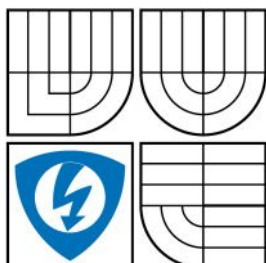


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRONIC TECHNOLOGY

# NÍZKOTEPLTNÍ VODÍKOVÉ PALIVOVÉ ČLÁNKY

LOW TEMPERATURE FUEL CELLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

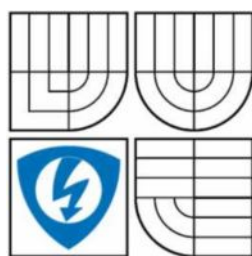
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Tomáš Kazda

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. PETER BARATH, PH.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Tomáš Kazda  
**Ročník:** 3

**ID:** 78272  
**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Nízkoteplotní vodíkové palivové články**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou palivových článků. Připravte elektrodové hmoty s různými typy katalyzátorů. Připravte MEA strukturu a proměřte v experimentálním palivovém článku. Výsledky vyhodnotte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 3.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Peter Barath, Ph.D.

**prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Tomáš Kazda  
Bytem: Brno, Kollárova 7, 61200  
Narozen/a (datum a místo): 28.3.1986, Brno

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Nízkooteplotní vodíkové palivové články

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Peter Barath, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

tištěné formě – počet exemplářů 2

elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 3.6.2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt:**

Bakalářská práce je zaměřena na nízkoteplotní palivové články a jejich použití v automobilech a mobilních aplikacích. V teoretické části projektu je popsán rozvoj palivových článků v posledních letech i historicky, dále byly popsány jejich funkce a jednotlivé druhy palivových článků se zaměřením na nízkoteplotní články. V praktické části jsem vytvářeli různé druhy uhlíkových směsí. Byly prováděny měření směsí na rotační diskové elektrodě a v experimentálním palivovém článku. V závěru práce jsou experimentálně vyhodnoceny různé typy uhlíkových materiálů s různým obsahem deponované platiny. Výsledky jsou pomocí elektroanalytických metod vyhodnoceny, pomocí tohoto zhodnocení bylo optimalizované složení materiálu, použitelných jako elektrodová hmota v palivovém článku.

## **Abstrakt:**

The Bachelor's thesis is aimed at the low-temperature fuel cells and their usage in cars and mobile applications. In the theory part of this project is described the evolution of the fuel cells in last years and historically as well. Further there are described their functions and particular kinds of the fuel cells with aim at low-temperature cells. In the practical part of this thesis we were making different kinds of carbon mixtures. We have been doing measurements of mixtures on rotate disk electrode and in the experimental fuel cell. At the end of the work are experimentally evaluated different types of carbon materials with different contents of platinum depositing. The results are evaluated using electro analytical methods, using this evaluation to optimize the composition of the material used as electrode material in fuel cells.

## **Klíčová slova:**

Palivový článek, vodíkové programy, aplikace palivových článků, rotační disková elektroda, MEA struktura, skladování vodíku, elektrodové materiály.

## **Keywords:**

Fuel cell, hydrogen programs, application of fuel cells, rotating disk electrode, MEA structure, hydrogen storage, electrode materials.

## **Bibliografická citace mé práce:**

KAZDA, T. *Nízkoteplotní vodíkové palivové články*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 70s. Vedoucí semestrální práce Ing. Peter Barath, Ph.D.

# **Prohlášení**

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Nízkoteplotní vodíkové palivové články jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 3. června 2009

.....  
podpis autora

# Osnova

<b>1. ÚVOD</b> .....	- 1 -
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	- 2 -
<b>2.1. Podpora použití článku ve světě</b> .....	- 2 -
2.1.1. Japonský program palivových článků.....	- 2 -
2.1.2. Islandský projekt ECTOS.....	- 2 -
2.1.3. Evropský projekt CUTE.....	- 2 -
2.1.4. Kalifornská vodíková dálnice.....	- 2 -
2.1.5. Kalifornské partnerství palivových článků.....	- 3 -
<b>2.2. Moderní trendy v použití palivových článků</b> .....	- 3 -
2.2.1. Použití v automobilovém průmyslu.....	- 4 -
2.2.2. Použití v mobilních technologiích.....	- 9 -
<b>2.3. Vodíkové hospodářství</b> .....	- 11 -
2.3.1. Struktura vodíku a jeho vlastnosti.....	- 11 -
2.3.2. Příprava vodíku.....	- 13 -
2.3.3. Skladování vodíku.....	- 14 -
<b>2.4. Palivové články</b> .....	- 15 -
2.4.1. Historie.....	- 15 -
2.4.2. Výhody a nevýhody palivových článků.....	- 17 -
2.4.3. Princip palivového článku.....	- 18 -
2.4.4. Rozdělení palivových článků podle teploty.....	- 19 -
2.4.5. Druhy nízkoteplotních palivových článků.....	- 19 -
2.4.6. Iontoměničové membrány.....	- 22 -
<b>3. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	- 23 -
<b>3.1. Příprava materiálu pro elektrody</b> .....	- 23 -
<b>3.2. Programovatelné rozhraní Nova</b> .....	- 25 -
<b>3.3. Měření na rotační diskové elektrodě</b> .....	- 25 -
3.3.1. Výsledky měření na RDE.....	- 29 -
<b>3.4. Příprava MEA struktury</b> .....	- 57 -
<b>4. ZÁVĚR</b> .....	- 60 -
<b>5. POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	- 61 -
<b>6. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	- 63 -

# 1 Úvod

Práce se zabývá strukturou a funkcí nízkoteplotních palivových článků vodík - kyslík a moderními trendy v jejich využití. Práci jsem rozdělil na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá trendy použití mobilních článků v automobilovém průmyslu a přenosných zařízeních a organizacemi podporujícími rozšíření palivových článků ve světě. Pozornost jsem dále věnoval i vodíkovému hospodářství, které je nedílnou součástí používání palivových článků. Další část jsem zaměřil na samotné palivové články, jejich historii, výhody a nevýhody, princip funkce palivového článku a rozdělení do skupin dle vlastností článků. Závěr teoretické části je věnován struktuře a funkci iontoměnicových membrán. Praktická část popisuje postup výroby různých typů elektrodoých hmot a jejich použití při měření na rotační diskové elektrodě a při konstrukci MEA struktury. Součástí praktické části je dále i popis programovatelného rozhraní Nova.

## **2 Teoretická část**

### **2.1 Podpora použití vodíku a palivových článků ve světě**

#### **2.1.1 Japonský program palivových článků (JHFC – Japan Hydrogen Fuel Cell Program)**

JHFC je první Japonský rozsáhlý výzkumný projekt zahrnující demonstraci funkčního vozidla s palivovými články. Tento projekt byl zahájen v roce 2002. V roce 2003 uskutečnilo 8 autobusů s palivovými články určených na komerční cesty zkušební cestu na dálnici, cestou byly získány data pro hodnocení spolehlivosti, ekologických charakteristik a spotřeby paliva. V rámci projektu JHFC jsou v okolí Tokya a Osace testovány vozy GM Hydrogen3, Toyota FCHV a FCHV BUS, Honda FCX, Daimler F-Cell, Nissan X-TRIAL FCV a Mazda RX-8 RE jako jediná spalující vodík přímo. Projekt JHFC je řízen Japonským METI (Japonské ministerstvo hospodářství, průmyslu a obchodu), které nejen podporuje výzkum a vývoj, ale také se snaží zvyšovat povědomí Japonské veřejnosti. Projekt zahrnuje provoz 5 čerpacích stanic v okolí Tokya, jedna z těchto stanic je provozována skupinou Shell. V roce 2004 byl počet stanic zvýšen na deset. Dnešní počet čerpacích stanic je třináct včetně 2 dočasných a dvou nových stanic v Osace.[3]

#### **2.1.2 Islandský projekt ECTOS**

Společný podnik s názvem Island New Energy vyvíjí vodíkové výrobní technologie a palivové články pro aplikaci na Islandu, který má v plánu být první vodíkově napájeným hospodářstvím na světě před koncem roku 2050. Firmy Shell, DimlerChrysler a Norsk Hydro jsou partnery Islandu v tomto ambiciózním projektu. Firma Shell bude rozmísťovat na Islandu, především v Reykjavíku, síť čerpacích stanic. Norsk Hydro dodává elektrolyzéry a DimlerChrysler dodává vodíkem napájené městské autobusy. V roce 2003 byly dodány první tři tyto autobusy, které tvořily 4% z celkové Reykjavické autobusové flotily.[3]

#### **2.1.3 Evropský projekt CUTE**

Projekt CUTE (Clean urban transport for Europe – Čistá městská doprava pro Evropu) probíhá v 8 Evropských městech v Australském Perthu a Čínském Pekingu. Projekt je podpořený z finančních zdrojů EU a jeho celkový rozpočet je kolem 52 milionů eur. První autobus na vodíkový pohon byl zprovozněn v roce 2003 v Madridu v rámci konference Mezinárodní unie veřejné dopravy. Dnešní flotila čítá 33 autobusů s palivovými články a 14 autobusů s přímým spalováním vodíku. Posledním partnerským městem tohoto projektu se stal Čínský Peking, který v rámci Olympijských her zprovoznil na území města šest autobusů s palivovými články.[3]

#### **2.1.4 Kalifornská vodíková dálnice**

Program Kalifornské vodíkové dálnice byl zahájen v roce 2001. Tento projekt má v plánu udělat státní dopravu mnohem čistější. Pro vytvoření dostatečné základny pro dopravu bude vytvořeno 150-200 vodíkových čerpacích stanic, což znamená na každých 32 km jedna stanice. Do roku 2005 bylo vybudováno 11 stanic a dnes je v provozu celkem 26 stanic. Cena této základní sítě se odhaduje na 90 mil. dolarů, tato částka bude hrazena většinou ze soukromých investic. Partnery projektu Kalifornské vodíkové dálnice je asi 90 firem, veřejných agentur a výzkumných organizací. Patří do nich několik automobilek, výrobců motorů a výrobců palivových článků a firma Shell a ChevronTexaco.[3]



### 2.1.5 Kalifornské partnerství palivových článků

Je spojení 30 subjektů zabývajících se výrobou automobilů, výrobců energií, ropných rafinerií, vývojářů palivových článků a vládních a vědeckých agentur. Toto uskupení vzniklo v roce 1999.[3] Skupina v roce 2008 měla v provozu 250 vozidel poháněných palivovými články, tyto vozy využívají síť stanic vybudovanou projektem Kalifornské vodíkové dálnice, která nyní činí 26 funkčních čerpadel a 10 čerpadel ve výstavbě.[17]

Tento program sleduje čtyři hlavní cíle:

- Potvrzení možnosti sériové výroby ozkoušením v reálných podmínkách Kalifornie.
- Dokázat možnost realizace jedné alternativní palivové infrastruktury.
- Představit a připravit techniku pro širokou veřejnost
- Nalézt cestu pro zavedení na trh, identifikovat problémy a rozpracovat jejich řešení.



Obr.1: Rozmístění vodíkových čerpacích stanic v Kalifornii.[17]

## 2.2 Moderní trendy v použití palivových článků

Palivové články nacházejí v dnešní době uplatnění jako pohonné jednotky automobilů, z důvodu jejich ekologické šetrnosti a snižujícím se zásobám nerostných surovin. Další uplatnění nachází ve sféře přenosných zařízení. Mnoho výrobců přenosných zařízení se snaží pomocí článků nahradit konvenční baterie, a tím zvětšit provozní dobu těchto zařízení, a také zvětší možnost implementace nových, na energii náročných technologií do těchto zařízení.

## 2.2.1 Použití v automobilovém průmyslu

Na vývoji palivových článků pro použití v automobilech dnes pracuje většina předních výrobců aut. Tento vývoj je zdůvodněn ubývajícimi zásobami ropy a snahou o zvýšení ekologické šetrnosti provozu automobilů.

### GM

V roce 2004 General Motors ustanovil vzdálenostní světový rekord automobilu na palivové články překonáním vzdálenosti 9751 km. Při této cestě překročil čtrnáct zemí od severního Norska až k portugalskému Lisabonu. Rekord byl ustanoven s prototypem GM HydroGen3 založeném na Oplu Zavita. Dřívější rekord držela společnost DaimlerChrysler, jejíž vůz zdolal vzdálenost 5280 km ze San Franciska do Washingtonu DC. Hlavním cílem GM je zajistit komerční životaschopnost vozu s palivovými články v roce 2010.

Prototyp HydroGen3 musel vydržet během jeho 38-denní cesty, bez zastávek na opravu vozidla, extrémní teploty a špatný stav vozovky. Byl podroben vysokým rychlostem, strmým horským průsmykům a teplotním výkyvům více než 18°C. Palivové články dodávali energii 60 kW motoru pohánějícímu přední kola a schopnému dosáhnout rychlost 160 km/h. Průměrná denní uražená vzdálenost byla kolem 480 km, k tankování byla používána pojízdná tankovací stanice a průměrná doba tankování byla 4 minuty.[3]



Obr.2: HydroGen3

GM rovněž rozvíjí Seqel koncept car jež by měl akcelarovat na 100 km/h za méně než 10 s a dosáhnout dojezdu 500 km. Tento vůz má tři zásobníky na plynný vodík pod tlakem 70 MPa a palivový článek poskytující výkon 73k W, který je doplněn o lithium-ion akumulátor o hmotnosti 67 kg umístěný u zadní nápravy. Nejvyšší rychlost tohoto 2170 kg těžkého vozu je 145 km/h.[8]



Obr.3: GM Seqel.[8]

## Ford

Ford Motor Co. zahájila výrobu flotily Focusů sedan poháněných palivovými články na konci roku 2004, ty budou nasazeny v několika městech po celém světě. Tyto Focusy mohou ujet vzdálenost 160 km maximální rychlostí 130 km/h a jsou poháněny 67 kW elektromotorem napájeným PEM článkem od Balcar Power Systems, vodík je uskladněn v nádrži při tlaku 24,8 MPa.[3]

Ford je také největším akcionářem Mazdy, která rozvíjí rotační motory spalující vodík a to včetně vodíkem napájeného konceptu sportovního vozu Nagare. Mazda hodlá pokračovat v této práci a také spolupracovat s Fordem na technologii palivových článků.[9]



**Obr.4:** Mazda Nagare.[9]

## Honda FCX

Na počátku řady FCX stály dva primitivní prototypy FCX-v1 a FCX-v2 představené v roce 1999. Dalším krokem vývoje byl FCX-v3 představený v letech 2000 a 2001 na několika veřejných akcích. Do testování v reálném provozu se dostalo prvních padesát prototypů FCX-V4 roku 2002. Vůz se stal prvním automobilem s palivovými články se schválení k provozu v USA. Tento vůz byl nabízen v USA a Japonsku k pronajmu případným zájemcům pro jejich potřeby. Do dnešní doby se vývoj opět posunul a nová generace FCX Clarity s moderními palivovými články, v ohledech nikterak nezaostává za běžnými vozy.

FCX Clarity používá nejnovější generaci vertikálních článků V Flow. Oproti starším článkům Honda FC má V Flow o polovinu vyšší výkon na litr a o dvě třetiny vyšší výkon na kilogram. Jeho hmotnost je 67 kg a má objem 57 litrů a výkon 100 kW, jeho uložení ve středovém panelu je vhodné z důvodu dobrého rozložení hmotnosti. Struktura nového článku lépe odvádí vodu a tím se zlepšuje přísun výkonu hned po zpuštění. Dalším zlepšením je možnost nastartovat i při teplotě  $-30^{\circ}\text{C}$ . Vodíková nádrž je umístěna nad zadní nápravou a její kapacita vzrostla oproti předchozí generaci o 24% na 171 litrů, vodík je v ní pod tlakem 35 MPa. Dojezd tohoto vozu je 450 km. Elektřina vyrobená článkem se ukládá do lithiové baterie, která je umístěna pod zadními sedadly. Koaxiální elektromotor Honda E-Drive dosahuje nejvyššího výkonu 100 kW a točivého momentu 256Nm. Díky tomuto výkonu směřujícímu na přední kola FCX Clarity vyvine rychlost 160km/h. Účinnost pohonu tohoto vozu je 60%, což podstatně převyšuje menší než 20% účinnost benzinových spalovacích motorů. Díky karosérii vyrobené z hliníku má FCX pohotovostní hmotnost 1635 kg.[4]

V Pondělí 16. června 2008 - z linky v prvním výrobním závodě na světě určeném výhradně pro výrobu vozidel poháněných palivovými články sjel FCX Clarity a stal se tak prvním sériově vyráběným automobilem na světě poháněným palivovými články. Honda plánuje vyrobit 200 vozů během tří let.



**Obr.5:** Honda FCX Clarity.[4]

## **Výzkum automobilových palivových článků firmou Ballard**

Strategické spojení mezi Ballard Power Systeme a automobilkou DaimlerChrysler a Ford vyústila v PEM články využívané v autobuse Citaro. Palivové články firmy Ballard jsou používány ve více než 110 vozech po celém světě, včetně 45 autobusů. Za posledních deset let firma Ballard významně přispěla do vývoje palivových článků pro automobily, ať už jejich zmenšením nebo snížením množství používané platiny. Firma Ballard prodala v roce 2004 německou část podniku, a nadále se zaměřila na vývoj další generace automobilových palivových článků a elektrického pohonu.[3]

## **Toyota**

V roce 2002 představila Toyota konkurenční program pro Hondu FCX, jedná se o vozidlo typu SUV poháněné pomocí palivových článků a pojmenované FCHV. Toyota FCHV je poháněna motorem s permanentním magnetem o výkonu 80 kW a točivém momentu 260 Nm. Motor je zásobován palivovým článkem PEM, vyvinutým přímo Toyotou, o výkonu 90 kW a sekundárním zdrojem z NiMH baterií. Stlačený plynný vodík je uložen v tlakové nádrži a vystačí na ujetí 300 km. Maximální rychlost je 155 km/h a vozidlo o pohotovostní hmotnosti 1860 kg, uveze 5 osob. Karoserie typu má odlehčenou střechu a některé další díly jsou vyrobeny z hliníkového plechu. [6]



**Obr.6:** Toyota FCHV.[6]

V roce 2005 Toyota odhalila upravenou verzi tohoto vozu s novou objemnější nádrží na vodík se zcela novým uzavíracím ventilem, jež pomáhá prodloužit dojezd o 10 procent na 330 km. Zvýšila se rovněž životnost nádrže ze tří na patnáct let. Vzrostl také výkon palivového článku a elektromotoru na 90 kW. Další úprava tohoto vozu se odehrála v roce 2007 díky nové vysokotlakové nádrži jež vydrží tlak 70 MPa a o 25% efektivnějším využití energie vzrostl dojezd vozu na 750 km.[7]

## Nissan

Nissan využil palivových článků ve vozidle založeném na SUV X-Trial a označil jej X-Trial FCV. Maximální výkon pohonné soustavy byl 90 kW a dojezd 350 km, k článku byly přidány lithium-ion baterie pro uchovávání přebytečné energie a energie získané při brzdění. Tento vůz byl schválen pro použití na Japonských veřejných komunikacích. V roce 2008 Nissan ustanovuje první rychlostní rekord vozu poháněného palivovými články zjetím času 11 minut a 58 sekund na severní smyčce Nürburgringu. Tato nová verze vozu disponuje výkonem 90 kW a točivým momentem 280 Nm a je schopna dosáhnout rychlosti 150 km/h. Vodík je uložen v nové nádrži pod tlakem 70 MPa čímž se zvýšil dojezd na 500 km.[5]



**Obr.7:** Nissan X-Trial FCV.[5]

Na konci roku 2008 Nissan představil novou verzi vlastního palivového článku jež je o 35% levnější, především díky snížení množství využívané platiny na polovinu. Struktura nového palivového článku je nyní hustší oproti starším typům. To bylo umožněno díky lepší vodivosti elektrolytu a novým kovovým separátorům, které slouží k regulaci reakce, oddělují vodík, kyslík a vodu sloužící ke chlazení. V současnosti se na výrobu separátorů používá uhlík, ale Nissan vyvinul kovové separátory se speciální ochrannou vrstvou, která brání korozi a zvyšuje trvanlivost. Těmito vylepšeními bylo dosaženo zdvojnásobení měrného výkonu. Díky tomuto zvýšení mohla být snížena velikost o 25% z 90 na 68 l, ale zároveň vzrostl 1,4 x výkon z 90 na 130 kW.

## DaimlerChrysler

V roce 1994 sestrojil Mercedes první vozidlo s palivovými články, na tomto prototypu byla vyzkoušena vhodnost k pohonu automobilu. Tento prototyp byl nazván NECAR 1, technika zaplňovala celý vnitřní prostor transportéru a vážila 800 kg. Vůz používal 12 svazků palivových článků, které dodávaly elektrický výkon 50kW. V roce 1996 byl prezentován prototyp NECAR 2, založený na Mercedesu-Benz třídy V. Nabízel šest míst a dosahoval rychlosti 110 km/h a dojezdu 250 km. Technika palivového článku se nalézala pod zadními sedadly, dvě vodíkové nádrže byly uloženy na střeše. Další verze NECAR 3 získávala vodík přímo ve voze z tekutého methanolu a byla představena v roce 1997. Maximální rychlost byla 120 km/h a dosahovala dojezdu 400 km. Prototyp byl založen na vozidle třídy A, poskytoval prostor jen pro řidiče a spolujezdce.[18]



**Obr.8:** Vozidla NECAR 1,2,3.

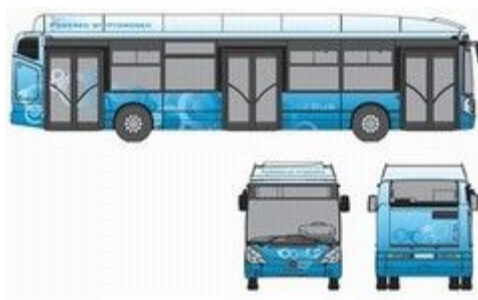
V roce 1999 byl představen prototyp NECAR 4 využívající opět tekutý vodík. Veškerá technika byla zabudována do sendvičové podlahy vozu třídy A. Díky těmto úpravám vůz poskytoval místo pro pět cestujících a zavazadlový prostor, díky výkonu 70 kW dosahoval rychlost 145 km/h a dojezd 450 km. Další verze označená NECAR 5 byla představena v roce 2000, jako palivo používala methanol. Kompletní reformační technika byla umístěna do sendvičové podlahy vozu Mercedes-benz třídy A. Vnitřní prostor byl srovnatelný s konvenčními vozy. Díky výkonu 75 kW vůz dosahoval rychlosti 150 km/h. Toto vozidlo bylo testováno v rámci projektu California Fuel Cell Partnership.[18] Na začátku roku 2008 byl testován v severním Švédsku novější model založený na platformě Mercedes-Benz třídy B. Inženýři věnovali pozornost studenému startu při teplotách  $-25^{\circ}\text{C}$  a souhrně jednotlivých dílčích částí systému v zimních podmínkách. Tento model využívá výkonnější systém pohonu oproti modelu třídy A výkon motoru činí 100 kW a točivý moment 320 Nm, což odpovídá výkonům dvoulitrového benzínového motoru. Mercedes plánuje výrobu malé série tohoto vozu na rok 2010.[16]



**Obr.9:** Vozidlo NECAR 5.

## FCZ-H2BUS

Jedná se o projekt vývoje a provozu prvního vodíkového autobusu v ČR. Tento projekt zařizuje několik organizací. ÚJV Řež a.s. ČR se stará o koordinaci celého projektu, Škoda Electric má na starost elektrický pohon, řídicí systém a finální kompletaci autobusu. O vývoj a výrobu palivového článku se stará firma Proton Motor GmbH Německo, která dále vyvíjí i palivové nádrže a vodíkovou infrastrukturu ve vozidle. Zásobování autobusu vodíkem a provoz čerpací stanice má na starost firma Linde Gas. Samotný autobus bude poháněn PEM článkem o výkonu 60kW a dalšími doplňkovými zdroji energie bude trakční baterie a ultrakapacitory. Vodík bude skladován ve čtyřech nádobách o objemu 820 l při tlaku 35 MPa na střeše autobusu. Tento autobus by se měl dostat do provozu v druhé polovině roku 2009 v městě Neratovice. [19]



Obr.10:Skica podoby Českého vodíkového autobusu.[19]

## 2.2.2 Použití v přenosných zařízeních

Standardní lithium-iontové baterie vydrží zásobit chytrý telefon někdy pouze 1 den. Firmy Toshiba, Motorola, Nokia, Samsung a jiné, řeší tento problém a výsledkem je využití palivových článků. Použití čistého vodíku a kyslíku není pro mobilní zařízení vhodné z důvodu velkého místa pro uskladnění vodíku. Jako zdroj vodíku se tedy používá metanol s využitím článku DMFC, u něhož probíhají reakce při pokojové teplotě, ale nevýhodou jsou velké rozměry a produkce CO<sub>2</sub> při výrobě energie. Někteří výrobci používají článek PEM-FC poháněný vodíkem získaným z metanolu předem. Dalšími nevýhodami použití metanolu je to, že běžné telefony se dají nabíjet kdekoli, u palivového článku se musíme spolehnout na přichystanou zásobu a také to, že metanol se může prodávat ve většině zemí pouze na povolení, v obchodech k tomu určených. Po 11.září se také zpřísnili bezpečnostní opatření na letištích a je tedy zakázáno brát na palubu letadla hořlavé látky a toto nařízení by platilo také pro palivové články.[10]

### Technický vývoj:

**2005 :** Japonská společnost TNN (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) začala pracovat na eliminaci těchto problémů. Výsledkem je článek PEM-FC spojující funkci zásobníku metanolu s el.obvodů a jednotku pro výrobu el.energie v jeden celek. Rozměry článku jsou 40x80x13 mm a hmotnost 104 g.[10]

Toshiba vyrobila první dva prototypy mobilního telefonu poháněného metanolovým palivovým článkem. Věčko označené o rozměrech 98x50x40 mm, hmotností 160 g, s nádrží na metanol o objemu 7 cm<sup>3</sup> a s klasickou rezervní Li-ion baterií. Palivo by mělo vydržet přibližně na měsíc provozu. Druhý klasický telefon označený o rozměrech 98x50x25 mm s nádrží o objemu 3 cm<sup>3</sup> bez rezervní baterie. [11]



Obr.11: Mobilní telefon a plnicí pero, nadměrná tloušťka při pohledu z boku a plnění telefonu.[11]

**2006 :** Společnost NTT vyrobila první funkční prototyp miniaturní nabíječky baterií pracující na principu článku PEM-FC. Článek pracuje na principu elektrolýzy vody. Výhodou je vyšší účinnost a palivem je destilovaná voda. Na jednu nádrž dokáže tato nabíječka dobýt Li-ion akumulátor s kapacitou 800 mAh a výstupním napětím 3,6 V až třikrát. Doba nabíjení se pohybuje kolem dvou hodin, tzn. jako při nabíjení z běžné

sítě. Rozměry prototypu jsou 24x24x70mm, hmotnost 45 g, udávaný výstupní výkon je 2 W. Kapacita při plném zaplnění nádrže přepočtená na elektrickou energii je 10 Wh.[12]



**Obr.12:**Nabíječka připojená k mobilnímu telefonu.[12]

**2007 :** Samsung představil na mezinárodním Korejském veletrhu palivovou buňku a vodní generátor využívající čistou vodu. Při provozu reaguje kov a voda za vzniku vodíku, který následně využívá palivový článek. Buňka dokáže vygenerovat výkon 3 W, což je pro mobilní zařízení dostatečné. Doba provozu je odhadována na dvojnásobnou, oproti standardní baterii tzn. doplňování vody zhruba za 5 dní. Využití na trhu Samsung předpokládá v roce 2010.[13]



**Obr.13:**Palivový článek a komunikátor poháněný tímto článkem.[13]

**2008 :** Toshiba dovezla na světový mobilní kongres funkční prototyp metanolového článku přijatelné velikosti. Jedna verze tohoto článku byla použita jako externí nabíječka a druhá integrovaná přímo do mobilu. Rozměry tohoto mobilu jsou 113x54x17,5 mm (na asijském trhu standardní velikost přístroje) a rozměry externího modulu 120x55x25 mm. Jedna nádržka metanolu by měla podle výrobce vydržet 3x déle než Li-ion baterie srovnatelných rozměrů. Množství zbylého metanolu určuje měrka na zadní straně přístroje. Toshiba použila článek DMFC vlastní konstrukce, který byl zapsán do Guinnessovy knihy rekordu jako nejmenší funkční palivový článek.[15]



**Obr.14:**Mobilnímu telefon poháněný článkem[15]

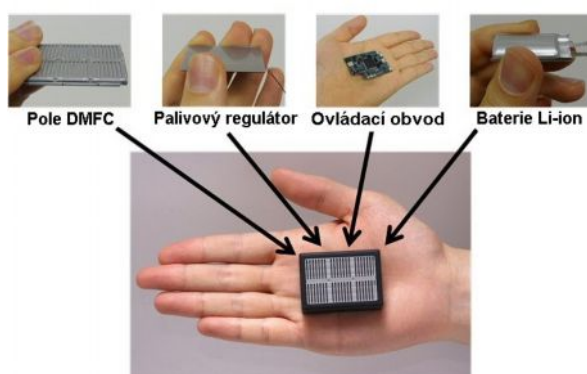




**Obr.15:**Plnění zásobníku stejným způsobem jako u zapalovače.[15]

Firma Sony představila hybridní palivový článek pro mobilní telefon, jehož rozměry jsou 50x30x10 mm a vejde se tedy do dlaně. Využívá stejně jako Toshiba článek typu DMFC, ale doplněný o několik dalších komponentů. Těmito komponenty jsou palivový usměrňovač řídicí obvod a Li-pol baterie, která je určena k vyrovnávání výkonových špiček. Sony již představilo několik konceptů, ale tentokrát se jedná o plně funkční prototyp určený ke komercializaci. Výkon tohoto článku je zhruba 3 W. [14]

### Micro fuel cell system



**Obr.16:**Článek firmy Sony a jeho části.[14]

## 2.3 Vodíkové hospodářství

Velkým problémem pro komerční rozšíření využívání vodíku, a tedy i palivových článků, je nedostatečná infrastruktura čerpacích míst, nedostatečná podpora ze strany legislativy a neochota investovat do tohoto rozvoje. Počet vodíkových čerpacích stanic na celém světě je něco přes 200, je to způsobeno jejich velkou finanční nákladností oproti standardním čerpacím stanicím a jejich takřka nulovou návratností z důvodu nedostatku vozidel používajících k pohonu vodík. Jejich vysoká cena je způsobena velkou technickou náročností systému pro skladování a výrobu vodíku, to stejné platí i pro vozidla a jakákoli jiná zařízení využívající vodík. Problémy spojené s výrobou a skladováním vodíku související s jeho vlastnostmi jsou náplní této kapitoly.

### 2.3.1 Struktura vodíku a jeho vlastnosti

Je základním stavebním prvkem, podílí se ze 75% na hmotě a 90% na počtu atomů přítomných ve vesmíru. Na zemi je vodík nejvíce obsažen ve vodě a jelikož vodík patří mezi biogenní prvky (společně s uhlíkem, kyslíkem a dusíkem) vyskytuje se ve všech organických sloučeninách. Vodíkový atom si můžeme představit

jako husté centrální jádro, kolem kterého obíhá jeden elektron. Většina hmotnosti atomu vodíku je soustředěna v jádře, jelikož je jeden elektron obíhající kolem něj velmi reaktivní, spojuje se vodík do molekul obsahujících dva atomy. [1]

## Izotopy vodíku

V přírodě se vyskytují tři izotopy vodíku:

- Protium (lehký vodík)  $^1\text{H}$
- Deuterium (těžký vodík)  $^2\text{H}$  také označován  $^2\text{D}$
- Tritium  $^3\text{H}$  také označován  $^3\text{T}$

Lehký vodík – je tvořen jedním protonem a jedním elektronem ve spojení s kyslíkem tvoří lehkou vodu.[1]

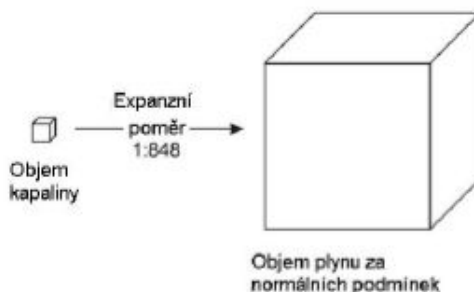
Deuterium – liší se od běžného vodíku atomovou hmotností jelikož se jádro skládá z jednoho protonu a neutronu. Je to stabilní izotop nepodléhající radioaktivní přeměně. V přírodě se běžně vyskytuje místo lehkého vodíku. Deuterium s kyslíkem tvoří těžkou vodu používanou v jaderném průmyslu. Deuterium lze také použít jako stopovač biochemických reakcí.[1]

Tritium – jádro je složeno z jednoho protonu a dvou neutronů má 3krát vyšší atomovou hmotnost než lehký vodík. Jádro Tritia se rozpadá s poločasem rozpadu 12,33 roku a vyzařuje malé množství beta záření. V přírodě se vyskytuje v horních vrstvách atmosféry. Tritium je jedním ze základních meziproductů jaderné fúze, která je energetický zdroj všech hvězd. Používá se jako jedna ze složek náplně termonukleární bomby.[1]

## Fyzikální vlastnosti

Vodík má druhou nejnižší teplotu varu a bod tání ze všech prvků, zkapalní pod teplotou varu  $-252,882\text{ }^\circ\text{C}$  ( $20,268\text{ K}$ ) pevnou látkou se stává pod bodem tání  $-259,125\text{ }^\circ\text{C}$  ( $14,025\text{ K}$ ) za normálního tlaku. Vodík je téměř bez chuti, zápachu a barvy, v případě úniku je za denního světla takřka neviditelný. Když se vodík získává z fosilních paliv je doprovázen dusíkem, oxidem uhličitým, oxidem uhelnatým a dalšími stopovými plyny. Většinou jsou tyto plyny také bezbarvé, bez chuti a zápachu. Vodík není toxický, ale může být dusivý, protože zaujímá místo kyslíku, takže jeho vdechování může způsobit bezvědomí a zadušení. Také při jeho vdechování může vzniknout hořlavá směs uvnitř těla. Plyny, které ho doprovází při výrobě z fosilních paliv, mohou působit také dusivě.[1]

Vodík má nejnižší atomovou váhu ze všech sloučenin, díky čemuž má jak v plynné tak v kapalně formě velmi malou hmotnost. Ve svém plynném skupenství zabírá vodík 848 krát větší objem než v kapalně podobě.[1]



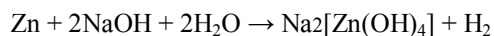
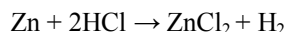
**Obr.17:**Expanzní poměr (kapalin – plyn ) vodíku.[1]

Molekuly plynného vodíku jsou menší než molekuly všech ostatních plynů a mohou procházet skrz mnoho materiálů, které jsou jinak vzduchotěsné nebo nepropustné pro ostatní plyny. Díky této vlastnosti se vodík špatně skladuje. Zkapalněný vodík se zase velmi rychle vypařuje, díky velmi nízkému bodu varu. Úniky vodíku jsou nebezpečné, jelikož je směs vodíku a vzduchu hořlavá, vznítí se následkem jiskry, plamene nebo vysoké teploty. Vodík je také hořlavý ve velmi velkém rozsahu koncentrace se vzduchem (4-75%) a výbušný v rozmezí koncentrace (15-59%). Vodíkový plamen je světle modrý a bez sazí, tedy na světle špatně viditelný. Teplota samovznícení vodíku je v celku vysoká 585°C, díky čemuž směs H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> je velmi těžké zapálit bez vnějšího podnětu. Vodík má také malou energii zážehu 0,02 mJ, takže i neviditelná jiskra nebo statická elektřina může způsobit zapálení. Proudící vodík může vygenerovat elektrostatický náboj, takže všechny součásti, které přichází do styku s vodíkem, musí být dobře uzemněny. Díky malým molekulám má ale také velmi vysokou rozptylnost, takže se velmi rychle zředí a tím se omezí možnost hořlavosti. [1]

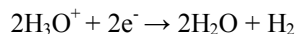
Množství energie, které se uvolní při reakci vodíku, je asi 2,5x vyšší než při spálení uhlíkového paliva. Vodík má tedy vysoký energetický obsah díky čemuž při jeho explozi dojde také k 2,5x většímu uvolnění energie. Vysokým energetickým obsahem se ale zvyšuje rychlost hoření, takže vodíkový oheň vyhoří rychle. Naproti tomu je koncentrace energie vodíku velmi nízká z důvodu jeho nízké hustoty. To znamená, že pro srovnatelné množství energie zabere 3x více místa než metan při tlaku 0,1 MPa a 16x více místa než nafta při tlaku 25MPa, ale přitom váží mnohem méně.[1]

### 2.3.2 Příprava vodíku

V laboratorních podmínkách se vodík připravuje reakcí neušlechtilých kovů s kyselinami nebo hydroxidy v Kippově přístroji:



Další možností je elektrolýza vody s malým množstvím H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nebo NaOH pro zvýšení vodivosti:



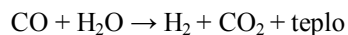
Dále se získává: reakcí s1 a s2 prvků s vodou nebo reakcí vodní páry se železem. [1]

### Průmyslová výroba vodíku

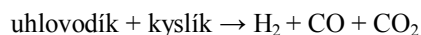
Parní reforming – je jednou z nejrozšířenějších technologií výroby vodíku, vyrábí se takto více než 90% použitého vodíku. Výrobní proces je vysoce efektivní s malými provozními a výrobními náklady. Vodík se vyrábí pomocí endotermické reakce uhlovodíkové suroviny s vodní parou. V prvním kroku vzniká syntézní plyn – směs oxidu uhelnatého a vodíku:



V druhém kroku se syntézní plyn v reakci s vodní parou rozloží na vodík a oxid uhlíčitý:



Parciální oxidace ropných frakcí – Je založena na nekatalytickém procesu zpracování těžké uhlíkové frakce. V prvním kroku reaguje těžká uhlíková frakce s kyslíkem výsledkem je vznik syntetického plynu:



Druhý krok je obdobný jako u parního reformingu. Tento způsob výroby vodíku je dražší než parní reforming.

Další způsoby výroby vodíku jsou:

- Zplynování uhlí
- Absorpce při střídavém tlaku – Slouží pro získání ultračistého vodíku (99,99+%)
- Membránová technologie
- Hydridy kovů
- Kryogenní technologie
- Rozklad fosilních látek bakteriemi (ve stavu pokusu do budoucna)
- Elektrolýza vody - Voda je štěpena pomocí dodané elektrické energie na vodík a kyslík. Účinnost je kolem 85%, tuto hodnotu je možno zvýšit přidáním elektrolytu, který zvýší vodivost. Náklady na výrobu jsou dány náklady na výrobu vstupní el. energie.[1]

### 2.3.3 Skladování vodíku

Skladování ve formě plynné vyžaduje velký objem zásobníků a vysoké tlaky, ve formě kapalné pak kryogenní systém skladování. Používání vodíku v systému palivových článků vyrovnáme podmínky s ostatními palivy tím, že účinnost palivového článku je vyšší oproti účinnosti spalovacích motorů, takže bude zapotřebí méně paliva a tím i energie, k dosažení stejného energetického výsledku.[1]

#### Skladování stlačeného vodíku

Nejčastějším způsobem skladování vodíku jsou vysokotlaké systémy. Vodík se skladuje v tlakových láhvích, které se podobají lahvím pro skladování stlačeného zemního plynu.

Pro výrobu vysokotlakých zásobníků se používá tlustostěnných, vysokopevnostních materiálů, které jsou velice trvalé. Zásobníky se dělí na čtyři typy podle použitého materiálu při jejich výrobě.[1]

Tab. 1: Klasifikace vysokotlakých lahví na vodík[1]

Design (typ)	Popis	% přebírání hmot. Kov / kompozit
Typ 1	Láhev vyrobená kompletně z oceli a hliníku	100 / 0
Typ 2	Láhev s kovovým pruhem z oceli či hliníku a s obručkami z kompozitního materiálu	55 / 45
Typ 3	Láhev zcela zabalená do kompozitního materiálu s tenkými vrstvami z oceli či hliníku	20 / 80
Typ 4	Láhev zcela zabalená v kompozitním materiálu s plastickými vrstvami	0 / 100

Obvyklý tlak při kterém se skladuje vodík ve vysokotlakých zásobnících je 25 MPa, zkoušejí se zásobníky na tlak 35 MPa.[1] Další možností je skladování v podzemních úložištích (solné doly, plynové jeskyně) při tlaku 11 MPa. Ve světě se tato metoda využívá na několika místech, např. v Amarillo v Texasu (850 mil. m<sup>3</sup>), ve francouzském Beynes (330 mil. m<sup>3</sup>).[2]



Obr.18:Nádrže na skladování plynného vodíku.[2]

### **Skladování vodíku v kapalné podobě**

Při skladování je zapotřebí zajistit kryogenní teploty, ale výhodou je, že skladování vodíku v kapalné podobě překonává mnoho problémů spojených s objemem a hmotností při skladování vysokotlakém. Nevýhodou skladování vodíku v kapalné formě je, že dochází k odpařování vodíku zhruba 1 až 2% za den, díky netěsnosti teplotní izolace. Tyto ztráty se omezují zlepšováním izolace a zmenšením plochy povrchu zásobníku. Další nevýhodou je vysoké množství energie, které je potřebné na zkapalnění vodíku, zhruba 40% energie obsažené v použitém vodíku. Zkapalněný vodík se uskládá obvykle v uskladňovacích zásobnících s perlitovými podtlakovými izolacemi. Největší zásobník tohoto typu vlastní NASA, je umístěn na mysu Canaveral.[1]



Obr.19:Nádrže na skladování kapalného vodíku.[2]

### **Jiné metody skladování**

Další metody skladování vodíku jsou ve fázi výzkumu. Patří mezi ně absorpce na uhlíkových porézních strukturách, skleněné mikrosféry a oxidační technologie železa.[1]

## **2.4 Palivové články**

### **2.4.1 Historie využití vodíku a palivových článků**

Princip palivového článku byl objeven v roce 1838 švýcarským vědcem Christianem Fredrichem Schönbeinem. První palivový článek postavil William Grove v roce 1839, tento článek využíval plynný vodík a kyslík a používal platinových elektrod a kyseliny sírové jako elektrolytu. Během zbytku 19. a počátku 20. století se vědci pokoušeli objevit nové typy palivových článků kombinujících různá paliva a elektrolyty. První moderní palivový článek vyvinula společnost Francise T. Bacona v roce 1932, ten používal stlačený plyn a nahradil platinu niklem, což je levnější. Roku 1959 předvedl Francis T. Bacon palivový článek jenž generoval 5 kW.

Větší verze tohoto článku byla následovně použita v traktoru a výzkumném plavidlu. V 60.letech 20.stol, NASA začala používat palivové články pro provoz palubní elektroniky na lodích Gemini a Apollo pro jejich příznivý poměr výkonu na jednotku hmotnosti asi osmkrát většímu než u akumulátorů. Výzkum NASA v 70. a 80.letech umožnil oživení vývoje palivových článků v 90.letech. Již v roce 1970 zařadilo termín vodíkové hospodářství do své správy General Motors. Hlavní pobídkou vědců, aby přehodnotili využití vodíku a jeho použití v palivových člancích, byla ropná krize. Vlády po celém světě investovaly do vodíkového výzkumu a zahájily ambiciózní projekt na vývoj technologií pro využití vodíku a alternativních paliv, jako jsou větrné elektrárny a solární energie. Ale klesající cena ropy v 80.letech způsobila pokles investic do vývoje, takže v roce 1987 investovalo USA do vývoje jen 1 milion dolarů. Druhá renesance vodíku nastala v 90.letech po zveřejnění výzkumu o globálním oteplování.[3]

#### Významné události 1987-2000

- 1987 – Studie vyzývá vládu Kanady aby udělala z vodíku pro energetické technologie národní cíl.  
První projekt autobusu s palivovými články v USA
- 1988 – Vysoká úroveň vodíkové výzkumné činnosti sovětského svazu se projevuje na světové Vodíkové konferenci v Moskvě.  
Kanada zahajuje výzkumný program pevných polymerních elektrolytů palivových článků.  
Německo začíná námořní zkoušku ponorky s palivovými články.
- 1989 – Vzniká National Hydrogen Association ve Washingtonu DC  
Začíná úsilí o vytvoření mezinárodních technických normách  
BMW staví pro první testy motor poháněný vodíkem s interním spalováním(IC).
- 1990 – GM začíná pracovat na 10 kW metanolovém PEM článku.  
V německých laboratořích funguje první výroba vodíku pomocí solární energie.  
Sovětský svaz a Německo plánují vyvinout technologii pro prototyp tryskového dopravního letadla na kapalným vodík
- 1991 – V Německu se začíná zkoušet čerpací stanice na kapalný vodík pro auta a autobusy.  
V Pensylvánii se testuje upravený Ford Fiesta s palivovým článkem.  
Mazda odhaluje HR-X koncept car s pomocí vodíku poháněným rotačním motorem.
- 1992 – V Německu postavený solární dům využívá vodík pro dlouhodobé období energetické nezávislosti.
- 1993 – Ballard zprovoznil první autobusy poháněné PEM článkem v Kanadě.  
Ballard a Daimler-Benz spolupracují na palivových člancích pro autobusy a automobily.  
Daimler-Benz představil první vozidlo NECAR s palivovými články v Německu  
V Quebecu představí EU první čtyři autobusy poháněné palivovými články.  
První Evropský 87 kW autobus Eureka debutuje v Bruselu
- 1995 – V Chicagu se testují 3 autobusy poháněné Ballardovým PEM článkem.
- 1996 – Daimler-Benz NECAR2 je odhalen v Německu a je to první spotřebitelsky přátelský osobní automobil poháněný palivovými články.

- Toyota představuje experimentální SUV poháněné pomocí PEM článků.
- První vodíkové golfové vozíky s PEM článkem jsou dodávány do Kalifornie
- 1997 – Chrysler představil model osobního automobilu s PEM článkem používající vodík extrahovaný z benzínu přímo ve voze.
- Daimler-Benz odhalí prototyp NEBUS poháněný 250 kW PEM článkem.
- Mazda odhalila Demio používající 20 kW PEM článek
- Je odhalen NECAR3 používající 50 kW PEM článek
- 1998 – GM a Opel zahájili globální PEM projekt pro Evropské vozy a je odhalen Opel Zavita s palivovým článkem.
- Island stanoví základy pro svoje vodíkové hospodářství
- BMW odhalí pátou generaci automobilu s přímým spalováním vodíku a otevře čerpací stanici v Mnichově s plně automatizovaným palivovým čerpadlem.
- 2000 – GM představil koncept vozu se 105 kW PEM článkem
- Nebus je spuštěn v Belgii a dieselové autobusy jsou převedeny na vodík.
- Američtí výzkumní pracovníci popsaly experimentální výrobu vodíku za pomoci zelené řasy.
- BMW plánuje první komerční auto používající přímé spalování vodíku [3]

## **2.4.2 Výhody palivových článků**

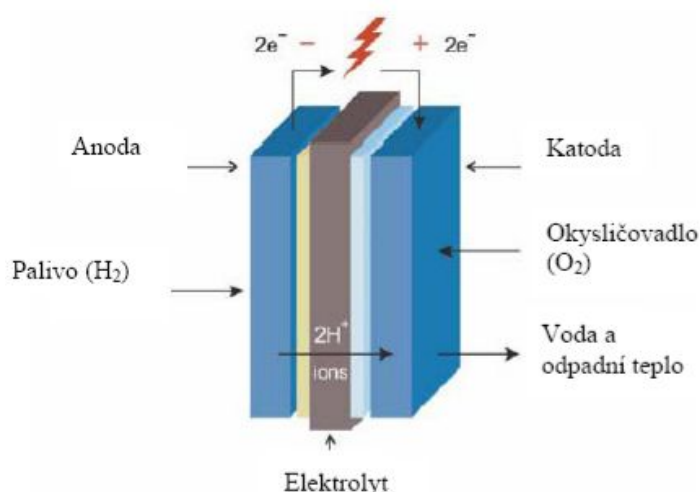
- Palivový článek používá pouze čistý vodík, tedy nepoužívá žádné znečišťující látky.
- Produkty reakce jsou elektrická energie, voda a teplo.
- Články využívající plynou reformační směs bohatou na vodík, produkují malé množství škodlivých zplodin.
- Dosahují vyšší termodynamické účinnosti než tepelné motory, také mají oproti tepelným motorům vyšší účinnost při částečném zatížení.
- Palivové články pracující na čistý vodík mají vynikající odezvu na změnu zatížení.
- Články pracující při nízkých teplotách jsou vhodné pro mobilní aplikace, vynikají také vysokou bezpečností a krátkým zahřívacím časem.
- Krom elektrické energie produkují také čistou horkou vodu a teplo, takže se dají využít v kogeneračních aplikacích.
- Nepotřebují seřizování a nevyžadují dobíjení jen doplnění paliva, což je rychlejší než dobíjení.
- Jsou také schopny snášet vysoká zatížení.
- Vynikají tichým chodem, protože nepoužívají žádné pohyblivé části díky čemuž mají vysokou životnost a nízké opotřebení.
- Jsou ekologicky velmi šetrné oproti klasickým elektrochemickým akumulátorům.[1]

### 2.4.3 Nevýhody palivových článků

- Vodík se velmi složitě vyrábí a uskládňuje.
- Díky nízké energetické objemové hustotě vodíku jsou systémy uskládňující plynný vodík velmi rozměrné.
- Palivové články vyžadují čistotu paliva a také platinových katalyzátorů pro podporu reakce, při které se vyrábí elektrická energie, což podstatně zvyšuje cenu, protože platina je velice drahá.
- Další nevýhodou je to, že i nepatrné množství vody může způsobit zničení článku v případě jejího zmrznutí a následného roztažení.
- Palivové články využívající membrány nesmí vyschnout protože provoz suchého článku by vedl k jeho zničení.
- Dále je nutné udržovat optimální teplotu a tlak aktivních médií.[1]

### 2.4.4 Princip palivového článku

Palivový článek umožňuje přímou přeměnu chemické energie vázané v palivu na energii elektrickou, aniž by bylo potřeba mezistupně. Když dojde k chemické reakci paliva s kyslíkem uvolní se energie. Palivový článek se skládá z anody, katody a elektrolytu. Plyny protékají po obou stranách elektrolytu. Palivovému článku je současně dodáván na straně anody palivový plyn (vodík) a okysličovadlo na straně katody (kyslík nebo vzduch). Styk molekul vodíku s platinovým katalyzátorem vyvolá na povrchu protonové membrány reakci, při které dochází k rozkladu molekul vodíku nejprve na jednotlivé atomy H, které se následně štěpí na protony  $H^+$  a elektrony  $e^-$ . Na katodové straně jsou přijímány elektrony procházející vnější elektrickou zátěží za vzniku iontu  $O^{2-}$ , které vznikly štěpením molekul kyslíku  $O_2$  platinovým katalyzátorem. Přes membránu jsou propuštěny pouze kladně nabyté vodíkové ionty, které jsou dále přitahovány kyslíkovými ionty na straně katody. Po průchodu vodíkového protonu membránou dochází na straně katody k reakci, do které vstupují vodíkové protony  $H^+$  a kyslíkový anion  $O^{2-}$ . Články mohou být provozovány s různými druhy palivových (methanu, methanolu) a oxidačních plynů (peroxid vodíku). Za nejefektivnější palivo je považován vodík díky své vysoké reaktivitě. Články jsou rozdělovány na jednotlivé druhy podle druhu elektrolytu, další možností dělení je podle provozních teplot při kterých články pracují.[1]



Obr.20: Ukázka funkce vodíkového palivového článku[1]



## **2.4.5 Rozdělení palivových článků podle teploty**

### **Nízkoteplotní palivové články**

Na rozdíl od vysokoteplotních článků vyžadují katalyzátory, které jsou tvořeny ušlechtilými kovy hlavně platinou. Tyto katalyzátory slouží pro povzbuzení reakcí probíhajících na elektrodách. Nízkoteplotní palivové články pracují obvykle při teplotách do 250°C vyžadují vnější zdroj paliva, protože nízká teplota neumožní reforming paliva. Vykazují rychlý rozběh reakce a trpí menší poruchovostí konstrukčních materiálů a jsou vhodné pro mobilní aplikace.

Zástupci nízkoteplotních palivových článků jsou:

- Alkalické palivové články AFC (Alkaline Fuel Cells)
- Palivové články s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)
- Palivové články s protonovou membránou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)
- Palivové články s přímým zpracováním methanolu DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)[1]

### **Vysokoteplotní palivové články**

Pracují při teplotách vyšších než 600°C díky čemuž je umožněn samovolný vnitřní reforming lehkých uhlovodíkových paliv jako je metan. Reakce probíhá na anodě za podpory niklového katalyzátoru. Vnitřní reforming významně zvyšuje účinnost takřka o 15% díky odstranění potřeby vnějšího zdroje vodíku. Vedlejší produkt je odpadní teplo, které se používá pro koregenerační účely. Vysokoteplotní články nepotřebují drahé katalyzátory, ale se stoupající teplotou klesá množství uvolněné energie. Trpí některými materiálovými poruchami, protože jen málo materiálu je schopno pracovat dlouhou dobu při vysokých teplotách bez degenerace. Další nevýhodou je pomalý start.

Zástupci vysokoteplotních palivových článků jsou:

- Palivové články s elektrolytem na bázi tekutých uhličitánů MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)
- Palivové články s elektrolytem na bázi pevných oxidů SOFC (Solid Oxide Fuel Cells). [1]

## **2.4.6 Druhy nízkoteplotních palivových článků**

### **Alkalické palivové články AFC**

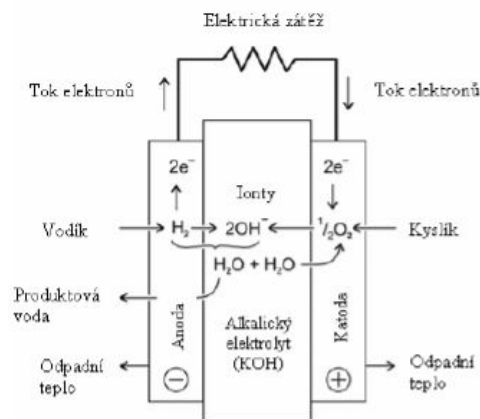
Elektrolyt je schopen vést hydroxidové ionty od katody k anodě. Elektrolyt tvoří směs roztaveného hydroxidu draselného, může být jak pevný nebo pohyblivý. AFC článek pracuje při teplotách 65 až 250°C a s tlakem kolem 0,1 MPa. Při teplotách ~ 250°C je směs KOH 85% pro nižší teploty <120°C je směs KOH 35-50%. Článek je schopen vyrábět napětí mezi 1,1 až 1,2 V účinnost je 45 až 60% a výkon do 20 kW.[1]

Výhody AFC článků:

- Nízká provozní teplota
- Rychlé startovací časy
- Vysoká účinnost, jednoduchý provoz
- Minimální nebo žádná potřeba Pt katalyzátoru
- Minimální koroze konstrukčních materiálů a malé rozměry

Nevýhody AFC článků:

- Jsou náročné na obsah oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého.
- Kratší životnost
- Díky tekutému elektrolytu složitější manipulace[1]



**Obr.21:** Palivový článek AFC[1]

### Palivové články s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné PAFC

Elektrolyt na bázi kyseliny fosforečné schopný vést vodíkové ionty od anody ke katodě. Elektrolyt je zadržován většinou uvnitř krystalové mřížky karbidu křemíku. Tyto články pracují při teplotách od 150°C do 220°C a tlakem okolo 0,1 MPa. Články jsou schopny vyrobit napětí o velikosti 1,1 V. Jejich účinnost je 38 až 45% a výkon od 50 do stovky kW.[1]

Výhody PAFC článků:

- Snášejí vysoký obsah oxidu uhličitého v palivu až 30%
- Pracují při nízkých teplotách
- Elektrolyt s nízkou proměnlivostí

Nevýhody PAFC článků:

- Snesou pouze 2 % obsahu oxidu uhelnatého v palivu.
- Citlivost na obsah sloučenin síry v palivu.
- Díky tekutému elektrolytu složitější manipulace
- Veliké a těžké
- Neschopnost reformingu uhlíkových paliv
- Nutnost trvalého udržování provozní teploty[1]

## Palivové články s protonovými membránami PEM FC

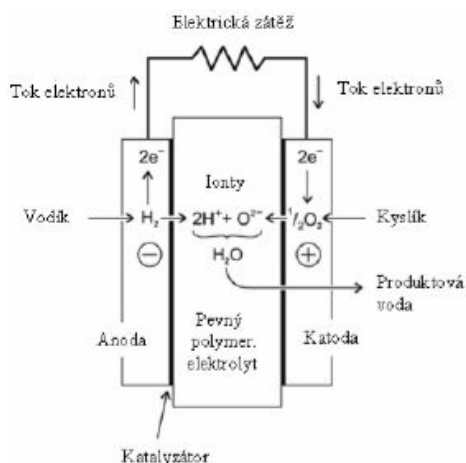
Články s protonovými membránami jsou schopny vést protony  $H^+$  od anody ke katodě. Elektrolyt tvoří pevný polymerický film skládající se z okyseleného tetfluoru. Tyto články pracují při teplotách od  $70^{\circ}C$  do  $120^{\circ}C$  (nové materiály v testech až  $200^{\circ}C$ ) a tlakem mezi 100 kPa až 200 kPa. Článek jsou schopny vyrobít napětí o velikosti 1,1 V. Jejich účinnost je 40 až 60% a výkon do 250 kW.[1]

Výhody PEM FC článků:

- Dobře snáší vysoký obsah oxidu uhličitého tedy může pracovat s nečistým vzduchem.
- Pracují při nízkých teplotách, tedy rychlý start a vysoká bezpečnost
- Použití pevného elektrolytu eliminuje nároky na manipulaci s tekutinou
- Elektrolyt je nekorozivní
- Kompaktní a mechanicky odolný mající jednoduchý tvar a stabilní konstrukci

Nevýhody PEM FC článků:

- Citlivost na obsah oxidu uhelnatého v palivu max. 50ppm
- Velmi nízká snášenlivost sloučenin síry
- Vyžaduje zvlhčování reakčního plynu. Energeticky náročný proces zvětšuje rozměry celého systému.
- Použití drahých Pt katalyzátorů
- Použití drahých membrán se kterými se složitě pracuje[1]



Obr.22: Palivový článek PEMFC[1]

## Palivové články s přímým zpracováním metanolu DMFC

Palivový článek PEM u kterého je nahrazen vodík methanolem, při této reakci je nižší uvolněná energie než při použití vodíku. Tato technologie je ve stavu vývoje.[1]

### **2.4.7 Iontoměničové membrány**

Membrány z tenkého plastového filmu tloušťka bývá od 50 do 175 $\mu$ m. Jsou základní součástí PEM vodíkových článků. Skládají se z fluorem dotovaných siřičitanových kyselin, které stejně jako teflonové fluoro-uhlíkové polymery mají řetězec končící zbytkem kyseliny siřičité. Palivové články PEM používá kyselý elektrolyt stejně jako PAFC články. Všechny kyselé pevné elektrolyty vyžadují přítomnost molekul vody pro vodivost vodíkových iontů, jelikož se pohybují vodíkové ionty společně s molekulami vody. Podíl vody k vodíkovým iontům u efektivní vodivosti je obvykle okolo 3:1. Proto musí být plyny v kontaktu s membránou nasycené vodou. Membrána na úrovni molekul má trubicovitou strukturu, ve které jsou skupiny siřičitanových kyselin na vnitřním povrchu trubic pro vedení vody a vnější část trubice tvoří hydrofobní fluorovaný materiál. Při poklesu obsahu vody dochází ke sevřkávání struktury a prudkému poklesu vodivosti a nárůstu odporu mezi elektrodou a membránou, což vede až k poškození membrány. Velké množství membrán je komerčně dostupných jako například Nafion. [1]

## 3 Praktická část

### 3.1 Příprava materiálu pro elektrody

#### ➤ Vysokoteplotní deponace platiny do různých druhů uhlíků

Použitý typy uhlíků: 1)	CHEZACARB A (částice tvaru nepravidelných granulí)
2)	CHEZACARB A mletý
3)	CHEZACARB B mletý
4)	CABOT VULCAN GP- 3893
5)	CABOT VULCAN GP- 3893 mletý
6)	VULCAN CX72R
7)	CABOT BLACK PEARLS GP-3848
8)	CABOT BLACK PEARLS GP-3848 mletý

Vzorky byly mlety 2-3 minuty

Pro platinování použita kyselina dihydrogenhexachloroplatičitá  $H_2PtCl_6$  s 3% obsahem platiny

Příprava materiálu pro elektrody:

0,250 g uhlíku jsem rozmíchal v malém množství vody (řádově ml), do vzniklé suspenze jsem poté odpipetoval 650 $\mu$ l kyseliny  $H_2PtCl_6$  a opět promíchal. Vzorek jsem poté vložil do pece, vyhřáté na 400°C a to na dobu 30ti minut. U některých vzorků docházelo ke kolísání teploty pece od 370°C do 420°C vlivem špatně nastaveného teplotního gradientu a vlivem nepřesné regulace pece, proto byla doba žihání u těchto vzorků prodloužena dle velikosti kolísání.

Dále byla využita dehydrovaná kyselina hexachloroplatiničitá s 36% obsahem platiny.

Postup při jejím použití byl obdobný, do pece vyhřáté na 400°C se vložil na 30.minut směs složená z určitého druhu uhlíku a kyseliny hexachloroplatiničité zastoupené v určitém hmotnostním poměru. Tato směs je promíchána v malém množství vody (řádově ml) s isopropylalkoholem v poměru 2:1.

#### ➤ Žihání uhlíků pomocí $CO_2$

Použité druhy uhlíků: 1. CHEZACARB A  
2. CABOT VULKAN GP – 3893  
3. EXPANDOVANÝ GARFIT

Postup žihání:

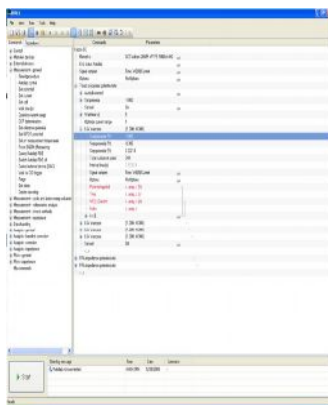
Naplnil jsem vaničku uhlíkem, pak jí vložil do komory pece. V atmosféře  $CO_2$  jsem žihal uhlík při teplotě 750°C po dobu jedné hodiny. Z důvodu pomalého chladnutí pece je možno žihat pouze jeden vzorek za den. Při žihání v atmosféře  $CO_2$  se váží sírany obsažené ve vzorku uhlíku na kyslík. Při tomto vyžihání se tedy uvolní místo, které zabíraly sírany, tím vzniká více prostoru pro zachycení iontu. Další možností je použití místo  $CO_2$  dusík, ten při žihání na sebe váže kyslík obsažený v uhlíku. Všechny tři vzorky byly vyžihány ve 3 dávkách.

**Tab. 2** :Seznam a postup přípravy vzorků

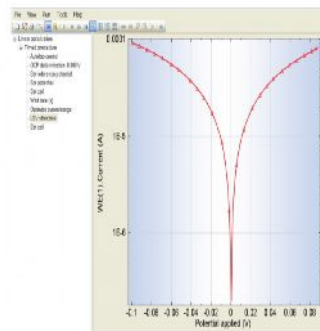
Dávka č.	Typ uhlíku	Množství [mg]	H <sub>2</sub> Pt Cl <sub>6</sub> [μl]	Teplota [°C]	Žiháno [min]	Poznámka
1	CHEZACARB A	250	650	377-400	35	Nestálá teplota + Pt zachycená na misku
1	CHEZACARB A mletý	250	650	380-400	35	
1	VULCAN	250	650	400	30	
1	VULCAN mletý	250	650	370-400	45	Nestálá teplota
1	BLACK PEARLS	250	650	400	30	Pt zachycená na misku
1	BLACK PEARLS mletý	250	650	372-400	40	Nestálá teplota + Pt zachycená na misku
2	CHEZACARB A	250	650	400	30	Pt zachycená na misku
2	CHEZACARB A mletý	250	650	400	33	
2	VULCAN	250	650	400	30	
2	VULCAN mletý	250	650	400	30	
2	BLACK PEARLS	250	650	400	30	
2	BLACK PEARLS mletý	250	650	400	32	
3	CHEZACARB A	250	650	400	30	Pt zachycená na misku
3	CHEZACARB A mletý	250	650	400	30	
3	VULCAN mletý	250	650	400	30	
3	BLACK PEARLS	250	650	400	30	
3	BLACK PEARLS mletý	250	650	400	32	
4	CHEZACARB A mletý	250	650	400	32	Pt zachycená na misku
4	VULCAN mletý	250	650	379-400	38	Nestálá teplota
4	BLACK PEARLS mletý	250	650	400	30	
<b>Vzorky připravené z dehydrované kyseliny hexachloroplatinické</b>						
Číslo vzorku	Použitý uhlík	Množství [mg]	H <sub>2</sub> Pt Cl <sub>6</sub> [mg]	Teplota [°A]	Žiháno [min]	Hmotnostní poměr [%]
1	VULCAN CX72R	800	160	400	30	20
2	VULCAN CX72R	800	160	400	30	20
3	VULCAN GP 3893 mletý	1000	200	400	30	20
4	CHEZACARB A mletý	500	100	400	30	20
5	CHEZACARB B mletý	500	100	400	30	20
7	CHEZACARB B mletý	500	25	400	30	5

## 3.2 Programovatelné softwarové rozhraní Nova

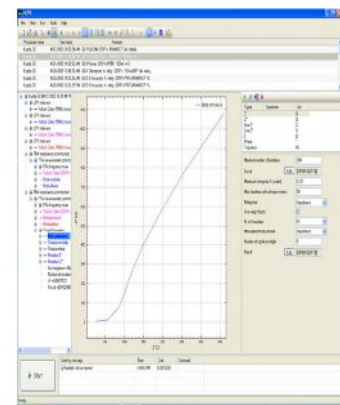
Programovatelné rozhraní nova umožňuje uživateli pomocí různých příkazových bloků sestavit vlastní měřicí program o libovolné délce jakoby z jednotlivých stavebních dílů. Takto je díky tomuto rozhraní možno vytvořit komplexní měřicí programované procedury odpovídající představám uživatele. To je velkou výhodou oproti standardním měřicím programům, ve kterých jsou možnosti uživatele omezeny nastavením jednotlivých předem definovaných měřicích procedur a v případě potřeby využití jiné měřicí procedury musí čekat až výrobce daného softwaru potřebnou měřicí metodu vytvoří. Program nova obsahuje dále i určitou sadu již vytvořených měřicích procedur jejichž parametry lze libovolně editovat, k těmto procedurám lze uložit vlastní měřicí metody sestavené z již zmíněných příkazových bloků. Celkové prostředí programu nova je rozděleno do 3 částí: obrazovka Nastavení, Měřicí obrazovka a obrazovka Analytickou. Obrazovka nastavení poskytuje rámec pro vytváření a editaci měřicích procedur. Měřicí obrazovka slouží k zobrazování dat v reálném čase během samotného měření a také k zobrazení aktuální části postupu měření. Analytická obrazovka je využita k úpravě a samotnému vyhodnocování naměřených dat, ať už pomocí 2D a 3D grafů, tak pomocí různých typů výpočtů. Tato obrazovka také slouží ke správě knihovny provedených měření. [21]



Obrazovka nastavení

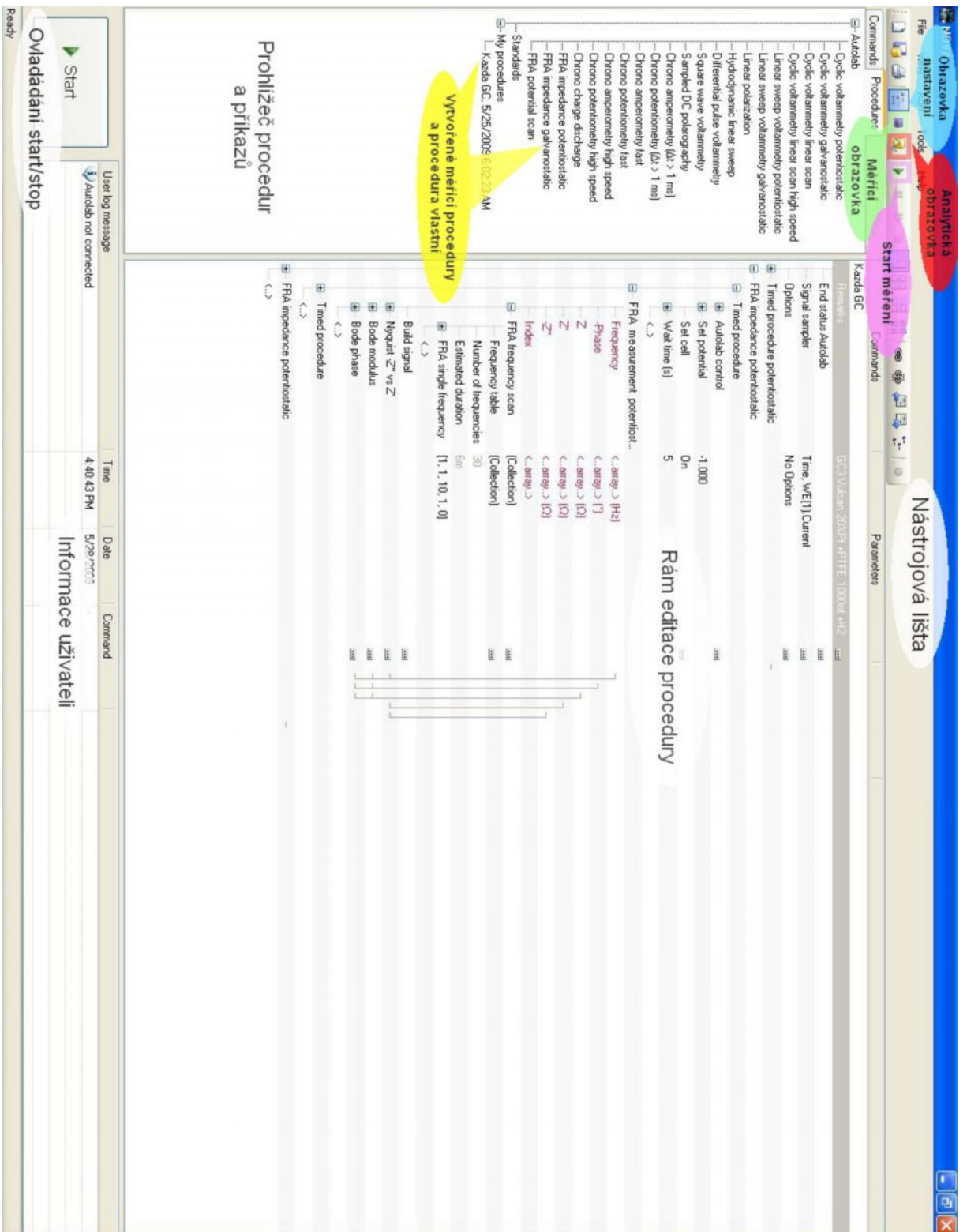


Měřicí obrazovka



Analytická obrazovka

Obr.23: Zobrazení hlavních uživatelských obrazovek [21]



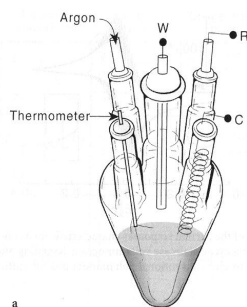
Obr.24: Hlavní obrazovka programu Nova



### 3.3 Měření na rotační diskové elektrodě

#### ➤ Postup měření na RDE

Měření probíhá na potenciostatu Autolab (Eco Chemie, Holandsko), ten je připojen k RDE. Byla použita dvouplášťová cela z pirexového skla. Veškeré typy elektrod měřené na rotační diskové elektrodě byly měřeny v 1molárním roztoku KOH. Využívalo se tříelektrodevého zapojení přičemž jako proudová elektroda (CE) byla použita platina a kalomelová elektroda (Hg-HgO) byla použita jako referenční elektroda (RE). Pracovní elektrodu (WE) tvoří rotační nástavec z leštěného uhlíku. Rozsah používaných otáček byl 0-3000 ot/min.

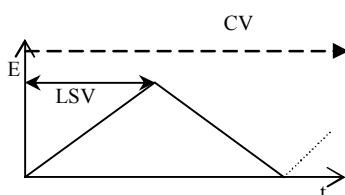


Obr.25: Měřicí tříelektrodeová cela

#### ➤ Použité metody měření

##### Voltametrie s lineárním skenem - LSV

Tato metoda je odvozená od polarografie. Při této metodě je na elektrody vložen potenciál, který je lineárně zvyšován od počátečního po zlomový, tomuto zvyšování se říká dopředný sken na rozdíl od cyklické voltametrie (CV) se hodnota již nesnižuje zpět na počáteční hodnotu a měření tímto končí. Rychlost změny potenciálu se nazývá scan rate. Výsledkem měření je voltamogram, tedy závislost proudu soustavou na vloženém napětí. O přesné nastavení potenciálu mezi pracovní a referenční elektrodou se stará potenciostat, který nutí procházet proud mezi pracovní a pomocnou elektrodou.



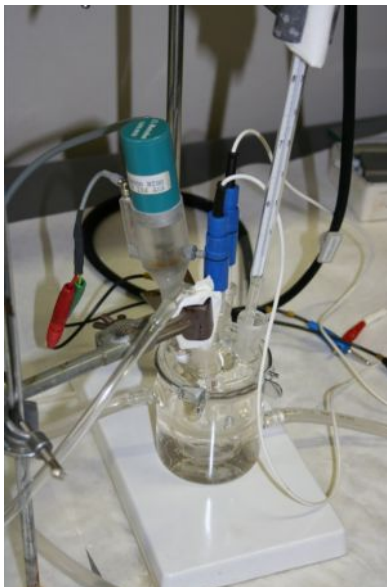
Obr.26: Tvar potenciálového cyklu

Nastavení měřicího systému: Počáteční potenciál -1V a konečný potenciál -0,3V hodnoty scan rate 0,016V/s, 0,032V/s, 0,064V/s a 0,128V/s

##### Impedanční spektroskopie - EIS

Tato metoda spočívá v nastavení malého sinusového střídavého napětí o předepsané frekvenci s offsetem o určité hodnotě polarizačního napětí. Pomocí poměru změny střídavého napětí a střídavého proudu se spočítá hodnota impedance systému, která je složena z hodnot amplitudy a velikosti fázového posunu, ten je závislý na nastavené frekvenci. Díky tomu se získá závislost změny impedance systému na frekvenci.

Nastavení měřicího systému: Rozsah frekvencí 10kHz – 0,1Hz po 30.krocích použitá amplituda AC 0,01V pro hodnoty potenciálu DC -1V a -0,3V.



**Obr.27:**Cela rotační diskové elektrody

### ➤ Příprava materiálů a nanesení na pracovní elektrodu (WE)

Na rotační diskové elektrodě bylo proměřeno několik druhů elektrod - platinová elektroda, elektroda GC a šest vzorků uhlíkových směsí.

Navážíme 25 mg elektrodového materiálu, z kterého připravíme inkoust smícháním destilované vody a ethanolem. Inkoust umístíme do ultrazvukové lázně na dobu 2x10 min. Mezi těmito intervaly pomocí mikropipety přidáme emulzi PTFE (60%). Z takto připravených vzorků bylo vždy nanášeno mikropipetou na elektrodu 4  $\mu$ l suspenze a následně v sušičce vysušeno po dobu 30 minut při teplotě 110°C. Na určité elektrody bylo nanášeno po vysušení nepatrné množství ionomeru Fumasep, pak se proces sušení opakoval ještě jednou. (vis.Tab. 3 :)

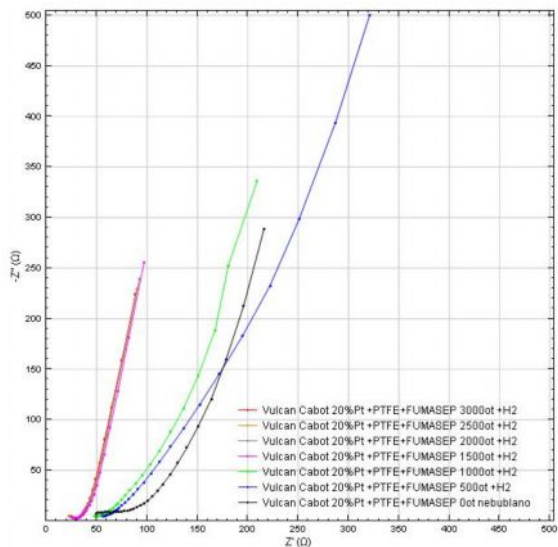
**Tab. 3 :** Seznam a postup přípravy směsí na elektrody

Označení vzorku	Číslo deponovaného uhlíku	Použité množství [mg]	H <sub>2</sub> O [ml]	IPA [ml]	PTFE [ $\mu$ l]	Ionomer [ $\mu$ l]
I	VULCAN GP 3893 mletý 20%Pt	25	0,6	0,3	4	3
II	VULCAN GP 3893 mletý 20%Pt	25	0,6	0,3	0	3
III	VULCAN GP 3893 mletý 20%Pt	25	0,6	0,3	4	0
IV	CHEZACARB A mletý 20%Pt	25	0,6	0,3	4	3
V	CHEZACARB A mletý 20%Pt	25	0,6	0,3	0	3
VI	CHEZACARB A mletý 20%Pt	25	0,6	0,3	4	0

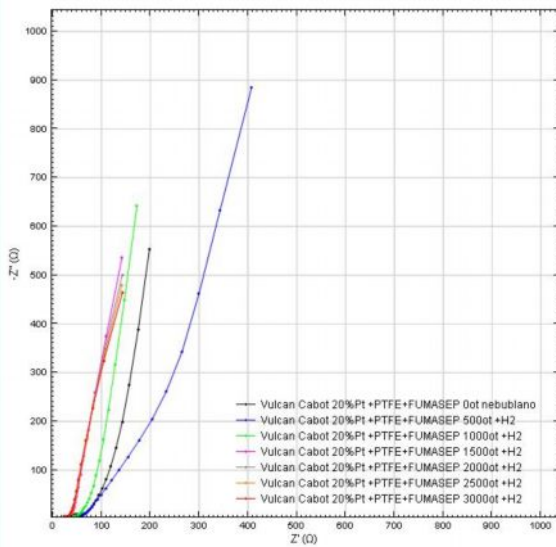
Ionomer – Druh vodivého polymeru tvořený opakujícími se elektricky neutrálními celky a celky obsahujícími ionty obvykle do 15%. Další vlastností ionomeru krom elektrické vodivosti je i viskozita rostoucí se vzrůstající teplotou.

### 3.3.1 Výsledky měření na RDE

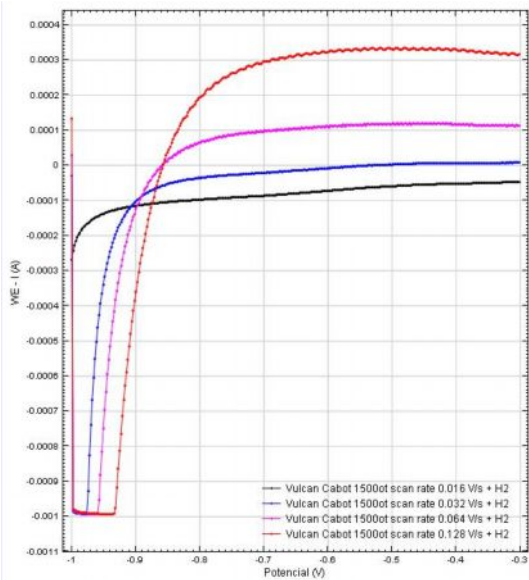
Vzorek č:I – CABOT VULCAN GP 3893 mletý 20%  $H_2PtCl_6$  + PTFE+FUMASEP ionomer



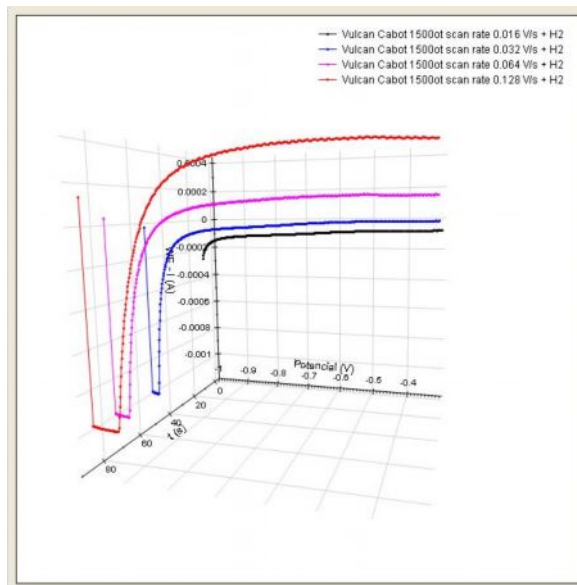
Obr.28: Impedanční spektroskopie pro -1V



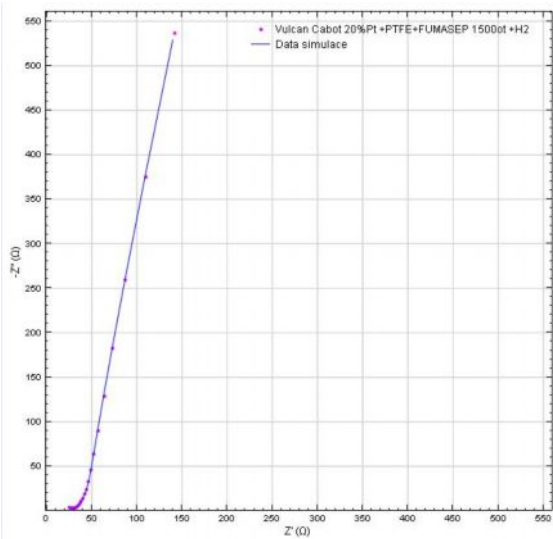
Obr.29: Impedanční spektroskopie pro -0,3V



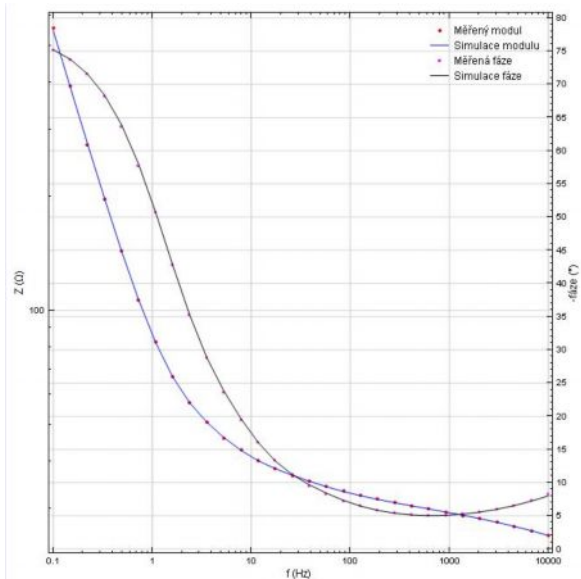
Obr.30: LSV 1500ot bubláno  $H_2$



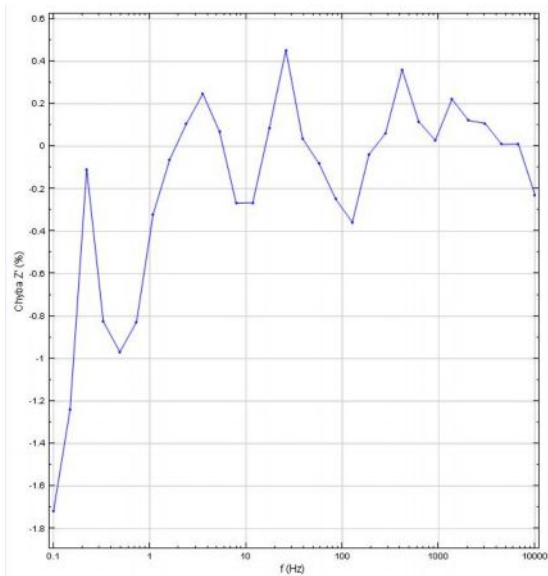
Obr.31: LSV 1500ot bubláno  $H_2$ +časová osa



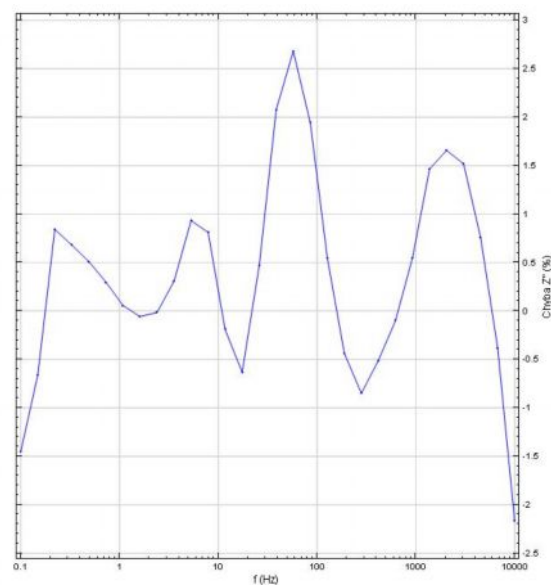
**Obr.32:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V+H<sub>2</sub> porovnání se simulací



**Obr.33:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> porovnání změn modulu a fáze



**Obr.34:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z'



**Obr.35:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z''

**Tab. 4:** Naměřené hodnoty EIS CABOT VULCAN GP3893 mletý 20% $H_2PtCl_6$ +PTFE+FUMASEP ionomer

Číslo kroku	$f$ [Hz]	$Z'$ [ $\Omega$ ]	$-Z''$ [ $\Omega$ ]	$Z$ [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	10000,000	25,300	3,630	25,559	8,164
2	6723,400	26,044	3,310	26,253	7,242
3	4520,400	26,783	3,050	26,956	6,497
4	3039,200	27,440	2,842	27,586	5,913
5	2043,400	28,074	2,694	28,203	5,482
6	1373,800	28,647	2,604	28,766	5,194
7	923,670	29,279	2,588	29,393	5,052
8	621,020	29,814	2,631	29,930	5,043
9	417,530	30,300	2,744	30,424	5,176
10	280,720	30,967	2,948	31,107	5,439
11	188,740	31,608	3,238	31,774	5,850
12	126,900	32,380	3,637	32,584	6,409
13	85,317	33,107	4,170	33,368	7,179
14	57,362	33,948	4,888	34,298	8,193
15	38,566	34,943	5,840	35,428	9,488
16	25,929	35,912	7,113	36,609	11,204
17	17,433	37,217	8,833	38,251	13,351
18	11,721	38,690	11,137	40,261	16,059
19	7,881	40,373	14,232	42,808	19,418
20	5,298	42,263	18,456	46,117	23,591
21	3,562	44,338	24,372	50,595	28,797
22	2,395	46,569	32,863	56,997	35,210
23	1,610	49,057	45,362	66,815	42,759
24	1,083	52,310	63,687	82,416	50,602
25	0,728	57,044	90,170	106,699	57,682
26	0,489	63,716	128,214	143,173	63,575
27	0,329	73,401	182,529	196,735	68,093
28	0,221	87,275	259,681	273,955	71,423
29	0,149	109,803	375,092	390,833	73,683
30	0,100	142,180	537,086	555,587	75,173

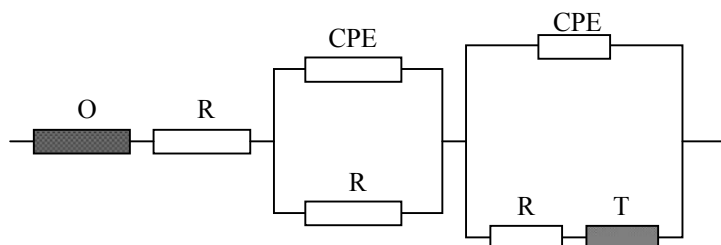
Nejvyšší naměřená vodivost elektrodové hmoty odečteno z grafu

**Tab. 5 :** Hodnoty sim. EIS CABOT VULCAN GP 3893 mletý 20% $H_2PtCl_6$ +PTFE+FUMASEP ionomer

Z' [ $\Omega$ ]	-Z'' [ $\Omega$ ]	Chyba Z' [%]	Chyba Z'' [%]	Z [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]	f [Hz]	$x^2$	Obvod
25,243	3,551	-0,228	-2,167	25,491	8,007	10000,000	0,00061569	[OR(QR)(Q[RT])]
26,047	3,297	0,011	-0,384	26,255	7,214	6723,400		
26,785	3,073	0,009	0,757	26,961	6,545	4520,400		
27,469	2,885	0,108	1,518	27,620	5,995	3039,200		
28,108	2,739	0,122	1,658	28,241	5,566	2043,400		
28,711	2,642	0,221	1,465	28,832	5,259	1373,800		
29,287	2,603	0,028	0,549	29,402	5,078	923,670		
29,849	2,628	0,116	-0,100	29,964	5,032	621,020		
30,410	2,731	0,360	-0,509	30,532	5,131	417,530		
30,986	2,923	0,061	-0,850	31,123	5,389	280,720		
31,596	3,224	-0,039	-0,438	31,760	5,827	188,740		
32,264	3,657	-0,358	0,546	32,471	6,467	126,900		
33,024	4,251	-0,249	1,943	33,297	7,335	85,317		
33,920	5,019	-0,082	2,682	34,290	8,416	57,362		
34,956	5,961	0,036	2,080	35,460	9,678	38,566		
36,074	7,147	0,452	0,466	36,775	11,206	25,929		
37,248	8,777	0,083	-0,631	38,268	13,259	17,433		
38,587	11,116	-0,266	-0,192	40,156	16,071	11,721		
40,265	14,348	-0,267	0,812	42,745	19,613	7,881		
42,292	18,628	0,069	0,933	46,213	23,772	5,298		
44,447	24,447	0,247	0,307	50,727	28,812	3,562		
46,617	32,858	0,105	-0,016	57,033	35,178	2,395		
49,026	45,336	-0,063	-0,057	66,775	42,760	1,610		
52,142	63,724	-0,322	0,058	82,338	50,708	1,083		
56,572	90,440	-0,828	0,299	106,676	57,973	0,728		
63,099	128,867	-0,968	0,510	143,486	63,912	0,489		
72,795	183,771	-0,825	0,680	197,663	68,391	0,329		
87,181	261,868	-0,108	0,842	275,999	71,586	0,221		
108,441	372,608	-1,240	-0,662	388,067	73,773	0,149		
139,736	529,290	-1,719	-1,452	547,425	75,211	0,100		

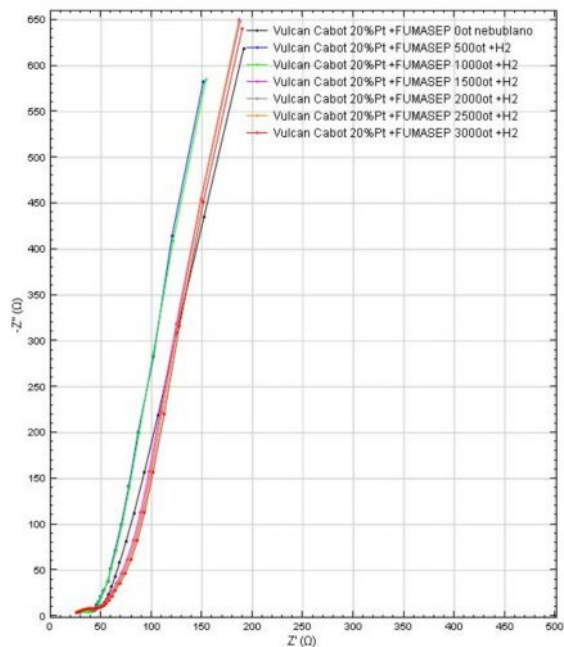
■ Nejvyšší celková chyba simulace  
■ Nejmenší celková chyba simulace

Q – CPE

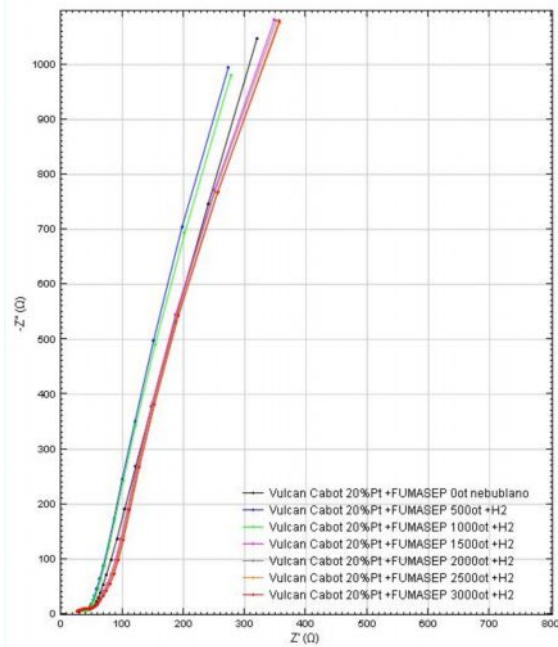


**Obr.36:** Zapojení náhradního obvodu

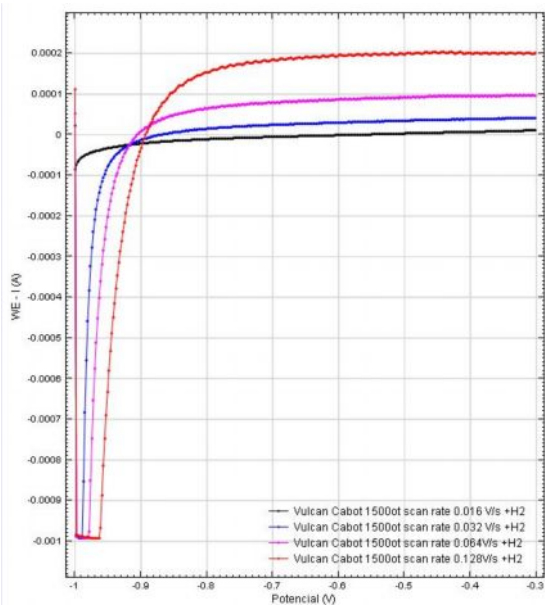
Vzorek č:II – CABOT VULCAN GP 3893 mletý 20% $H_2PtCl_6$  + FUMASEP ionomer



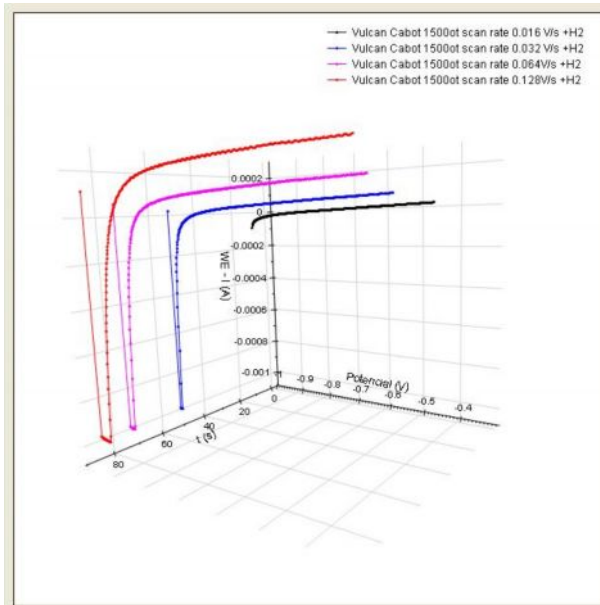
Obr.37: Impedanční spektroskopie pro -1V



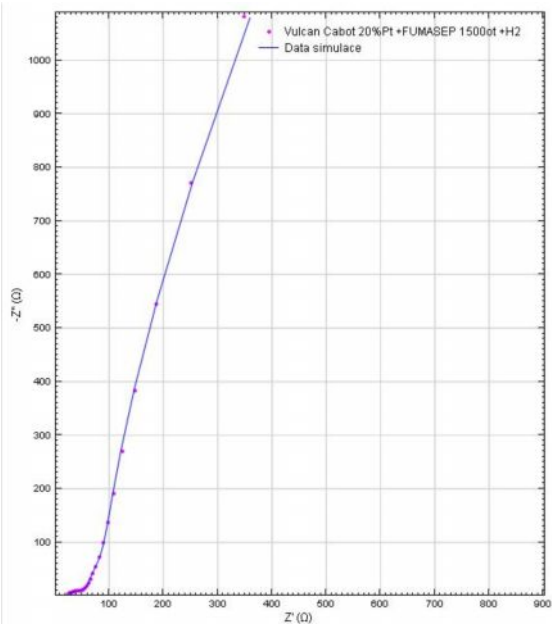
Obr.38: Impedanční spektroskopie pro -0,3V



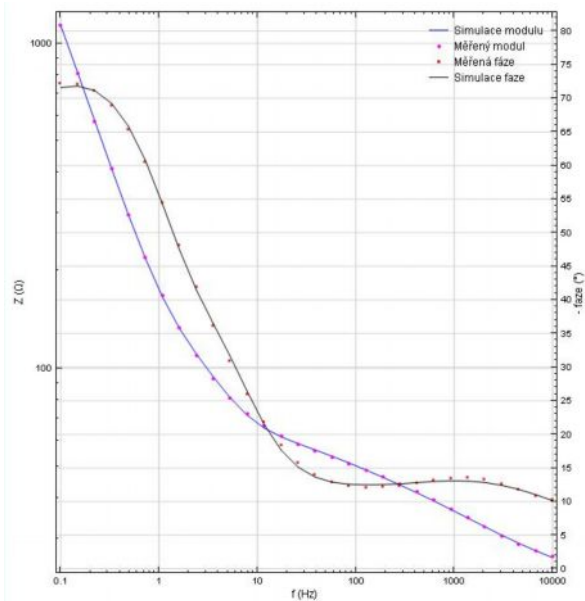
Obr.39: LSV 1500ot bubláno  $H_2$



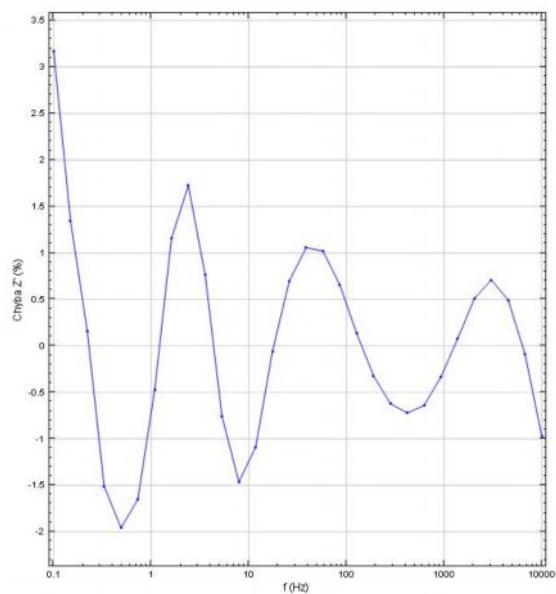
Obr.40: LSV 1500ot bubláno  $H_2$  + časová osa



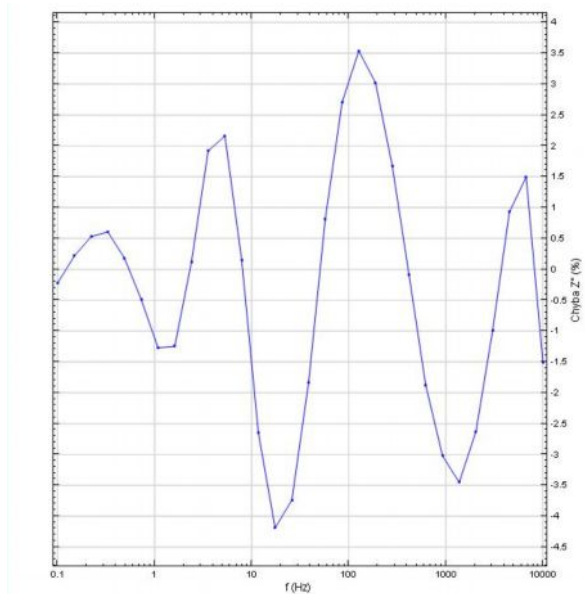
**Obr.41:** Impedanční spektroskopie 1500ot - 0,3V + H<sub>2</sub> porovnání se simulací



**Obr.42:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V + H<sub>2</sub> porovnání změn modulu a fáze



**Obr.43:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V + H<sub>2</sub> chyba Z'



**Obr.44:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V + H<sub>2</sub> chyba Z''



**Tab. 6 :** Naměřené hodnoty EIS CABOT VULCAN GP3893 mletý 20% $H_2PtCl_6$ +FUMASEP ionomer 1500ot+ $H_2$

Číslo kroku	$f$ [Hz]	$Z'$ [ $\Omega$ ]	$-Z''$ [ $\Omega$ ]	$Z$ [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	10000,000	26,000	4,673	26,417	10,189
2	6723,400	26,979	5,180	27,472	10,869
3	4520,400	28,222	5,878	28,827	11,765
4	3039,200	29,755	6,669	30,493	12,632
5	2043,400	31,604	7,438	32,467	13,244
6	1373,800	33,714	8,108	34,675	13,523
7	923,670	35,980	8,606	36,995	13,451
8	621,020	38,331	8,964	39,365	13,162
9	417,530	40,675	9,204	41,703	12,751
10	280,720	42,985	9,431	44,007	12,374
11	188,740	45,239	9,731	46,273	12,139
12	126,900	47,455	10,176	48,533	12,103
13	85,317	49,629	10,854	50,802	12,336
14	57,362	51,788	11,877	53,132	12,916
15	38,566	53,978	13,496	55,640	14,038
16	25,929	56,252	15,898	58,455	15,781
17	17,433	58,713	19,468	61,856	18,344
18	11,721	61,660	24,625	66,396	21,770
19	7,881	65,201	31,800	72,542	26,000
20	5,298	69,685	41,601	81,158	30,837
21	3,562	75,160	54,902	93,077	36,147
22	2,395	81,499	73,228	109,564	41,940
23	1,610	88,735	99,145	133,055	48,171
24	1,083	97,383	136,516	167,690	54,498
25	0,728	108,222	190,832	219,383	60,442
26	0,489	123,832	270,045	297,083	65,366
27	0,329	148,475	383,695	411,420	68,846
28	0,221	187,009	545,592	576,753	71,080
29	0,149	250,540	771,590	811,247	72,011
30	0,100	348,381	1081,880	1136,590	72,151

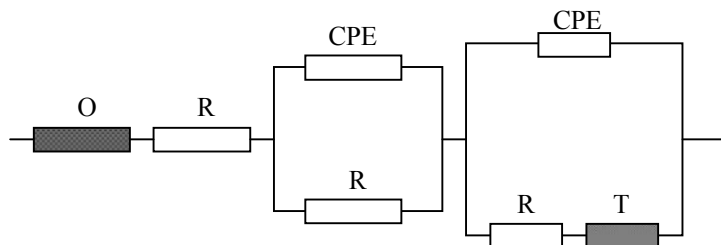
Nejvyšší naměřená vodivost elektrodové hmoty odečteno z grafu

**Tab. 7 :** Hodnoty simulace EIS CABOT VULCAN GP3893 mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+FUMASEP ionomer 1500ot+H<sub>2</sub>

Z' [Ω]	-Z'' [Ω]	Chyba Z' [%]	Chyba Z'' [%]	Z [Ω]	-φ [°]	f [Hz]	x <sup>2</sup>	Obvod
25,746	4,603	-0,976	-1,501	26,154	10,136	10000,000	0.0027533	[OR(QR)(Q[RT])]
25,956	5,258	-0,087	1,494	27,464	11,037	6723,400		
28,361	5,932	0,493	0,927	28,975	11,815	4520,400		
29,966	6,603	0,709	-0,987	30,685	12,426	3039,200		
31,765	7,243	0,511	-2,628	32,580	12,844	2043,400		
33,740	7,828	0,077	-3,452	34,636	13,063	1373,800		
35,859	8,346	-0,337	-3,019	36,817	13,102	923,670		
38,085	8,795	-0,642	-1,876	39,087	13,004	621,020		
40,381	9,196	-0,722	-0,086	41,415	12,830	417,530		
42,718	9,588	-0,621	1,674	43,781	12,651	280,720		
45,093	10,025	-0,321	3,023	46,194	12,534	188,740		
47,518	10,536	0,134	3,539	48,672	12,502	126,900		
49,955	11,148	0,656	2,705	51,184	12,580	85,317		
52,316	11,974	1,020	0,821	53,669	12,892	57,362		
54,549	13,249	1,056	-1,834	56,134	13,651	38,566		
56,645	15,303	0,700	-3,739	58,676	15,118	25,929		
58,679	18,652	-0,057	-4,189	61,572	17,634	17,433		
60,989	23,972	-1,089	-2,653	65,531	21,458	11,721		
64,246	31,849	-1,464	0,153	71,707	26,369	7,881		
69,159	42,500	-0,755	2,161	81,174	31,572	5,298		
75,734	55,957	0,763	1,920	94,164	36,459	3,562		
82,905	73,315	1,726	0,120	110,673	41,487	2,395		
89,761	97,908	1,156	-1,248	132,827	47,486	1,610		
96,921	134,781	-0,475	-1,271	166,010	54,280	1,083		
106,434	189,896	-1,652	-0,491	217,689	60,730	0,728		
121,408	270,531	-1,958	0,180	296,524	65,831	0,489		
146,234	386,022	-1,509	0,606	412,792	69,252	0,329		
187,298	548,472	0,154	0,528	579,571	71,146	0,221		
253,918	773,260	1,348	0,216	813,883	71,821	0,149		
359,436	1079,460	3,173	-0,224	1137,730	71,583	0,100		

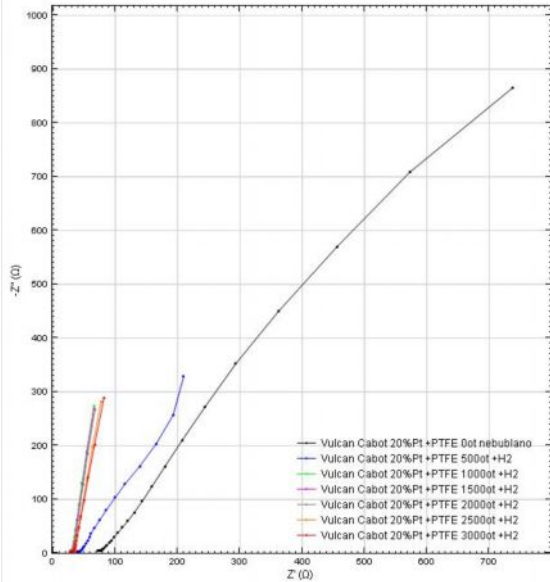
■ Nejvyšší celková chyba simulace  
■ Nejmenší celková chyba simulace

Q – CPE

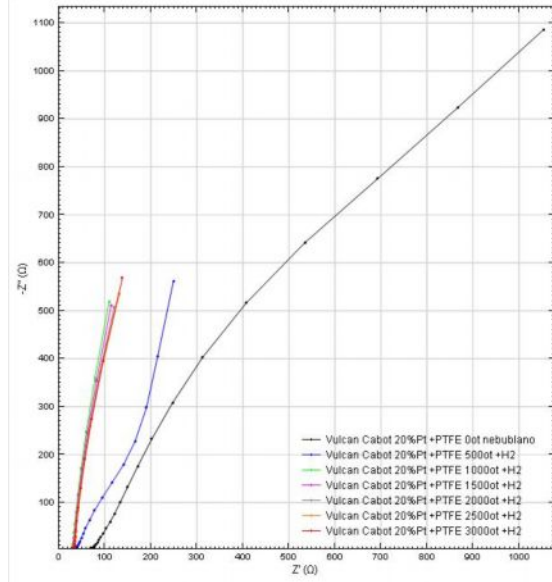


**Obr.45:** Zapojení náhradního obvodu

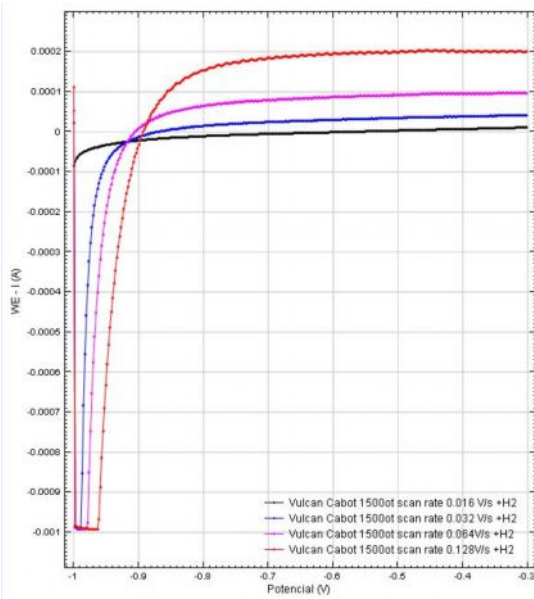
Vzorek č:III – CABOT VULCAN GP 3893 mletý 20%  $H_2PtCl_6$  + PTFE



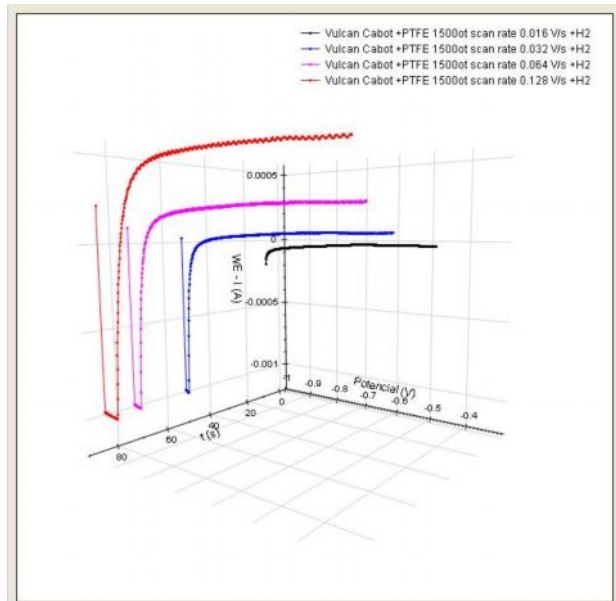
Obr.46: Impedanční spektroskopie pro -1V



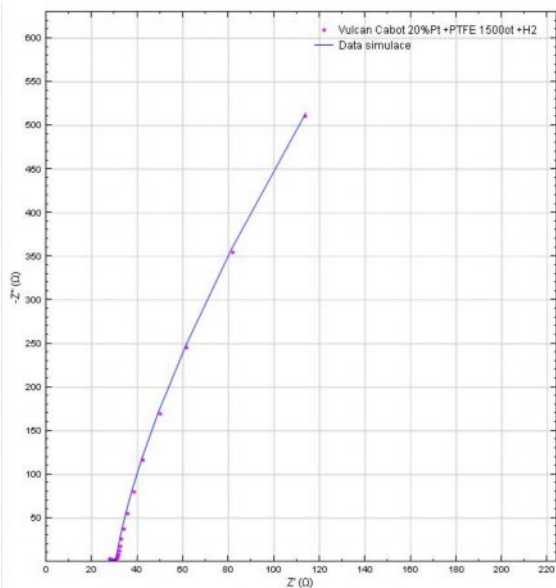
Obr.47: Impedanční spektroskopie pro -0,3V



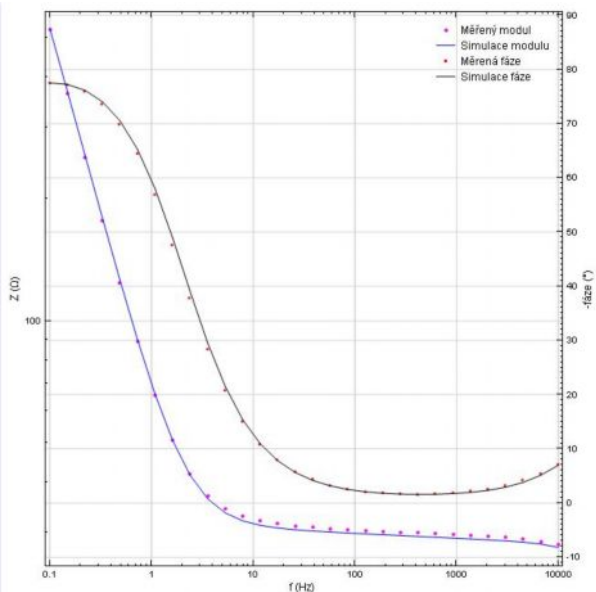
Obr.48: LSV 1500ot bubláno  $H_2$



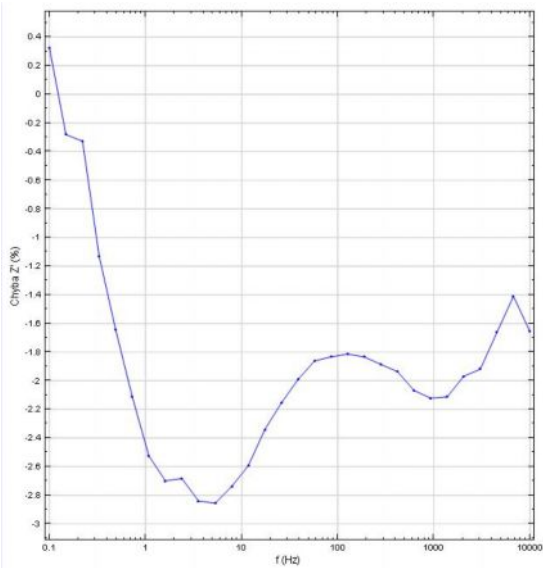
Obr.49: LSV 1500ot bubláno  $H_2$  + časová osa



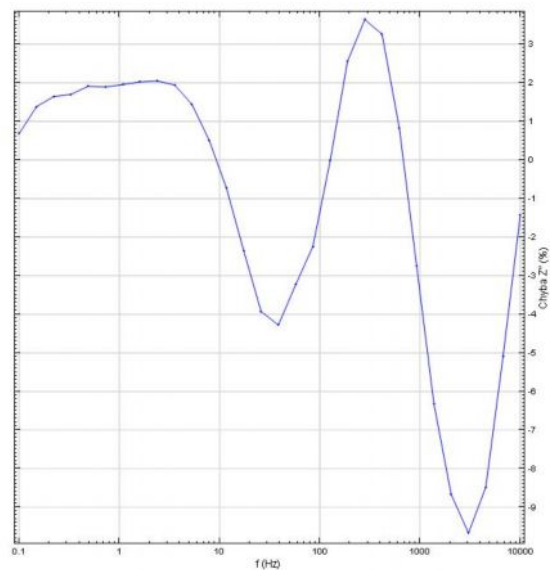
**Obr.50:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V+H<sub>2</sub> porovnání se simulací



**Obr.51:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> porovnání změn modulu a fáze



**Obr.52:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z'



**Obr.53:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z''

**Tab. 8 :** Naměřené hodnoty EIS CABOT VULCAN GP 3893 mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+PTFE 1500ot+H<sub>2</sub>

Číslo kroku	$f$ [Hz]	$Z'$ [ $\Omega$ ]	$-Z''$ [ $\Omega$ ]	$Z$ [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	10000,000	27,869	3,408	28,077	6,971
2	6723,400	28,436	2,665	28,561	5,355
3	4520,400	28,872	2,080	28,947	4,121
4	3039,200	29,183	1,630	29,228	3,198
5	2043,400	29,379	1,300	29,408	2,533
6	1373,800	29,582	1,071	29,601	2,074
7	923,670	29,735	0,918	29,749	1,768
8	621,020	29,864	0,830	29,876	1,592
9	417,530	29,968	0,800	29,978	1,529
10	280,720	30,095	0,829	30,106	1,577
11	188,740	30,221	0,918	30,235	1,739
12	126,900	30,356	1,086	30,375	2,050
13	85,317	30,504	1,348	30,534	2,531
14	57,362	30,656	1,729	30,705	3,228
15	38,566	30,845	2,306	30,931	4,275
16	25,929	31,051	3,126	31,208	5,749
17	17,433	31,279	4,288	31,572	7,805
18	11,721	31,554	5,982	32,116	10,734
19	7,881	31,837	8,482	32,947	14,918
20	5,298	32,184	12,164	34,406	20,704
21	3,562	32,616	17,612	37,067	28,368
22	2,395	33,217	25,672	41,982	37,699
23	1,610	34,251	37,514	50,798	47,603
24	1,083	35,852	54,840	65,519	56,825
25	0,728	38,427	80,062	88,806	64,361
26	0,489	42,746	116,558	124,149	69,860
27	0,329	49,960	169,572	176,779	73,584
28	0,221	61,757	245,413	253,064	75,875
29	0,149	81,741	354,243	363,552	77,007
30	0,100	113,576	510,821	523,295	77,465

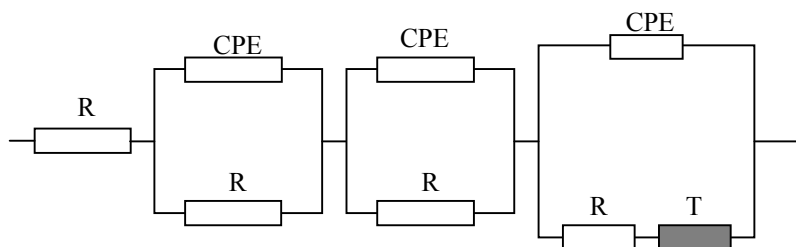
■ Nejvyšší naměřená vodivost elektrodové hmoty odečteno z grafu

**Tab. 9 :** Hodnoty simulace EIS CABOT VULCAN GP 3893 mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+PTFE 1500ot+H<sub>2</sub>

Z' [Ω]	-Z'' [Ω]	Chyba Z' [%]	Chyba Z'' [%]	Z [Ω]	-φ [°]	f [Hz]	x <sup>2</sup>	Obvod
27,408	3,359	-1,657	-1,426	27,613	6,987	10000,000	0.01235	[R(RQ)(RQ)(Q[RT])]
28,035	2,529	-1,410	-5,096	28,149	5,155	6723,400		
28,391	1,904	-1,663	-8,481	28,455	3,836	4520,400		
28,623	1,473	-1,919	-9,669	28,661	2,946	3039,200		
28,801	1,187	-1,969	-8,667	28,825	2,360	2043,400		
28,957	1,004	-2,113	-6,316	28,974	1,985	1373,800		
29,104	0,893	-2,122	-2,738	29,117	1,757	923,670		
29,247	0,837	-2,068	0,831	29,259	1,639	621,020		
29,388	0,826	-1,936	3,261	29,399	1,610	417,530		
29,527	0,859	-1,886	3,637	29,540	1,666	280,720		
29,666	0,941	-1,834	2,555	29,681	1,817	188,740		
29,805	1,086	-1,814	-0,015	29,825	2,087	126,900		
29,945	1,318	-1,833	-2,238	29,974	2,520	85,317		
30,086	1,673	-1,862	-3,234	30,132	3,183	57,362		
30,230	2,207	-1,992	-4,278	30,311	4,176	38,566		
30,382	3,004	-2,155	-3,924	30,530	5,646	25,929		
30,547	4,187	-2,341	-2,358	30,833	7,804	17,433		
30,735	5,938	-2,594	-0,732	31,304	10,934	11,721		
30,965	8,525	-2,738	0,508	32,117	15,393	7,881		
31,265	12,340	-2,856	1,445	33,612	21,538	5,298		
31,690	17,954	-2,840	1,942	36,422	29,534	3,562		
32,326	26,198	-2,683	2,047	41,609	39,022	2,395		
33,326	38,272	-2,699	2,022	50,749	48,952	1,610		
34,947	55,911	-2,524	1,954	65,934	57,993	1,083		
37,615	81,577	-2,111	1,892	89,832	65,246	0,728		
42,043	118,784	-1,644	1,910	126,005	70,509	0,489		
49,396	172,457	-1,128	1,701	179,392	74,017	0,329		
61,555	249,442	-0,327	1,642	256,925	76,138	0,221		
81,511	359,135	-0,281	1,381	368,269	77,213	0,149		
113,946	514,305	0,326	0,682	526,777	77,508	0,100		

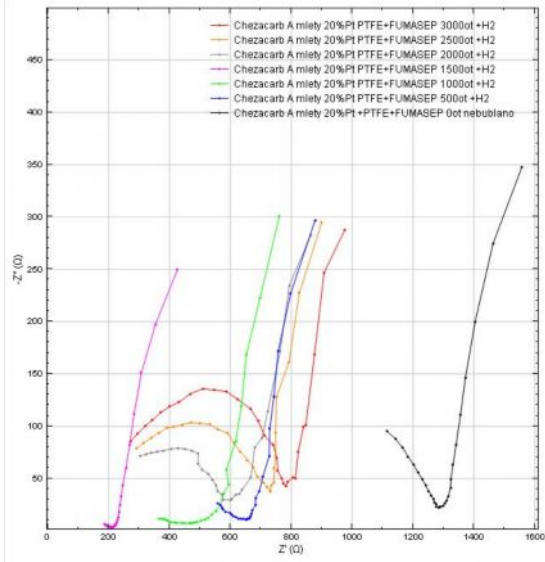
■ Nejvyšší celková chyba simulace  
■ Nejmenší celková chyba simulace

Q – CPE

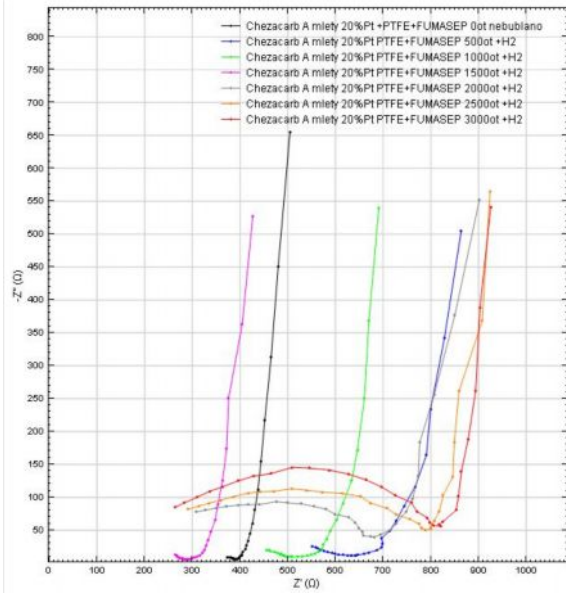


**Obr.54:** Zapojení náhradního obvodu

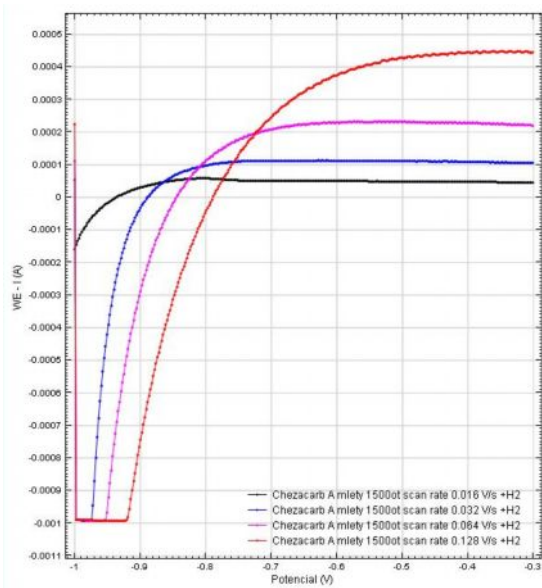
Vzorek č:IV – CHEZACARB A mletý 20%  $H_2PtCl_6$  + PTFE+FUMASEP ionomer



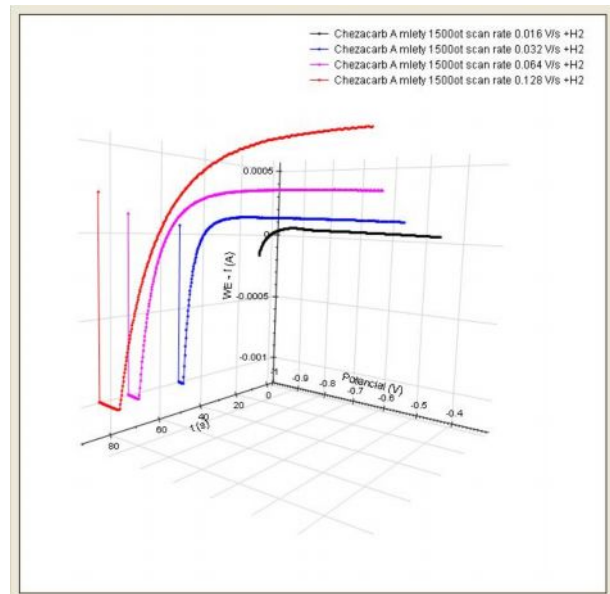
Obr.55: Impedanční spektroskopie pro -1V



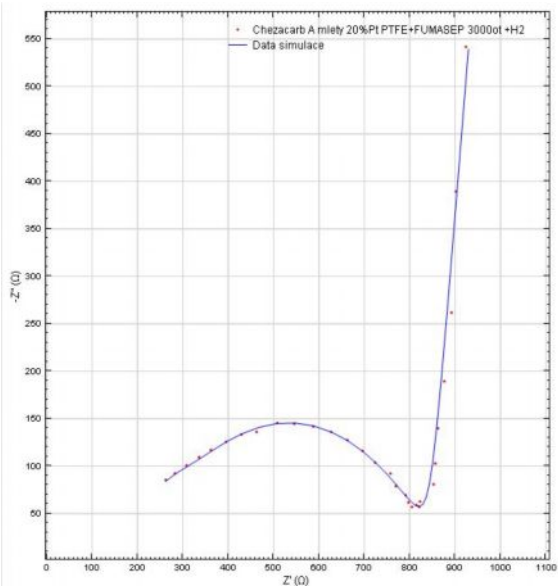
Obr.56: Impedanční spektroskopie pro -0,3V



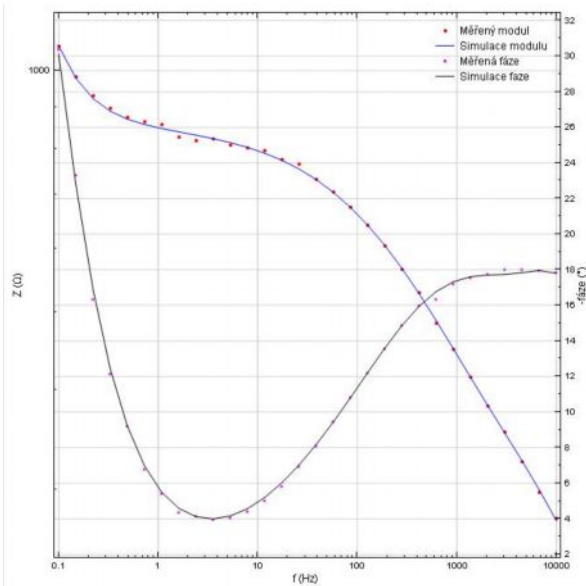
Obr.57: LSV 1500ot bubláno  $H_2$



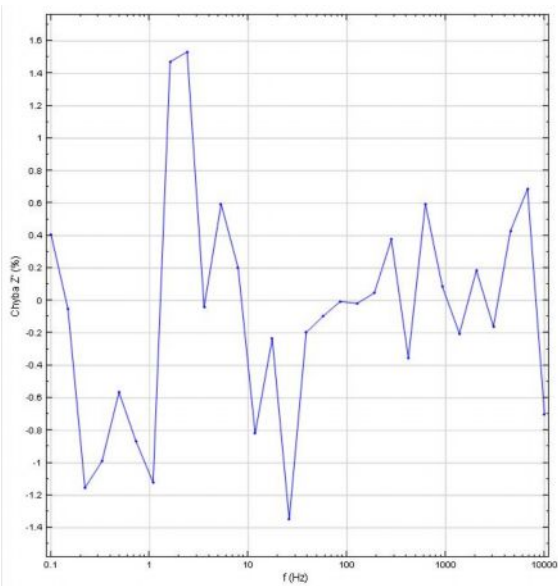
Obr.58: LSV 1500ot bubláno  $H_2$  + časová osa



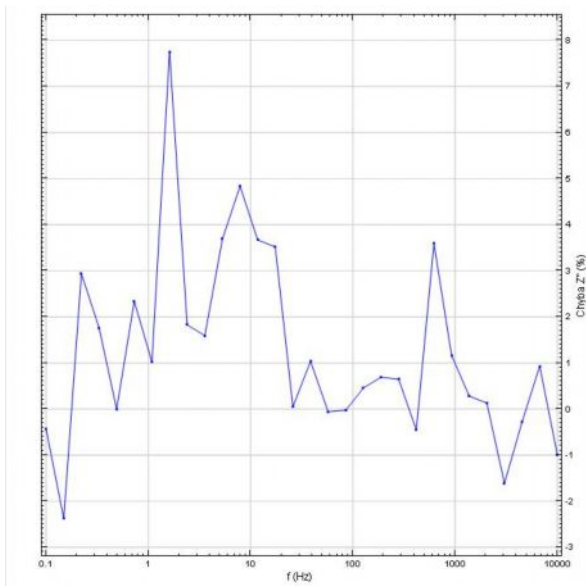
**Obr.59:** Impedanční spektroskopie 3000ot -0,3V+H<sub>2</sub> porovnání se simulací



**Obr.60:** Impedanční spektroskopie 3000ot -0,3V +H<sub>2</sub> porovnání změn modulu a fáze



**Obr.61:** Impedanční spektroskopie 3000ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z'



**Obr.62:** Impedanční spektroskopie 3000ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z''



**Tab. 10 :** Naměřené hodnoty EIS CHEZACABR A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+PTFE+FUMASEP ionomer 3000ot+H<sub>2</sub>

Číslo kroku	$f$ [Hz]	$Z'$ [ $\Omega$ ]	$-Z''$ [ $\Omega$ ]	$Z$ [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	10000,000	263,200	84,696	276,492	17,838
2	6723,400	283,476	91,663	297,927	17,919
3	4520,400	309,035	100,128	324,851	17,953
4	3039,200	336,716	109,284	354,006	17,981
5	2043,400	363,339	116,028	381,415	17,710
6	1373,800	395,716	124,971	414,980	17,527
7	923,670	428,904	132,368	448,865	17,151
8	621,020	464,072	135,872	483,553	16,319
9	417,530	508,579	145,465	528,973	15,962
10	280,720	545,764	144,457	564,558	14,826
11	188,740	588,225	141,315	604,961	13,509
12	126,900	627,513	135,200	641,912	12,159
13	85,317	663,433	126,700	675,423	10,812
14	57,362	696,409	115,809	705,972	9,442
15	38,566	725,545	102,905	732,806	8,072
16	25,929	758,704	92,132	764,277	6,924
17	17,433	770,754	78,356	774,727	5,805
18	11,721	792,377	68,951	795,371	4,973
19	7,881	798,170	60,980	800,496	4,369
20	5,298	806,384	56,932	808,391	4,038
21	3,562	821,013	56,485	822,954	3,936
22	2,395	816,329	58,662	818,434	4,110
23	1,610	824,041	62,316	826,394	4,325
24	1,083	852,770	80,374	856,549	5,384
25	0,728	858,033	101,804	864,052	6,766
26	0,489	863,908	139,487	875,096	9,172
27	0,329	878,208	188,649	898,241	12,124
28	0,221	893,672	261,015	931,009	16,282
29	0,149	902,855	388,863	983,037	23,302
30	0,100	925,407	541,599	1072,240	30,339

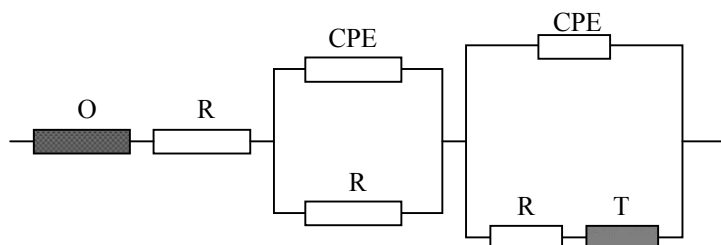
Nejvyšší naměřená vodivost elektrodové hmoty odečteno z grafu

**Tab. 11 :** Hodnoty simulace EIS CHEZACABR A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+PTFE+FUMASEP ionomer 3000ot+H<sub>2</sub>

Z' [Ω]	-Z'' [Ω]	Chyba Z' [%]	Chyba Z'' [%]	Z [Ω]	-φ [°]	f [Hz]	x <sup>2</sup>	Obvod
261,350	83,855	-0,703	-0,992	274,473	17,789	10000,000	0.0018062	[OR(QR)(Q[RT])]
285,428	92,516	0,688	0,931	300,047	17,959	6723,400		
310,360	99,850	0,429	-0,278	326,027	17,834	4520,400		
336,173	107,526	-0,161	-1,609	352,951	17,737	3039,200		
364,013	116,178	0,186	0,130	382,103	17,701	2043,400		
394,913	125,324	-0,203	0,283	414,322	17,607	1373,800		
429,271	133,912	0,086	1,166	449,673	17,325	923,670		
466,836	140,755	0,596	3,593	487,594	16,778	621,020		
506,774	144,810	-0,355	-0,451	527,058	15,947	417,530		
547,819	145,390	0,377	0,646	566,783	14,864	280,720		
588,500	142,292	0,047	0,691	605,458	13,593	188,740		
627,403	135,819	-0,017	0,458	641,936	12,215	126,900		
663,399	126,667	-0,005	-0,026	675,383	10,810	85,317		
695,747	115,744	-0,095	-0,056	705,309	9,445	57,362		
724,119	103,970	-0,197	1,036	731,545	8,171	38,566		
748,473	92,178	-1,348	0,050	754,127	7,021	25,929		
768,958	81,113	-0,233	3,519	773,224	6,022	17,433		
785,897	71,482	-0,818	3,670	789,141	5,197	11,721		
799,779	63,929	0,202	4,837	802,330	4,570	7,881		
811,184	59,032	0,595	3,690	813,329	4,162	5,298		
820,690	57,385	-0,039	1,593	822,694	4,000	3,562		
828,843	59,735	1,533	1,828	830,993	4,122	2,395		
836,169	67,147	1,472	7,752	838,860	4,591	1,610		
843,213	81,196	-1,121	1,023	847,113	5,500	1,083		
850,583	104,184	-0,868	2,338	856,940	6,983	0,728		
859,027	139,488	-0,565	0,001	870,279	9,223	0,489		
869,514	191,983	-0,990	1,768	890,457	12,451	0,329		
883,357	268,683	-1,154	2,938	923,315	16,918	0,221		
902,384	379,631	-0,052	-2,374	978,988	22,816	0,149		
929,194	539,219	0,409	-0,439	1074,320	30,127	0,100		

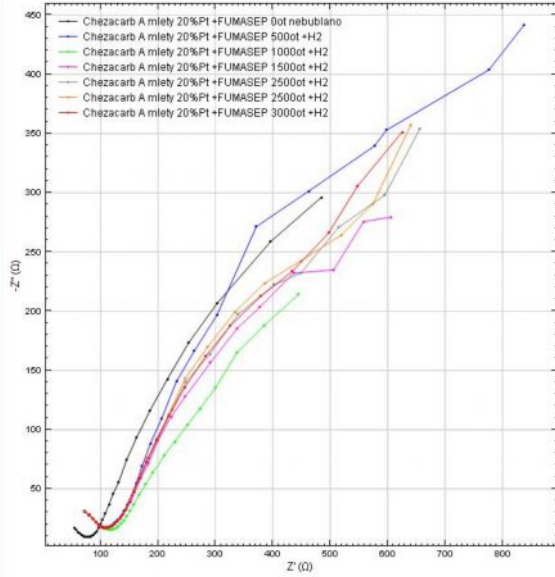
■ Nejvyšší celková chyba simulace  
■ Nejmenší celková chyba simulace

Q – CPE

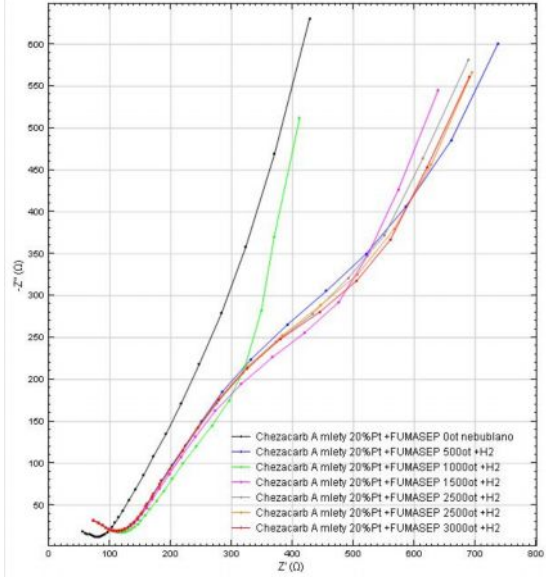


**Obr.63:** Zapojení náhradního obvodu

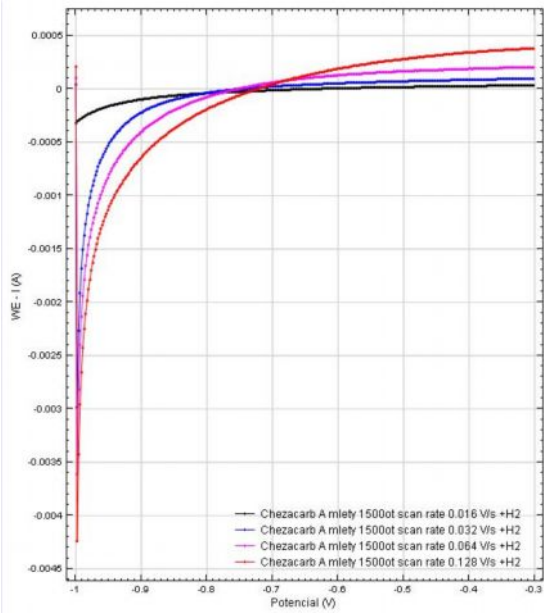
Vzorek č:V – CHEZACARB A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> +FUMASEP ionomer



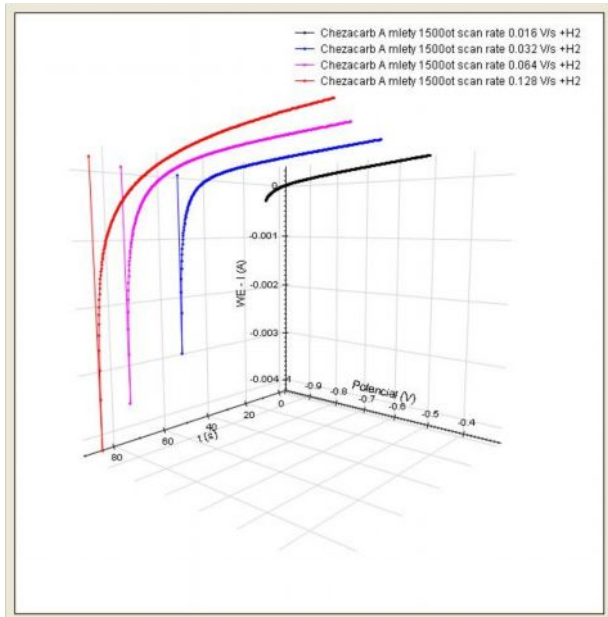
Obr.64: Impedanční spektroskopie pro -1V



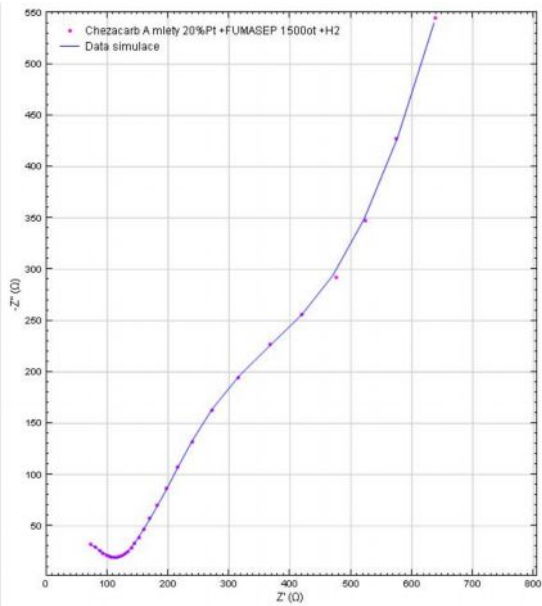
Obr.65: Impedanční spektroskopie pro -0,3V



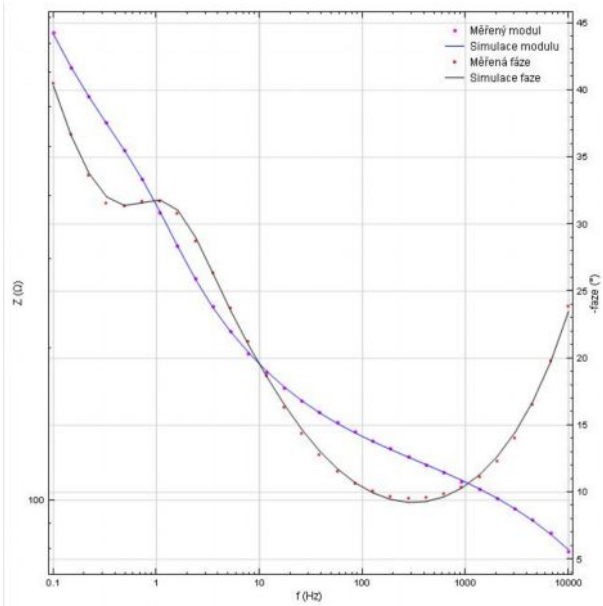
Obr.66: LSV 1500ot bubláno H<sub>2</sub>



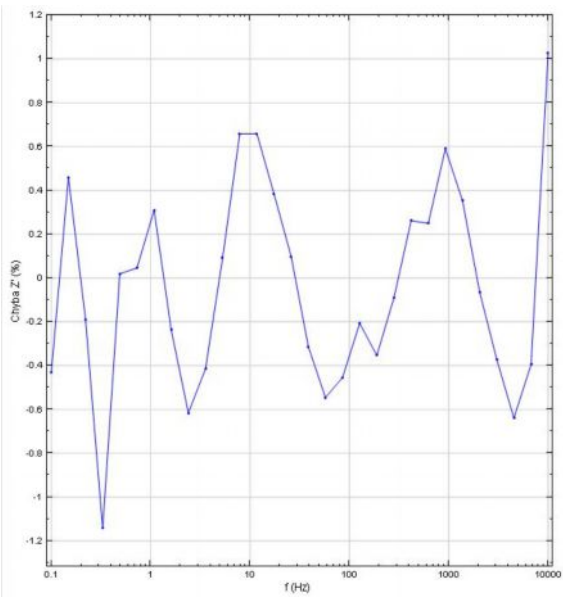
Obr.67: LSV 1500ot bubláno H<sub>2</sub>+časová osa



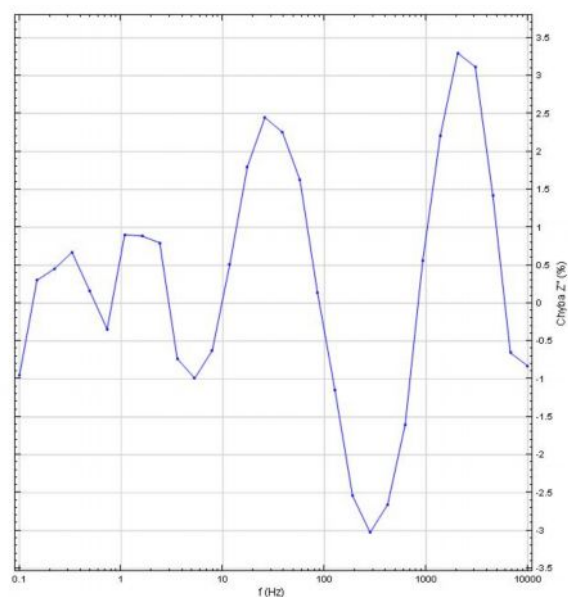
**Obr.68:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V+H<sub>2</sub> porovnání se simulací



**Obr.69:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> porovnání změn modulu a fáze



**Obr.70:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z'



**Obr.71:** Impedanční spektroskopie 1500ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z''

**Tab. 12 :** Naměřené hodnoty EIS CHEZACABR A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> +FUMASEP ionomer 1500ot+H<sub>2</sub>

Číslo kroku	$f$ [Hz]	$Z'$ [ $\Omega$ ]	$-Z''$ [ $\Omega$ ]	$Z$ [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	10000,000	72,489	32,095	79.2762	23,882
2	6723,400	80,921	29,130	86.0045	19,798
3	4520,400	87,749	25,961	91.5085	16,481
4	3039,200	93,435	23,328	96.3031	14,019
5	2043,400	98,466	21,451	100.776	12,290
6	1373,800	102,880	20,228	104.85	11,124
7	923,670	107,081	19,526	108.846	10,334
8	621,020	111,648	19,385	113.319	9,850
9	417,530	115,697	19,553	117.337	9,592
10	280,720	120,163	20,173	121.844	9,530
11	188,740	124,666	21,260	126.466	9,678
12	126,900	128,915	22,841	130.923	10,047
13	85,317	134,071	25,204	136.42	10,647
14	57,362	139,587	28,395	142.446	11,498
15	38,566	145,397	32,889	149.07	12,746
16	25,929	151,917	38,853	156.807	14,346
17	17,433	159,886	46,834	166.604	16,326
18	11,721	169,495	57,298	178.918	18,678
19	7,881	181,532	70,408	194.708	21,199
20	5,298	196,995	86,548	215.169	23,718
21	3,562	215,954	107,012	241.013	26,360
22	2,395	240,424	131,579	274.075	28,691
23	1,610	272,829	162,422	317.516	30,766
24	1,083	315,260	194,389	370.373	31,658
25	0,728	367,348	226,840	431.742	31,696
26	0,489	419,736	255,773	491.526	31,357
27	0,329	476,048	292,560	558.76	31,573
28	0,221	522,838	347,778	627.941	33,631
29	0,149	573,846	426,910	715.228	36,647
30	0,100	639,154	545,282	840.148	40,469

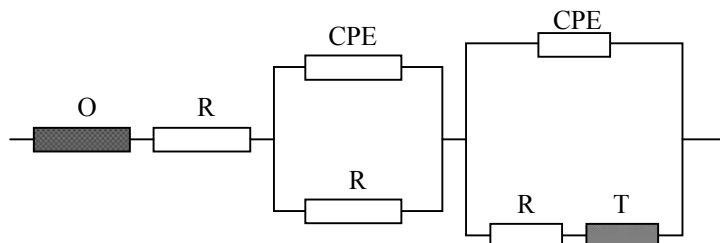
Nejvyšší naměřená vodivost elektrodové hmoty odečteno z grafu

**Tab. 13 :** Hodnoty simulace EIS CHEZACABR A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+ FUMASEP ionomer 1500ot+H<sub>2</sub>

Z' [Ω]	-Z'' [Ω]	Chyba Z' [%]	Chyba Z'' [%]	Z [Ω]	-φ [°]	f [Hz]	x <sup>2</sup>	Obvod
73,234	31,829	1,028	-0,829	79,852	23,491	10000,000	0.0010397	[OR(QR)(Q[RT])]
80,602	28,939	-0,395	-0,655	85,639	19,750	6723,400		
87,188	26,330	-0,640	1,423	91,077	16,804	4520,400		
93,088	24,055	-0,372	3,116	96,146	14,489	3039,200		
98,404	22,158	-0,064	3,298	100,867	12,690	2043,400		
103,243	20,674	0,352	2,204	105,292	11,323	1373,800		
107,713	19,635	0,590	0,558	109,487	10,331	923,670		
111,926	19,075	0,249	-1,602	113,540	9,671	621,020		
116,000	19,034	0,262	-2,655	117,551	9,318	417,530		
120,055	19,563	-0,090	-3,024	121,638	9,255	280,720		
124,225	20,720	-0,354	-2,539	125,942	9,470	188,740		
128,648	22,578	-0,207	-1,151	130,615	9,954	126,900		
133,462	25,239	-0,454	0,140	135,828	10,709	85,317		
138,825	28,856	-0,546	1,623	141,792	11,742	57,362		
144,942	33,630	-0,313	2,253	148,792	13,063	38,566		
152,066	39,804	0,098	2,450	157,189	14,669	25,929		
160,499	47,677	0,383	1,801	167,431	16,544	17,433		
170,611	57,592	0,659	0,513	180,070	18,653	11,721		
182,728	69,970	0,658	-0,622	195,666	20,953	7,881		
197,175	85,691	0,091	-0,990	214,990	23,490	5,298		
215,058	106,228	-0,415	-0,732	239,864	26,287	3,562		
238,943	132,626	-0,616	0,795	273,283	29,033	2,395		
272,181	163,860	-0,237	0,885	317,698	31,049	1,610		
316,237	196,145	0,310	0,903	372,127	31,809	1,083		
367,516	226,063	0,046	-0,343	431,477	31,596	0,728		
419,816	256,201	0,019	0,167	491,817	31,394	0,489		
470,612	294,523	-1,142	0,671	555,175	32,040	0,329		
521,849	349,355	-0,189	0,453	627,993	33,801	0,221		
576,478	428,202	0,459	0,303	718,111	36,605	0,149		
636,395	540,095	-0,432	-0,951	834,686	40,321	0,100		

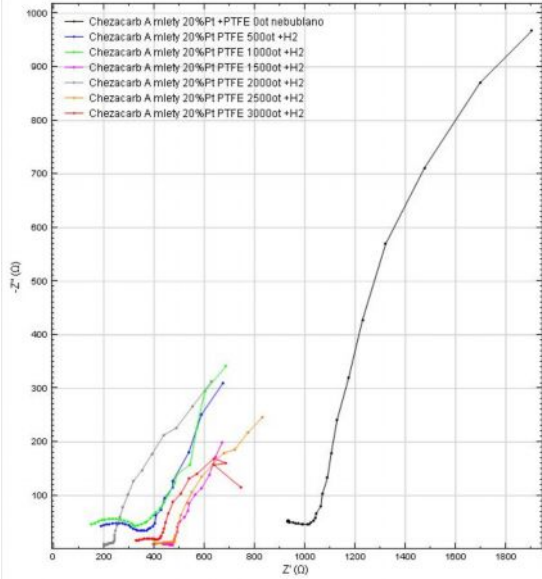
■ Nejvyšší celková chyba simulace  
■ Nejmenší celková chyba simulace

Q – CPE

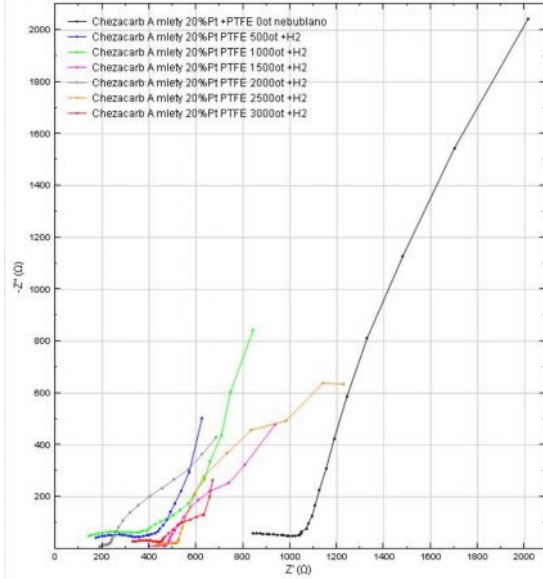


**Obr.72:** Zapojení náhradního obvodu

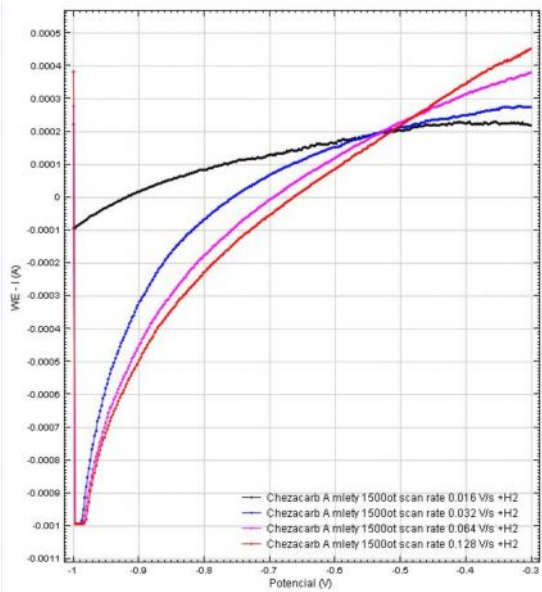
Vzorek č:VI – CHEZACARB A mletý 20%  $H_2PtCl_6$  +PTFE



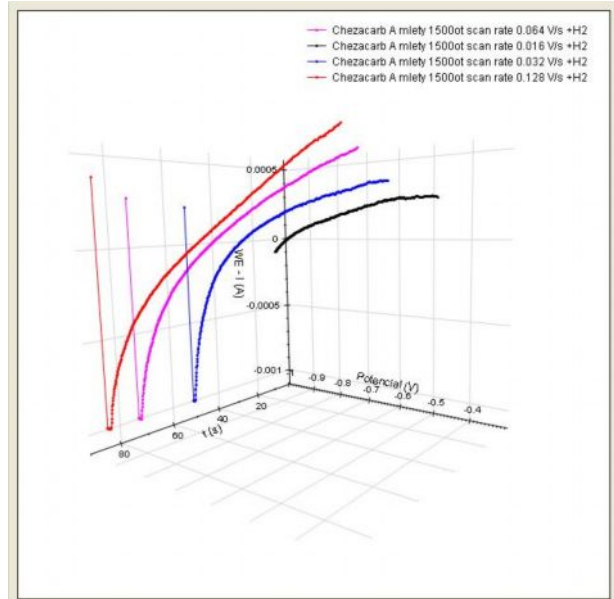
Obr.73: Impedanční spektroskopie pro -1V



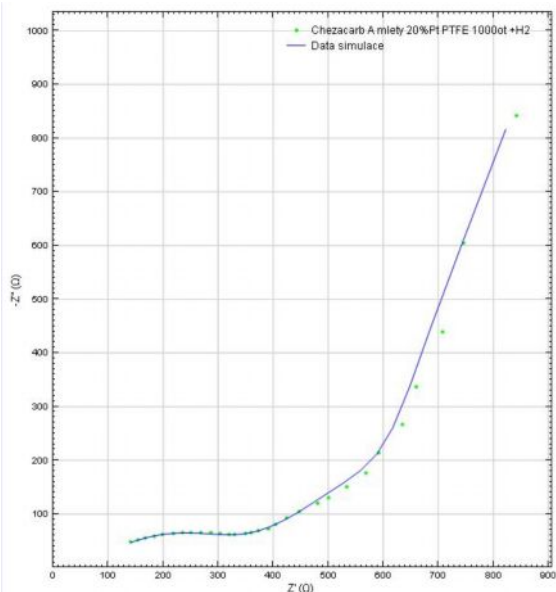
Obr.74: Impedanční spektroskopie pro -0,3V



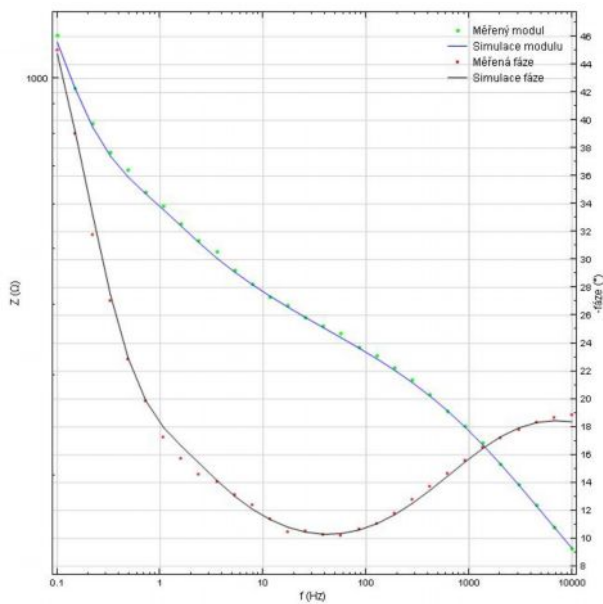
Obr.75: LSV 1500ot bubláno  $H_2$



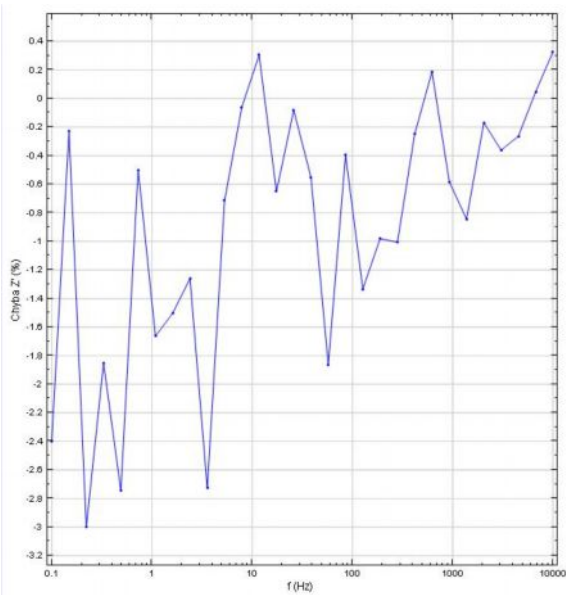
Obr.76: LSV 1500ot bubláno  $H_2$  + časová osa



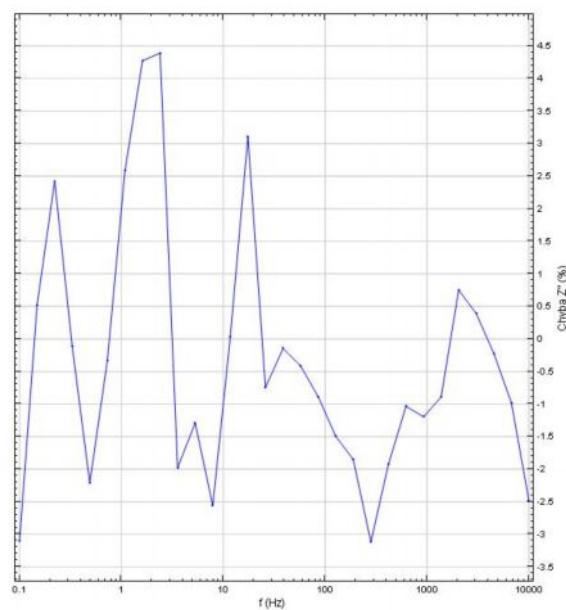
**Obr.77:** Impedanční spektroskopie 1000ot -0,3V+H<sub>2</sub> porovnání se simulací



**Obr.78:** Impedanční spektroskopie 1000ot -0,3V +H<sub>2</sub> porovnání změn modulu a fáze



**Obr.79:** Impedanční spektroskopie 1000ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z'



**Obr.80:** Impedanční spektroskopie 1000ot -0,3V +H<sub>2</sub> chyba Z''



**Tab. 14 :** Naměřené hodnoty EIS CHEZACABR A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+PTFE 1000ot+H<sub>2</sub>

Číslo kroku	$f$ [Hz]	$Z'$ [ $\Omega$ ]	$-Z''$ [ $\Omega$ ]	$Z$ [ $\Omega$ ]	$-\varphi$ [ $^\circ$ ]
1	10000,000	140,614	48,058	148,600	18,869
2	6723,400	153,531	51,762	162,022	18,631
3	4520,400	167,991	55,572	176,945	18,304
4	3039,200	183,492	58,923	192,720	17,803
5	2043,400	199,561	61,618	208,857	17,159
6	1373,800	218,229	64,604	227,591	16,491
7	923,670	235,241	65,714	244,247	15,608
8	621,020	250,780	65,567	259,210	14,652
9	417,530	268,837	65,425	276,684	13,678
10	280,720	287,313	65,144	294,606	12,775
11	188,740	302,926	63,279	309,465	11,799
12	126,900	319,105	62,443	325,157	11,072
13	85,317	330,612	62,181	336,409	10,652
14	57,362	350,101	62,987	355,722	10,199
15	38,566	359,958	65,123	365,801	10,255
16	25,929	373,110	69,259	379,483	10,516
17	17,433	390,989	71,860	397,538	10,414
18	11,721	404,051	81,296	412,148	11,376
19	7,881	423,989	93,132	434,097	12,389
20	5,298	447,474	104,119	459,428	13,099
21	3,562	480,791	120,354	495,625	14,054
22	2,395	501,340	130,574	518,065	14,598
23	1,610	534,117	150,513	554,919	15,738
24	1,083	567,744	176,194	594,455	17,241
25	0,728	591,784	213,300	629,051	19,821
26	0,489	634,820	266,901	688,645	22,804
27	0,329	659,785	336,932	740,837	27,052
28	0,221	708,249	438,960	833,248	31,790
29	0,149	746,287	604,539	960,423	39,010
30	0,100	842,706	842,600	1191,690	44,996

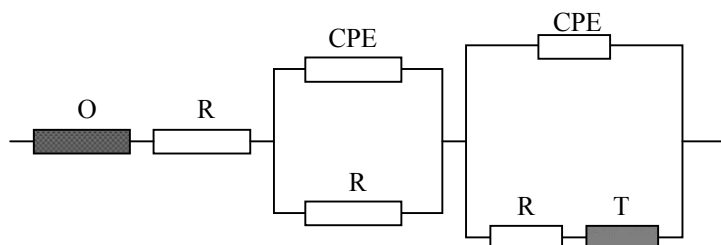
Nejvyšší naměřená vodivost elektrodové hmoty odečteno z grafu

**Tab. 15 :** Hodnoty simulace EIS CHEZACABR A mletý 20% H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>+PTFE 1000ot+H<sub>2</sub>

Z' [Ω]	-Z'' [Ω]	Chyba Z' [%]	Chyba Z'' [%]	Z [Ω]	-φ [°]	f [Hz]	x <sup>2</sup>	Obvod
141,075	46,862	0,328	-2,488	148,655	18,376	10000,000	0.0055026	[OR(QR)(Q[RT])]
153,605	51,254	0,048	-0,981	161,930	18,453	6723,400		
167,548	55,449	-0,264	-0,221	176,485	18,312	4520,400		
182,828	59,153	-0,362	0,390	192,159	17,929	3039,200		
199,224	62,081	-0,169	0,751	208,672	17,308	2043,400		
216,385	64,028	-0,845	-0,891	225,659	16,483	1373,800		
233,872	64,929	-0,582	-1,195	242,718	15,516	923,670		
251,252	64,889	0,188	-1,034	259,496	14,481	621,020		
268,172	64,167	-0,247	-1,924	275,742	13,456	417,530		
284,423	63,112	-1,006	-3,118	291,341	12,511	280,720		
299,954	62,108	-0,981	-1,852	306,316	11,698	188,740		
314,850	61,510	-1,333	-1,493	320,803	11,054	126,900		
329,307	61,630	-0,395	-0,886	335,024	10,600	85,317		
343,578	62,728	-1,863	-0,412	349,257	10,347	57,362		
357,968	65,028	-0,553	-0,146	363,826	10,296	38,566		
372,805	68,742	-0,082	-0,746	379,090	10,448	25,929		
388,447	74,091	-0,650	3,105	395,450	10,799	17,433		
405,281	81,326	0,305	0,038	413,360	11,347	11,721		
423,735	90,748	-0,060	-2,559	433,344	12,088	7,881		
444,276	102,777	-0,715	-1,289	456,009	13,026	5,298		
467,677	117,975	-2,728	-1,977	482,327	14,158	3,562		
495,023	136,308	-1,260	4,391	513,447	15,395	2,395		
526,095	156,944	-1,502	4,273	549,005	16,611	1,610		
558,296	180,752	-1,664	2,587	586,827	17,940	1,083		
588,832	212,606	-0,499	-0,325	626,039	19,853	0,728		
617,399	260,999	-2,744	-2,211	670,300	22,916	0,489		
647,570	336,537	-1,851	-0,117	729,798	27,461	0,329		
687,000	449,608	-3,000	2,426	821,046	33,203	0,221		
744,595	607,710	-0,227	0,524	961,110	39,220	0,149		
822,486	816,441	-2,399	-3,105	1158,900	44,789	0,100		

■ Nejvyšší celková chyba simulace  
■ Nejmenší celková chyba simulace

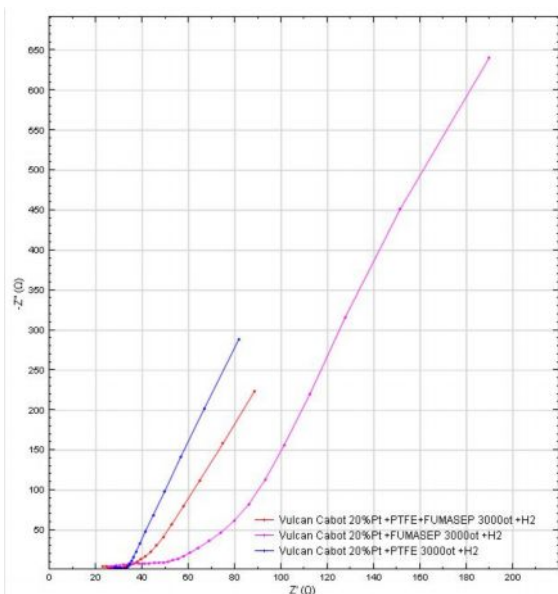
Q – CPE



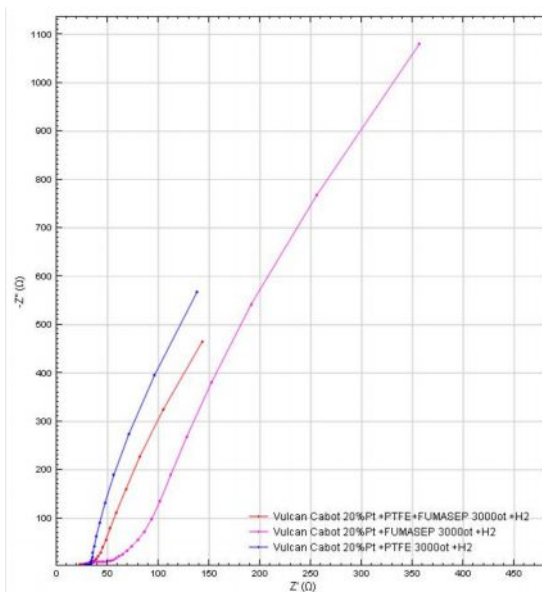
**Obr.81:** Zapojení náhradního obvodu

## Porovnání vzorků

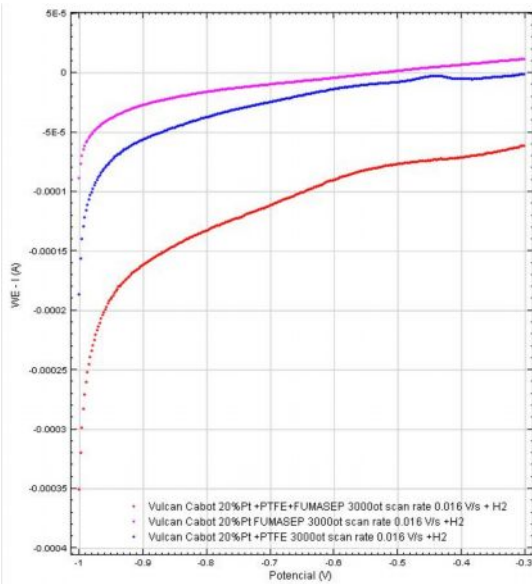
**Zhodnocení** : Veškeré směsi materiálů zakápnuté na elektrodu byly měřeny impedanční spektroskopií a voltametrií s lineárním skenem. Tyto dvě měřicí metody byly vybrány z důvodu určení důležitých vlastností pro palivový článek, co nejvyšší vodivost elektrodové hmoty a rychlost oxidace vodíku. Metoda impedanční spektroskopie byla prováděna při hodnotách potenciálu -1 a -0,3 V. Nejvyšších vodivosti při obou potenciálech dosahovaly elektrodové hmoty s použitým uhlíkem typu Vulcan Cabot, nejbližše jejich hodnotám vodivosti ze skupiny elektrodových hmot využívajících Chezacarb A byl vzorek zakápnutý fumasepem viz Obr.90: a Obr.91:. Dále byly prováděny simulace průběhů impedance u jednotlivých vzorků elektrodových hmot pomocí náhradního obvodu. Nejmenší hodnoty odchylky průběhu impedance náhradního obvodu od naměřeného se povedlo dosáhnout u vzorku Chezacarb A mletý 20% $H_2PtCl_6$  smíchaným s PTFE a zakápnutým fumasepem viz Tab. 11 :, Obr.61: a Obr.62:. Metoda voltametrie s lineárním skenem byla prováděna pro různé hodnoty otáček elektrody stejně jako impedanční spektroskopie. Díky zvyšování hodnoty otáček dochází k růstu hodnoty difúze reakční směsi k elektrodě a můžeme tedy řízenou difúzi přesně stanovit hodnotu kinetického proudu. Obdobně jako otáčky byla zvyšována i hodnota scan rate to má za následek růst proudu urychlením elektrodové reakce viz Obr.30., Obr.31:. Při celkovém srovnání rychlostí vývinu všech elektrodových hmot se nejvíce blížily čisté platinové elektrodě vzorky elektrodových hmot Chezacarbu A viz.Obr.93:. Pomocí metody voltametrie s lineárním skenem se dá dále získat pomocí obrácené hodnoty proudové hustoty vynesené do Levich-Kouteckého grafu hodnota kinetického proudu. Z takto získaných hodnot kinetického proudu lze pomocí Tafelova grafu určit rychlost reakce hmoty na proudové požadavky. Tyto dvě procedury se již neprováděly.



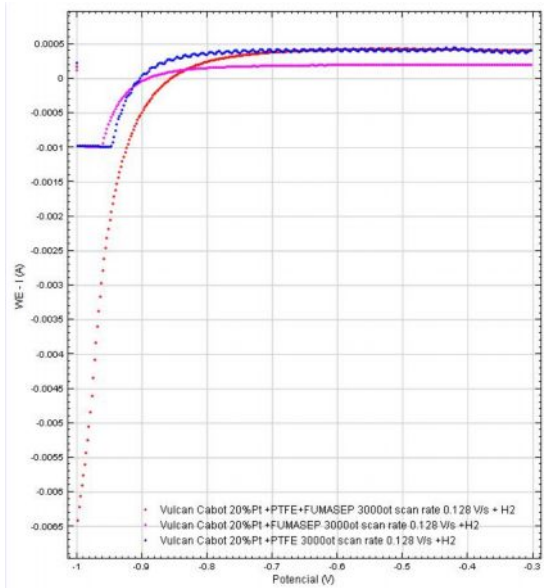
**Obr.82:** Impedanční spektroskopie porovnání vzorku Vulcan cabot 3000ot+ $H_2$  -1V



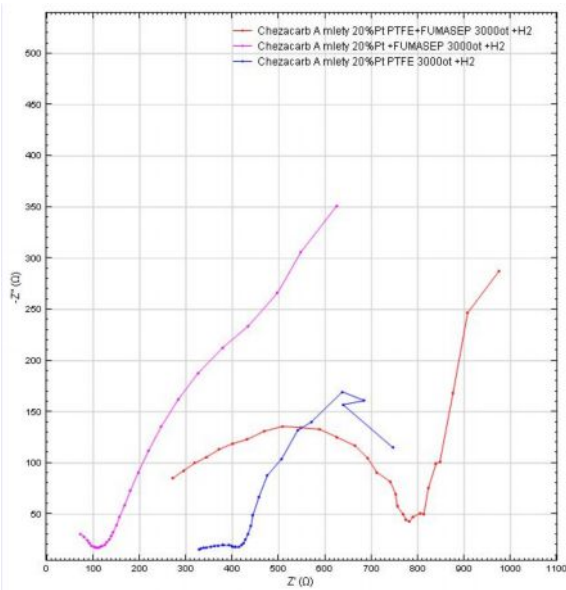
**Obr.83:** Impedanční spektroskopie porovnání vzorku Vulcan cabot 3000ot+ $H_2$  -0,3V



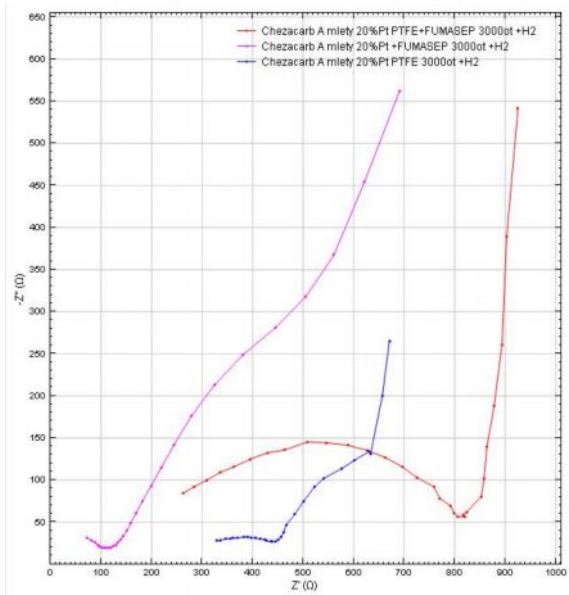
**Obr.84:**LSV porovnání vzorku Vulcan cabot 3000ot +H<sub>2</sub> scan rate 0,016



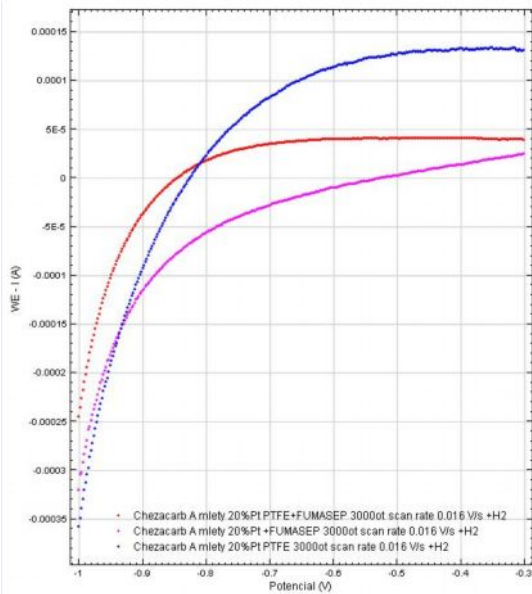
**Obr.85:**LSV porovnání vzorku Vulcan cabot 3000ot +H<sub>2</sub> scan rate 0,128



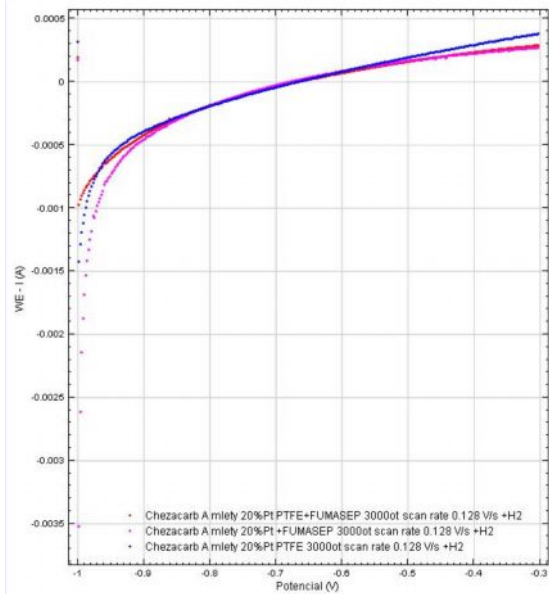
**Obr.86:**Impedanční spektroskopie porovnání vzorků Chezacarb A mlety 3000ot+H<sub>2</sub> -1V



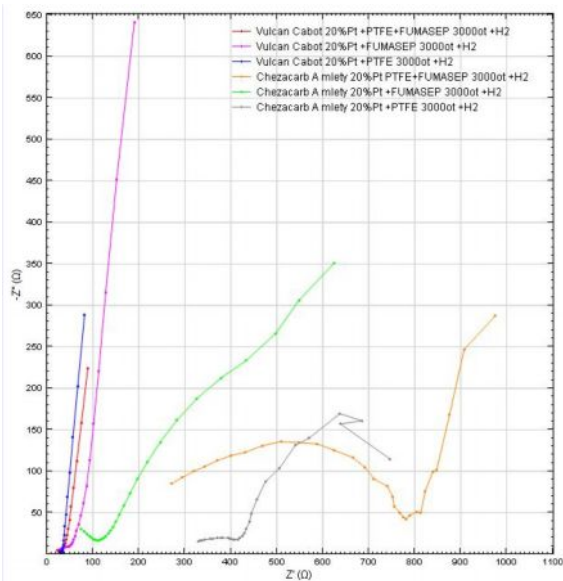
**Obr.87:** Impedanční spektroskopie porovnání vzorků Chezacarb A mlety 3000ot+H<sub>2</sub> -0,3V



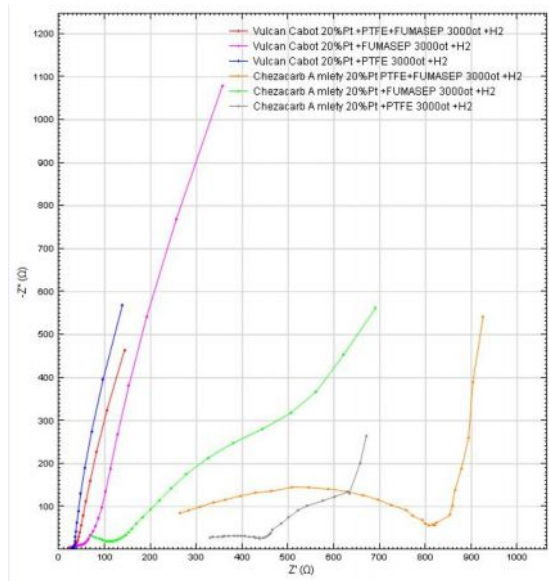
**Obr.88:** LSV porovnání vzorku Chezacarb A mlety 3000ot +H<sub>2</sub> scan rate 0,016



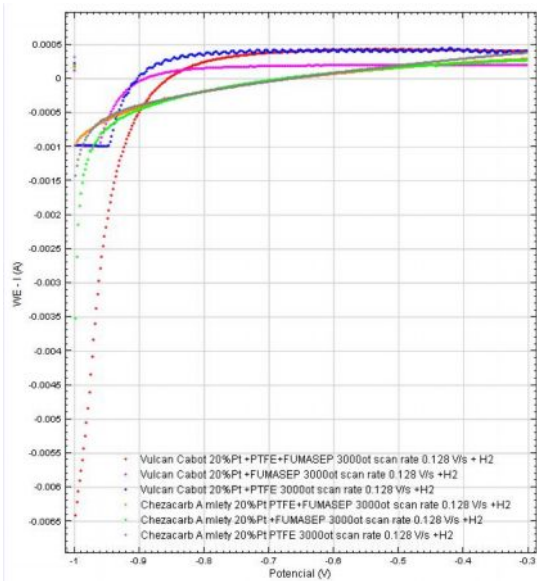
**Obr.89:** LSV porovnání vzorku Chezacarb A mlety 3000ot +H<sub>2</sub> scan rate 0,128



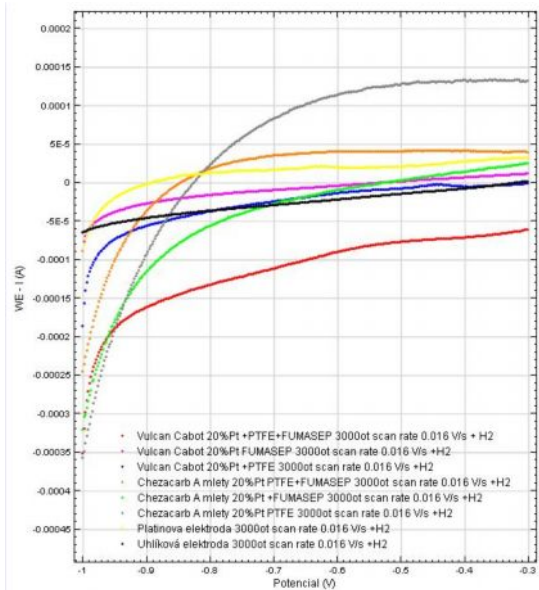
**Obr.90:** Impedanční spektroskopie porovnání všech vzorků 3000ot +H<sub>2</sub> -1V



**Obr.91:** Impedanční spektroskopie porovnání všech vzorků 3000ot +H<sub>2</sub> -0,3V



**Obr.92:**LSV porovnání všech vzorku 3000ot+H<sub>2</sub> scan rate 0,128



**Obr.93:**LSV porovnání všech vzorků s platinovou a uhlíkovou elektrodou 3000ot +H<sub>2</sub> scan rate 0,016

### 3.4 Příprava MEA struktury

Byli vystříženy čtyři čtverce uhlíkové tkaniny o rozměrech 3x3 cm, na všechny tyto čtverce bylo nanášeno pomocí airbrushové pistole vždy z jedné strany 600 µl ionomeru rozmíchaného v 1200 µl vody, po nanášení se nechala tkanina asi 30 minut důkladně vyschnout. Dále bylo odebráno 100 mg směsi ze vzorků 1.Vulcan CX72R 20%Pt a 2.Vulcan CX72R 20%Pt a rozmícháno ve 2400 µl vody a 1200 µl isopropilalkoholu. Takto vzniklá emulze byla nanášena na plochu 2x2 cm pomocí airbrushové pistole na ionomerem pokrytou stranu uhlíkové tkaniny, po tomto nanášení se nechala tkanina opět důkladně proschnout.

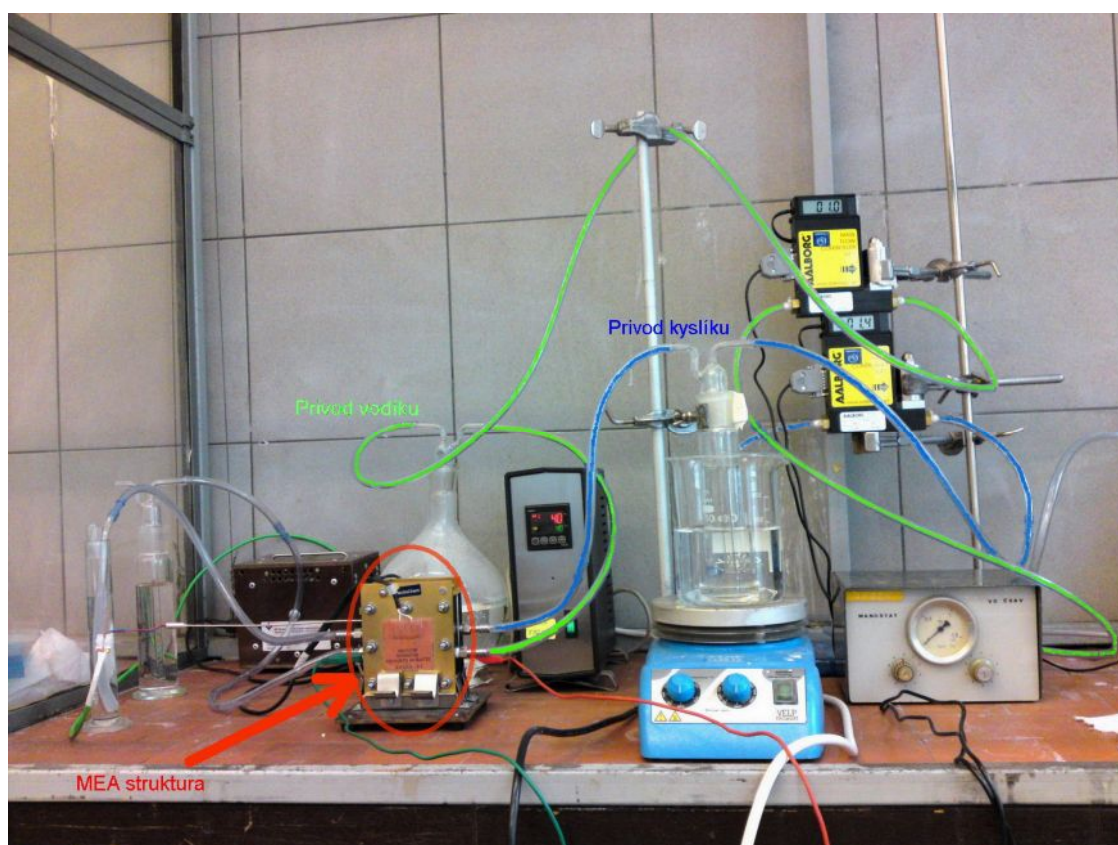
Tab. 16 : Seznam a označení jednotlivých uhlíkových čtverců

Označení čtverce	Čistá hmotnost čtverce [mg]	Hmotnost čtverce po nanášení IONOMERU [mg]	Typ uhlíkové směsi	Hmotnost po nanášení uhlíkové směsi [mg]	Čistá hmotnost uhlíkové směsi [mg]
V15	103	104	Vulcan XC72R 20%Pt č.1	122	18
V10	103	104	Vulcan XC72R 20%Pt č.1	120	16
V5	108	109	Vulcan XC72R 20%Pt č.2	127	18
11	106	107	Vulcan XC72R 20%Pt č.2	127	20
B20	108		Vulcan XC72R 20%Pt č.1	129	21
B15	109		Vulcan XC72R 20%Pt č.1	128	19
12	105		Chezacarb A 20%Pt	123	18
13	103		Chezacarb A 20%Pt	124	21
10	107		Chezacarb B 20%Pt	127	20
V20	104		Chezacarb B 20%Pt	121	17
14	106		Chezacarb B 5%Pt	126	20
15	105		Chezacarb B 5%Pt	124	19

Takto připravené tkaniny byly nalisovány na alkalickou membránu FUMASEP, vždy nanášenou stranou k membráně. Pro zvýšení pevnosti uchycení tkaniny na membránu bylo na okraj tkaniny nanášeno nepatrné množství PTFE. Teplota desek při lisování byla nastavená na 80°C, doba lisování byla 10 minut při tlaku 400kg. Čtverce označené V15 a V10 byly nalisovány na membránu a čtverce s označením V5 a 11 byly nalisovány na další membránu, díky čemuž využívá jedna membrána uhlíkovou směs vzorku číslo 1. a další membrána vzorku číslo 2. Obdobným způsobem byly nanášeny vzorky Vulcan XC72R 20%Pt č.1 na tkaniny označené B20 a B15, Chezacarb A mletý 20%Pt na tkaniny označené 12 a 13, Chezacarb B mletý 20%Pt na tkaniny označené 10 a V20 a Chezacarb B mletý 5%Pt na tkaniny označené 14 a 15. Tyto tkaniny již nebyly nanášeny ionomerem a byly nalisovány na Nafionové membrány.(viz Tab. 16 :)



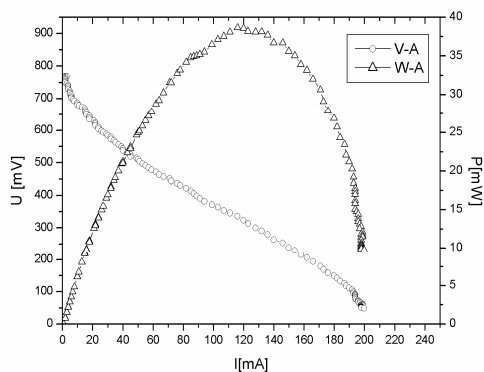
**Obr.94:**Membrána s nalisovanými elektrodami



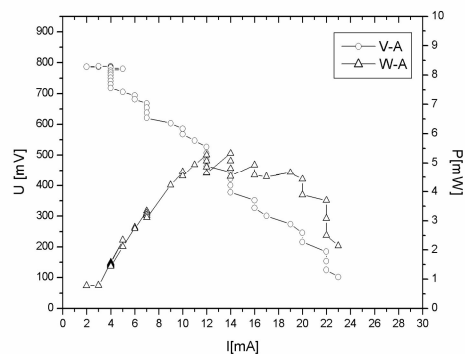
**Obr.95:**Sestava zapojeného palivového článku



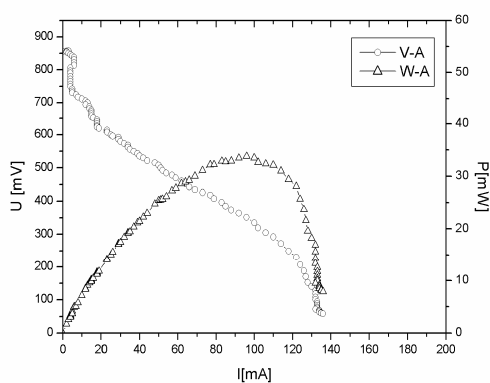
➤ **Měření na Nafionové membráně**



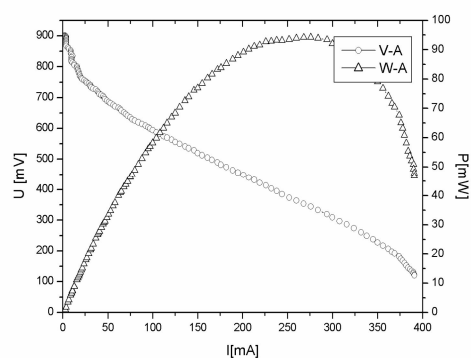
**Obr.96:**Chezacarb A 20%Pt



**Obr.97:**Chezacarb B 5%Pt



**Obr.98:**Chezacarb B 20%



**Obr.99:**Vulcan XC72R 20%

**Tab. 17 :** Tabulka naměřených hodnot a přepočít na gram

Druh uhlíku	$I_{Pmax}$ [A]	$U_{Pmax}$ [V]	$P_{max}$ [mW]	$m$ [g]	$I_{hmota}$ [A/g]	$U_{hmota}$ [V/g]	$P_{hmota}$ [mW/g]
Chezacarb A 20%Pt	0,118	0,320	37,760	0,039	3,026	8,205	968,205
Chezacarb B 5%Pt	0,014	0,398	5,586	0,037	0,378	10,757	150,973
Chezacarb B 20%Pt	0,098	0,349	34,202	0,039	2,513	8,949	876,974
Vulcan XC72R 20%Pt	0,276	0,348	96,048	0,040	6,900	8,700	2401,200

Zhodnocení : Ze všech čtyř měřených vzorků dosáhl nejlepších výsledků vzorek Vulcan XC72R, se kterým bylo dosaženo výkonu 96,048 mW a přepočteno na hmotu 2401,2 mW. Nejhůře dopadl vzorek Chezacarb B s 5%  $H_2PtCl_6$  dosahující výkonu 5,586 mW přepočteno na plochu 150,973 mW.

## 4 Závěr

Z práce je patrný jasný rozvoj využití palivových článků. V posledních letech se jejich možné použití v komerční sféře jeví jako čím dál více uskutečnitelné. V oblasti mobilních zařízení je nejpokročilejší firma Toshiba, jejíž mobilní telefony jsou takřka připraveny pro běžné použití. Hlavní rozvoj těchto technologií lze předpokládat zejména na asijských trzích. V automobilovém průmyslu jednoznačně dominuje firma Honda, která již vyrábí komerční malosériové vozidlo FXC Clarity poháněné palivovými články. Do několika let by tuto technologii a data získaná z tohoto vozu chtěla využít pro stavbu masově vyráběného automobilu.

Při vytváření materiálů na elektrody bylo zjištěno, že použití nedehydrované kyseliny  $H_2PtCl_6$  je neefektivní z důvodu nedostatečného zachycení platiny na uhlíkový materiál. Po tomto zjištění jsem přešel na použití kyseliny v pevné formě. Při vysokoteplotní deponaci na uhlíkový materiál dochází při promíchání v nedostatečném množství vody k zachycování platiny na misku. Množství vody a isopropylalkoholu použité na promíchání směsi se musí vždy odhadnout podle druhu uhlíkového materiálu a jeho hmotnosti, je to do jisté míry věcí zkušenosti. Dva z takto vytvořených materiálů byly využity pro měření na rotační diskové elektrodě, kde byly podrobeny měření metodou impedanční spektroskopie a voltametrii s lineárním skenem. Pomocí těchto metod byla zkoumána velikost vodivosti elektrodových materiálů a rychlost vývinu vodíku, která probíhá podle mechanismu Tafel-Volmerova nebo Heyrovského-Volmerova. Nejvyšší vodivosti při měření impedanční spektroskopie dosáhly vzorky vytvořené z uhlíku Cabot Vulkan pro obě hodnoty potenciálu tedy  $-1V$  a  $-0,3V$ . Ze skupiny elektrodových hmot vytvořených z uhlíku Chezacarb A se nejvíce blížil jejich vodivosti vzorek zakápnutý ionomerem viz Obr.90:. Veškeré vzorky byly při měření bublány vodíkem při různých rychlostech otáček vyjma 0ot a u voltametrie se zaraz zvyšovala hodnotou scan rate, což má za následek zvyšování proudu. Při srovnání rychlostí vývinu byly vzorky porovnány s platinovou elektrodou, té se nejvíce blížily elektrodové materiály vyrobené z Chezacarbu A.

Další náplní mé práce bylo sestavení MEA struktury a proměření vytvořených elektrodových materiálů v články. Pro toto měření jsem využil uhlíky Vulcan XC72R, Chezacarb B a Chezacarb A měřené na rotační diskové elektrodě, který by díky dobré rychlosti vývinu a nemalé vodivosti měl dosahovat dobré hodnoty výkonu. Veškeré tyto elektrodové směsi byly naneseny na membránu typu Nafion. Nejvyšší výkon přepočtený na gram aktivní hmoty byl naměřen vzorku Vulcan XC72R, oproti vzorku měřenému na rotační diskové elektrodě byl jeho výkon více než dvojnásobný. U vzorku Chezacarb B který byl měřen s 20% a 5%  $H_2PtCl_6$  bylo zjištěno, že při čtyřnásobném zvýšení množství platiny došlo k zhruba šestnásobnému zvýšení výkonu na gram elektrodové hmoty. V dalším kroku mé práce jsem nalisoval elektrodový materiál Vulcan XC72R na alkalickou membránu Fumasep, k proměření tohoto vzorku již nedošlo.

Jako další postup mé práce bych navrhol vytvoření více vzorků z různými typy uhlíku a různým obsahem  $H_2PtCl_6$  pro rozšíření možností jejich vzájemného porovnání. Tyto vzorky bych také nanesl na alkalickou membránu pro porovnání výsledků mezi membránou alkalického a kyselého typu. Na alkalické membrány bych se dále pokusil nanést jiné druhy katalyzátorů než platinu, pro ověření možnosti její náhrady za levnější materiál.

## 5 Použitá literatura

- [1] HORÁK, B., KOZIOREK, J., KOPŘIVA, M., PAPOUŠEK, M., SLANINA, Z. *Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem* Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2005.
- [2] KOTEK, Luboš. *Skladování vodíku : přehled metod* [online]. 2005 , 08. 03. 2006 [cit. 2008-10-17]. Dostupný z WWW: <<http://vodik.czweb.org/view.php?cisloclanku=2006030801>>.
- [3] L. BUSBY, Rebecca. *Hydrogen and Fuel Cells* . [s.l.] : [s.n.], 2005. 445 s.
- [4] VAVERKA , Lukáš . *Honda FCX Clarity : Budoucnost patří vodíku* [online]. 1997-2009 , 25. 07. 2008 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://magazin.auto.cz/predstavujeme/honda-fcx-clarity-budoucnost-patri-vodiku.html>>.
- [5] VAVERKA, Lukáš . *Nissan X-Trail FCV : neobvyklý rekord na Nürburgringu* [online]. 1997-2009 , 25. 07. 2008 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://news.auto.cz/aktuality/nissan-x-trail-fcv-neobvykly-rekord-na-nrburgingu.html>>.
- [6] KUDĚLKA, Miroslav. *Toyota FCHV : konkurence Hondy FCX startuje* [online]. 1997-2009 , 25. 11. 2002 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://news.auto.cz/nove-modely/toyota-fchv-konkurence-hondy-fcx-startuje.html>>.
- [7] VOŘECHOVSKÝ , Dan . *Toyota představila vylepšenou verzi svých palivových článků* [online]. 1997-2009 , 30. 09. 2007 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://news.auto.cz/aktuality/toyota-predstavila-vylepsenou-verzi-svych-palivovych-clanku.html>>.
- [8] *Chevrolet Sequel : 300 mil na vodík* [online]. 1997-2009 , 18. 05. 2007 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://news.auto.cz/aktuality/chevrolet-sequel-300-mil-na-vodik.html>>.
- [9] VOŘECHOVSKÝ , Dan. *Mazda Nagare : Rouška tajemství poodhalena* [online]. 1997-2009, 01.12.2006 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://news.auto.cz/aktuality/mazda-nagare-rouska-tajemstvi-poodhalena.html>>.
- [10] NAVRÁTIL, Jan . *Palivové články : energetická spása pro mobility* [online]. 1998 ,5. 4. 2005 [cit. 2008-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mobilmania.cz/default.aspx?section=21&server=1&article=1109746>>.
- [11] POLESNÝ, David. *Japonsko : první dva mobility s palivovými články* [online]. 1998 , 5. 10. 2005 [cit. 2008-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mobilmania.cz/default.aspx?section=21&server=1&article=1111041>>.

- [12] POLESNÝ, David. *Japonci dokáží nabíjet mobily vodou* [online]. 1998 , 17. 8. 2006 [cit. 2008-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mobilmania.cz/bleskovky/japonci-dokazi-nabijet-mobily-vodou/sc-4-a-1113261/default.aspx>>.
- [13] POSPÍŠIL, Aleš. *Samsung vyvinul baterii na vodu* [online]. 1998 , 17. 10. 2007 [cit. 2008-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mobilmania.cz/default.aspx?section=21&server=1&article=1116912>>.
- [14] POSPÍŠIL, Aleš. *Sony vyvinulo hybridní palivový článek pro mobily* [online]. 1998 , 6.5.2008 [cit. 2008-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mobilmania.cz/default.aspx?section=21&server=1&article=1119003>>.
- [15] KŮŽEL, Filip . *Toshiba ukázala fungující mobil s palivovým článkem* [online]. 1998 , 14.2.2008 [cit. 2008-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mobilmania.cz/default.aspx?section=21&server=1&article=1118102>>.
- [16] HORČÍK, Jan . *Mercedes-Benz úspěšně testuje palivové články* [online]. 2006-2008 , 8.4.2008 [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://hybrid.cz/clanky/mercedes-benz-uspesne-testuje-palivove-clanky>>.
- [17] California Fuel Cell Partnership [online]. [1999] [cit. 2009-05-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.fuelcellpartnership.org/progress/stations>>.
- [18] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohony automobilů*. 1. vyd. Praha : BEN, 2005. ISBN 9788073001278. Koncepční vozidla alternativních pohonů, s. 153-178.
- [19] FCZ-H2BUS : *Oficiální web prvního vodíkového autobusu v ČR* [online]. 2008 [cit. 2009-03-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.h2bus.cz>>.
- [20] Innocente, A.F, Angelo, A.C.D. *Electrocatalysis of oxidacion fo hydrogen on platinum ordered intermetallic phases: Kinetic and mechanisti studies* Laboratório de Eletrocatalise, Departamento de Qulmica, Faculdade de Ciencias, Hauru,Brazilie 2006.
- [21] *NOVA 1.5 - User manual* Ostrava: Utrecht: Nizozemsko, 2009.

## 6 Seznam použitých zkratk a symbolů

- JHFC – Japonský program palivových článků
- FCHV – Hybridní vozidlo s palivovým článkem
- GM – Společnost General Motors
- FCV – Vozidlo s palivovým článkem
- MEZI – Japonské ministerstvo hospodářství, průmyslu a obchodu
- ECTOS – Zkratka Ekologického městského dopravního systému na Islandu
- CUTE – Čistá městská doprava pro Evropu
- EU – Evropská unie
- PEM – Palivový článek s protonovou membránou
- NiMH – Nikl-metal hydridový akumulátor
- Li-ion – Lithium-Iontová baterie
- Li-pol – Lithium-polymerová baterie
- SUV- označení sportovní užitkové vozidlo
- NECAR – Nové elektrické vozidlo (New Electric car)
- DMFC – Přímý methanolový palivový článek
- CO<sub>2</sub> – Oxid uhličitý
- TNN – Nippon telegrafická a telefonní korporace
- H<sub>2</sub> – Vodík
- Zn – Zinek
- HCl - Kyselina chlorovodíková
- ZnCl<sub>2</sub> – Chlorid zinečnatý
- NaOH – Hydroxid sodný
- H<sub>2</sub>O – Voda
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Kyselina sírová
- CO – Oxid uhelnatý
- NASA – Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
- USA – Spojené státy americké
- BMW –Bavorské Motorové Závody výrobce automobilů
- O<sub>2</sub> – Kyslík
- MEA – Struktura palivového článku
- PAFC – Palivový článek s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné

AFC – Alkalický palivový článek  
MCFC – Palivový článek s elektrolytem na bázi tekutých uhličitánů  
SOFC – Palivový článek s elektrolytem na bázi pevných oxidů  
KOH – Hydroxid draselný  
 $\text{H}_2\text{PtCl}_6$  – Kyselina dihydrogenhexachloroplatičitá  
Pt – Platina  
PTFE – Polytetrafluoretylen  
RDE – Rotační disková elektroda  
CV – Cyklická voltametrie  
LSV – Voltametrie s lineárním skenem  
EIS – Impedanční spektroskopie  
RE – Referenční elektroda  
WE – Pracovní elektroda  
CE – Proudová elektroda  
Hg-HgO – Kalomelová elektroda používaná jako referenční  
Z – Impedance  
Z' – Reálná část impedance  
Z'' – Imaginární část impedance  
|Z| - Absolutní hodnota impedance  
 $\varphi$  – Fáze  
I – Proud  
U – Napětí  
P – Výkon  
m – hmotnost  
MPa- Tlak mega Pascal