

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Charakterizace organických elektrochemických  
tranzistorů**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip KLÍMA**  
Osobní číslo: **E18N0006P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Téma práce: **Charakterizace organických elektrochemických tranzistorů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

#### Zásady pro vypracování

1. Prostudujte a popište princip činnosti organických elektrochemických tranzistorů.
2. Proveďte rešerši v oblasti organických elektrochemických tranzistorů se zaměřením na jejich parametry a materiálovou konfiguraci.
3. Navrhněte metodiku testování vybraných parametrů s využitím dostupného měřicí vybavení.
4. Proveďte praktické testování organických elektrochemických tranzistorů na zvolených konfiguracích.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

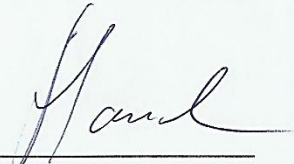
1. G. Nisato, D. Lupo, and S. Ganz, Organic and printed electronics : fundamentals and applications. Pan Stanford Publishing, 2016.
2. IEC/IEEE, „Test methods for the characterization of organic transistors and materials,“ IEC 628602013(E) IEEE Std 1620-2008, pp. 1728, 2013.
3. J. Rivnay, S. Inal, A. Salleo, R. M. Owens, M. Berggren, and G. G. Malliaras, „Organic electrochemical transistors,“ Nat. Rev. Mater., vol. 3, no. 2, p. 17086, Jan. 2018.
4. P. C. Hütter, A. Fian, K. Gatterer, and B. Stadlober, „Efficiency of the Switching Process in Organic Electrochemical Transistors,“ ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 8, no. 22, pp. 14071-14076, Jun. 2016.
5. Elektronické informační zdroje, Databáze Scienedirect, Wiley Interscience, IEEEXplore.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Silvan Pretl, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
**Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na charakterizaci organických elektrochemických tranzistorů. Úvodní teoretická část práce se věnuje základním výrobním technologiím, které se používají při výrobě tištěné a organické elektroniky. Součástí je i popis vlastností konjugovaných vodivých polymerů potřebných pro výrobu organické elektroniky. V hlavní části je popsán samotný organický elektrochemický tranzistor, je zde popis principu jeho funkce, jeho materiálové konfigurace a porovnání s ostatními typy organických tranzistorů. Součástí je i výčet aplikací, ve kterých je možné tento tranzistor uplatnit. Další část se věnuje předpokladům pro charakterizaci organických tranzistorů, které vycházejí z normy IEC 62860-2013. Zaměřuje se rovněž na určení parametrů organického tranzistoru. Praktická část je zaměřena na návrh měřicí metodiky a její experimentální ověření na sérii vzorků. Je zde popsána měřicí metodika, měřicí instrumentace a plán experimentálního ověření vlivu vlhkosti na tranzistorové chování. Poslední část se věnuje vyhodnocení výsledků získaných tranzistorových parametrů a prezentaci ověřených poznatků o vlivu vlhkosti na tranzistorové chování.

## Klíčová slova

Organický elektrochemický tranzistor, OECT, OTFT, PEDOT:PSS, elektrolyt, iontová kapalina, měření, tištěná elektronika, organické materiály.

## **Abstract**

This master thesis is focused on characterization of organic electrochemical transistors. Theoretical introduction of this paper describes basic manufacturing technologies, which are used for fabrication of printed and organic electronics. In this part, there is also a description of properties of organic conjugated conductive polymers necessary for fabrication of organic electronics. Main part is about organic electrochemical transistor itself, namely description of principle, material configurations and comparison with other types of organic transistors. There is also a list of applications, in which this transistor may be used. Next part deals with assumptions for characterization of organic transistors, which are based on IEC 62860-2013 standard. It also aims at extraction of organic transistor parameters. Practical part is focused on the design of measuring methodology and its experimental verification on a series of samples. There is description of the measuring methodology, measuring instrumentation and the plan of experimental verification of the influence of humidity on the transistor behaviour. The last part is devoted to the evaluation of the results of the obtained transistor parameters and the presentation of verified knowledge about the influence of humidity on the transistor behaviour.

## **Key words**

Organic electrochemical transistor, OEET, OTFT, PEDOT:PSS, electrolyte, ionic liquid, measurement, organic electronics, printed electronics.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 17.6.2020

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Silvanu Pretlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TIŠTĚNÁ A ORGANICKÁ ELEKTRONIKA</b> .....	<b>13</b>
1.1 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA.....	13
1.2 TISKOVÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE.....	14
1.2.1 Kontaktní technologie.....	15
1.2.2 Bezkontaktní technologie.....	18
1.3 ORGANICKÁ ELEKTRONIKA.....	22
1.3.1 Popis vodivostních mechanismů v organické elektronice.....	22
<b>2 ELEKTROCHEMICKÝ TRANZISTOR</b> .....	<b>27</b>
2.1 TRANZISTORY NA BÁZI ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ.....	27
2.1.1 OFET.....	27
2.1.2 EGOFET.....	30
2.2 OECT.....	32
2.2.1 Princip funkce OECT.....	33
2.3 TOPOLOGIE.....	37
2.3.1 Laterální topologie.....	37
2.3.2 Vertikální topologie.....	38
2.4 MATERIÁLOVÉ KONFIGURACE.....	39
2.4.1 Kanál.....	39
2.4.2 Kontakty.....	42
2.4.3 Elektrolyt.....	43
2.4.4 Aplikace OECT.....	44
<b>3 PŘEDPOKLADY PRO CHARAKTERIZACI OECT</b> .....	<b>45</b>
3.1 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	45
3.2 POŽADOVANÁ MĚŘENÍ.....	45
3.2.1 Převodní charakteristika.....	46
3.2.2 Výstupní charakteristika.....	46
3.2.3 Svodový proud.....	46
3.2.4 Parazitní vlivy.....	47
<b>4 URČENÍ PARAMETRŮ OECT</b> .....	<b>49</b>
4.1 POHYBLIVOST NOSIČŮ.....	49
4.2 SPÍNACÍ POMĚR.....	50
4.3 PERMITIVITA.....	50
4.4 PODMÍNKY PROSTŘEDÍ.....	50
4.5 SOUHRN MĚŘÍCÍCH ÚDAJŮ.....	52
<b>5 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>53</b>
5.1 NÁVRH MĚŘÍCÍ METODIKY.....	53
5.1.1 Měření statických charakteristik.....	53
5.1.2 Měření dynamických charakteristik.....	54
5.2 MĚŘÍCÍ INSTRUMENTACE.....	55
5.3 VZORKY OECT.....	56
5.4 PLÁN EXPERIMENTŮ.....	57
5.4.1 Ověření vlivu RH na interakci kanál-elektrolyt.....	58
5.4.2 Ověření vlivu RH na sadu tranzistorových parametrů.....	59
5.5 PRVNÍ FÁZE MĚŘENÍ.....	60



5.6	DRUHÁ FÁZE MĚŘENÍ .....	61
5.6.1	Měření statických charakteristik.....	61
5.6.2	Měření dynamických charakteristik.....	64
<b>6</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>67</b>
6.1	DYNAMICKÁ MĚŘENÍ.....	67
6.2	STATICÁ MĚŘENÍ.....	71
6.2.1	Výstupní charakteristiky .....	71
6.2.2	Převodní charakteristiky.....	72
6.3	NÁVRH NA ZLEPŠENÍ MĚŘÍCÍ METODIKY .....	74
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>77</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Úvod

V současném světě moderní elektrotechniky lze sledovat snahu o neustálý vývoj nových materiálů a jejich modifikaci. Kromě běžně používaných anorganických materiálů, se lze setkat i s organickými materiály. Pod pojmem „organické materiály“ si bylo možné do nedávna představit zejména hojně využívané izolanty (elektricky nevodivé polymery). Výzkum organických materiálů byl započat v roce 1967 a po objevu zvýšené vodivosti dopovaného polyacetyleny (PAC) se ještě více rozvinul [1]. V roce 2000 byla autorům, kteří objevili dopování PAC, udělena Nobelova cena za objev dopování polymerů [2]. V současnosti lze polymerní materiály syntetizovat a měnit tak jejich vodivosti v širokém rozsahu od izolantů až po vodiče. Tyto materiály mají také nespornou výhodu v podobě snadné rozpustnosti v běžných rozpouštědlech, což umožňuje užití mnoha depozičních metod. Zároveň je možné aplikovat tyto depoziční metody na flexibilní substráty jako papír či PET (Polyethylentereftalát) folie, a to umožňuje poměrně nízkonákladovou výrobu tištěných součástek či obvodů.

Jedním z odvětví vývoje organické elektroniky jsou i organické elektrochemické tranzistory (OECT). Hlavním důvodem jejich zkoumání je jejich možná aplikace v oblasti chemického či biologického snímání. S využitím tiskových metod a materiálových konfigurací lze pomocí OECT vytvářet levné jednorázové senzory. Chemické či elektrické vlastnosti OECT mohou být pomocí různých příměsí modifikovány (chemické dopování), aby senzory splňovali požadované vlastnosti např. citlivosti či selektivity. Signál ze sensorů je taktéž možno přímo zesílit na senzoru pomocí OECT, což představuje obrovskou výhodu.

Cílem této práce je shrnutí získaných informací o současném stavu OECT a nalezení vhodných měřicích metod pro testování jejich elektrických parametrů.

## Seznam symbolů a zkratk

$E_g$ (eV)	Šířka zakázaného pásu	
$g_m$ (S)	Transkonduktance	
$I_{DS}$ (A)	Proud procházející kanálem mezi elektrodami drain a source	
$I_{GS}$ (A)	Svodový proud procházející mezi elektrodami gate a source	
$RH$ (%)	Relativní vlhkost	
$t$ (s)	Čas	
$t_{OFF}$ (s)	Čas vypnutí tranzistoru	
$t_{ON}$ (s)	Čas zapnutí tranzistoru	
$V_{DS}$ (V)	Napětí mezi elektrodami drain a source	
$V_{GS}$ (V)	Napětí mezi elektrodami gate a source	
$V_{TH}$ (V)	Prahové napětí	
AJP	Aerosol jet printing	Bezkontaktní tisková technologie Aerosol Jet ®
CAD	Computer aided design	Počítačem podporované projektování
CIJ	Continual inkjet	Režim kontinuálního tisku u tiskové metody inkjet
DOD	Drop on demand	Režim řízeného dávkování inkoustu u metody inkjet
EEG	Electroencephalography	Elektroencefalogram
EGOFET	Electrolyte gated organic field effect transistor	Organický tranzistor řízený elektrickým polem s řídicí elektrodou oddělenou elektrolytem
EKG	Electrocardiography	Elektrokardiogram
FET	Field effect transistor	Tranzistor řízený polem
IL	Ionic liquid	Iontová kapalina
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor	Tranzistor řízený polem se strukturou kov-oxid-polovodič
OECT	Organic electrochemical transistor	Organický elektrochemický tranzistor
OFET	Organic field effect transistor	Organický tranzistor řízený polem
OTFT	Organic thin film transistor	Organický tenkovrstvý tranzistor
OLED	Organic light emitting diode	Organická elektroluminiscenční dioda

PA	Pneumatic atomizer	Pneumatický atomizér
PAC	Polyacetylen	Polyacetylen
PEDOT	Polyethylenedioxythiophene	Poly(3,4-ethylenedioxythiopen)
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate)	Poly(3,4-ethylenedioxythiopen)- poly(styrenesulfonát)
PEDOT:Tos	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): tosylate	Poly(3,4-ethylenedioxythiopen)- tosylát
PET	Poly(ethylene terephthalate)	Poly(ethylen tereftalát)
PPS	Poly(styrene sulfonate)	Poly(styrenesulfonát)
P3AT	Poly(3-alkylthiophene)	Poly(3-alkylthiopen)
P3HT	Poly(3-hexylthiophene)	Poly(3-hexylthiopen)
R2R	Roll – to – roll	Výroba na kontinuálně odvíjený substrát
SMU	Source measure unit	Zdroj s měřicí jednotkou
UA	Ultrasonic atomizer	Ultrazvukový atomizér
VI	Virtual impactor	-

# 1 Tištěná a organická elektronika

V této úvodní teoretické části práce bude nastíněn současný stav vývoje tištěné a organické elektroniky. Součástí bude stručný popis technologických možností z oblasti tištěné elektroniky. Budou popsány základní vodivostní mechanismy a možnosti využití funkčních materiálů organické elektroniky. Následující informace budou vycházet primárně z následujících zdrojů [3, 4].

Organická a tištěná elektronika jsou v současnosti předmětem zkoumání mnoha vědeckých týmů po celém světě a jejich nasazení lze již pozorovat v hromadné průmyslové výrobě. Každým rokem vznikají stovky vědeckých publikací na toto téma. V reálném nasazení se lze setkat s všudypřítomnými organickými světelnými diodami (např. OLED světlo emitující diody), dále je možné se setkat s tištěnými organickými fotovoltaickými panely či jednoduchými tištěnými paměťmi. I přes to má však tištěná elektronika mnohem větší potenciál jak ovlivnit životy milionů lidí.

## 1.1 Tištěná elektronika

Obecně lze říci, že tištěná elektronika je nový přístup k realizaci elektronických obvodů s cílem překonat některé nedostatky konvenční elektroniky a nabídnout nová řešení, která by klasickou elektronikou šla těžko realizovat (např. flexibilní nositelná elektronika). Vývoj tištěné elektroniky je pevně spjatý s vývojem organické a flexibilní elektroniky, a stejně tak s materiálovým vývojem v těchto oblastech [5–7].

Tištěná elektronika využívá zejména aditivní výrobní technologie, kterými lze vytvářet vodivá propojení, pasivní součástky či složitější elektronické součástky (tranzistory). Součástky jsou poměrně jednoduše tvořeny tiskem vrstev různých materiálů se specifickými funkčními vlastnostmi. Dnešní technologie umožňují nejen celoplošný tisk, ale i selektivní tisk pro vytváření specifických motivů [5–7].

## 1.2 Tiskové výrobní technologie

Výrobní technologie jsou základním kamenem sloužícím k výrobě elektronických obvodů a součástek. Pro výrobu jak tištěné, tak i organické elektroniky je třeba mít k dispozici některou z tiskových metod. Řada těchto metod má svůj původ v oblasti grafického tisku (např. ofsetový, flexotisk či hlubotisk) [8]. Výběr tiskové technologie je závislý především na materiálových vlastnostech použitého funkčního materiálu a požadavky na tištěné vrstvy (motivy). Výčet všech možných tiskových technologií by zcela přesáhl rámec této práce. Ucelený přehled nepoužívanějších tiskových technologií lze nalézt v těchto publikacích [3, 4, 7–9]. Podle [10] jsou pro průmyslové podmínky poměrně nejsnadněji uchopitelné technologie sítotisku a hlubotisku, které lze z testovacího provozu relativně snadno převést do hromadné průmyslové výroby. V následující podkapitole tedy bude těmto technologiím věnován stručný popis. Při vývoji tištěné či organické elektroniky je někdy důležité mít k dispozici i platformu pro snadné a rychlé vytváření tištěných motivů. Proto zde bude zmínka i o digitálních metodách tisku inkjet a aerosol jet. Pro úvodní ucelenou představu o základních tiskových parametrech těchto technologií je připravena následující tabulka Tab. 1.

Tab. 1: Souhrn základních parametrů vybraných tiskových metod (převzato z [7]).

Metoda	sítotisk	hlubotisk	inkjet	aerosol jet
rozišení tisku [ $\mu\text{m}$ ]	40 - 100	20 - 40	20 - 100	10 - 50
tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	10	1	<1	1
rychlost tisku [m/s]	0.1 - 0.5	0.5 - 15	$10^{-2}$ - 10	$10^{-3}$ - $10^{-2}$
rozsah viskozit [mPa·s]	$3 \times 10^3$ - $2 \times 10^4$	50 - 200	<1 - 50	<1 - $2 \times 10^3$

Obecně je možné tiskové výrobní technologie rozdělit na kontaktní a bezkontaktní technologie. V následujících podkapitolách budou shrnuty základní tiskové technologie a porovnání jejich parametrů. Popis těchto technologií bude vycházet z následujících zdrojů [4, 6–9].

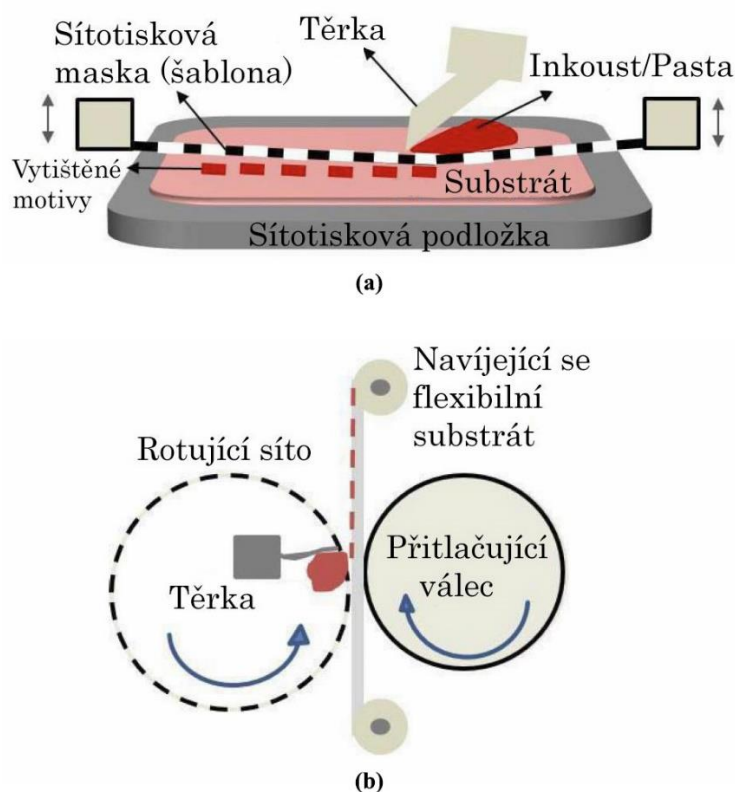
### 1.2.1 Kontaktní technologie

U těchto technologií je tisková forma (např. síto, válec, atd.) v přímém kontaktu se substrátem, tím hrozí rizika kontaminace pasty nebo poškození substrátu. Mezi tyto technologie tisku lze zařadit: sítotisk, šablonový tisk, ofsetový tisk, hlubotisk, flexotisk apod. Charakteristickými vlastnostmi těchto technologií jsou vysoká výrobní rychlost a malé náklady. Lze je totiž implementovat jako R2R (Roll-to-roll) výrobní procesy vyhovující požadavkům pro masovou výrobu [11]. Pod pojmem R2R je možné si představit komplexní výrobní linky využívající kombinaci průběžného tisku jednotlivých funkčních vrstev spolu se všemi nezbytnými procesy (např. čištění povrchu, vytvrzování, sušení vrstev, laserová diferenciací, fotolitografie atd.). V podstatě je možné si tento koncept představit jako kontinuální průchod polymerního substrátu skrze výrobní proces (jednu výrobní linku), bez nutnosti používat další výrobní linky nebo technologie. Polymerní fólie je na začátku procesu postupně odvíjena a po vytvoření elektronických součástí opětovně navíjena na konci výrobní linky.

#### Sítotisk

Sítotisk je jednou z velice vyspělých a dnes zřejmě i nejpoužívanějších depozičních technologií, která se v elektrotechnickém průmyslu po mnoho let používá zejména k tisku vodivých propojení na deskách plošných spojů. Princip této metody je založen na protlačování pasty skrz oka v šabloně (motivu) vytvořeném na napnuté síťovině (nejčastěji polyesterová či ocelová vlákna) jak ilustruje Obr. 1. Tuto tiskovou metodu lze v porovnání s ostatními metodami charakterizovat jako poměrně rychlou a všestrannou. Tisknout lze rovněž materiály v poměrně širokém rozmezí viskozit. Má však i svoje nevýhody v podobě nemožnosti snadné změny tiskového motivu. Na změnu motivu je totiž potřeba nové síto s nově vytvořeným motivem. Další nevýhodou je například i nemožnost tisku na 3D či jinak zakřivené substráty (jen velice obtížně). Obecně lze říci, že tato metoda umožňuje poměrně jednoduchý, rychlý a dostupný výrobní proces, pomocí něhož se lze snadno přizpůsobit požadavkům výroby (např. i velkoformátový tisk). Sítotiskový proces se pak skládá z opakovaných výrobních kroků, které lze snadno optimalizovat pro optimální výrobní smyčku. V současnosti existují dva možné způsoby sítotisku, a to rotační R2R sítotisk a konvenční sítotisk.

Rotační sítotisk je na rozdíl od konvenčního sítotisku (síto s motivem) mnohem vhodnější pro sériovou velkoobjemovou výrobu. Místo síta s motivem a třerkou je zde používán rotačním válec (rotační síto) s připraveným motivem, uvnitř kterého je pomocí třerky protlačovaná pasta skrze otvory viz Obr. 1. Tato metoda je kontinuální a na rozdíl od konvenčního sítotisku lze u ní dosáhnout mnohem vyšších výrobních rychlostí. U této metody se však lze setkat i s nevýhodami v podobě poměrně nákladné a náročné údržby pro čištění válce.



Obr. 1: (a) Ukázka principu konvenčního sítotisku (protlačování funkčního materiálu pomocí třerky skrze oka síťoviny s připraveným tiskovým motivem. (b) Ukázka principu rotačního sítotisku (protlačování funkčního materiálu skrz otvory rotujícího síta na kontinuálně odvíjený substrát), (převzato a upraveno z [4]).

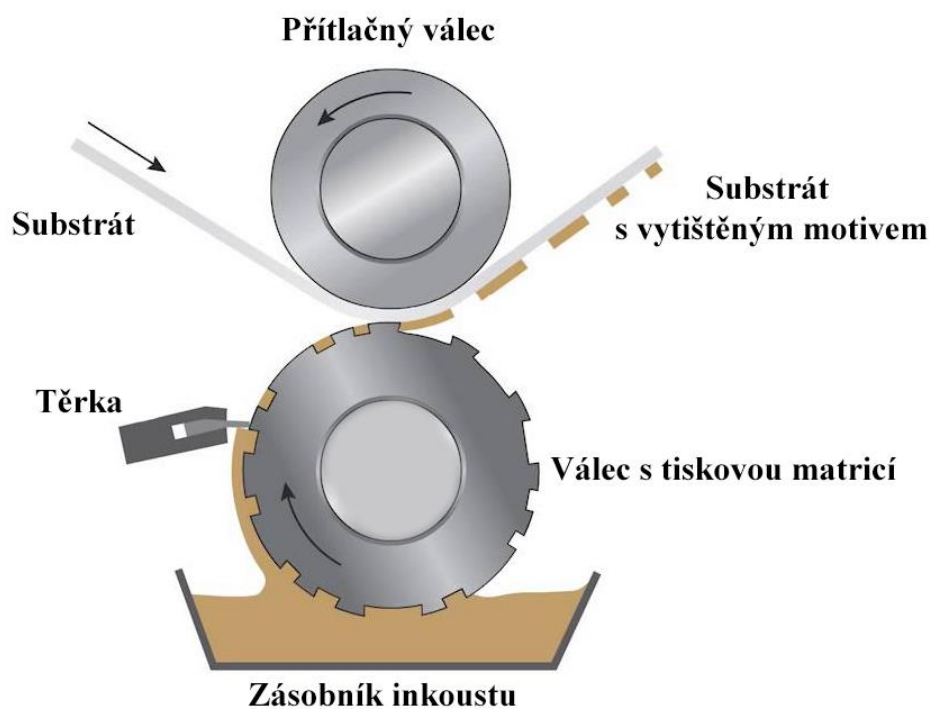
## Hlubotisk

Tisk z hloubky neboli hlubotisk je tisková technologie, která má své využití zejména v oblasti grafického tisku. Vyznačuje se tiskovým procesem s vysokou kvalitou tisku za rozumné náklady (R2R uspořádání). Princip této metody je založen na přenosu funkčního materiálu z tiskové matrice, na níž je pod rovinou tisku vytvořen tiskový motiv (zhloubené buňky), vyobrazeno na Obr. 2. Tiskové prvky na tiskové formě jsou tedy pod úrovní míst



netisknoucích. Individuálně zahloubené buňky v tiskové matici významně ovlivňují možný objem tisknutého materiálu (různé tvary či zahloubení buněk). Lze se setkat nejen s rotační, ale i plochou formou hlubotisku. Pro velkoobjemový tisk v sériové výrobě vyhovuje nejvíce rotační forma. Při rotačním způsobu se využívá hlubotiskový válec, který může mít vyhloubeny tiskové buňky následujícími procesy: elektromechanické gravírování, leptání přes fotorezist, laserové gravírování.

Proces samotného tisku nejprve začíná ovrstvením tiskového válce inkoustem, jak je možné vidět na Obr. 2. Válec rotuje a nabírá na svůj povrch inkoust ze zásobníku. Zároveň je otírán třerkou, to zabezpečuje přenos inkoustu pouze do vyhloubených míst na tiskové formě. Následně je pomocí tlaku válců funkční materiál přímo přenášen z vyhloubených míst na substrát. U hlubotisku se lze setkat s určitou nevýhodou v podobě rozsahu použitelných viskozit funkčních materiálů, protože pro tuto metodu jsou vhodnější spíše nižší hodnoty viskozit (jinak se musí ředit rozpouštědly). O této metodě je možné rovněž říci, že tiskové válce mají velice dobrou životnost (řádově  $10^6$  rotací). V oblasti tištěné elektroniky se tato metoda využívá zejména při výrobě organických flexibilních LED či fotovoltaických zařízeních [4].



Obr. 2: Ukázka principu hlubotisku (převzato a upraveno z [12]).

## 1.2.2 Bezkontaktní technologie

Jak již název napovídá, u těchto technologií nedochází k přímému kontaktu tiskových forem a substrátu. Namísto toho je funkční materiál nepřímo „dopravován“ na substrát (např. z trysky „proudí“ částičky aerosolu obsahující funkční materiál, viz aerosol jet). Mezi tyto technologie lze zařadit inkjet, aerosol jet či elektrografii. Nedochází zde k rizikům popsaným u kontaktních technologií (kontaminace pasty, poškození substrátu). Navíc jsou tyto technologie vhodné pro tisk na citlivé či nepravidelně zakřivené substráty.

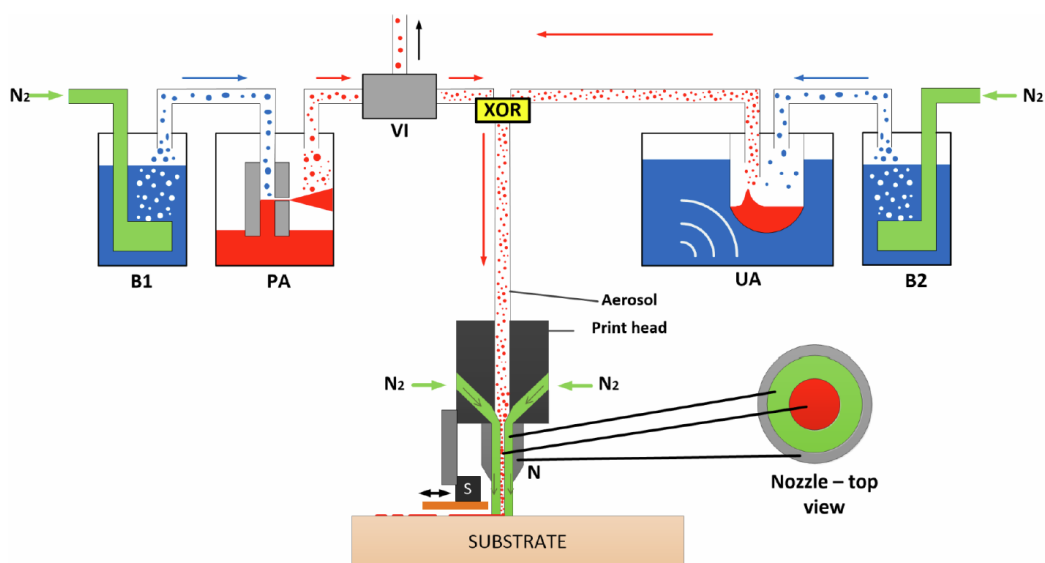
### Aerosol Jet

Technologie Aerosol Jet Printing<sup>®</sup> (AJP) je bezkontaktní tisková metoda, kterou dnes komerčně vyrábí společnost OPTOMECH. Tato technologie se vyznačuje zejména plně aditivním způsobem tisku s vysokým rozlišením a možným využitím široké škály materiálů s velice rozdílnou viskozitou. Jedná se o digitální metodu tisku, což znamená návrh tiskového motivu pomocí známých CAD (Computer Aided Design) systémů. To s sebou přináší uživatelsky přívětivou metodu vhodnou spíše pro maloobjemový tisk a zejména pro rychlé prototypování. Z pohledu návrhu motivu pomocí CAD systémů lze nalézt určitou analogii k dnešním 3D tiskárnám rovněž využívaným pro potřeby vytváření prototypů. Metoda je tedy vhodná pro postupnou optimalizaci zařízení ještě před nasazením do velkoobjemové výroby. Pro jiné potřeby jsou tato zařízení příliš nákladná a nedosahují takových rychlostí tisku jako konkurenční metody. Se zařízením aerosol jet printing se je možné setkat v oblasti pro výzkum tištěné elektroniky, organické elektroniky, smart textilií apod. V praxi se toto zařízení používá například pro výrobu tištěných antén v mobilních telefonech [13].

Princip systému aerosol jet je založen na selektivní depozici funkčního materiálu ve formě aerosolu. Celý systém se skládá z několika klíčových součástí (viz Obr. 3). Samotný aerosol je vytvářen v zařízení nazývaném atomizér (Pneumatic atomizer (PA), Ultrasonic atomizer (UA) viz Obr. 3. V tomto zařízení jsou tedy kapalné inkousty přeměňovány na aerosol. V AJP se nachází dva druhy atomizérů. Zaprvé tzv. pneumatický atomizér (PA), který slouží k depozici širších či tlustších linií (vrstev). Ten je vhodný pro inkousty o viskozitě  $1 \div 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , což představuje poměrně široký rozsah možných inkoustů. Zadruhé obsahuje tzv. ultrazvukový atomizér (UA), který slouží naopak k depozici užších

či tenčích linií (vrstev). Tento atomizér je vhodný pro inkousty o viskozitě  $1 \div 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Výhoda tohoto atomizéru spočívá v minimálním množství použitelného inkoustu 1ml (např. pro nákladné a vzácné materiály). V obou popsaných atomizérech je inkoust nasáván pomocí Venturiho efektu.

Dále AJP obsahuje zařízení nazývané jako bubbler (B1, B2), které slouží k zlepšení procesu atomizace. Přes bubblery dochází k „probublávání“ dusíku, a tím dochází k přidávání rozpouštědel (alkohol, aceton, voda apod.) do inkoustu. Před depoziční hlavou lze nalézt tzv. virtual impactor (VI), který zlepšuje homogenitu aerosolu z atomizéru. V podstatě odstraní z aerosolu přebytečný plyn a větší kapky inkoustu, čímž je pak aerosol za VI hustější a homogennější. Upravený aerosol již poté putuje do depoziční hlavy, která pomocí dalšího proudu dusíku soustředí aerosol do velice tenkého paprsku. Pro potřeby tisku např. nespojitých motivů se zde nachází zařízení nazývané stavítko, které v případě potřeby zastavuje tok aerosolu na substrát (odsává aerosol do odpadní nádoby).



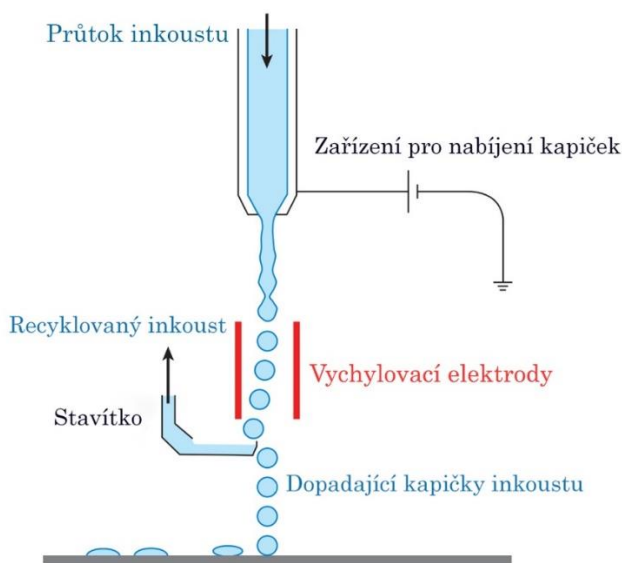
Obr. 3: Schéma systému Aerosol Jet Printing (převzato a upraveno z [14]).

## Inkjet

Tisková technologie inkjet je přímá tisková metoda využívající bezkontaktního nanášení inkoustu z tiskové hlavy přímo na substrát. Ze všech uváděných metod má tato technologie možnost nejrychlejšího tisku. V porovnání s AJP má jen o něco menší rozlišení ( $20 \div 100 \mu\text{m}$ ). Avšak vyznačuje se relativně malým rozsahem tisknutelných viskozit

v rozmezí  $1 \div 50$  mPa·s. Také lze říci, že u této technologie je inkoust v přímém kontaktu s tryskou a hrozí zde větší riziko ucpání trysky. Z pohledu řízení nanášení inkoustu (dávkování) má tato technologie dva možné způsoby nanášení inkoustu.

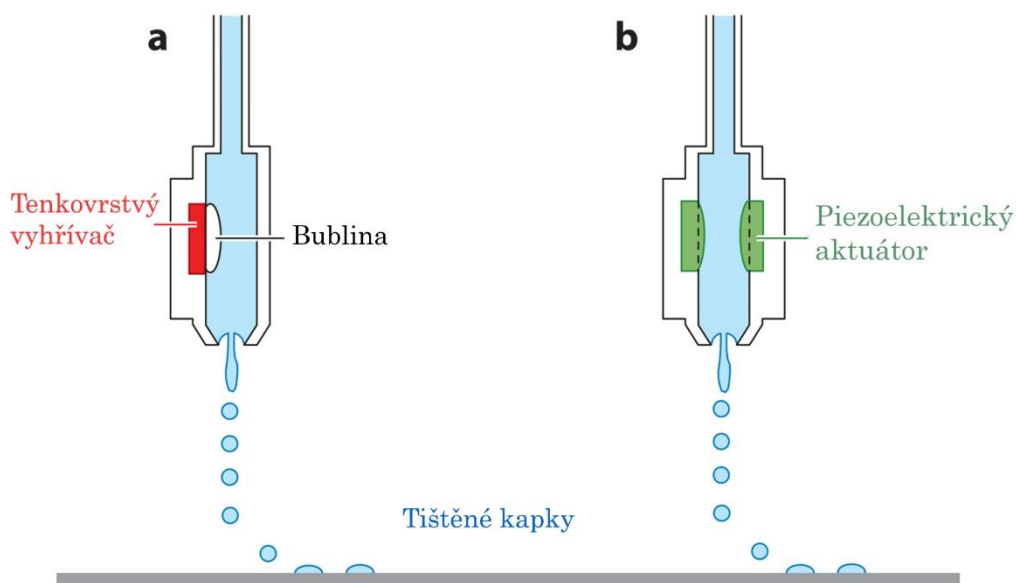
Prvním způsobem je tzv. kontinuální inkoustový tisk CIJ (Continual Inkjet). CIJ je vhodný spíše pro méně náročné aplikace, kde se příliš nevyskytují jemné motivy, neboť je limitován tiskem linií o šířce přibližně  $100 \mu\text{m}$  [7]. Princip tohoto způsobu tedy spočívá v nepřetržitém tisku inkoustu (viz Obr. 4). V tiskové hlavě jsou kapičky inkoustu nabity na nenulový potenciál a na konci tiskové hlavy (za tryskou) se nachází obvykle pár vychylovacích destiček, které pomocí elektrostatického principu směřují nabité kapičky inkoustu na požadovaná místa na substrátu. Kapky inkoustu jsou směřovány na substrát poměrně vysokými rychlostmi ( $10 \text{ m/s}$ ), což dělá z CIJ jednu z nejrychlejších tiskových technologií. Nevýhodou je pak nemožnost zastavit rychle proudící inkoust v případě, kdy chceme tisknout nespojité motivy. CIJ má však podobně jako AJP stavítko, které odsává odpadní materiál, který lze ve většině případů recyklovat a omezit tak finanční ztráty.



Obr. 4: Ukázka systému inkjet využívající způsob tisku CIJ (převzato a upraveno z [15]).

Druhým způsobem tisku je tzv. Drop on Demand (DOD). Na rozdíl od CIJ je zde inkoust nanášen na substrát pouze je-li to potřeba. V porovnání s CIJ je tedy ekonomičtější. Metoda DOD je vhodnější pro tisk jemných motivů, kde se šířka čar pohybuje přibližně v rozmezí  $20 \div 50 \mu\text{m}$ . V tiskové hlavě se nachází aktuátor, pomocí něhož je řízeno množství dopadajících kapek na substrát. Kapičky inkoustu jsou obvykle generovány v akustických frekvencích ( $1 \div 20 \text{ kHz}$ ). Obvykle se pro tyto účely používají tepelné či piezoelektrické

aktuátory (viz Obr. 5). Tepelný aktuátor má uvnitř trysky umístěn tenkovrstvý vyhřívač. Vyhřívač ohřívá kapalinu v jeho blízkosti na teplotu varu, což má za následek vytvoření malé kapsičky výparů (bublina). Náhlé vypínání a zapínání vyhřívače vede k vytváření požadovaného tlaku, neboť bubliny jsou neustále vytvářeny a hrouceny. V případě piezoelektrického aktuátoru jsou pomocí řídicího signálu mechanicky dávkovány kapičky inkoustu na základě piezoelektrického jevu. V obou popsaných způsobech dopadají všechny kapky na potřebné místo na substrátu balistickou trajektorií.



Obr. 5: Ukázka systému inkjet využívající způsob tisku DOD. (a) Tepelný aktuátor. (b) Piezoelektrický aktuátor. (Převzato a upraveno z [15]).

## 1.3 Organická elektronika

Molekuly organických polovodivých sloučenin jsou klíčem k technologiím budoucnosti. Klasické anorganické polovodiče spoléhají na jejich specifické vlastnosti dané přírodními prvky a jejich prostorovým uspořádáním, např. krystalická forma. Zatímco organické polovodiče spoléhají na jejich modifikaci, díky které lze chemicky vytvářet nové typy polovodičů, např. s určitým zbarvením či určitými absorpčními vlastnostmi [3, 10]. To otevírá celou řadu možností jak tyto materiály využít. Elektrická vodivost a modulace transportu náboje u tenkovrstvých transistorů umožnila vytvoření elektronických obvodů analogové a číslicové elektroniky. Díky možné absorpci světla a jeho převodu na elektrický náboj, je taktéž možné vytvářet organickou fotovoltaiku nebo fotodiody schopné detekovat objekty či obrazy. Displeje nebo obecně světelné zdroje mohou na druhou stranu využívat emisi světla.

Organické molekuly mohou být ve formě funkčních inkoustů, díky čemuž je lze posléze nasadit do již známých velkoformátových tiskových metod a technik. Tiskové techniky představují již rozvinutou oblast (stovky let používání), která se nejdříve začala rozvíjet v grafickém tisku a posléze i při výrobě elektroniky [4, 8]. Dnes je možné ve výrobě nasadit i digitální technologie tisku jako například inkjet a vytvářet tak snadno na zakázku navrženou elektroniku v masovém měřítku [8]. Největší přidanou hodnotu pak tvoří možnost vytvářet lehkou a flexibilní elektroniku jako alternativu ke stávající elektronice či vytváření zcela nových produktů.

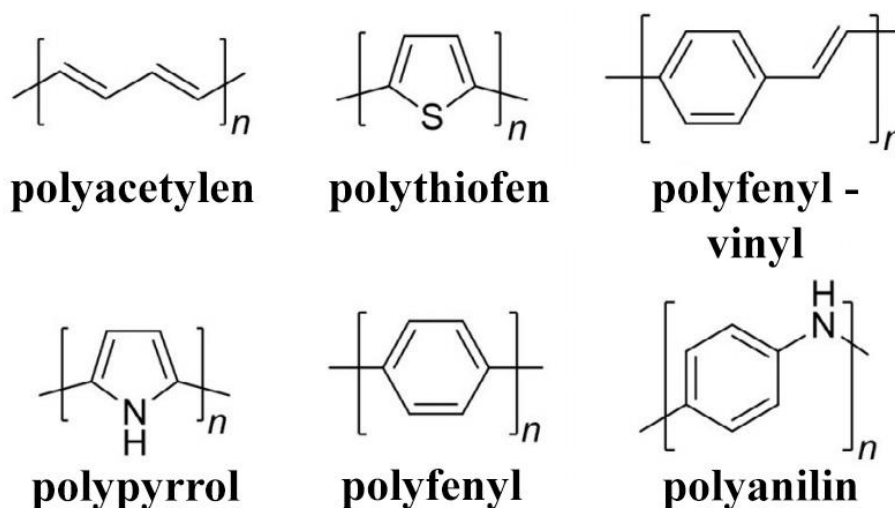
Informace obsažené v následujících podkapitolách budou primárně vycházet z těchto zdrojů ref [3, 16–19].

### 1.3.1 Popis vodivostních mechanismů v organické elektronice

U organických materiálů lze v poslední době pozorovat určitý trend v jejich využívání, neboť se díky svým jedinečným vlastnostem dají velmi dobře využít při výrobě tištěné či organické elektroniky [6]. Tyto materiály mohou být využity ve formě elektricky izolujících plastů (polymery), avšak dnes se v oblasti tištěné (organické) elektroniky využívají jako funkční materiály ve formě vodivých, polovodivých či odporových materiálů. Za objev

vlastní vodivosti polymerů (konjugované polymery) lze vděčit vědeckému zkoumání (přibližně od 70. let minulého století až do současnosti) [2].

Dlouho dobu bylo tedy možné si pod polymery představit spíše elektricky nevodivé izolanty (plasty). Dle [16] jsou někdy konjugované polymery charakterizovány též jako „syntetické kovy“, neboť vykazují některé kovům podobné charakteristiky. Obecně je možné organické materiály dělit na nízkomolekulární, oligomery a polymery [18]. Příkladem zástupců konjugovaných polymerů mohou být polyacetylen, polypyrrol, polythiofen viz Obr. 6 [18]. Vodivostní rozsah polymerů v jejich jinak nedopované formě lze přibližně charakterizovat rozsahem  $10^{-7} \div 10^{-11} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  [16, 18]. U dopovaných, chemicky či tepelně upravených polymerů se jejich vodivost může dostat až do hodnot  $10^3 \text{ cm}^{-1}$  [16, 18]. Proto jsou tyto materiály často zařazovány spíše do kategorie polovodičů.

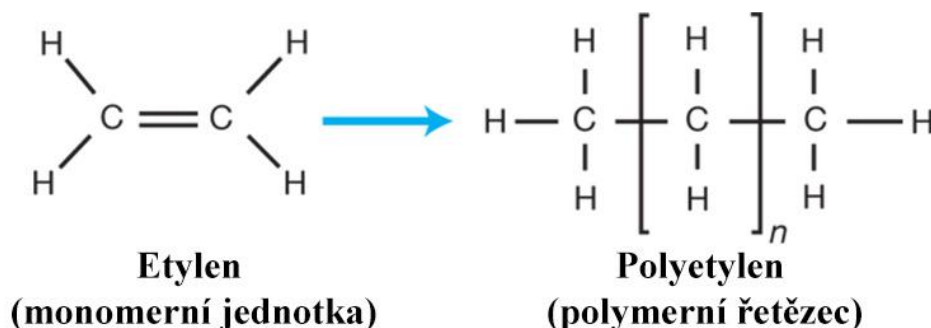


Obr. 6: Příklady zástupců konjugovaných polymerů.

### Konjugované polymery

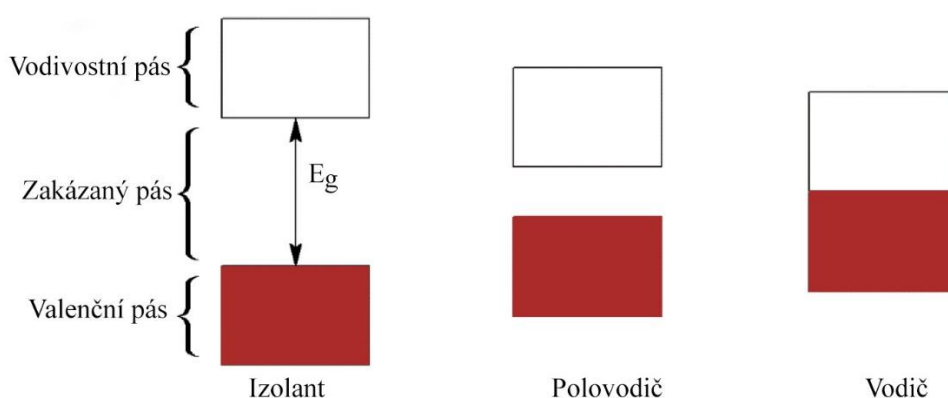
Pod polymery si lze tedy nejčastěji představit plasty, což jsou materiály obsahující objemné molekuly uspořádané do menších strukturních uspořádání tzv. monomerů, které jsou pomocí kovalentní vazby spojeny dohromady do určitých vzorů. Pod tím vším je možné si představit např. polyetylen, který má všechny čtyři valenční elektrony uhlíku uspořádané do kovalentních  $\sigma$ -vazeb. Nezbyvá zde tedy žádný volný elektron, který by se mohl účastnit

přenosu náboje, viz Obr. 7. Modifikací uspořádání těchto monomerních bloků je možné měnit např. mechanické či tepelné vlastnosti těchto polymerů. V praxi si lze tedy představit např. kontrast mezi ohebným či křehkým plastem [3].



Obr. 7: Etylen ve formě monomeru a polymerního řetězce (převzato a upraveno z [20]).

Z pásového modelu vodivosti látek je možné uvést, že elektricky nevodivé materiály (izolanty) mají nejnižší energetickou hladinu vodivostního pásu a nejvyšší energetickou hladinu valenčního pásu oddělenou tzv. zakázaným pásem, který se vyznačuje energií  $E_g$  (eV). Takto lze charakterizovat, zda je daný materiál vodivý, polovodivý či izolant, viz Obr. 8. Materiály používané jako elektrické izolanty mají tento pás velice široký, u saturovaných polymerů převyšuje šířka zakázaného pásu až 8 eV (izolanty již od  $E_g > 3$  eV). V případě dobrých vodičů (měď, stříbro, zlato) se valenční a vodivostní pásy navzájem překrývají a zakázaný pás se obecně u vodičů vůbec nevyskytuje [16, 21].



Obr. 8: Pásový model vodivosti.

Tato podkapitola však bude zaměřena na elektricky vodivé polymery (konjugované polymery), které jsou uspořádány tak, že se u nich pravidelně střídají jednoduché a dvojně vazby (konjugace) podél řetězce molekuly, viz Obr. 6. Pravidelné střídání těchto vazeb může



vykazovat vysokou elektrickou vodivost srovnatelnou s některými kovovými vodiči. V porovnání s výše uvedeným polyetylenem se pouze tři ze čtyř valenční elektronů podílejí na  $\sigma$ -vazbách a zbývající čtvrtý elektron vytváří  $\pi$ -vazbu. Přenos náboje je potom zajištěn překryvem  $\pi$ -orbitalů podél polymerního řetězce [16]. Přesto jsou však polymery v základním čistém stavu spíše izolanty či polovodiče (malá koncentrace nosičů náboje) [19, 22]. V praxi použitelné vodiče z nich vznikají až dopováním chemickými sloučeninami. Ty pak polymernímu materiálu přidávají nebo naopak odebírají elektrony [19, 23]. Pod dopováním je možno si analogicky představit dopování u konvenčně využívaných anorganických polovodičů (křemík, germanium apod.) [17, 21]. U anorganických vodičů se k dopování používá stopové množství látek, kdežto u organických látek jsou k dopování používány mnohem větší koncentrace dopantů pohybující se v řádech jednotek až desítek procent [3, 24].

### Dopování

Stručný popis z oblasti dopování organických vodivých materiálů bude vycházet z následujících zdrojů [6, 18, 19, 22, 23]. V praxi probíhá dopování elektrochemickými, chemickými (případně iontovými) procesy. Jako dopující sloučeniny lze uvést např. alkalické kovy či halogeny.

U chemického dopování je oxidační dopování typu p (tj. přidání elektronu) a redukční dopování typu n (tj. odebrání elektronu). V případě elektrochemického dopování dochází k rozdílu potenciálů mezi pracovní a referenční elektrodou, které jsou spolu v polymerem umístěny v elektrolytu, ve které je polymer nerozpustný. Elektrolyt si lze v okolí dopovaného polymeru představit jako zdroj iontů, které pronikají do struktury dopovaného polymeru a kompenzují elektrický náboj [16, 17]. Elektroda pracuje jako zdroj redoxních nábojů do polymerního materiálu. Během dopování musí být zachována určitá elektrochemická rovnováha (kompenzace elektrického náboje) [16, 17]. Důležité je si uvědomit, že polymerní materiál vede zároveň jak elektrony, tak i ionty. Rozdílem potenciálu mezi elektrodami pak dochází ke dvěma možným efektům. Vstup nábojů a odpovídajících iontů do polymeru ve formě přidávání elektronu (n-dopování) či odebrání elektronů (p-dopování).

Fyzický transport iontů sebou však nese i negativa v podobě pomalých dynamických vlastností v praktických aplikacích. Je třeba si uvědomit, že veškeré elektrochemické změny uvnitř dopovaného polymerního materiálu (změna elektrické vodivosti) jsou základem všech součástí pracujících na tomto principu (např. OECT či elektrochemické senzory).

Jak již bylo uvedeno dříve, pro vznik vodivého polymerního materiálu (konjugovaného polymeru) je nutná přítomnost volného nosiče náboje, který se může volně pohybovat po polymerním řetězci (volný elektron (n) či volná díra (p)). Pravidelné střídání jednoduchých a dvojných vazeb pak umožňuje delokalizování elektronů v tomto řetězci. Rychlost pohybu nosičů po řetězci je pak ovlivněna množstvím přidávaných dopantů (klesá s šířkou zakázaného pásu). Proces dopování je reversibilní proces a při přijetí dopantu do polymerního řetězce mohou vzniknout jisté efekty. Například tím, že může proběhnout redoxní a následně oxidační reakce či naopak (redox reakce), pak mohou vznikat jisté defekty jako např. polarony a bipolarony [16].

V praxi se lze nejčastěji setkat s konjugovanými dopovanými polymery typu p, a to pro jejich větší chemickou stabilitu (v prostředí atmosféry) [17]. Příkladem nejčastěji používaného materiálu může být materiál PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene :poly(styrenesulfonate)), který bude zmíněn a stručně popsán v následující kapitole.

## 2 Elektrochemický tranzistor

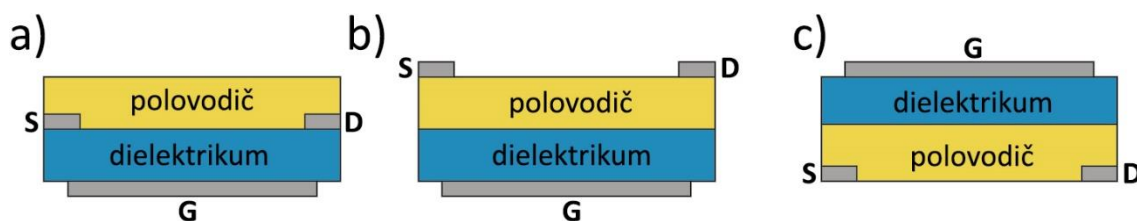
Tato kapitola bude zaměřena na obecný popis elektrochemického tranzistoru (OECT – „Organic Electrochemical Transistor“). Historie tohoto tranzistoru sahá do 80. let minulého století, kdy byly v laboratorních podmínkách zjištěny principy elektrochemického spínacího efektu [25, 26]. Obecně je možné říci, že organické tranzistory jsou děleny na dvě hlavní skupiny podle způsobu, jakým jsou odděleny elektrody od polovodičového kanálu. Nadskupina těchto tranzistorů se nazývá organické tenkovrstvé tranzistory (OTFT – „Organic Field Effect Transistor“). První skupinou jsou organické polem řízené tranzistory (OFET – „Organic Field Effect Transistor“) a druhou organické polem řízení tranzistory s elektrolytickým gatem (EGOFET- „Electrolyte Gated Field Effect Transistor“). Zde následuje krátký výčet základních vlastností a principů těchto dvou podskupin.

Informace obsažené v následujících podkapitolách budou primárně vycházet z těchto zdrojů [3, 10, 16, 27]

### 2.1 Tranzistory na bázi organických materiálů

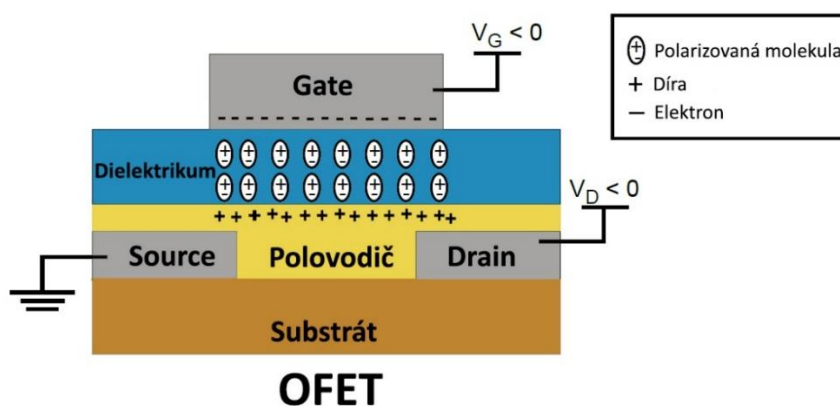
#### 2.1.1 OFET

Tranzistor OFET se principem svého fungování velice podobá „klasickému“ MOSFET tranzistoru. Jedná se o třípólovou součástku, kde jsou elektrody source a drain propojeny za pomoci polovodičového kanálu, zatímco od elektrody gate jsou obě tyto elektrody odděleny pomocí vrstvy dielektrika (velice tenká homogenní vrstva). Materiál tvořící polovodičový kanál určuje, zda se jedná o tranzistor typu n či p, čímž je určeno i to, zda pracuje v obohacovacím či ochuzovacím režimu. Vodivost či nevodivost tranzistoru bez přiloženého napětí na řídicí elektrodu je určena právě těmito režimy. Obr. 9 ilustruje nejběžnější druhy topologií, lišící se v pořadí funkčních vrstev.



Obr. 9: Tři nejpoužívanější geometrická uspořádání OFET (S - source, D - drain, G - gate): a) spodní gate - spodní kontakty (BG-BC), b) spodní gate - horní kontakty (BG - TC), c) horní gate - spodní kontakty (TG - BC), (převzato a překresleno z [28]).

Princip tohoto tranzistoru je založen na elektrostatickém působení na vodivost kanálu (kapacitní vazba) jak je možné vidět na Obr. 10 (polem řízený tranzistor typická struktura viz [29]). V situaci, kdy je elektroda gate negativně (pozitivně) polarizována a pracuje s kanálem typu p (typu n), jsou volné díry (elektrony) v polovodiči přitahovány k rozhraní polovodič-izolant, tak aby vykompenzovaly ekvivalentní negativní (pozitivní) náboj na rozhraní gate-izolant. Tento efekt má za následek vznik vodivého kanálu na rozhraní mezi elektrodou gate a izolující vrstvou [30].

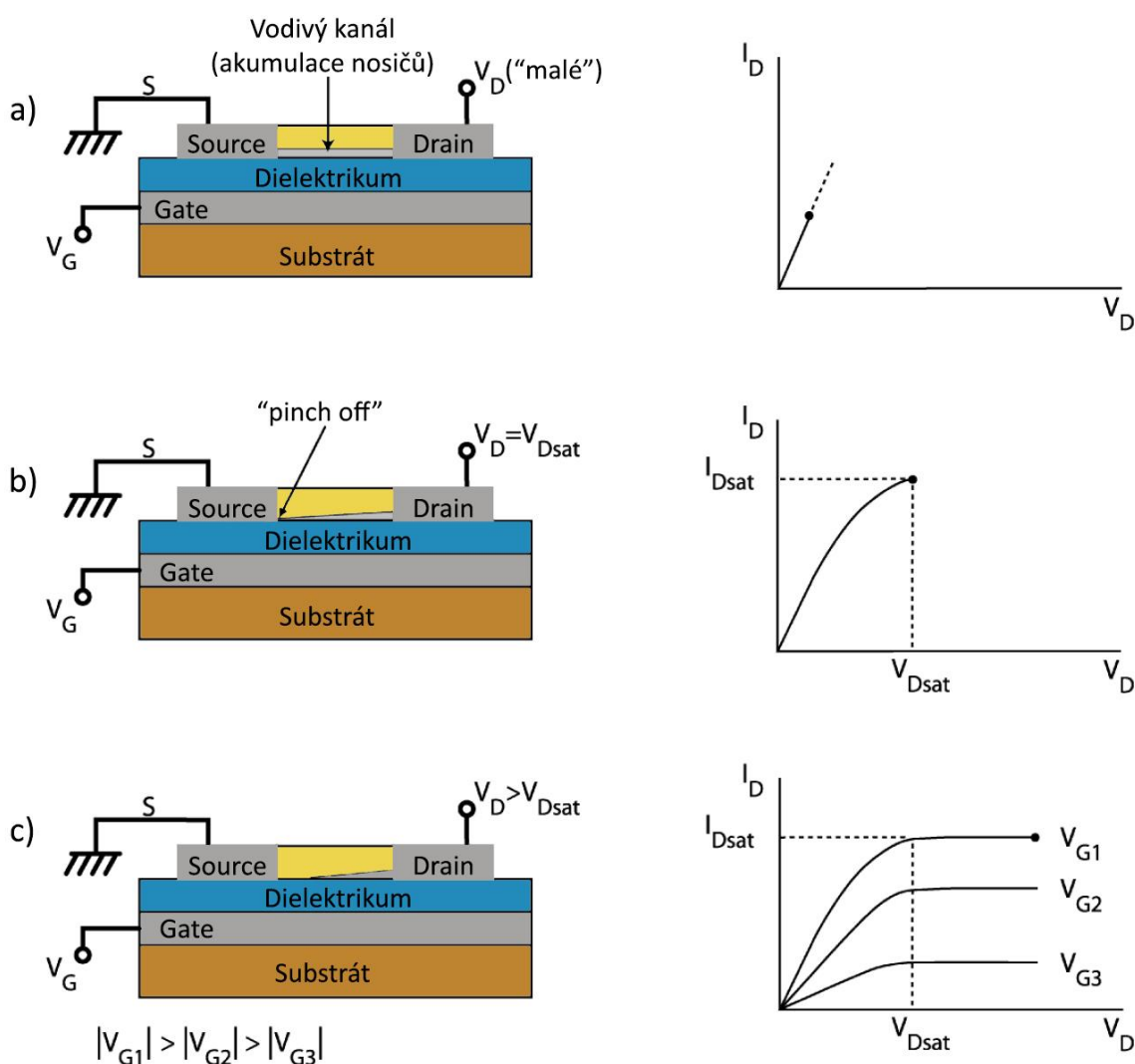


Obr. 10: Typická struktura polem řízeného tranzistoru OFET (převzato a překresleno z [29]).

Napětím přiloženým na řídicí elektrodě gate je řízena velikost proudu tekoucího v polovodivém kanálu mezi elektrodami source a drain (respektive dochází k akumulaci nosičů na rozhraní povrchu dielektrikum-polovodič [17]). Pokud tranzistor pracuje v obohacovacím režimu, dochází ke vzniku tenké vodivé vrstvy pod vrstvou dielektrika. Zároveň musí být připojeny na napětí i elektrody source a drain, aby mohl procházet proud.

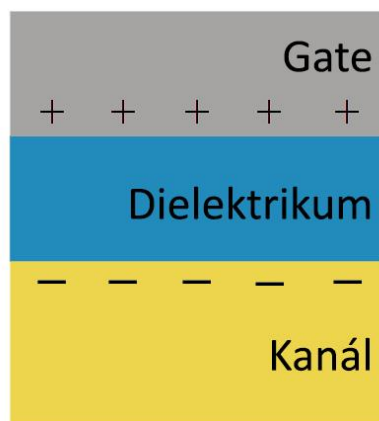
Podle [17, 30, 31] po přiložení napětí  $V_{GS}$  mezi elektrodu gate a source dochází k akumulaci nosičů náboje na rozhraní dielektrikum-polovodič, jak ilustruje Obr. 11. Tím dojde k vytvoření velice vodivého kanálu mezi elektrodami source a drain. Při malých napětích ( $V_{DS}$ ) mezi elektrodami source-drain lze pozorovat téměř lineární průběh proudu  $I_{DS}$  mezi těmito elektrodami. Kanál se tedy chová téměř jako odpor. Při dalším postupném zvyšování  $V_{DS}$  až do hodnoty  $V_{Dsat}$ , je možné pozorovat, že tloušťka vytvořeného kanálu je na jedné straně (u elektrody source) téměř eliminována, to je způsobeno prahovým napětím (tzv. zaškrcování kanálu neboli „pinch off“, viz blíže [32]). Po překročení hodnoty  $V_{Dsat}$  proud  $I_{DS}$  zůstává konstantní a tranzistor se navenek chová jako zdroj proudu. Změnou napětí

$V_{GS}$  je možné ovlivňovat množství akumulovaných nosičů na rozhraní dielektrikum-polovodič.



Obr. 11: Funkce OFET tranzistoru v akumulacním režimu: a) při malých napětích drain-source, b) při saturačním napětí (pinch off), c) při  $U_D > U_{Dsat}$  a různých napětích na gate (převzato a překresleno z [17]).

OFET tranzistory mají hlavní nevýhodu v podobě jejich požadavků na pracovní napětí. Třívrstvé uspořádání tranzistoru má určitou svoji kapacitu, která přímo ovlivňuje účinnost modulace vodivosti kanálu, jak je možné vidět na Obr. 12. Zvýšením této kapacity lze docílit snížení potřebného pracovního napětí, avšak u tranzistorů OFET se lze setkat s pracovními napětími spíše v řádech desítek voltů [33]. Tyto tranzistory jsou tedy nepoužitelné pro nízkoúrovňové aplikace (řády voltů).



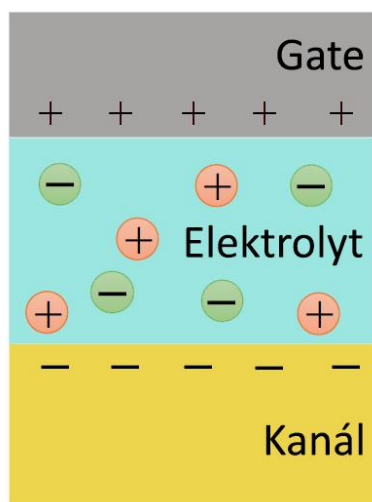
Obr. 12: Distribuce náboje na dvou stranách dielektrika v OFET systému (převzato a překresleno z [34]).

Nevýhodu těchto tranzistorů lze eliminovat mnoha způsoby. Jedním z nich je použití elektrolytu jako náhradu dielektrické vrstvy [10]. Avšak i tento princip s sebou nese určité nedostatky v podobě požadavků na kompatibilitu elektrolytu s ostatními materiály a omezené pohyblivosti iontů, což prodlužuje polarizační časy v elektrolytech. Obecně je možné říci, že pohyblivost nosičů v organických polovodičích je o až několik řádů nižší než u anorganických, proto je organická elektronika obecně nevhodná pro vysoce výkonné aplikace [35]. Pracovní napětí dnešních OFET tranzistorů se už díky jistým pokrokům pohybuje do úrovně 10 V [16, 36]. Mezi další nevýhodu lze zařadit nároky na čisté prostory při jejich poměrně složité přípravě [37].

### 2.1.2 EGOFET

Tranzistory EGOFET je možné pomyslně zařadit na rozhraní mezi tranzistory OFET a OECT. Hlavním rozdílem je zde náhrada dielektrické vrstvy za elektrolyt, což může pomoci eliminovat některé nedostatky (kapacita), které byly zmíněny u tranzistoru OFET. Tranzistor se z pohledu provozu chová velice podobně jako OFET, avšak funkci dielektrika zde podobným způsobem nahrazuje elektrolyt, v němž je ponořena elektroda gate. Dle [16] je možné se v praxi setkat s elektrolyty v následujících formách: tekuté elektrolyty [38, 39], iontové kapaliny [40], iontové gely [41, 42] a polyelektrolyty [43]. Při použití elektrolytů je však nutné počítat s jistými omezeními souvisejícími s kompatibilitou elektrolytů s dalšími materiály a zejména procesy, které probíhají uvnitř tranzistoru a které lze jen těžko vyšetřovat pouze z hlediska fyziky či chemie [44].

Princip funkce tohoto tranzistoru lze ilustrovat pomocí Obr. 13. Působení elektrického pole na vodivý kanál má za následek formování tzv. nábojové dvojvrstvy, což má v podstatě za následek vytvoření kondenzátorů se značnou kapacitou. Tato kapacita je vytvořena jak mezi elektrolytem a organickým polovodičem, tak mezi elektrodou gate a elektrolytem, jak je možné vidět na Obr. 13. Kapacita je tedy tvořena jak nosiči náboje na straně polovodiče, tak i kompenzačními ionty na straně elektrolytu [10]. Podle [30] se jedná o limitní případ FET konfigurace, protože dielektrická vrstva je zredukovaná na rozměry, které korespondují s rozměry iontů (tím je dosaženo vysoké kapacity). Jak uvádí [27, 44] u těchto tranzistorů se lze typicky setkat s kapacitami v řádech  $1 \div 100 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$ . U tranzistorů EGOFET je tedy možné pracovat s mnohem nižším pracovním napětím než u předešlých OFET [43, 44].



Obr. 13: Nábojová dvojevrstva tvořící kapacitor na rozhraní elektrolyt-kanál (převzato a překresleno z [34]).

## 2.2 OEECT

První tranzistory typu OEECT byly vyvinuty během 80. let autory Wrighton a kol. [25]. Tyto tranzistory se obecně skládají ze tří elektrod. První dvě elektrody (source a drain) jsou propojeny pomocí organického vodivého materiálu, zatímco třetí elektroda (gate) má interakci s vodivým kanálem prostřednictvím elektrolytu (obvykle kapalný)[30]. Obecně je možné říci, že princip těchto tranzistorů je založen na oxidaci či redukci polovodivého materiálu (mezi drain a source), což má za následek modulaci vodivosti kanálu a tím i potřebného proudu [27]. Podrobný princip tohoto tranzistoru bude následovat v následující podkapitole.

Na počátku byly OEECT vyráběny pomocí technologie elektropolymerace a jako vodivé polymery byly nejprve typicky používány tyto materiály: polypyrrol [25], polyanilin [26, 45] a polytiofén [46, 47]. Díky vývoji nových technologií a materiálů je možné dnešní OEECT s výhodou vytvářet pomocí již jinak rozvinutých technologií (sítotisk, inkjet, 3D tisk apod.), viz kapitola 1.2. V současnosti se pro aktivní kanál využívají např. tyto polymery: poly(3-akylthophen) (P3AT), poly(3-hexylthiophene) (P3HT) apod.[30, 48]. Mezi nejpoužívanější polymery současnosti patří taktéž materiál PEDOT:PSS, který je použit v OEECT, na kterých bude vyvíjena měřicí metodika v praktické části práce [49].

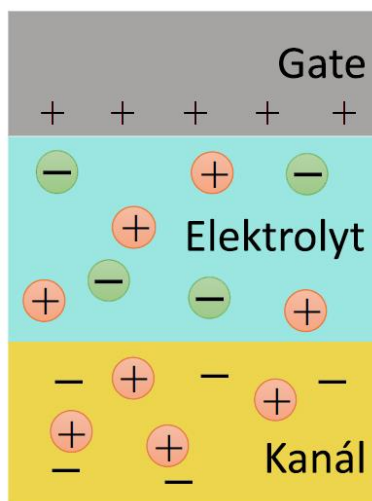
V porovnání s výše zmíněnými typy organických tranzistorů mají OEECT poměrně malá pracovní napětí (pod 1 V), což představuje jejich základní výhodu (při vyšších napětích může docházet k postupné degradaci elektrolytu, např. hydrolýzou). Díky této výhodě jsou OEECT vhodným kandidátem pro široký rozsah aplikací: senzory (biosenzory) či spínače u plně tištěných displejů [16]. Další z výhod je dobrá biokompatibilita použitelná pro biosenzory a také výborná odezva tranzistoru na interakci elektrolytu (kapalného) se snímaným médiem.

Jako nevýhodu OEECT lze uvést poměrně dlouhé spínací časy v řádech vteřin (výjimkou může být vertikální uspořádání viz [50]). Zatímco u OFET tranzistorů lze mluvit o spínacích časech v jednotkách milisekund a méně [27].



### 2.2.1 Princip funkce OECT

Tranzistor typu OECT vychází z obecné topologie tranzistoru typu MOSFET, avšak principem fungování se velmi liší. Tranzistor typu OECT je tříelektrodová elektronická součástka, kde je mezi elektrodami source a drain vytvořen vodivý kanál (elektrochemicky aktivní materiál), viz Obr. 15.

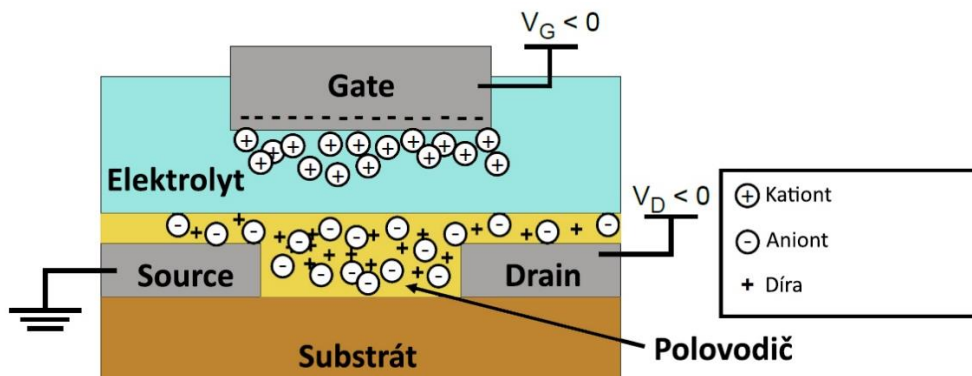


Obr. 14: Typická topologie OECT, proud je modulován pomocí elektrochemických reakcí mezi elektrolytem a kanálem (převzato a překresleno z [34]).

Objemová vrstva aktivního materiálu, tvořící vodivý kanál, je navíc od řídicí elektrody gate oddělena pomocí vrstvy elektrolytu (viz Obr. 14 ilustrující typickou topologii OECT). Řídicí elektroda gate je tedy v iontovém kontaktu s kanálem pomocí elektrolytu. Zatímco tranzistory OFET jsou založeny na čistě povrchovém účinku, kde aktivní část kanálu tvoří rozhraní dielektrikum-polovodič, u tranzistorů OECT je kanál tvořen celým objemem vrstvy polovodiče. V praxi je možné se setkat s dvěma topologiemi OECT. První z nich je laterální (planární), kde jsou všechny části v jedné vrstvě. Druhá varianta je tvořena postupným vrstvením jednotlivých částí. Obě varianty mají svůj význam a budou zmíněny v následujících částech práce.

Dle [16, 29, 34] je možné základní principy OECT popsat na principech tranzistoru MOSFET s kanálem typu p pracujícím v ochuzovacím režimu. Tranzistory OECT jsou rovněž založeny na modulaci proudu kanálem, pomocí vhodně zvoleného napětí na řídicí elektrodě gate (vhodná velikost a orientace), kdy při určitém napětí dojde k jeho úplnému zavření [51]. U tranzistorů OFET však dochází k modulaci proudu kanálem pomocí

elektrostatického pole a ke vzniku nábojové dvojvrstvy na rozhraní dielektrikum-polovodič (tzv. nefaradický režim), což již u OECT neplatí. Tranzistory OECT pracují v tzv. faradaickém režimu, kde se elektrony na rozhraní elektrolyt-kanál podílejí na redoxní reakci.



Obr. 15: Typická struktura OECT. Řízením velikosti napětí na gate dochází k injekci iontů do elektrolytu a polovodiče. Přesun nosičů probíhá v celém objemu OECT (převzato a překresleno z [29]).

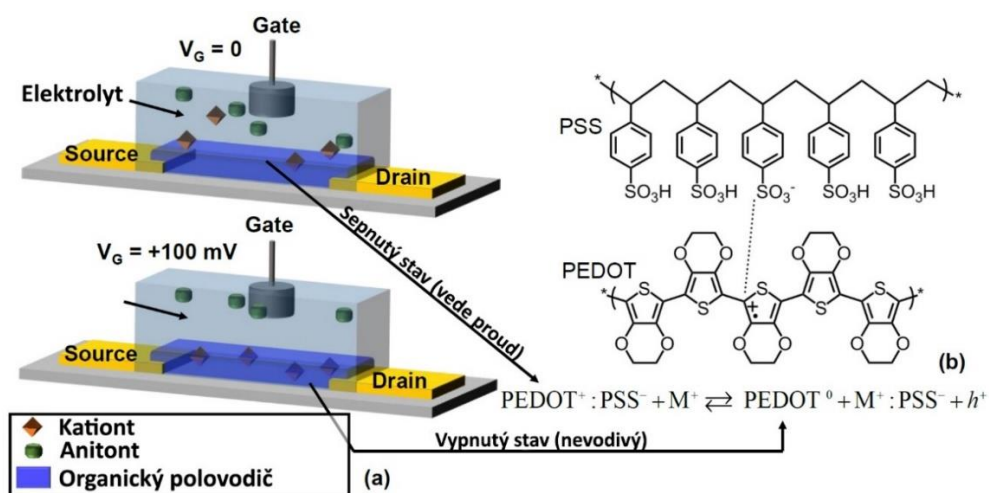
Podle [16, 29, 31] je princip OECT založen na elektrochemické redoxní reakci, která mění oxidační stavy aktivní vrstvy, uvnitř které probíhá iontová výměna mezi elektrolytem a polovodivou vrstvou, viz Obr. 15. Z tohoto předpokladu je možné odvodit dva oxidační stavy: aktivní vrstva s nízkou vodivostí kanálu (tranzistor ve vypnutém stavu) či aktivní vrstva s vysokou vodivostí kanálu (tranzistor v sepnutém stavu).

Přiložení napětí  $V_{DS}$  mezi elektrody source a drain má za následek protékání proudu  $I_{DS}$  (výstupní proud elektrodou drain) vodivým kanálem. Při malých napětích  $V_{DS}$  je možné pozorovat lineární závislost mezi přiloženým napětím a proudem kanálu odpovídající Ohmovu zákonu [29]. Přivedením napětí na elektrodu gate dochází k vytvoření elektrického pole, které vytlačuje ionty z elektrolytu do polovodičového kanálu (fyzický transport iontů), to má za následek změnu jeho vodivosti a dochází přitom k redoxní reakci.

Efekt těchto iontových částic na vodivost kanálu je závislý na vlastnostech použitého konjugovaného polymeru (polovodiče). U polovodičů typu p kladná řídicí napětí snižují vodivost kanálu a naopak záporná napětí jeho vodivost zvyšují. Přesně naopak je tomu u polovodičů typu n, kde kladná řídicí napětí vodivost kanálu zvyšují, zatímco záporná snižují [29]. Tyto tranzistory je rovněž možné klasifikovat jako tranzistory pracující v tzv. „ochuzovacím režimu“ či „obohacovacím režimu“. Tranzistory v ochuzeném režimu jsou při řídicím napětí  $V_{GS} = 0$  V vysoce vodivé a jejich vodivost klesá s přiloženým kladným

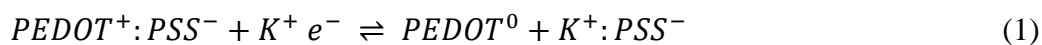
napětím. Tranzistory v obohaceném režimu mají opačné chování. S přiloženým záporným napětím tedy jejich vodivost roste, zatímco při  $V_{GS} = 0$  V jsou v nevodivém stavu.

Jak uvádí tyto publikace [29, 31, 34, 52] pro popis elektrochemických redoxních reakcí uvnitř tranzistoru, je nejvhodnější tyto reakce popsat na nejrozšířenějším druhu polymeru PEDOT:PSS. Jedná se o vysoce dopovaný polovodič typu p (vysoká koncentrace kladných nosičů náboje (děr)) se stabilními vlastnostmi v oxidované formě. Dle [53, 54] může být vodivost tohoto konjugovaného polymeru v oxidované formě vyšší než  $800 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Polymerní složka PSS stabilizuje PEDOT a umožňuje „ředění“ PEDOT do požadované vodivosti. PEDOT:PSS má navíc dobré filmotvorné vlastnosti a v dopovaném stavu je velice opticky transparentní, čehož lze využít při konstrukci zobrazovacích panelů [6].



Obr. 16: Tranzistor OEET v ochuzovacím režimu: a) molekulární struktura OEET v sepnutém stavu ( $V_{GS} = 0$  V) a následně vypnutém (při  $V_{GS} = 100$  mV), b) elektrochemická reakce vznikající při přesunu kationtů v polymerním PEDOT řetězci (převzato a upraveno z [52]).

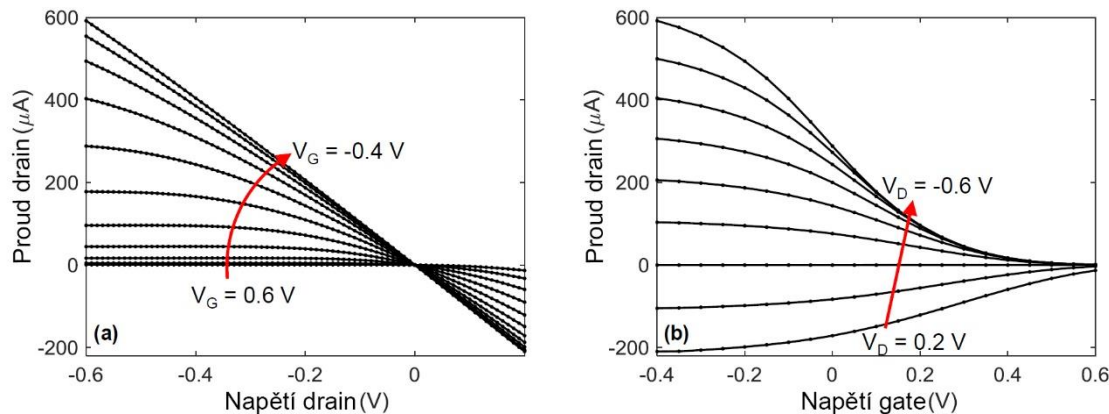
Kladné nosiče náboje jsou vázány na oxidovaných  $\text{PEDOT}^+$  molekulách, které jsou kompenzovány na sulfoanionty na  $\text{PSS}^-$  makromolekulárních řetězcích [10]. Tento mechanismus schématicky znázorňuje rovnice (1), pro redukce probíhající zleva doprava ( $\text{K}^+$  představuje injektovaný kationt z elektrolytu)[1]. V základním stavu je částečně oxidovaný a chová se jako vodič (ochuzovací režim). Další oxidací může být jeho vodivost ještě navýšena, zatímco při redoxní reakci se svými vlastnostmi přibližuje k polovodičovému chování. Blíže viz obecný popis dopování z těchto zdrojů [55–57].



Přiložení kladného řídicího napětí na elektrodu gate má za následek vytvoření elektrického pole, které inicializuje injekci kationtů z elektrolytu do polovodičového kanálu, viz Obr. 16. Tyto kationty jsou kompenzovány záporným nábojem sulfoaniontů (PSS složka) a dedopují molekuly  $PEDOT^+$  ze základního oxidovaného stavu (vodivého) do stavu  $PEDOT^0$  neutrálního (nevodivého). To má za následek redukční reverzibilní proces dle (2), který uzavírá kanál a snižuje jeho vodivost [57, 58]. Jedná se o reverzibilní proces (při  $V_{GS} = 0$  V) se vrací do sepnutého stavu). Při návratu řídicího napětí do výchozího stavu ( $V_{GS} = 0$  V), kationty zpětně difundují (za předpokladu kationtů schopných této reakce) ven z kanálu a složka PSS vytváří s  $PEDOT$  nové iontové vazby (oxidační proces), které ho navrací do vodivého stavu  $PEDOT^+$ .



Pro popis výsledného chování OECT je většinou využíváno výstupních a převodních charakteristik, které znázorňují závislost proudu  $I_{DS}$  na napětí drain  $V_{DS}$  a řídicím napětí  $V_{GS}$  [52, 59]. Obr. 17 znázorňuje tyto charakteristiky pro ochuzovací režim tranzistoru.



Obr. 17: Výstupní (a) a převodní (b) charakteristiky typického OECT pracujícího v ochuzovacím režimu (převzato a upraveno z [52]).

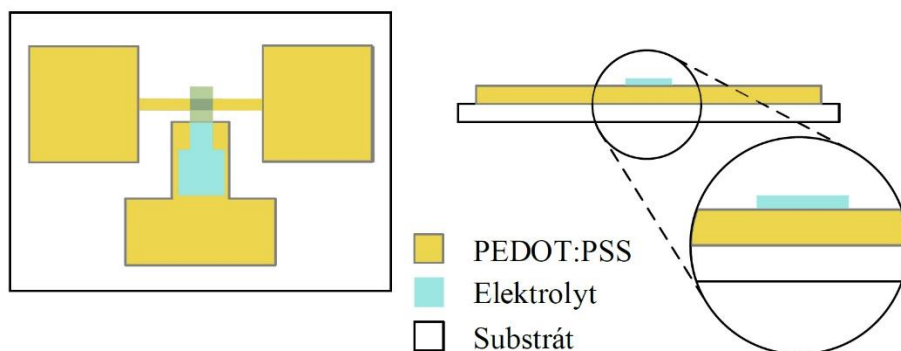
## 2.3 Topologie

Topologie, jakou je tranzistor realizován, významným způsobem ovlivňuje jeho výsledné vlastnosti. Důležitý je například poměr velikostí elektrody gate a kanálu, který předurčuje dynamické vlastnosti tranzistoru. Maximální poměr zajišťuje rychlejší dynamickou odezvu, což lze zajistit vhodně zvolenou tloušťkou elektrolytické vrstvy. Dnešní OECT je možné vyrobit s poměrně nízkými výrobními náklady, neboť u nich není požadavek na přesnou tloušťku oddělovací vrstvy (běžně mm až cm) a s využitím např. PEDOT:PSS je možné realizovat elektrody i kanál v jedné vrstvě [10, 30].

Následující podkapitoly se budou věnovat dvěma hlavním typům topologického uspořádání.

### 2.3.1 Laterální topologie

Jak již napovídá název, tato topologie pracuje s předpokladem, že je možné v jednom výrobním kroku (a jedné vrstvě) připravit všechny elektrody včetně kanálu za použití jednoho materiálu, viz Obr. 18. OECT pak vznikne přidáním elektrolytu do vytvořené struktury [16, 60]. Pokud je použit kapalný druh elektrolytu, je třeba vytvořit „bazének“, který brání jeho rozlití. Pro omezení jeho odpařování či případnému styku se vzdušnou vlhkostí (i v případě tuhého elektrolytu) je možné využít pouzdrění [16, 60].



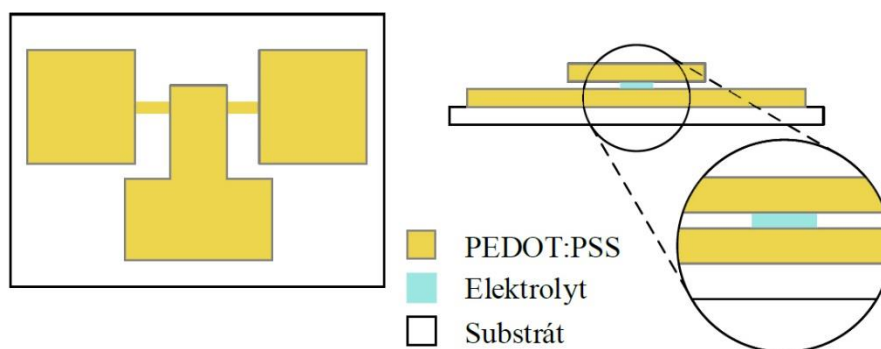
Obr. 18: Ukázka laterální topologie, pohled shora a zepředu (převzato a upraveno z [16]).

Výhoda laterální topologie spočívá v možné senzorové aplikaci, kdy může analyt snadněji přijít do kontaktu s elektrolytem (či být přímo jeho součástí) [61]. Tato topologie má však svoji nevýhodu, která se projevuje při dynamickém chování (rychlé přechody ze sepnutého a vypnutého stavu a zpět). Dle [50] je možné u tohoto uspořádání sledovat až o

dva řády pomalejší přepínání sepnutých stavů (v praxi až 10 s). Tato vlastnost je způsobena delší dráhou, kterou musí kationty urazit na vzdálenosti mezi elektrodou gate a kanálem, tak aby se mohli účastnit redoxní reakce [16, 60].

### 2.3.2 Vertikální topologie

Vertikální topologie má oproti přechodí topologii poměrně složitější výrobní nároky, neboť nelze připravit elektrody v jediném kroku. Elektroda gate je vždy připravována v samostatném kroku [51]. Vzniká zde navíc problém s volbou vhodného materiálu na výrobu gate elektrody, protože může dojít k jejímu rozpuštění. Jako materiál se s výhodou používají zlaté, platinové či jiné kontakty, jež jsou přímo ponořeny v kapalném elektrolytu. Z toho je možné usoudit, že tento způsob řešení je vhodný spíše pro laboratorní podmínky [16, 50].



Obr. 19: Ukázka laterální topologie, pohled shora a zepředu (převzato a upraveno z [16]).

Hlavní výhodou této topologie je eliminace nevýhody, kterou má laterální topologie (horší dynamické vlastnosti). Vzdálenost elektrody gate a kanálu je menší, takže je možné pozorovat rychlejší přepínání sepnutých stavů (menší než sekunda) [50]. Tato vzdálenost je přímo úměrná tloušťce vrstvy elektrolytu, což je možné zajistit potřebnou výrobní technologií (v praxi řády desítek nm až jednotky  $\mu\text{m}$ ) [16, 50].

## 2.4 Materiálové konfigurace

Materiály, kterými je OECT tvořen, předurčují jeho výsledné vlastnosti a účel pro který byl vytvořen. Strukturu OECT je možné dělit do těchto částí: kanál, kontakty a elektrolyt. Pro vytvoření OECT je však potřeba i nosná složka v podobě substrátu. V současné době se kromě pevných substrátů s výhodou používají flexibilní substráty (potřeby tištěné a flexibilní elektroniky). Jako zástupce nejběžnějších pevných substrátů je možné uvést sklo [62, 63]. Mezi nejčastěji používané flexibilní substráty lze zařadit PET folie (a jejich modifikace) či fotopapír [64, 65]. V současné době je možné se setkat i s textilními substráty jako např. kevlar, bavlna, hedvábí apod. [41, 66].

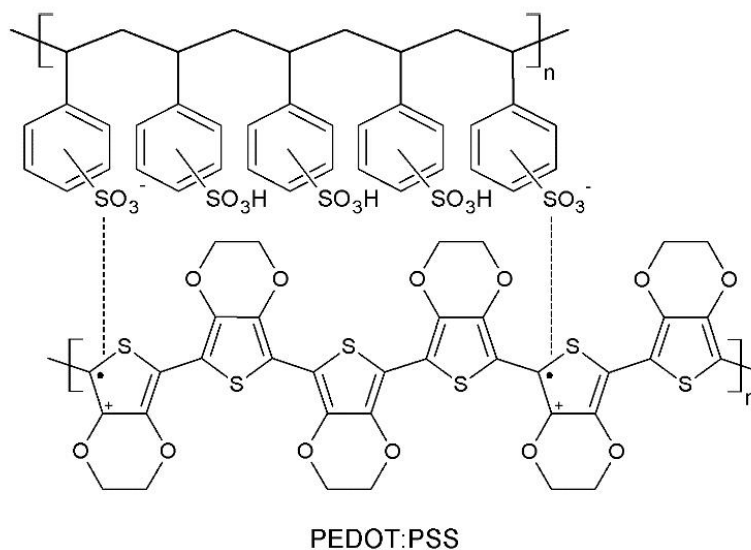
### 2.4.1 Kanál

Pro potřeby kanálu je třeba mít k dispozici materiál vykazující polovodivé vlastnosti závislé na změně napětí (ideálně od izolantu až k vodiči) [16]. Volba použitého materiálu se odvíjí od oblasti, pro kterou bude použit. V současné době se lze setkat pouze s omezeným množstvím použitelných polymerů. Pro potřeby realizace OECT se nejčastěji využívá materiál poly(3,4-ethylenedioxythiophene:poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), na němž jsou založeny i vzorky měřené v praktické části [30]. Jako další materiál lze použít např. poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl) (P3HT) [3, 67].

### PEDOT

Podle [6, 68, 69] je PEDOT možné charakterizovat jako jeden z nejpoužívanějších vodivých organických polovodičů, a to díky svojí komerční dostupnosti a vyváženým vlastnostem pro praktické využití. V základním stavu má omezenou rozpustnost, a proto se nejčastěji využívá ve spojení s jinými dopovacími sloučeninami. Nejčastěji se lze setkat například s kyselinou polystyren-solfonovou (PSS), viz Obr. 20. Tím vznikne PEDOT:PSS, který je již vodivý a vodou ředitelný. Mezi výhodné vlastnosti je možné zahrnout vysokou vodivost, stabilitu v p-dotované formě, dobré filmotvorné vlastnosti a optickou transparentnost v dopovaném stavu. V praxi se s ním lze setkat obvykle v již dotovaném stavu a ve formě folií. Výhoda polymerní směsi PEDOT:PSS spočívá v modifikovatelnosti obsahu PSS v polymerní směsi. Zvyšování obsahu PSS má totiž za následek snižování elektrické vodivosti. Měrná vodivost samotného PEDOT se pohybuje od  $400\div 600 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  [70]. V kapalně formě je možné ho využít pro vytvoření tenkých, opticky

transparentních, vodivých vrstev jako např. flexibilní elektrody či jiné aplikace. V komerční praxi je možné se s ním setkat např. pod názvem CLEVIOS™.



Obr. 20: Ukázka chemické struktury polymerní směsi PEDOT:PSS [68].

Jak uvádí [10, 16], pro polymer PEDOT:PSS je význačný i elektrochromní jev, který je možno využít pro konstrukci elektrochromních displejů [71]. Bez přiloženého napětí je polymerní vrstva bezbarvá a téměř transparentní, zatímco při přiložení napětí dochází ke změně zbarvení vrstvy na tmavě modrou. To je způsobeno elektrochemickou reakcí redukcí materiálu. Pro tento efekt je však potřeba, aby byl PEDOT:PSS v kontaktu s elektrolytem, který může poskytovat kationty pro oxidační či redukční reakce.

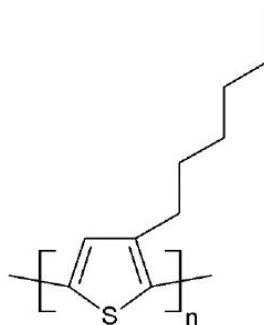
### P3HT

Jako další materiál s polovodivými vlastnostmi je rovněž možno použít regioregulární poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT), viz Obr. 21 [10, 16]. V organické elektronice je používán primárně díky svému koncovému uspořádání postranních řetězců, které umožňují tvorbu dvoudimenzionálních konjugovaných vrstev se silnými interakcemi mezi řetězci [72].

V praxi se však P3HT používá spíše pro přípravu OFET tranzistorů. Tento materiál je význačný zejména díky relativně vysoké mobilitě nosičů (přibližně  $0,1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) a



jednoduché výrobě [73]. Je ho totiž možné poměrně snadno rozpouštět v rozdílném typu organických rozpouštědel (toulen, chloroform atd.).

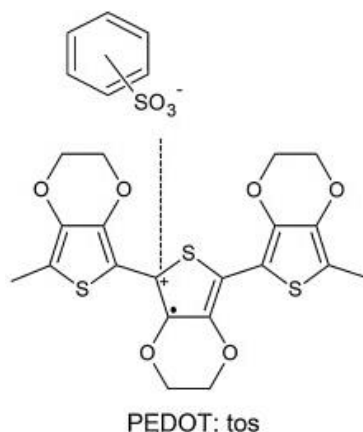


Obr. 21: Ukázka chemické struktury poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) [74].

U tohoto polymeru je důležitý tzv. stupeň regioregularity, který charakterizuje velikost molekulárního uspořádání v polymerních polovodičích. Vyšší stupeň reprezentuje vyšší pohyblivost nosičů náboje (až  $0,3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  při optimalizovaných podmínkách). Pohyblivost nosičů náboje je možné regulovat při depozici z tekuté fáze. Při použití rozpouštědel s vysokým bodem varu mají řetězce v mikrokrystalické struktuře delší čas na uspořádání, což má příznivý účinek na pohyblivost nosičů výsledného filmu z P3HT [16].

### Další polymery

Kromě výše popsaných polymerů je možné se v praxi setkat zejména s materiály typu PEDOT, kde je složka PSS zaměněna za jiný materiál. Jako příklad lze uvést např. PEDOT:tos (tosylát)[75], jak ilustruje Obr. 22. Jako vodivý kanál je možné použít i např. polyanilin [45], polypyrrol [22] či polyacetylen [17].



Obr. 22: Ukázka chemické struktury poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-tosylate (PEDOT:tos) [76].

## 2.4.2 Kontakty

Pro vytvoření všech elektrod, kterými disponuje OECT, je nutné mít k dispozici vhodné kontaktní materiály. Hlavním požadavkem na tyto materiály je vytváření ohmického kontaktu s lineární VA charakteristikou. Pro zaručení vzniku takového kontaktu je nutné mít k dispozici spojované materiály, které mají velice podobnou výstupní práci. V Tab. 2 je uvedeno porovnání výstupních prací často používaných kontaktních materiálů.

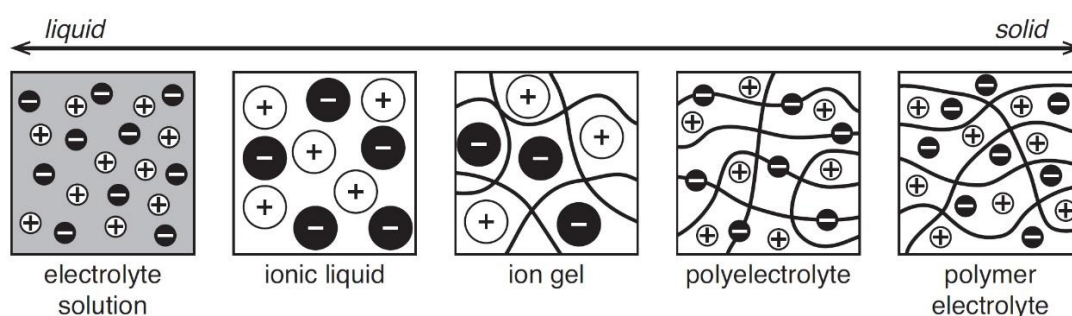
Tab. 2: Porovnání výstupních prací vybraných materiálů používaných na kontakty s materiály používanými pro konstrukci vodivého kanálu (PEDOT:PSS, P3HT).

Materiál	Výstupní práce [eV]
PEDOT:PSS	4,7 ÷ 5,4
P3HT	3,3 ÷ 5,2
Au	5,1
Pt	5,1 ÷ 5,9
C	~ 5,0
Ag	4,3 ÷ 4,7

Z hlediska technologie a jednoduché výroby lze z výhodou použít stejný materiál pro kontakty i kanál. Tomuto požadavku vyhovuje např. tranzistorová struktura vytvořená ze spojení PEDOT:PSS + elektrolyt.

### 2.4.3 Elektrolyt

Elektrolyt je klíčovou součástí struktury OECT, neboť zprostředkovává iontovou výměnu mezi kanálem. Hlavním požadavkem na jeho schopnosti je tedy schopnost poskytnout ionty pro redoxní reakci, která probíhá při změně vodivosti kanálu. Příčinou změny vodivosti je působení elektrochemické reakce či kombinovaná elektrochemická reakce při působení snímaného analytu na OECT. Používá se celá řada elektrolytů s rozličnými vlastnostmi, které odpovídají cílovým aplikacím, pro které byl OECT navržen, např. senzory, logické obvody, spínače atd.



Obr. 23: Přehled hlavních skupin elektrolytických materiálů [77].

Jak ilustruje Obr. 23 s elektrolyty se lze setkat ve formě kapalného až pevného skupenství (iontové kapaliny, iontové gely, polymerní elektrolyty a anorganické iontové materiály). Klíčovým parametrem ovlivňujícím výsledné dynamické vlastnosti OECT je vodivost elektrolytu.

Obecně nejpoužívanějším druhem elektrolytů jsou elektrolytické roztoky, které jsou složeny ze solí rozpuštěných v tekutém médiu. Jako rozpouštědlo se nejčastěji používá voda, použít však lze i jiné polární nevodnaté roztoky jako např. alkoholy, amoniak atd. Volba rozpouštědla souvisí s danou aplikací a tzv. elektrochemickým oknem, které je možné změřit pomocí cyklické voltametrie. Mimo toto „okno“ dochází k nepříznivým elektrochemickým reakcím jako elektrochemické redukce a oxidace. Relativně velké elektrochemické okno má např. acetonitril. Velice slabým elektrolytem je i čistá voda. Při neutrálním pH a pokojové teplotě má iontovou koncentraci  $0,1 \mu\text{M}$  a dosahuje elektrické vodivosti  $5,5 \cdot 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

Výčet všech druhů elektrolytů by zcela přesáhl záměr této práce, blíže tuto problematiku popisují následující zdroje [3, 10, 17, 77, 78]

#### 2.4.4 Aplikace OECT

V současné době se lze ve velké míře setkat s OECT v podobě sensorových aplikací. Sensorové aplikace OECT jsou možné díky jejich výborné biokompatibilitě [62, 79, 80]. Mezi další výhodné vlastnosti patří schopnost pracovat v kapalném prostředí při malých pracovních napětích (do 1 V) [81, 82]. Signály jsou přiváděny mezi elektrodu gate a source, což má za následek modulaci proudu  $I_{DS}$  kanálem OECT. S těmito aplikacemi se lze setkat především v medicíně při snímání elektrických signálů generovaných lidským tělem.

Publikace [83, 84] popisují využití OECT jako biosenzory pro snímání signálu mozkové aktivity tzv. EEG (Elektroencefalogram). Dále je možné uvést senzory schopné měřit srdeční činnost tzv. EKG (Elektrokardiogram) [85, 86]. Mezi další aplikace je možné zařadit senzor buněčných tkání [34, 87, 88], senzor cukru v lidském těle [61], senzor snímání bakterií [89], senzor detekce potu [90] či textilní senzor dopaminu a adrenalinu [91].

S OECT se lze taktéž setkat jako s chemickými senzory, které jsou schopné detekovat různé chemické látky a plyny. Lze se tedy setkat se senzory schopnými detekovat např.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$  a  $\text{Ca}^{2+}$  ionty,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , a další látky [92, 93]. Rovněž se lze setkat se senzory, které umožňují měřit pH [94] či vlhkost [95].

### 3 Předpoklady pro charakterizaci OECT

V této části jsou popsány obecné předpoklady měření organických tranzistorů, které vychází z poznatků obsažených normě IEC 62860/IEEE Std 1620 z roku 2013 [96]. Předpokladem pro správnou charakterizaci je znalost systematicky opakovatelného měřicího procesu, který kromě měřicí metodiky zahrnuje i způsob nakládání s daty, podmínky okolního prostředí a správnou reprezentaci výsledků.

#### 3.1 Měřicí zařízení

Výše uvedená norma popisuje základní požadavky pro měření organických tranzistorů. Pro měření organických tranzistorů je nutné mít k dispozici natolik citlivá měřicí zařízení, aby bylo schopné měřit alespoň s přesností  $\pm 0,1\%$  (citlivost by měla být minimálně o tři řády pod očekávanou úrovní měřeného signálu). Příkladem může být nejmenší proud tekoucí přes organický tranzistor, tzv. svodový proud. Pokud je tento proud na úrovni 1 pA ( $10^{-12}$  A) a nižší, je vyžadováno měřicí zařízení s minimálním rozlišením alespoň 1 fA ( $10^{-15}$  A). Organické součástky vykazují vysoké impedance, řádově ( $> 1$  G $\Omega$ ), proto by měly být vstupní impedance všech částí měřicího zařízení alespoň o tři řády vyšší než v organických komponentách. Komerčně dostupné měřicí systémy pro charakterizaci organických součástek mají obvykle minimální vstupní impedanci  $10^{16}$   $\Omega$ .

#### 3.2 Požadovaná měření

Pro charakterizaci organických tranzistorů nutné provést alespoň dvě z uvedených měření:

- Převodní charakteristiky ( $I_{DS} - V_{GS}$ ), díky nimž lze předběžně určit tyto veličiny: pohyblivost ( $\mu$ ) a prahové napětí ( $V_{TH}$ ).
- Výstupní charakteristiky ( $I_{DS} - V_{DS}$ ), pomocí nichž lze zjistit okamžik saturace a obecné informace o elektrickém výkonu. Pomocí těchto křivek lze určit, zda má součástka chování podobající se FET.
- Závislost svodového proudu na řídicím napětí ( $I_{GS} - V_{GS}$ ), pomocí něhož lze charakterizovat kvalitu dielektrika a velikost proudu na rozhraní elektrody gate

a kanálu. Velikost svodového proudu by měla být zanedbatelná vzhledem k výstupnímu proudu kanálem. Toto měření tedy určuje, zda je vůbec možné spolehlivě měřit a charakterizovat klíčové parametry součástek.

### Doporučená měření

Norma rovněž doporučuje tato dodatečná měření:

- Měření kapacity  $C_{GD}$  (tj. kapacita mezi hradlovou a odtokovou elektrodou) a  $C_{GS}$  (tj. kapacita mezi hradlovou a zdrojovou elektrodou). Tyto kapacity negativně ovlivňují dynamické vlastnosti součástky (rychlost spínání) a mohou ovlivňovat i samotnou charakterizaci.

#### 3.2.1 Převodní charakteristika

Převodní charakteristiky ( $I_{DS} - V_{GS}$ ) jsou nezbytné pro charakterizaci: driftová pohyblivost nosičů náboje, prahového napětí a spínacího poměru on/off. Tato data jsou klíčová pro charakterizaci přenosů probíhajících v polovodiči. V rámci tohoto měření se navíc určuje tzv. transkonduktance  $g_m$  (3). Aby bylo možné extrahovat parametry pro modely obvodů, je nutné mít k dispozici alespoň jednu převodní křivku (jako doplněk k výstupním datům V/A charakteristiky).

$$g_m = \frac{\partial i_{DS}}{\partial v_{GS}} \quad [\text{S}] \quad (3)$$

#### 3.2.2 Výstupní charakteristika

V rámci jednoho měření výstupních charakteristik ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) je možné získat dostatečné množství informací o chování součástky. Toto měření sice není přímo použitelné pro obecnou charakterizaci vlastností polovodičových přenosů, je však klíčové pro vývoj modelů, simulování a návrhy obvodů.

#### 3.2.3 Svodový proud

Měření svodového proudu ( $I_{GS} - V_{DS}$ ) je nezbytné pro zjištění izolačních vlastností mezi elektrodou gate a polovodičem, ty musí být dostatečné pro funkci součástky. Informace z těchto měření pomáhají odhalit potenciální rušivé vlivy na chování transistoru. Pro toto

měření je požadováno uzemnění, jak elektrody gate, tak i source ( $V_{DS} = V_{GS} = 0$  V), přičemž je měřen proud  $I_{GS}$ . Ideálně by měl být změřen nulový proud směrem od hradla do kanálu. V praxi je však postačující podmínkou pokud je proud  $I_{GS}$  při provozu součástky dostatečně menší než  $I_{DS}$  ( $I_{GS} < 0,001 \cdot I_{DS}$ ).

Svodový proud gatem může negativně ovlivnit měřenou hodnotu (offset) výstupního proudu kanálem, proto je nutné zajistit následující:

- Svodový proud musí být měřen v celém rozsahu řídicích napětí, které jsou očekávané pro funkci součástky a které jsou využity při měření převodních a výstupní V/A charakteristik.
- Velikost svodového proud gatem musí být alespoň o dva řády menší než velikost výstupního proudu drainem. Výjimkou jsou řídicí napětí, kdy je součástka uvažována ve vypnutém (off) stavu.
- Při extrakci parametrů z aproximovaných průběhů jako např. pohyblivost a prahové napětí je přípustný pouze takový počet platných číslic, který odpovídá tomu, o kolik řádů je větší velikost svodového proudu gatem oproti výstupnímu proudu drainem.

### 3.2.4 Parazitní vlivy

Kapacity, pohyblivé iontové nečistoty či jinak zkreslující jevy, mají za následek odlišná změřená data, což se projevuje při změně směru napětí v rámci měření (např. odlišné hodnoty při postupování ve směru kladných napětí oproti jiným hodnotám při postupování ve směru záporných napětí). Tyto odchylky mohou způsobit nepatrné posuny prahového napětí nebo až závažné odchylky, které rozporují s ideálním chováním tranzistoru (např. driftová pohyblivost zdánlivě závislá na řídicím napětí nebo chybějící oblast nasycení ve výstupní charakteristice). Parametry, které jsou určeny z V/A charakteristik, jako je např. závislost popisující driftovou pohyblivost či prahové napětí jsou silně zatíženy zmíněnými jevy. Pro posouzení míry hystereze způsobené výše uvedenými parazitními efekty se doporučuje následující postup:

- Zahájit každé měření nejprve z vypnutého stavu (uvažován rozsah napětí, kdy je součástka považována za vypnutou) až do zapnutého stavu. Následně provést opačný postup (ze zapnutého stavu do stavu vypnutého).
- Nechat součástku v klidovém stavu, nezatíženou (nejlépe se všemi elektrodami uzemněnými přes nízko-impedanční smyčku), a to alespoň na doporučenou dobu 10 min před jakýmkoliv měřením. Tímto postupem lze minimalizovat efekty, které mohly vzniknout při předešlých měřeních (např. nabíjení kapacit v součástce).
- Charakterizovat parazitní kapacity alespoň pomocí jedné frekvence a napětí. Při použití pouze jedné frekvence se doporučuje použít frekvenci 1 kHz.



## 4 Určení parametrů OECT

### 4.1 Pohyblivost nosičů

Aby bylo možné maximalizovat reprodukovatelnost hodnot, je nutné uvést postup, získání dat charakterizujících pohyblivost [96]. Hodnota pohyblivosti  $\mu$  je uváděna v jednotkách  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Hodnoty pohyblivosti nosičů náboje pro polovodivé materiály jsou většinou určeny z již vyrobené součástky a pochází z aproximovaných převodních charakteristik. Hodnota driftové pohyblivosti je obvykle odvozena od nasycení či pomocí lineárních aproximací. Pro oblast nasycení platí následující aproximace:

$$\left[ I_{DS} \approx \frac{W}{2L} C_i \mu (V_{GS} - V_T)^2 \right] \quad [\text{A}] \quad (4)$$

kde  $W$  je šířka kanálu,  $L$  je délka kanálu,  $C_i$  je vstupní kapacita na jednotku plochy a  $\mu$  představuje pohyblivost. Typicky je toho možné docílit nalezením sklonu  $I_{DS}^{1/2} - V_{GS}$ , čímž dojde k nalezení oblasti nasycení a hodnoty pohyblivosti. Pro lineární aproximace platí následující vztah:

$$\left[ I_{DS} \approx \frac{W}{L} C_i \mu (V_{GS} - V_T) V_{DS} \right] \quad [\text{A}] \quad (5)$$

kde  $V_{DS}$  musí být  $\ll (V_{GS} - V_T)$

V lineárním režimu může být pohyblivost vypočítána pomocí sklonu převodní křivky a matematickou derivací rovnice (5), viz rovnice (6). Hodnota driftové pohyblivosti musí být určována v režimu, kdy je  $V_{DS} \ll (V_{GS} - V_T)$ , (pro kanál s vodivostí typu p). Pokud driftová pohyblivost tranzistoru vykazuje značnou závislost na řídicím napětí gate (vyšší než 10 %), měla by být tato informace zanesená do průběhu převodní charakteristiky na sekundární osu odtokového proudu. Poté je možné určit hodnotu pohyblivosti jako:

$$\mu = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_G} \frac{L}{WC_i V_{DS}} \quad [\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}] \quad (6)$$

## 4.2 Spínací poměr

Pro snadnou opakovatelnost měření spínacího poměru by měla být vždy uvedena metodika, jakou byla data získána. Tento poměr je obecně možné popsat jako poměr velikosti maximální a minimální hodnoty proudu odtokového proudu ( $I_{DS}$ ), který byl získán z dynamických měření, viz rovnice (7). V literatuře se obecně udávají maximální získané hodnoty spínacího poměru. Měly by také být uvedeny rozměry měřené součástky a napětí  $V_{DS}$ , při kterém byl spínací poměr stanoven.

$$\text{spínací poměr} = \frac{I_{DS_{MAX}}}{I_{DS_{MIN}}} \quad [-] \quad (7)$$

## 4.3 Permittivita

Na měření permitivity izolační vrstvy na gate má významný vliv zvolená měřící metodika. Nekonzistentnost a variabilita změřených hodnot permitivity totiž následně ovlivní získané hodnoty pohyblivosti a prahového napětí. Dielektrické měření se obvykle provádí pomocí metody paralelního elektrodového systému, při které je změřena komplexní impedance při určité frekvenci. Permittivitu je také možné vyhodnotit z její frekvenční charakteristiky (především pokud se její hodnota značně mění v celém rozsahu). Doporučuje se vždy uvádět, při jaké frekvenci byla permitivita určena. Nejčastěji je to při 1kHz (např. pro organickou elektroniku je to obvykle při 100 Hz a méně). Záleží na typu zkoumané součástky.

## 4.4 Podmínky prostředí

Podmínky prostředí, které byly přítomny při výrobě součástky či při jeho měření, by měly být rovněž udávány. Ukázalo se, že podmínky prostředí, ve kterých byla součástka skladována, mají značný vliv na její funkci. Různé změny při skladování a měření způsobují nekonzistentnost vlastností součástky. Je nutné pečlivě zaznamenávat skladovací podmínky prostředí a podmínky, při kterých byla součástka charakterizována, aby bylo následně možné porovnat a ověřit získaná data.

Podmínky prostředí by měly být monitorovány a zapisovány pro každé měření, a to minimálně na začátku a konci měření. Doporučuje se však v reálném čase konstantně

sledovat a zapisovat měřicí podmínky po celou dobu měření, kdy jsou tyto podmínky zaznamenány pro všechna získaná data.

Musí být zaznamenány následující podmínky prostředí:

- Atmosféra při měření (např. okolní vzduch, vakuum, dusík apod.).
- Světelné podmínky a dobu působení světla (např. tma, UV ochrana atd.). Změny světelných podmínek jako např. čas po jaký byl vzorek tmě po expozici světla a před měřením).
- Teplota (doporučeno měřit s rozlišením alespoň 1 °C či 1 K (nejlépe s rozlišením 0,1 °C či 0,1 K)).
- Relativní vlhkost (*RH*), (doporučeno měřit s rozlišením 1 %, minimálně 5 %).
- Celkový čas měření a čas jednotlivých měření (aby se bylo možné odhalit dlouhodobě působícím efekty na měření).

## 4.5 Souhrn měřicích údajů

Minimální doporučený rozsah údajů pro reporting testovaných tranzistorů je uveden v Tab. 3. V Tab. 4 jsou ukázány přijatelné odchylky při uvádění vlastností dielektrik. Jsou zde uvedeny takové kombinace, z nichž lze další parametr je možné určit výpočtem. Výpis těchto parametrů by měl odpovídat terminologii, značkám a jednotkám, které jsou uvedeny v Tab. 3 a Tab. 4. Měly by být taktéž uvedeny podmínky prostředí, o kterých byla zmínka v přechozí podkapitole.

*Tab. 3: Vypsany seznam parametrů uváděných u elektrických dat*

Vlastnost	Symbol	Jednotky
Šířka kanálu	W	$\mu\text{m}$ (<1 mm) mm ( $\geq 1$ mm)
Délka kanálu	L	$\mu\text{m}$
Teplota	T	C° nebo K
Relativní vlhkost prostředí	RH	%
Driftová pohyblivost	$\mu$	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
Prahové napětí	$V_{\text{TH}}$	V
Spínací poměr	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	-

*Tab. 4: Kombinace přijatelných dat o dielektriku*

Číslo kombinace	Kapacita na jednotku plochy (C) [F/cm <sup>2</sup> ]	Tloušťka dielektrika (d) [ $\mu\text{m}$ či mm]	Relativní hodnota dielektrické konstanty [-] (při určité frekvenci)	Měřená frekvence (f) [Hz]
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✗	✓
3	✓	✗	✓	✓
4	✗	✓	✓	✓

## 5 Praktická část

Tato kapitola je zaměřena na návrh vlastní měřicí metodiky. Měřicí metodika vychází z poznatků přechozích kapitol 3, 4 a publikací, které se zabývaly organickými tranzistory. Na základě výše popsané kapitoly by mělo být možné sestavit takovou metodiku, díky které bude možné spolehlivě a opakovatelně provést charakterizaci elektrických parametrů OECT. Pro účely ověření této metodiky budou proměřeny měřicí vzorky OECT s PEDOT:PSS.

### 5.1 Návrh měřicí metodiky

Před zahájením měření je třeba mít k dispozici znalosti jak o měřených vzorcích, tak i o měřicí aparatuře (toto detailně popisuje norma IEC 62860-2013 v přechozí části práce). Přílohou měření, by proto měly být i tyto údaje. Pro opakovatelnost měření a snadné odhalení případné variability hodnot je rovněž doporučeno mít zaznamenány okolní podmínky během měření, a to po celou dobu měření a všech jeho částí. Dostupné zdroje se shodují, že není nutné provádět měření OECT ve specializovaných podmínkách (vakuová komora, stínící komora), což představuje výhodu [60, 97]. Pro měření je taktéž nutné mít k dispozici přístroje s dostatečnou přesností, které je možné s výhodou propojit s vyhodnocovacím softwarem na zpracování dat.

#### 5.1.1 Měření statických charakteristik

Při statických měřeních se obvykle měří vzájemné závislosti vstupních a výstupních veličin, tak aby bylo možné vyhodnotit provozní parametry tranzistoru (viz kapitoly 3 a 4. Jedná se o měření výstupních ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) a převodních charakteristik ( $I_{DS} - V_{GS}$ ), pomocí nichž je možné zjistit prahové napětí ( $V_{TH}$ ), transkonduktanci ( $g_m$ ) (3) či pohyblivost ( $\mu$ ) (6). Dle dostupné literatury je vhodné pro určení základního provozního napětí volit napěťový rozsah  $\pm 1$  V. Je to z důvodu bezpečného zachování stabilních vlastností organických materiálů. Aby bylo možné spolehlivě charakterizovat data ze změřených křivek, je nutné mít k dispozici alespoň 25 naměřených hodnot, jak doporučuje norma. Taktéž se doporučuje volit řídicí napětí tak, aby bylo možné změřit alespoň tři průběhy. Rozsah měřených napětí se volí tak, aby bylo možné spolehlivě prokázat funkci tranzistoru.

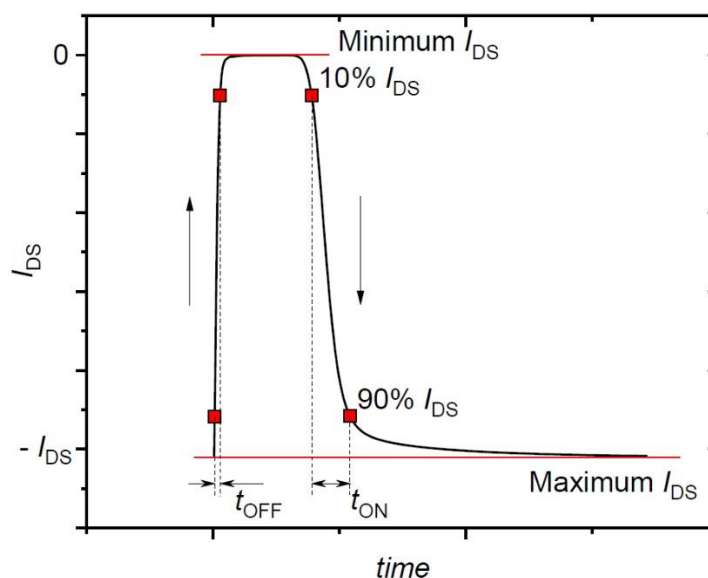
### 5.1.2 Měření dynamických charakteristik

Měření dynamických charakteristik vychází z funkce OECT jako elektronického spínače. Jak ilustruje Obr. 24, z tohoto měření je možné extrahovat odezvu na vstupní signály, tzn čas sepnutí  $t_{ON}$  (8) a čas vypnutí  $t_{OFF}$  (9) a spínací poměr (7).

$$\text{spínací poměr} = \frac{I_{DS_{MAX}}}{I_{DS_{MIN}}} \quad [-] \quad (7)$$

$$t_{ON} = t_{90\% I_{DS\downarrow}} - t_{10\% I_{DS\downarrow}} \quad [s] \quad (8)$$

$$t_{OFF} = t_{10\% I_{DS\uparrow}} - t_{90\% I_{DS\uparrow}} \quad [s] \quad (9)$$



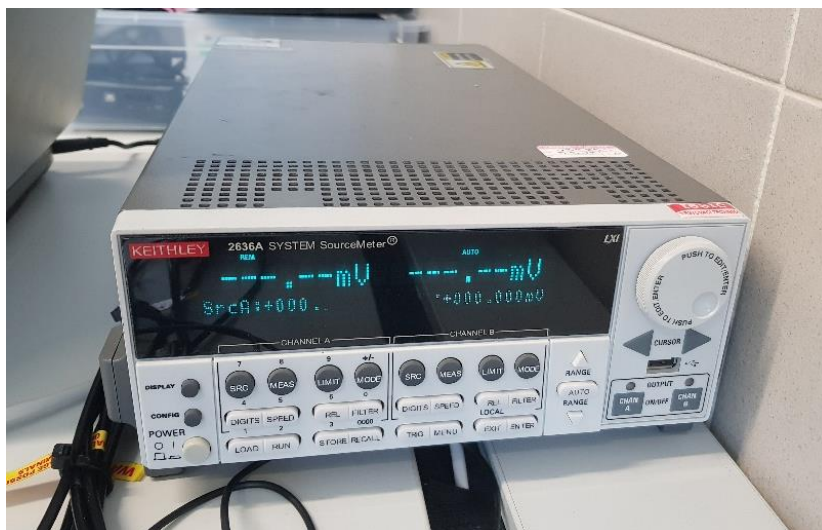
Obr. 24: Průběh časové odezvy proudu  $I_{DS}$  v závislosti na spínacím řídicím napětí  $V_{GS}$  [16].

Měření se provádí přivedením spínacích pulsů na elektrodu gate, přičemž se cyklicky mění hodnota napětí  $V_{GS}$  [27]. To vše se provádí při konstantním napětí  $V_{DS}$ , pro tranzistory v ochuzovacím režimu je možné zvolit  $V_{DS} = -1V$ . Pro počáteční měření je nutné zvolit polaritu a rozsah spínání. Pro tranzistory pracující v ochuzovacím režimu je možné zvolit rozsah  $V_{GS} \sim 0 \div 1 V$ . Při tomto měření je taktéž nutné zvolit frekvenci spínání a počet spínacích cyklů. Pro počáteční měření je možné provést 5 spínacích cyklů se střídou 1:1 (perioda spínání by měla být zpočátku dostatečně dlouhá (jednotky až desítky sekund), aby bylo možné odhalit spínací procesy u pomalejší OECT).

## 5.2 Měřicí instrumentace

### SMU Keithley 2636A

Veškeré parametry měření v rámci charakterizace OECT byly získány pomocí dvoukanálového měřicího přístroje SMU Keithley 2636A („Source Measure Unit“ – zdroj vybavený měřicí jednotkou), jak je možné vidět na Obr. 25. Přístroj je vybaven triaxiálními měřicími sondami, a lze pomocí něj kontinuálně měřit napětí a proud s dostatečnou přesností a rychlostí pro charakterizaci OECT. Přístroj je navíc softwarově řízen vyhodnocovacím softwarem SW ACS Basic 2.0, který umožňuje kontinuální a automatizovaný sběr dat do PC. Data jsou následně zpracována a vyhodnocena.



Obr. 25: SMU Keithley 2636A.

### Měřicí přípravek

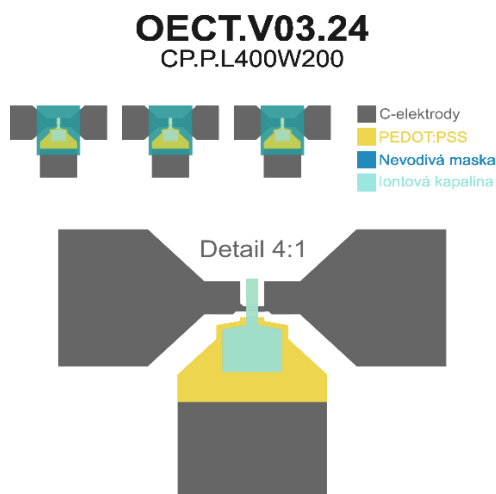
OECT byly umístěny do přípravku s jehlovým polem, pomocí něhož je možné kontaktovat až 18 OECT s dvoubodovým připojením každého vývodu (S, D, G), viz Obr. 26. Tento přípravek navíc disponuje vakuovým odsáváním pro stabilizaci měřicích podmínek (dosažitelný podtlak řádově  $< 10$  mbar).



Obr. 26: Měřicí přípravek s kontaktovacím jehlovým polem.

### 5.3 Vzorky OECT

Vzorky určené pro charakterizaci OECT byly realizovány ve spolupráci FEL ZČU a katedry polygrafie a fotofyziky na Univerziě Pardubice (KPF UPCE). Sady OECT byly vyrobeny s laterální topologií, viz Obr. 27. Všechny kontaktní elektrody (source, drain a gate) a vodivý kanál byly vytvořeny pomocí sítotisku na PET substrátu. Source a drain byly vytvořeny nátiskem uhlíkové pasty, zatímco kanál byl vytvořen pomocí PEDOT: PSS (CLEVIOS™ S V4 [98]). Jako elektrolyt byla přes plochu řídicí elektrody a vymezenou plochu kanálu mikropipetou nanášena iontová kapalina IL04 (1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonát).



Obr. 27: Laterální topologie měřeného vzorku OECT.



## 5.4 Plán experimentů

Cílem experimentů bylo ověření vlivu relativní vlhkosti ( $RH$  – „relative humidity“) na celkové elektrické chování OECT jako součást jejich standardní charakterizace.  $RH$  má výrazný vliv na chování OECT, zejména na chování elektrolytu, který je citlivý na změnu elektrické vodivosti [99, 100].

V první části experimentu byly do 3 prostředí s různou  $RH$  umístěny vždy 2 sady OECT (celkem 18 OECT). V této části byly pouze měřeny výstupní charakteristiky  $I_{DS} = f(V_{DS})$  při  $V_{GS} = 0$  V v definovaných časech od okamžiku depozice iontové kapaliny ( $IL$ ). Cílem bylo výchozí orientační ověření časového vývoje výstupních charakteristik OECT v plně otevřeném stavu v závislosti na  $RH$ . Časový plán těchto měření je uveden v Tab. 5

V druhé navazující části experimentu byly do 3 prostředí s různou  $RH$  (stejně jako u prvního experimentu) umístěny vždy 3 sady OECT (celkem 27 OECT). V rámci této části však byly měřeny kompletní statické i dynamické charakteristiky OECT. Kompletní časový plán těchto měření je možné vidět v příloze B.

Tab. 5: Přehled časového plánu prvních měření OECT, při kterých byly měřeny výstupní charakteristiky při  $V_{GS} = 0$  V.

		Sada-S1	Sada-S2
		Čas od depozice IL (h)	Čas od depozice IL (h)
<b>pouze <math>I_{DS}=f(V_{DS})</math> <math>V_{GS} = 0</math></b>	<b>Start aklimatizace OECT</b>	05.05.2020 8:00	0
	<b>1. měření</b>	06.05.2020 8:00	24
	<b>2. měření</b>	06.05.2020 11:00	27
	<b>3. měření</b>	06.05.2020 15:00	31
	<b>4. měření</b>	06.05.2020 20:00	36
	<b>5. měření</b>	07.05.2020 8:00	48
	<b>6. měření</b>	07.05.2020 15:00	55
	<b>7. měření</b>	08.05.2020 14:00	78
	<b>8. měření</b>	11.05.2020 8:00	144
			-

### 5.4.1 Ověření vlivu RH na interakci kanál-elektrolyt

Pro první část experimentů bylo zhotoveno 6 sad vzorků OECT (Označeny S1 a S2 pro celkem 18 OECT, viz Tab. 5 či detailněji Příloha A), které byly rovnoměrně rozděleny a následně umístěny do hermeticky uzavíratelných plastových nádob s definovaným prostředím, viz Tab. 6.

Tab. 6: Experimentální prostředí s definovanými hodnotami RH.

RH [%]	Prostředí
< 10%	Uzavřená nádoba se silikagelem
40 ÷ 50%	Uzavřená nádoba s normálním vnitřním lab. prostředím
70 ÷ 80%	Uzavřená nádoba s nasyceným roztokem NaCl v H <sub>2</sub> O

Před samotnou elektrickou charakterizací byly vzorky tištěných OECT bez elektrolytu vždy aklimatizovány v daném prostředí. Aktivovány byly až manuálním mikropipetováním *IL* (nejprve sada S2 v  $t = 0$  h a po 24 hodinách sada S1). Obr. 28 ilustruje boxy simulující prostředí s danou *RH*. Časový plán těchto měření je k nahlédnutí v Příloze A.



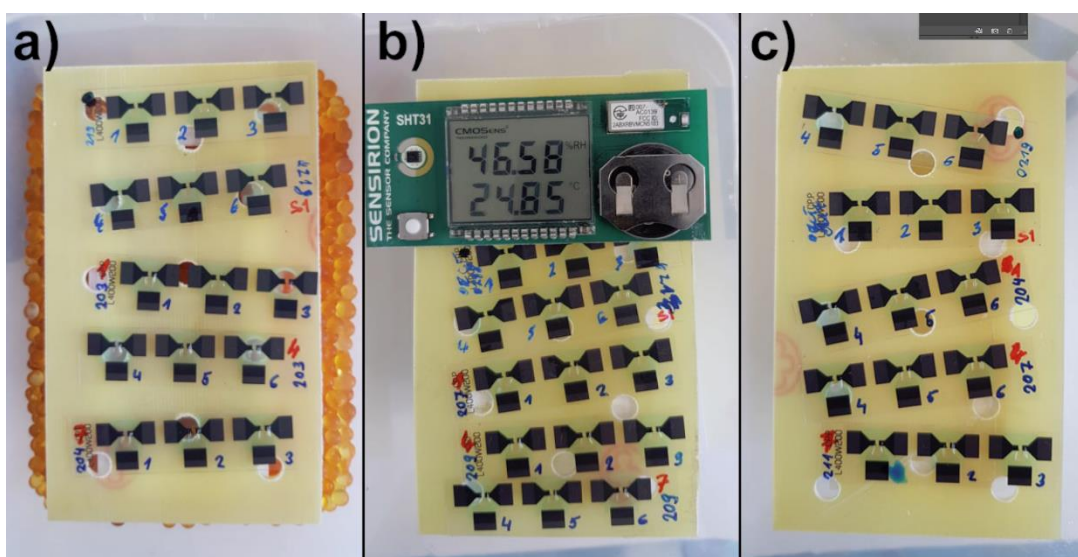
Obr. 28: Vzorky umístěné v prostředí s definovanými RH.

Po uplynutí této doby již byla prováděna elektrická charakterizace dle časového plánu. Na všech sadách byla proměřována statická výstupní charakteristika  $I_{DS} = f(V_{DS})$  při napětí  $V_{GS} = 0$  V. Při měření byly vzorky vždy vyjmuty z prostředí s definovanou *RH* a umístěny do měřicího přípravku. Samotný měřicí přípravek zajišťoval svým podtlakem (řádově <10 mbar) zanedbatelný vliv zbytkové *RH*. Po ukončení měření byly vzorky vždy navraceny do definovaného prostředí.

### 5.4.2 Ověření vlivu RH na sadu tranzistorových parametrů

Druhá část rozšiřuje přechodí sérii experimentů, kdy byly vždy na každé sadě OECT proměřeny kompletní charakteristiky. Měření bylo uzpůsobeno dle výsledků z předchozí měřicí části. Zvolen byl postup s 24-hodinovou aklimatizací vzorků v jednotlivých prostředích a následnou manuální depozicí iontové kapaliny mikropipetováním. Měření charakteristik bylo zahájeno ihned po depozici ( $t = 0$  h). Tomu byl uzpůsoben i plán samotných měření, který je možné vidět v příloze B.

Vzhledem k předpokládanému zvýšenému elektrickému namáhání vzorků vlivem samotného měření bylo vytvořeno několik sad OECT (celkem 9 sad po 3 OECT), které byly v tentýž čas aktivovány a umístěny do prostředí s definovaným RH, viz Tab. 6. Pro měření v jednotlivých časech byla vždy využita nová dosud neměřená sada (již změřené sady byly považovány za znehodnocené). Na Obr. 29 je možné vidět všechny sady OECT.



Obr. 29: 9 nových sad OECT umístěných do uzavíratelných nádob simulující prostředí s danou RH: a) Box - 1 s  $<10\%$  RH, b) Box - 2 s  $40 \pm 50\%$  RH, c) Box - 3 s  $70 \pm 80\%$  RH.

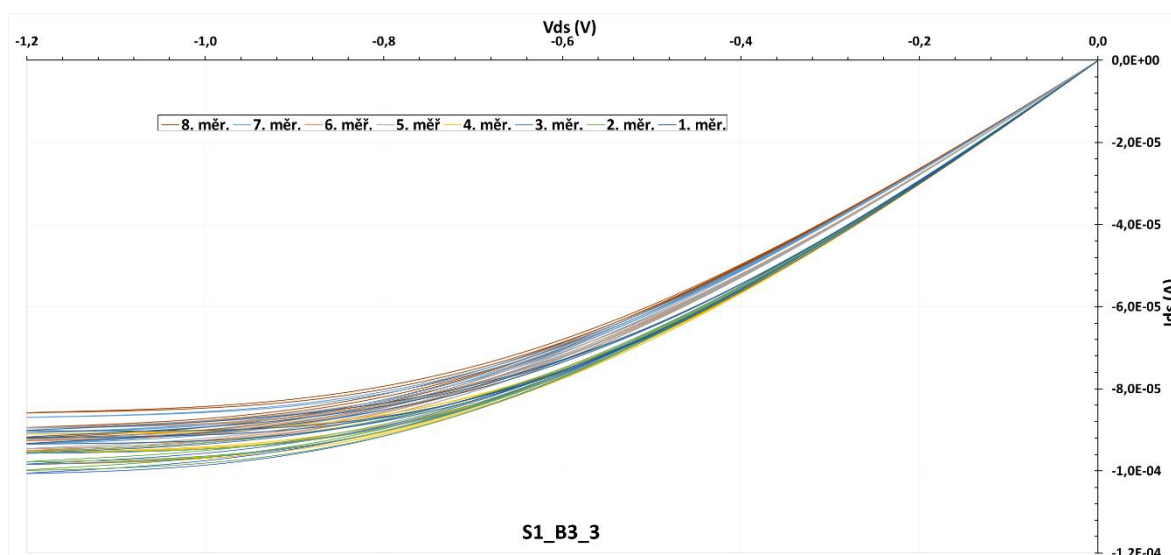
Byly změřeny výstupní charakteristiky znázorňující závislost  $I_{DS} = f(V_{DS})$  pro několik hodnot řídicího napětí  $V_{GS}$  ( $0 \text{ V} \div 1,2 \text{ V}$  po  $0,1 \text{ V}$ ). Změřeny byly taktéž převodní charakteristiky znázorňující závislost  $I_{DS} = f(V_{GS})$  pro různé hodnoty  $V_{DS}$  ( $0 \text{ V} \div 1,2 \text{ V}$  po  $0,1 \text{ V}$ ).

Pro potřeby charakterizace dynamických parametrů bylo zvoleno pulzně spínané řídicí napětí  $V_{GS}$  se střídou pulzů 1:1 (25 pulzů s periodou 1,25 s). Jako bezpečná hranice pro charakterizaci parametrů bylo zvoleno max. napětí  $V_{DS} = 1,2$  V a max. napětí  $V_{GS} = 0,85$  V.

## 5.5 První fáze měření

V rámci prvního měření OECT byly podle časového plánu, viz Příloha A měřeny výstupní charakteristiky  $I_{DS} = f(V_{DS})$  při  $V_{GS} = 0$  V, viz blíže popis experimentu v podkapitole 5.4.1. Data z těchto měření byla uspořádána do přehledných grafů znázorňujících časový vývoj výstupních křivek ve sledovaných prostředí s definovanou  $RH$ . Na Obr. 30, je znázorněn příklad změřené výstupní charakteristiky pro vzorek S1\_B3\_3 (Sada 1, Box 3 –  $RH \sim 70 \div 80\%$ , vzorek č.3), kde je barevně odlišeno celkem 8 změřených průběhů znázorňujících časový vývoj tranzistorového chování pro prostředí s danou  $RH$ .

Po diskuzi výsledků z těchto měření byla využita koncepce testování uplatněná u sady S2, tzn. 24-hodinová aklimatizace OECT bez IL a poté zahájení měření v čase  $t = 0$  h. Z toho byl určeno, že je pro účely měření dostatečné měřit v čase:  $t = 0$  h,  $t = 24$  h a  $t = 120$  h. Cílem bylo rozlišit změnu chování OECT po prvních 24 hodinách od depozice IL (vliv procesů s kratší dobou ustálení) a následně po celkem 120 hodinách od depozice IL (dodatečný vliv procesů s delší dobou ustálení).



Obr. 30: Příklad časového vývoje průběhů výstupních charakteristik při  $V_{GS} = 0$  V pro vzorek S1\_B3\_3 v prostředí s vysokou  $RH$  (Box 3,  $RH \sim 70 \div 80\%$ ), (jednotlivá měření barevně odlišena).

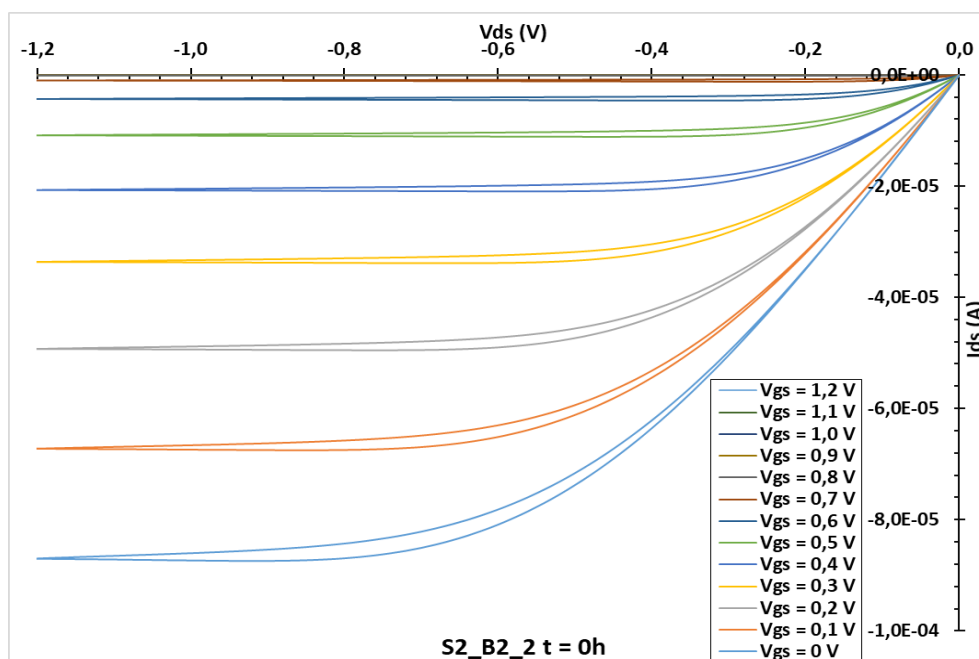
## 5.6 Druhá fáze měření

V rámci druhé fáze měření OECT byly dle časového plánu, změřeny kompletní statické a dynamické charakteristiky OECT, viz příloha B. Popis těchto experimentů je blíže uveden v podkapitole 5.4.2. Toto měření bylo zaměřeno na charakterizaci OECT a ověření vlivu vlhkosti na parametry OECT. Součástí této části je popis změřených statických a dynamických charakteristik OECT a způsob jakým byly vybrané parametry extrahovány v rámci elektrické charakterizace.

### 5.6.1 Měření statických charakteristik

#### Výstupní charakteristiky

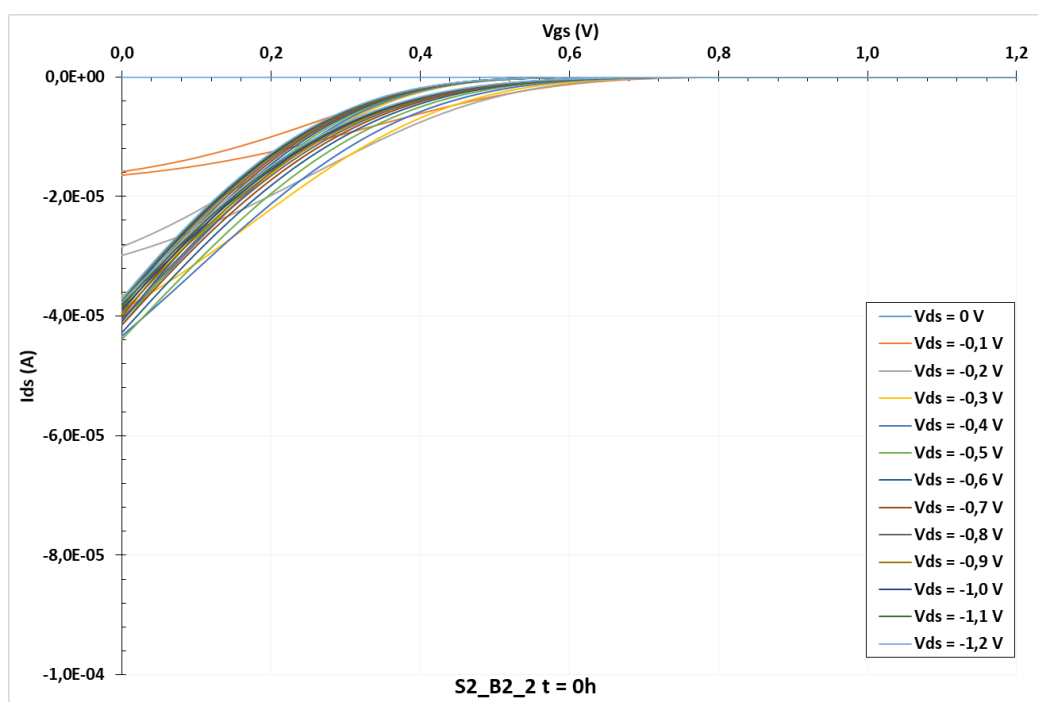
Účelem těchto měření bylo sledování časového vývoje výstupních charakteristik OECT umístěných ve 3 různých prostředích s různou  $RH$ . Změřené výstupní charakteristiky ukazují významný posun tranzistorového chování, které bylo možné nejvíce pozorovat u vzorků OECT uzavřených v boxu 1 (suché prostředí silikagelu s  $RH \sim 5 \div 10\%$ ). Časovým vývojem výstupních charakteristik OECT se přímo zabývá kapitola diskuze výsledků. Všechny změřené výstupní charakteristiky je možné vidět v Příloze F-H. Obr. 31 ilustruje příklad změřené převodní charakteristiky vzorku S2\_B2\_2, který byl umístěn v laboratorním prostředí s  $RH \sim 40 \div 50\%$  a změřen v čase  $t = 0$  h.



Obr. 31: Příklad změřené výstupní charakteristiky vzorku S2\_B2\_2.

## Převodní charakteristiky

Toto měření bylo rovněž zaměřeno na sledování časového vývoje sledovaných převodních charakteristik pro 3 různá prostředí s různou  $RH$ . Z těchto výsledných charakteristik byly určeny tyto parametry: prahové napětí  $V_{TH}$  a transkonduktance  $g_m$  (3). Všechny změřené převodní charakteristiky jsou uvedeny v Příloze I-K. Obr. 32 ilustruje příklad změřené převodní charakteristiky vzorku S2\_B2\_2, který byl umístěn v laboratorním prostředí s  $RH \sim 40 \div 50\%$  a změřen v čase  $t = 0$  h.

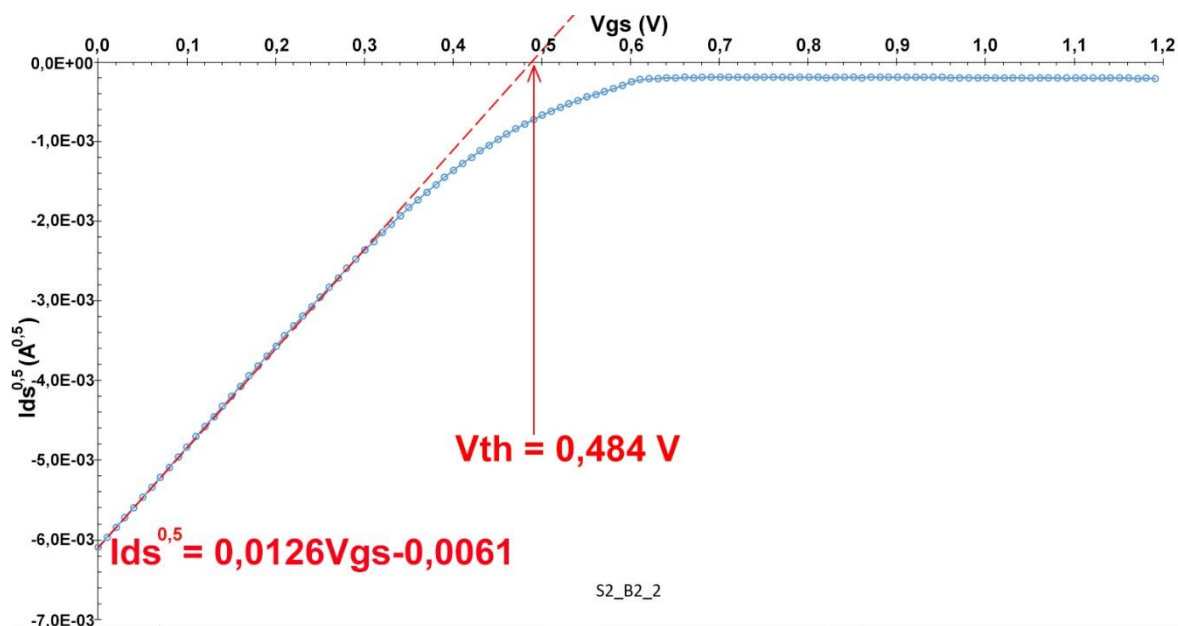


Obr. 32: Příklad změřené převodní charakteristiky vzorku S2\_B2\_2.

Prahové napětí  $V_{TH}$  a transkonduktance  $g_m$  byly z výsledných převodních charakteristik odečítány pomocí tzv. ESR metody („Extrapolation method in the saturation region“)[101]. Tato metoda definuje odečet prahového napětí z vykreslené charakteristiky  $I_{Dsat}^{0,5} - V_g$ , na níž se provede lineární extrapolace v saturované lineární části. Pro potřeby charakterizace byla hodnota prahového napětí  $V_{TH}$  vypočtena z rovnice přímky, která byla použita při extrapolaci (průnik extrapoláční přímky do osy napětí  $V_{GS}$ ). Pomocí získané rovnice extrapoláční přímky lze získat i hodnotu transkonduktance  $g_m$  podle (3), je však třeba respektovat, že osa proudu  $I_{DS}$  je vykreslena v první odmocnině a proto je nutný její přepočítání. Obr. 33 ilustruje vykreslenou charakteristiku  $I_{Dsat}^{0,5} - V_g$  pro vzorek S2\_B2\_2 a ukazuje,

jakým způsobem byly odečteny tranzistorové parametry. Pro ilustrovaný příklad bylo určeno prahové napětí  $V_{TH} = 0,484$  V a transkonduktance  $g_m = -1,532 \cdot 10^{-4}$  S.

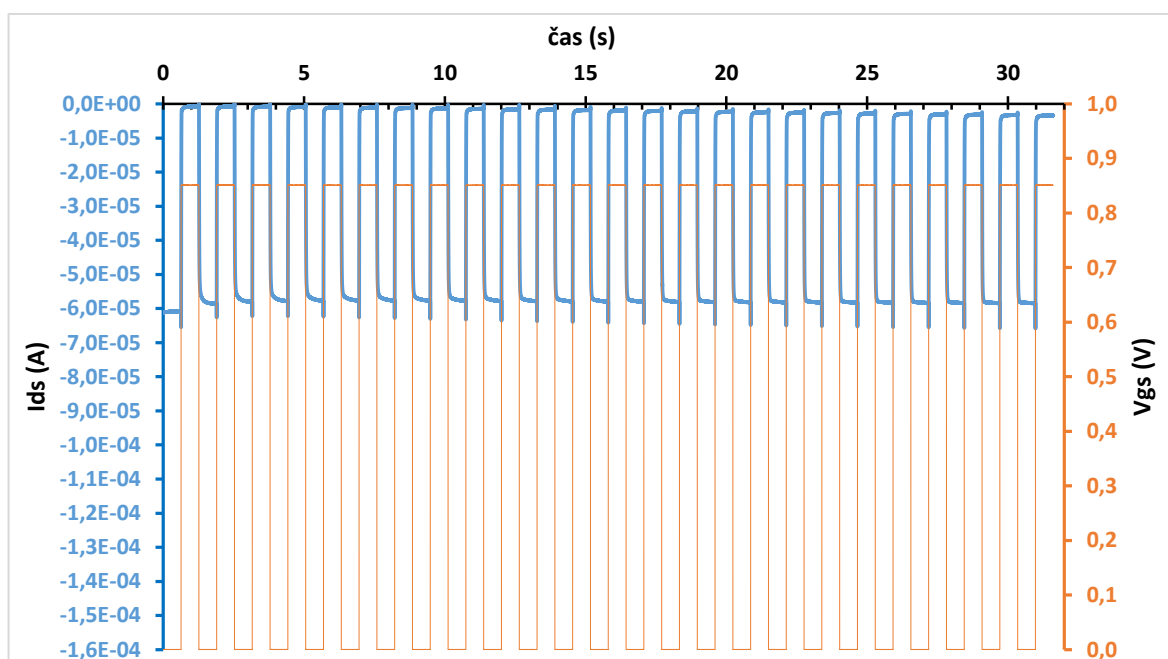
Parametry byly vždy odečítány při řídicím napětí  $V_{DS} = -1,2$  V, neboť zde převodní charakteristiky vykazovaly největší strmost. Všechna data získaná z měření převodních charakteristik jsou uvedena v příloze L či diskuzi výsledků v následující kapitole.



Obr. 33: Příklad vynesené  $I_{Dsat}^{0,5} - V_g$  charakteristiky dle ESR metody pro vzorek S2\_B2\_2 a ukázka odečtu prahového napětí  $V_{TH}$  z průniku extrapolační přímky s osou  $V_{GS}$ .

## 5.6.2 Měření dynamických charakteristik

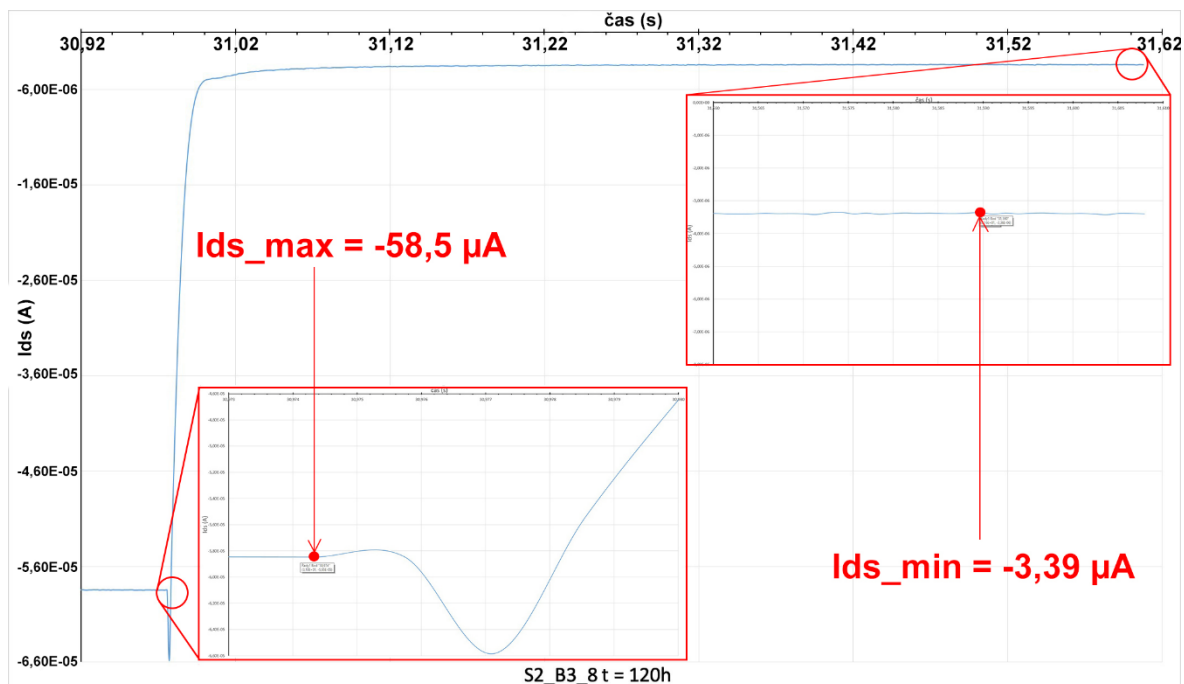
Účelem tohoto měření bylo sledování vývoje dynamických charakteristik OECT pro 3 různá prostředí s různou  $RH$ . Z výsledných dynamických charakteristik byly v rámci charakterizace určeny tyto parametry: rychlosti spínání  $t_{ON}$  (7) a vypínání  $t_{OFF}$  (8), spínací poměr  $I_{ON}/I_{OFF}$  (9). Všechny změřené dynamické charakteristiky jsou uvedeny v Příloze C-E. Na Obr. 34, je možné vidět příklad změřené dynamické charakteristiky pro prostředí s  $RH \sim 70 \div 80\%$ , která byla změřena v čase  $t=120$  h.



Obr. 34: Změřená dynamická charakteristika OECT, který byl po dobu  $t=120$ h umístěn v prostředí s  $RH \sim 70 \div 80\%$  (vzorek S2\_B3\_8).

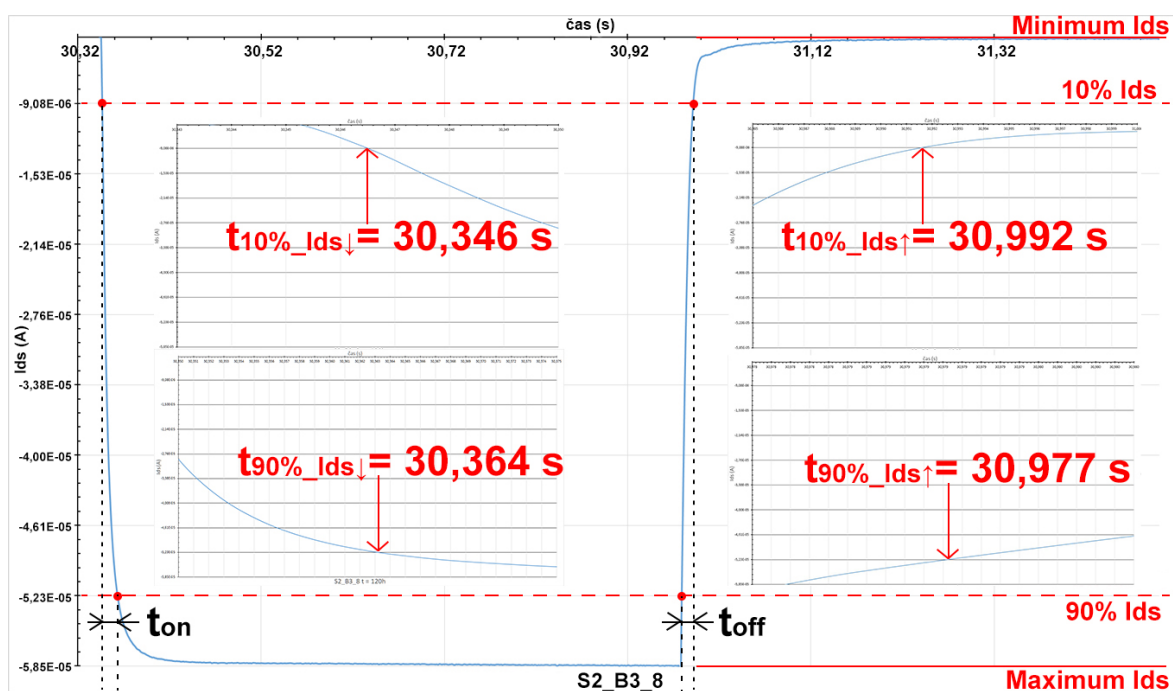
Charakterizace dynamických parametrů byla prováděna vždy na posledním změřeném pulzu, a to z důvodu předpokladu dostatečně ustáleného tranzistorového chování. Obr. 35 ilustruje dynamickou charakteristiku pro poslední změřený pulz a způsob jakým byly odečteny parametry pro získání spínacího poměru, viz rovnice (9). Na tomto obrázku je možné vidět parazitní kapacitní proudové špičky.





Obr. 35: Příklad detailního odečtu proudů  $I_{DS\_MAX}$  a  $I_{DS\_MIN}$  z posledního pulsu změřené dynamické charakteristiky (vzorek S2\_B3\_8).

Na Obr. 35 je rovněž možno vidět proudovou špičku v oblasti vypnutí OEECT, jedná se o parazitní vlivy způsobené nabíjecími a vybíjecími proudy v gate obvodu, které nerepresentují efektivní výstupní proud, a proto nebyly při odečtu proudových hodnot uvažovány.



Obr. 36: Příklad detailního odečtu spínacích časů pro získání časů spínání  $t_{ON}$  a vypínání  $t_{OFF}$  z posledního pulsu změřené dynamické charakteristiky (vzorek S2\_B3\_8).

Na Obr. 36 je možné vidět metodiku, jakou byly odečítány hodnoty proudů pro výpočet spínacího poměru a časy sepnutí  $t_{ON}$  (7) a vypnutí  $t_{OFF}$  (8). Při vyhodnocování byl vždy nalezen maximální proud  $I_{DS\_MAX}$  a minimální proud  $I_{DS\_MIN}$ , podle kterého se nastavil rozsah vertikální osy pro proud  $I_{DS}$  (proudové rozpětí). Tento rozsah byl následně přehledně rozdělen na 10 rovnoměrných částí, tak aby bylo možné s výhodou nalézt průnik křivky  $I_{DS}$  v 10 % či 90 %  $I_{DS}$  a následně pro tyto hodnoty odečíst časové hodnoty na horizontální ose. Obr. 36 rovněž ilustruje detailní odpočet časových hodnot pro zmíněné hodnoty 10 % a 90 % z proudového rozpětí. Z rozdílu odečtených časů byla následně určena rychlost sepnutí a vypnutí tranzistoru. Pro ilustrovaný příklad odečtu byly určeny hodnoty  $t_{ON} = 18$  ms a  $t_{OFF} = 15$  ms. Všechna data získaná z měření dynamických charakteristik jsou uvedena v příloze L a v diskuzi výsledků v následující kapitole.

## 6 Diskuze výsledků

Tato kapitola se zaměřuje na zhodnocení všech dosud změřených charakteristik a posouzení navržené měřicí metodiky. Předmětem diskuze je rovněž ověření vlivu vlhkosti na měření OECT, které byly umístěny ve třech prostředích s rozdílnou *RH*. V Tab. 9 (příloha L) jsou uvedeny všechny extrahované parametry získané ze statických a dynamických měření. Po diskuzi změřených výsledků navazuje posouzení navržené měřicí metodiky a návrh jejího zlepšení.

Všechny změřené charakteristiky z dynamických měření jsou uvedena v příloze C-E. Souhrnné grafy extrahovaných dynamických parametrů OECT jsou uvedeny na: Obr. 37 – spínací poměry, Obr. 38 – zapínací časy a Obr. 39 – vypínací časy.

Všechny změřené charakteristiky ze statických měření jsou v příloze F-H pro výstupní charakteristiky a v příloze I-K pro převodní charakteristiky. Souhrnné grafy extrahovaných statických parametrů OECT jsou uvedeny na: Obr. 40 – prahová napětí a Obr. 41 – transkonduktance.

### 6.1 Dynamická měření

#### Suché prostředí s *RH* <10 %

Měřené vzorky, které byly uzavřeny v boxu 1 se suchým prostředím silikagelu vykazovali v čase  $t = 0$  h (nakápnutí IL a aktivace OECT) navzájem rozdílné chování. To může signalizovat nedostatečný počet vzorků pro experimentální měření. U vzorku S2\_B1\_1 (viz Obr. 42) je možné pozorovat pomalejší dynamiku zapínání a vypínání a celkově horší spínací poměr. Vzorek S2\_B1\_2 (viz Obr. 43) má naopak ze všech 3 vzorků nejlepší dynamické chování a je u něj možné pozorovat ostré pulsy blízké se obdélníkovému průběhu. Tomu odpovídá i poměrně velmi dobrý spínací poměr. Vzorek S2\_B1\_3 (viz Obr. 44) má celkově nejhorší efektivitu modulace proudu a spínání. Je u něj možné pozorovat malý vliv řídicího napětí na výsledný průběh. U vzorků S2\_B1\_1 a S2\_B1\_3 jsou rovněž patrné proudové špičky v oblasti sepnutí a vypnutí tranzistoru, které jsou způsobeny nabíjecími a vybíjecími proudy v gate obvodu. Tyto proudy nebyly uvažovány při žádném z odečtu dat, neboť nereprezentují efektivní spínací proud tranzistoru.

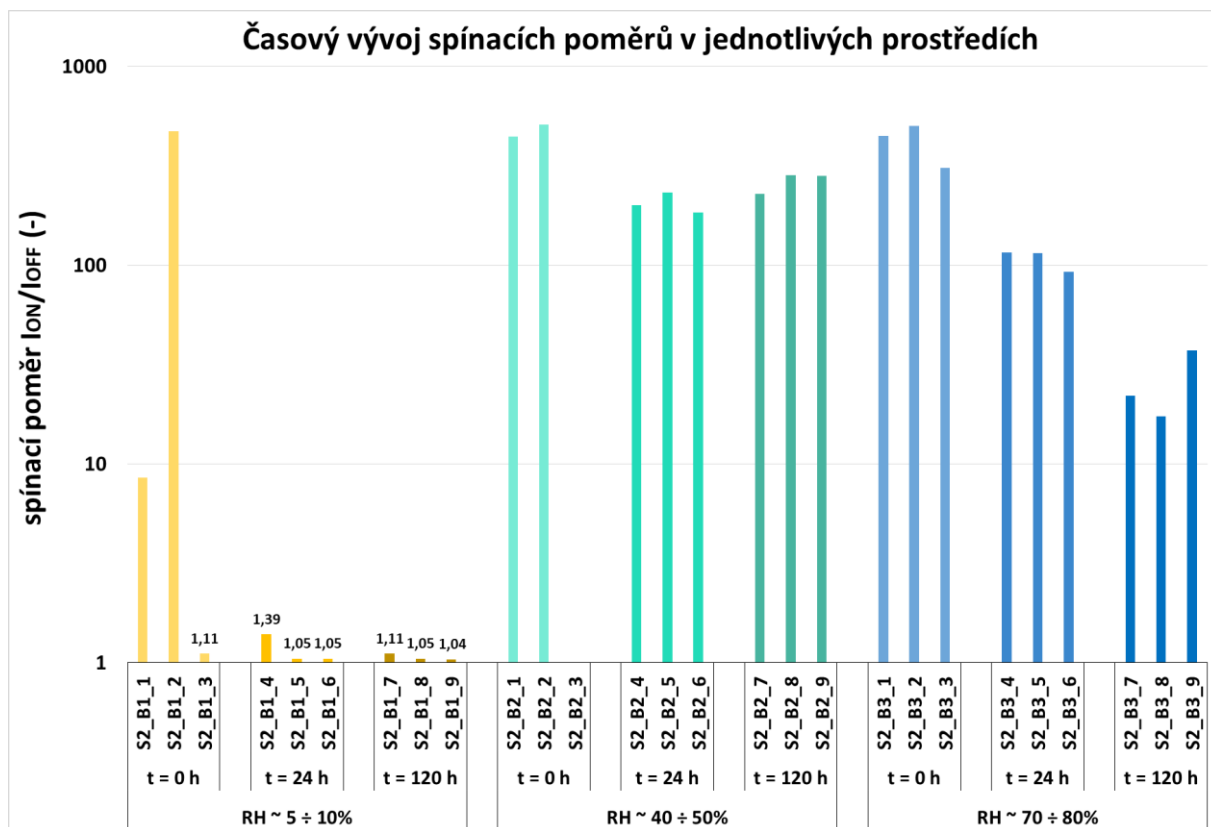
V čase  $t = 24$  h je u všech vzorků možné pozorovat výrazný vliv prostředí na degradaci tranzistorů. Je možné vidět dramatické zhoršení tvaru pulsů (velmi malá modulace výstupního proudu  $I_{DS}$  při stejné úrovni spínání  $V_{GS}$ ), které mají exponenciální průběh. Celkově je možné pozorovat mnohem menší spínací poměry. U vzorků v čase  $t = 120$  h nelze již pozorovat žádné větší výraznější změny způsobené degradací OECT.

### **Normální prostředí s RH ~ 40 ÷ 50 %**

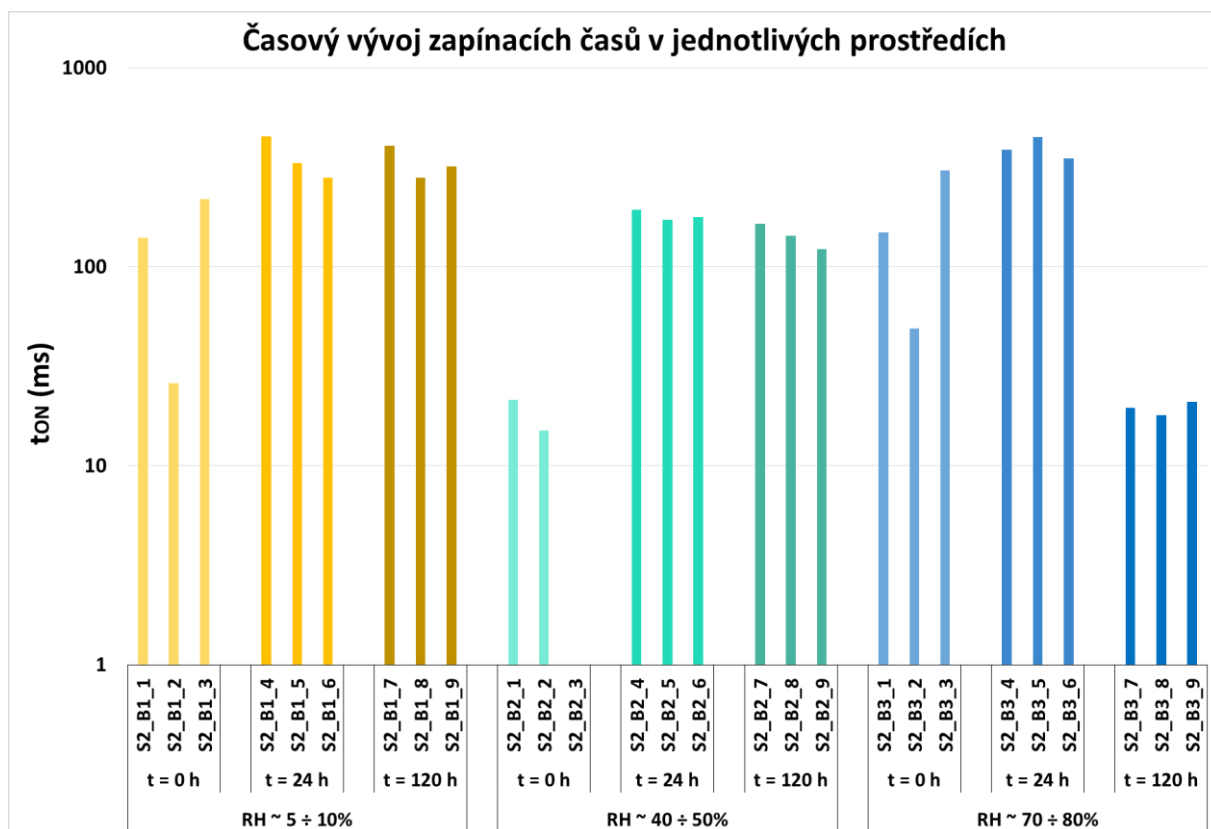
Vzorky uzavřené v boxu 2 mají v čase  $t = 0$  h velmi dobré dynamické průběhy blíží se obdélníkovým pulsům, mají i velmi dobré spínací poměry. Výjimkou byl vzorek S2\_B2\_3 (viz Obr. 53) u který v rámci všech měření nevykazoval tranzistorové vlastnosti a byl považován za defektní. V čase  $t = 24$  h je u všech vzorků možné pozorovat zhoršení tvaru jednotlivých pulsů (zejména při zapnutí tranzistoru), avšak u zapínacích a vypínacích časů je možné pozorovat mírné zlepšení. V čase  $t = 120$  h nedochází k žádnému dalšímu výraznějšímu vývoji. Je možné pozorovat jen mírné zhoršení tvaru dynamických pulzů s velmi mírným poklesem zapínacích a vypínacích časů. Spínací poměr u všech vzorků jen velmi mírně vzrostl.

### **Vlhké prostředí s RH ~ 80 ÷ 90 %**

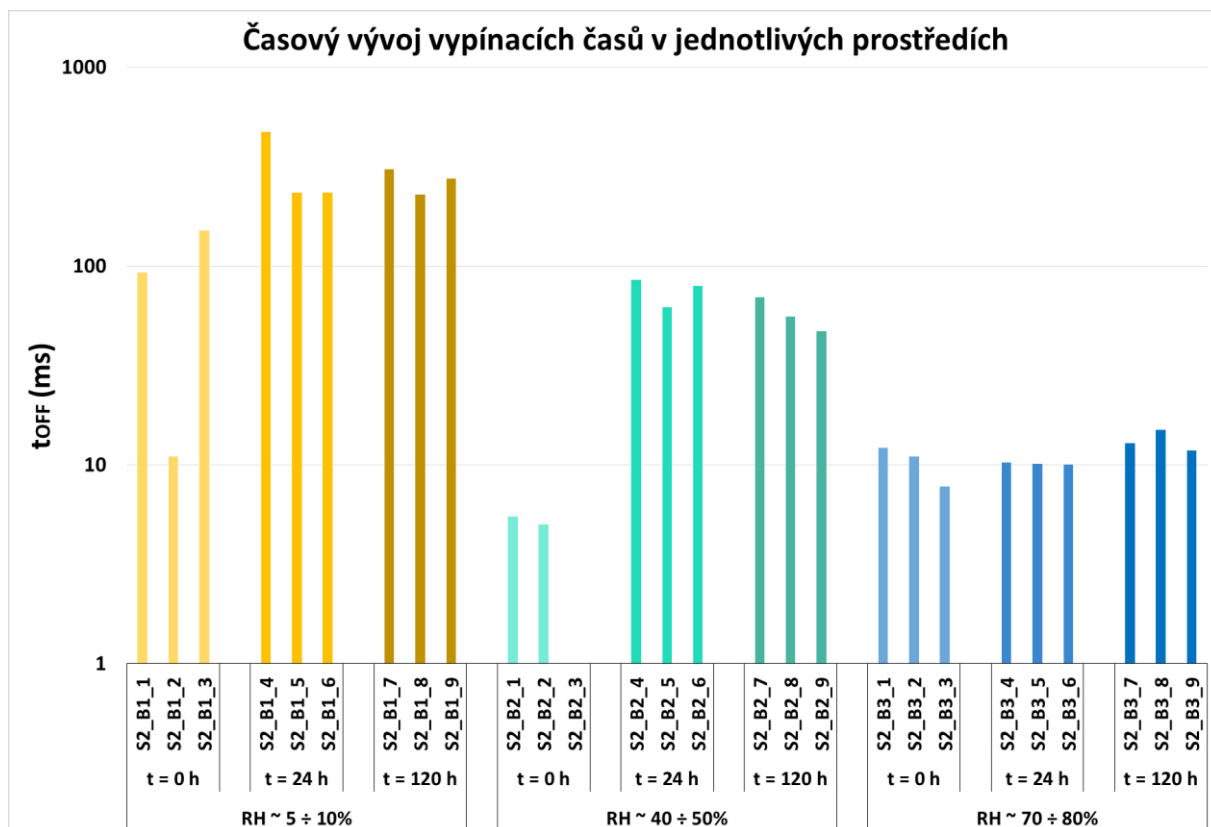
Vzorky z vlhkého prostředí boxu 3 mají již v čase  $t = 0$  h téměř anomální chování, neboť změřené pulzy neodpovídají ani obdélníkovému či exponenciálnímu průběhu. Pulzy mají totiž v oblasti sepnutí téměř pilovitý průběh. Vzorek S2\_B3\_3 (viz Obr. 62) má nejvíce anomální chování, dochází u něj k nežádoucí deformaci profilu pulsů a k postupnému snižování výstupního proudu. Pokud bychom neuvažovali absenci ustálení  $I_{DS}$  v periodě spínání  $V_{GS}$ , vykazují všechny vzorky na počátku velmi dobré spínací poměry. V čase  $t = 24$  h se deformace pulzů ještě více prohlubují a pilovité průběhy mění svojí směrnici. Dochází rovněž k poklesu spínacích poměrů. V čase  $t = 120$  h je možné pozorovat výraznou změnu změřených pulzů. Pulzy jsou mnohem více „ploché“, a je zde možné sledovat další pokles spínacích poměrů, tranzistory mají ale stále dostatečné spínací vlastnosti. Zapínací časy OECT poklesy, vypínací však časy mírně stouply.



Obr. 37: Časový vývoj spínacích poměrů OECT v jednotlivých prostředí s rozdílnou RH.



Obr. 38: Časový vývoj zapínacích časů  $t_{ON}$  OECT v jednotlivých prostředí s rozdílnou RH.



Obr. 39: Časový vývoj vypínacích časů  $t_{OFF}$  OECT v jednotlivých prostředích s rozdílnou RH.

### Shrnutí získaných poznatků

Dynamická měření pro 3 různá prostředí s rozdílnou RH ukázala, že největší vliv na degradaci OECT má suché prostředí. Dochází zde hlavně k výraznému zhoršení spínacích vlastností tranzistoru, zejména pak k prakticky úplnému zániku spínacího poměru. U normálního prostředí nedochází k žádným velkým změnám působících na spínání tranzistoru. V tomto prostředí vykazují OECT po celou dobu největší spínací poměry, avšak dochází zde k postupnému zakřivení měřených pulzů a tím i řádovému prodloužení spínacích časů. OECT ve vlhkém prostředí vykazují anomální chování, které se projevuje zakřivením pulzů do pilovitého tvaru. Po 120 h ale navíc dochází k výrazné změně tvaru měřených pulzů (více plochý tvar).

U suchého prostředí bylo možné pozorovat parazitní proudové špičky, které jsou dány nabíjecími a vybíjecími proudy v gate obvodu, a které nereprezentují efektivní spínací proud tranzistoru. Toto bylo možné pozorovat i u OECT umístěných ve vlhkém prostředí a změřených v čase  $t = 120$  h.

Téměř u všech změřených OECT je možné pozorovat postupné snižování špičkové hodnoty proudu v čase. To je dáno rozdílnou účinností mezi zapínáním a vypínáním tranzistoru. Ve zjednodušeném pohledu dochází při vypnutí OECT k injekci kationtů z elektrolytu do aktivního kanálu. Kationty způsobují dedopování a redukci PEDOT, což má za následek snížení děrové vodivosti a tedy snížení proudu kanálem. Naopak při vypnutí OECT ( $V_{GS} = 0$  V) neexistuje ekvivalentní elektrická síla, která by kationty extrahovala. Dochází tedy k jisté akumulaci kationtů v aktivním kanále. Proto je u OECT možné typicky pozorovat delší zapínací časy. Jedná se o známou vlastnost OECT, kterou popisují např. následující zdroje [17, 27].

## 6.2 Statická měření

### 6.2.1 Výstupní charakteristiky

#### Suché prostředí s RH <10%

Výstupní charakteristiky vzorků umístěných v suchém prostředí vykazují v čase  $t = 0$  h typické výstupní charakteristiky OECT (výrazná lineární oblast poté saturované proudové průběhy). Výjimkou je vzorek S2\_B1\_3 (viz Obr. 71) u kterého lze pozorovat jen mírnou závislost na řídicím napětí a lze jej považovat za defektní. U vzorků v časech  $t = 24$  h a  $t = 120$  h lze pozorovat výraznou degradaci výstupní charakteristik, kde již není možné pozorovat tranzistorové chování tranzistoru. U vzorku S2\_B1\_4 (viz Obr. 72) je možné vidět výraznou hysterezi, která je obrazem pomalé dynamiky měřeného vzorku.

#### Normální prostředí s RH ~ 40 ÷ 50%

U normálního prostředí není možné pozorovat žádný výrazný vliv prostředí na chování OECT. Celkově však lze v průběhu času pozorovat mírný pozitivní vliv na velikost výstupních proudů. V čase je rovněž možné pozorovat lehkou změnu strmosti lineární části charakteristik, jinak toto prostředí nemá na OECT žádný výrazný degradační vliv.

### **Vlhké prostředí s RH ~ 70 ÷ 80%**

U vlhkého prostředí je možné v čase pozorovat postupné klesání výstupního napětí ve všech změřených vzorcích. Charakteristiky se v čase postupně zakřivují do „oblouků“ a zaniká přechodová oblast mezi lineární a saturovanou částí charakteristiky. Postupný pokles strmosti lineární části výstupních charakteristik u těchto OECT vypovídá o snižování pohyblivosti nosičů náboje v aktivním kanále.

### **6.2.2 Převodní charakteristiky**

#### **Suché prostředí s RH <10%**

V čase  $t = 0$  h je možné pozorovat převodní charakteristiky odpovídající chování OECT pouze u vzorků S2\_B1\_1 (viz Obr. 96) a S2\_B1\_2 (viz Obr. 97). Všechny ostatní vzorky vykazují v čase „ploché“ křivky bez strmosti, které znázorňují sadu posunutých lineárních průběhů, které neodpovídají tranzistorovému chování. Vlivem výrazné degradace v čase ztrácí schopnost modulace proudu a uzavření řídicím napětím. U těchto vzorků tedy nebylo možné určit parametry prahového napětí či transkonduktance.

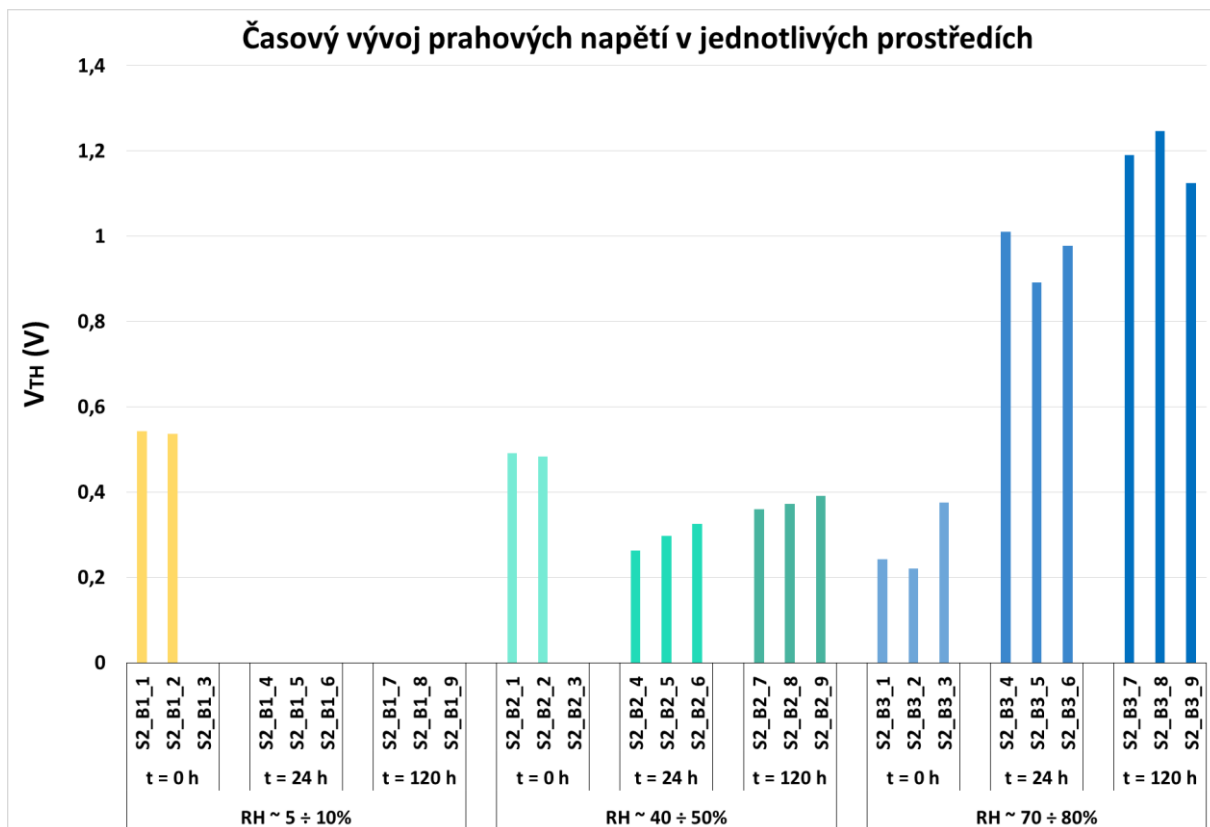
#### **Normální prostředí s RH ~ 40 ÷ 50%**

Převodní charakteristiky OECT z normálního prostředí vykazují průběhy dané variací výstupních napětí, které odpovídají tranzistorovému chování. Až na defektní vzorek S2\_B2\_3 (viz Obr. 107). V čase  $t = 24$  h dochází ke snížení strmosti u sledovaných vzorků, čemuž odpovídají i určené hodnoty transkonduktance, viz Obr. 40. Dochází také k poklesu prahových napětí, viz Obr. 41. V čase  $t = 120$  h však dochází naopak k jejich mírnému růstu.

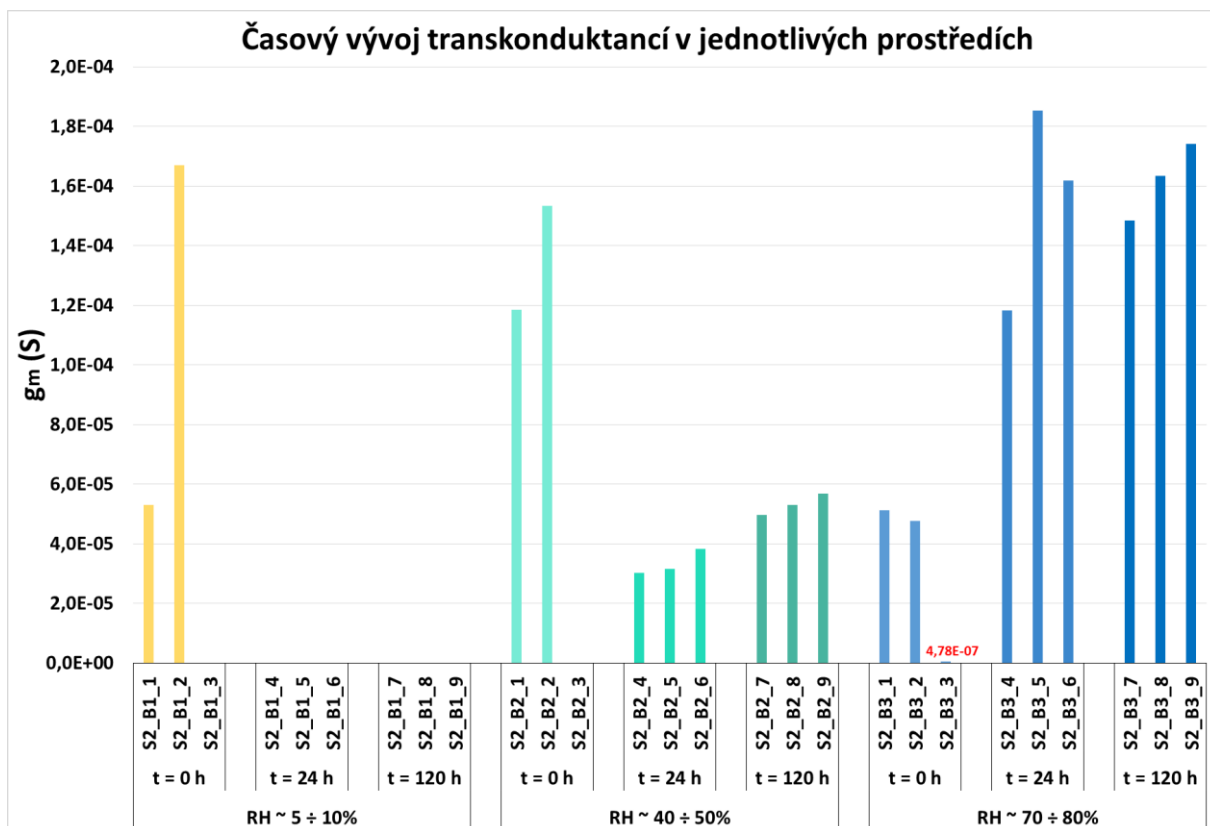
#### **Vlhké prostředí s RH ~ 70 ÷ 80%**

Převodní charakteristiky z tohoto prostředí vykazují největší strmost ze všech sledovaných prostředí a lze pozorovat, že parametr transkonduktance v čase roste a poté mírně klesá (viz Obr. 41). Naopak má toto prostředí negativní vliv na prahové napětí, které v čase výrazně roste (viz Obr. 40).





Obr. 40: Časový vývoj prahových napětí OECT v jednotlivých prostředí s rozdílnou RH.



Obr. 41: Časový vývoj transkonduktancí OECT v jednotlivých prostředí s rozdílnou RH.

### 6.3 Návrh na zlepšení měřicí metodiky

Experimentální měření, které bylo zaměřeno na ověření navržené měřicí metodiky pro charakterizaci OECT ukázalo, že navrženou metodiku je vhodné modifikovat a dále rozšířit několika možnými způsoby.

Navržené body zlepšení:

- Zvýšení počtu vzorků. Ukázalo se, že pouze 3 vzorky jsou vzhledem k značnému rozptylu chování OECT v rámci jedné sady vzorků nedostatečné pro kvantifikaci chování OECT v daných prostředích. Např. 5 testovaných vzorků by již poskytlo spolehlivější údaje o chování OECT.
- Optická inspekce na každém vzorku OECT. Tato inspekce by pomohla odhalit defektní či rozdílné vzorky ještě před samotnou elektrickou charakterizací OECT. Bylo by možné např. zkoumat variabilitu geometrie, odhalit tiskové vady, detekovat zkratky či přerušení apod.
- Ověření vlivu vlhkosti na vodivost elektrolytu. Vhodné by bylo doplnit testovací tiskový layout o samostatné měřicí elektrody mimo strukturu OECT.
- Stanovení elektrochemického okna elektrolytu [102]. Tento parametr určuje bezpečný rozsah napětí, při kterých nedochází k nevratným deformacím elektrolytu. Na základě toho je vhodné upravit měřicí napěťové rozsahy pro charakterizaci OECT.
- Změření optického absorpčního spektra [103]. Tímto procesem je možné detekovat možnou kontaminaci elektrolytu, která se projevuje parazitní oblastí absorpce ve viditelném spektru. Pokud je kapalina čistá, tak má pouze jedno výrazné maximum v oblasti UV spektra.

## Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na oblast tištěné organické elektroniky se specifickým zaměřením na organické elektrochemické tranzistory. V úvodní části byly popsány základní tiskové technologie nezbytné pro výrobu tištěných součástek jako OECT. Byly rovněž popsány základní vodivostní mechanismy konjugovaných polymerů, které se využívají při výrobě OECT. Teoretická část práce se zaměřila na popis postupného vývoje organických tranzistorů. Celá jedna část byla zaměřená pouze na OECT. Tedy popis jeho základních vlastností a detailní popis jeho principu. Navazující část se přímo zaměřila na materiálové konfigurace OECT, kde byly zohledněny všechny jeho části. Další část práce byly zaměřena na teoretické předpoklady nutné k charakterizaci OECT a způsoby extrakce parametrů ze změřených dat OECT.

Praktická část práce byla zaměřena na návrh vhodné měřicí metodiky pro charakterizaci OECT. Byla navržena měřicí metodika, která byla doplněna o experimentální ověření vlivu vlhkosti na chování OECT. Na sérii vzorků umístěných ve třech prostředích s různou  $RH$  byla tato metodika měřena ve dvou fázích. Pomocí první fáze bylo zjištěno vhodné časové rozložení jednotlivých měření pouze na výstupních charakteristikách, zatímco druhá fáze se již plně zaměřovala na charakterizaci OECT.

V druhé fázi měření byly získány statické a dynamické charakteristiky reprezentující časové chování měřených OECT v prostředích s rozdílnou  $RH$ . Ze získaných charakteristik byly úspěšně získány tranzistorové parametry. Získané parametry a změřené charakteristiky byly předmětem diskuze poslední části práce. Diskuze výsledků odhalila vliv vlhkosti na chování měřených OECT. Jako celkově nejhůře působící se projevilo suché prostředí s  $RH < 10\%$ , u kterého docházelo k významné degradaci OECT. Normální prostředí s  $RH \sim 40 \div 50\%$  mělo ze všech sledovaných prostředí nejmenší degradabilní účinky na dlouhodobé chování OECT. U vlhkého prostředí s  $RH \sim 70 \div 80\%$  bylo možné pozorovat mírné degradabilní účinky prostředí na chování tranzistoru. Viditelné to bylo zejména u dynamických charakteristik. Vlhké prostředí však vykazovalo největší strmost převodních charakteristik, a tedy i nejvyšší transkonduktanci. Experimentální měření OECT však ukázalo i nedostatky navržené měřicí metodiky, a proto se závěrečná část práce věnuje návrhu jejího možného zlepšení.

OECT jsou v současné době předmětem výzkumu mnoha výzkumných týmů po celém světě. Klíčovým problémem OECT je jejich stabilita, která vyžaduje dlouhodobé a náročné testování. Dosud se nepodařilo zkonstruovat OECT, které by měly prakticky vyhovující parametry. Přesto jsou OECT velmi perspektivní oblastí např. pro oblast snímání biologických signálů a pro detekci analytů v tělních tekutinách.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SHIRAKAWA, Hideki, Edwin J. LOUIS, Alan G. MACDIARMID, Chwan K. CHIANG a Alan J. HEEGER. Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications* [online]. 1977, (16), 578–580. ISSN 00224936. Dostupné z: doi:10.1039/C39770000578
- [2] The Nobel Prize in Chemistry 2000. 2019 [online]. 2000 [vid. 2019-10-11]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/summary/>
- [3] NISATO, Giovanni, Donald LUPO a Simone GANZ. *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and applications* [online]. 2016. ISBN 9789814669757. Dostupné z: doi:10.1201/b20043
- [4] KHAN, Saleem, Leandro LORENZELLI a Ravinder S. DAHIYA. Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2015, **15**(6), 3164–3185. ISSN 1530437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2014.2375203
- [5] TORRES SEVILLA, Galo A. a Muhammad M. HUSSAIN. Printed organic and inorganic electronics: Devices to systems. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems* [online]. 2017, **7**(1), 147–160. ISSN 21563357. Dostupné z: doi:10.1109/JETCAS.2016.2619979
- [6] KLÍMA, Filip. *Tištěné součástky pro elektroniku*. B.m., 2018. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni.
- [7] GODLINSKI, Dirk, Ralf ZICHNER, Volker ZÖLLMER a Reinhard R. BAUMANN. Printing technologies for the manufacturing of passive microwave components: antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* [online]. 2017, **11**(14), 2010–2015. ISSN 1751-8725. Dostupné z: doi:10.1049/iet-map.2017.0042
- [8] R.PARASKOV;, E.BECKER;, T.RIEDL;, H.JOHANNES; a W.KOWALSKY. Large Area Elcetronics Using Printing Methods. *Proceedings IEEE* [online]. 2005, **93**(7), 1321–1329. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1461589](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1461589)
- [9] ŘEBOUN, Jan; *Tištěná a flexibilní elektronika - Tiskové technologie, Z prezentace k předmětu KET/ ITE1*. Plzeň: Západočeská univerzita. 2017
- [10] PRETL, Silvan; *Heterostruktury na bázi organických vodivých materiálů* [online]. B.m., 2015. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/23037>
- [11] CORREIA, V., K. Y. MITRA, H. CASTRO, J. G. ROCHA, E. SOWADE, R. R. BAUMANN a S. LANCEROS-MENDEZ. Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2018, **31**, 364–371. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.016

- [12] ECKART. *Metallic Ink for Gravure Printing* [online]. 2013 [vid. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.eckart.net/markets/printing-industry/printing-process/gravure-printing.html>
- [13] OPTOMECC. *Optomec's Aerosol Jet 3D printing technology is being used to mass-produce smartphones and other consumer devices embedded with commercial antennas* [online]. 2018 [vid. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-core-applications/printed-antennas/>
- [14] NAVRÁTIL, Jiří; *Aerosol Jet®technologie, Z prezentace k předmětu KET/ ITE1*. Plzeň: Západočeská univerzita. 2017
- [15] DERBY, Brian. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution. *Annual Review of Materials Research* [online]. 2010, **40**(1), 395–414. ISSN 1531-7331. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104502
- [16] MRAČEK, Lukáš. *Zlepšení stability organického elektrochemického tranzistoru omezením vlivu redoxní fronty*. B.m., 2019. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni.
- [17] NILSSON, David. *An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic*. 2005. ISBN 9185297267.
- [18] NEŠPŮREK, Stanislav a Miloš MATYÁŠ. Elektroaktivní organické materiály. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 2006, **51**(1), 31–50. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/141298>
- [19] *The Basics: Polymer Definition and Properties* [online]. 2018 [vid. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://plastics.americanchemistry.com/plastics/The-Basics/>
- [20] SHARPE, Pete. *Making Plastics: From Monomer to Polymer* [online]. 2015 [vid. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2015/september/making-plastics-monomer-polymer>
- [21] WEITER, Martin. *Pokročilé materiály pro organickou elektroniku a fotoniku* [online]. Edice Habi. Brno: Fakulta chemická Vysokého učení technického v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4671-7. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18120278-Vysoke-uceni-technicke-v-brne-doc-ing-martin-weiter-ph-d.html>
- [22] BALINT, Richard, Nigel J. CASSIDY a Sarah H. CARTMELL. Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia* [online]. 2014, **10**(6), 2341–2353. ISSN 18787568. Dostupné z: doi:10.1016/j.actbio.2014.02.015
- [23] PROKEŠ, Jan, Jaroslav STEJSKAL a Mária OMASTOVÁ. Polyanilin a polypyrrol - dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy*. 2001, **95**(8), 484–492.
- [24] HRUBÝ, Lukáš; *Měření vlastností organických materiálů s vlastní vodivostí*. Plzeň, 2010. Západočeská univerzita.

- [25] KITTLESEN, Gregg P., Henry S. WHITE a Mark S. WRIGHTON. Chemical derivatization of microelectrode arrays by oxidation of pyrrole and N-methylpyrrole: fabrication of molecule-based electronic devices. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1984, **106**(24), 7389–7396. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja00336a016
- [26] PAUL, Elizabeth W., Antonio J. RICCO a Mark S. WRIGHTON. Resistance of polyaniline films as a function of electrochemical potential and the fabrication of polyaniline-based microelectronic devices. *The Journal of Physical Chemistry* [online]. 1985, **89**(8), 1441–1447. ISSN 0022-3654. Dostupné z: doi:10.1021/j100254a028
- [27] RIVNAY, Jonathan, Sahika INAL, Alberto SALLEO, Róisín M. OWENS, Magnus BERGGREN a George G. MALLIARAS. Organic electrochemical transistors. *Nature Reviews Materials* [online]. 2018, **3**. ISSN 20588437. Dostupné z: doi:10.1038/natrevmats.2017.86
- [28] BRAGA, Daniele a Gilles HOROWITZ. High-Performance organic field-effect transistors. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(14–15), 1473–1486. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200802733
- [29] FRIEDLEIN, Jacob T., Robert R. MCLEOD a Jonathan RIVNAY. Device physics of organic electrochemical transistors. *Organic Electronics* [online]. 2018, **63**(June), 398–414. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2018.09.010
- [30] BORTOLI, Fabio De. *Characterization of organic electrochemical transistors printed with 3D-Stereolithography*. B.m., 2019. Politecnico di Torino.
- [31] SALMANI-REZAIE, Salva. *Organic electrochemical transistor, understanding and modifying for sensing applications*. B.m., 2016. University of Alberta.
- [32] ŠOJDR, Marek. *Návrh nízko-příkonového interního napěťového regulátoru pro automobilové aplikace*. B.m., 2019. Vysoké učení technické v Brně.
- [33] HOROWITZ, Gilles, Riadh HAJLAOUI, Habib BOUCHRIHA, Ramzi BOURGUIGA a Mohcen HAJLAOUI. Concept of 'threshold voltage' in organic field-effect transistors. *Advanced Materials* [online]. 1998, **10**(12), 923–927. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1521-4095(199808)10:12<923::AID-ADMA923>3.0.CO;2-W
- [34] LINGSTEDT, Leona Viola. *Organic Electrochemical Transistor for Biological Applications*. 2019.
- [35] EHLICH, Jiří. *Příprava organických elektrochemických tranzistorů pro biosenzoriku*. B.m., 2015. Vysoké učení technické v Brně.
- [36] WANG, Cheng Yin, Canek FUENTES-HERNANDEZ, Wen Fang CHOU a Bernard KIPPELEN. Top-gate organic field-effect transistors fabricated on paper with high operational stability. *Organic Electronics* [online]. 2017, **41**, 340–344. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2016.11.026
- [37] CHAIDOGIANNOS, G., F. PETRAKI, N. GLEZOS, S. KENNOU a S.

- NEŠPŮREK. Soluble substituted phthalocyanines for OFET applications. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 2008, **152**(1–3), 105–108. ISSN 09215107. Dostupné z: doi:10.1016/j.mseb.2008.06.025
- [38] AL NAIM, Abdullah, Adam HOBSON, Richard T. GRANT, Antonis DRAGONEAS, Mark HAMPTON, Chris DUNSCOMBE, Tim RICHARDSON, J. Emyr MACDONALD a Martin GRELL. Water-gated organic nanowire transistors. *Organic Electronics* [online]. 2013, **14**(4), 1057–1063. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2013.01.024
- [39] ZHANG, Qiaoming, Francesca LEONARDI, Stefano CASALINI, Inés TEMIÑO a Marta MAS-TORRENT. High performing solution-coated electrolyte-gated organic field-effect transistors for aqueous media operation. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1), 39623. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep39623
- [40] CHO, J. H., J. LEE, Y. HE, B. S. KIM, T. P. LODGE a C. D. FRISBIE. High-Capacitance Ion Gel Gate Dielectrics with Faster Polarization Response Times for Organic Thin Film Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2008, **20**(4), 686–690. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200701069
- [41] HAMEDI, Mahiar, Lars HERLOGSSON, Xavier CRISPIN, Rebeca MARCILLA, Magnus BERGGREN a Olle INGANÄS. Fiber-Embedded Electrolyte-Gated Field-Effect Transistors for e-Textiles. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(5), 573–577. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200802681
- [42] XIA, Yu, JeongHo CHO, Bryan PAULSEN, C. Daniel FRISBIE a Michael J. RENN. Correlation of on-state conductance with referenced electrochemical potential in ion gel gated polymer transistors. *Applied Physics Letters* [online]. 2009, **94**(1), 013304. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3058694
- [43] THIEMANN, S., S. J. SACHNOV, M. GRUBER, F. GANNOTT, S. SPALLEK, M. SCHWEIGER, J. KRÜCKEL, J. KASCHTA, E. SPIECKER, P. WASSERSCHIED a J. ZAUMSEIL. Spray-coatable ionogels based on silane-ionic liquids for low voltage, flexible, electrolyte-gated organic transistors. *J. Mater. Chem. C* [online]. 2014, **2**(13), 2423–2430. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/C3TC32465F
- [44] MELZER, Katharina, Marcel BRÄNDLEIN, Bogdan POPESCU, Dan POPESCU, Paolo LUGLI a Giuseppe SCARPA. Characterization and simulation of electrolyte-gated organic field-effect transistors. *Faraday Discuss.* [online]. 2014, **174**, 399–411. ISSN 1359-6640. Dostupné z: doi:10.1039/C4FD00095A
- [45] CHAO, Shuchi a Mark S. WRIGHTON. Characterization of a solid-state polyaniline-based transistor: water vapor dependent characteristics of a device employing a poly(vinyl alcohol)/phosphoric acid solid-state electrolyte. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1987, **109**(22), 6627–6631. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja00256a011
- [46] THACKERAY, James W., Henry S. WHITE a Mark S. WRIGHTON. Poly(3-methylthiophene)-coated electrodes: optical and electrical properties as a function of redox potential and amplification of electrical and chemical signals using poly(3-methylthiophene)-based microelectrochemical transistors. *The Journal of Physical*



- Chemistry* [online]. 1985, **89**(23), 5133–5140. ISSN 0022-3654. Dostupné z: doi:10.1021/j100269a048
- [47] THACKERAY, James W. a Mark S. WRIGHTON. Chemically responsive microelectrochemical devices based on platinized poly(3-methylthiophene): variation in conductivity with variation in hydrogen, oxygen, or pH in aqueous solution. *The Journal of Physical Chemistry* [online]. 1986, **90**(25), 6674–6679. ISSN 0022-3654. Dostupné z: doi:10.1021/j100283a016
- [48] OMASTA, Lukáš. *Printed biosensor based on organic electrochemical transistor*. B.m., 2019. Vysoké učení technické v Brně.
- [49] KIRCHMEYER, Stephan a Knud REUTER. Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Journal of Materials Chemistry* [online]. 2005, **15**(21), 2077. ISSN 0959-9428. Dostupné z: doi:10.1039/b417803n
- [50] NILSSON, David, Robert FORCHHEIMER, Magnus BERGGREN a Nathaniel ROBINSON. The electrochemical transistor and circuit design considerations. *Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design* [online]. 2005, **3**, 349–352. Dostupné z: doi:10.1109/ECCTD.2005.1523132
- [51] ANDERSSON ERSMAN, Peter, David WESTERBERG, Deyu TU, Marie NILSSON, Jessica ÅHLIN, Annelie EVEBORN, Axel LAGERLÖF, David NILSSON, Mats SANDBERG, Petronella NORBERG, Magnus BERGGREN, Robert FORCHHEIMER a Göran GUSTAFSSON. Screen printed digital circuits based on vertical organic electrochemical transistors. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2017, **2**(4), 045008. ISSN 2058-8585. Dostupné z: doi:10.1088/2058-8585/aa903a
- [52] T. FRIEDLEIN, Jacob. *Device physics and material science of organic electrochemical transistors*. B.m., 2017. University of Washington.
- [53] LIM, Kyounga, Sunghoon JUNG, Seunghun LEE, Jinhee HEO, Juyun PARK, Jae-Wook KANG, Yong-Cheol KANG a Do-Geun KIM. The enhancement of electrical and optical properties of PEDOT:PSS using one-step dynamic etching for flexible application. *Organic Electronics* [online]. 2014, **15**(8), 1849–1855. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2014.04.014
- [54] KAPHLE, Vikash, Shiyi LIU, Akram AL-SHADEEDI, Chang-Min KEUM a Björn LÜSSEM. Contact Resistance Effects in Highly Doped Organic Electrochemical Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2016, **28**(39), 8766–8770. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201602125
- [55] CARLBERG, C. Ionic transport and electronic structure in poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Solid State Ionics* [online]. 1996, **85**(1–4), 73–78. ISSN 01672738. Dostupné z: doi:10.1016/0167-2738(96)00043-4
- [56] NILSSON, D, M CHEN, T KUGLER, T REMONEN, M ARMGARTH a M BERGGREN. Bi-stable and Dynamic Current Modulation in Electrochemical Organic Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2002, **14**(1), 51–54. ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:10.1002/1521-4095(20020104)14:1<51::AID-

ADMA51>3.0.CO;2-#

- [57] ANDERSSON, P, D NILSSON, P.-O. SVENSSON, M CHEN, A MALMSTRÖM, T REMONEN, T KUGLER a M BERGGREN. Active Matrix Displays Based on All-Organic Electrochemical Smart Pixels Printed on Paper. *Advanced Materials* [online]. 2002, **14**(20), 1460–1464. ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:10.1002/1521-4095(20021016)14:20<1460::AID-ADMA1460>3.0.CO;2-S
- [58] ZHANG, Shiming, Prajwal KUMAR, Amel Sarah NOUAS, Laurie FONTAINE, Hao TANG a Fabio CICOIRA. Solvent-induced changes in PEDOT:PSS films for organic electrochemical transistors. *APL Materials* [online]. 2015, **3**(1), 014911. ISSN 2166-532X. Dostupné z: doi:10.1063/1.4905154
- [59] ROBINSON, Nathaniel D., Per-Olof SVENSSON, David NILSSON a Magnus BERGGREN. On the Current Saturation Observed in Electrochemical Polymer Transistors. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2006, **153**(3), H39. ISSN 00134651. Dostupné z: doi:10.1149/1.2172534
- [60] AFONSO, Mónica, Jorge MORGADO a Luís ALCÁCER. Inkjet printed organic electrochemical transistors with highly conducting polymer electrolytes. *Journal of Applied Physics* [online]. 2016, **120**(16), 165502. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.4966651
- [61] GUALANDI, I., M. MARZOCCHI, E. SCAVETTA, M. CALIENNI, A. BONFIGLIO a B. FRABONI. A simple all-PEDOT:PSS electrochemical transistor for ascorbic acid sensing. *Journal of Materials Chemistry B* [online]. 2015, **3**(33), 6753–6762. ISSN 2050-750X. Dostupné z: doi:10.1039/C5TB00916B
- [62] YAO, Chunlei, Qianqian LI, Jing GUO, Feng YAN a I-Ming HSING. Rigid and Flexible Organic Electrochemical Transistor Arrays for Monitoring Action Potentials from Electrogenic Cells. *Advanced Healthcare Materials* [online]. 2015, **4**(4), 528–533. ISSN 21922640. Dostupné z: doi:10.1002/adhm.201400406
- [63] BERNARDS, D. A. a G. G. MALLIARAS. Steady-State and Transient Behavior of Organic Electrochemical Transistors. *Advanced Functional Materials* [online]. 2007, **17**(17), 3538–3544. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.200601239
- [64] KAWAHARA, Jun, Peter Andersson ERSMAN, Kazuya KATOH a Magnus BERGGREN. Fast-Switching Printed Organic Electrochemical Transistors Including Electronic Vias Through Plastic and Paper Substrates. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2013, **60**(6), 2052–2056. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2013.2258923
- [65] MANNERBRO, Richard, Martin RANLÖF, Nathaniel ROBINSON a Robert FORCHHEIMER. Inkjet printed electrochemical organic electronics. *Synthetic Metals* [online]. 2008, **158**(13), 556–560. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/j.synthmet.2008.03.030
- [66] HÜTTER, Philipp C., Alexander FIAN, Karl GATTERER a Barbara STADLOBER. Efficiency of the Switching Process in Organic Electrochemical Transistors. *ACS Applied Materials and Interfaces* [online]. 2016, **8**(22), 14071–

14076. ISSN 19448252. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.6b02698
- [67] PRETL, Silvan, Michael KROUPA, Aleš HAMÁČEK, Tomáš DŽUGAN, Jan ŘEBOUN a Jiří ČENGERY. Characterization of the organic field-effect transistor based on solution processed P3HT. *ISSE 2010 - 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology: Polymer Electronics and Nanotechnologies: Towards System Integration - Conference Proceedings* [online]. 2010, 24–29. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2010.5547249
- [68] SUN, Kuan, Shupeng ZHANG, Pengcheng LI, Yijie XIA, Xiang ZHANG, Donghe DU, Furkan Halis ISIKGOR a Jianyong OUYANG. Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2015, **26**(7), 4438–4462. ISSN 0957-4522. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-015-2895-5
- [69] IONESCU, C., P. SVASTA, A. VASILE a D. BONFERT. Investigations on organic printed resistors based on PEDOT:PSS. In: *2012 IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* [online]. B.m.: IEEE, 2012, s. 85–89. ISBN 978-1-4673-4760-0. Dostupné z: doi:10.1109/SIITME.2012.6384352
- [70] LOUWET, F., L. GROENENDAAL, J. DHAEN, J. MANCA, J. VAN LUPPEN, E. VERDONCK a L. LEENDERS. PEDOT/PSS: synthesis, characterization, properties and applications. *Synthetic Metals* [online]. 2003, **135–136**, 115–117. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-6779(02)00518-0
- [71] ANDERSSON, P., R. FORCHHEIMER, P. TEHRANI a M. BERGGREN. Printable All-Organic Electrochromic Active-Matrix Displays. *Advanced Functional Materials* [online]. 2007, **17**(16), 3074–3082. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.200601241
- [72] SIGMA-ALDRICH. *Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* [online]. [vid. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/698997?lang=en&region=CZ>
- [73] MCINTIRE, Robert a Pierre DONNEL. *Integrated Circuits, Photodiodes and Organic Field Effect Transistors*. B.m.: Nova Science Publishers, Inc., 2009. ISBN 978-1-60692-660-4.
- [74] BELL, July T. a Gene T. MOLA. Improved charge transport in P3HT:PCBM bulk heterojunction PV cell under ambient environment. *Physica B: Condensed Matter* [online]. 2014, **437**, 63–66. ISSN 09214526. Dostupné z: doi:10.1016/j.physb.2013.12.034
- [75] BOLIN, Maria H., Karl SVENNERSTEN, David NILSSON, Anurak SAWATDEE, Edwin W. H. JAGER, Agneta RICHTER-DAHLFORS a Magnus BERGGREN. Active Control of Epithelial Cell-Density Gradients Grown Along the Channel of an Organic Electrochemical Transistor. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(43), 4379–4382. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200901191
- [76] ŠTULÍK, J., R. POLANSKÝ, A. HAMÁČEK, S. NEŠPŮREK, P. SLEPIČKA, Z.

- KOLSKÁ a V. ŠVORČÍK. Comparison of organic thermistors based on PEDOT:PSS and PEDOT:tos thin films under various thermal and humidity conditions. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2018, **275**, 359–366. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2018.08.054
- [77] HERLOGSSON, Lars. *Electrolyte-Gated Organic Thin-Film Transistors (Dissertation)* [online]. 2011. ISBN 9789173930888. Dostupné z: <http://su.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:432465>
- [78] MRACEK, Lukas, Silvan PRETL, Tomas SYROVY a Ales HAMACEK. Ionic liquid as an electrolyte for organic electrochemical transistor. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. 2015, **2015-Septe**, 11–15. ISSN 21612536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2015.7247952
- [79] INAL, Sahika, George G. MALLIARAS a Jonathan RIVNAY. Benchmarking organic mixed conductors for transistors. *Nature Communications* [online]. 2017, **8**(1), 1767. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-017-01812-w
- [80] ZHU, Zheng-Tao, Jeffrey T. MABECK, Changcheng ZHU, Nathaniel C. CADY, Carl A. BATT a George G. MALLIARAS. A simple poly(3,4-ethylene dioxythiophene)/poly(styrene sulfonic acid) transistor for glucose sensing at neutral pH. *Chemical Communications* [online]. 2004, (13), 1556. ISSN 1359-7345. Dostupné z: doi:10.1039/b403327m
- [81] TARABELLA, Giuseppe, Anna Giulia BALDUCCI, Nicola COPPEDÈ, Simone MARASSO, Pasquale D'ANGELO, Stefano BARBIERI, Matteo COCUZZA, Paolo COLOMBO, Fabio SONVICO, Roberto MOSCA a Salvatore IANNOTTA. Liposome sensing and monitoring by organic electrochemical transistors integrated in microfluidics. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects* [online]. 2013, **1830**(9), 4374–4380. ISSN 03044165. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbagen.2012.12.018
- [82] PREZIOSI, V., M. BARRA, A. PERAZZO, G. TARABELLA, A. ROMEO, S. L. MARASSO, P. D'ANGELO, S. IANNOTTA, A. CASSINESE a S. GUIDO. Monitoring emulsion microstructure by using organic electrochemical transistors. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2017, **5**(8), 2056–2065. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/C6TC05149A
- [83] KOUTSOURAS, Dimitrios A., Pierre LELEUX, Marc RAMUZ, Jonathan RIVNAY a George G. MALLIARAS. Organic electrochemical transistors for BioMEMS applications. *Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM* [online]. 2015, **2015-Febru**(February), 31.4.1-31.4.4. ISSN 01631918. Dostupné z: doi:10.1109/IEDM.2014.7047148
- [84] RIVNAY, Jonathan, Pierre LELEUX, Marc FERRO, Michele SESSOLO, Adam WILLIAMSON, Dimitrios A. KOUTSOURAS, Dion KHODAGHOLY, Marc RAMUZ, Xenofon STRAKOSAS, Roisin M. OWENS, Christian BENAR, Jean-Michel BADIÉ, Christophe BERNARD a George G. MALLIARAS. High-performance transistors for bioelectronics through tuning of channel thickness. *Science Advances* [online]. 2015, **1**(4), e1400251. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.1400251

- [85] CAMPANA, Alessandra, Tobias CRAMER, Daniel T. SIMON, Magnus BERGGREN a Fabio BISCARINI. Electrocardiographic Recording with Conformable Organic Electrochemical Transistor Fabricated on Resorbable Bioscaffold. *Advanced Materials* [online]. 2014, **26**(23), 3874–3878. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201400263
- [86] CAO, H., COLEMAN, T., HSIAT, T.K., KHADEMHOSEINI, A. *Interfacing Bioelectronics and Biomedical Sensing* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-34466-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-34467-2
- [87] YEUNG, Sin Yu. *Characterization of geometric parameters on organic electrochemical transistor (OECT) for cell-based biosensor*. B.m., 2018. Hong Kong University of Science and Technology.
- [88] VURRO, Vito. *Organic electrochemical transistor: a tool for cell tissue monitoring*. B.m., 2016. Università di Bologna.
- [89] DEMURU, Silvia, Alexis MARETTE, Wafa KOOLI, Pilar JUNIER a Danick BRIAND. Flexible Organic Electrochemical Transistor with Functionalized Inkjet-Printed Gold Gate for Bacteria Sensing. *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)* [online]. 2019, **1**(June), 2519–2522. Dostupné z: doi:10.1109/transducers.2019.8808309
- [90] KIM, Youngseok, Taekyung LIM, Chi-Hyeong KIM, Chang Su YEO, Keumyoung SEO, Seong-Min KIM, Jiwoong KIM, Sang Yoon PARK, Sanghyun JU a Myung-Han YOON. Organic electrochemical transistor-based channel dimension-independent single-strand wearable sweat sensors. *NPG Asia Materials* [online]. 2018, **10**(11), 1086–1095. ISSN 1884-4049. Dostupné z: doi:10.1038/s41427-018-0097-3
- [91] GUALANDI, I., M. MARZOCCHI, A. ACHILLI, D. CAVEDALE, A. BONFIGLIO a B. FRABONI. Textile Organic Electrochemical Transistors as a Platform for Wearable Biosensors. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1), 33637. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep33637
- [92] LIAO, Caizhi a Feng YAN. Organic Semiconductors in Organic Thin-Film Transistor-Based Chemical and Biological Sensors. *Polymer Reviews* [online]. 2013, **53**(3), 352–406. ISSN 1558-3724. Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2013.808665
- [93] BASIRIC, Laura. *Inkjet printing of organic transistor devices*. B.m., 2012. University of Cagliari.
- [94] SCHEIBLIN, Gaëtan, Romain COPPARD, Róisín M. OWENS, Pascal MAILLEY a George G. MALLIARAS. Referenceless pH Sensor using Organic Electrochemical Transistors. *Advanced Materials Technologies* [online]. 2017, **2**(2), 1600141. ISSN 2365709X. Dostupné z: doi:10.1002/admt.201600141
- [95] NILSSON, D. An all-organic sensor–transistor based on a novel electrochemical transducer concept printed electrochemical sensors on paper. *Sensors and Actuators*

- B: Chemical* [online]. 2002, **86**(2–3), 193–197. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/S0925-4005(02)00170-3
- [96] 60812, IEC. International Standard. *61010-1* © *Iec:2001*. 2006, **2006**, 13.
- [97] HUTTER, Philipp C., Thomas ROTHLANDER, Gregor SCHEIPL a Barbara STADLOBER. All Screen-Printed Logic Gates Based on Organic Electrochemical Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2015, **62**(12), 4231–4236. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2015.2491342
- [98] HERAEUS. *Printed electronics* [online]. 2020 [vid. 2020-05-02]. Dostupné z: [https://www.heraeus.com/en/hep/applications\\_hep/printed\\_electronics\\_hep/printed\\_electronics\\_2.html](https://www.heraeus.com/en/hep/applications_hep/printed_electronics_hep/printed_electronics_2.html)
- [99] ZAFAR, Qayyum, Shahino Mah ABDULLAH, Mohamad Izzat AZMER, Mansoor Ani NAJEEB, Karwan Wasman QADIR a Khaulah SULAIMAN. Influence of relative humidity on the electrical response of PEDOT:PSS based organic field-effect transistor. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2018, **255**, 2652–2656. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2017.09.076
- [100] FULLERTON-SHIREY, Susan K., Lalitha V. N. R. GANAPATIBHOTLA, Wenjin SHI a Janna K. MARANAS. Influence of thermal history and humidity on the ionic conductivity of nanoparticle-filled solid polymer electrolytes. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* [online]. 2011, **49**(21), 1496–1505. ISSN 08876266. Dostupné z: doi:10.1002/polb.22330
- [101] ORTIZ-CONDE, A., F. J. GARCÍA SÁNCHEZ, J. J. LIU, A. CERDEIRA, M. ESTRADA a Y. YUE. A review of recent MOSFET threshold voltage extraction methods. *Microelectronics Reliability* [online]. 2002, **42**(4–5), 583–596. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(02)00027-6
- [102] HAYYAN, Maan, Farouq S. MJALLI, Mohd Ali HASHIM, Inas M. ALNASHEF a Tan Xue MEI. Investigating the electrochemical windows of ionic liquids. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2013, **19**(1), 106–112. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2012.07.011
- [103] MUSUMECI, Chiara, Mikhail VAGIN, Erica ZEGLIO, Liangqi OUYANG, Roger GABRIELSSON a Olle INGANÄS. Organic electrochemical transistors from supramolecular complexes of conjugated polyelectrolyte PEDOTS. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2019, **7**(10), 2987–2993. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/C8TC05774E

# Přílohy

## Příloha A – Časový plán prvního měření OECT

Tab. 7: Časový plán měření a časový záznam jednotlivých měření probíhajících při prvním měření OECT

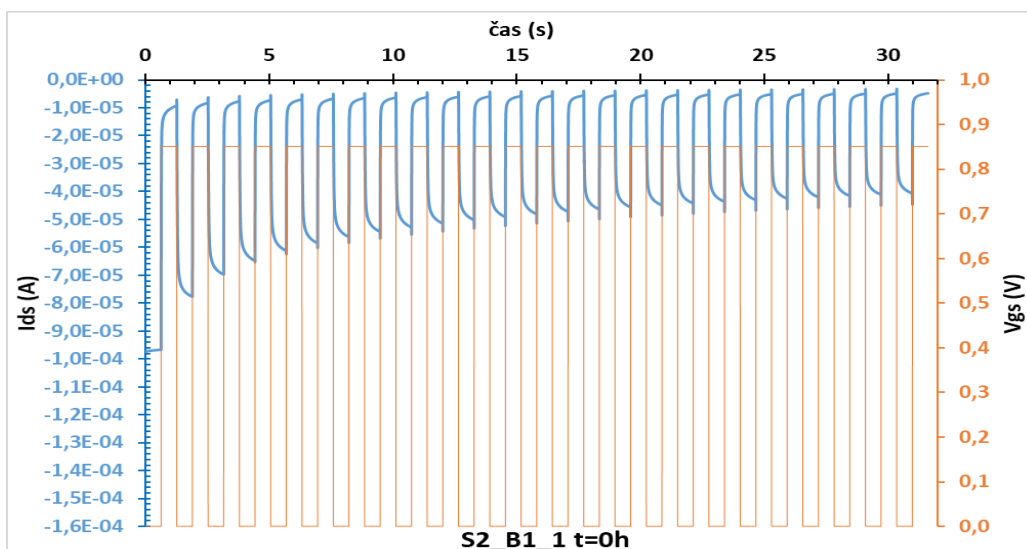
Sada	Panel	Vzorek	Prostředí	Start	Typ	Čas depozice	BOX	Médium	RH	Číslo měření	200506-1		200506-2		200506-3		200506-4		200507-1		200507-2		200509-1		200511-1	
											Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření
S1	OECT_218	B4	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 1	silikagel	LOW (<10)	S1_B1.1	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:14	28,0	6:5-20 15:02	30,8	6:5-20 20:21	36,1	7:5-20 07:58	47,7	7:5-20 15:58	55,7	9:5-20 15:17	103,0	11:5-20 06:53	142,6
S1	OECT_218	B5	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 1	silikagel	LOW (<10)	S1_B1.2	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:17	28,0	6:5-20 15:04	30,8	6:5-20 20:23	36,1	7:5-20 08:01	47,8	7:5-20 16:01	55,8	9:5-20 15:19	103,1	11:5-20 06:56	142,7
S1	OECT_218	B6	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 1	silikagel	LOW (<10)	S1_B1.3	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:19	28,1	6:5-20 15:06	30,8	6:5-20 20:24	36,1	7:5-20 08:02	47,8	7:5-20 16:03	55,8	9:5-20 15:21	103,1	11:5-20 06:58	142,7
S1	OECT_217	B4	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 2	normální atmosféra	NORMAL (60)	S1_B2.1	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:22	28,1	6:5-20 15:10	30,9	6:5-20 20:28	36,2	7:5-20 08:06	47,9	7:5-20 16:05	55,8	9:5-20 15:23	103,1	11:5-20 07:02	142,8
S1	OECT_217	B5	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 2	normální atmosféra	NORMAL (60)	S1_B2.2	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:24	28,2	6:5-20 15:13	31,0	6:5-20 20:29	36,2	7:5-20 08:07	47,9	7:5-20 16:06	55,8	9:5-20 15:24	103,2	11:5-20 07:03	142,8
S1	OECT_217	B6	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 2	normální atmosféra	NORMAL (60)	S1_B2.3	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:26	28,2	6:5-20 15:15	31,0	6:5-20 20:31	36,3	7:5-20 08:09	47,9	7:5-20 16:08	55,9	9:5-20 15:26	103,2	11:5-20 07:05	142,8
S1	OECT_217	B1	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S1_B3.1	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:29	28,2	6:5-20 15:17	31,0	6:5-20 20:33	36,3	7:5-20 08:11	47,9	7:5-20 16:10	55,9	9:5-20 15:28	103,2	11:5-20 07:07	142,9
S1	OECT_217	B2	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S1_B3.2	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:31	28,3	6:5-20 15:19	31,1	6:5-20 20:35	36,3	7:5-20 08:13	48,0	7:5-20 16:12	56,0	9:5-20 15:30	103,3	11:5-20 07:09	142,9
S1	OECT_217	B3	NORMAL (60)	4:5-20 15:00	LO4	5:5-20 08:15	BOX 3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S1_B3.3	6:5-20 08:47	24,5	6:5-20 12:33	28,3	6:5-20 15:21	31,1	6:5-20 20:37	36,4	7:5-20 08:14	48,0	7:5-20 16:13	56,0	9:5-20 15:31	103,3	11:5-20 07:10	142,9
S2	OECT_218	B1	LOW (<10)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1.1	6:5-20 09:00	0,5	6:5-20 12:45	4,3	6:5-20 15:34	7,1	6:5-20 20:44	13,2	7:5-20 08:35	24,1	7:5-20 16:19	31,8	9:5-20 15:37	79,1	11:5-20 07:27	118,0
S2	OECT_218	B2	LOW (<10)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1.2	6:5-20 09:02	0,5	6:5-20 12:48	4,3	6:5-20 15:38	7,1	6:5-20 20:45	13,2	7:5-20 08:37	24,1	7:5-20 16:20	31,8	9:5-20 15:38	79,1	11:5-20 07:30	118,0
S2	OECT_218	B3	LOW (<10)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1.3	6:5-20 09:04	0,6	6:5-20 12:50	4,3	6:5-20 15:37	7,1	6:5-20 20:47	13,3	7:5-20 08:39	24,2	7:5-20 16:22	31,9	9:5-20 15:40	79,2	11:5-20 07:31	118,0
S2	OECT_218	B1	NORMAL (60)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 2	normální atmosféra	NORMAL (60)	S2_B2.1	6:5-20 09:08	0,6	6:5-20 12:53	4,4	6:5-20 15:40	7,2	6:5-20 20:50	12,3	7:5-20 08:27	24,0	7:5-20 16:24	31,9	9:5-20 15:42	79,2	11:5-20 07:22	118,9
S2	OECT_218	B2	NORMAL (60)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 2	normální atmosféra	NORMAL (60)	S2_B2.2	6:5-20 09:10	0,7	6:5-20 12:55	4,4	6:5-20 15:41	7,2	6:5-20 20:51	12,4	7:5-20 08:29	24,0	7:5-20 16:26	31,9	9:5-20 15:44	79,2	11:5-20 07:23	118,9
S2	OECT_218	B3	NORMAL (60)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 2	normální atmosféra	NORMAL (60)	S2_B2.3	6:5-20 09:12	0,7	6:5-20 12:57	4,5	6:5-20 15:43	7,2	6:5-20 20:53	12,4	7:5-20 08:31	24,0	7:5-20 16:27	32,0	9:5-20 15:45	79,3	11:5-20 07:25	118,9
S2	OECT_219	B4	HIGH (80)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3.1	6:5-20 09:15	0,8	6:5-20 13:00	4,5	6:5-20 15:46	7,3	6:5-20 20:56	12,4	7:5-20 08:25	23,9	7:5-20 16:29	32,0	9:5-20 15:48	79,3	11:5-20 07:19	118,8
S2	OECT_219	B5	HIGH (80)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3.2	6:5-20 09:17	0,8	6:5-20 13:02	4,5	6:5-20 15:48	7,3	6:5-20 20:57	12,5	7:5-20 08:22	23,9	7:5-20 16:32	32,0	9:5-20 15:49	79,3	11:5-20 07:17	118,8
S2	OECT_219	B6	HIGH (80)	5:5-20 08:30	LO4	6:5-20 09:30	BOX 3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3.3	6:5-20 09:19	0,8	6:5-20 13:04	4,6	6:5-20 15:49	7,3	6:5-20 20:59	12,5	7:5-20 08:21	23,9	7:5-20 16:33	32,1	9:5-20 15:51	79,4	11:5-20 07:16	118,8

## Příloha B – Časový plán druhého měření OECT

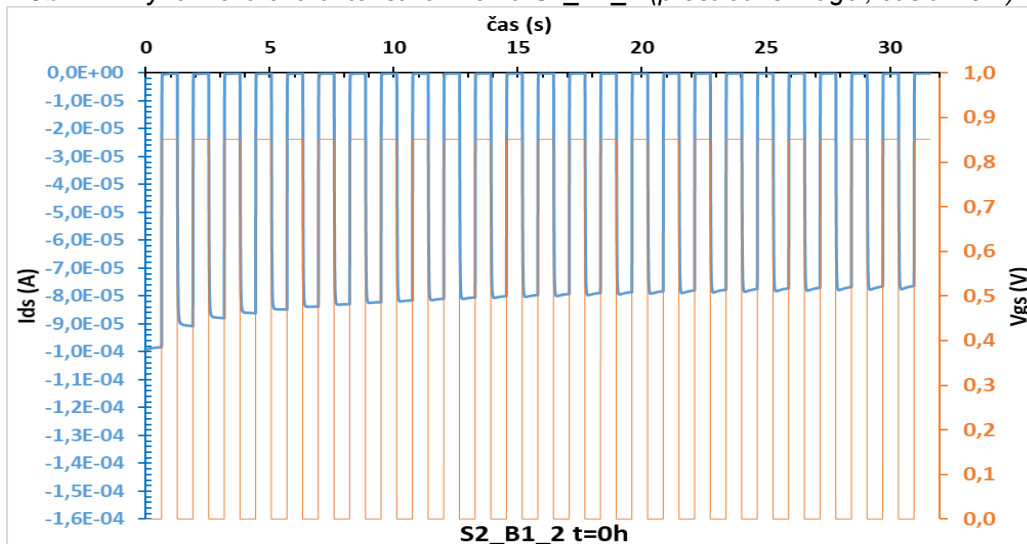
Tab. 8: Časový plán a záznam jednotlivých měření probíhajících při druhém měření OECT.

Sad a	Panel	Vzorek	Aktivatizace vzorků bez el Depozice elektrolytu										DYN		OUT		TRANS	
			Prostředí	Start	Typ	Čas depozice	BOX	Médium	RH	Číslo měření	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)	Čas měření	Doba od depozice (h)		
S2	OECT_203	B1	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_1	14-5-20 08:44	0,4	14-5-20 08:51	0,5	14-5-20 09:02	0,7		
S2	OECT_203	B2	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_2	14-5-20 09:05	0,8	14-5-20 09:10	0,8	14-5-20 09:15	0,9		
S2	OECT_203	B3	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_3	14-5-20 09:18	1,0	14-5-20 09:23	1,1	14-5-20 09:28	1,1		
S2	OECT_207	B1	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_1	14-5-20 09:32	1,2	14-5-20 09:37	1,3	14-5-20 09:42	1,4		
S2	OECT_207	B2	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_2	14-5-20 09:44	1,4	14-5-20 09:49	1,5	14-5-20 09:54	1,6		
S2	OECT_207	B3	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_3	14-5-20 10:00	1,7	14-5-20 10:09	1,8	14-5-20 10:14	1,9		
S2	OECT_204	B4	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_1	14-5-20 10:17	2,0	14-5-20 10:22	2,0	14-5-20 10:26	2,1		
S2	OECT_204	B5	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_2	14-5-20 10:29	2,2	14-5-20 10:34	2,2	14-5-20 10:39	2,3		
S2	OECT_204	B6	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_3	14-5-20 10:42	2,4	14-5-20 10:46	2,4	14-5-20 10:51	2,5		
S2	OECT_203	B4	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_4								
S2	OECT_203	B5	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_5								
S2	OECT_203	B6	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_6								
S2	OECT_209	B1	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_4								
S2	OECT_209	B2	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_5								
S2	OECT_209	B3	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_6								
S2	OECT_207	B4	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_4								
S2	OECT_207	B5	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_5								
S2	OECT_207	B6	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_6								
S2	OECT_204	B1	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_7								
S2	OECT_204	B2	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_8								
S2	OECT_204	B3	LOW (<10)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX1	silikagel	LOW (<10)	S2_B1_9								
S2	OECT_209	B4	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_7								
S2	OECT_209	B5	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_8								
S2	OECT_209	B6	NORMAL (50)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX2	normální atmosféra	NORMAL (50)	S2_B2_9								
S2	OECT_211	B1	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_7								
S2	OECT_211	B2	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_8								
S2	OECT_211	B3	HIGH (80)	13-5-20 07:15	IL04	14-5-20 08:20	BOX3	saturovaný roztok NaCl	HIGH (80)	S2_B3_9								

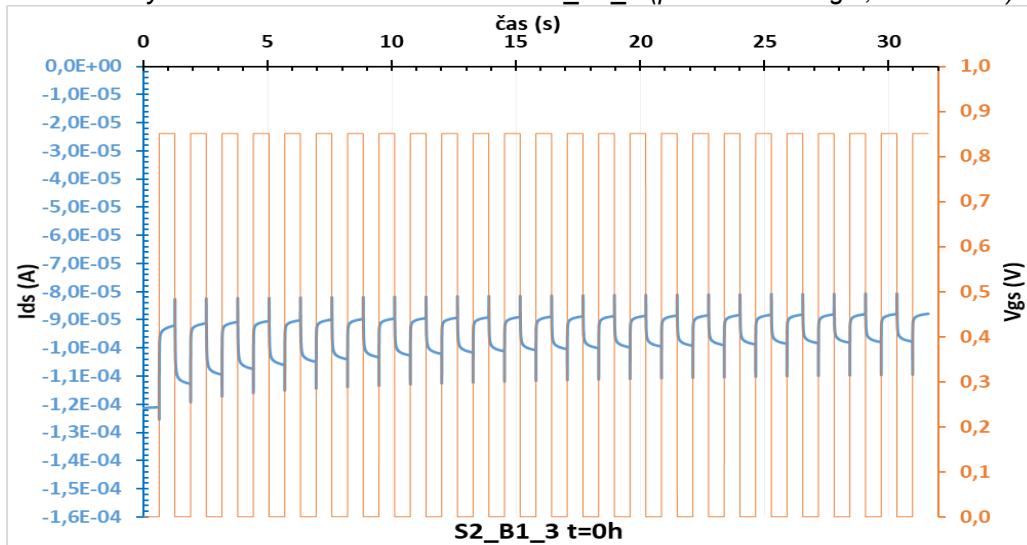


**Příloha C – Změřené dynamické charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH <10% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**

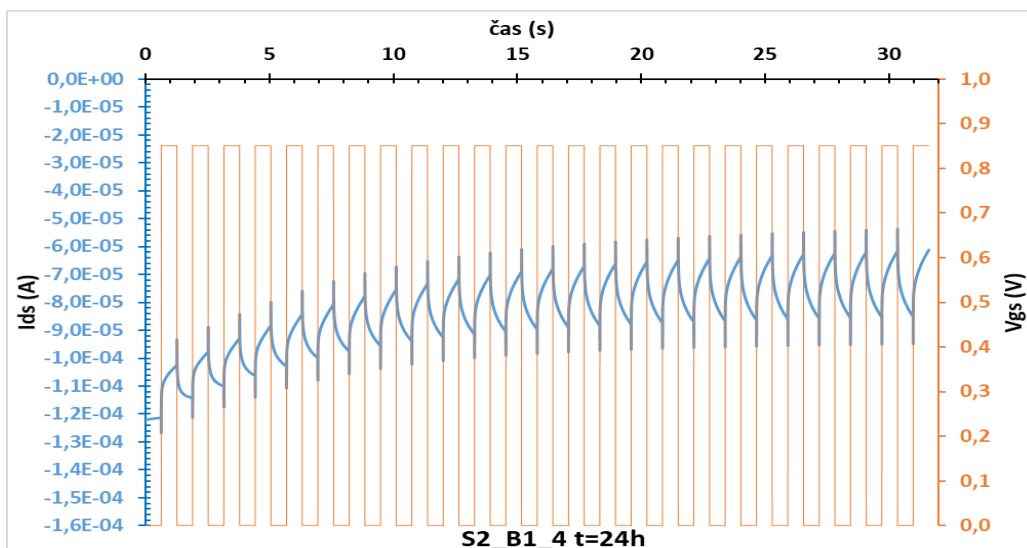
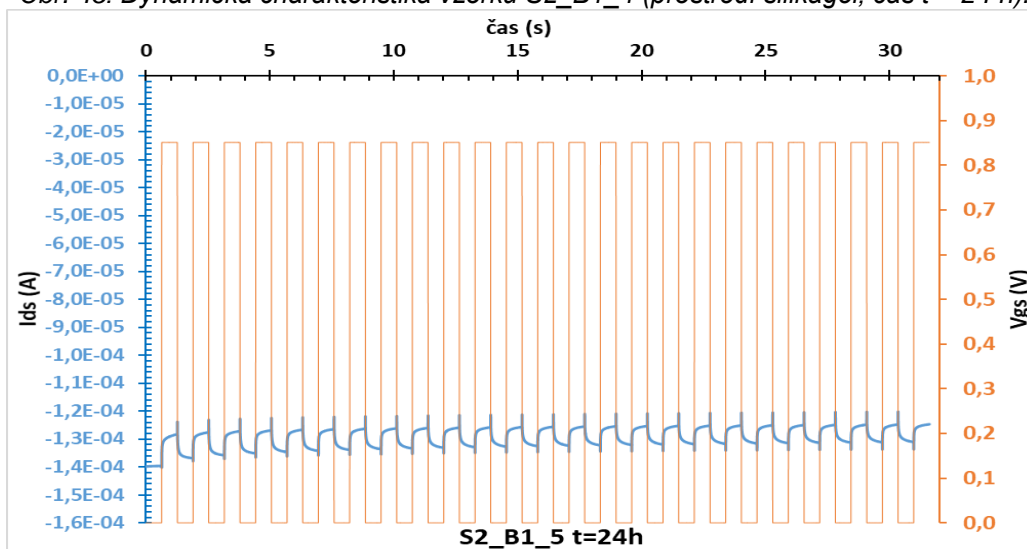
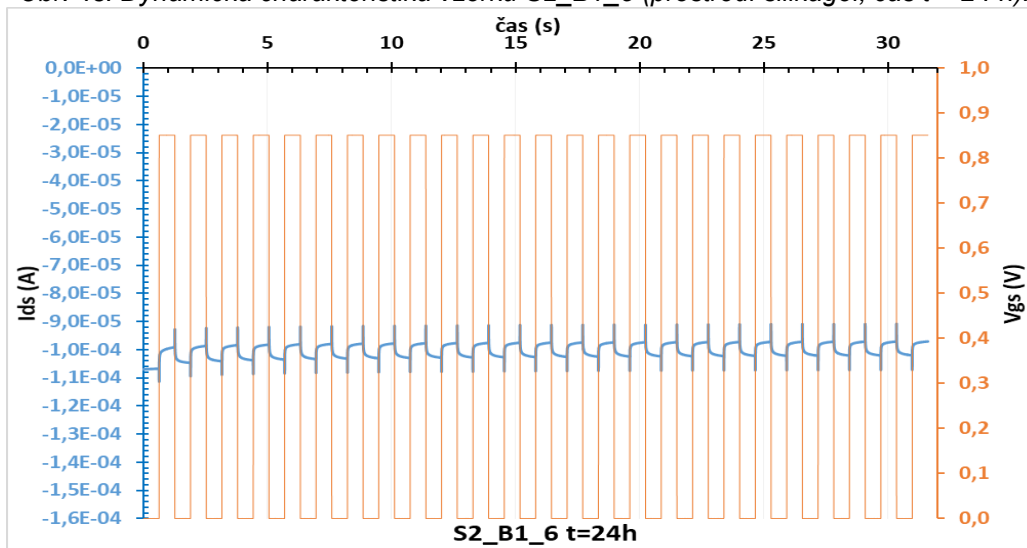
Obr. 42: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_1 (prostředí silikagel, čas t = 0 h).

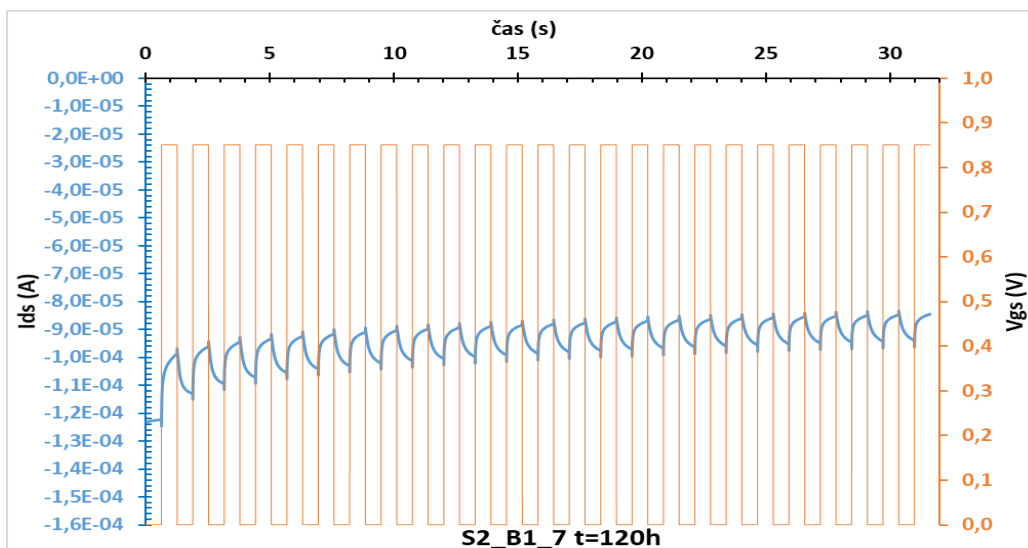
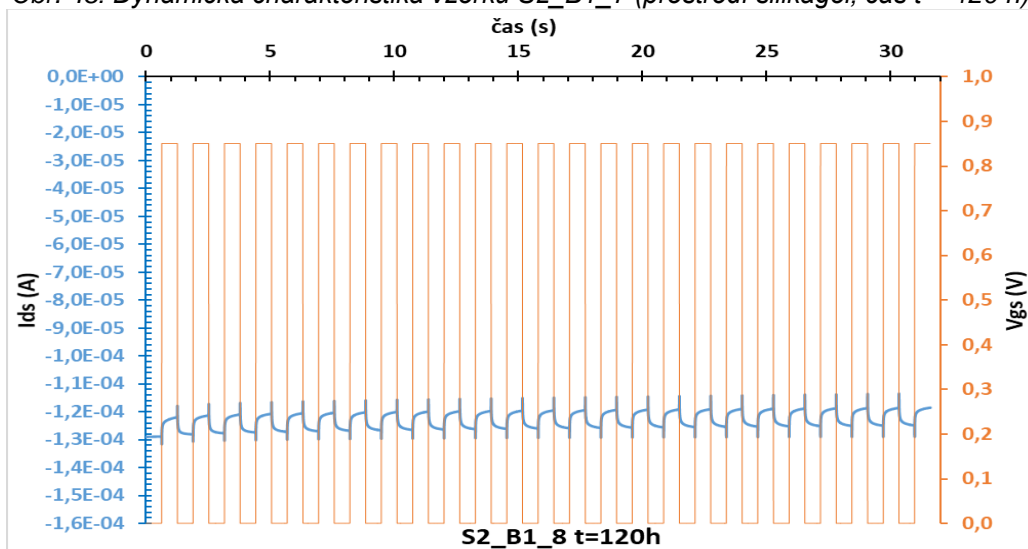
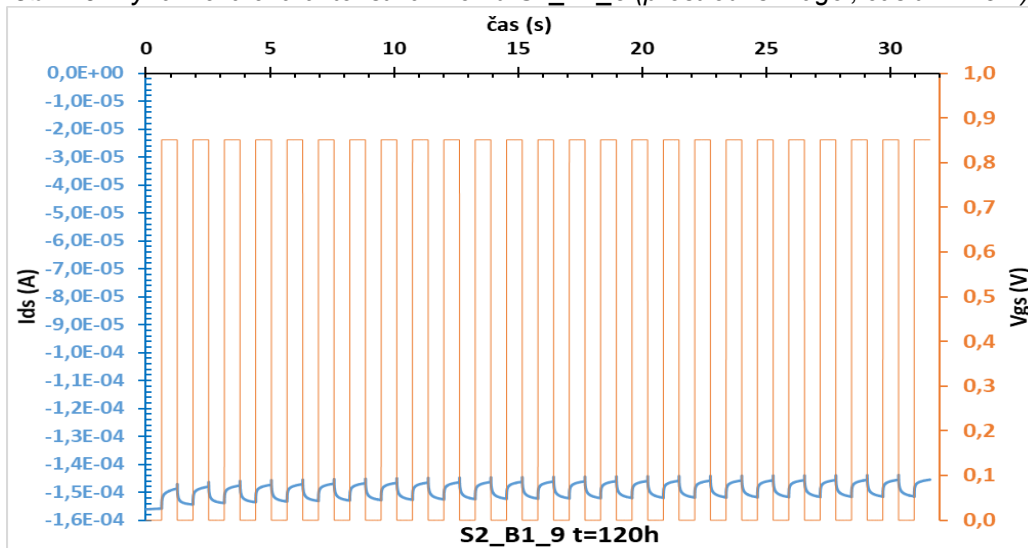


Obr. 43: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_2 (prostředí silikagel, čas t = 0 h).

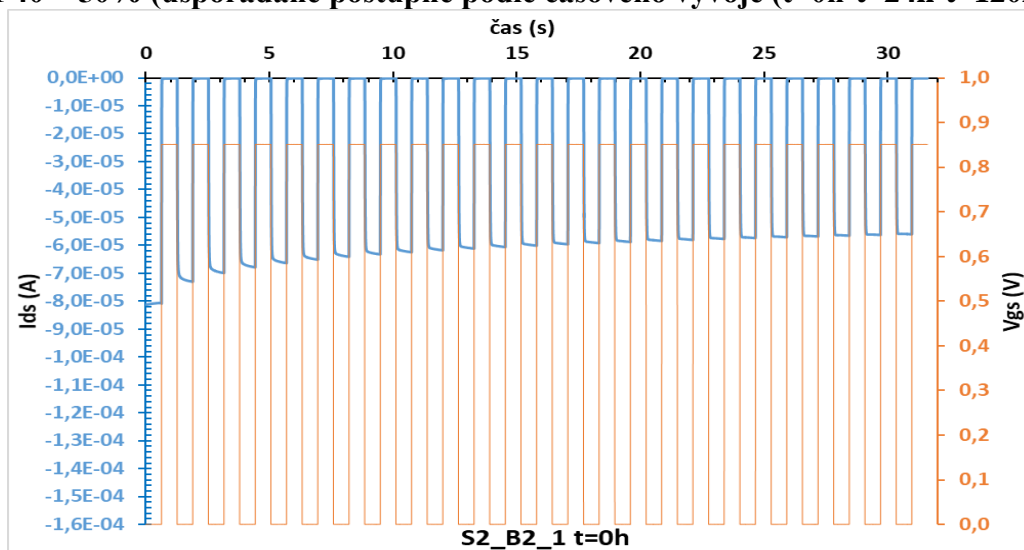


Obr. 44: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_3 (prostředí silikagel, čas t = 0 h).

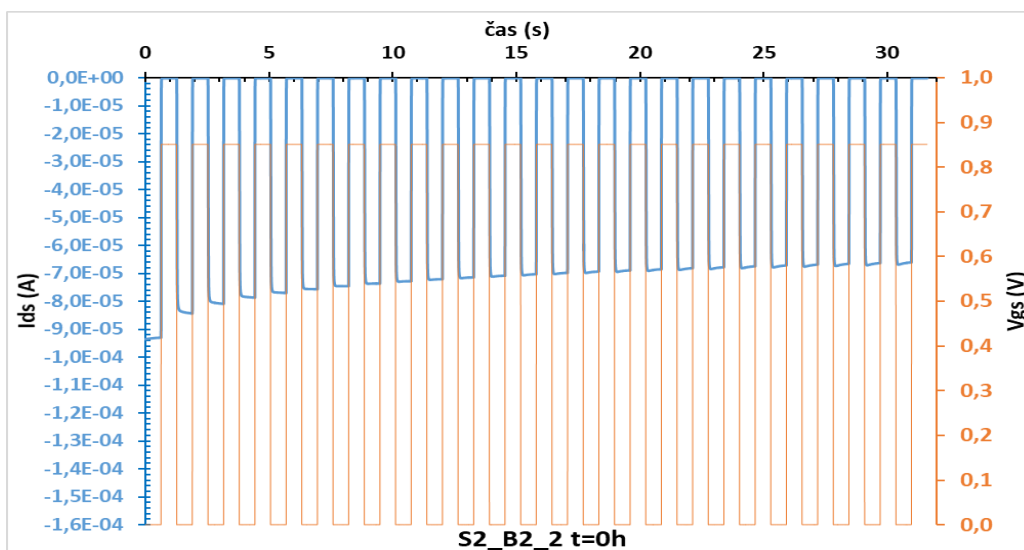
Obr. 45: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_4 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h).Obr. 46: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_5 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h).Obr. 47: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_6 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h).

Obr. 48: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_7 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h).Obr. 49: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_8 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h).Obr. 50: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B1\_9 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h).

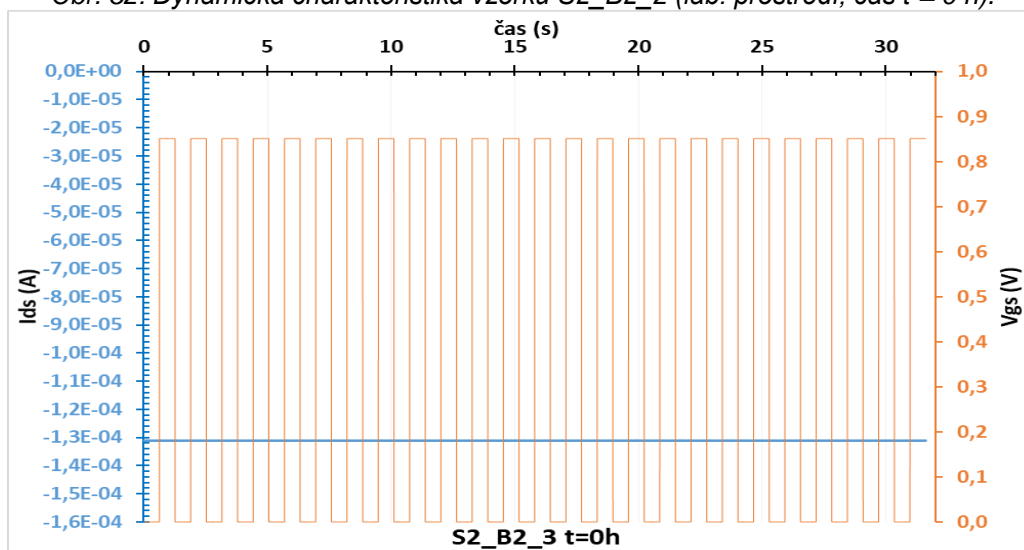
**Příloha D – Změřené dynamické charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH 40 ÷ 50% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**



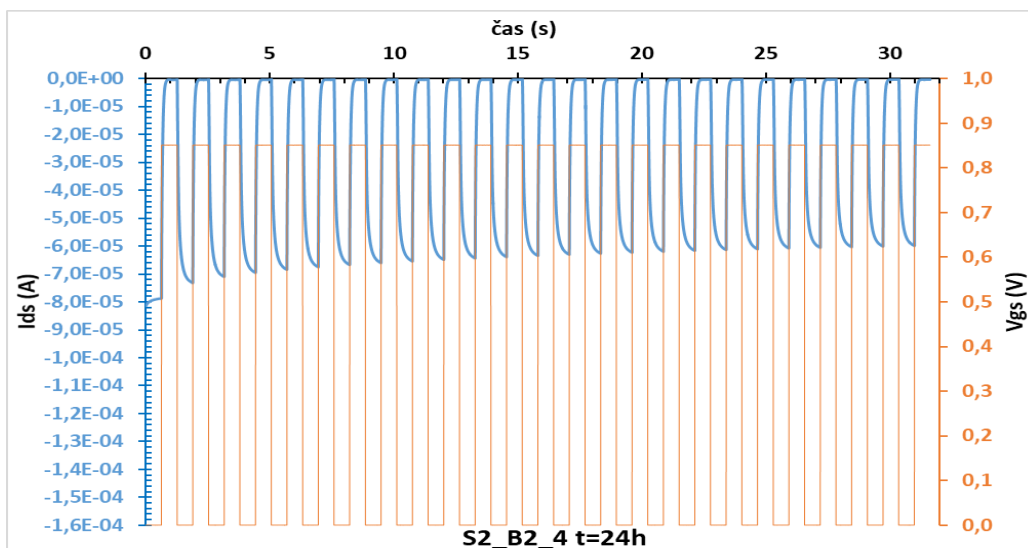
Obr. 51: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_1 (lab. prostředí, čas t = 0 h).



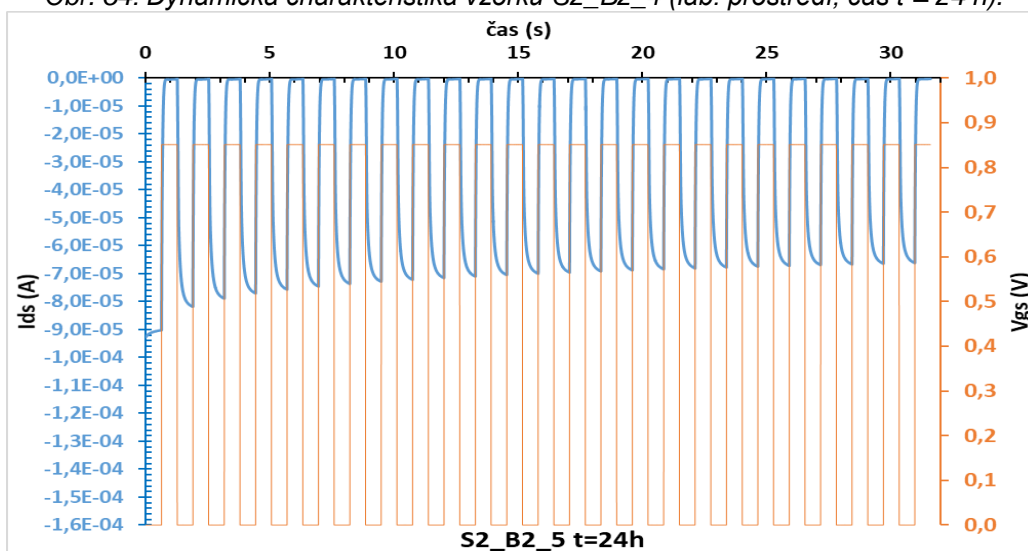
Obr. 52: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_2 (lab. prostředí, čas t = 0 h).



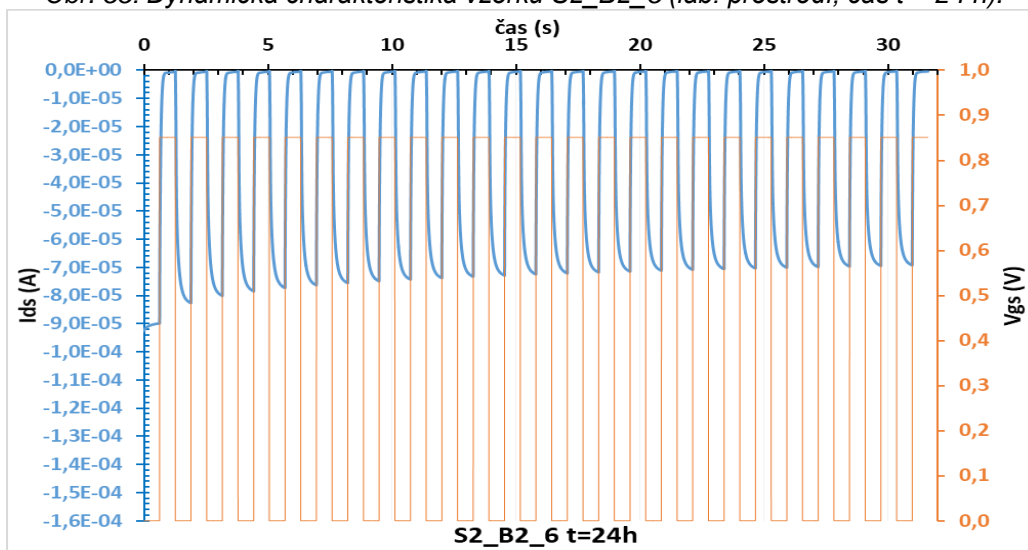
Obr. 53: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_3 (lab. prostředí, čas t = 0 h).



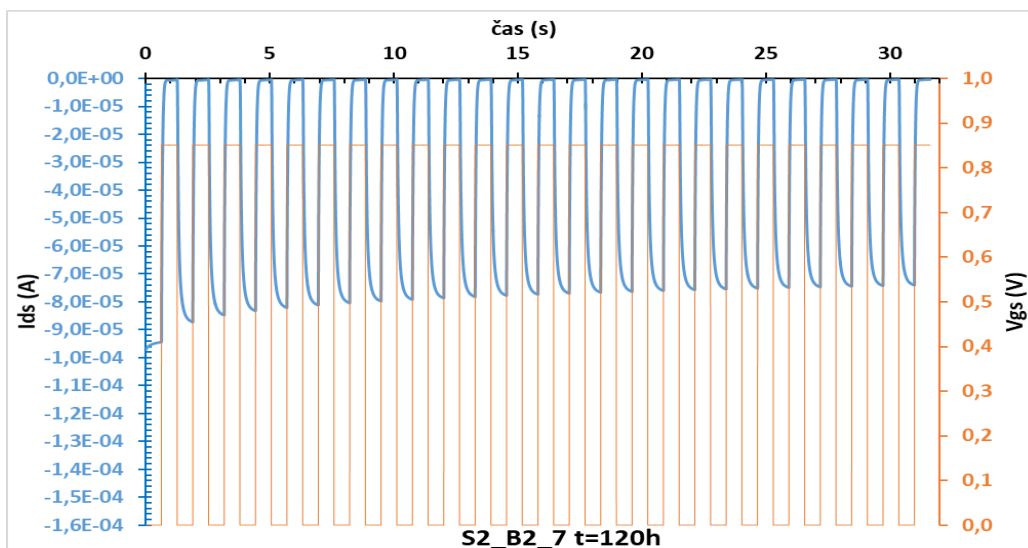
Obr. 54: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_4 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).



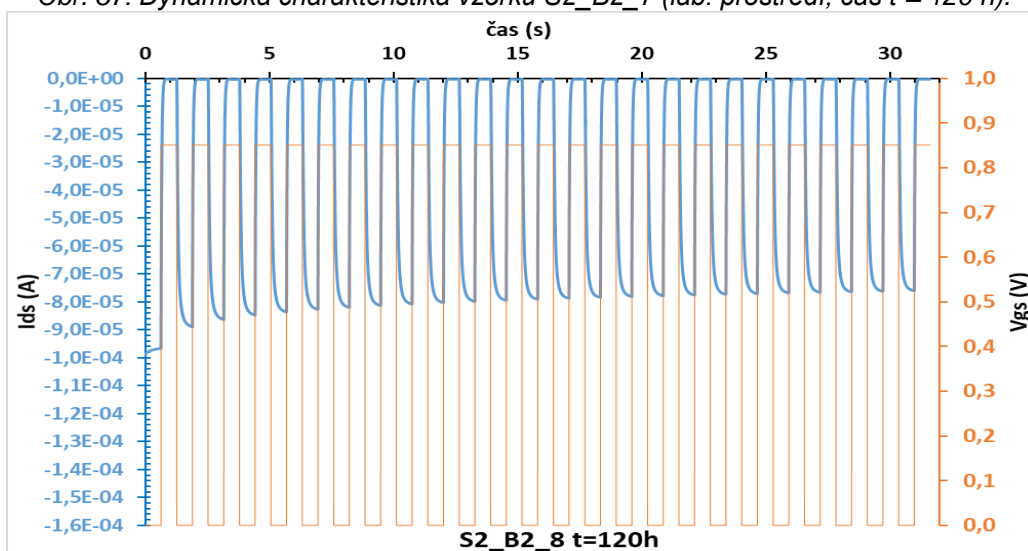
Obr. 55: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_5 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).



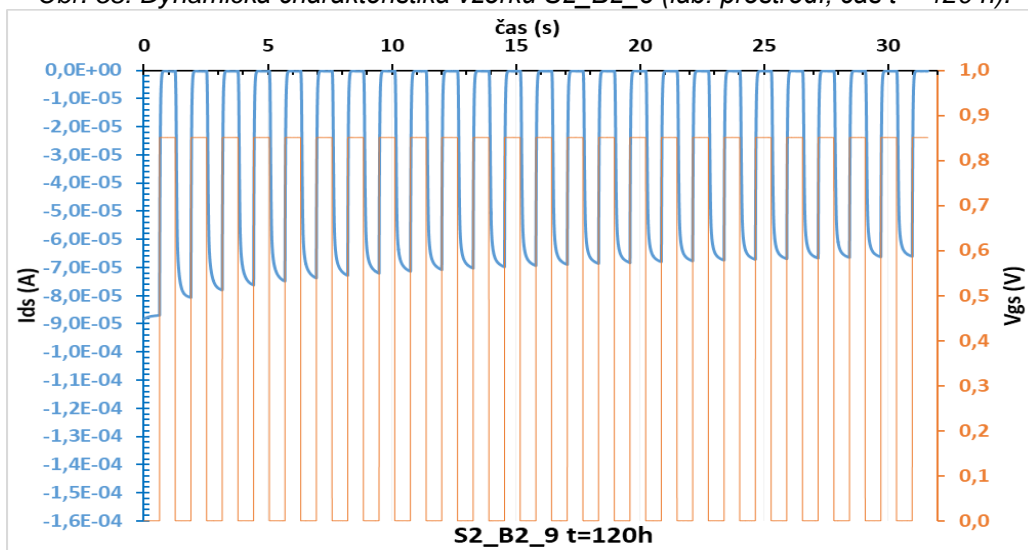
Obr. 56: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_6 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).



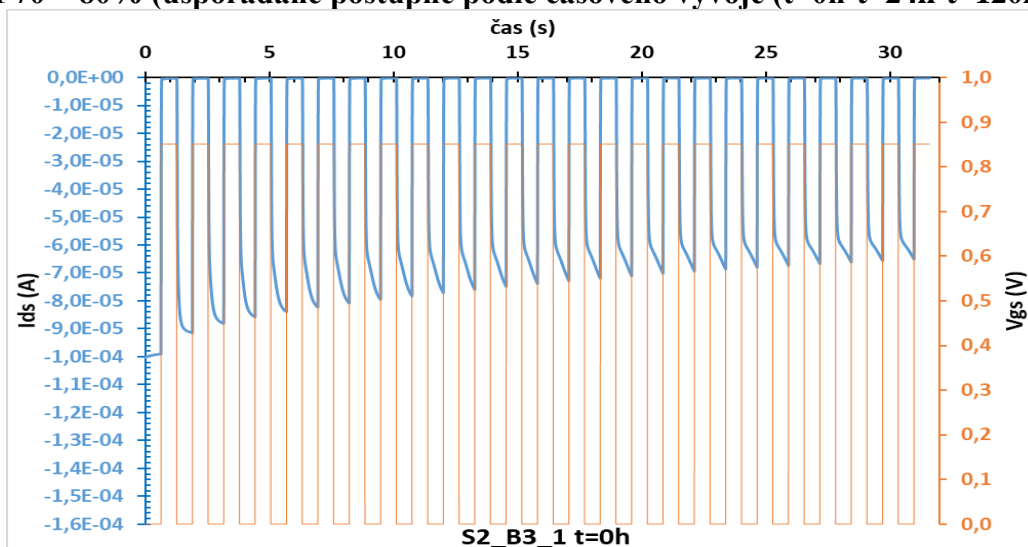
Obr. 57: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_7 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).



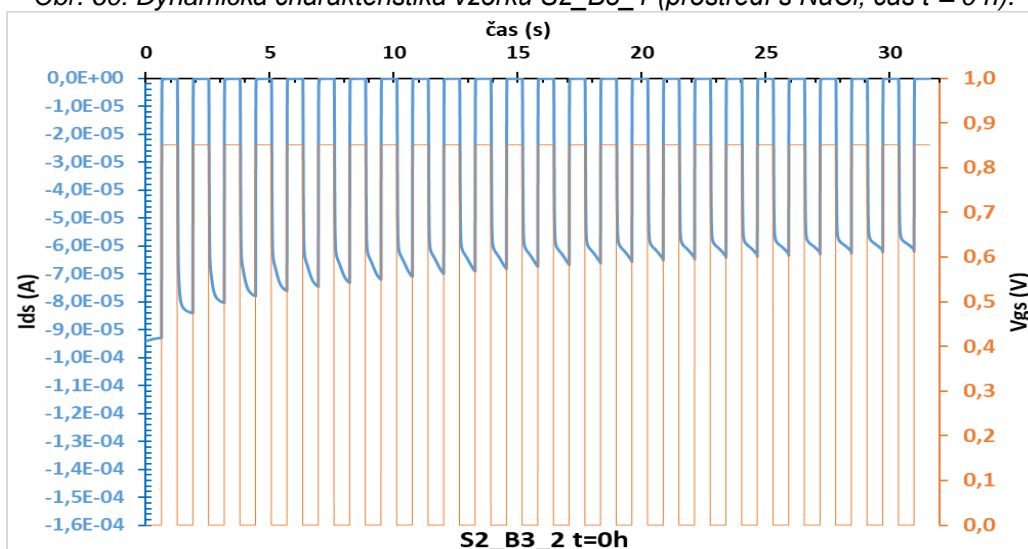
Obr. 58: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_8 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).



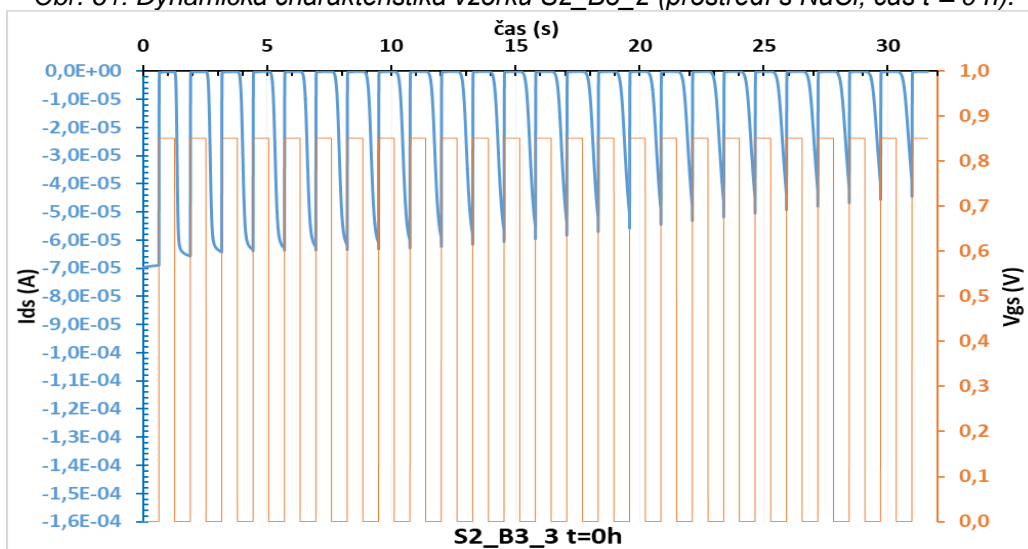
Obr. 59: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B2\_9 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).

**Příloha E – Změřené dynamické charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH 70 ÷ 80% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**

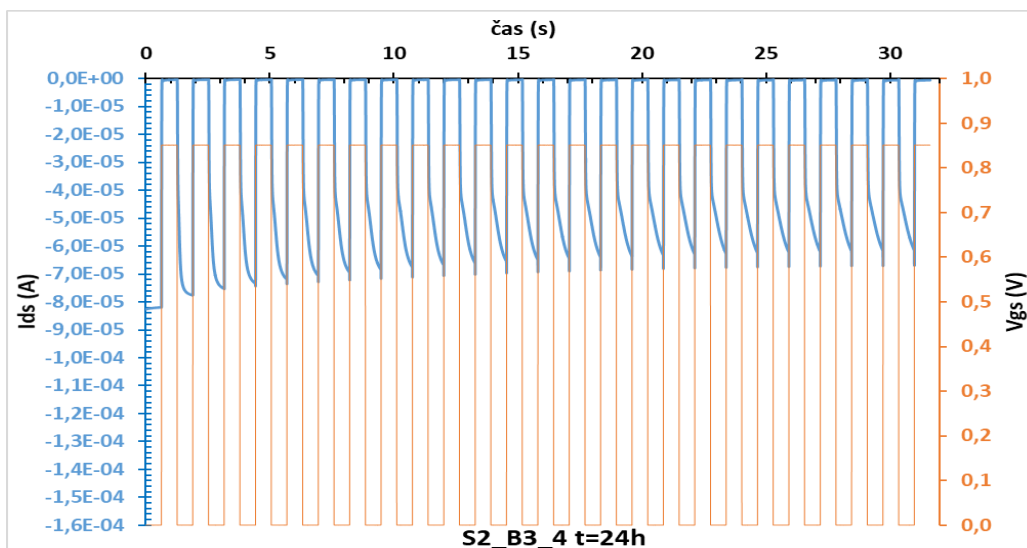
Obr. 60: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_1 (prostředí s NaCl, čas t = 0 h).



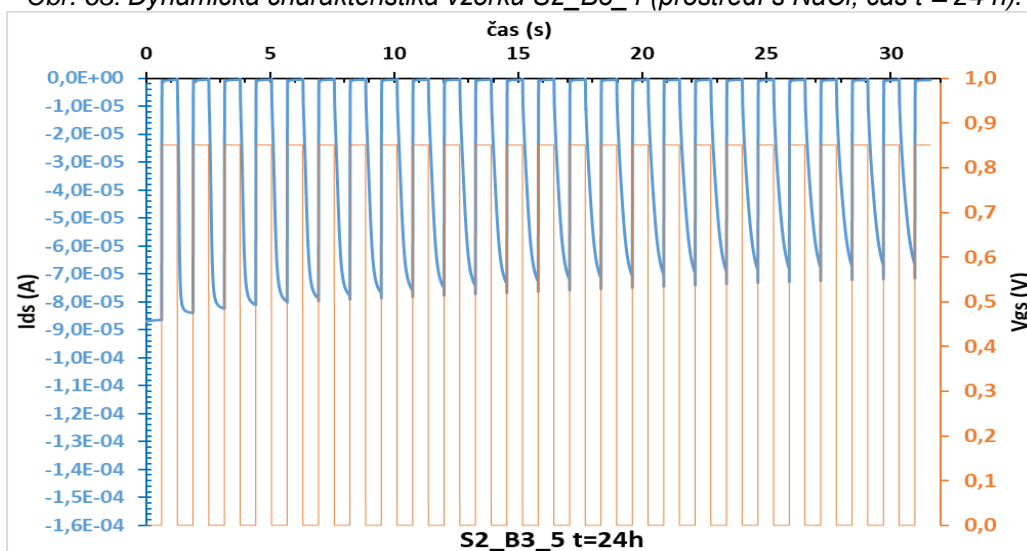
Obr. 61: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_2 (prostředí s NaCl, čas t = 0 h).



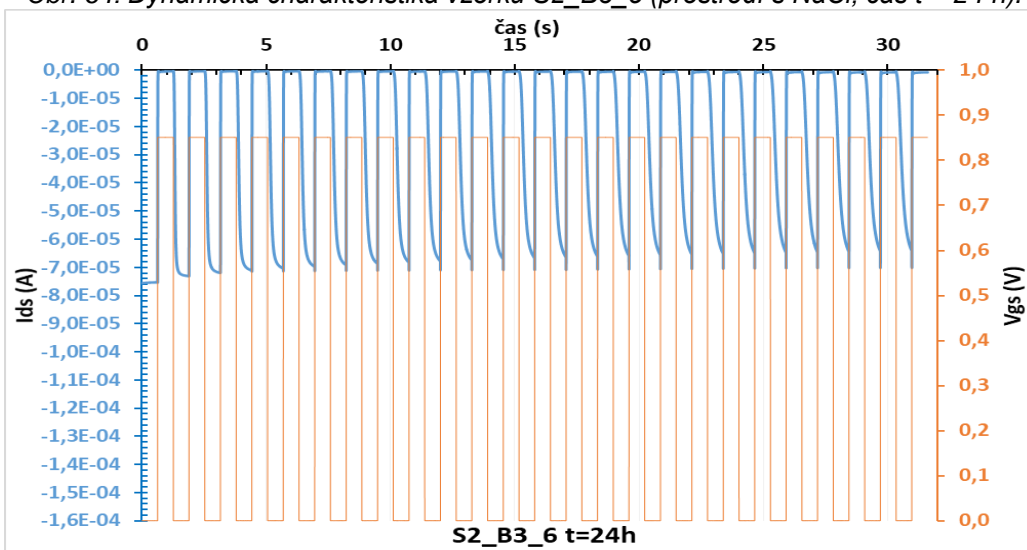
Obr. 62: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_3 (prostředí s NaCl, čas t = 0 h).



Obr. 63: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_4 (prostředí s NaCl, čas  $t = 24$  h).

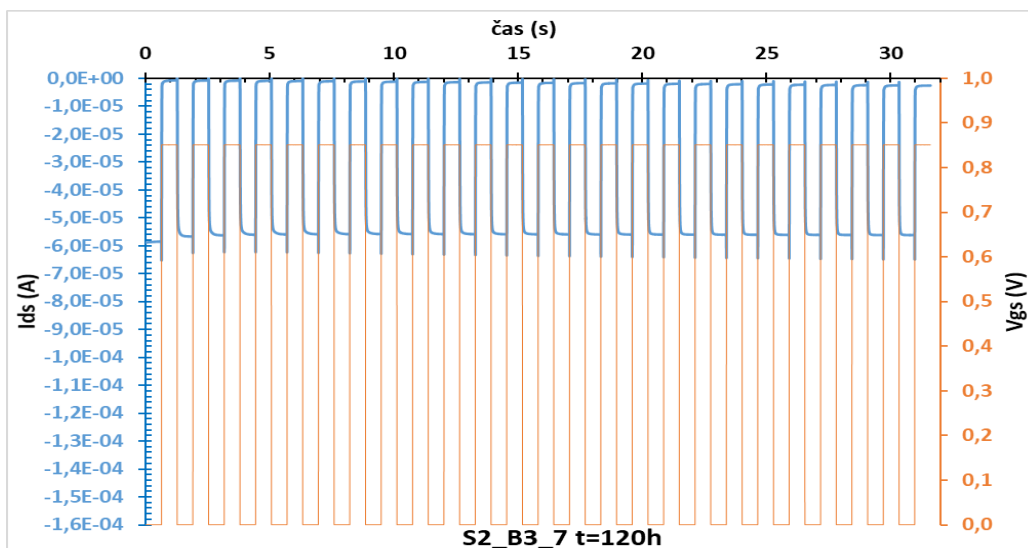


Obr. 64: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_5 (prostředí s NaCl, čas  $t = 24$  h).

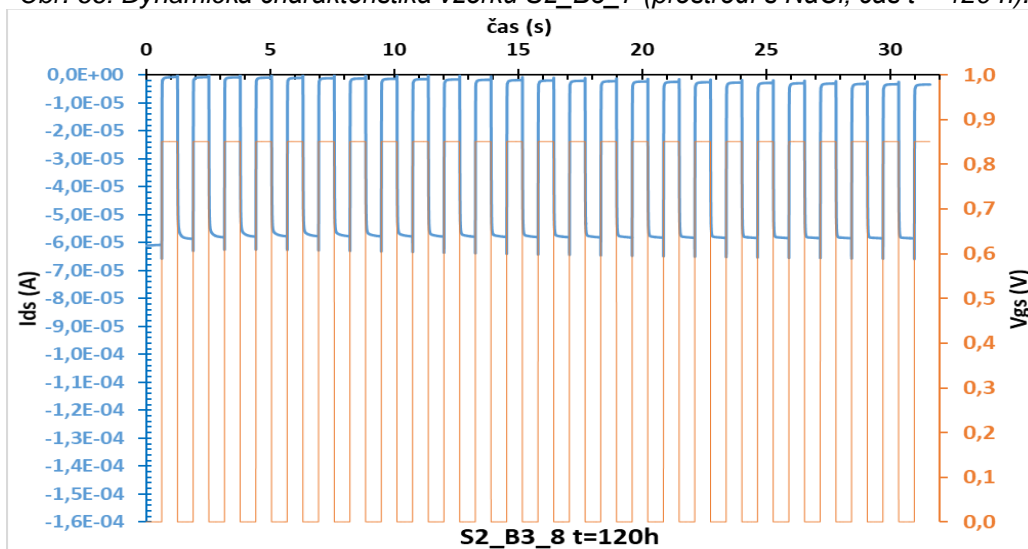


Obr. 65: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_6 (prostředí s NaCl, čas  $t = 24$  h).

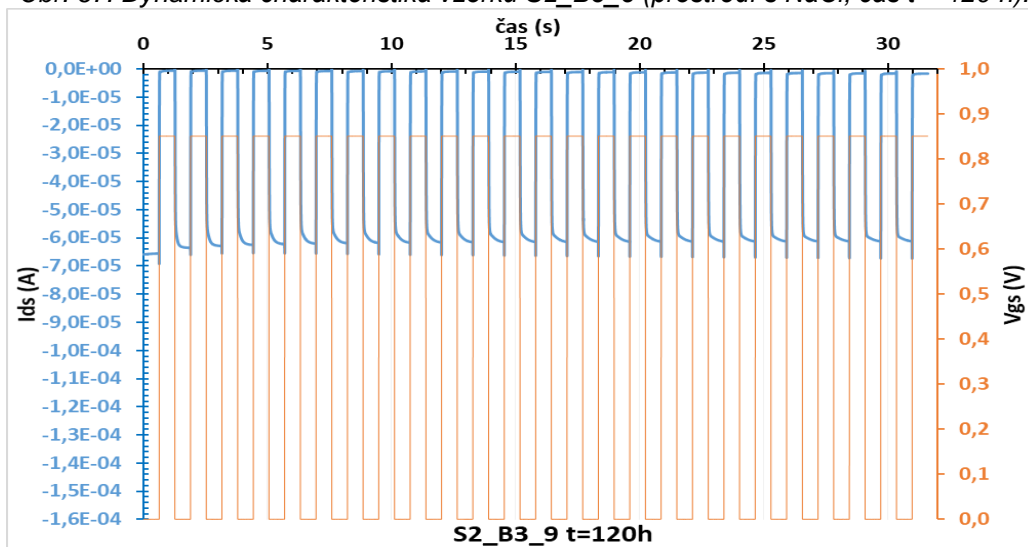




Obr. 66: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_7 (prostředí s NaCl, čas  $t = 120$  h).

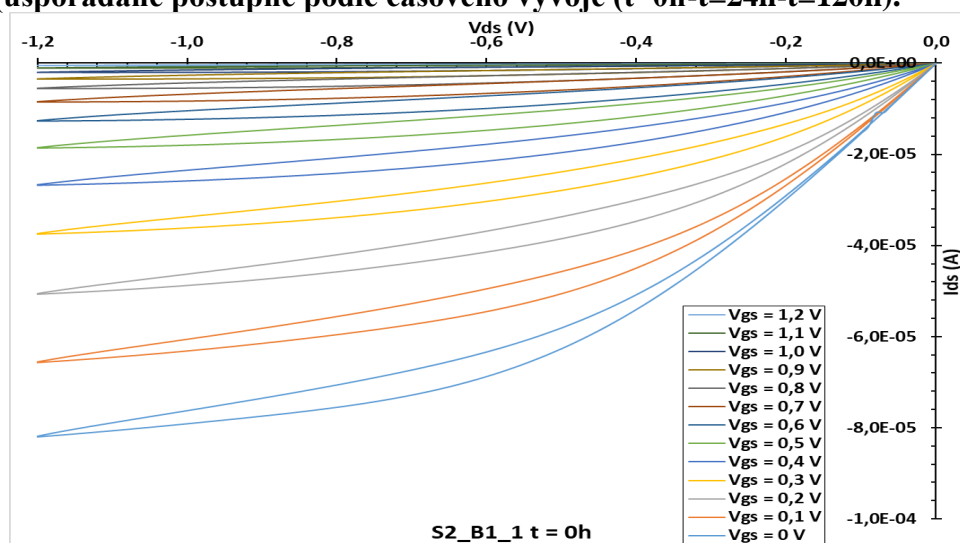


Obr. 67: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_8 (prostředí s NaCl, čas  $t = 120$  h).

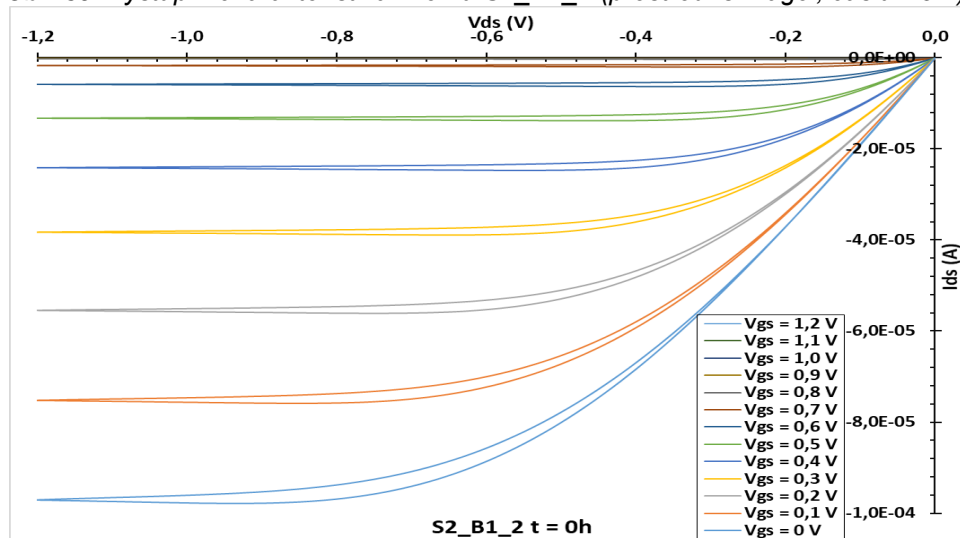


Obr. 68: Dynamická charakteristika vzorku S2\_B3\_9 (prostředí s NaCl, čas  $t = 120$  h).

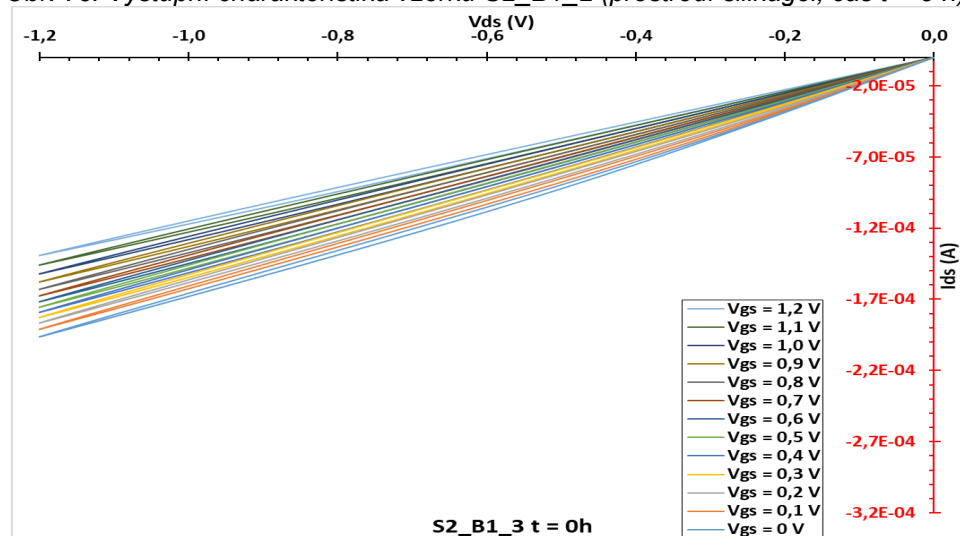
**Příloha F – Změřené výstupní charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH <10% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**



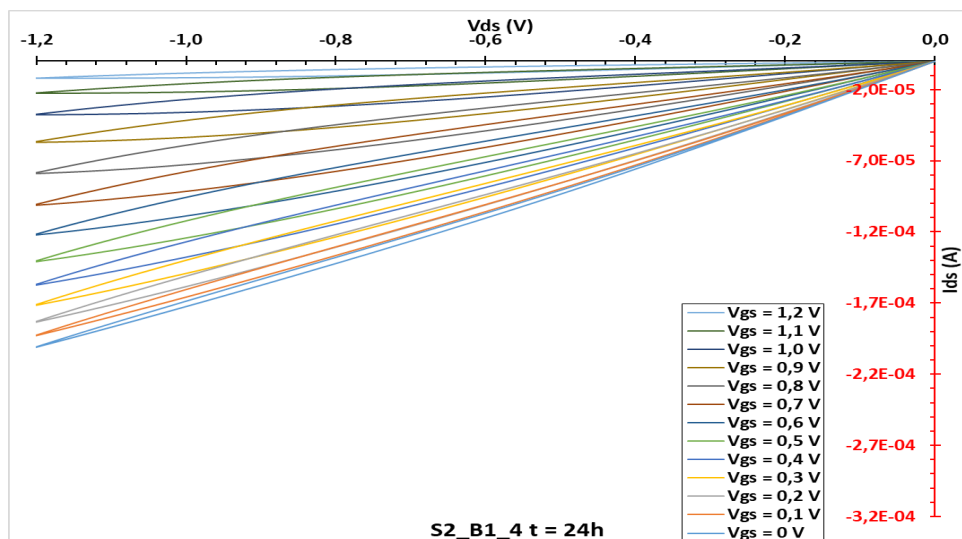
Obr. 69: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_1 (prostředí silikagel, čas t = 0 h).



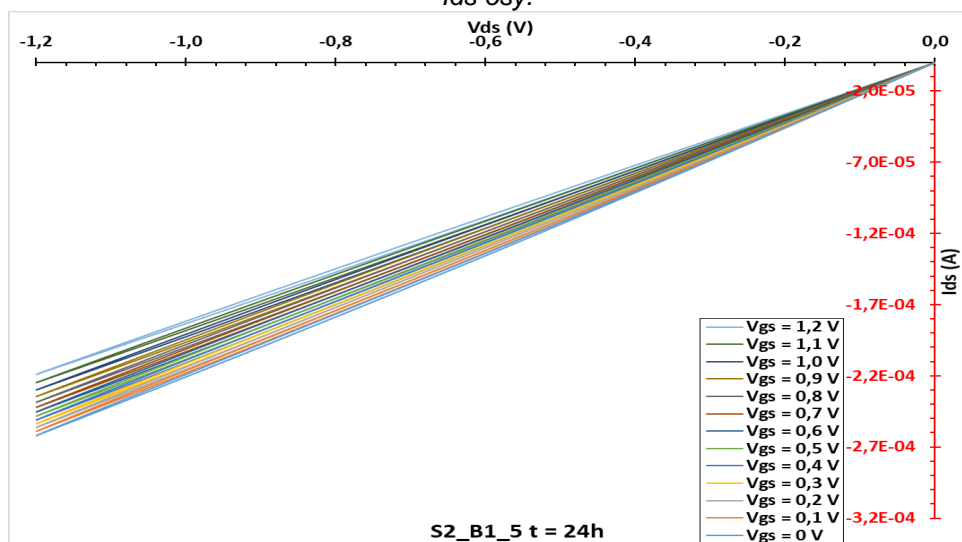
Obr. 70: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_2 (prostředí silikagel, čas t = 0 h).



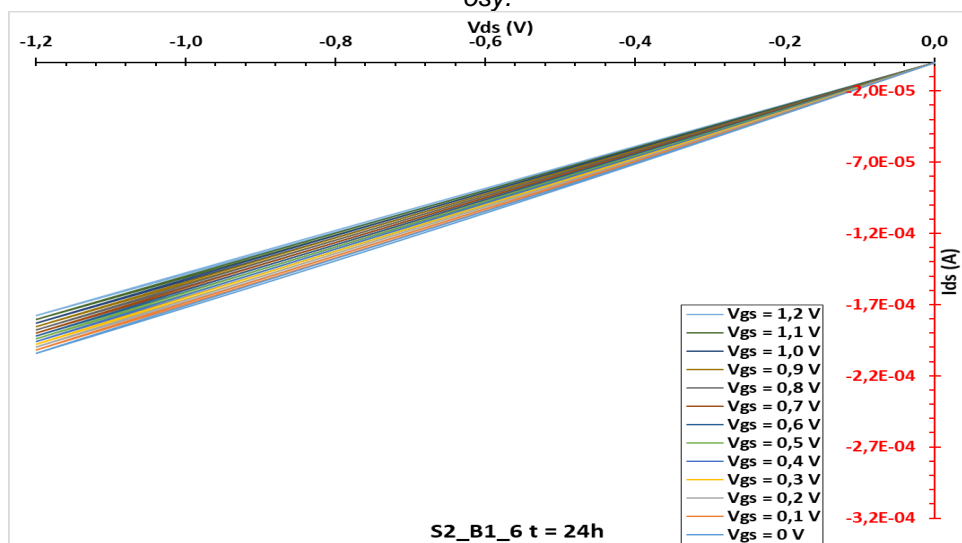
Obr. 71: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_3 (prostředí silikagel, čas t = 0 h), jiné měřítko Ids osy.



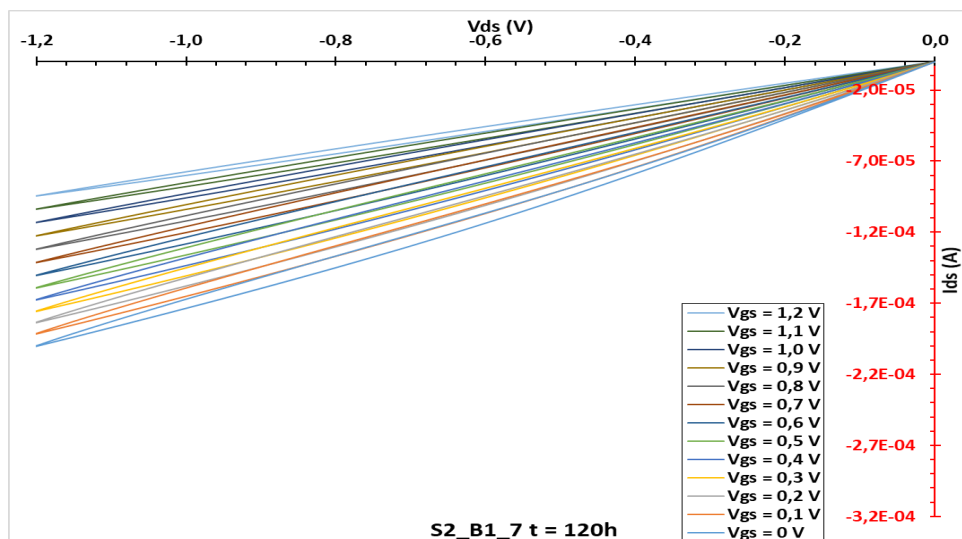
Obr. 72: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_4 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h), jiné měřítko  $I_{ds}$  osy.



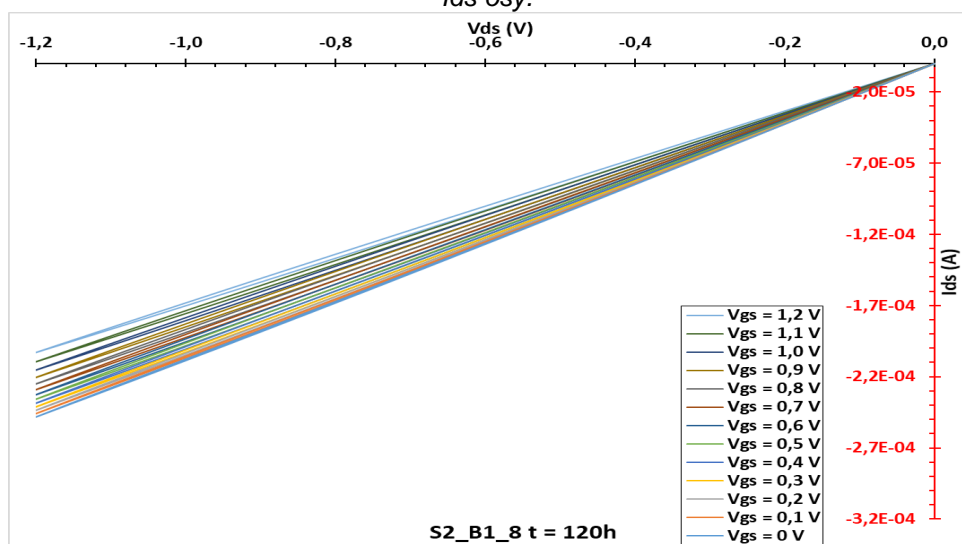
Obr. 73: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_5 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h), jiné měřítko  $I_{ds}$  osy.



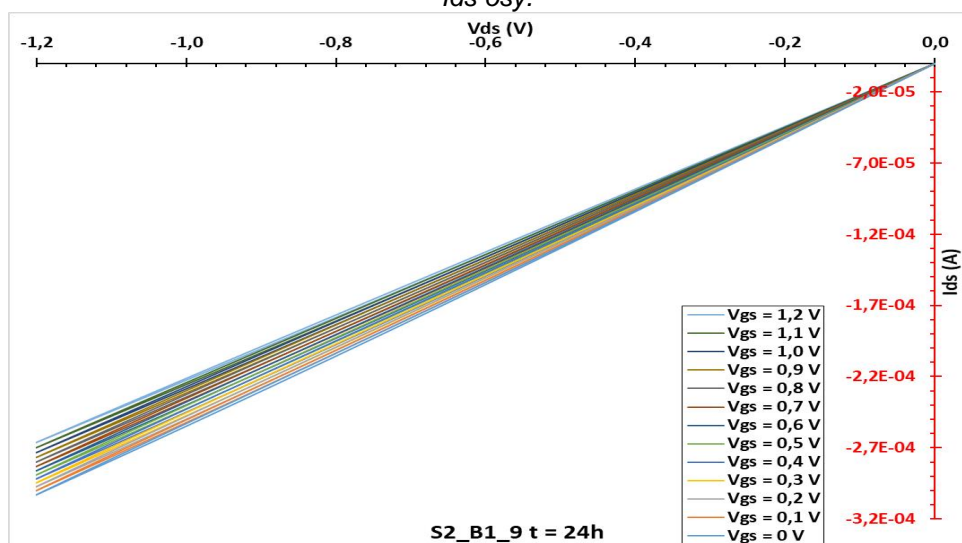
Obr. 74: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_6 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h), jiné měřítko  $I_{ds}$  osy.



Obr. 75: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_7 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h), jiné měřtko  $I_{ds}$  osy.

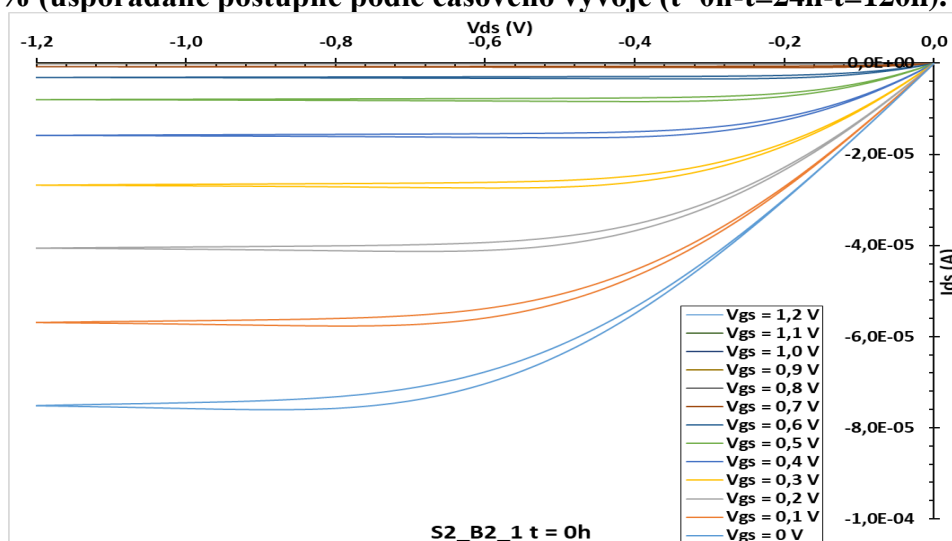


Obr. 76: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_8 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h), jiné měřtko  $I_{ds}$  osy.

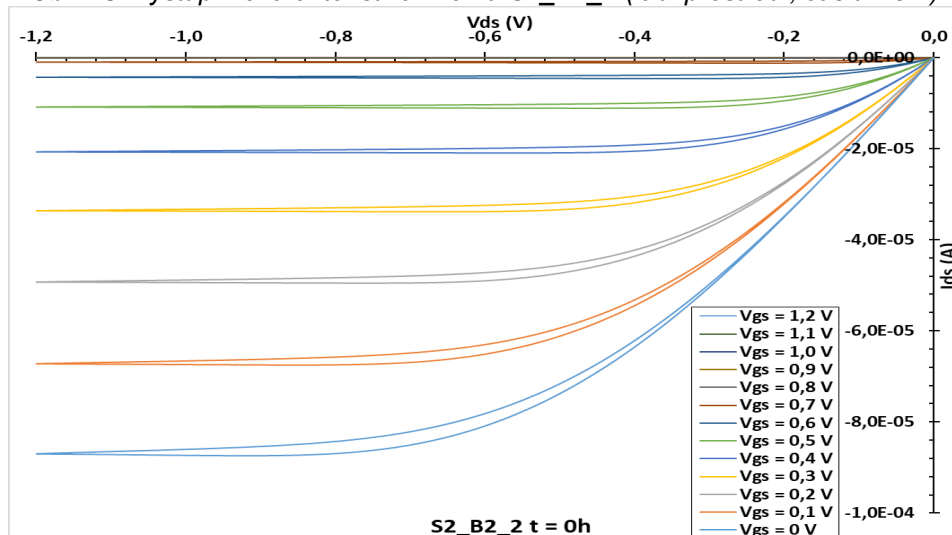


Obr. 77: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B1\_9 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h), jiné měřtko  $I_{ds}$  osy.

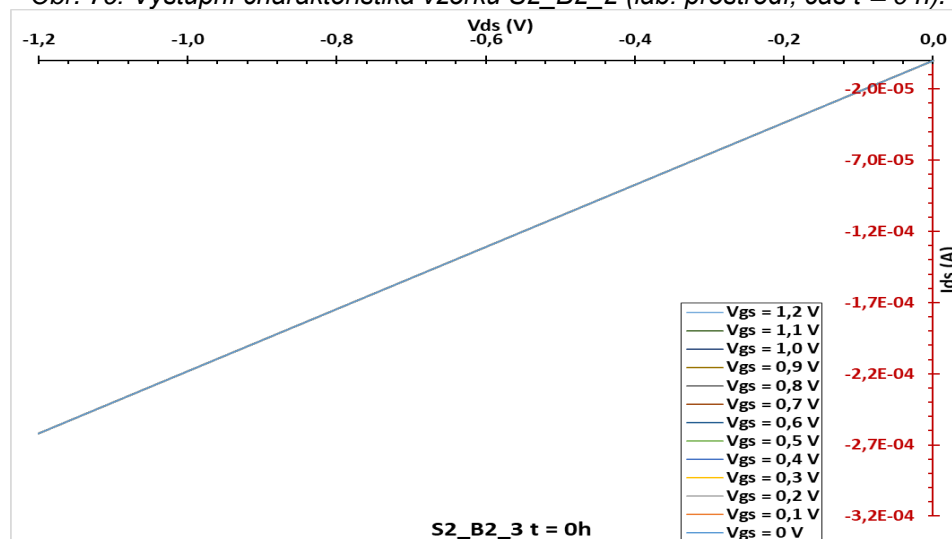
**Příloha G – Změřené výstupní charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH 40 ÷ 50% (uspořádané postupně podle časového vývoje ( $t=0h-t=24h-t=120h$ )).**



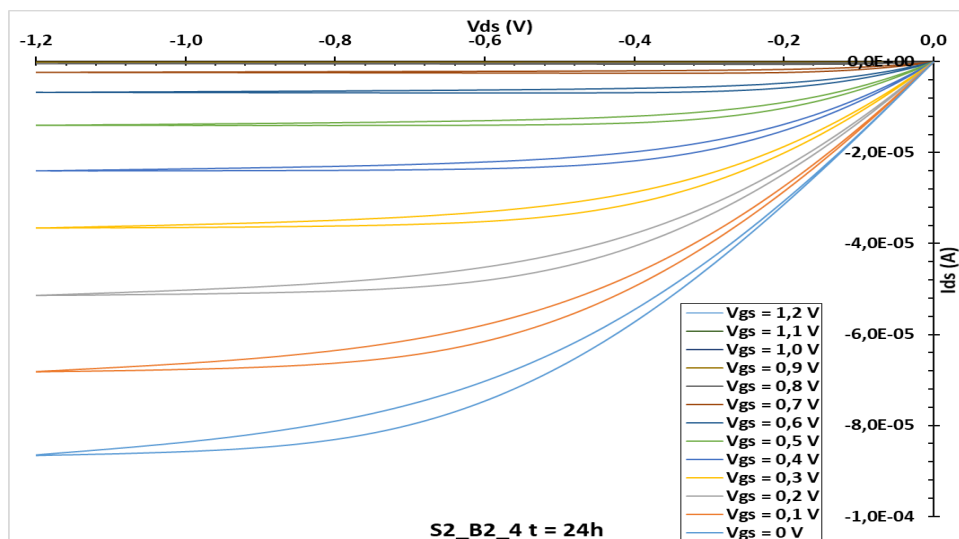
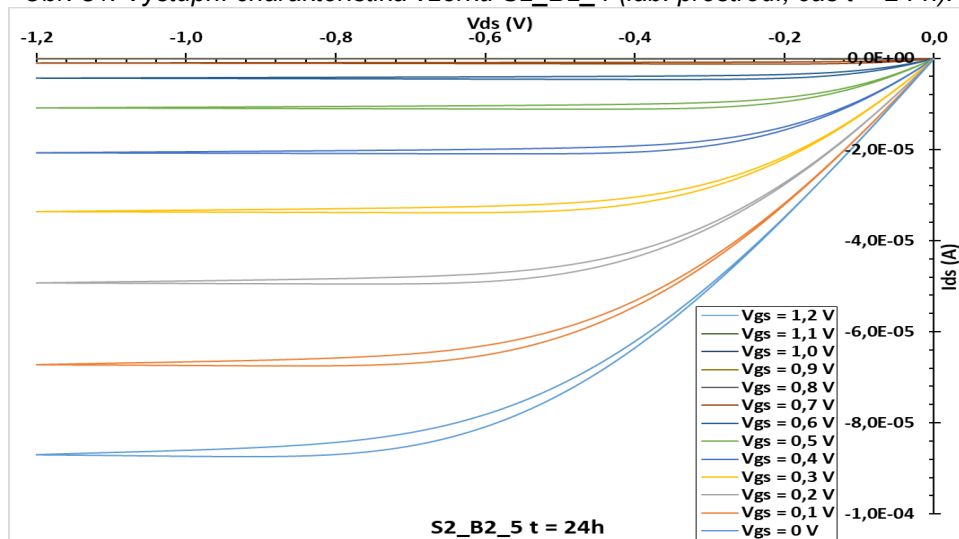
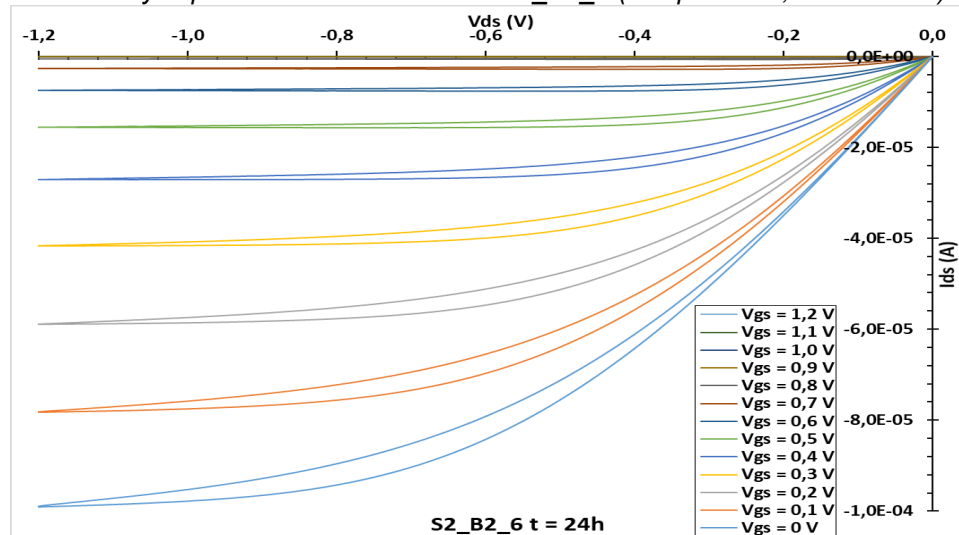
Obr. 78: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_1 (lab. prostředí, čas  $t = 0 h$ ).

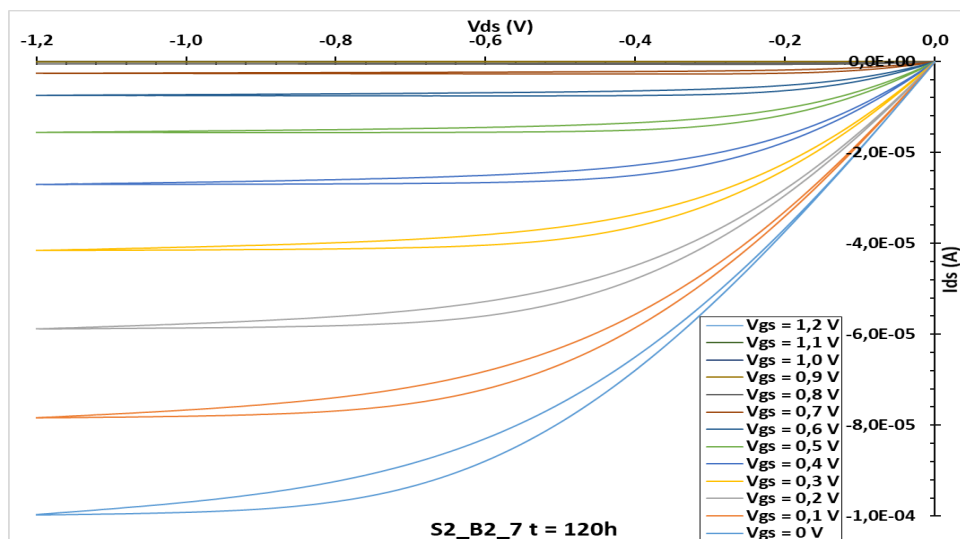
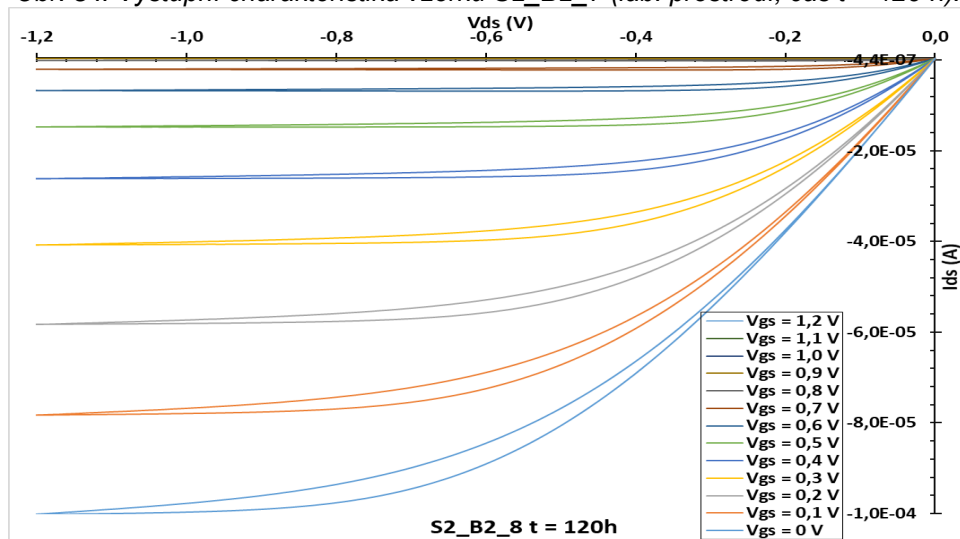
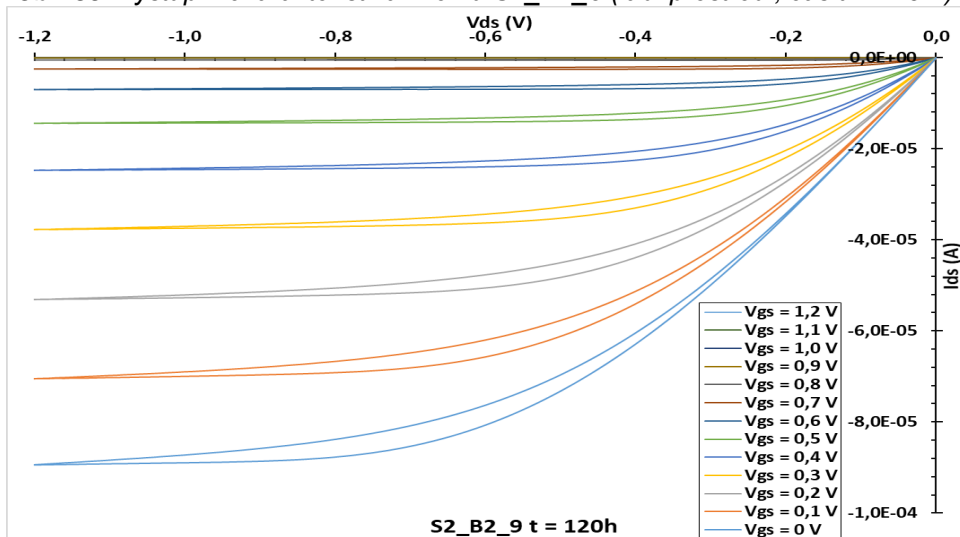


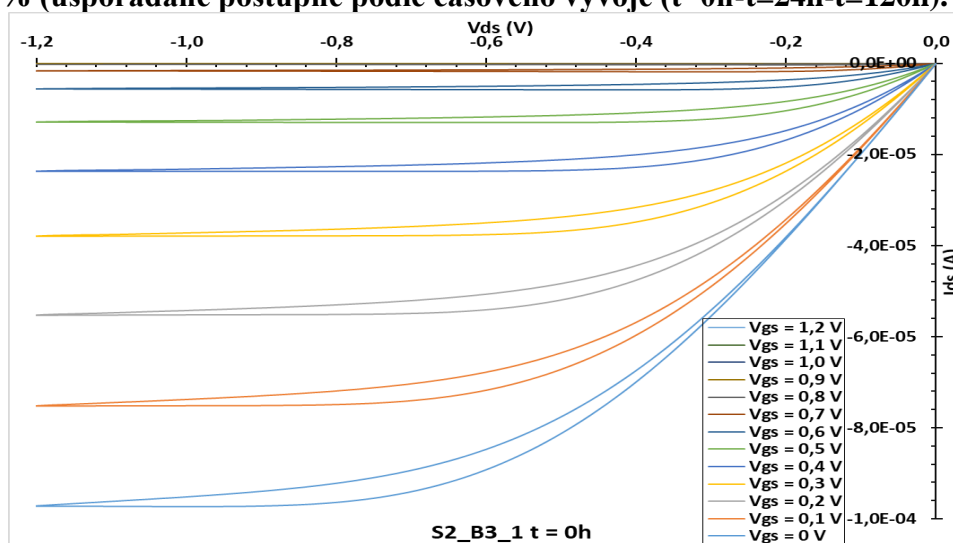
Obr. 79: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_2 (lab. prostředí, čas  $t = 0 h$ ).



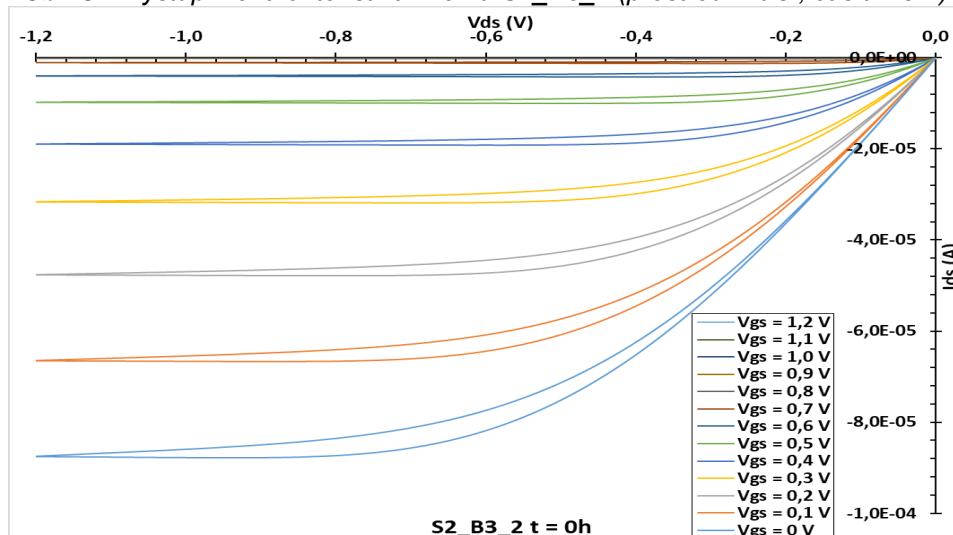
Obr. 80: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_3 (lab. prostředí, čas  $t = 0 h$ ), jiné měřítko  $I_{ds}$  osy.

Obr. 81: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_4 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).Obr. 82: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_5 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).Obr. 83: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_6 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).

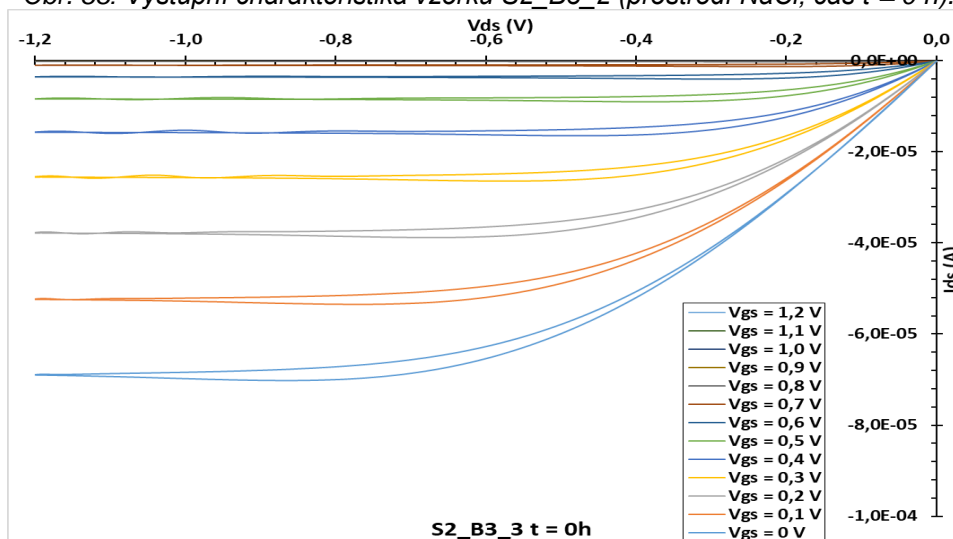
Obr. 84: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_7 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).Obr. 85: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_8 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).Obr. 86: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B2\_9 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).

**Příloha H – Změřené výstupní charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH 70 ÷ 80% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**

Obr. 87: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_1 (prostředí NaCl, čas t = 0 h).

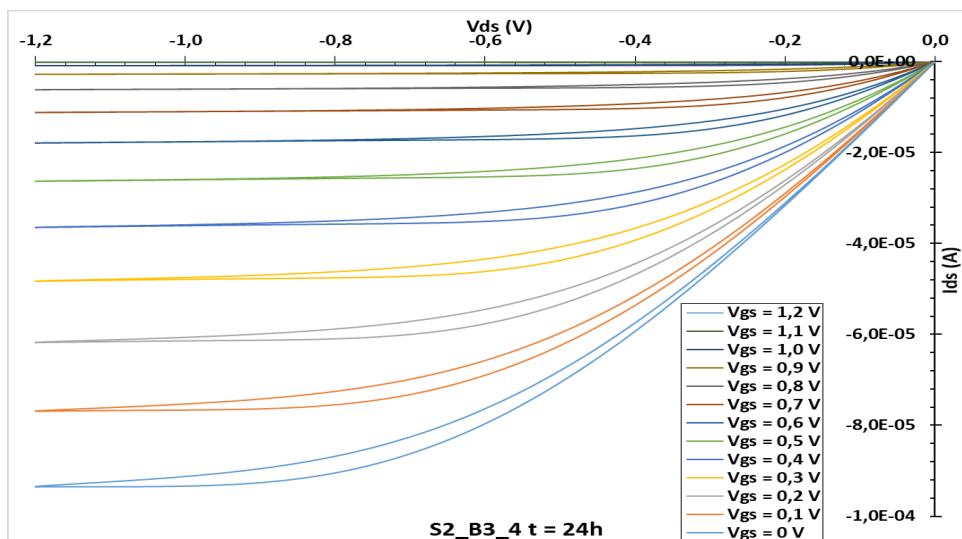
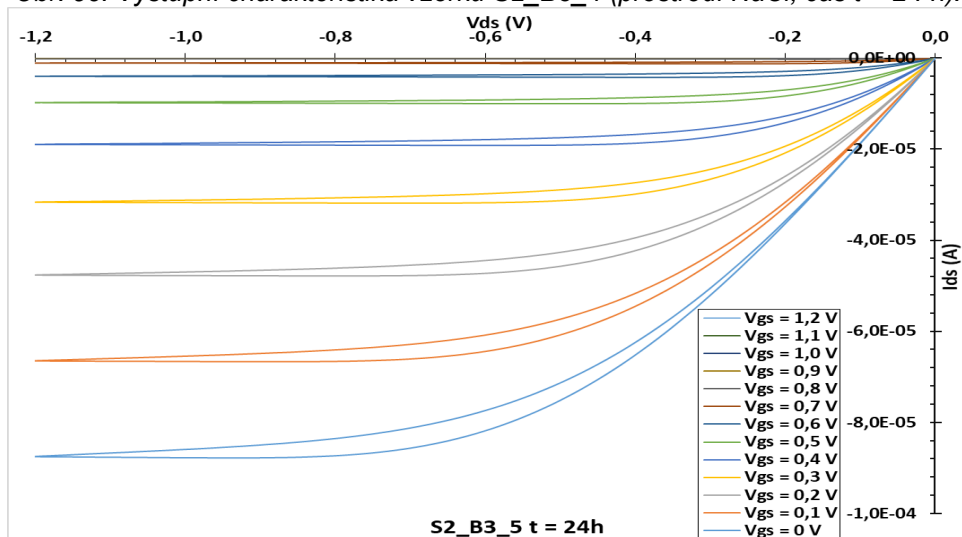
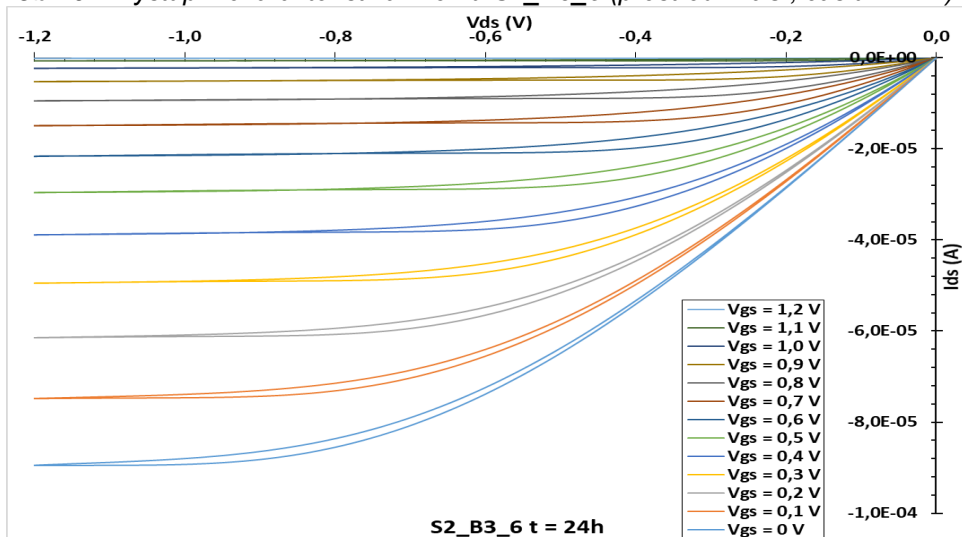


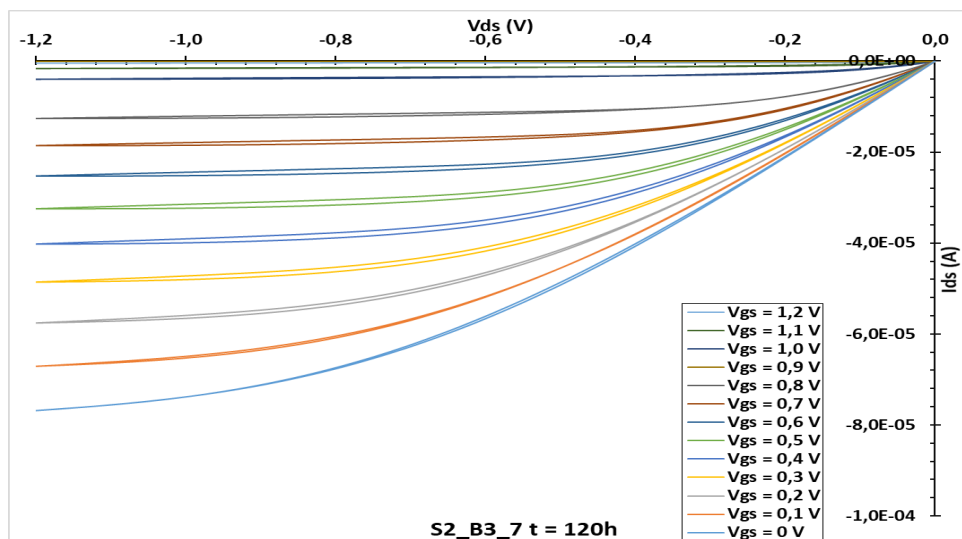
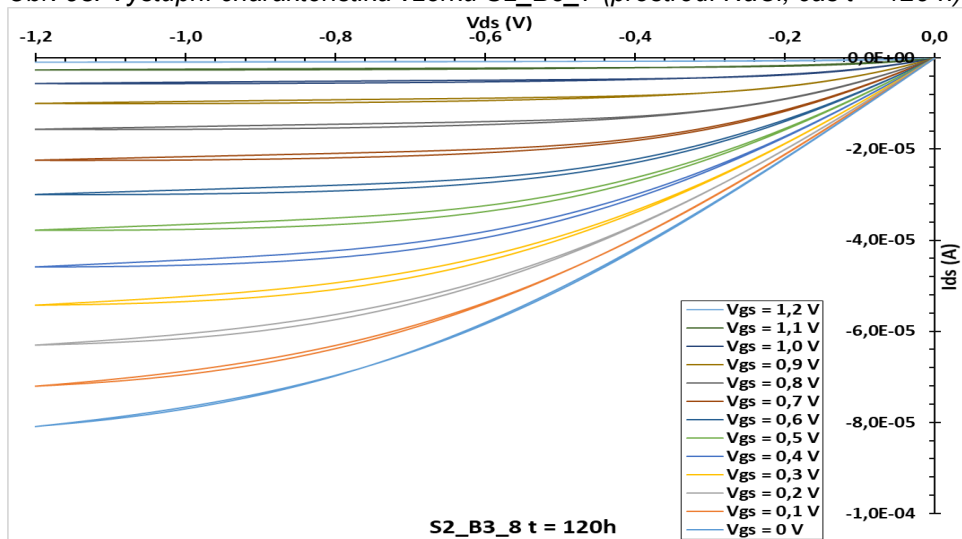
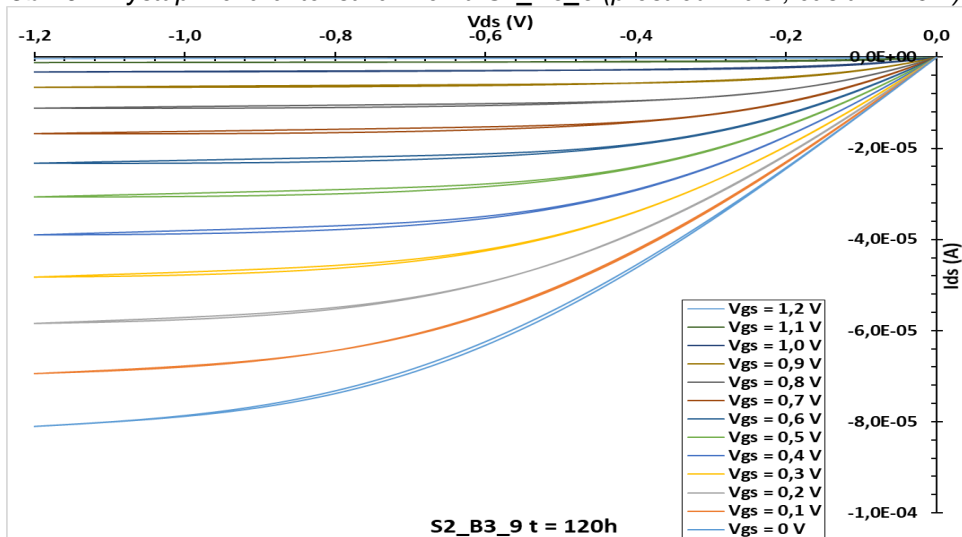
Obr. 88: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_2 (prostředí NaCl, čas t = 0 h).

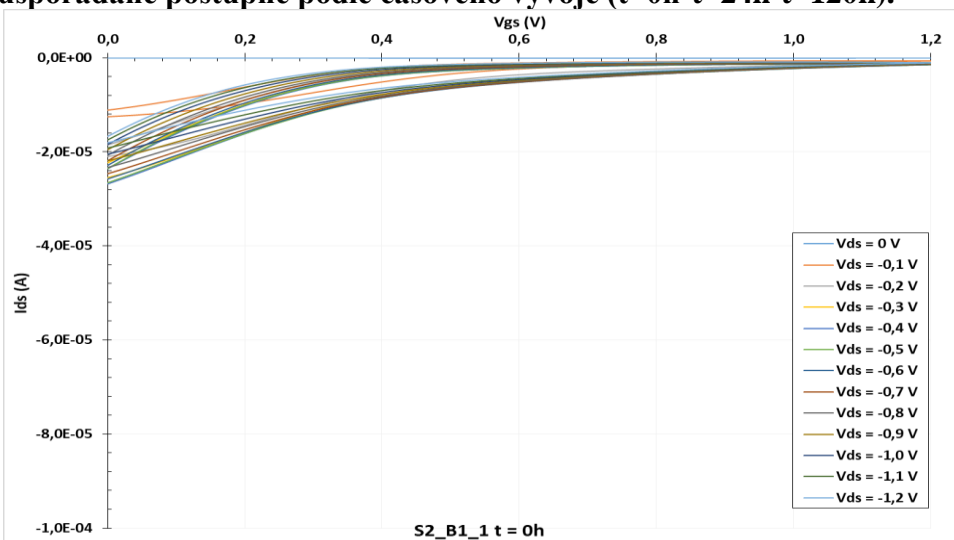
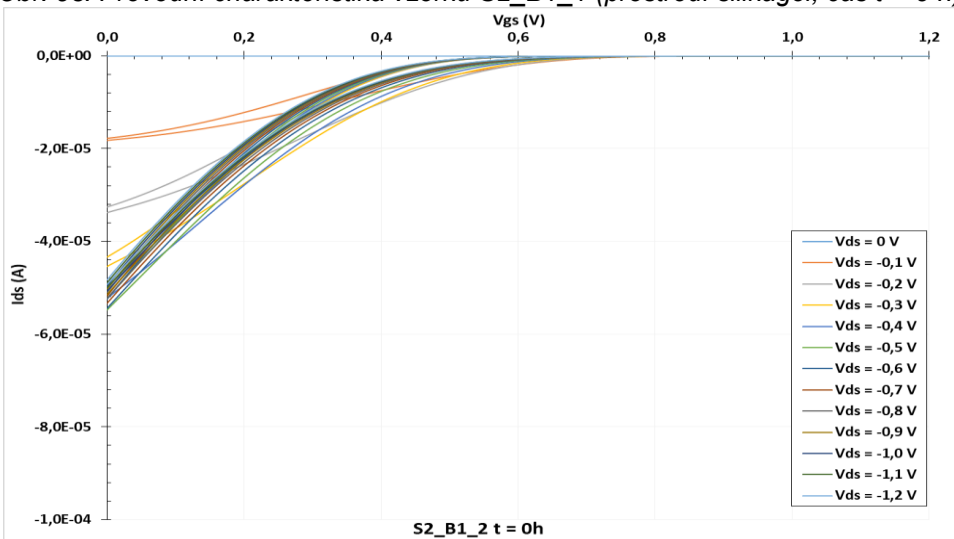
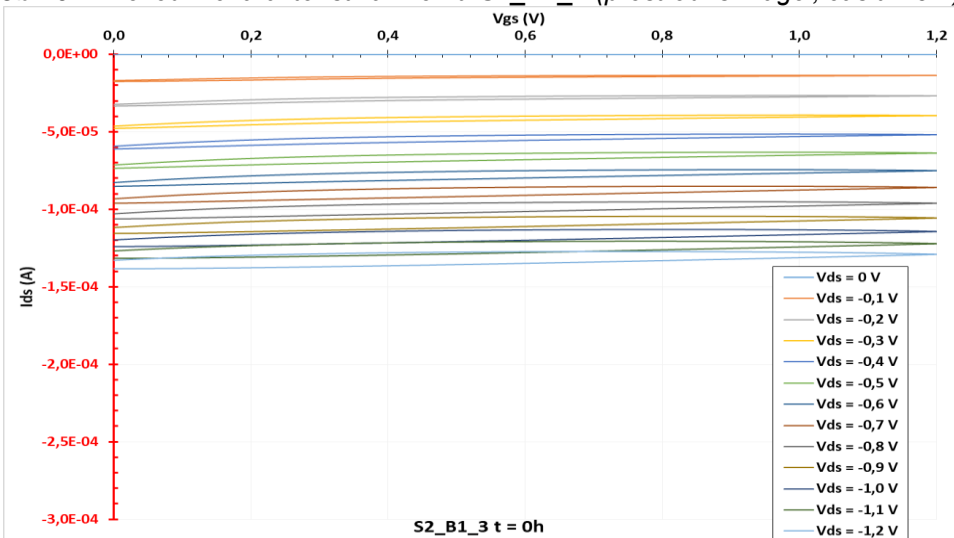


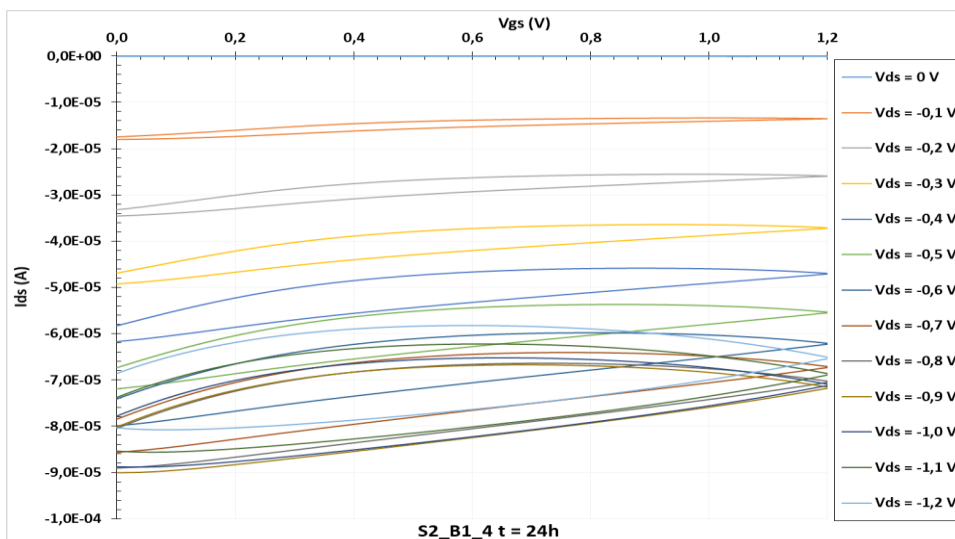
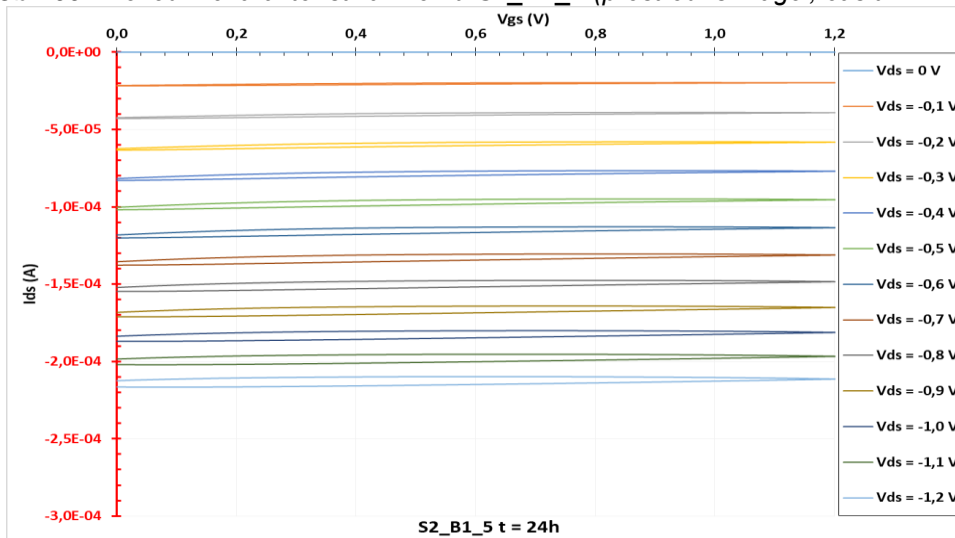
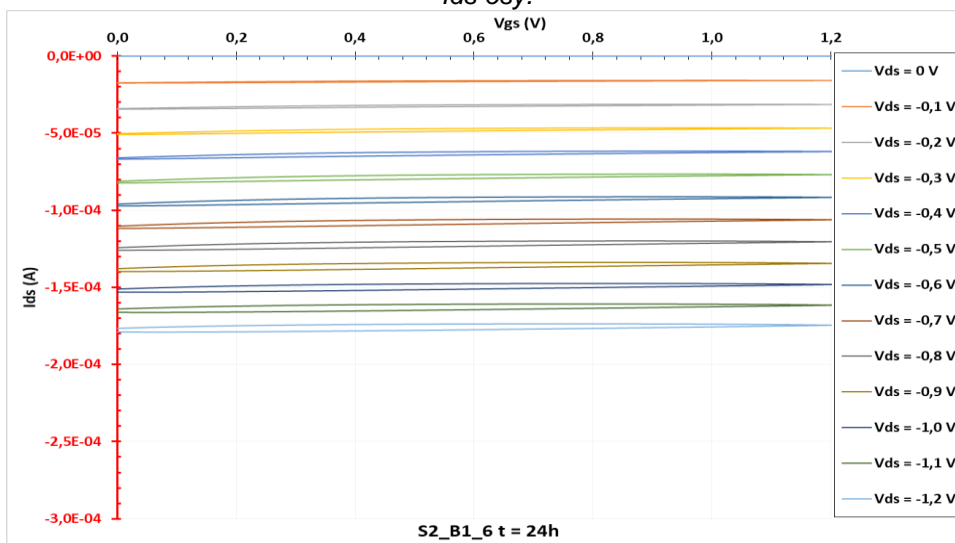
Obr. 89: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_3 (prostředí NaCl, čas t = 0 h).

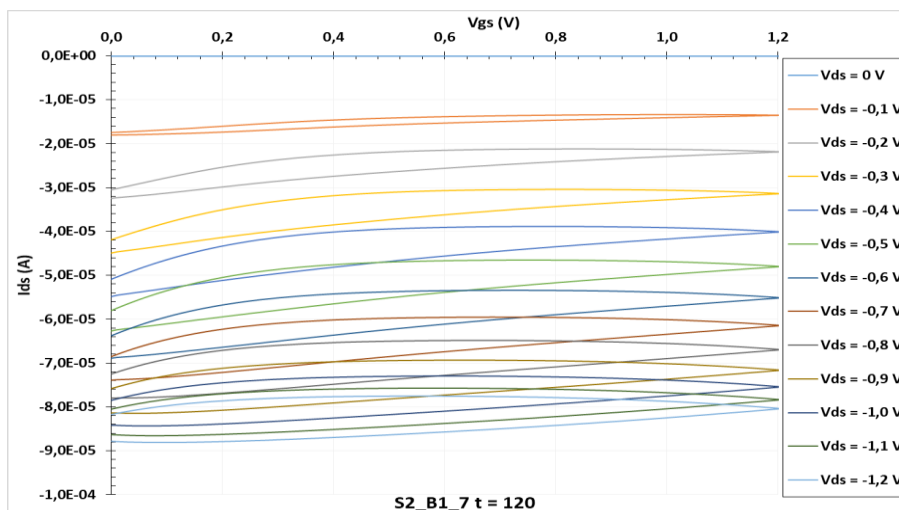
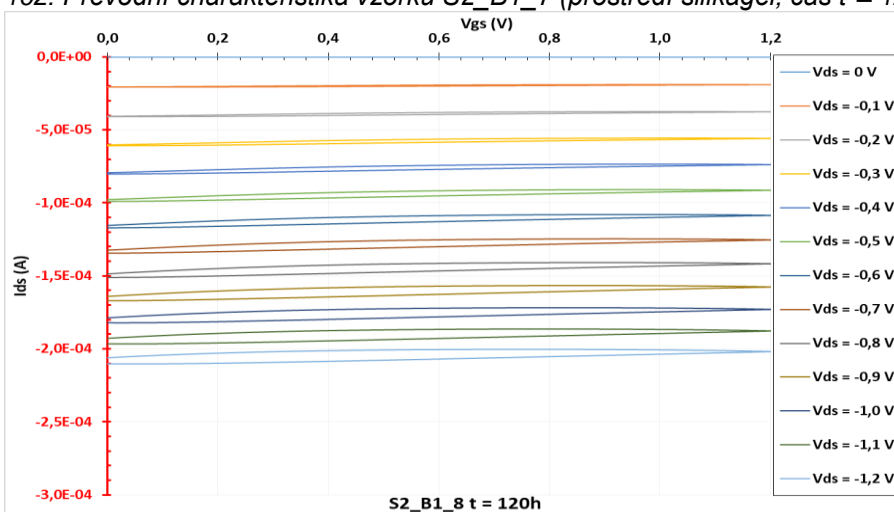
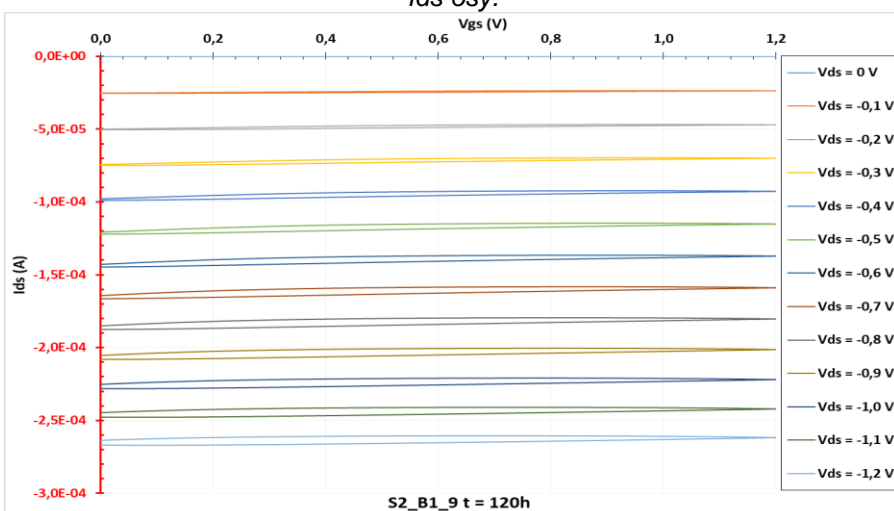


Obr. 90: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_4 (prostředí NaCl, čas  $t = 24$  h).Obr. 91: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_5 (prostředí NaCl, čas  $t = 24$  h).Obr. 92: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_6 (prostředí NaCl, čas  $t = 24$  h).

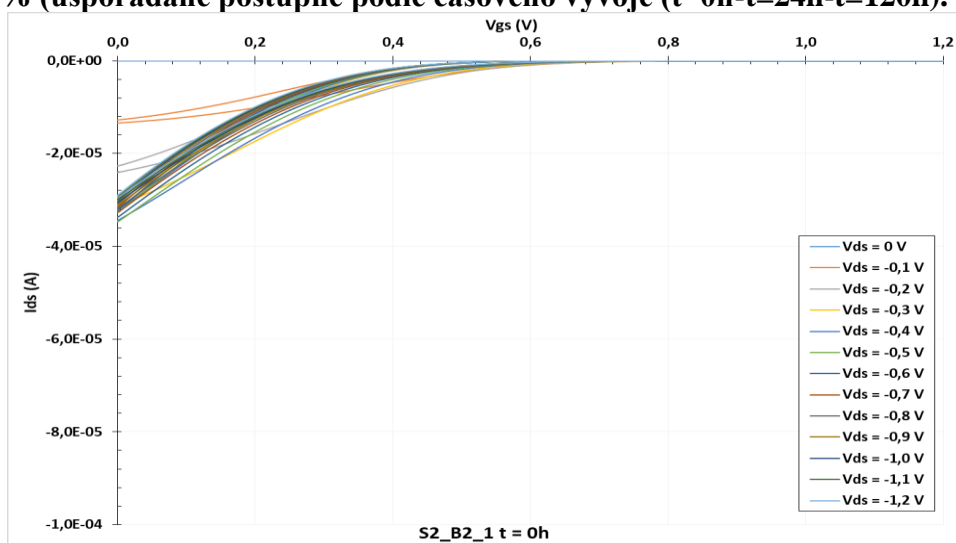
Obr. 93: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_7 (prostředí NaCl, čas  $t = 120$  h).Obr. 94: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_8 (prostředí NaCl, čas  $t = 120$  h).Obr. 95: Výstupní charakteristika vzorku S2\_B3\_9 (prostředí NaCl, čas  $t = 120$  h).

**Příloha I – Změřené převodní charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH <10% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**Obr. 96: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_1 (prostředí silikagel, čas  $t = 0$  h).Obr. 97: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_2 (prostředí silikagel, čas  $t = 0$  h).Obr. 98: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_3 (prostředí silikagel, čas  $t = 0$  h), jiné měřítko  $I_{ds}$  osy.

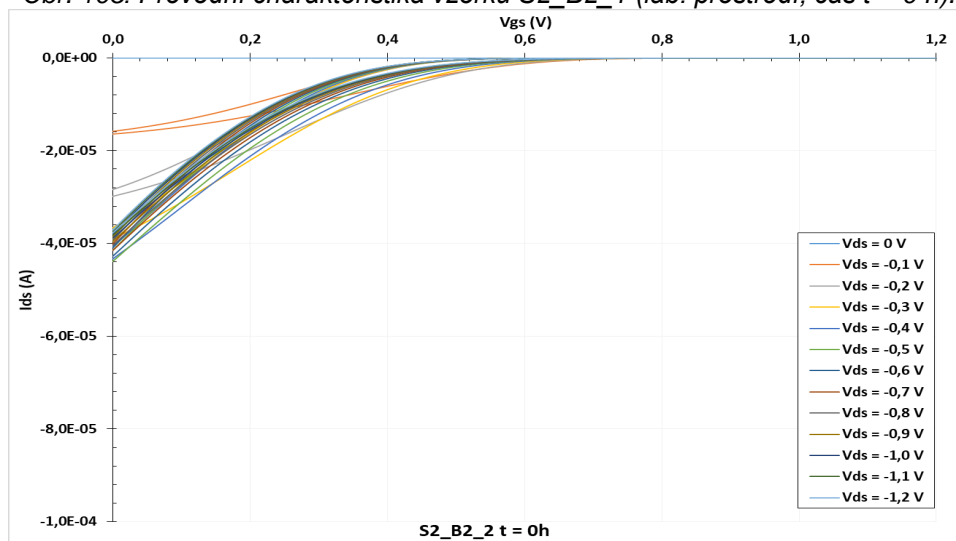
Obr. 99: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_4 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h).Obr. 100: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_5 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h), jiné měřítko Ids osy.Obr. 101: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_6 (prostředí silikagel, čas  $t = 24$  h), jiné měřítko Ids osy.

Obr. 102: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_7 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h).Obr. 103: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_8 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h), jiné měřítko Ids osy.Obr. 104: Převodní charakteristika vzorku S2\_B1\_9 (prostředí silikagel, čas  $t = 120$  h), jiné měřítko Ids osy.

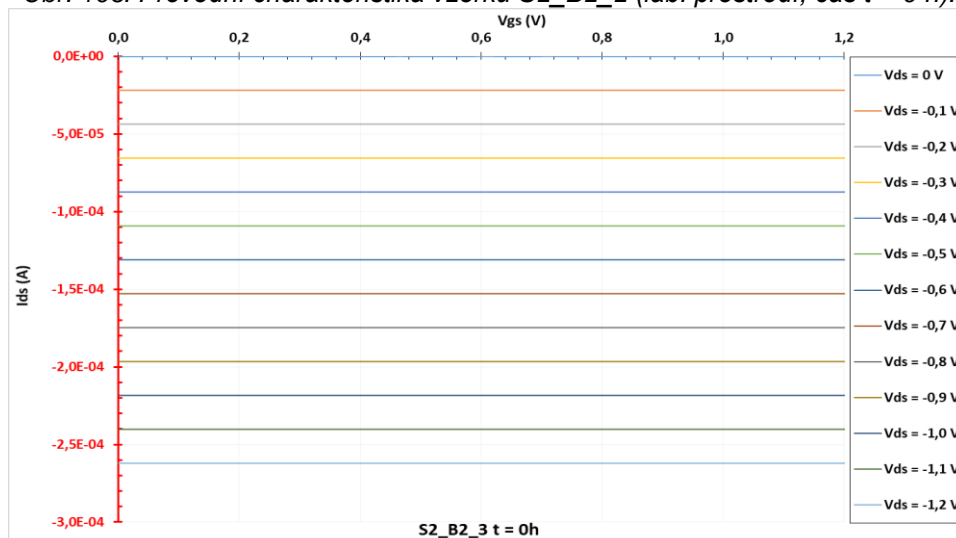
**Příloha J – Změřené převodní charakteristiky pro OECT umístěné v prostředí s RH 40 ÷ 50% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**



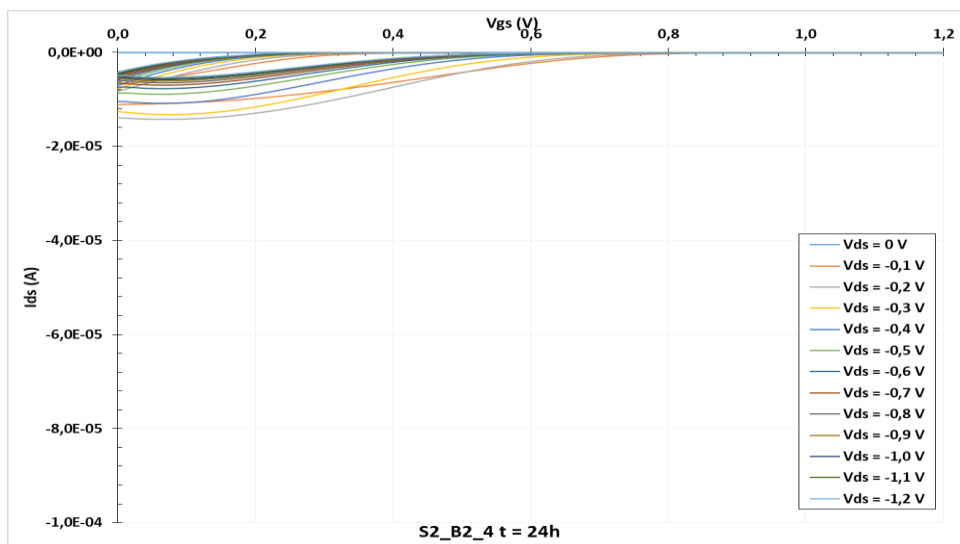
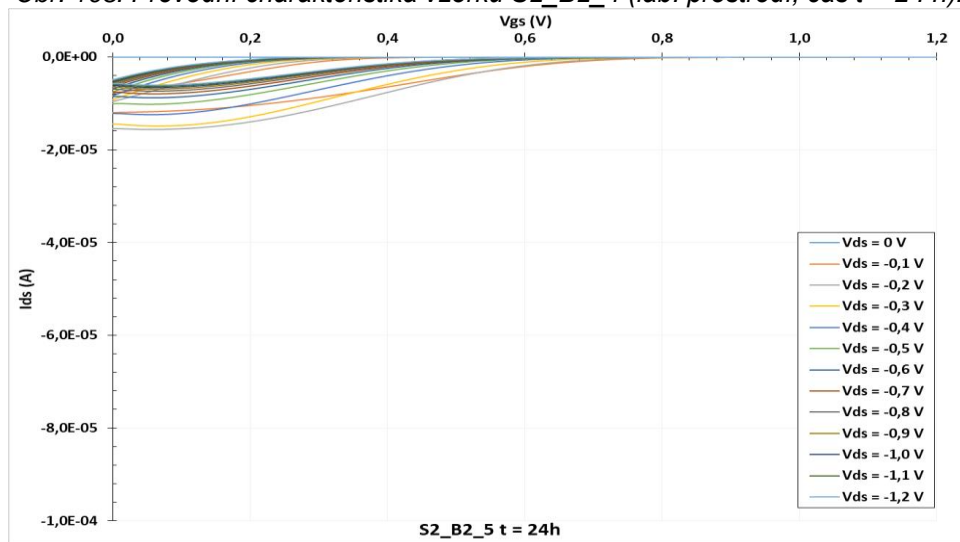
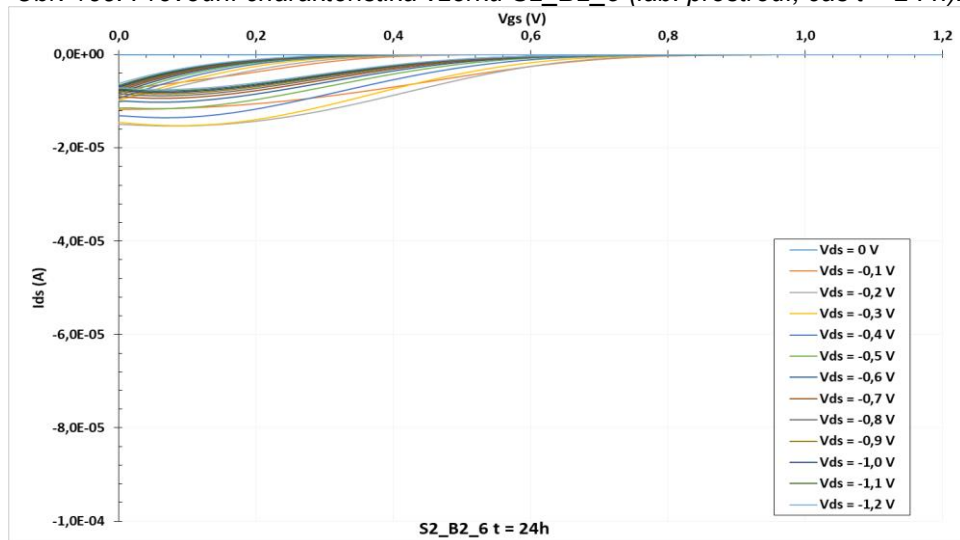
Obr. 105: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_1 (lab. prostředí, čas t = 0 h).

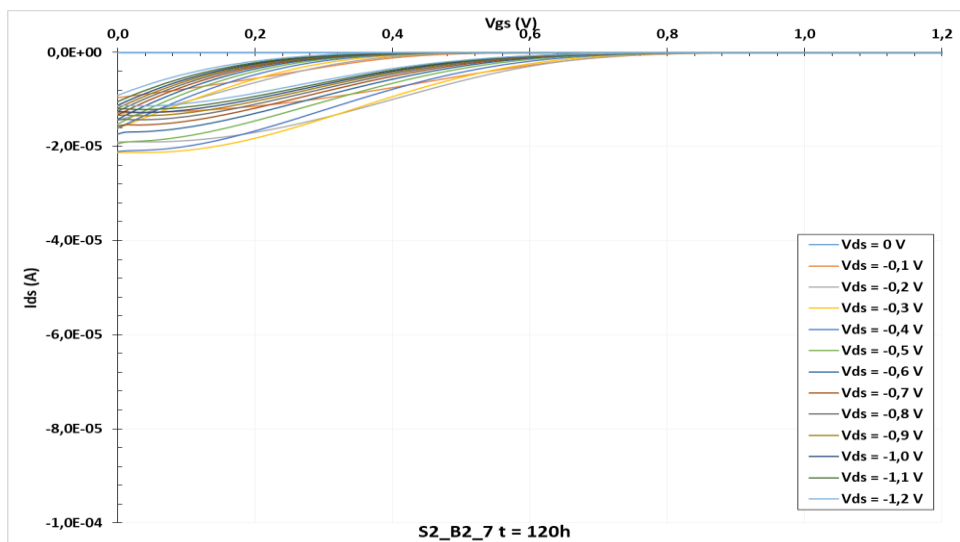
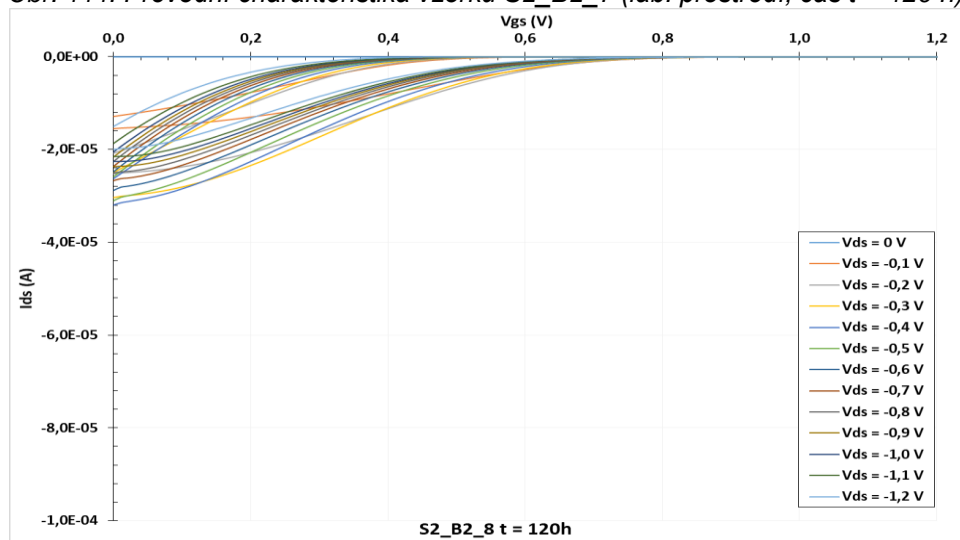
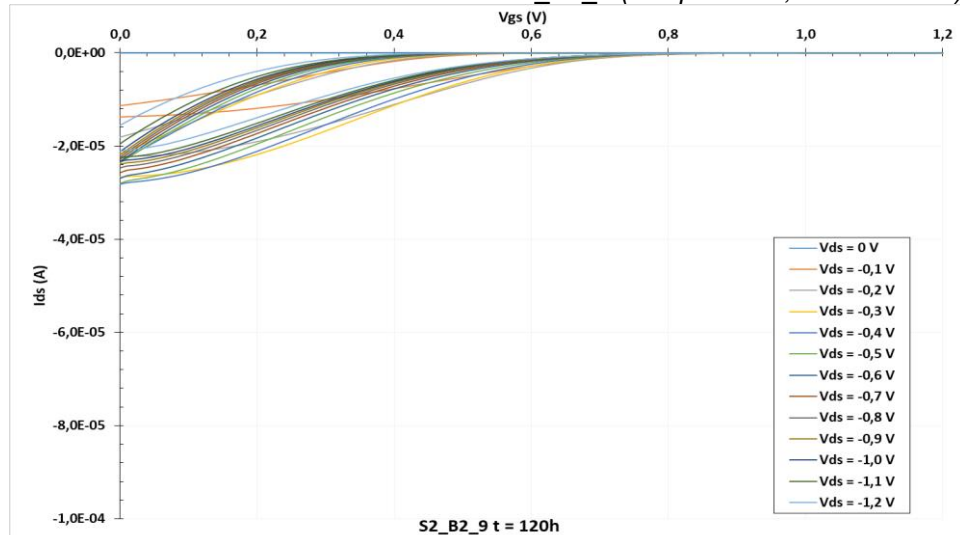


Obr. 106: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_2 (lab. prostředí, čas t = 0 h).

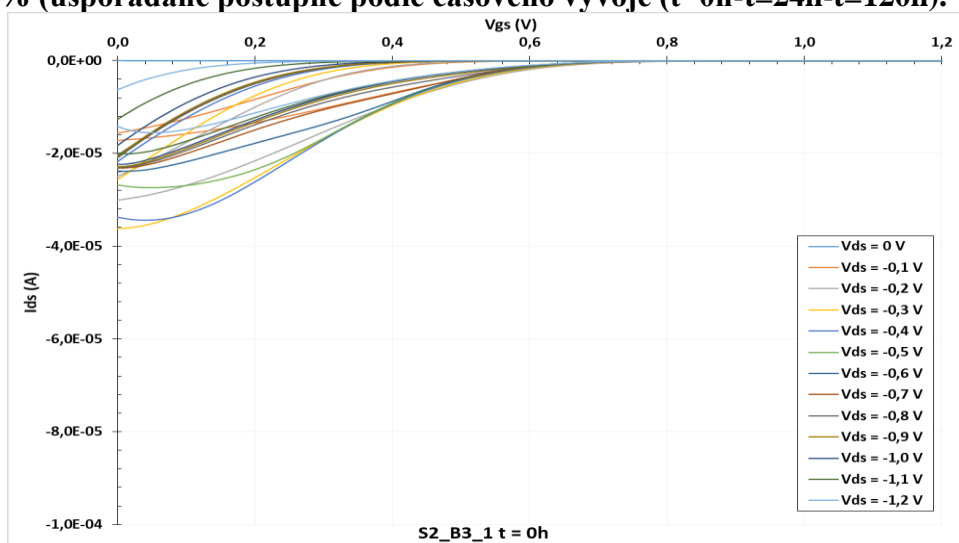


Obr. 107: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_3 (lab. prostředí, čas t = 0 h), jiné měřítko Ids osy.

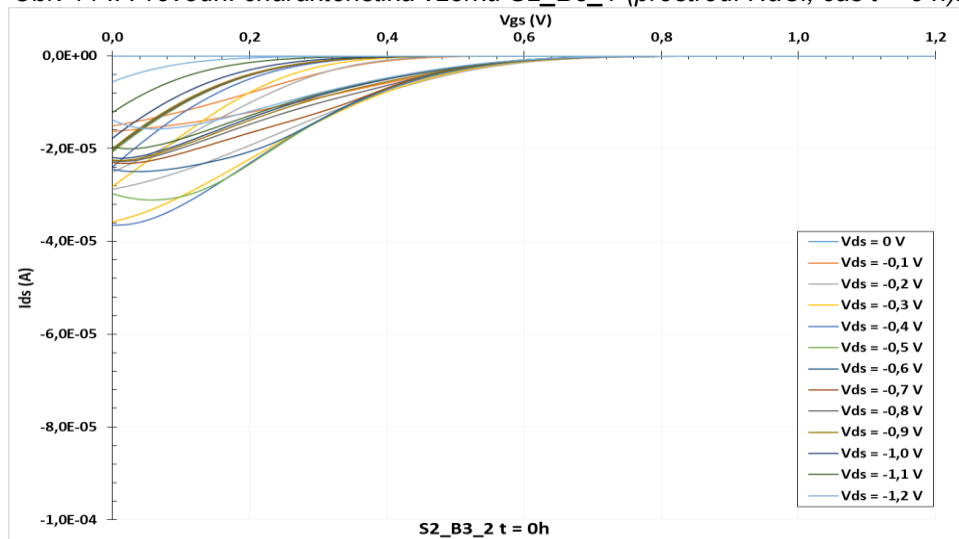
Obr. 108: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_4 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).Obr. 109: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_5 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).Obr. 110: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_6 (lab. prostředí, čas  $t = 24$  h).

Obr. 111: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_7 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).Obr. 112: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_8 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).Obr. 113: Převodní charakteristika vzorku S2\_B2\_9 (lab. prostředí, čas  $t = 120$  h).

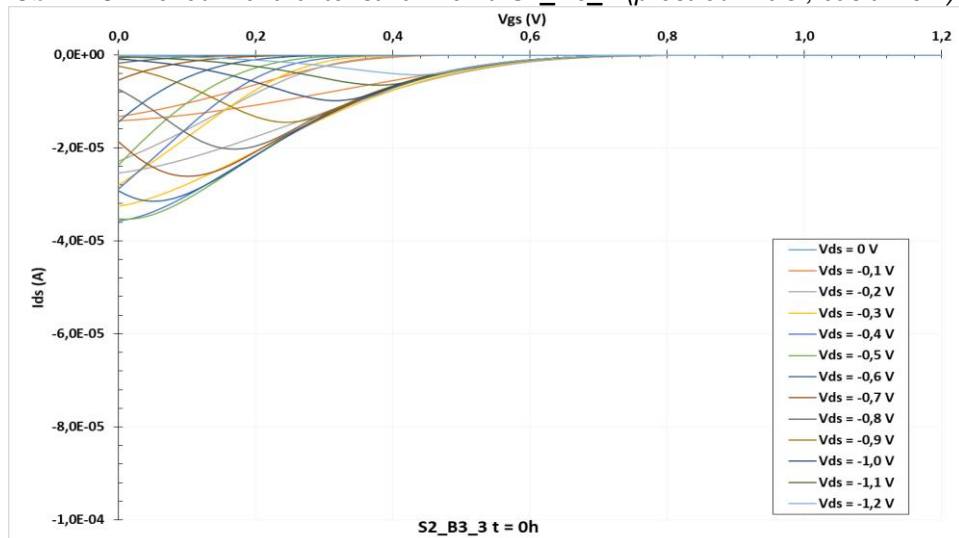


**Příloha K – Změřené převodní charakteristiky pro OEECT umístěné v prostředí s RH 70 ÷ 80% (uspořádané postupně podle časového vývoje (t=0h-t=24h-t=120h)).**

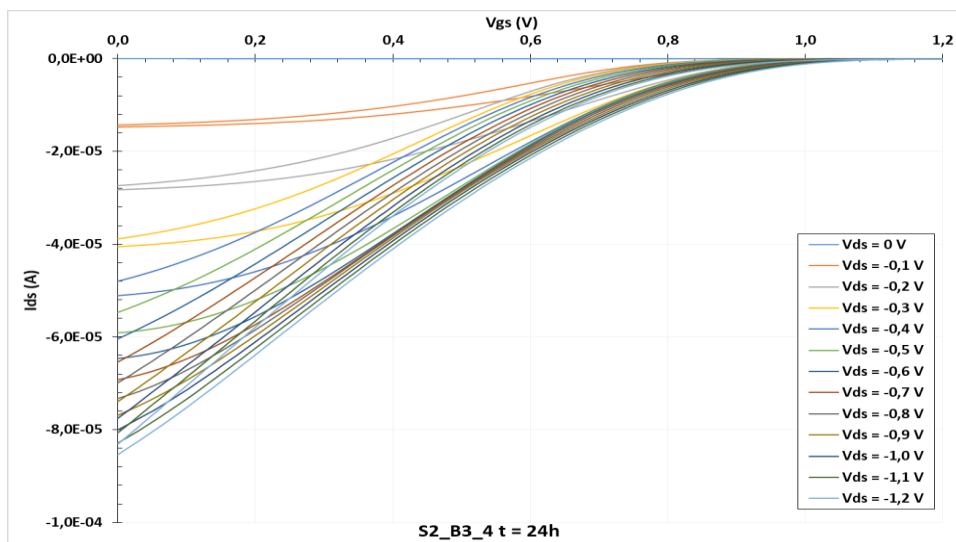
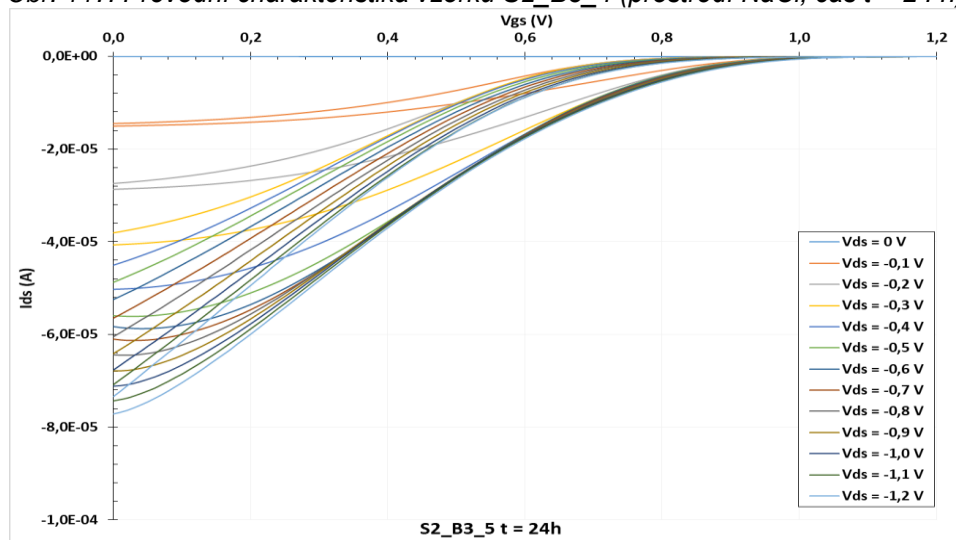
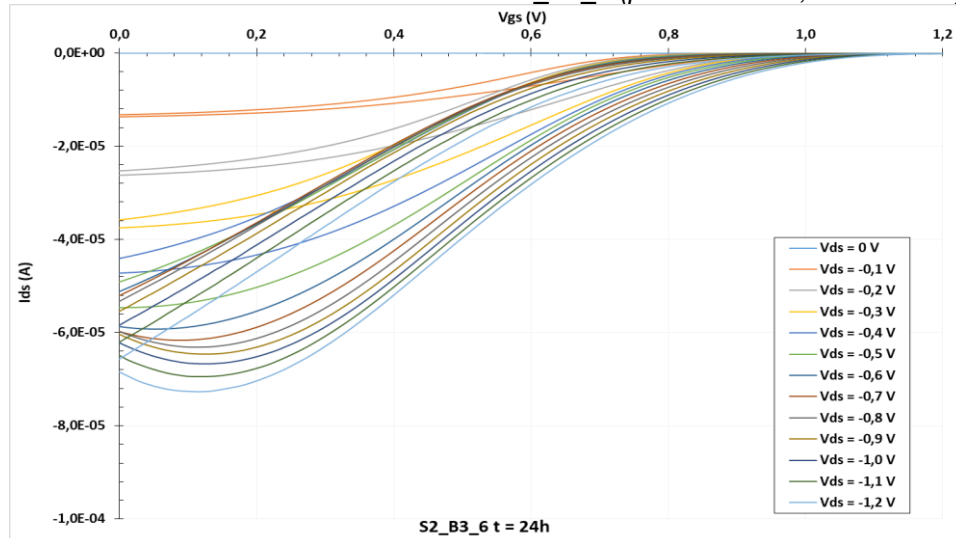
Obr. 114: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_1 (prostředí NaCl, čas t = 0 h).

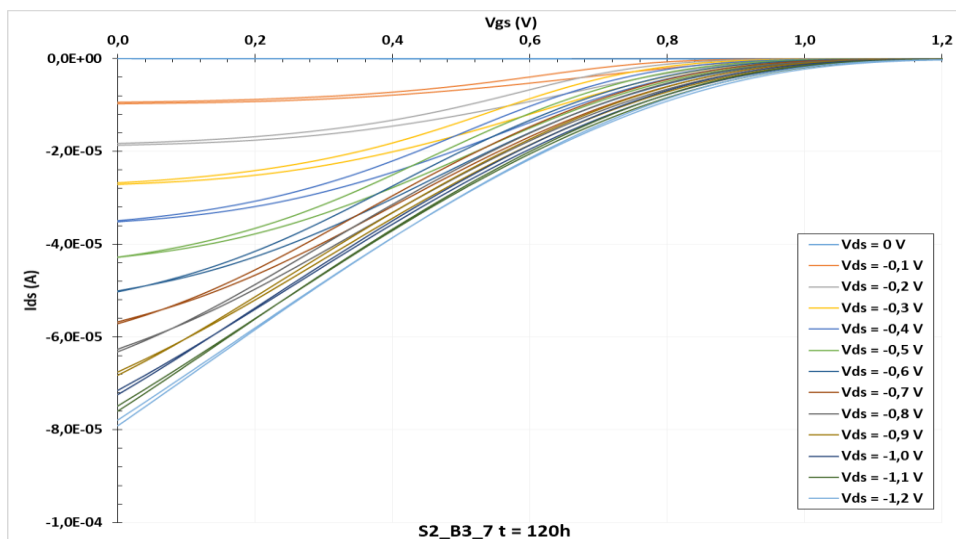
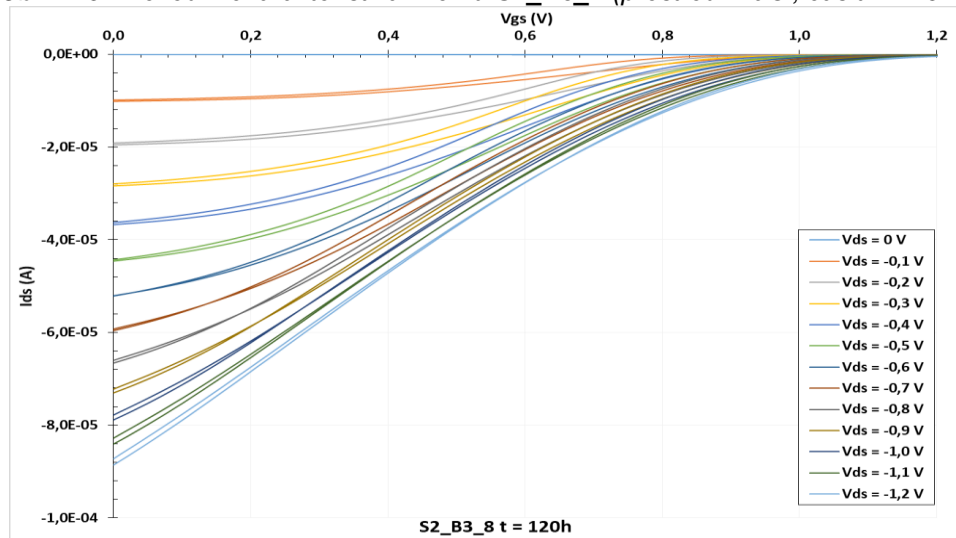
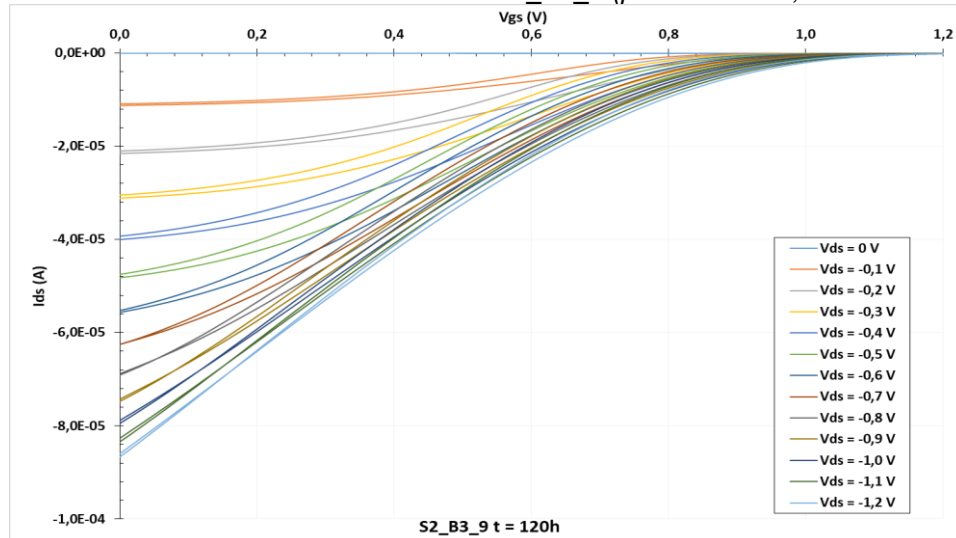


Obr. 115: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_2 (prostředí NaCl, čas t = 0 h).



Obr. 116: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_3 (prostředí NaCl, čas t = 0 h).

Obr. 117: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_4 (prostředí NaCl, čas  $t = 24$  h).Obr. 118: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_5 (prostředí NaCl, čas  $t = 24$  h).Obr. 119: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_6 (prostředí NaCl, čas  $t = 24$  h).

Obr. 120: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_7 (prostředí NaCl, čas  $t = 120$  h).Obr. 121: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_8 (prostředí NaCl, čas  $t = 120$  h).Obr. 122: Převodní charakteristika vzorku S2\_B3\_9 (prostředí NaCl, čas  $t = 120$  h).

## Příloha L – Tabulka všech parametrů extrahovaných v rámci charakterizace OEET.

Tab. 9: Extrahované parametry OEET.

označení vzorku	čas	prostředí	V <sub>th</sub> (V)	g <sub>m</sub> (S)	-I <sub>ds</sub> (A)			t (ms)	
					ON	OFF	I <sub>on</sub> /I <sub>off</sub> (-)	ON-OFF	OFF-ON
S2_B1_1	t = 0h	RH <10%	0,543	5,31E-05	-4,07E-05	-4,78E-06	8,51	92,5	140
S2_B1_2			0,536	1,67E-04	-7,64E-05	-1,61E-07	474,53	11	26
S2_B1_3									151
S2_B1_4	t = 24h	RH <10%	Nelze extrahovat hodnoty z převodních charakteristik		-8,51E-05	-6,12E-05	1,39	473	451
S2_B1_5					-1,31E-04	-1,25E-04	1,05	233	333
S2_B1_6					-1,02E-04	-9,71E-05	1,05	233	281
S2_B1_7	t = 120h	RH <10%			-9,39E-05	-8,45E-05	1,11	307	407
S2_B1_8					-1,25E-04	-1,19E-04	1,05	228	281
S2_B1_9					-1,52E-04	-1,46E-04	1,04	276	319
S2_B2_1	t = 0h	RH 40 ÷ 50%	0,491	1,18E-04	-5,60E-05	-1,26E-07	444,44	5,5	21,5
S2_B2_2			0,484	1,53E-04	-6,61E-05	-1,29E-07	512,40	5	15
S2_B2_3			defektní vzorek						
S2_B2_4	t = 24h	RH 40 ÷ 50%	0,263	3,02E-05	-5,99E-05	-2,99E-07	200,33	85	193
S2_B2_5			0,297	3,15E-05	-6,62E-05	-2,84E-07	233,10	62	172
S2_B2_6			0,325	3,83E-05	-6,92E-05	-3,76E-07	184,04	79,5	177
S2_B2_7	t = 120h	RH 40 ÷ 50%	0,36	4,96E-05	-7,40E-05	-3,23E-07	229,10	69,5	164
S2_B2_8			0,373	5,29E-05	-7,60E-05	-2,67E-07	284,64	55,5	143
S2_B2_9			0,391	5,67E-05	-6,61E-05	-2,35E-07	281,28	47	123
S2_B3_1	t = 0h	RH 70 ÷ 80%	0,243	5,12E-05	-6,50E-05	-1,45E-07	448,28	12,2	149
S2_B3_2			0,221	4,75E-05	-6,12E-05	-1,22E-07	501,64	11	49
S2_B3_3			0,375	4,78E-07	-3,91E-05	-1,26E-07	310,32	7,8	305
S2_B3_4	t = 24h	RH 70 ÷ 80%	1,011	1,18E-04	-6,16E-05	-5,31E-07	116,01	10,3	387,5
S2_B3_5			0,892	1,85E-04	-6,65E-05	-5,77E-07	115,25	10,1	448
S2_B3_6			0,978	1,62E-04	-6,42E-05	-6,93E-07	92,64	10	349
S2_B3_7	t = 120h	RH 70 ÷ 80%	1,19	1,48E-04	-5,61E-05	-2,55E-06	22,00	12,8	19,5
S2_B3_8			1,247	1,63E-04	-5,85E-05	-3,37E-06	17,36	15	18
S2_B3_9			1,125	1,74E-04	-6,12E-05	-1,64E-06	37,32	11,8	21