolní pásnice. Přítlak musí být mechanicky nastaven a odzkoušen tak, aby nedošlo k vytékání elektrolytu (nasycený roztok Na_2SO_4) mimo celu a snižování hladiny elektrolytu v měrné části. Vlastní tříelektrodové zapojení je zcela konvenční a zahrnuje aplikaci solného můstku s balónkovým natahováním elektrolytu do potřebné měřicí výšky referenční elektrody. Jako protielektrody byl v tříelektrodové zapojení použit platinový drát, který byl implementován vlastním otvorem v rozebíratelném akrylátovém víčku (slepen s víčkem) a spirálově omotán kolem vnitřní části solného můstku (hubičky). Vlastním vzorkem při zapojení byl povrch patinující oceli.

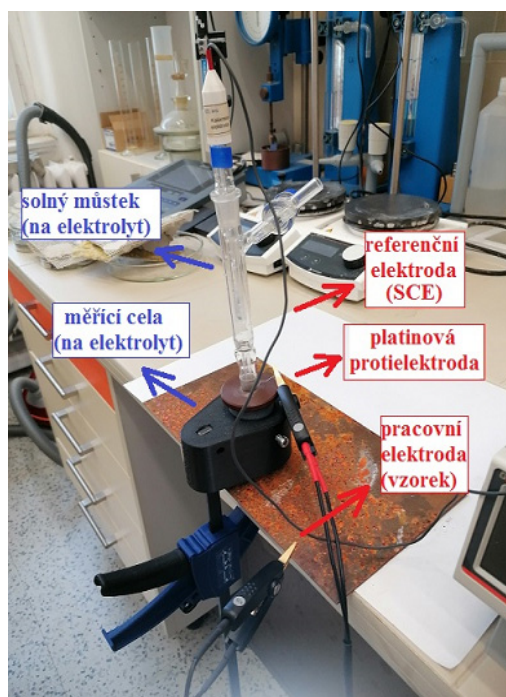


Obr. FV 1. Vytvořené obrazové schéma in-situ měřicí cely pro stanovení bariérových ochranných vlastností patiny horního povrchu dolní pásnice (navrženo na tloušťku pásnice 50 mm s přesahem 5 mm)

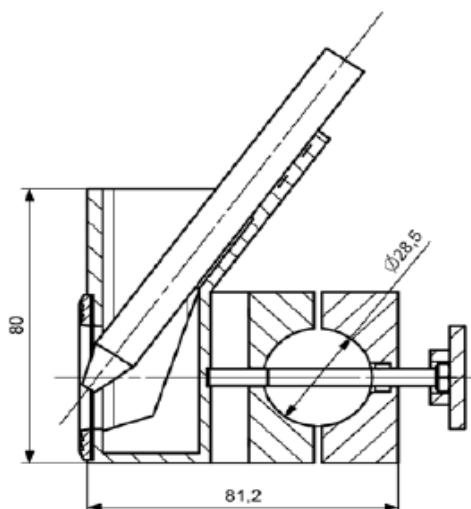


Obr. FV 2. Realizace této cely s přesností 0,1 mm dle schématu prostřednictvím 3D tisku – aplikace na horní povrch dolní pásnice – víčko bylo realizováno z polyakrylátu a tělo z PP

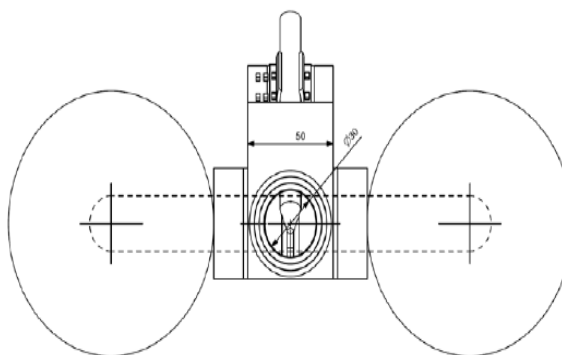
Druhá v pořadí byla vytvořena zcela unikátní cela na in-situ měření bariérových ochranných vlastností patiny vytvořené na povrchu stojiny (stěny) – vertikální uspořádání. Nejdříve opět následovalo vytvoření obrazového schématu (viz **Obr. FV 4.** – boční řez, **Obr. FV 5.** – čelní pohled) a následně byla vytvořena expoziční vertikální cela – to je zřejmé na **Obr. FV 6.** Tato cela byla opět navržena bez destruktivní možnosti aplikace na povrch ocelové mostní konstrukce (stojina, stěna) s tím, že byla vytvořena se dvěma podtlakovými kontra přísavkami, jejichž povrch je před každou aplikací opatřen tenkou vrstvou konvenční vazelíny. Tříelektrodové zapojení i s imobilizací referenční elektrody je detailně u této (vertikální) cely popsáno na **Obr. FV 7.** Zapojení vzorku potom nesla vlastní stěna (stojina) pásnice a jako referenční elektroda byl opět zvolen spirálově vinutý platinový drátek, která vstupoval bočně do komory imobilizované referenční elektrody.



Obr. FV 3. Obrázek tříelektrodového zapojení pro měření EIS charakteristik bariérových ochranných vlastností patiny (stavu patiny) u horizontální cely ve Fyzikálně-chemickém centru Kloknerova ústavu ČVUT



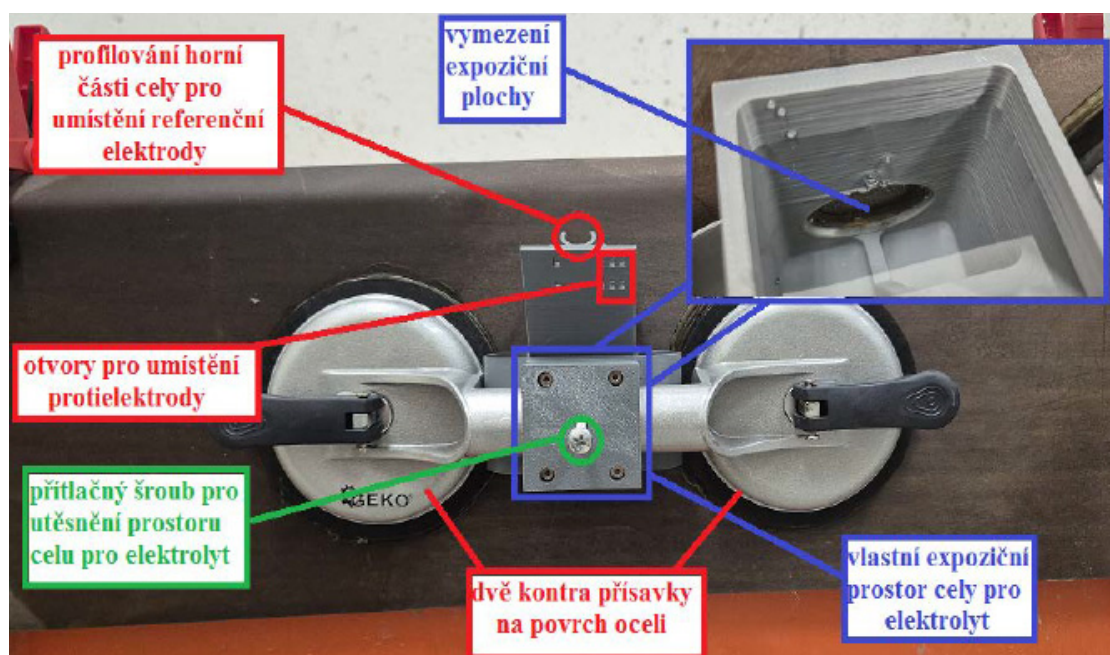
Obr. FV 4. Vytvořené obrazové schéma in-situ měřící cely pro stanovení bariérových ochranných vlastností patiny stojiny (stěny) ocelové mostní konstrukce –boční řez



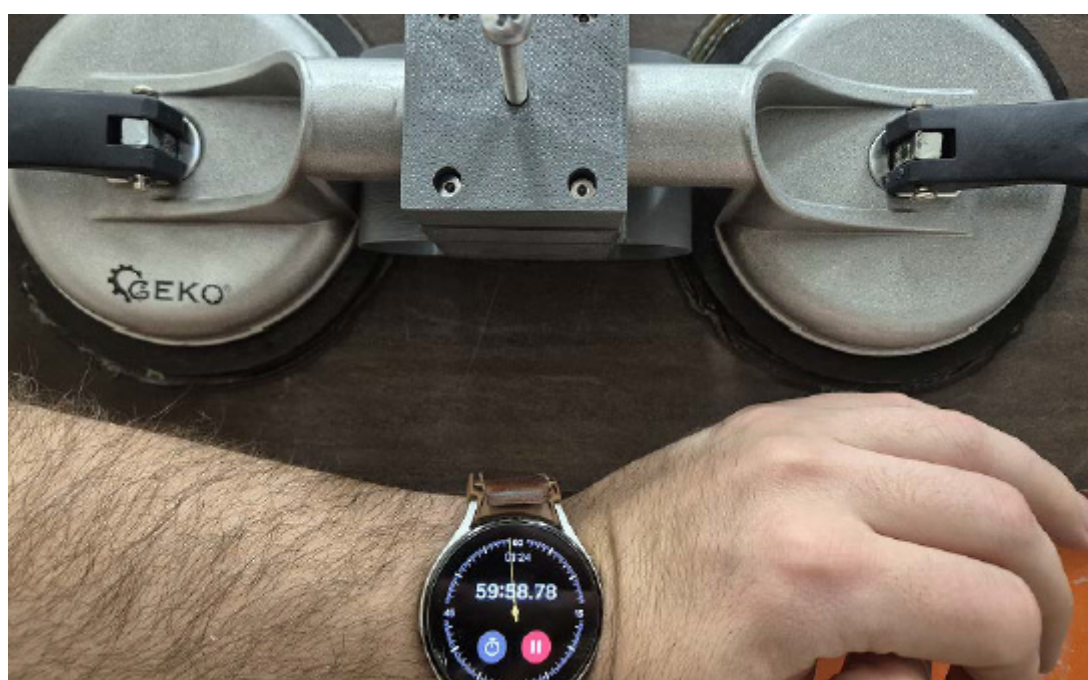
Obr. FV 5. Vytvořené obrazové schéma in-situ měřící cely pro stanovení bariérových ochranných vlastností patiny stojiny (stěny) ocelové mostní konstrukce –čelní pohled (podélný řez)



Obr. FV 6. Realizace této cely s přesností 0,1 mm dle schématu prostřednictvím 3D tisku – aplikace na stěnu (stojinu) ocelové mostní konstrukce – navrženo na pásnici s délkou přesahující 20 cm



Obr. FV 7. Obrázek tříelektrodového zapojení pro měření EIS charakteristik bariérových ochranných vlastností patiny (stavu patiny) u vertikální cely ve Fyzikálně-chemickém centru Kloknerova ústavu ČVUT



Obr. FV 8. Zobrazení prodloužené doby přidrženosti s aplikací 1,5 vrstvy vazelíny podél okrajů obou přísavek

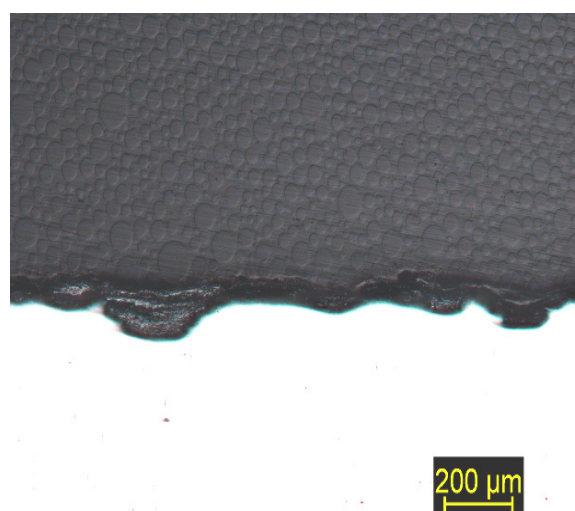
U této vertikální cely byla testována přidržnost (aplikace bipodálního mechanického siloměru) k povrchu (vertikální směr) patinující oceli s ohledem na aplikaci tenkých vrstev vazelíny a jejich lokalizaci (okraj/střed přísavek). Tloušťka vrstvy byla dána tloušťkou plochy konvenční ocelové špachtle – zkoušení je zobrazeno na **Obr. FV 8**.

METODIKA MĚŘENÍ EIS A VYHODNOCENÍ

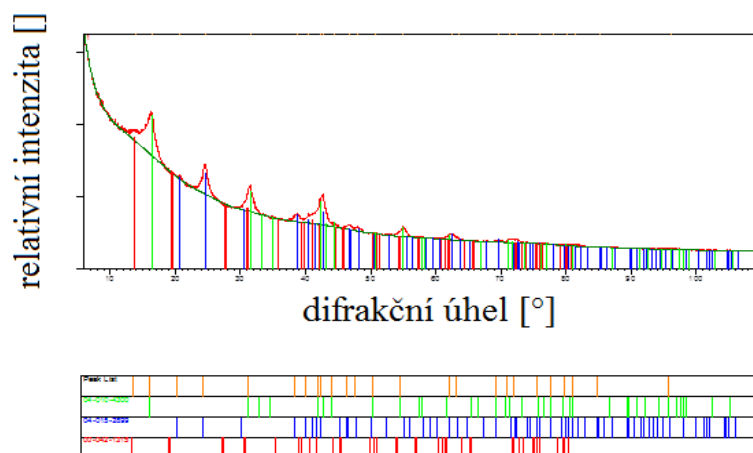
Pro možnost využití elektrochemické impedanční spektroskopie pro měření bariérových ochranných vlastností patiny (korozních produktů patinujících ocelí) byly jednotlivé zkušební kupóny odebrané ke srovnávací analýze podrobeny konvenčnímu hodnocení. Toto hodnocení zahrnuje vizuální (kolorimetrické stanovení) hodnocení stavu patiny (barva, pórovitost, morfologie – viz **Obr. FV 9.**) s hodnocením tloušťky precipitovaných korozních produktů. Tloušťka korozních produktů je hodnocena na povrchu odebraných kupónů na příčném řezu (optická mikroskopie – viz **Obr. FV 10.**) případně na jednotlivých površích mostní konstrukce z patinující oceli konvenčním měřením za použití magneticko-indukční metody. Jako další parametr, jehož výsledky jsou korelovány s charakteristikami EIS je měřením tzv. PAI indexů (Protection Ability Index), konkrétně $PAI(\alpha)$ a $PAI(\beta)$. Toto měření se provádí prostřednictvím kalibrované XRD analýzy odebraných a homogenizovaných (třecí miska s tloučkem, promytí ethanolem) korozních produktů (měření reflexních parametrů na změně 2 Theta $Co(\alpha)$). Na dále uvedeném **Obr. FV 11.** je zobrazen příklad měření s vyhodnocením. Výsledky všech těchto analýz jsou korelovány s výsledky měření řádových specifických odporů R_p ($\Omega \cdot cm^2$) získaných ze shodných oblastí detekované patiny prostřednictvím EIS.



Obr. FV 9. Příklad vizuálního hodnocení (obsahuje kolorimetrické měřítko) stavu patiny na vzorku odebraného kupónu ke korelaci se vstupními hodnotami EIS charakteristik



Obr. FV 10. Příklad měření tloušťky korozních produktů (patiny) prostřednictvím optické mikroskopie na příčném řezu na vzorku odebraného kupónu ke korelaci se vstupními hodnotami EIS charakteristik

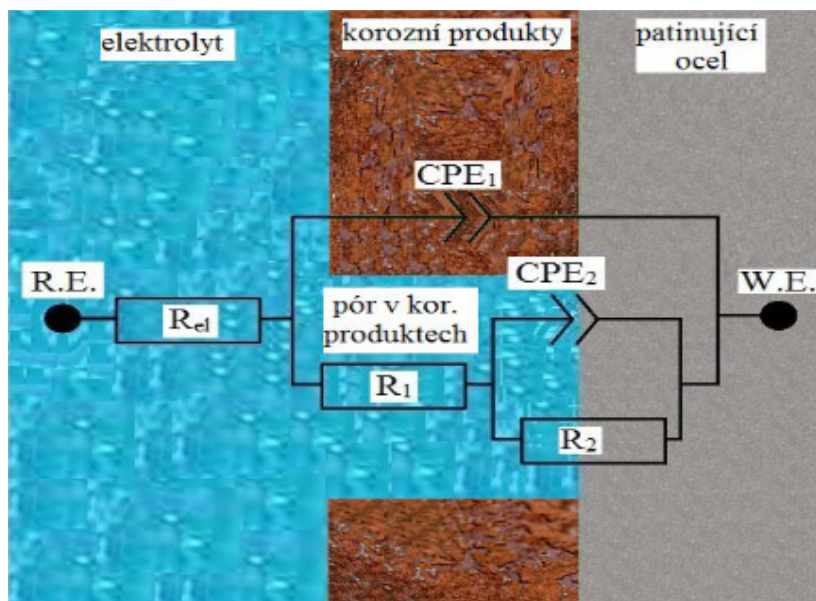


$$\text{PAI}(\alpha) - 0,20$$

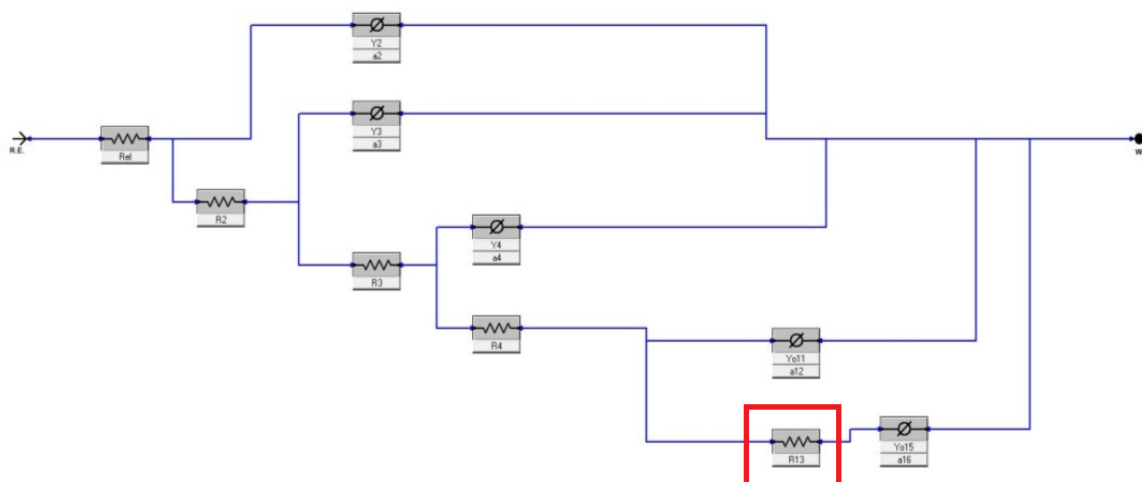
$$\text{PAI}(\beta) - 0,72$$

Obr. FV 11. Ukázka měření a vyhodnocení PAI(α) a PAI(β) patiny vytvořené na povrchu stojiny mostní konstrukce SO 233 (dálnice D47)

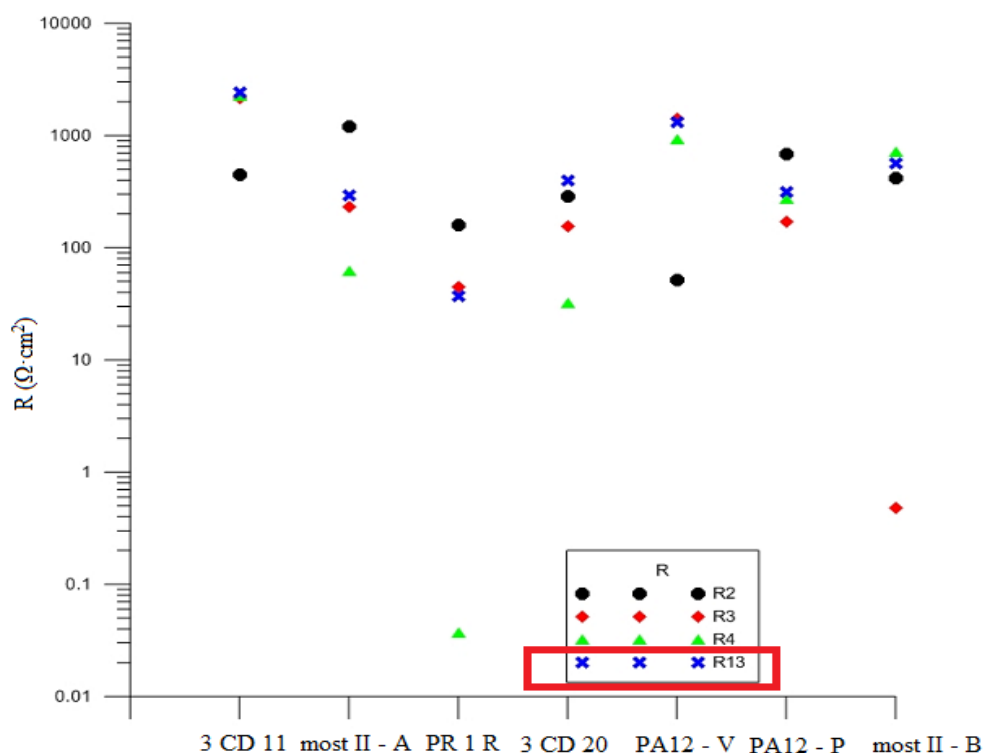
Na **Obr. FV 12.** a **Obr. FV 13.** jsou zobrazeny dva nejčastěji používané ekvivalentní obvody, které byly zvoleny při modulaci výsledků EIS spekter po konvenčním fitování jednotlivých naměřených parametrů – $Z_{\text{mod}} f(f \text{ [Hz]})$ a $\Theta f(f \text{ [Hz]})$. Ekvivalentní obvod simulující vícevrstvý systém (**Obr. FV 13.**) byl použit méně často a to u patiny s významně vyšší tloušťkou korozních produktů (patiny) a to u většiny horního povrchu dolních pásnic a menšího množství stojin a u ostatních povrchů (většina stojin (stěn) a další) byl použit model porézní vrstvy (**Obr. FV 12.**). Pro vícevrstevný násobný systém bylo ověřeno, že bariérové ochranné vlastnosti poskytuje především vrstva korozních produktů na fázovém rozhraní (R_{13}) – viz **Obr. FV 14.** Respektive souvislá vrstva bez strukturních defektů na fázovém rozhraní dokáže v některých případech limitovat reakci výměny náboje.



Obr. FV 12. Převzatý ekvivalentní obvod (model porézní vrstvy) pro vyhodnocení EIS specifického řádového odporu R_p vrstvy patiny – s vyznačením specifického odporu na fázovém rozhraní (jednoznačně více frekventovaný při in-situ aplikaci)



Obr. FV 13. Převzatý ekvivalentní obvod (vícevrstvý násobný model vrstvy) pro vyhodnocení EIS specifického řádového odporu R_p vrstvy patiny – s vyznačením specifického odporu na fázovém rozhraní (méně frekventovaný při in-situ aplikaci)



Obr. FV 14. Příklad vyhodnocení EIS charakteristik řádového specifického odporu R_p (vyznačení specifického odporu na fázovém rozhraní R_{13}) dle ekvivalentního obvodu uvedeném na **Obr. FV 13**.

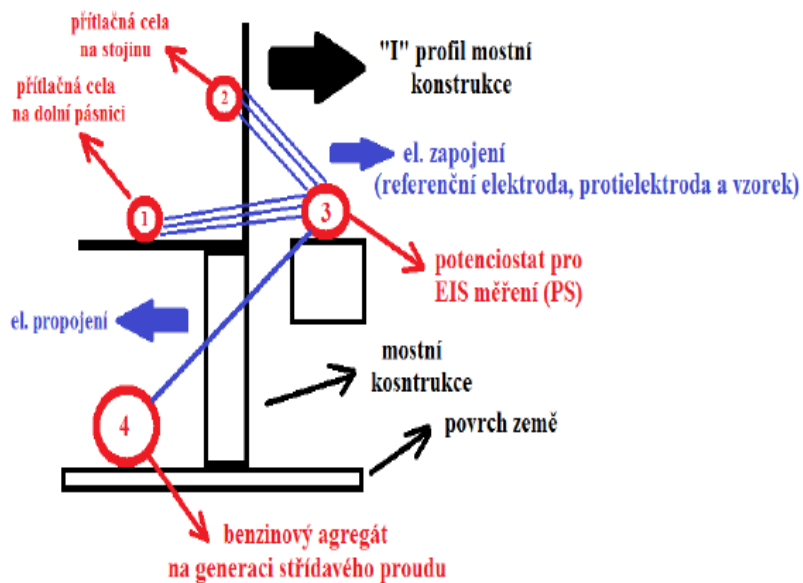
Naopak při vyhodnocení výsledků EIS charakteristik při využití ekvivalentního obvodu porézní vrstvy (**Obr. FV 12.**) je celkový R_p dán součtem specifického násobného odporu bariérové vrstvy ($R_1 = R_{por}$) a mezifázové vrstvy ($R_2 = R_{corr}$). Výpočty celkových specifických násobných odporů jsou dány rovnicemi (r1) – pro systém vícevrstvý násobný a (r2) – pro systém porézní vrstvy.

$$R_p = \sum_{i=1}^n R_i \sim R_{13} \quad (r1)$$

$$R_p = \sum_{i=1}^n R_i \sim (R_{por} + R_{corr}) \quad (r2)$$

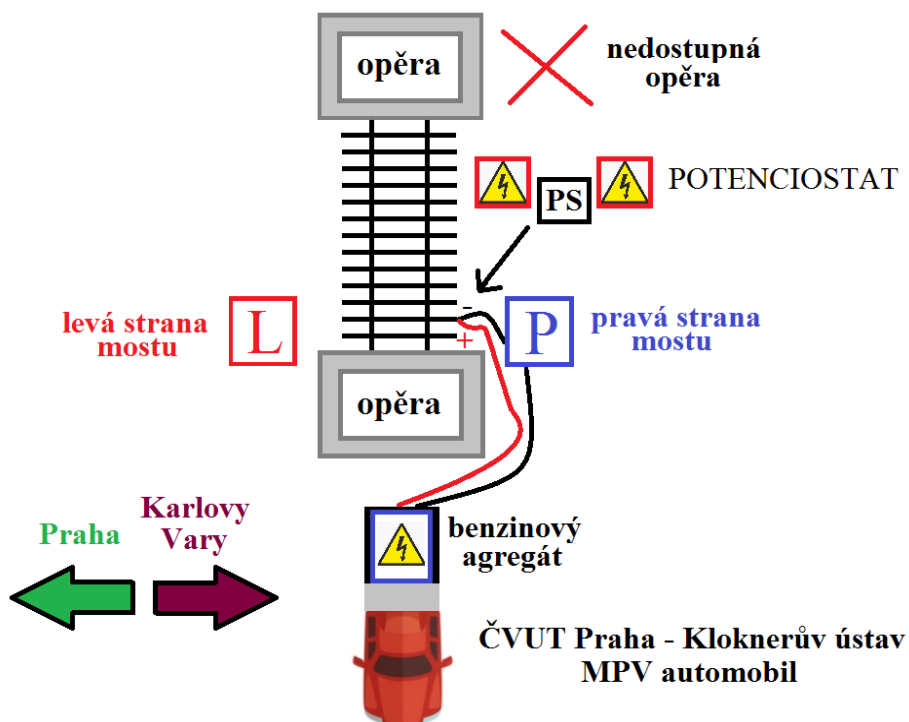
MĚŘENÍ EIS NA MOSTNÍCH KONSTRUKCÍCH

Vlastní měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na reálných mostních konstrukcích (měřeno na površích: horní povrch dolní pásnice a povrch stojiny/stěny) byl realizován např. na mostních konstrukcích MOTOL, OSTRAVA (stavební objekty SO 202 a SO 203), ŽALMANOV a dalších.



Obr. FV 15. Zobecněný systém zapojení použitý pro měření charakteristik EIS na mostních konstrukcích

**technické uspořádání měření EIS na mostě
ŽALMANOV**



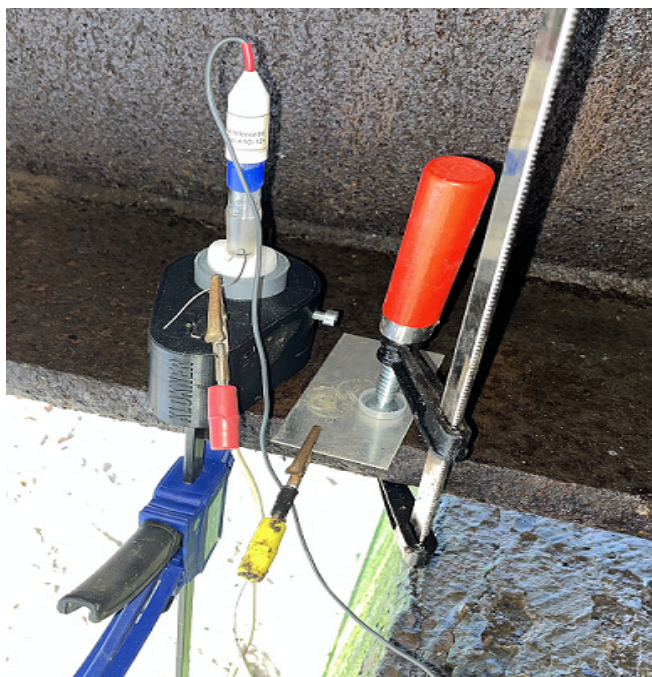
Obr. FV 16. Konkrétní systém měření EIS charakteristik na mostní konstrukci s omezenou dostupností – konkrétně most Žalmanov



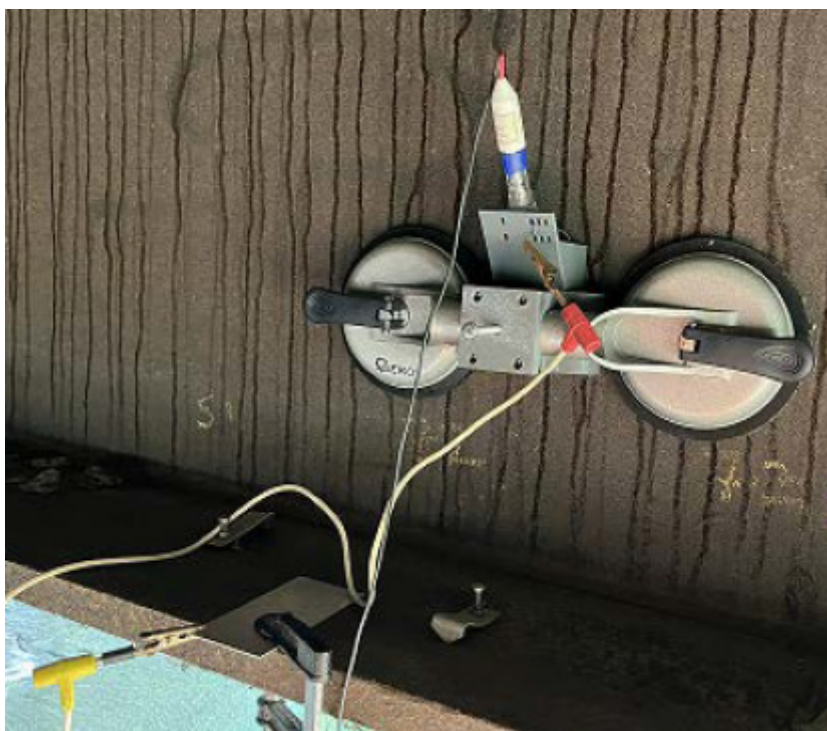
Obr. FV 17. Měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na OP 4 (horní povrch dolní pásnice) – čtvrtý nosník (pravá strana) - MOTOL



Obr. FV 18. Měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na OP 1 (horní povrch dolní pásnice) – pravý nosník (pravá strana) – OSTRAVA – SO₂



Obr. FV 19. Měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na OP 1 (horní povrch dolní pásnice) – druhý nosník (pravá strana) - ŽALMANOV



Obr. FV 20. Měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na OP 4 (stojina/stěna) – čtvrtý nosník (levá strana) - MOTOL



Obr. FV 21. Měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na OP 1 (stojina/stěna) – první nosník (levá strana) – OSTRAVA SO 203



Obr. FV 22. Měření EIS charakteristik (řádového specifického odporu) na OP 1 (stojina/stěna) – první nosník (pravá strana) – ŽALMANOV

K použití potenciostatu k měření EIS charakteristik bylo potřeba zajistit benzinovou centrálu – kde uspořádání k realizaci na mostních konstrukcích bez omezení přístupu a s omezeným přístupem zobrazuje **Obr. FV 15.** a **Obr. FV 16.** Na obrázcích **Obr. FV 17. – Obr. FV 19.** je zobrazeno použití funkčního vzorku G_{funk} (horizontální cela) pro měření EIS charakteristik na horním povrchu dolních pásnic reálných mostních konstrukcích (mosty: Motol, Ostrava – SO 202 a SO 203, Žalmanov) a na **Obr. FV 20. – Obr. FV 22.** potom je zobrazeno použití funkčního vzorku G_{funk} (vertikální cela) pro měření EIS charakteristik na povrchu stojiny/stěny nosníku. Výsledky vyhodnocených specifických řádových odporů R_p jednotlivých patin na povrchu patinující oceli je pro srovnání doporučeno interpretovat do podoby sloupcových grafů s implementací směrodatné odchylky.