

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

QuoVadis Research @ FEI



ročník 5, číslo 2
September 2022

ISSN 2585-9587

QuoVadis Research @ FEI je vedecký časopis, ktorého obsahom sú prezentácie výsledkov vedeckého bádania v oblasti informatických a elektrotechnických vied na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach (FEI TUKE). Časopis obsahuje plnotextové vedecké články, ktorých obsahom sú výsledky dizertačných prác doktorandov a ich školiteľov obhájených v aktuálnom období na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Vedecké články prispievajú k rozšíreniu vedeckých poznatkov v odboroch informatiky a elektrotechniky. Ide o podporu a rozvoj takých odborov ako je výpočtová technika a informatika, počítačové siete, kyberbezpečnosť, mechatronika a automatizácia, kybernetika a umelá inteligencia, multimediálna telekomunikačná technika, aplikovaná informatika, počítačové modelovanie, vybrané oblasti matematiky, hospodárska informatika, elektronika, mikroelektronika a optoelektronika, spracovanie signálov, teoretická elektrotechnika, elektroenergetika a technika vysokých napätí, silnoprúdová elektrotechnika, meracie systémy v elektronike, riadenie elektrotechnickej výroby, materiály a technológie elektroniky, štruktúra a vlastnosti moderných materiálov. Prijaté rukopisy uvádzajú relevantnú medzinárodnú literatúru a popisujú nové objavy, aplikácie nových techník a metód, použitie existujúcej metodológie na nový problém, čím prispievajú k rozširovaniu základných vedeckých poznatkov v danej vednej disciplíne.

Redakčná rada

Šéfredaktor časopisu:

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

Výkonný redaktor:

doc. Ing. Anton Baláž, PhD.

Členovia:

prof. Ing. Jaroslav Porubán, PhD.

odbor: informatika

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

odbor: informatika, kyberbezpečnosť

prof. Ing. Peter Sinčák, CSc.

odbor: kybernetika, umelá inteligencia, inteligentné systémy, aplikovaná informatika

prof. Ing. Ján Paralič, PhD.

odbor: hospodárska informatika, informatika

prof. RNDr. Ján Plavka, CSc.

odbor: aplikovaná matematika, počítačové modelovanie, informatika

prof. Ing. Jozef Juhár, CSc.

odbor: multimediálne telekomunikácie, počítačové siete, informatika

prof. Ing. Michal Kolcun, PhD.

odbor: elektroenergetika a technika vysokých napätí, elektrotechnika

prof. Ing. Dobroslav Kováč, CSc.

odbor: teoretická elektrotechnika, automatizácia, elektrotechnika

prof. Ing. Daniela Perduková, PhD.

odbor: elektrotechnika, mechatronika, riadenie elektrotechnickej výroby

prof. Ing. Alena Pietriková, CSc.

odbor elektrotechnológie a materiály, elektrotechnika

prof. Ing. Ján Šaliga, PhD.

odbor: elektronika, spracovanie signálov, optoelektronika, meranie, elektrotechnika

prof. RNDr. Ján Ziman, CSc.

odbor: štruktúra a vlastnosti moderných materiálov, elektrotechnika

Adresa vydavateľa a redakcie: Redakcia časopisu QuoVadis Research @ FEI, Technická univerzita v Košiciach Fakulta elektrotechniky a informatiky, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika, email:quovadis@fei.tuke.sk

Obsah

Modely batériových systémov elektrovozidiel

Juraj Biľanský, Milan Lacko 4-17

Metódy a algoritmy automatizovaného spracovania dát a modelov kozmickej fyziky

Daniel Gecášek, Ján Genči, Pavol Bobík 17-25

Analýza zmien v elektrofyzikálnej štruktúre izolačného materiálu impedančnou spektroskopiou

Peter Havran, Roman Cimbala 25-47

Dynamika doménových stien vo feromagnetických mikrodrôtoch

Jana Horniaková, Jozef Onufer 47-55

Plne optické komunikačné siete

Tomáš Huszaník, Ján Turán 55-70

Emulátor dynamických momentov

Jozef Ivan, František Ďurovský 70-83

Výskum technológií WAMS systémov v oblasti riadenia elektrizačných sústav

Vladimír Kohan, Michal Kolcun, Zsolt Čonka 83-102

Metódy strojového učenia pre tvorbu klasifikačných modelov zameraných na kardiovaskulárne ochorenia

Zuzana Pella, Ján Paralič 102-116

Využitie smart zariadení v medicínskej oblasti

Pavol Šatala, Peter Butka 116-123

Modely batériových systémov elektrovozidiel

Juraj Biľanský

Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE
Košice, Slovensko
Email: juraj.bilansky@tuke.sk

Milan Lacko

Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE
Košice, Slovensko
Email: milan.lacko@tuke.sk

Abstract—Článok je zameraný na aktuálnu problematiku li-ion batériových článkov. Popisuje základné vlastnosti týchto článkov, ich spôsoby testovania a používania. Okrem prehľadovej časti je tu možné nájsť aj návrh vlastného riešenia testovacieho zariadenia. Toto zariadenie je schopné vykonávať dlhodobé testy článkov. V poslednej časti článku sú vyhodnotené výsledky z dlhodobých testov na vybranom type článku. Tieto výsledky sú následne využité na tvorbu veľmi presného modelu článku v programe Matlab Simulink. Tieto modely sú schopné presne aproximovať napätia, kapacitu a degradáciu reálnych článkov. Presnosť merania je demonštrovaná na overovacích priebehoch.

Abstract—The paper is focused on current issues of li-ion batteries. Paper describes the basics of the li-ion battery cells, ways of testing and use. In addition to the overview part, it is possible to find a design of own test equipment. This device is capable of performing long-term cyclical tests of cells. In the last part, the article evaluates the results of long-term tests on selected type of cell. These results are used to create a highly accurate model of the cell in Matlab Simulink. These models can accurately approximate real cells' voltage, capacity and degradation. Measurement accuracy is demonstrated on verification measurements.

SKRATKY

NiMh	Nickel-Metal hydride
NiCd	Nickel-Cadmium
Li-ion	Lithium-ion
SOH	Stav životnosti batérie %
SOC	Stav nabitia batérie v %
CC/CV	Constant Current - Constant Voltage
EIS	Elektrochemická impedančná spektroskopía

I. ÚVOD

Batérie sa v posledných rokoch stali veľmi dôležitou súčasťou našich životov. Poskytujú napájanie pre takmer každé mobilné zariadenie, ktoré dennodenne používame. Medzi tieto zariadenia patrí napríklad notebook, mobilný telefón a podobne. Pokrok vo svete elektronickej je každý rok obrovský. Keďže chceme pokrokové mobilné zariadenia zlepšovať aj po stránke výkonu a výdrže potrebujeme inovovať aj ich mobilné zdroje energie, ktoré sa nazývajú batérie, resp. batériové články. V dnešnej dobe sa technologické firmy predbiehajú, ktorá vytvorí batériu s lepšími parametrami ako sú kapacita a životnosť. V súčasnej dobe je na trhu dostupné obrovské množstvo rôznych batériových článkov, ktoré sa líšia tvarom, kapacitou, technológiou výroby a podobne. Medzi najznámejšie typy patria napr. nikel-kadmium (NiCd), nikel-metal hydrid

(NiMh) alebo lítium-ión (Li-ion). Práve posledné menované lítium-iónové batérie sa v dnešnej dobe dostávajú do popredia viac a viac. Používajú sa v mobiloch, notebookoch a mnohých ďalších odvetviach. Tieto batérie sú vďaka svojím vlastnostiam aktuálne najvhodnejšie aj pre použitie v elektromobiloch. Tento článok je zameraný práve na tieto batérie, ktoré sa už v dnešnej dobe používajú takmer v každom elektrickom vozidle (elektrické autá, elektrické skútre, elektrické bicykle, atď.). Takéto batérie v elektromobiloch sa nazývajú trakčné batérie. Ich úlohou je premena elektrickej energie na pohyb. Tieto batérie sú zvyčajne relatívne veľké, ťažké a tvoria významnú časť hmotnosti vozidla. Trakčné batérie (v závislosti od veľkosti vozidla) pozostávajú z veľkého počtu malých batériových článkov, ktoré vhodným sériovo-paralelným spájáním tvoria celú batériu elektrického vozidla. Celkové vlastnosti tejto batérie majú významný vplyv na vlastnosti vozidla. Dá sa povedať, že batéria z veľkej miery definuje základné vlastnosti vozidla ako sú výkon, dojazd, hmotnosť a obratnosť. Cyklické testovanie takýchto článkov je energetický, časový a finančne náročný (batérie sú drahé, ťažké a majú vysoký výkon) [1], [2].

II. LI-ION BATÉRIE

Li-ion batérie majú viacero výhod. Ponúkajú relatívne vysoké kapacity (2 Ah a viac v závislosti na type článku) a dlhú životnosť článku (1000 cyklov a viac) [3].

- Relatívne vysoké pracovné napätia (2.5 V – 4.2 V)
- Vysoká výkonová hustota a žiaden pamäťový efekt
- Veľmi dobré nabíjacie/vybíjacie charakteristiky a samovybíjanie na úrovni 2–5% za mesiac
- Široký rozsah pracovných teplôt od -20°C do +60°C

Jednou z ich nevýhod je to, že ak chceme dosiahnuť dlhú životnosť článku je potrebné sa k nim správať podľa určitých podmienok:

- Dodržiavať predpísané nabíjacie/vybíjacie prúdy
- Správny postup nabíjania CC/CV (Constant Current/Constant Voltage)
- Chrániť batériu pred prebíjaním, podvybíjaním
- Zabezpečiť teplotný manažment článku (chrániť ju pred chladom, prehriatím)

Li-ion batérie dosahujú životnosť približne 500 – 1 000 cyklov v závislosti na presnom zložení batérie. Táto časť sa zameriava na správny proces nabíjania a vybíjania Li-ion batérie. Okrem

toho sú v tejto časti tiež popísané ochrany, ktoré musia byť počas týchto procesov zabezpečené. Ako je možné vidieť na obr. 1, Li-ion batérie sa vyrábajú v rôznych tvaroch (valcové, hranolové, gombíkové atď.) a vo väčšine prípadov majú menovité napätie okolo 3,7 V [4], [2], [5]. Hlavnou



Fig. 1. Rôzne druhy Li-ion batériových článkov [6]

úlohou bolo vytvoriť spôsob, ako získať presné modely batérií na základe nameraných dát. K tomuto účelu bolo potrebné postaviť testovacie zariadení, ktoré bude vykonávať cyklické nabíjanie a vybíjanie článkov.

III. SPÔSOB TESTOVANIA ČLÁNKOV

Batérie je možné testovať z viacerých hľadísk ako sú napríklad elektrické, mechanické alebo teplotné vlastnosti článku. Vykonané testy boli zamerané práve na elektrické vlastnosti článku. Tieto testy zohľadňujú schopnosti batérie dodávať určité napätie, prúd a kapacitu. Takéto testovanie prebieha opakovaným nabíjaním a vybíjaním článkov [7], [8].

A. Nabíjanie

Optimálny proces nabíjania Li-Ion článkov sa nazýva CC/CV (Constant Current/Constant Voltage) a pozostáva z dvoch fáz:

- Fáza konštantného prúdu (CC) je fáza počas ktorej do batérie tečie regulovaný prúd o konštantnej hodnote. Zvyčajne sa volí konštantný prúd v rozsahu 0,5 - 1 C (Ak má článok kapacitu 2500mAh $1C = 2.5A$) v závislosti na presnom type článku. Tento prúd je potrebné udržiavať určitým zariadením s prúdovou reguláciou. Teda prúd je konštantný a napätie na článku pomaly začne narastať. Táto prvá fáza, teda fáza konštantného prúdu je využívaná až do momentu, kedy sa na svorkách batérie objaví jej maximálne povolené napätie, ktoré stanovil výrobca. Vo väčšine prípadov je to hodnota okolo 4.2 V. Po dosiahnutí tejto hodnoty napätia nabíjanie prechádza do druhej fázy [9], [10].
- Fáza konštantného napätia (CV) je fáza počas, ktorej už batéria nie je schopná prijímať prúd s hodnotou používanou v prvej fáze bez toho aby sa jej výstupné napätie nezvyšovalo nad maximálnu povolenú hodnotu

napätia, ktorú stanovil výrobca. Keďže batéria na začiatku tejto fázy ešte nie je plne nabitá, pripojíme na ňu zdroj konštantného napätia s maximálnou hodnotou, ktorú určil výrobca. Vo väčšine prípadov je to hodnota okolo 4.2 V. Vďaka tomu, batéria neprekročí túto hodnotu napätia na výstupe. Avšak začne do nej tiecť prúd, ktorý ju bude nabíjať až do 100%. Tento prúd nadobúda klesavý exponenciálny tvar. Hodnota prúdu klesá až do minimálnej hodnoty prúdu, kedy sa batéria považuje za plne nabitú [9], [10].

Celkový proces nabíjania, ktorý je popísaný vyššie je možné vidieť v grafickej podobe na obr. 2. Je nutné povedať, že dĺžka jednotlivých fáz je výrazne ovplyvnená presným typom batéria a hlavne maximálnym prúdom v prvej fáze.

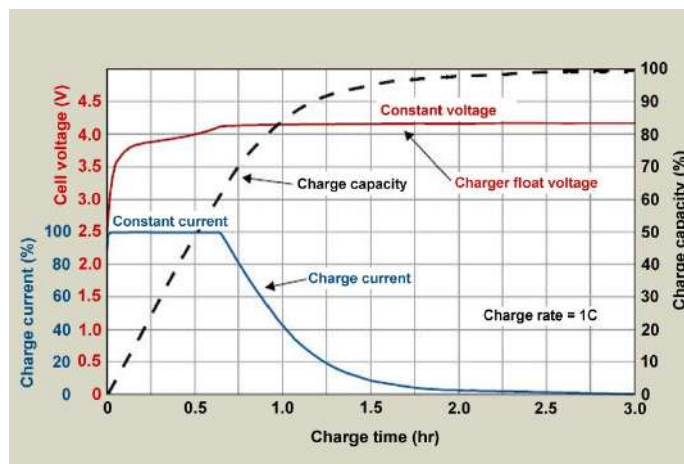


Fig. 2. Priebehy počas nabíjania CC/CV [11]

B. Vybíjanie

Vybíjací proces článkov je výrazne jednoduchší. Skladá sa iba z jednej fázy, teda fázy vybíjania. Pri vybíjaní je dôležité sledovať prúdy počas vybíjania, minimálne napätie a teplotu článku. Vybíjanie vyššími ako dovoľenými prúdmi, podvybíjanie pod minimálne napätia a vybíjanie článku mimo teplotný pracovný rozsah má výrazný vplyv na životnosť článku. Takéto vybíjacie charakteristiky je možné vidieť na obrázku nižšie.

IV. ZARIADENIE NA CYKlickÉ TESTOVANIE ČLÁNKOV

Zariadení má za úlohu cyklicky nabíjať a vybíjať články počas celej životnosti článku. Požiadavky, kladené na testovacie zariadenie sú nasledovné:

- Nabíjanie a vybíjanie rôznych typov Li-Ion článkov
- Možnosť nabíjať/vybíjať až 6 článkov naraz v jednej skupine.
- Možnosť nastavenia nabíjacej krivky a vybíjacieho profilu
- Nabíjací prúd max 5A vybíjací max 30A
- Ochrana proti prepólovaniu, skratu, podvybitiu, prepätiu a prehriatiu

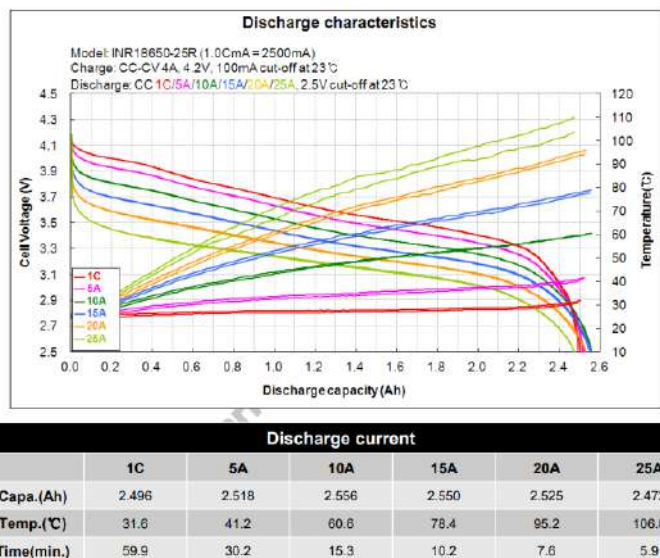


Fig. 3. Priebehy počas vybijania rôznymi prúdmi [12]

- Monitorovanie napätí, prúdov, teplôt a stavu nabitia článku

Na základe týchto požiadaviek bola navrhnutá koncepcia celého testovacieho zariadenia.

A. Koncepcia

Pre vývoj zariadenia bola zvolená koncepcia s pomocným procesorom. V tejto koncepcii má každé zariadenia svoj vlastný riadiaci procesor, ktorý je schopný pracovať nezávisle na zvyšných testovacích zariadeniach. Výhodou je odolnosť voči poruchám, keďže zariadenia budú schopné pracovať aj pri poruchách na zvyšných zariadeniach. Na obr. 4 je znázornená bloková schéma, pre dlhodobý cyklický tester článkov, ktorý obsahuje všetky potrebné bloky na splnenie požiadaviek, ktoré boli požadované. Obrázok je farebne rozdelený do troch farieb. Červenou farbou sú znázornené výkonové časti

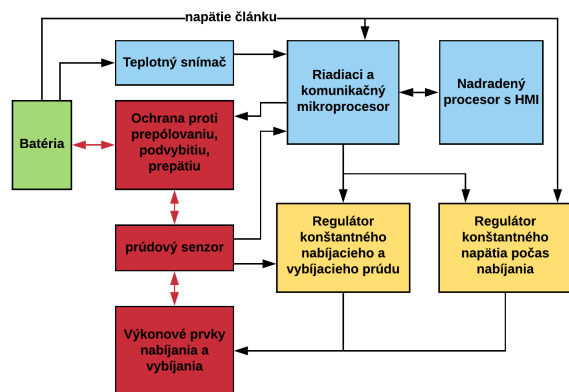


Fig. 4. Koncepcia testovacieho zariadenia

a cesty zariadenia, kde sa predpokladá väčší prúd. Modrou farbou sú označené snímacie, riadiace a komunikačné časti zariadenia. Žltá farba znázorňuje regulátory. Tieto regulátory,

budú v prípade digitálnej regulácie obsiahnuté v bloku riadiaci a komunikačný mikroprocesor. Keďže podľa požiadaviek chceme testovať aspoň 6 článkov naraz v jednej skupine, bude potrebných minimálne 6 takýchto testovacích modulov, ktoré sa pripoja k nadriadenému procesoru s HMI rozhraním [13], [14].

B. Realizácia jednotlivých blokov

1) *Riadiaci a komunikačný mikroprocesor:* Hlavnými požiadavkami pri výbere mikroprocesora bol dostatočný počet GPIO pinov, ktoré podporujú PWM, ADC a rôzne komunikácie ako sú napríklad UART, a CAN. Toto všetko spĺňa viacero procesorov. Bol zvolený mikroprocesor od firmy ST s ARM architektúrou a označením STM32L432KC. Ide o jednojadrový procesor s jadrom Cortex M4. Procesor poskytuje dostatočné množstvo vstupných a výstupných GPIO pinov, na ktorých je možné generovať PWM, prípadne merať za pomoci ADC. Okrem toho procesor ponúka hardvérové rozhranie pre pripojenie CAN zbernice.



Fig. 5. Riadiaci a komunikačný mikroprocesor

Pre jednoduchší vývoj boli zakúpené hotové vývojové moduly s týmto procesorom, programátorom a debuggerom. Tieto moduly sú malé, jednoducho sa programujú. V prípade poškodenia počas vývoja je aj ich výmena bezproblémová.

2) *Výkonová časť:* Výkonovú časť celého zariadenia je možné viesť na obr. 6. Je zložená z dvoch paralelne zapojených znižovacích DC/DC meničov.

- Prvý z meničov, má za úlohu znížiť vstupné napätie z hodnoty 12V na hodnotu potrebnú pre nabíjanie článku. Tento menič budeme ďalej nazývať nabíjací menič. Pozostáva z komponentov X2, D3, T1, U2, L1, BT1 a D2. Vstupné napätie 12V dodávané z externého zdroja. Toto napätie sa za pomoci T1, L1 a D2 premieňa na požadované napätie. Proces riadenia je vykonávaný za pomoci PWM signálu z riadiaceho procesora. Okrem výkonových komponentov, nabíjací obvod taktiež obsahuje budič pre MOSFET U1 a izolovaný napájací zdroj, ktorý nám umožní spínanie MOSFETu v vo vrchnej vetve. Bez tohto izolovaného zdroja by spínanie v takomto zapojení nebolo možné. PWM výstup z mikroprocesora je preto doplnený ešte o optočlen U4.
- Vybíjací obvod pozostáva z komponentov BT1, U3, L2, R1, D1 a T2. Úlohu zdroja v tomto meniči preberá batéria BT1. Energia z tejto batérie je marená na všetkých komponentoch avšak primárne na 100W výkonovom rezistore s hodnotou 0.05 mΩ. Rezistor má okrem úlohy výkonovej záťaže aj úlohu ochrany proti skratu. Hodnota odporu spolu s odporom MOSFETu v stave RDS(on) obmedzí prúd pri tvrdom skrate na hodnotu okolo približne 30A.

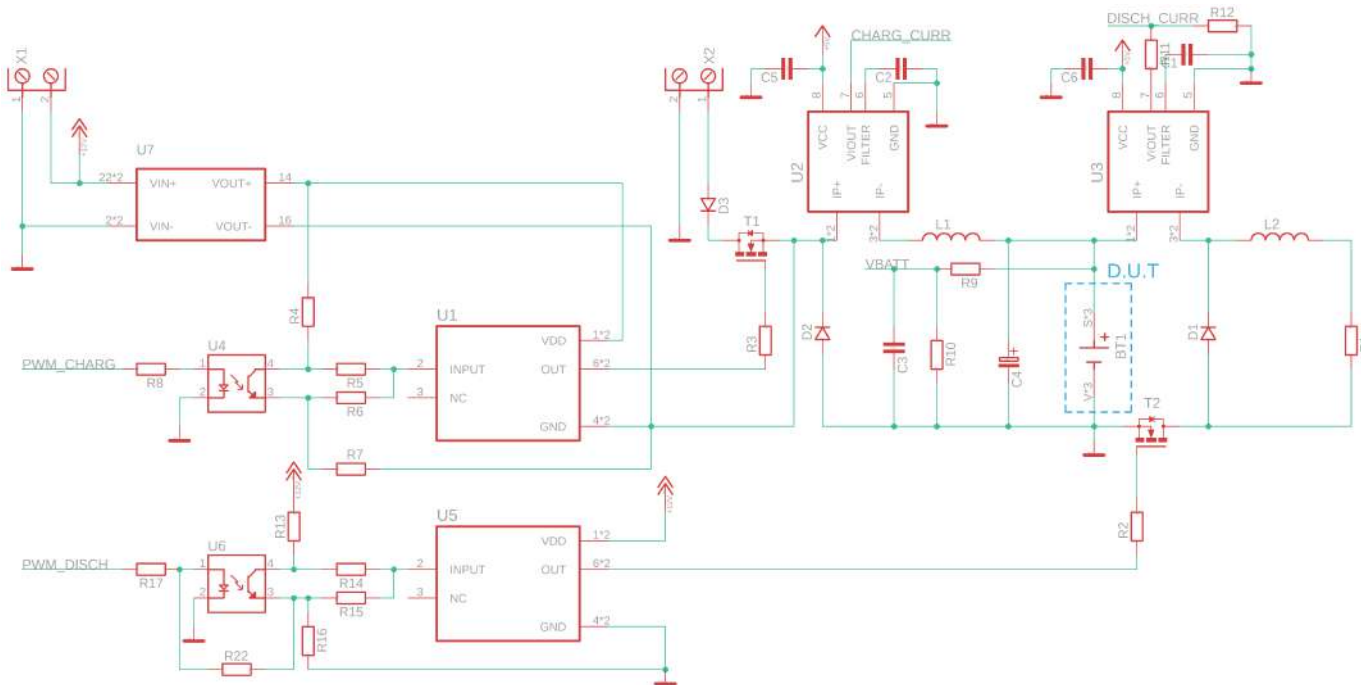


Fig. 6. Znižovaco/znižovací DC/DC menič

3) *Komunikácia*: Vybraný procesor disponuje viacerými možnosťami komunikácie s okolím. Na výber sú zbernice SPI, I2C, UART prípadne po pripojení CAN transceivera aj zbernica CAN. Ako hlavný komunikačný protokol využitý na komunikáciu medzi modulmi a ovládacím počítačom je využitá CAN komunikácia. CAN ponúka dostatočne vysoké rýchlosti (až 1 Mbit/s), jednoduché prepojenie zariadení za pomoci trojvodičového prepojenia a odolnosť voči rušeniu. Okrem komunikácie bola naprogramovaná aj ďalšia periféria

4) *Nadriadený systém s HMI*: Ako už bolo spomínané každý z modulov má vlastný riadiaci procesor, ktorý je možné pred spustením testov samostatne nastaviť podľa požiadaviek aktuálneho testovania. Pre tento účel bol vytvorený ovládací program, ktorý umožní jednoduché nastavovanie celého procesu testovania. Samostatný program bol navrhnutý v spolupráci s Ing. Tomášom Mervom v programe Qt. Program bol naprogramovaný v jazyku C++. A umožňuje nasledovné funkcie:

- Monitorovanie stavu cyklických testov po skupinách 6 testérov
- Nastavovanie parametrov testovania ako sú napríklad počet cyklov, prúdy a napätia počas cyklov
- Možnosť nastavenia cyklických testov podľa predprogramovanej krivky
- Možnosť ukončenia testov pri prednastavenom SOH článku
- Možnosť fungovať len ako nabíjačka/záť až

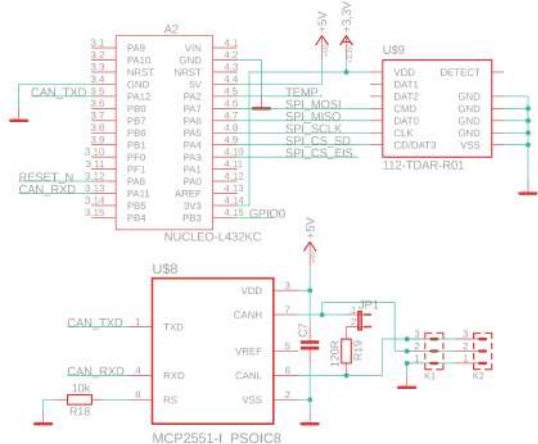


Fig. 7. Pripojenie komunikačných periférií

na logovanie dát. Ako ideálna periféria sa ukázala SD karta, ktorá je priamo pripojená na procesor. Výhodou je to, že logovanie bude fungovať aj pri zlyhaní CAN alebo aj zvyšných zariadení.

Samotné prostredie je možné vidieť na obr. 8 a obr. 9. Na obr. 8 je možné vidieť úvodnú obrazovku, ktorá ponúka na výber zo 6 skupín. V každej skupine je následne 6 ďalších testérov, teda program ponúka možnosť ovládať až 36 testovacích zariadení z jedného miesta. Obr 9 zasa zobrazuje ovládacie prvky, ktoré je možné nakonfigurovať pred spustením testovania:

- Nabíjací/vybíjací prúd
- Maximálne napätie batérie / minimálny nabíjací prúd
- Počet cyklov
- Minimálna hodnota SOH

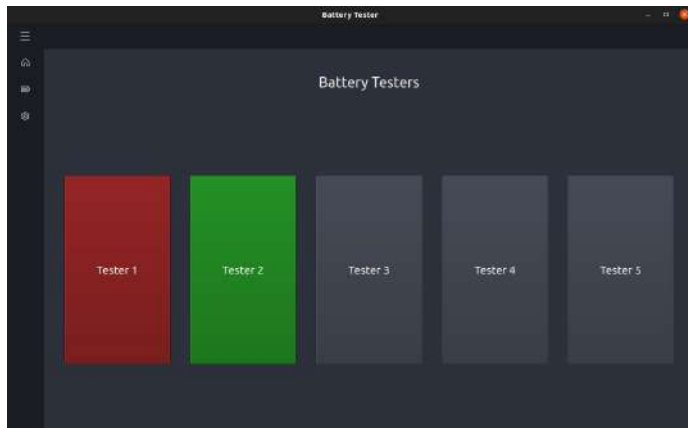


Fig. 8. Úvodná obrazovka s výberom skupiny testérov

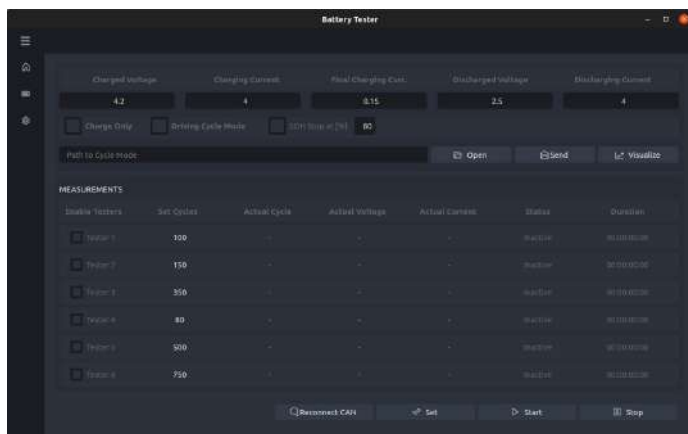


Fig. 9. Nastavovacia obrazovka skupiny testérov

5) *Finálne zariadenie:* Výsledné zariadenie, ktoré sa poradilo poskladať je možné vidieť na obr. 10 Finálny produkt

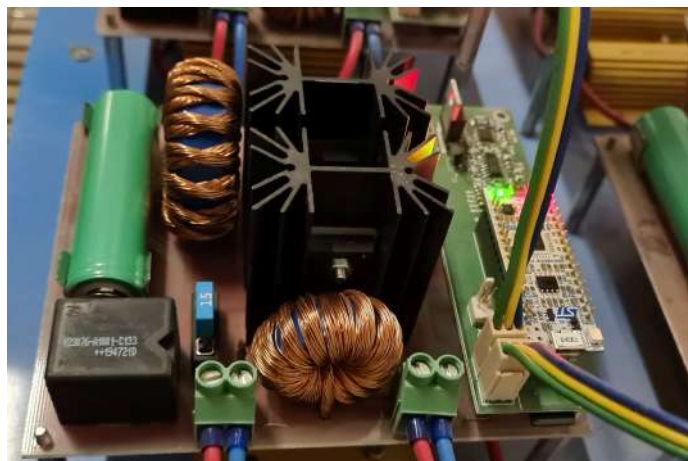


Fig. 10. Finálne testovacie zariadenie

má nasledujúce schopnosti:

- Štandardné zaťažovacie testy konštantným prúdom. Prúdy pre nabíjanie boli otestované do 5A, avšak návrh

bol dimenzovaný na 15A. Vybíjacie prúdy boli otestované na 20A s pridaním ventilácie V prípade bez ventilácie je testér schopný zaťažovať dlhodobo batériu max 10A.

- Možnosť nahrat' jazdný profil vo formáte csv, ktorý je formátovaný nasledovne (čas, prúd)
- Možnosť cyklovania batérie po určitú hodnotu SOH, ktorú je možné prednastaviť v GUI
- Možnosť monitorovania testov buď osobne alebo vzdialene cez aplikáciu tretích strán (TeamViewer)
- Možnosť simulácie prebývania, podvybývania a rýchlonabývania
- Okrem samotných možností testér zabezpečuje všetky potrebné druhy ochrán ako sú ochrana proti prebývaniu, podvybývaniu, prehriatiu a skratu

V. VYKONANÉ TESTY

Po samotnej analýze problematiky a vytvorení testovacích zariadení prišli na rad testy na článkoch. Ako testovací objekt bol zvolený li-ion batéria Samsung INR18650-25R. Parametre tejto batérie je možné vidieť na nasledujúcom obrázku. Na

Type		Typical INR18650-25R
Chemistry		NCA
Initial IR (mΩ AC 1kHz)		13.20 ± 2
Initial IR (mΩ DC (10A-1A))		22.15 ± 2
Nominal Voltage (V)		3.64
Charge Method (100mA cut-off)		CC-CV (4.2±0.05V)
Charge Time	Standard (min), 0.5C	134min
	Rapid (min), 4A	55min
Charge Current	Standard current (A)	1.25
	Max. current (A)	4.0
Discharge	End voltage (V)	2.5
	Max. cont. current (A)	20
	Max. momentary pulse (A, <1sec)	100
Rated discharge Capacity	Standard (mAh) (0.2C)	2.560
	rated (mAh) (10A)	2.539

Fig. 11. Parametre Samsung INR18650-25R

týchto typoch článkov sa vykonala nasledujúca séria testov s cieľom získať maximálne možné množstvo dát, za pomoci ktorých bude možné vytvoriť presný model článku.

- 1) Pri štandardných prúdoch nabíjania/vybíjania s cieľom určiť maximálny počet cyklov, ktoré je článok schopný vykonať pred tým ako jeho SOH klesne na hodnotu 80%
- 2) Pri štandardných prúdoch nabíjania a vybíjajúcich prúdoch o hodnotách 5A, 10A, 20A a to až do SOH 80% s cieľom určiť aký veľký má vplyv zmena veľkosti vybíjacieho prúdu na starnutie článku
- 3) Pri štandardných vybíjajúcich prúdoch a rôznych prúdoch nabíjania a to až do SOH 80% s cieľom určiť aký veľký má zmena veľkosti nabíjacieho prúdu na starnutie článku
- 4) Pri maximálnom prúde rýchlonabíjania a prúdoch vybíjania 20A a to až do SOH 80%
- 5) Meranie kapacity batérie pri rôznych veľkostiach prúdov a pri rôznych stavoch SOH až do SOH 80%

6) Meranie tvarov nabíjajúcich a vybíjajúcich kriviek pre rôzne nabíjacie a vybíjacie prúdy a rôzne stavy SOH až do SOH 80%

Výsledky týchto testov je možné vidieť na obrázkoch nižšie. Ako je možné vidieť na obr. 12, vybíjacie charakteristiky pre SOH = 100% popisujú schopnosti batérie dodávať veľmi vysoké prúdy pri zachovaní vysokej kapacity. To je dosiahnuté vďaka malým úbytkom na vnútorných štruktúrach článku. Keďže ide o články na vysoké prúdy ich starnutie je mierne rýchlejšie. Okrem týchto skutočností je možné sledovať mierne nelinearity na krivkách pre prúd 1A, teda nižší ako nominálny. Tieto nelinearity je možné sledovať v bodoch približne 0.45 Ah a 2 Ah. Čo ich spôsobuje nám nie je známe, keďže pri vyšších prúdoch sme tento jav nepozorovali.

Charakteristiky na obr. 13 boli namerané pri SOH = 94%. Je možné vidieť vplyv narastajúcich vnútorných odporových prvkov. Tento skok je najviac viditeľný medzi prúdmi 5 A a 10 A. Stále je možné sledovať menšie nelinearity pri menšom ako nominálnom prúde. Je možné vidieť, že článok pri SOH = 94% nedosahuje už tak výborné výsledky a to najmä pri vyšších prúdoch ako 10 A. Pri SOH = 94% a pri prúde 20 A je schopná dodať len okolo 78% z nominálnej kapacity článku. S klesajúcim SOH je možné sledovať zvyšovanie sa úbytkov na vnútorných prvkoch článku, čo má za následok nižšie hodnoty napätie. Článok je taktiež schopný stále dodávať menšiu kapacitu. V tomto prípade je to pre maximálny povolený prúd už iba okolo 73% nominálnej kapacity batérie.

S ďalším znižovaním SOH sa tento trend len opakuje. Zvyšujú sa úbytky na vnútorných prvkoch článku a teda aj schopnosť batérie dodávať vyššie prúdy. Čo potvrdzujú aj obr. 15 pre SOH 85% a obr. 16 pre SOH 79%.

Obr. 17 znázorňuje zmeny tvarov kriviek pri prúde 5A, je možné vidieť ako sa mení tvar najmä v koncových polohách kriviek, teda v SOC=100% a SOC=0%. Okrem týchto nameraných kriviek boli namerané aj zmeny výslednej kapacity článku na základe odoberaných prúdov. Porovnanie týchto kapacít pre rôzne prúdy je možné vidieť na obr. 18. Je možné vidieť ako veľmi je ovplyvnená maximálna kapacita článku odoberaným prúdom.

Posledné dva priebehy na obr. 19 a obr. 20 znázorňujú závislosť rýchlosti starnutia článkov na základe veľkostí nabíjajúcich/vybíjajúcich prúdov. Čísla na osiach Y znázorňujú počet cyklov článku, ktoré je schopný vykonať pred tým ako dosiahne SOH = 80%.

Vďaka týmto nameraným charakteristikám boli získané všetky potrebné závislosti na presné určenie hodnoty napätia počas vybíjania v každom jednom okamihu životnosti článku.

VI. TVORBA MODELU

Všetky potrebné namerané dáta sme mali k dispozícii, no bolo potrebné ich zakomponovať do výsledného modelu. Na začiatku bola znova navrhnutá koncepcia celého modelu. Celkovú koncepciu je možné vidieť na obr. 21.

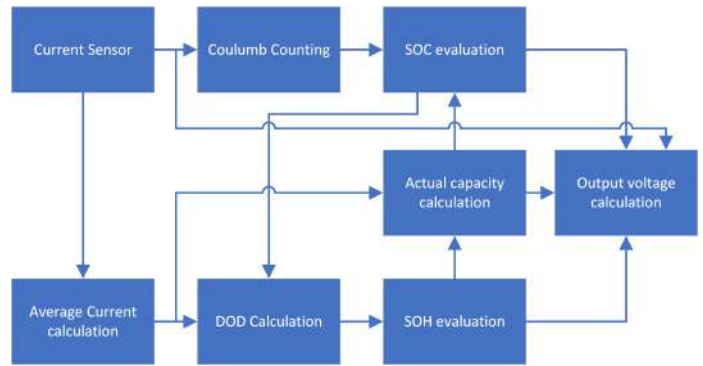


Fig. 21. Koncepcia navrhovaného modelu

Celkový návrh sa skladá z 8 blokov, z ktorých ma každý významnú funkciu.

- Current Sensor - blok, ktorý meria prúd vtekajúci/vytekajúci z modelu
- Coulomb Counting a SOC evaluation - tieto dva bloky je možné vo výsledku spojiť do jedného bloku. Blok Coulomb counting integruje v čase hodnotu z prúdového snímača. Následne sa vďaka výstupu integrovania určuje aktuálna hodnota SOC. Tieto javy je možné popísať nasledujúcimi rovnicami

$$i_count \int^t idt [Ah] \tag{1}$$

$$SOC = \frac{Q_{C_act} - i_count}{Q_{C_act}} \cdot 100 [\%] \tag{2}$$

Celkové vnútorné zapojenie tohto bloku v programe Simulink je možné vidieť na obr. 22.

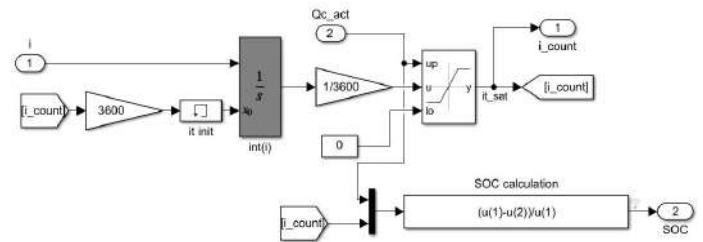


Fig. 22. Koncepciu navrhovaného modelu

- Blok Average Current calculation - blok integruje hodnotu z prúdového snímača, avšak rozlišuje či ide o prúd nabíjací alebo vybíjací. Výstupom z tohto bloku sú potom dve hodnoty. Hodnota Idis_ave odpovedá priemernému vybíjaciemu prúdu v predošlom cykle a Ichar_ave zasa nabíjaciemu prúdu.
- Blok DOD Calculation - blok vypočítava a ukladá hĺbku vybitia článku z troch posledných meraných cyklov. Má 4 výstupy, tri z nich nám dávajú informáciu o troch po sebe idúcich stavoch DOD z predošlých cyklov. Štvrtým výstupom je koeficient určujúci počet prechodov medzi nabíjaním a vybíjaním.

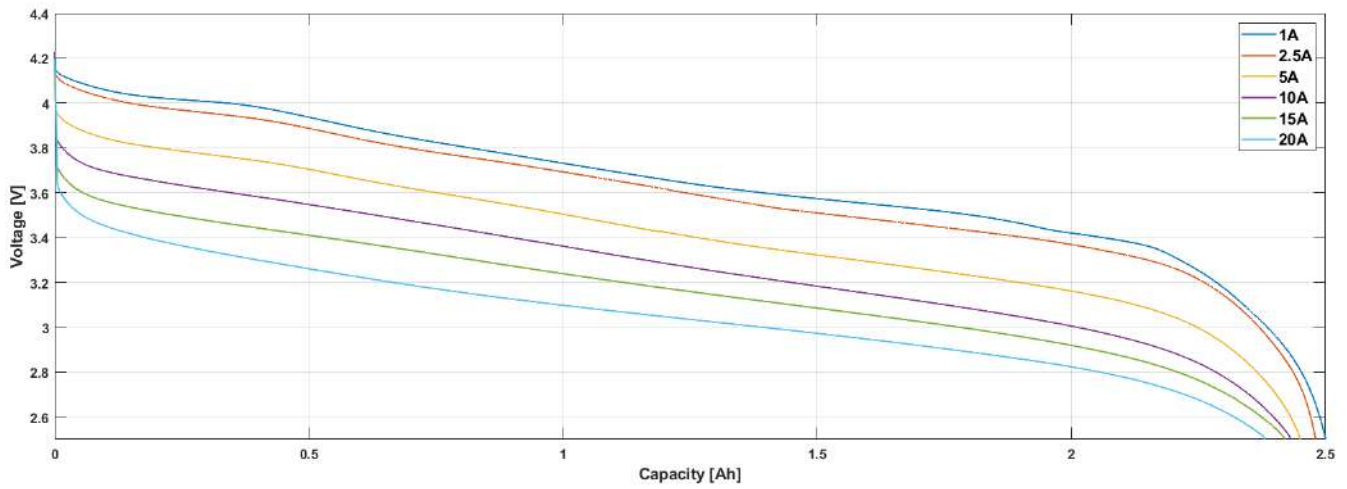


Fig. 12. Vybíjacie charakteristiky SOH = 100%

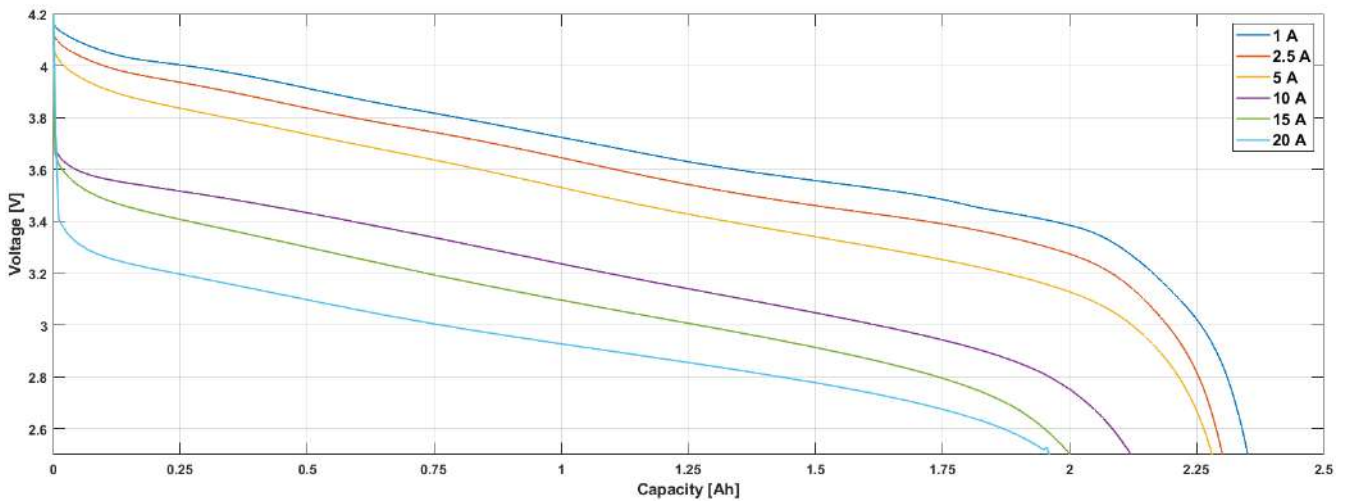


Fig. 13. Vybíjacie charakteristiky SOH = 94%

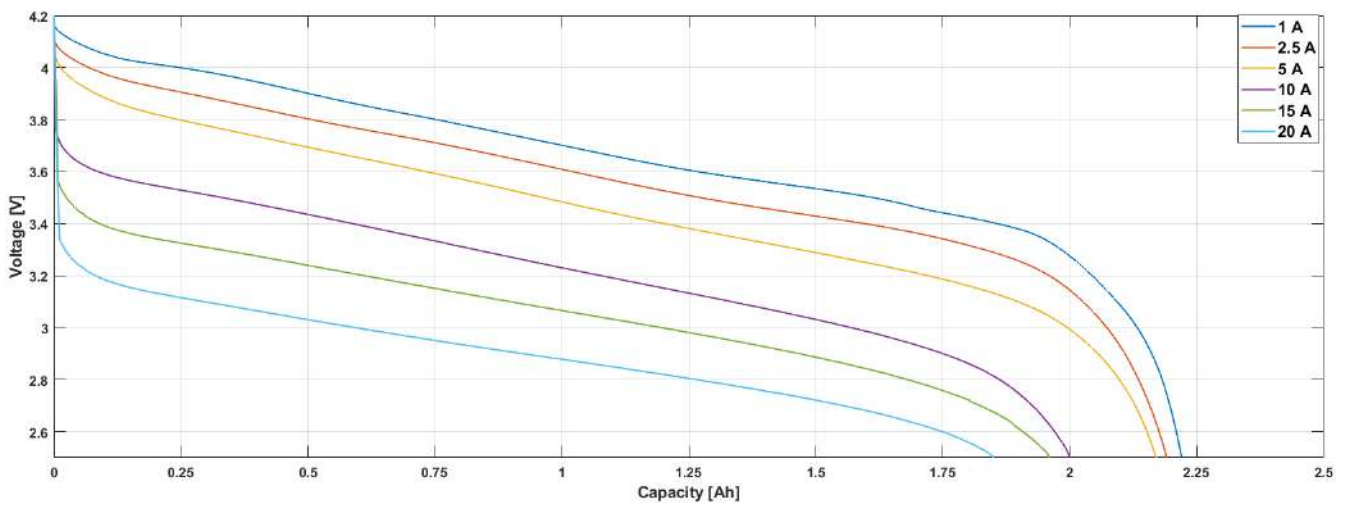


Fig. 14. Vybíjacie charakteristiky SOH = 89%

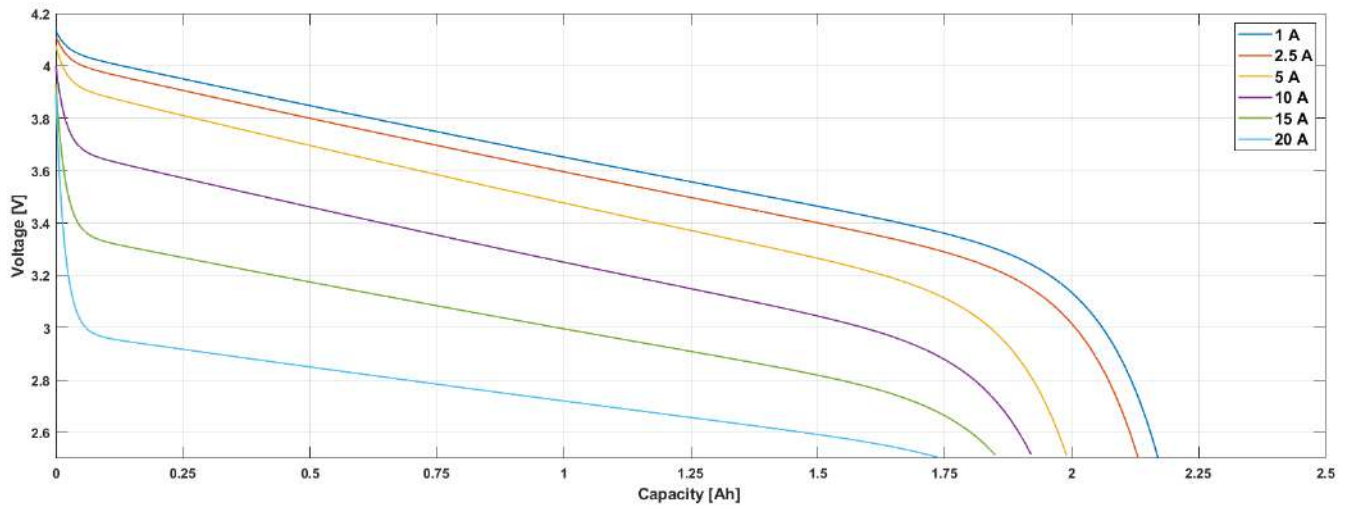


Fig. 15. Vybíjacie charakteristiky SOH = 85%

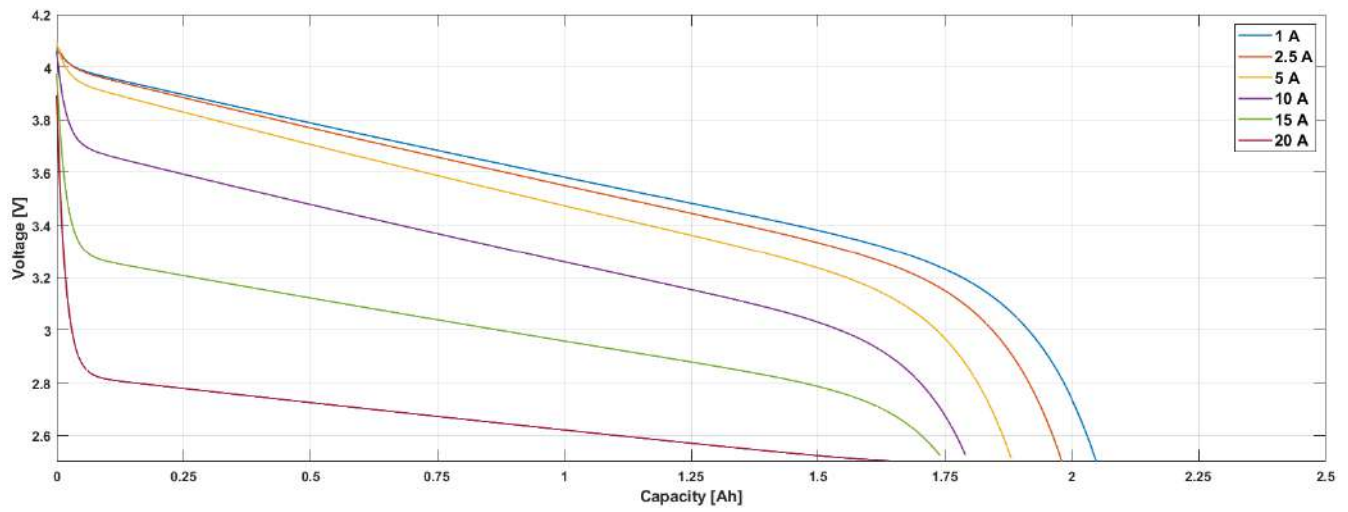


Fig. 16. Vybíjacie charakteristiky SOH = 79%

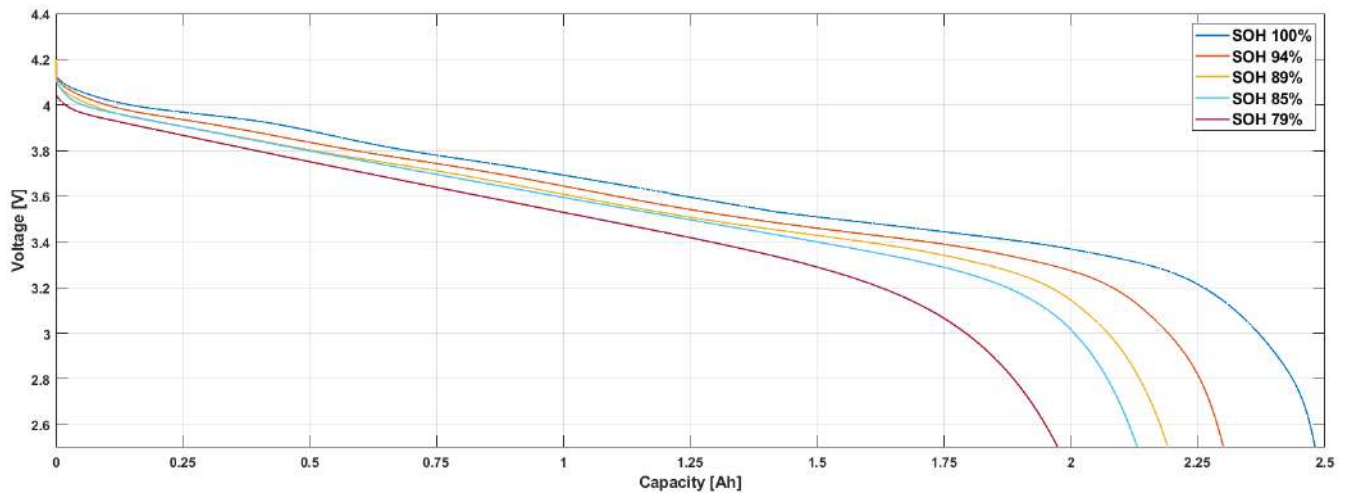


Fig. 17. Vybíjacie charakteristiky pri 5 A a SOH = 100%, 94%, 89%, 85%, 79%

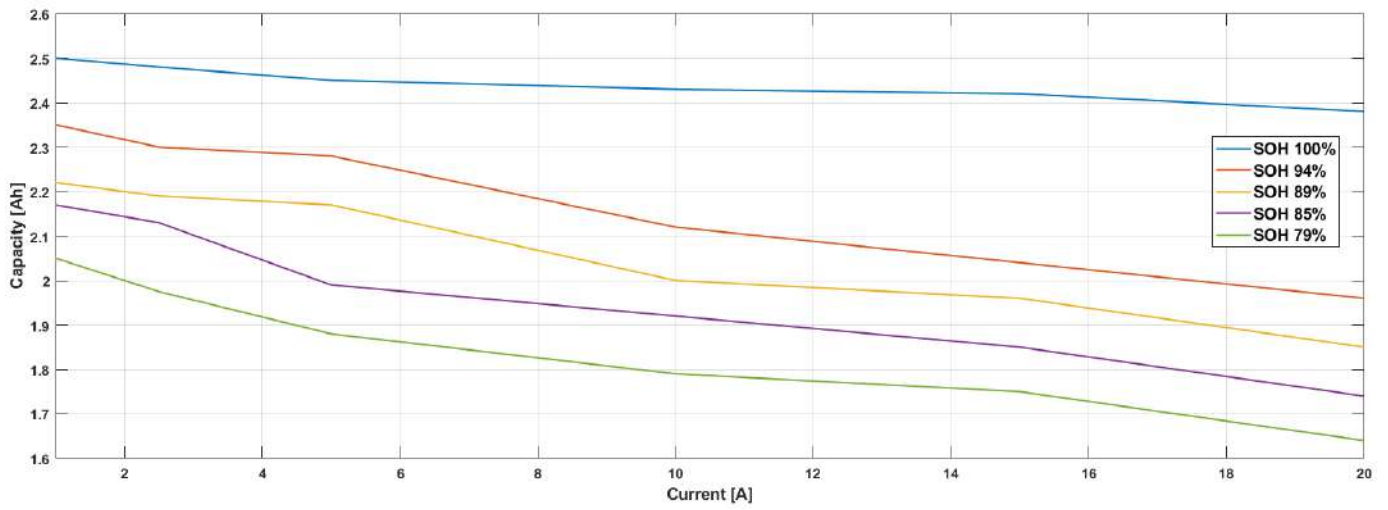


Fig. 18. Vplyv prúdu a SOH na maximálnu dodávanú kapacitu

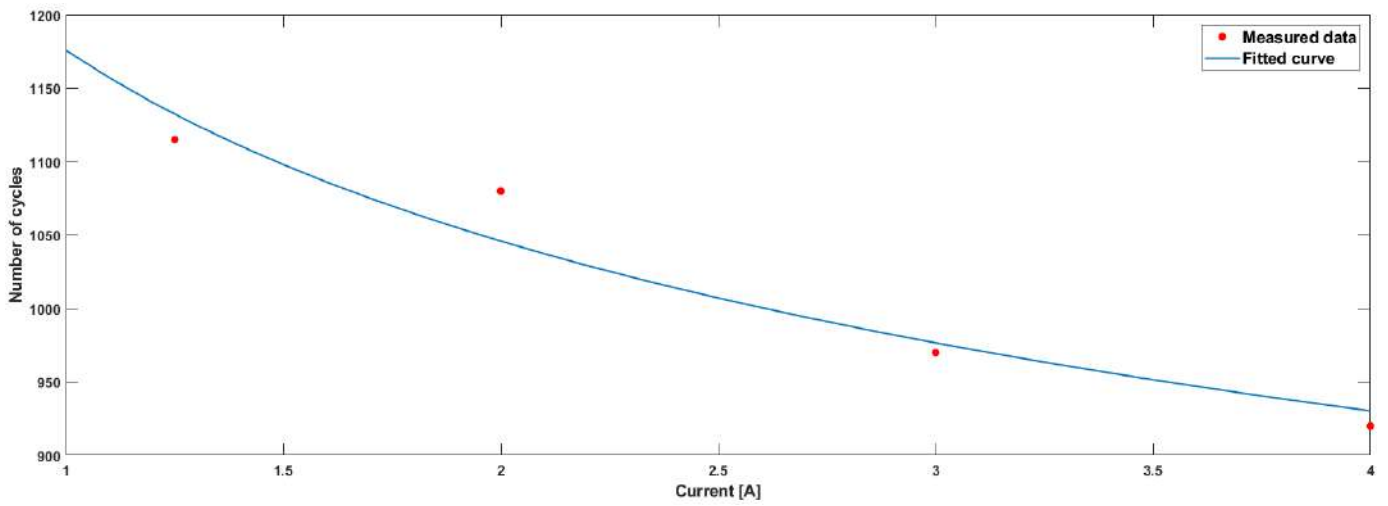


Fig. 19. Vplyv nabíjacieho prúdu na maximálny počet cyklov pred dosiahnutím SOH = 80%

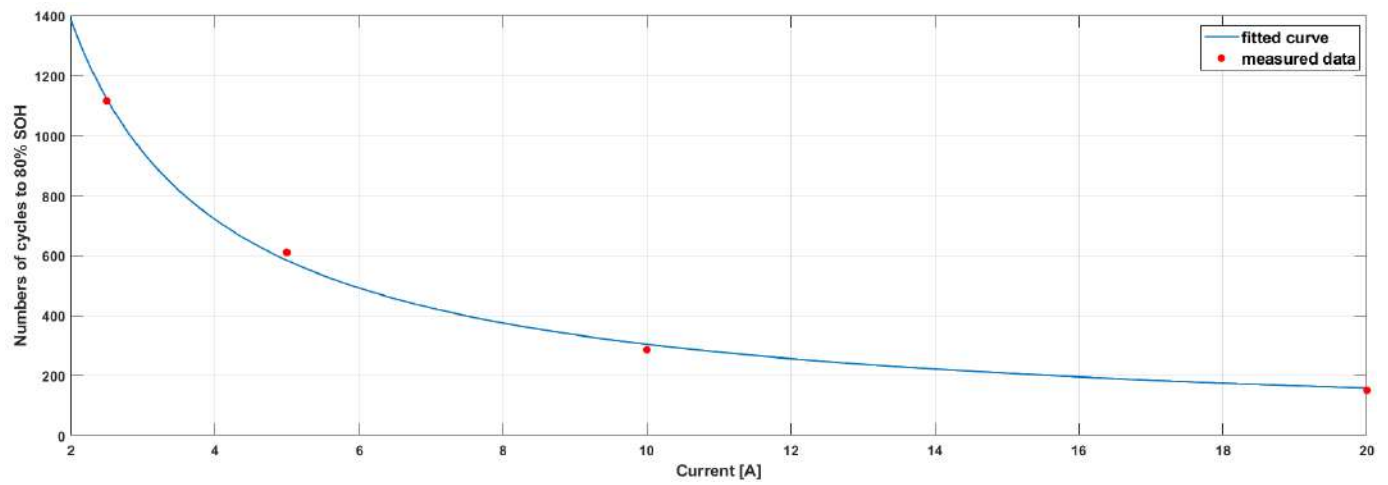


Fig. 20. Vplyv vybijacieho prúdu na maximálny počet cyklov pred dosiahnutím SOH = 80%

- Blok Actual capacity calculation - blok má za úlohu prepočítavať aktuálne maximálnu dostupnú kapacitu batérie na základe SOH a odoberaného prúdu. Tieto hodnoty sú následne spätne privedené do blokov na určovanie SOC. Prepočty v bloku vychádzajú z reálne nameraných dát, ktoré je možné vidieť v tab. I Tieto získané dáta boli

TABLE I
KAPACITY BATÉRIE PRI RÔZNYCH PRÚDOCH A RÔZNYCH STAVOCH SOH

SOH[%]	100	94	89	85	79
1A	2.5 Ah	2.35 Ah	2.22 Ah	2.17 Ah	2.05 Ah
2.5A	2.48 Ah	2.3 Ah	2.19 Ah	2.13 Ah	1.98 Ah
5A	2.45 Ah	2.28 Ah	2.17 Ah	1.99 Ah	1.88 Ah
10A	2.43 Ah	2.12 Ah	2 Ah	1.92 Ah	1.79 Ah
15A	2.42 Ah	2.04 Ah	1.96 Ah	1.85 Ah	1.74 Ah
20A	2.38 Ah	1.96 Ah	1.85 Ah	1.74 Ah	1.64 Ah

prenesené do 3D grafu, kde ich bolo následne možné naftované funkciou.

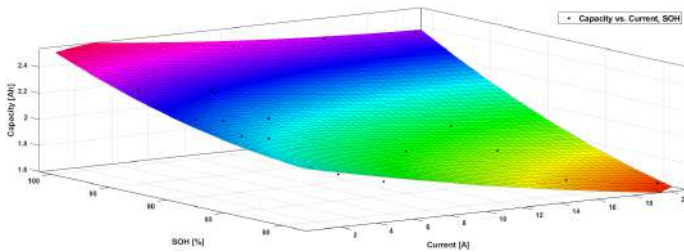


Fig. 23. Namerané dáta z tabuľky prenesené do 3D a naftované

$$Q_{act} = p00 + p10 \cdot I + p01 \cdot SOH + p20 \cdot I^2 + p11 \cdot I \cdot SOH + p02 \cdot SOH^2 \quad (3)$$

Výsledné zapojenie bloku podľa spomínanej rovnice je možné vidieť na obr. 24. Tento blok ma 4 výstupy. Prvý výstup nám dáva informáciu o maximálnej kapacite pri aktuálne odoberanom prúde. Druhý výstup o nominálnej kapacite batérie pri aktuálnom SOH. Zvyšné dva výstupy prepočítavajú hodnotu kapacity na základe teploty. Dáta na určenie teplotných rovníc boli získané z katalógových listov článku.

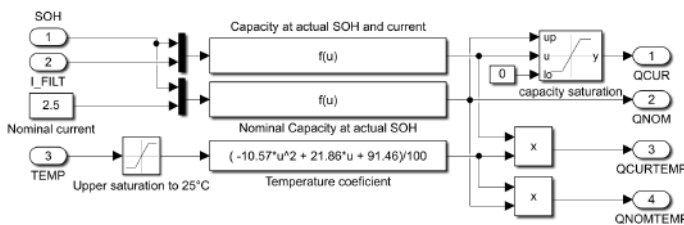


Fig. 24. Zapojenie bloku na výpočet kapacity

- Blok SOH evaluation - úlohou tohto bloku je prepočítavať počas simulácie stav SOH a tým upravovať správanie modelu. Stav SOH sa mení počas jej starnutia. Výpočet starnutia v modeli je založený na koeficiente

starnutia ε , ktorý nadobúda nulovú hodnotu na začiatku životnosti a 1 na jej konci. Tento koeficient je definovaný ako:

ak $k \bmod 2 > 0$

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)} \cdot \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) \quad (4)$$

inak

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) \quad (5)$$

koeficient k a koeficienty DOD získavame z bloku DOD Calculation, pričom poslednou neznámou v tomto bloku je hodnota koeficienta N , ktorý udáva maximálny odhadovaný počet cyklov pri aktuálnom prúde a DOD . Je možné ho popísať nasledujúcou rovnicou:

$$N(n) = H \left(\left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^\xi \cdot \left(\frac{\gamma_{01}}{H} Idis_{ave}(n)^{-\gamma_{11}} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_{02}}{H} Ich_{ave}(n)^{-\gamma_{12}} \right) \right) \quad (6)$$

kde:

- H - počet cyklov pri štandardných prúdoch a $DOD = 100\%$ po ktorých článok dosiahne 80% SOH
- $DOD(n)$ - hodnota DOD z predošlého cyklu
- ξ - exponent pre vplyv DOD
- γ_{01}, γ_{02} - koeficienty na prevod hodnoty na percentá
- γ_{11} - exponent pre vplyv vybíjacieho prúdu
- γ_{12} - exponent pre vplyv nabíjacieho prúdu
- $Idis_{ave}(n)$ - stredná hodnota vybíjacieho prúdu v predošlom vybíjacom cykle
- $Ich_{ave}(n)$ - stredná hodnota nabíjacieho prúdu v predošlom nabíjacom cykle

Po prenesení týchto rovníc do funkcií vyzerá celkové zapojenie bloku pre odhad starnutia počas simulácie nasledovne. Do bloku N vstupujú priemerné hodnoty prúdov

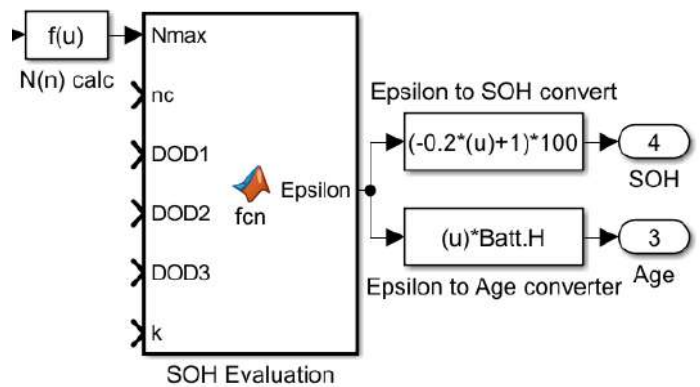


Fig. 25. Blok na aproximáciu starnutia článkov

v predošlých cykloch a jedna z hodnôt DOD . Tieto dáta sú privedené cez mux. Do bloku SOH Evaluation vstupujú

hodnoty DOD a koeficient k. Výstupom z tohto bloku je hodnota koeficientu ε , ktoré je následne prepočítaná na SOH a ekvivalentný počet štandardných cyklov.

- Blok Output voltage calculation - tento blok využíva informácie zo zvyšných blokov a následne aproximuje hodnotu napätia na výstupe článku.

$$V_{bat} = f(I, SOC, SOH, Q, Q_{nom}) \quad (7)$$

kde:

- I - Aktuálny odoberaný prúd [A]
- SOC - Stav nabitia batérie [%]
- SOH - Stav zdravia batérie [%]
- Q/Q_{nom} - Aktuálna/nominálna kapacita batérie [Ah]

Na naftovanie týchto rovníc boli použité namerané dáta, ktoré je možné vidieť na obr. 12 až obr. 16. Vďaka týmto dátam bolo možné vytvoriť funkciu, ktorá bola priamo naftovaná na tieto dáta. Ide o exponenciálnu funkciu tretieho rádu, ktorá vyzerá nasledovne:

$$a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x) + e \cdot \exp(f \cdot x) \quad (8)$$

Táto rovnica bola získaná pre každý jeden nameraný priebeh prúdu pri všetkých vybraných hodnotách SOH. Následne boli jednotlivé koeficienty porovnané a bola medzi nimi najdená závislosť, ktorú bolo možné popísať polynomičnými rovnicami druhého rádu:

$$U_{batt} = a \cdot \exp(b \cdot SOC) + c \cdot \exp(d \cdot SOC) + e \cdot \exp(f \cdot SOC) \quad (9)$$

pričom:

$$a = a1 \cdot I^2 + a2 \cdot I + a3 \quad (10)$$

$$b = b1 \cdot I^2 + b2 \cdot I + b3 \quad (11)$$

$$c = c1 \cdot I^2 + c2 \cdot I + c3 \quad (12)$$

$$d = d1 \cdot I^2 + d2 \cdot I + d3 \quad (13)$$

$$e = e1 \cdot I^2 + e2 \cdot I + e3 \quad (14)$$

Vďaka tejto úprave bolo možné do rovníc dostať ďalšiu premennú a to prúd. Po naftovaní všetkých kriviek dostávame nasledujúci trojrozmerný model článku pre dané SOH, ktorý je závislý na SOC a prúde.

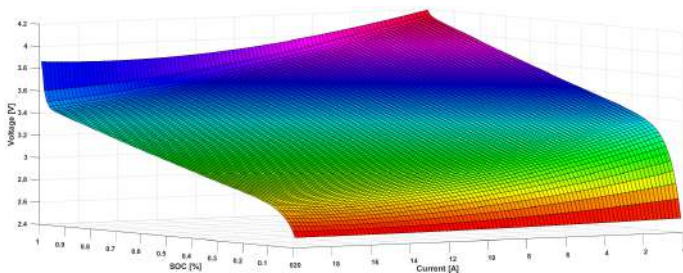


Fig. 27. Naftované dáta exponenciálnou funkciou 3. rádu pre SOH = 100%

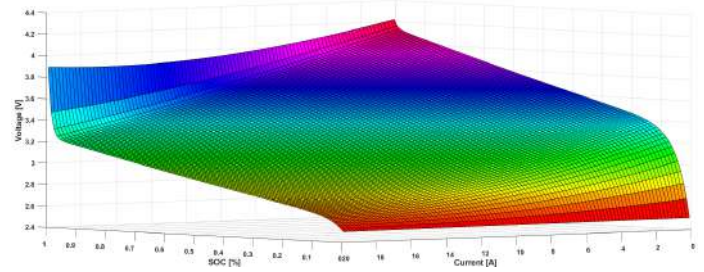


Fig. 28. Naftované dáta exponenciálnou funkciou 3. rádu pre SOH = 89%

Po výpočte týchto koeficientov pre každú jednu hodnotu SOH bolo zistené, že zmeny týchto koeficientov sú na seba lineárne závislé a je možné popísať každý koeficient ďalšou rovnicou, v ktorej ako premenná bude vystupovať SOH. Vo výsledku získavame rovnicu, ktorá je závislá od SOC, prúdu a SOH.

$$a1 = a1a \cdot SOH + a1b; a2 = a2a \cdot SOH + a2b \quad (15)$$

$$a3 = a3a \cdot SOH + a3b; b1 = b1a \cdot SOH + b1b \quad (16)$$

$$b2 = b2a \cdot SOH + b2b; b3 = b3a \cdot SOH + b3b \quad (17)$$

$$c1 = c1a \cdot SOH + c1b; c2 = c2a \cdot SOH + c2b \quad (18)$$

$$c3 = c3a \cdot SOH + c3b; d1 = d1a \cdot SOH + d1b \quad (19)$$

$$d2 = d2a \cdot SOH + d2b; d3 = d3a \cdot SOH + d3b \quad (20)$$

$$e1 = e1a \cdot SOH + e1b; e2 = e2a \cdot SOH + e2b \quad (21)$$

$$e3 = e3a \cdot SOH + e3b; f = 100 \quad (22)$$

Poprepájanie jednotlivých blokov v simulovanom modeli je možné vidieť na obr. 29.

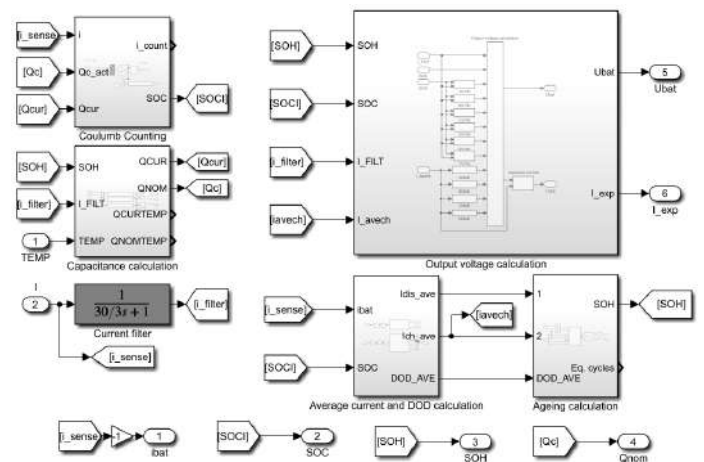


Fig. 29. Zapojenie jednotlivých blokov v modeli

Blok má niekoľko výstupov. Hlavnými výstupmi sú hodnoty pre ovládanie zdrojov pripojených na výstupe modelu. Tieto zdroje je možné vidieť na obr. 30. Okrem týchto ovládacích výstupov má model aj niekoľko informačných resp. meracích výstupov ako sú aktuálna hodnota SOC, SOH, aktuálna nominálna kapacita a samozrejme svorkové napätie simulovaného článku.

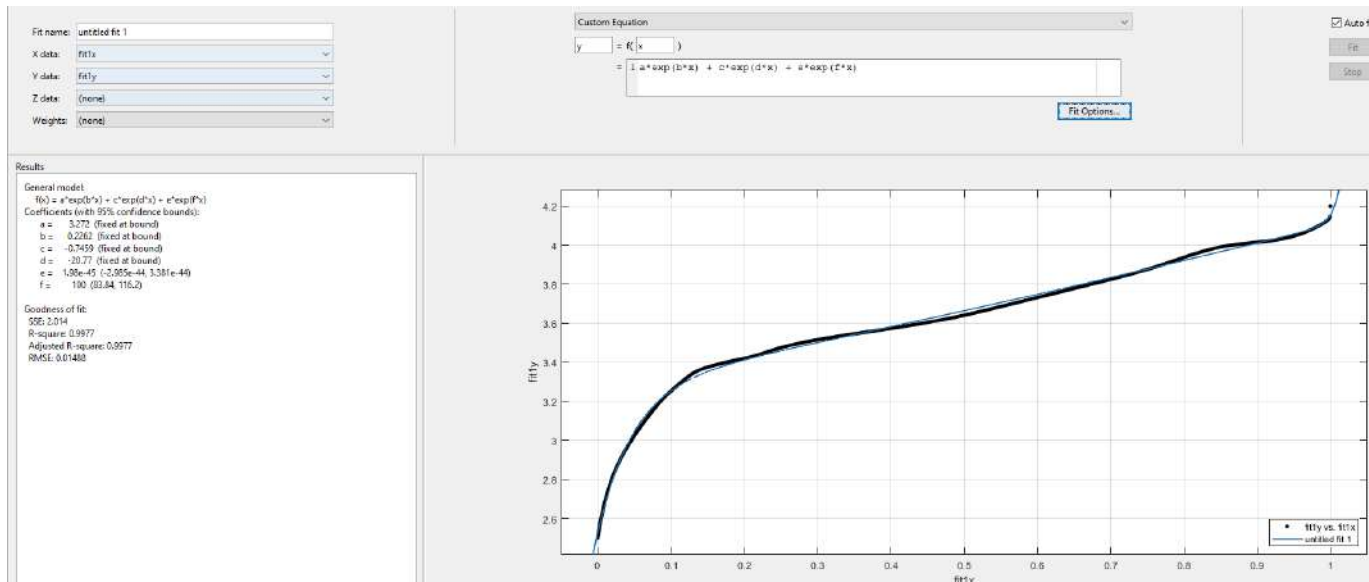


Fig. 26. Fitovanie priebehov exponenciálnou funkciou 3. rádu

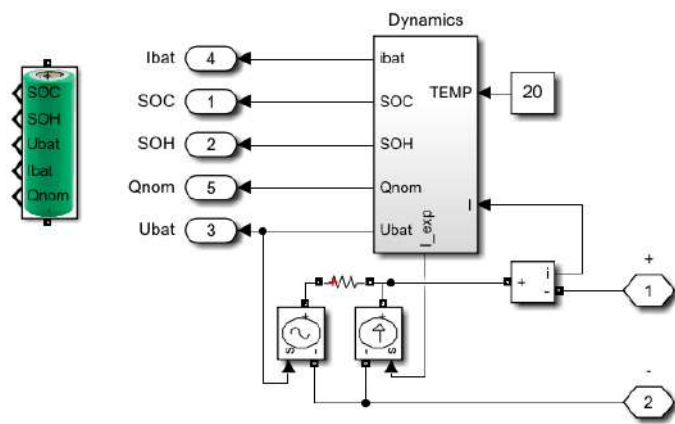


Fig. 30. Finálny model

VII. POROVNANIE MODELU S REÁLNYMI MERANIAM I

Po dokončení modelu, bolo potrebné overiť jeho presnosť porovnaním s nameranými dátami. Reálne dáta boli namerané za pomoci lineárnej záťaž a vysoko presného analyzátor výkonu. Vďaka tomu je možné povedať, že presnosť merania reálnych dát bola na veľmi vysokej úrovni. Meranie prebiehalo na niekoľkých statických meraniach, teda hodnota prúdu sa nemenila. Okrem týchto statických meraní prebehlo aj niekoľko dynamických meraní s premenlivou hodnotou prúdu a s cieľom určiť presnosť modelu v dynamických podmienkach. Do výsledkovej časti boli vybrané iba niektoré z meraní na demonštráciu presnosti celkového modelu batérie. Je potrebné pripomenúť, že okrem dát z vytvoreného modelu bol do porovnania pridaný aj batériový model, ktorý je bežne dostupný v simulinku s názvom Genneric Battery model. Tento model bol nakonfigurovaný podľa príručky v programe matlab.

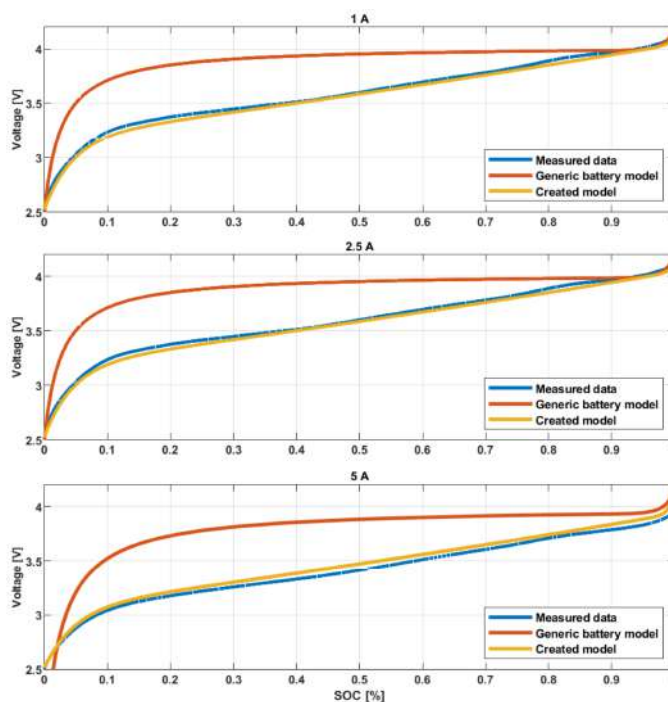


Fig. 31. Porovnanie statických meraní pri SOH = 100%

VIII. ZÁVER

Článok sumarizuje výsledky dizertačnej práce s cieľom vytvoriť zariadenia na analýzu najnovších typov Li-Ion batériových článkov. Toto zariadenie sa nám poradilo vytvoriť. Následne boli za pomoci spomínaného zariadenia vykonané dlhodobé cyklické testy s cieľom zistiť správanie článku Samsung INR18650-25R v priebehu jeho životnosti. Takéto testovanie je časovo náročné, keďže jeden cyklus batérie

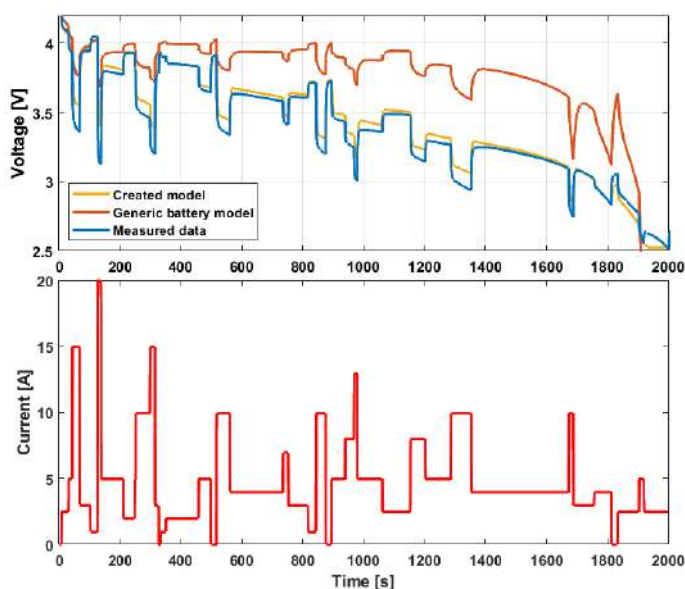


Fig. 32. Dynamické meranie pri SOH = 100%

(nabitie a vybitie) trvá pri štandardných prúdoch približne 3 hodiny. Spomínaný článok má pri štandardných prúdoch životnosť okolo 1000 cyklov. Teda len jeden dlhodobý test na jednom článku zabral približne 125 dní. Takéto testy boli vykonávané pre rôzne kombinácie prúdov. Vo výsledku sme získali priebehy kriviek a kapacít pre testované kombinácie. Okrem toho boli získané aj degradačné krivky, ktoré popisujú starnutie batérie pri zmenách prúdov. Všetky tieto dáta boli následne využité pre tvorbu presného modelu, ktorý má za úlohu aproximovať starnutie, zmeny výstupného napätia a kapacitu batérie. Vďaka modelu je možné výrazne zrýchliť vývoj batériových aplikácií. Vďaka takto presnému modelu je oveľa jednoduchšie navrhovať balansovacie obvody, meniče a tak výrazne urýchliť vývoj celého paku. Okrem toho je možné model využiť aj na ďalší výskum v oblasti zvyšovania životnosti batériových článkov, napríklad v spojení so superkapacitormi. Celkový postup tvorby modelu je možné aplikovať na ľubovoľný li-ion článok, avšak je potrebné vykonať dlhodobé testy. Z výsledkom testov je možné zhodnotiť, že vytvorený model je relatívne veľmi presný. Presnosť modelu sa pohybuje na úrovni okolo 5-7%. Do budúcnosti by bolo možné celý postup doplniť o merania článkov v neoptimálnych podmienkach ako sú nízke alebo vysoké teploty, prebývanie a podbvybývanie.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja projektami APVV-18-0436 a APVV-19-0210.

LITERATÚRA

- [1] J. Bil'anský, "Overview of the battery types and their testing," *SCYR-Nonconference Proceedings of Young Researchers. Košice: sn*, pp. 143–146, 2020.
- [2] "Bu-205: Types of lithium-ion," https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion, accessed: 2022.
- [3] M. F. a kolektív 2019., "Elektromobilita," *ISBN:978-80-554-1598-7*.

- [4] "Batteryuniversity [online] - what's the best battery?," https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery, accessed: 2022.
- [5] J. P. Aditya and M. Ferdowsi, "Comparison of nimh and li-ion batteries in automotive applications," in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2008, pp. 1–6.
- [6] "A history of the battery," <https://batteryguy.com/kb/knowledge-base/a-history-of-the-battery/>, accessed: 2022.
- [7] N. Meena, V. Baharwani, D. Sharma, A. Sharma, B. Choudhary, P. Parmar, and R. B. Stephen, "Charging and discharging characteristics of lead acid and li-ion batteries," in *2014 power and energy systems: towards sustainable energy*. IEEE, 2014, pp. 1–3.
- [8] C.-L. Wey and P.-C. Jui, "A unitized charging and discharging smart battery management system," in *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. IEEE, 2013, pp. 903–909.
- [9] A. B. Khan, V.-L. Pham, T.-T. Nguyen, and W. Choi, "Multistage constant-current charging method for li-ion batteries," in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. IEEE, 2016, pp. 381–385.
- [10] S.-W. Luan, J.-H. Teng, D.-J. Lee, Y.-Q. Huang, and C.-L. Sung, "Charging/discharging monitoring and simulation platform for li-ion batteries," in *TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2011, pp. 868–872.
- [11] H. Wan, "High efficiency dc-dc converter for ev battery charger using hybrid resonant and pwm technique," Ph.D. dissertation, Virginia Tech, 2012.
- [12] "Introduction of inr18650-25r," <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>, accessed: 2022.
- [13] J. Bilansky and M. Lacko, "Design and simulation of cyclic battery tester," *Power Electronics and Drives*, vol. 5, 2020.
- [14] J. Bil'anský, T. Merva, J. Ivan, A. Marcinek, and M. Lacko, "Cyclic tester of battery cells for electric vehicles," in *2021 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM)*. IEEE, 2021, pp. 1–7.

Metódy a algoritmy automatizovaného spracovania dát a modelov kozmickej fyziky

Daniel Gecášek

Katedra počítačov a informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
daniel.gecasek@tuke.sk

Ján Genčí

Katedra počítačov a informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
jan.genci@tuke.sk

Pavol Bobík

Ústav experimentálnej fyziky
Slovenská akadémia vied
Košice, Slovensko
bobik@saske.sk

Abstract—In this work, we dealt with the development of a system working with models of calculations of the vector of the geomagnetic field and the trajectories of cosmic radiation in the Earth's magnetosphere. We also dealt with the possibilities of further processing of data produced by given models, mainly by visualization. During the creation of the system, we focused on the calculation of the observed quantity (vector of the magnetic field, cut-off rigidity, cosmic ray intensity) for a massive number of points spread out in space and time. This requirement resulted from a detailed examination of existing systems. During the creation of data processing modules, a performance-limiting factor was identified in the system. This factor was the unsuitable structure of data storage. In this work, we focus on ways in which it would be possible to eliminate the identified bottleneck. The system as a whole was verified by comparing the results it produces with the results of other authors.

Index Terms—cosmic rays, scientific data processing, automation, data formats

Abstrakt—V práci sme sa zaoberali vývojom systému pracujúceho s modelmi výpočtov vektoru geomagnetického poľa a trajektórií kozmickej žiarenia v zemskej magnetosfére. Ďalej sme sa zaoberali možnosťami ďalšieho spracovania dát produkovaných danými modelmi a to hlavne spôsobmi ich vizualizácií. Počas tvorby systému sme sa zamerali na výpočet sledovanej veličiny (vektor magnetického poľa, odrezávacia rigidita, intenzita kozmickej žiarenia) pre masívny počet bodov rozprestretých v priestore a čase. Táto požiadavka vyplývala z detailného prieskumu doteraz existujúcich systémov. Počas tvorby modulov na spracovanie dát bol v systéme identifikovaný faktor limitujúci výkon. Týmto faktorom bola nevhodná štruktúra ukladania simulovaných dát. V práci sa venujeme spôsobom, ktorými by bolo možné daný nedostatok odstrániť. Systém ako celok bol overený porovnaním výsledkov ktoré produkuje s výsledkami iných autorov.

Príčné slová—kozmickej žiarenie, spracovanie vedeckých dát, automatizácia, dátové formáty

I. INTRODUCTION

Uplatnenie numerických modelov v oblasti časticovej fyziky je široké, avšak nie vo všetkých oblastiach. Hlavne simuláciám trajektórií kozmickej žiarenia v geomagnetosfére chýbajú nástroje a publikované implementované modely. V tejto práci sme vyvinuli metódy a algoritmy automatizovaného spracovania údajov a modelov pre oblasť pohybu kozmickej žiarenia v magnetosfére Zeme.

Kozmické žiarenie bolo objavené pred viac ako storočím v roku 1912 [1]. Simulácie trajektórie však nevznikli hneď po jeho objavení. Hlavnou hypotézou po objavení kozmickej žiarenia až do roku 1929 bolo, že primárne kozmické žiarenie sú fotóny. Keďže aj vtedy bolo známym faktom, že fotóny nie sú ovplyvnené magnetickým poľom, vplyv geomagnetického poľa na kozmické žiarenie sa neočakával.

Korpuskulárna hypotéza sa objavila o niekoľko článkoch neskôr, keď v roku 1929 Bothe a Kolhorster navrhli, že kozmické žiarenie tvoria ionizujúce častice. Poznamenali tiež, že kozmické žiarenie nižších energií bude vylúčené z rovníkových oblastí, čo povedie k nižším intenzitám kozmickej žiarenia v blízkosti rovníka. Názor, že intenzity kozmickej žiarenia sú na rôznych geografických miestach rôzne, bol v nasledujúcich rokoch intenzívne testovaný. Prvé testy nevedli ku konečnému výsledku, ale celosvetový prieskum Comptona a jeho spolupracovníkov [2] hypotézu o rôznej distribúcii kozmickej žiarenia jednoznačne potvrdili.

Riešenie simulácií trajektórií kozmickej žiarenia bolo spočiatku riešené manuálnymi výpočtami, no veľmi skoro po tomto období prichádzajú na scénu v 30. rokoch 20. storočia analógové počítače. V [3] autori použili "Bushov diferenciálny analyzátor"[4] na skúmanie kuželov povolených smerov kozmickej žiarenia. Diferenciálny analyzátor je mechanický analógový počítač určený na riešenie diferenciálnych rovníc. Bolo vyriešených tristo asymptotických trajektórií s dôrazom na ich presnosť. V ďalšom článku [5] autori overujú výsledky porovnaním s numerickou integráciou. Ako píšú "porovnanie získaných výsledkov ukazuje absenciu systematických chýb akéhokoľvek dôsledku v mechanických integráciách a ukazuje presnosť dosiahnutú diferenciálnym analyzátorom".

Úloha je stále výpočtovo náročná. Obsiahla technická správa z roku 2020 [6] v ktorej sú vypočítané hodnoty efektívnej odrezávacej rigidity¹ vo forme tabuliek, ktoré obsahujú hodnoty pre body rozprestrené po celej zemeguli posledných desaťročí uvádzajú že *na výpočet takéhoto veľkého množstva*

¹Rigidita je miera hybnosti elektrickej častice. Je ekvivalentná energii častice vynásobenej konštantou. Efektívna odrezávacia rigidita je rigidita medzi spodnou a hornou odrezávacou rigiditou vyhodnotená zo štruktúry penumbry [7].

trajektórií je potrebný efektívny programový kód aj výkonný počítač.

Systém COR na vyhodnotenie trajektórií kozmického žiarenia v geomagnetickom poli vyvinutý v spolupráci Technickej Univerzity v Košiciach (TUKE) a Ústav Experimentálnej Fyziky Slovenskej Akadémie Vied (ÚEF SAV) typicky vypočítava jeden milión trajektórií na vyhodnotenie intenzity kozmického žiarenia v požadovanom mieste, čo trvá 10-20 hodín na 32 jadrovom uzle. Model COR ako príklad výpočtového nákladného modelu je vhodnou prípadovou štúdiou pre špecifikáciu návrhu rámca, ktorý má za cieľ zjednodušiť automatizáciu vedeckých modelov. Výsledná špecifikácia rámca by mala byť ľahko použiteľná, modulárna a ľahko rozširiteľná.

II. SYSTÉMY Z WEBOVÝM ROZHRAŇM NA SPRACOVANIE DÁT A MODELOV VO VEDE

Na identifikáciu požiadaviek, ktoré by výsledný systém mal implementovať, boli analyzované existujúce systémy v doméne kozmického žiarenia, ako aj v iných doménach. V tejto sekcii je poskytnutý prehľad vybraných systémov a ich krátky opis.

A. Vybrané systémy venované výpočtom kozmického žiarenia

V tejto kategórii boli analyzované nasledovné systémy.

- SPENVIS je systém na prácu s modelmi na zhodnotenie radiačnej situácie v okolí Zeme [8]. Tento systém má používateľskú základňu hlavne medzi návrhármi a konštruktérmi hardvéru, ktorý bude prevádzkovaný vo vysokých vrstvách zemskej atmosféry alebo mimo nej. Systém poskytuje dobré rozhranie na spoluprácu implementovaných modelov, avšak má viacero obmedzení. Hlavným obmedzením je limitovanie času daného na vykonanie simulácie. Po tom ako je tento limit dosiahnutý, prebiehajúci výpočet je zastavený. Toto obmedzenie vylučuje komplexné simulácie, ktoré sú často krát potrebné pre vedcov, ktorí s danou doménou pracujú. Ďalším obmedzením je neprívetivé používateľské rozhranie a nízka miera podpory od vývojárov systému.
- Cutoff2050 rigidity visualizer je nástroj na výpočet trajektórií kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme [9]. Systém je prístupný na adrese <https://tools.izmiran.ru/cutoff2050/>. Tento nástroj je vhodný na vyhodnotenie trajektórií prichádzajúcich z jediného smeru príchodu na dané miesto, pričom simulácia viacerých smerov príchodu je vysoko používateľsky neprívetivá. Ďalšia charakteristika tohoto systému spočíva v manuálnom zadávaní parametrov opisujúcich stav zemskej magnetosféry pri každom výpočte. Tieto parametre sa dajú získať z iných zdrojov ([10]) na základe dátumu a času, pre ktorý je simulácia vykonaná. Táto charakteristika môže byť výhodná pri simulovaní hypotetických stavov zemskej magnetosféry. No vo väčšine prípadov, kedy je potrebné vyhodnotiť trajektórie pre reálny stav magnetosféry, táto charakteristika znižuje používateľskú prívetivosť služby a môže odradiť potenciálnych používateľov.

- Existujúci systém COR je systém, do ktorého budú požiadavky implementované. Pred začatím tohoto doktorandského štúdia systém poskytoval výpočet trajektórií pre vybraný bod v zadanom čase s vertikálnym smerom príchodu, alebo s 576 smermi príchodu, ktoré rovnomerne pokrývajú povrch pologule nad uvažovaným bodom. Výsledky boli spracované do množstva vizualizácií a to konkrétne:

- vizualizácia funkcie prenosu;
- vizualizácia asymptotických smerov príchodu;
- vizualizácia katalógu spektier povolených a zakázaných rigidít;
- vizualizácia nebeskej mapy odrezávacích rigidít.

Systém taktiež ponúka výpočet a vizualizáciu jedinej trajektórie s vybranou rigiditou.

B. Vybrané systémy venované iným oblastiam

Systémy analyzované v tejto časti sú venované vektoru magnetického poľa. Hodnoty, ktoré tieto systémy ponúkajú sú buď vypočítané, alebo v prípade systému VirES namerané. Boli analyzované nasledovné systémy:

- Tsyganenko Geomagnetic Field Calculators sú "kalkulátory" prístupné na adrese https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/empirical-models/mf_calculator, kde sú udržiavané autormi Dr. Nikolaiom Tsyganenkom a Dr. Varvarou Andreevaovou. Modely na vyhodnotenie geomagnetického vektora, ktoré služba ponúka sú TS05 [11], TA15 [12], a TA16_RBF [13]. Podobne ako v prípade systému *Cutoff2050 rigidity visualizer*, hlavná nevýhoda je ťažkosť zadávania výpočtu geomagnetického vektora pre veľké množstvo bodov. Spôsob zadávania výpočtov v tomto systéme je relatívne pohodlný a používateľ dokáže bez väčších ťažkostí zadať niekoľko desiatok bodov, no pre stovky až tisíce bodov tento systém nevyhovuje.
- VirES for Swarm je systém, ktorý poskytuje prístup k nameraným a nasimulovaným hodnotám geomagnetického vektora. Je prístupný na adrese <https://vires.services/>. Tento systém poskytuje tri základné rozhrania na prístup k dátam:
 - Webový klient - ponúka základné vizualizácie dát a stiahnutie samotných dát vo viacerých dátových formátoch (text a CDF [14]). Pre použitie tohoto rozhrania sa používateľ musí zaregistrovať.
 - VirES Python klient - Aplikačné programové rozhranie (API), cez ktoré je poskytnutý priamy prístup k dátam, ku ktorým sa potom dá pristupovať cez štandardné nástroje (pandas.DataFrame² alebo xarray.Dataset³).
 - Virtual Research Environment (VRE) - ponúka prístup k VirES Python klientovi cez rozhranie Jupyter notebooku pre registrovaných používateľov. Toto rozhranie spája flexibilitu VirES Python klienta

²https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user_guide/dsintro.html

³<https://xarray.pydata.org/en/stable/user-guide/data-structures.html#dataset>

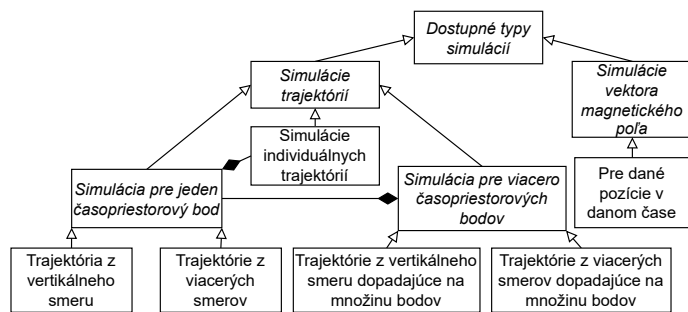
(keďže sa dá automatizovaným spôsobom prístupit' ku všetkým ponúkaným dátam) a používateľskú priateľnosť webového klienta (keďže nie je potrebné dáta lokálne ukladať a nastaviť si vývojové prostredie).

III. IDENTIFIKÁCIA POŽIADAVIEK A ICH ŠPECIFIKÁCIA

Na základe analýzy, boli identifikované nasledujúce požiadavky na systém:

- vyhodnotenie trajektórií a následne odrezávacích rigidít a intenzity kozmického žiarenia pre masívny počet bodov v čase a priestore (neskôr nazývané várkové spracovanie);
- vyhodnotenie vektora geomagnetického poľa pre množinu bodov distribuovaných v čase a priestore;
- vizualizácia prúdu častíc pre vyhodnocovanú pozíciu v prípade vyhodnotenia trajektórií pre jeden bod;
- vizualizácia výsledkov várkového spracovania konkrétne:
 - vizualizácia veličín pre vyhodnocovanú množinu bodov v danom čase;
 - vizualizácia veličín pre daný bod v priebehu času;
- vizualizácia podielu časti povrchu Zeme kde bola hodnota danej veličiny nižšia ako limitná hodnota;
- prístup k vypočítaným dátam a ich spracovanie cez webové rozhranie bez potreby nastavovania lokálneho vývojového prostredia (tomuto kroku sa v rámci tohoto článku venovať nebudeme, keďže jeho riešenie spočíva v integrácií už existujúcich nástrojov).

Na diagrame tried v obrázku 1, ktorý reprezentuje konceptuálny model, sú zobrazené typy simulácií ktoré budú v systéme dostupné.



Obr. 1. Diagrama tried zobrazujúci konceptuálny model typov simulácií zostrojený na základe identifikovaných požiadaviek. Listy v grafe reprezentujú typy výpočtov dostupné používateľovi, kurzívou je vyznačené konceptuálne zaradenie.

A. Špecifikácia časopriestorových bodov várok výpočtov

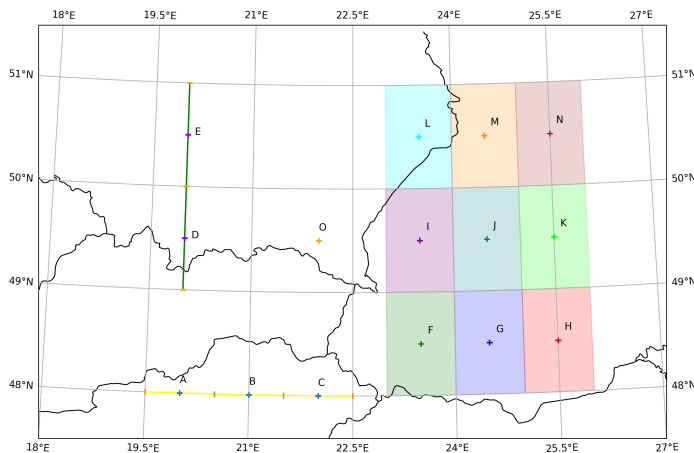
Keďže majoritná identifikovaná požiadavka je simulácia veličín pre veľké množstvo časopriestorových bodov v tejto časti špecifikujeme možné tvary ktoré systém bude ponúkať. Tie sú nasledovné:

- Bod - tento prípad nastane, ak má počiatočný aj konečný bod spoločnú aj zemepisnú šírku aj zemepisnú dĺžku.
- Čiara paralelná so zemepisnou šírkou - tento prípad nastane ak začiatočný aj konečný bod majú rovnakú

zemepisnú dĺžku ale nerovnakú zemepisnú šírku. Tento prípad taktiež nastane ak počet segmentov popri zemepisnej dĺžke je nulový.

- Čiara paralelná so zemepisnou dĺžkou - tento prípad nastane ak začiatočný aj konečný bod majú rovnakú zemepisnú šírku ale nerovnakú zemepisnú dĺžku. Tento prípad taktiež nastane ak počet segmentov popri zemepisnej šírke je nulový.
- Plocha - tento prípad nastane, keď ani začiatočný ani konečný bod nezdediajú žiaden koordinát a počet segmentov v oboch rozmeroch je nenulový.

Všetky opísané možnosti sú zobrazené na obrázku 2.



Obr. 2. Možné priestorové tvary ktoré navrhovaný systém bude podporovať.

IV. IDENTIFIKÁCIA PROBLÉMOV VZNIKNUÝCH PRI IMPLEMENTÁCI

Pri meraní rýchlosti behu implementovaných modulov na spracovanie dát simulovaných v rámci systému boli identifikované miesta, ktoré mali výrazný dopad na výkonnosť systému ako celku. Konkrétne to boli miesta čítania dát z disku. V tejto časti predstavíme dva moduly systému, v ktorých bol tento problém identifikovaný a výsledky snahy o jeho odstránenie.

A. Spracovanie súborov simulácie pre jeden bod

Na čítanie a parsovanie dát riadok po riadku bola pôvodne použitá existujúca metóda `fscanf`. Na zvýšenie rýchlosti čítania z disku bola navrhnutá vlastná metóda spočívajúca v načítaní celého obsahu súboru a následnom parsovaní riadkov použitím funkcie `strtok_r`. Navyše bol testovaný aj vplyv zamykania prístupu k súborom a paralelizmu pre disky typu SSD aj HDD. Testy boli spustené 10 krát, pričom časovaná bola iba fáza programu v ktorej boli dáta načítavané z disku. Pred každým testom bola vyčistená vyrovnávacia pamäť systému, aby bolo zaručené, že sa nemeria rýchlosť tohoto optimalizačného mechanizmu. Výsledky tohoto testovania sú v tabuľke I.

Výsledky ukazujú, že pre SSD aj HDD disky paralelizácia zlepšila výkon čítania a parsovania údajov. Na SSD pri paralelnom prístupe vlastný algoritmus parsovania zlepšil výkon a tiež zlepšil výkon pre sériový prístup. Zmena uzamykania

TABUĽKA I

ČASY BEHU FÁZY ČÍTANIA SÚBORU PROGRAMU SPRACOVANIA SIMULOVANÝCH DÁT VYUŽÍVAJÚCE RÔZNE IMPLEMENTÁCIE ČÍTANIA SÚBOROV A PARSOVANIA DÁT.

Parsovanie	Zamykanie	Prístup k súborom	SSD	HDD
Pôvodné	Áno	Sériový	8971 ms	27659 ms
		Paralelný	3562.5 ms	12840.5 ms
	Nie	Sériový	9396.5 ms	27269 ms
		Paralelný	3777 ms	12739.5 ms
Vlastné	Áno	Sériový	6389.5 ms	24426 ms
		Paralelný	2638.5 ms	12964 ms
	Nie	Sériový	6325 ms	24358 ms
		Paralelný	2604 ms	12972 ms

súborov mala na SSD len malý vplyv. Pri pôvodnom parsovaní sa výkon zhoršil a pri vlastnom parsovaní sa výkon zlepšil. Na HDD vlastný algoritmus parsovania zlepšil sériový výkon, ale zhoršil paralelný výkon. Neuzamknutie súboru tiež zmenilo výsledky na HDD len málo.

Výsledky naznačujú, že pri použití SSD je nový algoritmus parsovania veľmi výhodný, zatiaľ čo v prípade použitia HDD nie je výhodný, pretože mierne zhoršuje výkon. Zamykanie súborov výrazne neovplyvňuje výkon a paralelizácia zlepšuje výkon pre SSD aj HDD.

B. Spracovanie súborov simulácie pre výpočtovú várku

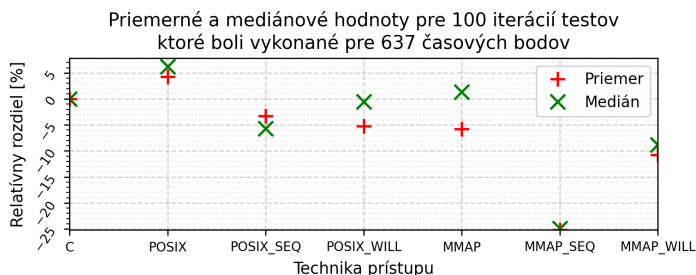
Tento modul má za úlohu spracovať výstupy modulu opísaného v predchádzajúcej časti pre všetky body vyhodnocovanej várky. Tieto súbory sú malé (obsahujú len jediný riadok z maximálne troma desiatimi číslami). Na načítanie a spracovanie obsahu týchto súborov sme navrhli, implementovali a otestovali nasledovné prístupy:

- Štandardné C - pri tomto prístupe sme použili kombináciu `fopen` a `fscanf` funkcií. Keďže obe tieto funkcie sú určené na všeobecné použitie, je možné, že obsahujú nadbytočnú réžiu, ktorej by sa bolo najlepšie vyhnúť.
- POSIX - v tejto implementácii sme najprv otvorili súbor pomocou systémového volania `open`, potom zistili veľkosť súboru pomocou `fstat`, zarezervovali vyrovnávaciu pamäť na čítanie celého súboru a potom parsovali hodnoty pomocou `sscanf`. Pri tejto implementácii máme operačnému systému možnosť oznámiť, ako spracujeme otvorené súbory pomocou funkcie `posix_fadvise`. Rozhodli sme sa vyskúšať nasledujúce možnosti:
 - `POSIX_FADV_SEQUENTIAL` (neskôr s názvom `P_SEQ`) - táto možnosť naznačuje, že súbor sa bude čítať postupne od začiatku do konca.
 - `POSIX_FADV_WILLNEED` (neskôr s názvom `P_WILL`) - táto možnosť naznačuje, že prístup k údajom nastane v blízkej budúcnosti.
- Pamäťové mapovanie - v tejto implementácii sme najprv otvorili súbor, aby sme získali deskriptor súboru, potom sme súbor namapovali na pamäť pomocou `mmap` (režim čítania, zdieľané, čítanie dopredu). Vďaka tejto implementácii máme možnosť operačnému systému oznámiť, ako spracujeme otvorené súbory pomocou

funkcie `madvise`. Rozhodli sme sa vyskúšať nasledujúce možnosti:

- `MADV_SEQUENTIAL` (neskôr s názvom `M_SEQ`) - oznam, že stránky budú čítané v sekvenčnom poradí z pamäte a teda systém môže agresívne čítať dopredu.
- `MADV_WILLNEED` (neskôr s názvom `M_WILL`) - oznam, že prístup k súborom nastane v blízkej budúcnosti.

Relatívne rozdiely času behu programu pri použití opísaných techník je zobrazený na obrázku 3. Väčšina techník prístupu k súborom mala porovnateľné výsledky, ktoré sa od štandardnej C implementácie líšili približne o 5%. Nakratší čas behu bol zaznamenaný pre prípad mapovania pamäte s radou očakávať sekvenčné poradie požiadaviek na stránky a mapovanie pamäte s radou na čítanie stránok dopredu. Tieto výsledky naznačujú, že mapovanie pamäte so správnymi radami môže zvýšiť výkon pri čítaní mnohých malých súborov. Na jednoznačné tvrdenie je však potrebný ďalší výskum.



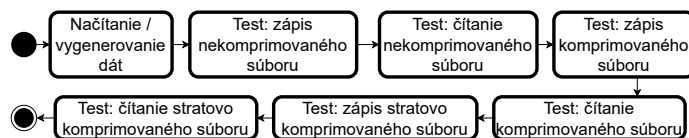
Obr. 3. Relatívny rozdiel času behu skúmaných techník pre prípad simulácie z málo (637) bodmi.

V. NÁVRH ODSTRÁNENIA IDENTIFIKOVANÝCH PROBLÉMOV

S výsledkami ktoré sú opísané v predchádzajúcej subsekcii sme stále neboli spokojní a preto sa v tejto sekcii venujeme návrhu nového spôsobu ukladania dát, ktoré by malo zaručiť zníženie času čítania a parsovania dát. Najprv sme urobili porovnanie existujúcich dátových formátov v článku [15] a vybrali sme najvhodnejší dátový formát pre naše dáta. Následne sme navrhli možnosti ako vybraný formát uplatniť vo vytváranom systéme.

A. Metóda na porovnanie dátových formátov

Metóda spočíva v navrhnutí ľubovoľnej série testov, ktoré sú potom automaticky spúšťané a namerané údaje sú potom štatisticky vyhodnocované. Navrhované poradie testov, ktoré boli v rámci testovania vykonané je na obrázku 4.



Obr. 4. Poradie testov, ktoré boli v rámci vyhodnotenia dátových formátov vykonané.

Priebeh testovania každého navrhnutého testu je zobrazený na obrázku 5. Po každom kroku testovania je vyčistená vyrovnávacia pamäť operačného systému. Vyrovnávacia pamäť slúži na minimalizáciu požiadaviek na disk tak, že údaje sú v nej ukladané. Tento efekt ale skresľuje výsledky merania, preto bol eliminovaný. Čas nameraný pri každom spustení testu je uložený pokiaľ neprebehne celé testovanie daného kroku. Namerané časy sú neskôr štatisticky vyhodnotené tak, že je vypočítaná ich mediánová hodnota. Meranie veľkosti súboru je vykonané iba raz, po vykonaní všetkých iterácií testov času čítania. Navrhnutá metóda je dostupná na adrese v zázname [16].



Obr. 5. Priebeh krokov vykonaných pred a po meraní každej iterácie testu.

B. Výsledky porovnania existujúceho riešenia a vybraných dátových formátov

V článku [15] sme porovnali textové a binárne dátové formáty z hľadiska času prístupu k dátam a úrovne komprimácie. Porovnávané dátové formáty a spôsoby kompresie, ktoré ponúkajú sú v tabuľke II. Súbory, ktoré sme vybrali na porovnanie sú výstupmi simulácie trajektórie kozmického žiarenia a produkty z nich odvodené. Údaje o trajektóriách boli vybrané zo skutočnej simulácie, zatiaľ čo hodnoty odvodených produktov boli generované náhodne tak, aby sa nachádzali v príslušných rozsahoch hodnôt. V prípade binárnych formátov sme sa rozhodli ukladať údaje vo forme s dvojnásobnou presnosťou, aby sme predišli strate presnosti.

TABUĽKA II

TESTOVANÉ DÁTOVÉ FORMÁTY A SPÔSOBY KOMPRESIE AKÚ PONÚKAJÚ

Kompresia	Text	CDF	netCDF	HDF	HDF gzzip	HDF lzf
Žiadna	Áno	Áno	Áno	Áno	Nie	Nie
Bezstratová	Áno	Áno	Áno	Nie	Áno	Áno
Stratová	Nie	Nie	Áno	Nie	Áno	Áno

Pri meraní času behu programu sme sa rozhodli merať čas na SSD aj na RAM disku, aby sme videli vplyv SSD na výkon. Meranie ukázalo skutočnosť, že používanie SSD bolo pomalšie ako RAM s výnimkou prípadu komprimovaného CDF. Poradie formátov od najrýchlejšieho po najpomalší bolo väčšinou zachované bez ohľadu na použité pamäťové médium.

Z hľadiska veľkosti súboru bol najlepším bezstratovým formátom pre simulačné súbory komprimovaný text a najlepším stratovým formátom komprimovaný netCDF. V prípade malých súborov sa ich veľkosti s bezstratovými binárnymi formátmi väčšinou zvýšili okrem netCDF a CDF, kde CDF dosiahlo oveľa lepšie výsledky. V prípade stratových formátov bol najlepší nekomprimovaný HDF5.

Pri analýze rýchlosti spracovania môžeme pozorovať, že čítanie je rýchlejšie ako zápis v prípade všetkých dátových formátov a rýchlosť spracovania malých súborov je lepšia ako

pri simulačných súboroch. Vzhľadom na rýchlosť spracovania bol HDF5 najrýchlejší bez kompresie ako aj vo väčšine ostatných prípadov s výnimkou nekomprimovaného stratového prípadu, kde bol netCDF rýchlejší (avšak súbor zaberá na disku viac miesta ako pri iných formátoch).

Pri hodnotení pomeru úrovne kompresie a rýchlosti môžeme ignorovať dátové formáty, ktoré zväčšujú veľkosť súboru. Pre bezstratové dátové formáty bol najlepší pomer kompresie k času čítania/zápisu dosiahnutý s HDF5 pomocou kompresie lzf alebo nekomprimovaného CDF pre normálne súbory a CDF pre malé súbory. Absolútne najlepší formát pri zvažovaní zmenšenia veľkosti a rýchlosti čítania/zápisu a bez ohľadu na zachovanie presnosti hodnôt je stratový HDF5 bez kompresie. Ponúka najlepší výkon pre bežné aj malé súbory.

Hlavným poznatkom je, že použitie akéhokoľvek binárneho formátu s vhodnou štruktúrou zvýši rýchlosť prístupu na čítanie a zápis k údajom, pričom vo väčšine prípadov poskytne aj menšie veľkosti súborov. V prípade malých súborov je zlepšenie rýchlosti prístupu na čítanie a zápis enormné pri použití binárnych dátových formátov.

C. Spôsoby integrácie HDF5 do navrhovaného systému

Boli navrhnuté tri spôsoby ako integrovať HDF5 formát vzhľadom na požiadavky systému a obmedzenia vybraného formátu a to konkrétne:

- Implementácia, pre ktorú je potrebné vykonať minimálny počet zmien - táto implementácia by plne akceptovala obmedzenia HDF5 a vyhla by sa synchronizačným mechanizmom nad rámec už existujúcich zariadení, ktoré ponúka formát HDF5. Štruktúra navrhovaného úložiska nie je z výkonnostného hľadiska optimálna, ale je jednoducho implementovateľná do existujúceho systému. Štruktúry navrhované v tejto časti obmedzujú potrebu súbežného zápisu do rovnakého súboru HDF5. To sa vykonáva ukladaním výstupov údajov do viacerých oddelených súborov v prípadoch, keď sa pre jednu simuláciu vytvorí paralelne viacero výstupov. Pre intenzívny kozmického žiarenia a odrezávaciu rigiditu dávkovej simulácie sa vytvorí iba jeden súbor pre jednu dávku. Súbežný prístup je možné vyriešiť aktívnym čakaním na pokus o otvorenie súboru HDF5 na zápis. Môžeme použiť správanie HDF5, kde pokus o otvorenie súboru na zápis, ktorý je už otvorený na zápis v inom procese, zlyhá s kombináciou hlavnej a vedľajšej chyby `File accessibility` a `Unable to open file`.
- Zmena implementácie simulačného modulu z neprerušovaného zápisu na bafrovaný zápis - simulačný modul v aktuálnej implementácii otvorí výstupný súbor na začiatku simulácie a priebežne do neho zapisuje. Tento faktor limituje integráciu formátu HDF5 pre várkové výpočty. V prípade, že by bol súbor otváraný iba pred požiadavkou na zápis a hneď po nej zatvorený, by bolo možné navrhnuť ľubovoľnú štruktúru úložiska a nutnosť aktívneho čakania by bola minimalizovaná.
- Serializácia požiadaviek na čítanie a zápis prostredníctvom služby - v tomto prípade navrhujeme vrstvu,

ktorá by spracovala požiadavky programov tak, aby obmedzenia formátu HDF5 boli akceptované. Štruktúra súborov by mohla byť ľubovoľná a rýchlosť prístupu k dátam veľká, no v prípade zmeny štruktúry úložiska by bolo nutné meniť len implementáciu tejto vrstvy. Pre jednoduchšiu implementáciu tejto vrstvy by mohlo byť použité už existujúce rozhranie Parallel HDF.

VI. ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE PODOBNOSTI VÝSLEDKOV EFEKTÍVNEJ ODREZÁVACEJ RIGIDITY

Na overenie integrácie modulov do vyvinutého systému bol navrhnutý štatistický test. Tento test nielen overuje presnosť modelov integrovaných do systému COR, ale tiež ukazuje, že systém správne integruje simulačné modely a moduly následného spracovania. Systém bol overený spustením dávkovej simulácie pre povrch celej Zeme s krokom v stupňoch zemepisnej šírky a dĺžky 1° dňa 1. januára 2015 o 00:00 pomocou modelu geomagnetického poľa IGRF. Táto kombinácia vstupov a modelu geomagnetického poľa bola zvolená, pretože existujú najmenej dve nedávne štúdie, v ktorých sú odrezávacie rigidity pre mriežku bodov na povrchu Zeme s krokom 5° v zemepisnej šírke a 15° v zemepisnej dĺžke. Vypočítali sme odrezávacie rigidity pre hustejšiu mriežku, aby sme demonštrovali schopnosti systému COR. Štúdie, ktoré sme už spomenuli a ktoré boli použité na porovnanie našich výsledkov, sú Gerontidou [17] a Smart & Shea [18]. Výsledky tohto overovania boli publikované vo forme článku [19] v časopise *Advances in Space Research*.

A. Metodológia štatistického vyhodnotenia

Rozhodli sme sa priradiť každému bodu oblasť okolo neho, kde je hodnota odrezávacej rigidity rovnaká ako na samotnom bode. Vysvetlenie a vizuálne príklady, ako priradiť každému bodu oblasť sú prezentované v subsekcii III-A. Na porovnanie sme najprv vypočítali absolútny rozdiel pre každý bod D_{abs} ako efektívnu hodnotu odrezávacej rigidity z jedného súboru údajov, od ktorej sme odčítali efektívnu hodnotu odrezávacej rigidity druhého súboru údajov:

$$D_{abs} = dataset_1 - dataset_2 \quad (1)$$

Po druhé, vypočítali sme relatívny rozdiel pre každý bod D_{rel} ako percentuálny rozdiel efektívnej odrezávacej rigidity z prvého súboru údajov a efektívnej odrezávacej rigidity z druhého súboru údajov:

$$D_{rel} = (dataset_1 / dataset_2 - 1) * 100 \quad (2)$$

Údaje od iných autorov obsahujú body s efektívnou odrezávacou tuhosťou 0 GV. Z hľadiska fyziky by sa táto hodnota mala vyskytovať len na magnetických póloch. V dátach sú však tieto hodnoty prítomné v nepólových polohách. Z tohoto dôvodu sme nezohľadnili body, ktoré aspoň v jednom súbore údajov obsahovali hodnoty efektívnej odrezávacej rigidity 0 GV. Za platné body sa teda považujú iba tie body, ktoré majú nenulové hodnoty efektívnej odrezávacej rigidity v oboch porovnávaných súboroch údajov. Výsledný skript na automatizované aplikovanie tejto metodológie je dostupný na [20].

B. Výsledky štatistického vyhodnotenia

Súhrn štatistických parametrov, na základe ktorých vieme porovnať relatívne rozdiely výsledkov, možno nájsť v tabuľkách III (zohľadňujú sa všetky platné body) a ?? (iba platné body s efektívnou odrezávacou rigiditou väčšou ako 0.3 GV pre oba porovnávané súbory údajov). Definíciu platného bodu je možné nájsť v podsekcii VI-A.

V prípade, keď boli vyhodnotené všetky validné body, tak môžeme vidieť, že pre väčšinu štatistických parametrov sú si výsledky ostatných dvoch prác navzájom podobnejšie, ako k výsledkom zo systému COR. Výnimkou je priemerná hodnota rozdielov, ktorá je menšia medzi výsledkami z COR a Smart & Shea.

TABUĽKA III

TABUĽKA MEDIÁNU A PRIEMERU RELATÍVNYCH ROZDIELOV MEDZI PUBLIKOVANÝMI VÝSLEDKAMI (SMART SHEA [18], GERONTIDOU [17]) A VÝSLEDKY TEJTO PRÁCE) A PERCENTUÁLNYM PODIELOM CELKOVEJ PLOCHY A_{rd} , KDE SÚ RELATÍVNE ROZDIELY MENŠIE AKO 5%

	Medián	Priemer	$A_{rd} < 5\%$
Smart Shea / Gerontidou	1.40%	7.63%	90.61%
Gerontidou / COR	1.73%	7.87%	88.62%
Smart Shea / COR	2.76%	7.10%	80.24%

Kľúčovým parametrom je pre nás percento plochy Zeme, kde sa hodnoty medzi modelmi líšia o menej ako 5%. Z hľadiska tohoto štatistického parametra sú výsledky z COR takmer také isté, ako výsledky Gerontidou, ako sú si výsledky z Gerontidou podobné výsledkom Smart & Shea.

Poradie podobnosti modelov sa príliš nemení, keď sa berú do úvahy iba body s efektívnou odrezávacou rigiditou vyššou ako 0.3 GV v oboch porovnávaných súboroch údajov. Toto je možné vidieť v tabuľke ?? . Hodnota 0.3 GV bola stanovená na základe analýzy závislosti použitých štatistických parametrov od limitnej hodnoty. V tomto prípade sa podobnosť všetkých skúmaných modelov zvyšuje vo všetkých štatistických parametroch.

TABUĽKA IV

TABUĽKA MEDIÁNU A PRIEMERU RELATÍVNYCH ROZDIELOV MEDZI PUBLIKOVANÝMI VÝSLEDKAMI (SMART & SHEA [18], GERONTIDOU [17]) A VÝSLEDKAMI TEJTO PRÁCE) A PERCENTUÁLNYM PODIELOM CELKOVEJ PLOCHY A_{rd} , KDE SÚ RELATÍVNE ROZDIELY MENŠIE AKO 5% V REGIÓNOCH S EFEKTÍVNOU ODREZÁVACOU RIGIDITOU VYŠŠOU AKO 0.3 GV.

	Medián	Priemer	$A_{rd} < 5\%$
Smart Shea / Gerontidou	0.93%	1.95%	95.08%
Gerontidou / COR	1.23%	2.71%	92.59%
Smart Shea / COR	2.01%	2.91%	87.77%

VII. ZÁVER

Hlavným výsledkom tejto práce je nástroj na simuláciu trajektórií kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme s názvom COR (Cut-Off Rigidity) použitý ako prípadová štúdia pre implementáciu rámca vedeckého kódu vesmírnej fyziky. Nástroj COR poskytuje rámec ponúkajúci širokú škálu funkcií a možnosť realizovať rozsiahle simulácie na škálovateľných viacjadrových / viacuzlových systémoch.

Hlavné prínosy práce pre študijný odbor:

- **Bol vyvinutý pohodlný systém pre astročasticových fyzikov pracujúcich v oblasti kozmického žiarenia v geomagnetosfére.**

Ide o hlavný vedecký prínos, ktorý prispeje k pozitívnemu rozvoju celej oblasti astročasticovej fyziky. Nástroj, ako je tento, prevezme bremeno ručnej analýzy modelovaných výsledkov vedcov a zvýši ich vedeckú produktivitu. Konkrétne príspevky do oblasti astročasticovej fyziky:

- **Simulácia radiačnej situácie pre veľké množstvo priestorových bodov v rôznych časových okamihoch.**

Spoločným nedostatkom analyzovaných existujúcich systémov je ich neschopnosť poskytnúť simulácie pre masívny počet bodov. Vyvinutý systém sa pokúša vyplniť túto medzeru a poskytnúť dobrý východiskový bod pre implementáciu ďalších systémov tohto druhu.

- **Vývoj interaktívneho webového prostredia na analýzu údajov.**

Aj keď je systém zameraný na poskytnutie prvotnej analýzy, nie je možné poskytnúť analýzu všetkých možných aspektov. Z tohto dôvodu je prospešné prostredie, ktoré možno použiť na ďalšiu analýzu výsledkov bez potreby nastavovania lokálneho prostredia. Tento príspevok bol inšpirovaný najmä virtuálnou výskumnou platformou ESA VirES pre misiu Swarm.

- **Vývoj pracovných postupov spracovania dát pre predbežnú analýzu výsledkov simulácií so zameraním na vizualizáciu výsledkov.**

Automatizované spracovanie údajov skraca čas prvotnej analýzy výsledkov. Opis špecifických algoritmov spracovania dát vyvinutých počas tejto práce môže poskytnúť dobrý východiskový bod pre ďalšie podobné automatizované analýzy.

- **Identifikácia miest, ktoré spomaľujú výkon spracovania výsledkov simulácie.**

Výkon systému je dôležitým aspektom, pretože môže rozhodnúť o tom, či používateľ bude systém naďalej používať a tiež ovplyvňuje náklady na prevádzku systému. Výkon je najviac spomalený dlhým časom potrebným na načítanie dát z disku.

- **Návrh eliminácie identifikovaných miest, ktoré spomaľujú spracovanie dát analýzou vhodnosti dátových formátov na skladovanie dát v oblasti astročasticovej fyziky.**

Aby sme vyriešili najväčšiu prekážku výkonu, preskúmali sme dostupné alternatívy a vybrali sme tú s najlepšimi výkonnosťnými charakteristikami pre konkrétne dáta (HDF5). Na výber najlepšieho výkonu sme vyvinuli metódu na automatizované testovanie výkonu dátových formátov. Následne sme navrhli 3 možné prístupy implementácie zvoleného formátu do systému. Na zodpovedanie otázky, ktorý z navrhovaných prístupov je

najvhodnejší, je potrebný ďalší výskum.

- **Overenie výsledného systému porovnaním s dostupnými publikovanými výsledkami.**

Boli vytvorené metódy na porovnanie výsledkov systému COR s výsledkami iných modelov. Tieto metódy boli použité na identifikáciu a kvantifikáciu rozdielov. Vyvinuté metódy sú opísané v práci a môžu tvoriť štandard pre overenie výsledkov simulácií odrezávacích rigidít.

- **Zhromažďovanie spätnej väzby od používateľov systému a zlepšovanie systému na základe získanej spätnej väzby.**

Systém bol propagovaný na konferencii ICRC⁴, kde bol použitý na získanie výsledkov o šírení kozmického žiarenia v geomagnetosfére za posledné dve tisícročia. Ďalšia spätná väzba bola prijatá vo forme recenzie článku, ktorý bol zaslaný do časopisu *Advances in Space Research*. Na zlepšenie systému sme použili spätnú väzbu z oboch ohlasov.

- **Bol identifikovaný súbor všeobecných návrhov na implementáciu vedeckého rámca na spracovanie modelov a údajov nájdených v prípade použitia.** Návrhy sú nasledovné:

- Pri navrhovaní systému by sa mal najskôr implementovať najvšeobecnejší prípad a potom konkrétnejšie prípady.
- Dizajn systému by mal byť modulárny, aby sa podporilo opätovné použitie modulu.
- Rozhrania by mali byť dobre definované. V prípade, že sa na komunikáciu používajú súbory, mala by byť definovaná ich štruktúra.
- Použitie štandardných metód ukladania údajov môže zlepšiť výkon a interakciu s inými systémami.

Pre implementátorov časovo závislých modelov odporúčame poskytovať implementovaný jednoducho použiteľný systém na načítavanie vstupných hodnôt.

Budúca práca by mala zahŕňať implementáciu navrhovaných schém ukladania údajov a overenie najvhodnejšej z nich. Ďalším krokom by mohlo byť ešte väčšie zovšeobecnenie systému prostredníctvom prijatia existujúceho alebo vývoja nového doménovo špecifického jazyka na definovanie automatizácie pracovného toku spracovania údajov. Na zvýšenie informovanosti vedeckej komunity o systéme COR by sa mala využívať jeho propagácia vo forme článkov v časopisoch a konferenčných príspevkoch. Ďalšou možnosťou je začlenenie iných modelov kozmického žiarenia (napr. modulácie kozmického žiarenia v modeloch heliosféry, modely sekundárneho kozmického žiarenia v zemskej atmosfére a modely radiačných pásov) do systému COR.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] V. F. Hess, "Über beobachtungen der durchdringenden strahlung bei sieben freiballonfahrten," *Phys. Zeits.*, vol. 13, pp. 1084–1091, 1912.
- [2] A. H. Compton, "A geographic study of cosmic rays," *Physical Review*, vol. 43, no. 6, p. 387, 1933.

⁴<https://icrc2021.desy.de/>

- [3] G. Lemaitre and M. Vallarta, "On the geomagnetic analysis of cosmic radiation," *Physical Review*, vol. 49, no. 10, p. 719, 1936.
- [4] V. Bush, "The differential analyzer. a new machine for solving differential equations," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 212, no. 4, pp. 447–488, 1931.
- [5] G. Lemaitre and M. Vallarta, "On the allowed cone of cosmic radiation," *Physical Review*, vol. 50, no. 6, p. 493, 1936.
- [6] K. Copeland, "Cari-7 documentation: Geomagnetic cutoff rigidity calculations and tables for 1965-2010," 2020.
- [7] D. Cooke, J. Humble, M. Shea, D. Smart, N. Lund, I. Rasmussen, B. Byrnak, P. Goret, and N. Petrou, "On cosmic-ray cut-off terminology," *Il Nuovo Cimento C*, vol. 14, no. 3, pp. 213–234, 1991.
- [8] D. Heynderickx, B. Quaghebeur, E. Speelman, and E. Daly, "Esa's space environment information system (spenvis)-a www interface to models of the space environment and its effects," in *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2000, p. 371.
- [9] S. Belov, G. Zobnin, and V. Yanke, "Program for calculating the geomagnetic cutoff rigidity of cosmic rays and the trajectories of their motion," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 85, no. 11, pp. 1297–1301, 2021.
- [10] G. J. Mathews and S. S. Towheed, "Nssdc omniweb: The first space physics www-based data browsing and retrieval system," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 801–808, 1995.
- [11] N. Tsyganenko and M. Sitnov, "Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 110, p. A03208, 2005.
- [12] N. Tsyganenko and V. Andreeva, "A forecasting model of the magnetosphere driven by an optimal solar wind coupling function," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, no. 10, pp. 8401–8425, 2015.
- [13] —, "An empirical rbf model of the magnetosphere parameterized by interplanetary and ground-based drivers," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 121, no. 11, pp. 10 786–10 802, 2016.
- [14] *CDF User's Guide*, 11 2020.
- [15] D. Gecášek, M. Solanik, and J. Genčí, "Which data format to store scientific data should i use? a performance analysis." *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2022.
- [16] D. Gecášek, "dage5/data_formats: Published_version," Jun. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6760248>
- [17] M. Gerontidou, N. Katzourakis, H. Mavromichalaki *et al.*, "World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade," *Advances in Space Research*, vol. 67, no. 7, pp. 2231–2240, 2021.
- [18] D. Smart and M. Shea, "Vertical geomagnetic cutoff rigidities for epoch 2015," in *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, vol. 36, 2019, p. 1154.
- [19] D. Gecášek, P. Bobík, J. Genčí, J. Villim, and M. Vaško, "Cor system: a tool to evaluate cosmic ray trajectories in the earth's magnetosphere," *Advances in Space Research*, vol. 70, pp. 1153–1168, 2022.
- [20] D. Gecášek, "dage5/cut-off-rigidity-comparison-method: Published_version," Jun. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6760350>

Analýza zmien v elektrofyzikálnej štruktúre izolačného materiálu impedančnou spektroskopiou

Peter Havran

Katedra elektroenergetiky
FEI TUKE
Košice, Slovenská republika
peter.havran@tuke.sk

Roman Cimbala

Katedra elektroenergetiky
FEI TUKE
Košice, Slovenská republika
roman.cimbala@tuke.sk

Abstrakt— Predmetom tejto dizertačnej práce je analýza elektrofyzikálnych mechanizmov izolačných materiálov v podobe dielektrickej odozvy na aplikované elektrické pole. V počiatočnej fáze práca obsahuje súčasný prehľad izolačných materiálov v elektroenergetike a tepelnú degradáciu, ako faktor spôsobujúci výrazné zmeny v štruktúre izolačného materiálu. Podrobne sú popísané dynamické relaxačné procesy prostredníctvom komplexných dielektrických modelov a metóda impedančnej spektroskopie, ktorá v práci predstavuje nosný diagnostický nástroj pri experimentálnej analýze. Experimentálnej analýze sú podrobené izolačné materiály rôzneho skupenstva. V prípade kvapalných izolačných materiálov sú skúmané základové oleje, magnetická nanokvapalina a hybridné nanokvapaliny. Čo sa týka kombinovaných izolačných materiálov, sú skúmané vzorky hybridná nanokvapalina-papier. Skúmaný materiál pevného skupenstva je XLPE izolácia. Experimentálna analýza skúmaných materiálov poskytuje pozoruhodné výsledky, ktoré by mohli byť implementované v praxi.

KLúčové slová—impedančná spektroskopia; dielektrikum; polarizácia; vodivosť; dielektrické straty

Abstract— The subject of this dissertation is the analysis of electrophysical mechanisms of insulating materials in the form of dielectric response to the applied electric field. In the initial phase, the work contains a current overview of insulation materials in the power engineering and thermal degradation, as a factor causing significant changes in the structure of the insulation material. Dynamic relaxation processes through complex dielectric models and the method of impedance spectroscopy are described in detail, which in this work represents a key diagnostic tool in experimental analysis. Insulation materials of various states are subjected to experimental analysis. In the case of liquid insulating materials, base oils, magnetic nanofluids and hybrid nanofluids are investigated. Regarding combined insulation materials, the examined samples are hybrid nanofluid-paper. The investigated solid-state material is XLPE insulation. Experimental analysis of the investigated materials provides remarkable results that could be implemented in practice.

I. ÚVOD

Dizajn a výber izolačných materiálov je jedným z najdôležitejších problémov, ktorým musia inžinieri čeliť po celom svete, pretože pokrývajú všetky tri formy skupenstva (tuhé, kvapalné a plynné). Je zrejme, že návrh izolačného systému je zložitý postup, ktorý by mal byť vykonaný

metodicky. Aj napriek tomu, že je kvalita izolačných materiálov zvyšovaná, sú mnohé poruchy elektrických zariadení spojené so zlyhaním izolácie. Cieľom je eliminácia týchto porúch, ktorú je možné dosiahnuť správnym dodržiavaním prevádzkových parametrov, skvalitnením údržby a pod. Existuje ale proces resp. jav, ktorý má podstatný dosah na kvalitu izolačného systému na základe degradačných faktorov ovplyvňujúcich jeho kompaktnosť z hľadiska štruktúry. Tento jav predstavuje starnutie izolačných materiálov. V dôsledku starnutia je súčasná prax zaťažovaná veľkou výzvou, pretože zlyhanie izolácie môže zapríčiniť veľké národnohospodárske škody, neberúc do úvahy opravu daného zariadenia. Preto je potrebné monitorovať a diagnostikovať stav izolácie vhodnou a spoľahlivou metódou, akou impedančná spektroskopia bezpochyby je. Vďaka súčasnej dostupnosti neustále sa vyvíjajúcich automatizovaných impedančných zariadení pokrývajúcich široké frekvenčné, časové a potenciálne rozsahy sú štúdie impedančnej spektroskopie čoraz populárnejšie, pretože jej teoretické základy sú čoraz viac chápané elektrotechnikmi a vedcami na základe získavania zručností v interpretácii údajov o impedancii, ktorá dokáže popisovať rýchlosť degradácie izolačných materiálov prostredníctvom sledovania polarizačných mechanizmov vo frekvenčnej a v časovej oblasti. Podstata tejto metódy spočíva v analýze dielektrickej relaxácie s cieľom zníženia dielektrických strát v materiáloch, ktoré odrážajú stav izolácie s cieľom zabrániť škodám súvisiacim s haváriou elektrického zariadenia na jednej strane a na druhej strane podať spätnú väzbu na optimalizáciu daného izolačného materiálu, či eliminovať nedostatky v nových progresívnych izolačných materiáloch. Je možné predpokladať, že impedančná spektroskopia bude v nadchádzajúcich rokoch hrať čoraz dôležitejšiu úlohu v základnej a aplikovanej elektrochemii a materiálových vedách na báze diagnostiky elektroenergetických systémov.

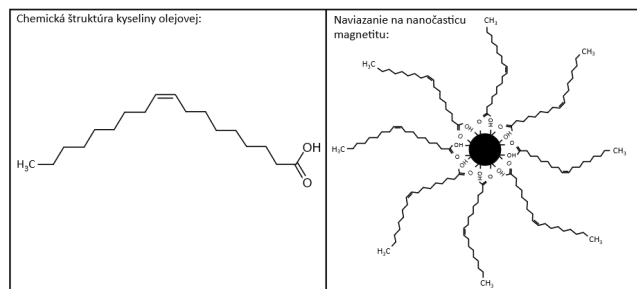
II. PREHĽAD IZOLAČNÝCH MATERIÁLOV V ELEKTROENERGETIKE

A. Kvapalné izolačné materiály

Kvapalné izolačné materiály je možné v zásade rozdeliť do dvoch chemických kategórií na organické a anorganické. Najčastejšie používaným organickým kvapalným dielektrikom pre elektroenergetické zariadenia sú minerálne oleje. Okrem prirodzene sa vyskytujúcich olejov sú na trhu dostupné aj rôzne

syntetické organické izolačné kvapaliny. Najbežnejšie z nich sú silikónové oleje a polychlórované bifenyly (PCB). Z anorganických izolačných kvapalín sú vysoko čistená voda a jej vodný roztok používané na impulzné energetické aplikácie, ako sú napr. kondenzátory. Podobne sú na kryogénne aplikácie často používané skvapalnené izolačné plyny [1]. Kvapalné izolačné materiály sú hojne používané v celom elektroenergetickom systéme v rôznych komponentoch, ako sú transformátory, silové káble, ističe, výkonové kondenzátory, priedochky a spínače. Slúžia tu na rôzne funkcie, buď ako samotné alebo v kombinácii s pevnými izolačnými materiálmi. V elektroenergetike je používaná široká škála prírodných a syntetických kvapalín. Výber správnej dielektrickej kvapaliny však závisí od jej fyzikálno-chemických a elektrických vlastností, ako aj povahy funkcie, ktorú bude vykonávať [1].

Magnetická (feromagnetická) kvapalina predstavuje moderný kvapalnú izolačný materiál, ktorému je momentálne venovaná veľká pozornosť v podobe experimentálnych skúmaní po celom svete. Ide o stabilnú koloidnú suspenziu mikroskopických jednodoménových magnetických častíc (nanočastíc), ktoré sú rovnomerne rozptýlené v celom objeme kvapalného média. Veľkosť týchto magnetických častíc sa pohybuje v rozsahu 5 až 15 nm. Ako nosné kvapalné médium v magnetických kvapalinách sú používané elektroizolačné oleje, prírodné estery alebo voda. Magnetická kvapalina a jej aplikácia je podmienená druhu a charakteru nosnej kvapaliny. Magnetické nanočastice sú v oleji stabilizované surfaktantom, najčastejšie kyselinou olejovou, ako je to znázornené na Obr. 1 [2].



Obr. 1 Stabilizácia magnetickej nanočastice kyselinou olejovou [2]

B. Pevné izolačné materiály

Pevné izolačné materiály predstavujú neoddeliteľnú súčasť štruktúry každého vysokonapäťového zariadenia. Mali by disponovať odolnosťou voči predpokladaným prevádzkovým teplotám a taktiež elektrickému, chemickému a mechanickému namáhaniu. Pevné izolačné materiály, ktoré sú široko používané v elektrických zariadeniach, je možné rozdeliť na anorganické a organické (termoplastické) pevné izolačné materiály. Anorganické pevné izolačné materiály vo forme porcelánu, skla a sfudových výrobkov sa všeobecne vyznačujú vysokou teplotnou odolnosťou a sú odolné voči chemickým vplyvom, poveternostným vplyvom, rádiácii a namáhaniu častkovými výbojmi. Termoplastické materiály sú používané na izoláciu káblov (polyetylén, polyvinylchlorid), ako dielektrikum kondenzátorov (fólie) a na opláštenie. Spektrum ďalších pevných izolačných materiálov tvoria termosetické

materiály a elastoméry, spolu s vláknitými izolačnými materiálmi [1][3].

C. Plynné izolačné materiály

Všetky plyny sú ideálne vyplňovacie látky a impregnačné médiá, vďaka svojej schopnosti rovnomerne vyplniť dutiny. Atmosférický vzduch je prirodzene dostupný izolačný materiál pre všetky vonkajšie izolácie. Bohužiaľ, elektrická pevnosť je porovnateľne nízka a dokonca aj fluorid sírový (SF_6) dosahuje pevnosť kvapalného dielektrika iba v stlačnom stave. Veľkou výhodou je okamžitý návrat elektrickej pevnosti po preskoku a výbojoch prostredníctvom rekombinácie voľných nosičov nábojov. Starnutím dochádza v prevádzkových podmienkach k zmenám dielektrických vlastností iba pri hexafluoride síry (SF_6). Dielektrické vlastnosti sú výnimočné. Relatívna permitivita $\epsilon_r = 1$ a stratový činiteľ je $\text{tg } \delta \ll 10^{-4}$. Aplikácia plyných izolačných materiálov zahŕňa napr. vonkajšie izolácie, zapuzdrené rozvodne, ističe, vypínače a meracie kondenzátory [3].

III. TEPELNÁ DEGRADÁCIA IZOLAČNÝCH MATERIÁLOV

Teplota, ako stavová fyzikálna veličina, predstavuje aspekt, ktorý zásadne pôsobí na prevádzkovú schopnosť každého elektrického zariadenia. Môže ísť o nízke teploty alebo vysoké teploty vonkajšieho prostredia. Takže tepelné namáhanie alebo preťažovanie izolačného systému urýchľuje jeho starnutie a taktiež znižuje jeho elektroizolačné vlastnosti [4].

A. Tepelné namáhanie izolačného systému

Základné prvky tepelného starnutia spočívajú v postupnosti chemických a fyzikálnych prejavov, ako následok chemických degradačných procesov. Na základe týchto procesov dochádza k termodynamickej rovnováhe. Ako už bolo spomenuté vyššie, teplota výrazne ovplyvňuje prevádzkovú schopnosť elektrického zariadenia prostredníctvom pôsobenia vysokých a nízkych teplôt vonkajšieho prostredia. V dôsledku zvyšovania teploty dochádza k poklesu mechanickej pevnosti a pružnosti pevných izolačných materiálov, mäknutiu plastov a ich následnému poškodzovaniu. Pri ďalšom zvyšovaní teploty dochádza k procesu topenia, kedy pevné látky nadobúdajú kvapalné skupenstvo. Čo sa týka kvapalných izolačných materiálov, pri zvýšení teploty dochádza k poklesu viskozity, následkom čoho bádaj zhoršenie elektroizolačných vlastností prostredníctvom zníženia odporu, zvýšenia stratového činiteľa, nárastu relatívnej permitivity a poklesu elektrickej pevnosti. Znižovanie teploty pôsobí zase opačne. Plynné izolačné materiály majú tendenciu kondenzovať a viskozita kvapalných materiálov rastie [5].

B. Tepelné starnutie izolačného systému

Na posúdenie životnosti izolačných materiálov sú zvyčajne vykonávané skúšky životnosti. Tieto skúšky sú charakteristické vystaveniu vzoriek izolačného materiálu neustálemu namáhaniu, kým nedôjde k zlyhaniu. Čas do zlyhania izolačného materiálu v prevádzkových podmienkach by mal byť z týchto testov predpovedaný zo štatistického hľadiska. Tento výsledok musí byť dosiahnutý v časoch oveľa kratších,

ako je predpokladaná životnosť, preto sú skúšky vykonávané za ťažších podmienok, ako sú prevádzkové [6].

Elektrická izolácia (najmä organické materiály), ktorá je vystavená vysokým teplotám sa môže koniec koncov poškodiť. Poškodenie materiálu spôsobuje zmeny v ich fyzikálnych vlastnostiach, to znamená, že po určitom čase nie sú schopné plniť svoju funkciu [6]. Ak je daný predpoklad zmeny jednej fyzikálnej resp. elektrickej veličiny z , dôjde aj k zmene koncentrácie c chemického zloženia látky $c = F(z)$. Časová zmena koncentrácie môže byť vyjadrená nasledovne:

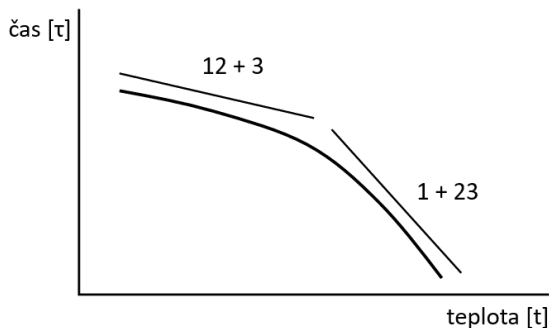
$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -k \cdot c^{-n_r} \quad (1)$$

pričom k predstavuje Arrheniovu rýchlostnú reakčnú tepelne závislú konštantu, n_r reakčnú konštantu v materiáli ($1 - 3$) a c je chemické zloženie látky [5]. Zmeny vlastností izolačných materiálov prostredníctvom pôsobenia zvýšenej teploty, ktoré sú označované ako starnutie, sú dané výsledkom prebiehajúcich chemických procesov a podliehajú teda rovnakým zákonitostiam. Vzťah medzi rýchlosťou degradácie a pôsobiacou teplotou má rovnaký tvar, ako Arrhéniova rovnica, ktorá vyjadruje rýchlosť chemickej reakcie, resp. čas, ktorý uplynie do hraničnej hodnoty bezpečného prevádzkovania elektrickej izolácie [5]:

$$\tau = A \cdot \exp \frac{B}{T} \quad (2)$$

kde τ reprezentuje dobu životnosti izolačného materiálu, T predstavuje absolútnu teplotu a A, B sú konštanty vychádzajúce z aktivačnej energie reakcie [5].

Na Obr. 2 je znázornený priebeh životnosti, majúci podobu lomenej závislosti na základe toho, že zmenou v izolačnom materiáli nepredchádzal iba jeden chemický proces, ale viacero procesov súčasne (napr. $123 \rightarrow 12 + 3$ alebo $123 \rightarrow 1 + 23$). Výsledný priebeh životnosti teda predstavuje exponenciálne klesajúcu dotyčnicu k lomeným priamkam, ktoré charakterizujú viacero chemických procesov, prebiehajúcich v materiáli [5].

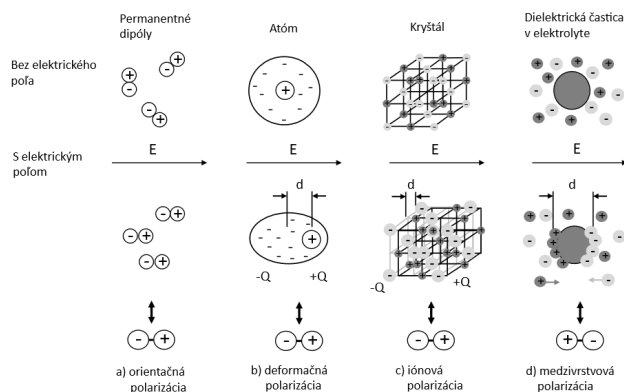


Obr. 2 Viaceré chemické zmeny vplyvajúce na životnosť materiálu [5]

IV. ELEKTROFYZIKÁLNA ANALÝZA POLARIZAČNÝCH PROCESOV V DIELEKTRIKU METÓDOU IMPEDANČNEJ SPEKTROSKOPIE

Keď je systém elektrických nábojov (dielektrikum) vystavené konštantnému elektrickému poľu, dochádza k posunu náboja spôsobom, ktorý závisí od toho, či sú náboje voľné alebo viazané. Ak sú náboje voľné, ako napr. v prípade zriedených roztokov elektrolytov, vedie posunutie k prenosu kladných nábojov v smere poľa a záporných nábojov v opačnom smere. Pri existencii viazaných párov kladných a záporných nábojov (dipólov), elektrické pole indukuje rotáciu párov tak, aby boli dipóly vyrovnané rovnobežne s poľom. V prvom prípade dochádza k vodivosti konštantným elektrickým prúdom, zatiaľ čo v ďalšom prípade je registrovaná vodivosť elektrickým prúdom s určitým posunom, čo je prechodný proces, ktorý trvá iba dovtedy, kým dipóly nedosiahnu svoju novú rovnovážnu orientáciu, ktorá je určená rovnováhou medzimolekulárných, tepelných a poľných síl. Systém permanentných alebo indukovaných dipólov predstavuje ideálne dielektrikum. Reálne dielektrikum obsahuje aj voľné náboje, preto bude kvôli všeobecnosti v tejto časti popisované reálne dielektrikum, v ktorom sú prítomné voľné a viazané náboje, resp. dipóly [7].

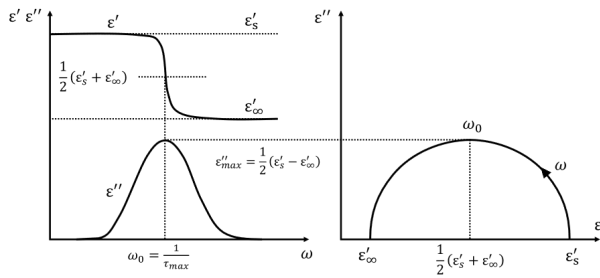
Pri aplikovaní vonkajšieho elektrického poľa na dielektrikum je z hľadiska pohybu nosičov elektrického náboja registrovaných viacero druhov polarizácie. Celkový polarizačný proces dielektrika môže byť vytvorený súčtom viacerých polarizácií naraz. Je známych niekoľko špecifických typov polarizácie, ktoré sú prezentované na Obr. 3 [7].



Obr. 3 Ilustrácia rôznych polarizačných mechanizmov [7]

A. Relaxačný proces – Debye

Polarizačné relaxačné procesy je možné registrovať aj pri aplikácii striedavého elektrického napätia a sledovať ich frekvenčnú závislosť v podobe komplexnej permitivity, ktorej zložky predstavujú až na konštantné súčinitele Fourierovej transformácie funkciu poklesu [8].

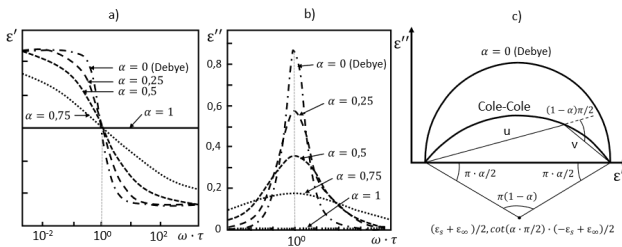


Obr. 4 Frekvenčné závislosti Debyeovej relaxácie [8]

Z Debyeových charakteristík na Obr. 4 vľavo vyplýva nasledovné. V oblasti nízkych frekvencií je reálna časť ϵ' rovná statickej permitivite ϵ_s a imaginárna časť ϵ'' je nulová v dôsledku uvažovania jednosmerného elektrického poľa, pripojeného na dielektrikum. V oblasti vysokých frekvencií je $\epsilon' = \epsilon_\infty$ a ϵ'' nadobúda opäť nulovú hodnotu. V oblasti stredných frekvencií dosahuje ϵ'' maximálne hodnoty, pričom platí $\omega_0 \cdot \tau_{max} = 1$, kde ω_0 predstavuje frekvenciu pri ϵ''_{max} . Pri tejto frekvencii, ktorá symbolizuje Debyeho relaxáciu, je reálna časť rovná súčtu statickej a optickej permitivity, podelená dvomi a imaginárna časť je rovná ich rozdielu, ako je to znázornené na Obr. 4 vľavo. Na Obr. 4 vpravo je vynesenie Debyeho relaxačného procesu do komplexnej roviny, ktorý ako prví vyjadrili bratia K. S. Cole a R. H. Cole v súradnicovom systéme $\epsilon'' = f(\epsilon')$, ktorého výsledkom je polkruh signalizujúci frekvenčné spektrum. Daný graf komplexnej roviny je nazývaný ako Cole-Cole diagram a je jednou z metód polarizačného merania, ktorá presnejšie popisuje správanie sa dielektrika prostredníctvom relaxačných časov (polarizácií) pri pôsobení striedavého elektrického poľa v určitom frekvenčnom rozsahu [8].

B. Distribúcia relaxačných časov modelom Cole-Cole

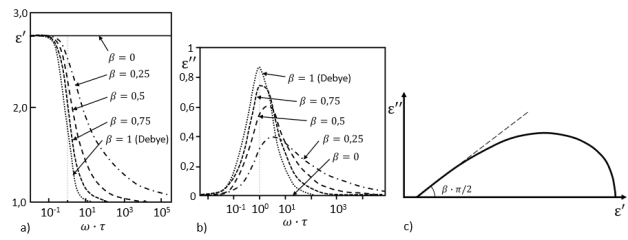
Debyeove rovnice nie sú postačujúce pre polárne dielektriká, ktoré vykazujú viacero relaxačných časov. Pri rozložení relaxačných časov podľa Cole-Cole dochádza k zníženiu špičiek ϵ'' a pri ϵ' k zmene strmosti krivky vo frekvenčnom spektre (Obr. 5a,b). Pri vynesení do komplexnej roviny nadobúda priebeh Cole-Cole posun stred polkružnice pod os ϵ' , oproti Debyeho úvahe, charakterizujúcej stred polkružnice priamo na osi ϵ' (Obr. 5c) [8].



Obr. 5 Frekvenčné závislosti modelu Cole-Cole [8]

C. Distribúcia relaxačných časov modelom Davidson-Cole

Davidson-Cole rozloženie relaxačných časov so sebou nesie určité zmeny v priebehoch, ako uvažovali Cole-Cole [8].

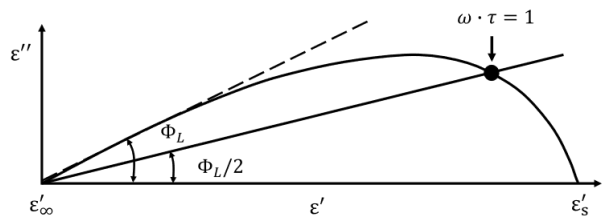


Obr. 6 Frekvenčné závislosti modelu Davidson-Cole [8]

Z Obr. 6 je vidieť, že ϵ' nie je v oblasti nízkych frekvencií závislá na konštante β , avšak pri priblížení k bodu $\omega \cdot \tau = 1$ dochádza k prudkému poklesu krivky, ktorá sa so znižujúcou konštantou β posúva smerom k vyšším frekvenciám až do hodnoty $\beta = 0$, ktorá simuluje pôsobenie jednosmerného elektrického poľa. Čo sa týka ϵ'' , tak jej hodnoty sú v oblasti nízkych frekvencií kvázi nulové až do hodnoty $\omega \cdot \tau = 1$, pri ktorej dochádza k totožnému priebehu ako uvažoval Debye, v tomto prípade ($\beta = 1$), avšak pri postupnom znižovaní konštanty β je bádany pokles špičiek ϵ'' so súčasným vychýlením k vyšším frekvenciám [8].

D. Distribúcia relaxačných časov modelom Havriliak-Negami

Havriliak-Negami rozloženie relaxačných časov predstavuje popis priebehu procesu relaxácie pri zložitých molekulárných štruktúrach. Tieto štruktúry vykazujú dielektrické materiály, ako napr. polyméry, pri ktorých nie je možné výsledky meraní analyzovať tak, ako v prípade materiálov s jednoduchou molekulárnou štruktúrou (úvahy Cole-Cole a Davidson-Cole). Riešením tohto problému je kombinácia úvah rozloženia relaxačných časov Cole-Cole a Davidson-Cole, ktorá predstavuje popis relaxačných procesov podľa Havriliak-Negami [8].



Obr. 7 Diagram relaxácie Havriliak-Negami v komplexnej rovine [8]

Diagram komplexnej permitivity na Obr. 7 umožňuje popisovať komplikovanejšie štruktúry dielektrického materiálu na molekulárnej úrovni pri aplikovaní časovo premenlivého elektrického poľa. Tento diagram nadobúda Cole-Cole rozloženie za predpokladu, že $\beta = 1$ a Davidson-Cole vtedy, ak je $\alpha = 0$. Avšak v prípade, keď $\beta = 1$ a $\alpha = 0$, tak vtedy diagram dosiahne stav Debyeho relaxácie, výsledkom čoho bude priebeh v tvare polkružnice so stredom na ϵ' osi [8].

E. Impedančná spektroskopia

Impedančná spektroskopia (IS) je mimoriadne všestrannou, citlivou a výpovedeschopnou metódou, ktorá je všeobecne používaná na štúdium elektrofyzikálnej kinetiky elektród

a izolačných médií a na stanovenie vodivostných mechanizmov v rôznych materiáloch prostredníctvom voľných a viazaných nosičov elektrického náboja [9].

V oblasti diagnostiky elektroizolačných materiálov je impedančná analýza v zásade založená na relatívne jednoduchom elektrickom meraní, spočívajúcom v sledovaní malého signálu lineárnej elektrickej odozvy (v podobe kinetiky voľných a viazaných nábojov) skúmaného materiálu. Jej hlavná podstata spočíva v schopnosti vyšetrovať relaxačné javy, ktorých časové konštanty sa pohybujú v rozmedzí niekoľkých rádov od minút po mikrosekundy. Na rozdiel od iných analytických metód je IS nedeštruktívna metóda, ktorú je možné použiť na on-line analýzu a diagnostiku v mnohých zložitých časovo a priestorovo rozlíšených procesoch, prebiehajúcich v materiáli. Výsledky experimentálnej impedancie možno korelovať s mnohými prakticky užitočnými chemickými, fyzikálnymi, mechanickými a elektrickými veličinami. Tieto výsledky môžu byť užitočné na posúdenie vhodnosti použitia materiálu v danej aplikácii prostredníctvom vhodných elektrických vlastností a taktiež na definovanie časových a teplotných závislostí procesov prebiehajúcich v materiáli [9].

V. EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA ZMIEN V KVAPALNÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOCH PROSTREDNÍCTVOM IMPEDANČNEJ SPEKTROSKOPIE

Experimentálna analýza zahŕňa najdôležitejšiu činnosť pri výskume, návrhu a diagnostikovaní elektroenergetických systémov, a to meranie na vzorkách elektroizolačných materiálov. Táto kapitola je zameraná na výskum progresívnych, ako aj súčasných vybraných izolačných materiálov kvapalného skupenstva, podliehajúcich zmenám v ich elektrofizikálnej štruktúre. Jedná sa konkrétne o výskum súčasných a nových elektroizolačných olejov, ktoré sú porovnávané s progresívnymi kvapalnými kompozitnými materiálmi, obohatenými o nanočastice rôzneho druhu. Merania na vzorkách kvapalných izolačných materiálov sú rozdelené do troch experimentov v nasledujúcich podkapitolách.

A. Výskum dielektrických vlastností elektroizolačných olejov pre vysokonapäťové elektrické zariadenia v striedavom elektrickom poli

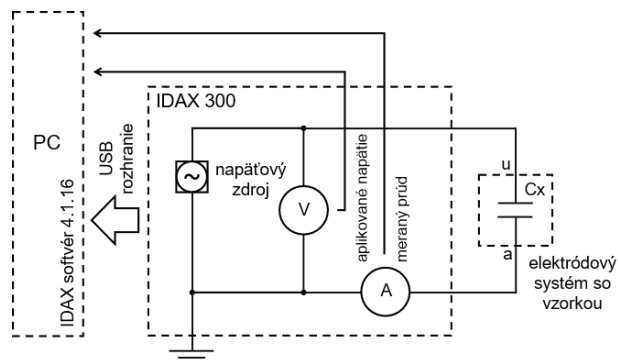
Cieľom tohto experimentu je skúmanie minerálneho oleja Mogul TRAF0 CZ-A (MO), doplneného o porovnanie s uhl'ovodíkovým olejom Shell DIALA S4 ZX-1 (SD). Keďže sú známe len údaje pre nafténový minerálny olej s obsahom síry – Mogul TRAF0 CZ-A, cieľom tohto experimentu je porovnať tieto údaje s unikátnym typom transformátorového oleja, ktorý má minimálny obsah síry (SD). Porovnávací údaje pri rôznych intenzitách striedavého elektrického poľa a frekvenciách testovacieho napätia však nie sú dostupné, preto tomu bude venovaná pozornosť v tomto experimente.

a) Materiály a metódy

Experiment je realizovaný na nových, nestarnutých (nepoškodených) vzorkách elektroizolačných olejoch MO a SD. MO je inhibovaný minerálny olej s inhibítorom oxidácie,

ktorý spĺňa všetky požiadavky kladené na jeho úžitkové vlastnosti. Používa sa ako izolačná a chladiaca kvapalina pre transformátory všetkých napäťových úrovní a iné energetické zariadenia. SD je uhl'ovodíkový olej vyrobený technológiou GTL (gas-to-liquid) s dlhou životnosťou, zanedbateľným obsahom síry a nízkym obsahom aromatických a nenasýtených látok. Čo sa týka predĺženej životnosti, ide o plne inhibovaný olej s dobrými oxidačnými vlastnosťami.

Experimentálne merania boli realizované v laboratórnych podmienkach s teplotou vzduchu 21 °C, vlhkosťou vzduchu 39 % a atmosférickým tlakom vzduchu 1013 hPa. Pre uskutočnenie tohto experimentu bola navrhnutá schéma zapojenia meracieho pracoviska, znázornená na Obr. 8.

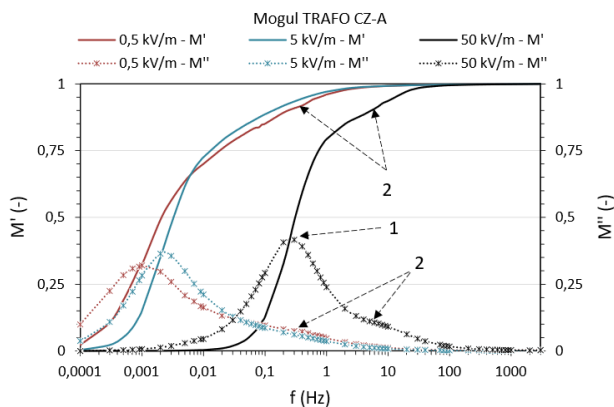


Obr. 8 Schéma zapojenia meracieho obvodu

Schéma na Obr. 22 obsahuje elektródový systém Tettex AG Zürich typ 2903a. Testovanie elektroizolačných olejov bolo realizované pomocou meracieho prístroja IDAX 300, ktorý bol pripojený cez USB (Universal Serial Bus) k počítaču so softvérom IDAX 4.1.16, pomocou ktorého boli zaznamenávané namerané údaje. Na vzorku oleja boli aplikované tri intenzity striedavého elektrického poľa s dekadickou gradáciou 0,5 kV/m, 5 kV/m a 50 kV/m (RMS – Root Mean Square) v poradí podľa veľkosti intenzity poľa vo frekvenčnom rozsahu od 0,1 MHz do 3 kHz.

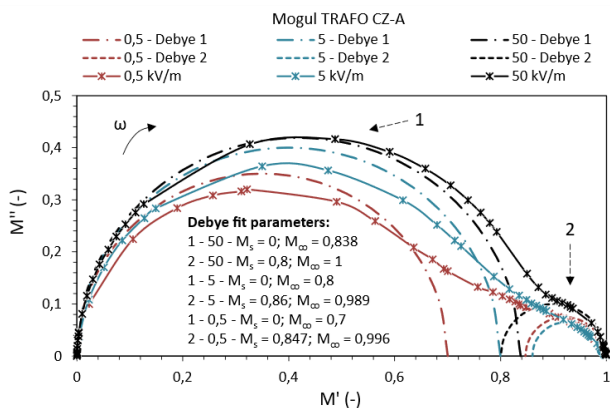
b) Analýza polarizačných procesov

Obr. 9 znázorňuje závislosť reálnej a imaginárnej časti komplexného elektrického modulu oleja MO na frekvencii. Dekadické zvýšenie aplikovanej intenzity striedavého elektrického poľa spôsobuje posunutie kriviek reálnej a imaginárnej časti komplexného elektrického modulu oleja MO do vyšších frekvencií. S týmto posunom sa zvyšujú aj maximálne hodnoty imaginárnej časti M''_{max} . Vzhľadom na ideálny stav dielektrika so vzťahom $M''_{max} = 1/2(M'_{max})$ je zrejme, že zvýšenie intenzity elektrického poľa zlepšuje dielektrické vlastnosti oleja MO približovaním sa M''_{max} k hodnote 0,5. Daný mechanizmus sa pripisuje dielektrickej relaxácii, ktorá je označená číslom 1. Deformácia kriviek M' a rozšírenie priebehov M'' je označené číslom 2, ako druhý relaxačný proces v meranom frekvenčnom spektre.



Obr. 9 Komplexný elektrický modul oleja MO vo frekvenčnom spektre

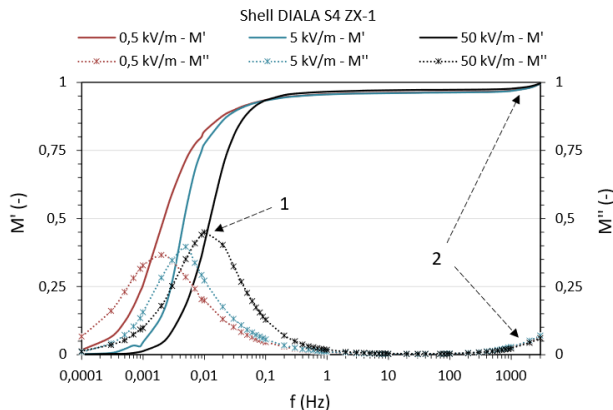
Podľa Cole-Cole diagramu je vynesenie hodnôt reálnej a imaginárnej časti komplexného elektrického modulu v komplexnej rovine znázornené na Obr. 10. Tento diagram potvrdzuje všetky spomenuté deje z Obr. 9. Všetky spojité krivky na Obr. 10 vykazujú charakter priebehu, zloženého z dvoch polarizačných procesov s rôznym časom relaxácie τ_M . Na základe princípu Cole-Cole distribúcie relaxačných časov boli vynesené ideálne krivky Debyeho relaxácie pre obidva polarizačné procesy (bodkočiarkované a čiarkované krivky). Získaním Debyeových charakteristík a ich porovnaním s nameranými údajmi bol vyjadrený parameter α , charakterizujúci mieru rozloženia relaxačných časov. Pre tento parameter bolo potrebné získať uhol $\pi\alpha/2$. Získaním parametra α (Tab. 1) je možné tvrdiť, že so zvyšujúcou sa intenzitou striedavého elektrického poľa dochádza k väčšiemu približovaniu sa Debyeho správaniu u oboch zachytených polarizačných mechanizmov (1 a 2).



Obr. 10 Cole-Cole diagram komplexného elektrického modulu oleja MO

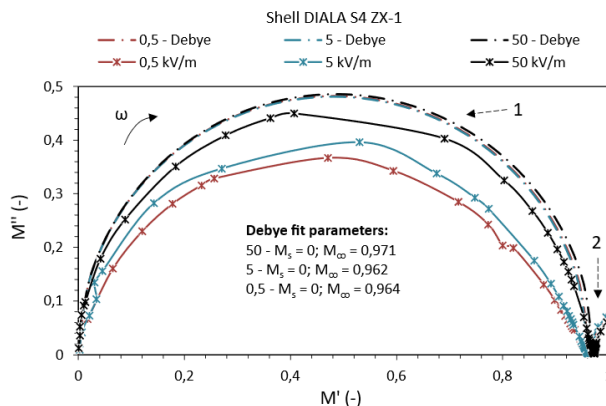
Frekvenčné závislosti reálnej a imaginárnej časti komplexného elektrického modulu oleja SD sú uvedené na Obr. 11. So zvyšovaním intenzity striedavého elektrického poľa dochádza k posunutiu kriviek M' a M'' k vyšším frekvenciám. S uvedenou disperziou kriviek M' dochádza k postupnému zvyšovaniu hodnôt M''_{max} s dekadicky aplikovanou intenzitou elektrického poľa. Tento efekt

poukazuje na zlepšovanie dielektrických vlastností z hľadiska približovania sa k ideálnemu stavu s hodnotou 0,4865 pre daný relaxačný proces. Číslo 1 na Obr. 11 označuje prvý polarizačný proces, ktorého prejavom je pík (pri M'') spoločne s krivkou v tvare S (pri M'). Vo vysokofrekvenčnej oblasti meraného frekvenčného spektra dochádza k postupnému zvyšovaniu hodnôt M' a M'' . Dané zvýšenie hodnôt je pripisované rozvíjajúcemu sa polarizačnému javu, označeného číslom 2.



Obr. 11 Komplexný elektrický modul oleja SD vo frekvenčnom spektre

Potvrdenie prebiehajúcich dejov v oleji SD z Obr. 11 je prezentované vynesением do Cole-Cole diagramu na Obr. 12. V danom zobrazení je možné poukázať na prítomnosť jedného polarizačného procesu so zachytením začiatku rozvíjajúceho sa druhého polarizačného procesu. Parametre Debyeho kriviek sa líšia len minimálne (0,5, 5, 50 kV/m). Získané parametre α , uvedené v Tab. 1, poukazujú na väčšie rozloženie relaxačných časov s dekadickým poklesom aplikovanej intenzity striedavého elektrického poľa. Je to spôsobené čoraz väčším posunutím stredy polkružnice pod reálnu os M' . Pre rozvíjajúci sa druhý polarizačný proces vo frekvenčnom pásme nebolo možné zistiť ideálne charakteristiky Debye, nakoľko ide iba o náznak uvedenej relaxácie.



Obr. 12 Cole-Cole diagram komplexného elektrického modulu oleja SD

Relaxačné časy polarizačných procesov klesajú so zvyšovaním intenzity striedavého elektrického poľa u oboch

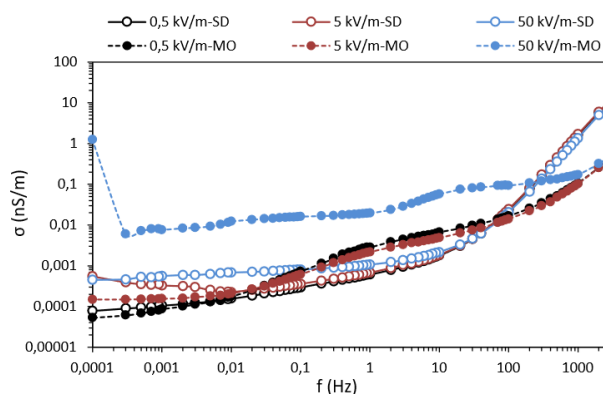
olejov. To znamená, že vyššia intenzita elektrického poľa urýchľuje zmeny natáčania elektrických dipólov za zmenami striedavého elektrického poľa.

TABUĽKA 1 RELAXAČNÉ PARAMETRE SKÚMANÝCH OLEJOV

	0,5 kV/m		5 kV/m		50 kV/m	
	α	M''_{max}	α	M''_{max}	α	M''_{max}
SD	0,146	0,367	0,108	0,396	0,038	0,45
MO1	0,056	0,316	0,054	0,364	0,004	0,417
MO2	0,067	0,067	0,056	0,059	0,033	0,095
	β	τ_M (s)	β	τ_M (s)	β	τ_M (s)
SD	0,854	73,97	0,892	33,91	0,962	13,21
MO1	0,944	105,5	0,946	58,02	0,996	0,517
MO2	0,933	1,656	0,944	1,995	0,967	0,075

c) *Analýza vodivostných procesov*

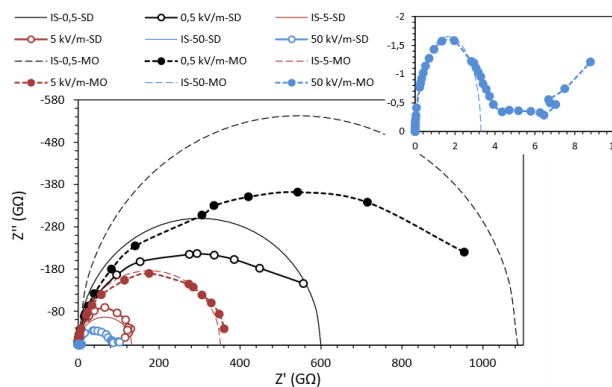
Obr. 13 znázorňuje frekvenčnú závislosť elektrickej vodivosti σ skúmaných olejov pri intenzite striedavého elektrického poľa. Elektrická vodivosť skúmaných olejov sa zvyšuje so zvyšujúcou sa frekvenciou. Uvedené zvýšenie elektrickej vodivosti uhl'ovodíkového oleja SD je strmšie, ako zvýšenie elektrickej vodivosti minerálneho oleja MO, najmä vo vysokofrekvenčnom rozsahu. Vplyv intenzity striedavého elektrického poľa je priamo úmerný zvýšeniu elektrickej vodivosti skúmaných olejov. Táto disperzia je prítomná v celom frekvenčnom spektre pri aplikovanej intenzite elektrického poľa 50 kV/m pre minerálny olej MO. Prostredníctvom frekvenčne závislých charakteristík elektrickej vodivosti olejov pri sieťových frekvenciách 50 Hz a 60 Hz, dielektrická odozva indikuje vyššiu vodivosť minerálneho oleja MO, spôsobenú menšou absorpciou náboja a väčšou distribúciou voľných nábojov v kvapaline. Platí to pre všetky aplikované intenzity striedavého elektrického poľa.



Obr. 13 Frekvenčné spektrá elektrickej vodivosti

Na priblíženie charakteru vodivosti olejov MO a SD sú na Obr. 14 uvedené grafy komplexnej impedancie podľa modelu Cole-Cole. So zvyšovaním intenzity striedavého elektrického poľa klesá impedancia v komplexnej rovine. Nárast impedancie s poklesom intenzity poľa spôsobuje detailné zachytenie nízko-frekvenčného rozsahu charakteristík Cole-Cole. Tieto impedancie v komplexnej rovine zodpovedajú

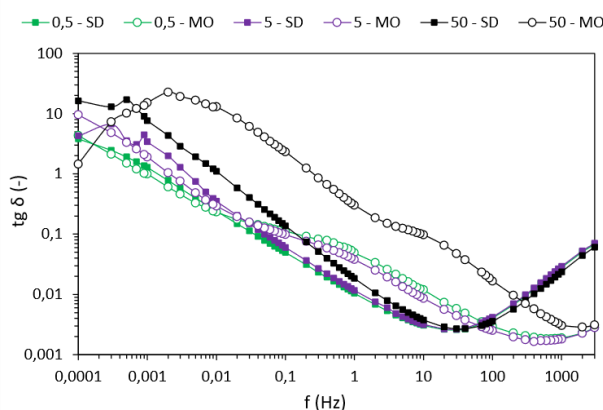
nízko-frekvenčnému spektru na Obr. 13, čo znamená, že so zvyšujúcou sa impedanciou materiálu klesá elektrická vodivosť. Okrem impedančných priebehov Cole-Cole boli vynesené ideálne polkružnice (IS) pre všetky aplikované intenzity elektrického poľa. Vodivosť materiálu je opísaná impedanciou v komplexnej rovine, kde sa uvádza, že ideálny Cole-Cole formalizmus (IS) predstavuje čistou jednosmernú vodivosť. Porovnaním Cole-Cole komplexných impedančných závislostí s vnesenými ideálnymi polkružnicami je zrejmé, že distribúcia voľných nábojov v skúmaných kvapalinách pri striedavom elektrickom poli nie je čisto jednosmerná. Preto je táto disperzia pripisovaná superponovanej vodivosti jednosmerného a striedavého prúdu.



Obr. 14 Cole-Cole diagram komplexnej impedancie

d) *Diskusia*

Obr. 15 znázorňuje závislosť dielektrických strát na frekvencii. Z hľadiska dielektrických strát elektroizolačných olejov pri sieťovej frekvencii (50 Hz resp. 60 Hz), dosahuje lepšie dielektrické vlastnosti uhl'ovodíkový olej SD, teda nižšie dielektrické straty, pretože má nižšie hodnoty stratového činiteľa pri danej frekvencii pri všetkých aplikovaných intenzitách striedavého elektrického poľa.



Obr. 15 Stratový činiteľ olejov vo frekvenčnom pásme

e) *Zhodnotenie experimentu*

V experimente bolo zistené, že v pásme sieťovej frekvencie 50 Hz a 60 Hz má minerálny olej vyššiu elektrickú vodivosť, ako uhľovodíkový olej. Čo sa týka zachytených polarizačných mechanizmov pri uvedených frekvenciách, minerálny olej vykazuje dodatočný polarizačný proces (MO2). Tieto základné dielektrické mechanizmy spôsobujú zvýšenie dielektrických strát minerálneho oleja pri všetkých aplikovaných intenzitách striedavého elektrického poľa, čo má priamy vplyv na prevádzku výkonových transformátorov. Výsledky tohto experimentu boli publikované v časopise *Energies* (2022, Vol. 15, JCR 2020 – Q3) pod odkazom [10].

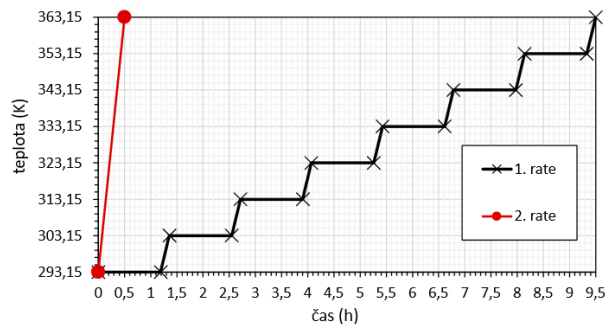
B. Výskum dielektrickej odozvy elektroizolačných kvapalín pri rôznej povahe tepelného poľa

Cieľom tohto experimentu je poskytnutie dielektrickej odozvy skúmaných izolačných kvapalín na báze základových olejov a nanokvapaliny v tepelnom poli. Nakoľko je známe dielektrické správanie izolačných olejov v procese tepelného starnutia a vplyvom vlhkosti, vplyv rýchlosti zvyšovania tepelného namáhania na dielektrické vlastnosti izolačných kvapalín ešte nie je dostatočne preskúmaný. Preto je experiment zameraný aj na zmenu dielektrických parametrov pri rôznej rýchlosti zvyšovania teploty s predpokladom, že zmena dielektrických parametrov môže byť spôsobená zmenou obsahu vlhkosti izolačných kvapalín vplyvom teploty.

a) Materiály a metódy

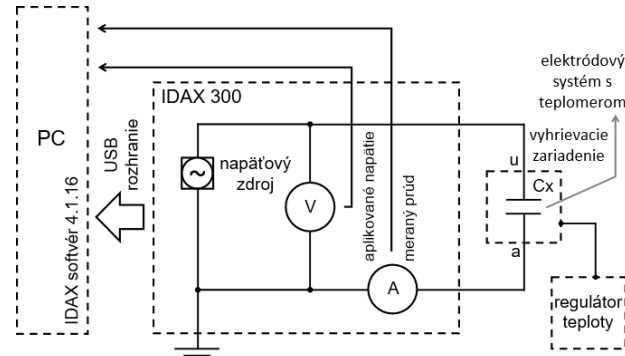
Experimentálnej procedúre boli podrobené základové transformátorové oleje a olej modifikovaný magnetickými nanočasticami Fe_3O_4 . V experimente boli porovnávané dva základové transformátorové oleje MOGUL TRAF0 CZ-A (MO) a Shell Diala S4 ZX-1 (SD). Experiment bol realizovaný aj na magnetickej nanokvapaline, ktorej nosným kvapalným izolačným médiom bol olej SD (MF-SD). Prostredníctvom koprecipitačného procesu boli magnetické nanočastice dispergované a pomocou kyseliny olejovej stabilizované v transformátorovom oleji SD. Bola pripravená vzorka s magnetickými nanočasticami Fe_3O_4 o objemovej koncentrácii $\phi_V = 0,23\%$.

Vplyv rýchlosti zohrievania izolačných kvapalín na dielektrické parametre bol skúmaný pomocou metódy impedančnej spektroskopie. Experiment porovnáva dva teplotné testy s rôznou rýchlosťou zohrievania kvapalín z teploty 293,15 K na teplotu 363,15 K. 1. rate trval 9,5 h, to znamená, že teplota z 293,15 K bola zvyšovaná postupne s krokom 10 K na teplotu 363,15 K za čas 9,5 h. Pri 2. rate bola teplota z 293,15 K na 363,15 K dosiahnutá priamo a to za čas 0,5 h. Merania dielektrických parametrov prostredníctvom impedančnej spektroskopie (porovnanie 1. a 2. rate) boli vykonané iba pri teplote 363,15 K. Na Obr. 16 je uvedená simulácia dvoch rýchlostí zohrievania skúmaných kvapalín.



Obr. 16 Simulácia zohrievania kvapalín pomocou 1. a 2. rate

Pre vyšetrovanie dielektrických vlastností v tepelnom poli bol použitý merací prístroj IDAX 300. To znamená, že impedančná spektroskopie bola realizovaná vo frekvenčnej oblasti v pásme 1 mHz – 3 kHz s aplikovanou intenzitou striedavého elektrického poľa 50 kV/m. Z meracieho prístroja IDAX 300 bola vyvedená vysokonapäťová a nízkonapäťová elektróda na elektródový systém Tettex AG Zürich typu 2903a. Elektródový systém obsahuje aj teplomer, pomocou ktorého bola zisťovaná aktuálna teplota meranej vzorky. Elektródový systém bol uložený do vyhrievacieho zariadenia Tettex AG Zürich typu 2903. Riadenie a regulácia teploty bola zabezpečovaná manuálne prostredníctvom regulátora teploty Tettex AG Zürich typu 2965, ktorý bol prepojený s vyhrievacím zariadením (Obr. 17). Merania dielektrických parametrov boli podrobené laboratórnym podmienkam s tlakom vzduchu 1013 hPa, teplotou vzduchu 293,15 K a vlhkosťou vzduchu 33 %.



Obr. 17 Experimentálny obvod

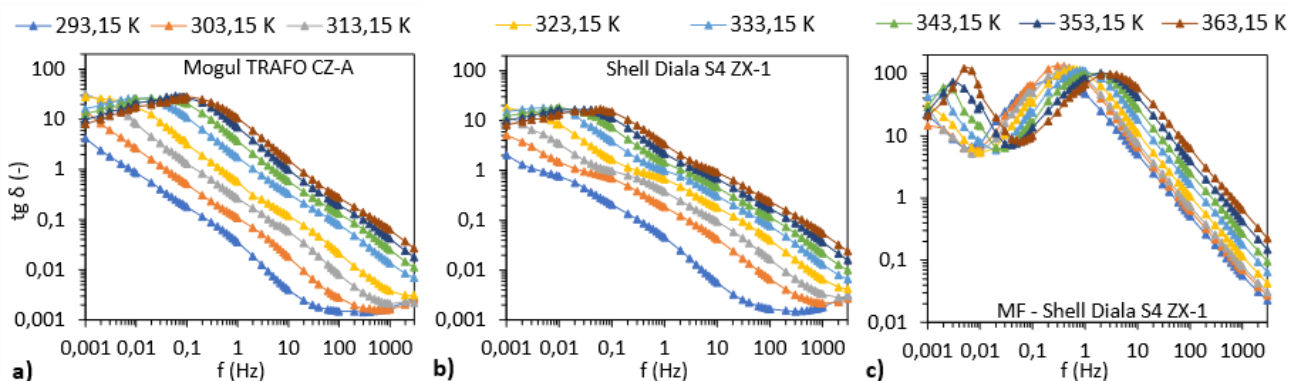
Vplyv rýchlosti zohrievania izolačných kvapalín na ich vlhkosť bol skúmaný pomocou Karl Fischerovej titračnej metódy. Pre meranie vlhkosti skúmaných kvapalín bol použitý merací prístroj Megger KF-LAB Moisture Meter. Pre každú z troch skúmaných kvapalín boli získané tri hodnoty vlhkosti.

b) Analýza dielektrických vlastností skúmaných kvapalín pri tepelnom namáhaní

Na Obr. 18 sú znázornené hodnoty stratového činiteľa $tg \delta$. Prostredníctvom zvyšovania teploty dochádza k posunutiu charakteristík k vyšším frekvenciám u všetkých skúmaných kvapalínach. V pásme stredných frekvencií 1 Hz – 100 Hz to

zapričiňuje zvýšenie dielektrických strát. Zo stratových spektrier je vidieť vplyv dispergácie magnetických nanočastíc do nosného oleja SD, ktoré sú zodpovedné za dve relaxačné maximá. Stratový pík v okolí frekvencie 1 Hz na Obr. 18c je pripisovaný elektrickej dvojrstvovej polarizácii. Druhý stratový pík v okolí frekvencie 1 MHz môže byť spôsobený medzivrstvovou polarizáciou na rozhraní magnetická nanočastica-olej. Pri aplikovaní intenzity elektrického poľa vzniká indukovaný dipólový moment v dôsledku rôznej mobility voľných nábojov, ktoré sa hromadia pri blokujúcich vrstvách rôzneho charakteru a generujú priestorové náboje s podobnými externými prejavmi, ako polarizácie iného typu. Uvedené relaxačné procesy dominujú nad vodivostnými stratami a spôsobujú zvýšenie dielektrických strát v celom frekvenčnom spektre v porovnaní so základovými olejmi MO a SD. Tento efekt zapričiňuje vyššia polarizovateľnosť

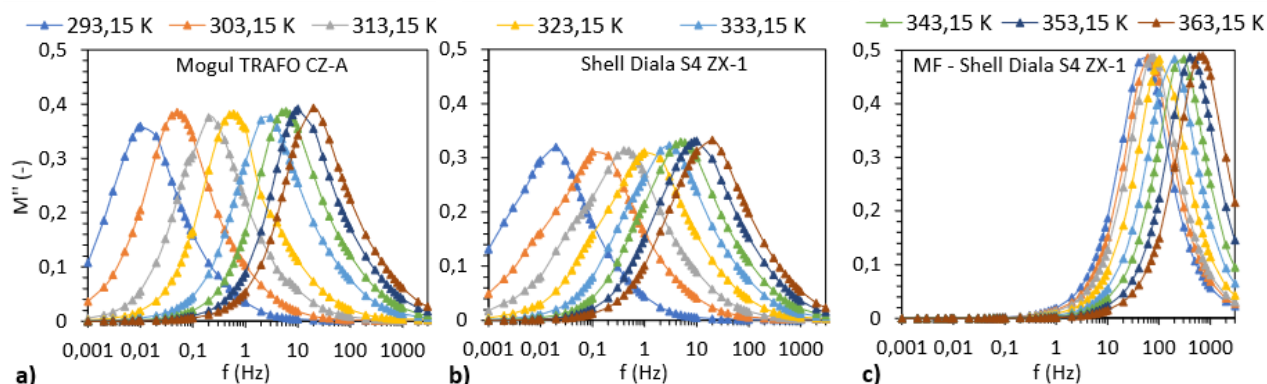
magnetických nanočastíc. Charakteristiky dielektrických strát transformátorových olejov MO a SD poukazujú na zvyšovanie hodnôt so znižovaním frekvencie v tepelnom rozsahu 293,15 K – 323,15 K. Pri týchto teplotách môžu byť dielektrické straty ovplyvnené viac-menej vodivostnými procesmi, ktoré spôsobujú voľné náboje, respektíve ióny, ktoré vznikajú polarizáciou polárnych nečistôt. Pri zvýšení teploty nad 323,15 K je zachytený relaxačný pík v nízkofrekvenčnom pásme, ktorý je postupne posunutý k vyšším frekvenciám. Pretože transformátorový olej je nepolárna izolačná kvapalina, zachytená relaxácia je spôsobená nečistotami v oleji, ktoré majú silne polárne väzby. Porovnaním dielektrických strát minerálneho oleja MO a uhlíkovodíkoveho GTL oleja SD je badať mierne zníženie hodnôt oleja SD vo frekvenčnom spektre, hlavne pri prevádzkových teplotách 333,15 K – 353,15 K, čo je dôležitý aspekt z praktického hľadiska.



Obr. 18 Stratový činiteľ pri tepelnom namáhaní a) MO, b) SD a c) MF-SD

Skúmané frekvenčné spektrum na Obr. 18a,b neumožnilo odhaliť charakter dielektrickej odozvy v nízkofrekvenčnom pásme pri nízkych teplotách v rozsahu 293,15 K – 323,15 K. Je preto potrebné zvoliť iný typ prezentácie údajov. Zameriame sa teda na stratové charakteristiky komplexného elektrického modulu M'' . Vyššie uvedené hodnoty stratového činiteľa $tg \delta$ boli, spolu s hodnotami kapacity C , prepočítané na hodnoty imaginárnej časti komplexného elektrického modulu M'' (Obr. 19). Všetky krivky vyjadrujú tvar zachytených polarizačných procesov s maximami, ktoré sú teplotne závislé. Z Obr. 19a,b je vidieť, že komplexný elektrický modul bližšie poodhalil dielektrickú informáciu pri nižších teplotách.

Poukazuje na relaxačný mechanizmus, ktorý sa vplyvom zvýšenej teploty posúva k vyšším frekvenciám. Porovnaním olejov MO a SD je možné poukázať na fakt, že MO má vyššie hodnoty stratových píkov pri $tg \delta$ a zároveň aj pri M'' . Taktiež vidíme, že olej SD má širšie charakteristiky M'' vo frekvenčnom pásme, ako olej MO pri všetkých aplikovaných teplotách. Tento efekt súvisí s väčším rozložením relaxačných časov. Pridanie magnetických nanočastíc do oleja SD (MF-SD), korešponduje s $tg \delta$ na Obr. 18c, čo sa týka zvýšenia hodnôt relaxačných píkov. Dané charakteristiky sa približujú Debyeovmu dielektrickému správaniu s ideálnou relaxáciou.

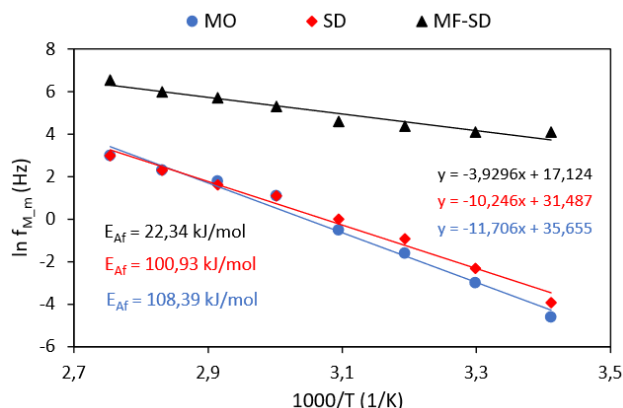


Obr. 19 Imaginárny modul pri tepelnom namáhaní a) MO, b) SD a c) MF-SD

Pre posúdenie správania sa relaxačných maxím M''_{max} v tepelnom poli boli fitované relaxačné frekvencie f_{Mm} na konštantnú teplotu, ktoré sú znázornené na Obr. 20. Hodnoty aktivačnej energie E_{Af} relaxačných maxím M''_{max} boli získané z relaxačných frekvencií prostredníctvom vzťahu:

$$\alpha_T = \frac{f_{pt}}{f_{pr}} = e^{\frac{E_{Af}}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_t} \right)} \quad (3)$$

kde α_T je faktor posunu relaxácie, f_{pt} a f_{pr} sú relaxačné frekvencie pri testovacej teplote T_t (293,15 K – 363,15 K) a referenčnej teplote T_r (293,15 K), E_{Af} je aktivačná energia a R je univerzálna plynová konštanta rovná 8,314 J/mol·K. Z Obr. 20 je vidieť, že logaritmus relaxačnej frekvencie lineárne klesá so znižujúcou sa teplotou u všetkých skúmaných kvapalín podľa Arrheniovoho zákona. Vyjadrením hodnôt aktivačných energií pre jednotlivé kvapaliny je poukázané na vyššiu hodnotu aktivačnej energie oleja MO, v porovnaní s olejom SD. Zachytenie väčšieho počtu relaxačných procesov v oleji SD s určitým príspevkom dielektrických strát, môže spôsobiť nižšiu hodnotu aktivačnej energie.

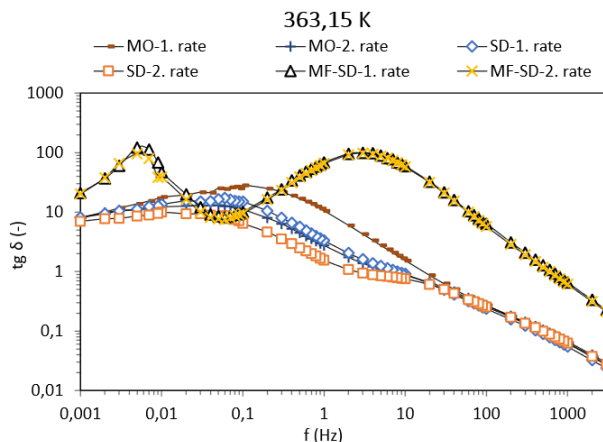


Obr. 20 Arrheniova závislosť relaxačnej frekvencie pri tepelnom namáhaní

c) Analýza vplyvu rýchlosti zohrievania na dielektrické parametre a obsah vlhkosti

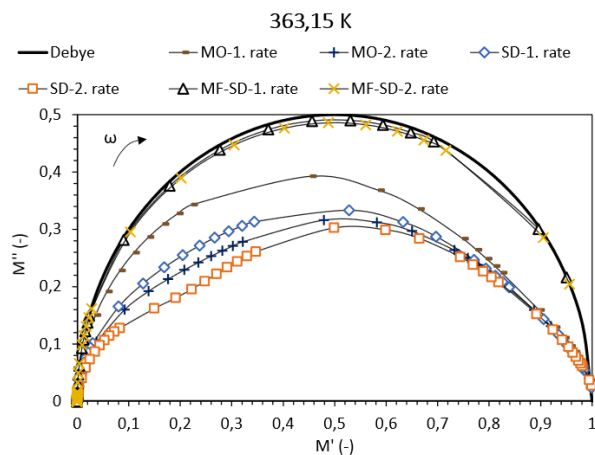
Obr. 21 popisuje zmenu $tg \delta$. Zmena dielektrických strát pri oleji MO nastala vo frekvenčnom pásme 3 mHz – 50 Hz. Pri oleji SD vo frekvenčnom pásme 1 mHz – 20 Hz. Z toho vyplýva, že pri transformátorových olejoch sa mení veľkosť dielektrických strát výlučne v nízkofrekvenčnom pásme. V tomto spektre sú dielektrické straty ovplyvnené polarizačnými procesmi, ktoré sa prejavujú relaxačnými vrcholmi. To znamená, že rýchlosť zohrievania transformátorových základových olejov vplyva iba na polarizačné straty $tg \delta_p$. Pomalšie zvyšovanie teploty (1. rate) spôsobuje zvýšenie polarizačných strát transformátorových olejov MO a SD. Dielektrické straty magnetickej nanokvapaliny MF-SD sa pri zmene rýchlosti zvyšovania teploty takmer nemenia. Z uvedeného vyplýva, že vzorka nosnej izolačnej kvapaliny s aplikáciou magnetickej

nanočastíc, je odolnejšia voči zmene rýchlosti zohrievania na teplotu 363,15 K.



Obr. 21 Vplyv zmeny rýchlosti zohrievania kvapalín na stratový činiteľ

Rýchlejšie zohrievanie základových olejov na teplotu 363,15 K spôsobuje zníženie veľkosti relaxačného píku. Z teoretických poznatkov je zrejmé, že ide o väčšie rozloženie relaxačných časov vo frekvenčnom spektre. Na Obr. 22 je Cole-Cole zobrazenie potvrdzujúce väčšie rozloženie relaxačných časov. Transformátorové oleje MO a SD sú závislé na rýchlosti zmeny teploty. Dôkazom je výraznejšia zmena charakteristík v komplexnej rovine. Rýchlejším zohrievaním základových kvapalín (2. rate) dochádza k väčšiemu posunutiu stredu polkružnice pod reálnu os M' . Nízkofrekvenčná disperzia Cole-Cole charakteristík korešponduje s charakteristikami na Obr. 21. Rozdiely sa prejavili v nízkofrekvenčnom pásme a vo vysokofrekvenčnom pásme boli zaznamenané približne rovnaké charakteristiky. Magnetickej nanokvapaliny MF-SD vykazuje relaxačnú odozvu blízku Debyeho správaniu pri oboch rýchlostiach zohrievania s minimálnym rozdielom.

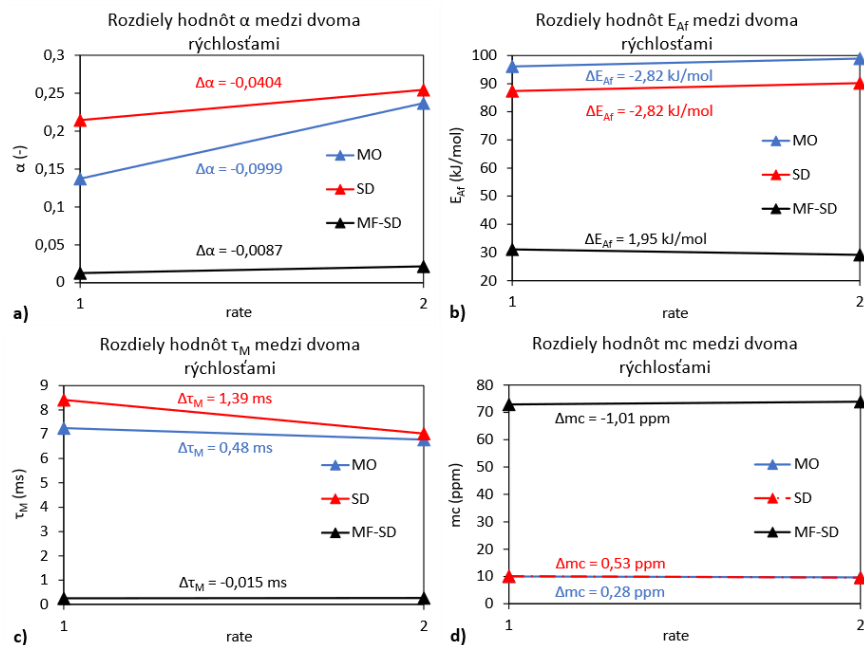


Obr. 22 Cole-Cole diagram pri rôznej rýchlosti zohrievania kvapalín

Prostredníctvom funkcie Cole-Cole bol vyjadrený parameter rozloženia relaxačných časov α , pričom platí, že ak

je $\alpha = 0$, ide o Debyeovu relaxáciu. Na Obr. 23a uvádzame hodnoty rozloženia relaxačných časov α a rozdiely pri zmene rýchlosti zohrievania izolačných kvapalín. Je zrejmé, že olej SD vykazuje v skúmanom frekvenčnom spektre najväčšie rozloženie relaxačných časov, bez ohľadu na zmenu rýchlosti zvyšovania teploty. Zvýšením rýchlosti zohrievania skúmaných kvapalín dochádza k väčšiemu rozloženiu relaxačných časov. Pri magnetickej nanokvapaline MF-SD ide o minimálnu zmenu na úrovni hodnoty $\alpha = -0,0087$. Zmena rýchlosti zvyšovania teploty najviac vplýva na minerálny olej MO (-0,0999). Na Obr. 23b sú prezentované zmeny aktivačnej energie. Minerálny olej MO má najvyššie hodnoty aktivačnej energie. Zvýšením rýchlosti zohrievania transformátorových olejov (MO a SD) dochádza k zníženiu relaxačných časov. Pri magnetickej nanokvapaline MF-SD relaxačný čas mierne stúpol, čo znamená, že po kratšom tepelnom namáhaní (2. rate) vykazuje nanokvapalina dlhší čas relaxácie. Rôzna rýchlosť zvyšovania teploty na 363,15 K spôsobila vyššie popisované zmeny dielektrických parametrov. Je však nutné uvažovať s predpokladom, že zmena

vlhkosti izolačných kvapalín pri rôznej rýchlosti tepelného namáhania by mohla prispievať k zmene dielektrických parametrov. Vzhľadom na to boli vykonané merania vlhkosti izolačných kvapalín. Z nameraných hodnôt mc vyplýva, že tepelné namáhanie minerálneho oleja MO znižuje vlhkosť v oleji približne o 6 ppm. Podobné zníženie vlhkosti bolo zaznamenané pri MF-SD, avšak s desaťnásobne väčším rozdielom (≈ 60 ppm). Pri základovom GTL oleji SD sa obsah vlhkosti výraznejšie nemenil, čo znamená, že tepelné namáhanie neznižuje vlhkosť v tomto oleji. Hodnota vlhkosti oleja SD je porovnateľná s hodnotami vlhkosti minerálneho oleja MO po tepelnom namáhaní. Na Obr. 23d sú uvedené zmeny obsahu vlhkosti pri rôznej rýchlosti tepelného namáhania. Z vyššie uvedených hodnôt a z grafu je vidieť, že zmena rýchlosti tepelného namáhania izolačných kvapalín je minimálna, s maximálnym rozdielom 1,01 ppm. Berúc do úvahy presnosť meracieho prístroja Megger KF-LAB Moisture Meter ($10 - 100 \mu\text{g} \pm 3 \mu\text{g}$), ide o rozdiely, ktoré sú pod hodnotou presnosti meracieho prístroja. Dané rozdiely teda môžu byť ovplyvnené presnosťou meracieho zariadenia. Vo všeobecnosti to znamená, že zmena rýchlosti zohrievania skúmaných kvapalín nevlplyva na ich vlhkosť. Na základe toho môžeme tvrdiť, že zmeny dielektrických parametrov nie sú spôsobené zmenou vlhkosti, ale dobou tepelného namáhania, respektíve tepelným starnutím izolačných kvapalín.



Obr. 23 Vplyv rôznej rýchlosti tepelného namáhania na a) α b) E_{Af} c) τ_M a d) mc

d) Zhodnotenie experimentu

Pri prevádzkových teplotách 333,15 K – 353,15 K má minerálny olej MO vyššie dielektrické straty vo frekvenčnom spektre, ako uhľovodíkový GTL olej SD. Z charakteristík imaginárnej časti komplexného elektrického modulu bolo

zistené, že MF-SD sa približuje Debyeovmu dielektrickému správaniu. Logaritmus relaxačnej frekvencie lineárne klesá so znižujúcou sa teplotou u všetkých skúmaných kvapalínach podľa Arrheniovhovho zákona. Vyjadrením hodnôt aktivačných energií pre jednotlivé kvapaliny bolo poukazané na vyššiu hodnotu aktivačnej energie oleja MO, v porovnaní s olejom

SD. Vo všeobecnosti bolo zistené, že zmena rýchlosti zohrievania skúmaných kvapalín nevlplyva na ich vlhkosť. Na základe toho je možné tvrdiť, že zmeny dielektrických parametrov nie sú spôsobené zmenou vlhkosti izolačných kvapalín, ale tepelným starnutím.

C. Výskum dielektrickej odozvy hybridnej nanokvapaliny obsahujúcej nanočastice fullerénu C_{60} a oxidu železitého Fe_3O_4

V tomto experimente boli rozptýlené dva typy nanočastíc (Fe_3O_4 a C_{60}) v transformátorovom oleji a podrobené štúdiu širokopásmovej dielektrickej odozvy. Experimenty V.A. a V.B. v tomto článku poukazujú na to, že uhl'ovodíkový GTL olej má lepšie dielektrické vlastnosti, ako minerálny olej. Toto zistenie predstavovalo motiváciu pripraviť fullerénovo-magnetitovú nanokvapalinu na uhl'ovodíkovom základnom oleji na báze GTL.

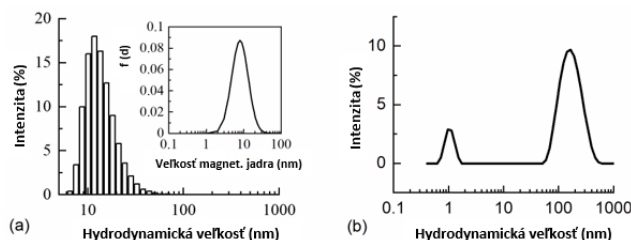
a) Materiály a metódy

Nanokvapaliny zahrnuté v tomto experimente sú založené na oleji GTL (SD) ktorý sa vyznačuje nízkou viskozitou ($16 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ pri 20°C) a nízkou hustotou (786 kg/m^3 pri 23°C). Niekoľko výskumných prác uvádza, že jeho dielektrický výkon je vhodný na priame použitie v elektroenergetických zariadeniach. Disperzná fáza skúmaných nanokvapalín pozostávala zo superparamagnetického oxidu železa Fe_3O_4 (približne 10 nm v priemere) a nanočastíc fullerénu C_{60} . Nanočastice oxidu železa boli v prvom kroku syntetizované osvedčenou chemickou metódou koprecipitácie. Potom boli nanočastice stéricky stabilizované jednou vrstvou kyseliny olejovej a dispergované v nosnom oleji. Použitý fullerén, teda sférická molekula uhlíka, bol typu C_{60} (tzv. Buckminsterfulleren), kde každý atóm uhlíka má tri väzby a tvorí klieťkovú štruktúru. Práškový fullerén C_{60} s $99,5\%$ čistotou a hustotou 1600 kg/m^3 sa použil na prípravu nanokvapaliny tak, ako bol zakúpený. Častice prášku boli homogénne dispergované v oleji GTL bez povrchovo aktívnej látky alebo akejkoľvek látky modifikujúcej povrch. Pripravili sa tri vzorky s koncentraciami od $0,01$ do $0,03 \text{ \%m/V}$ (pomernosti nanočastíc k objemu kvapaliny). Nakoniec sa do každej vzorky nanokvapaliny na báze fullerénu pridal malý objem základnej magnetickej nanokvapaliny obsahujúcej $2,3 \text{ \%m/V}$ stabilizovaných nanočastíc oxidu železa. Výsledná koncentrácia nanočastíc oxidu železa vo vzorkách hybridných nanokvapalín je $0,01 \text{ \%m/V}$. Miešanie prebiehalo pri teplote 60°C . Vzorky boli poskytnuté ústavom experimentálnej fyziky SAV v Košiciach. Prehľad skúmaných vzoriek je uvedený v Tab. 2.

TABUĽKA 2 PREHLAD MERANÝCH VZORIEK NANOKVAPALÍN

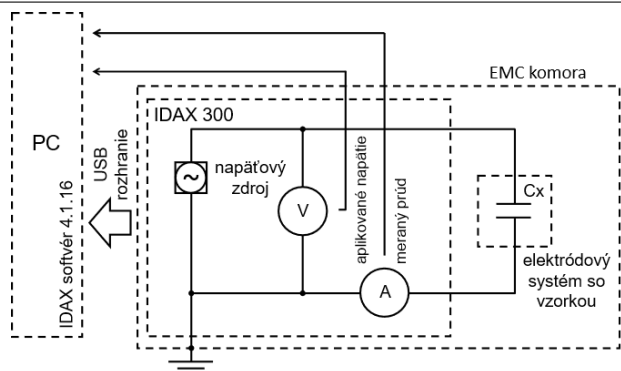
Vzorka	Koncentrácia C_{60} (%m/V)	Koncentrácia Fe_3O_4 (%m/V)
1.	0,01	0,01
2.	0,02	0,01
3.	0,03	0,01
4.	0,01	0
5.	0	0,01
6.	Shell Diala S4 ZX-1, $\rho = 786 \text{ kg/m}^3$	

Distribúcia veľkosti častíc bola meraná na ústave experimentálnej fyziky SAV v Košiciach metódou dynamického rozptylu svetla (DLS) (Malvern Instruments Ltd., Malvern, UK). Na Obr. 24a je znázornená získaná hydrodynamická distribúcia veľkosti nanočastíc oxidu železitého, dispergovaných v oleji GTL. Stredný hydrodynamický priemer je $13,3 \text{ nm}$. Okrem toho bol stanovený priemer magnetického jadra z magnetizačných meraní (Cryogenic Limited, UK). Vložka na Obr. 24a ukazuje získanú distribúciu veľkosti (prezentovanú ako funkcia hustoty pravdepodobnosti) so strednou hodnotou priemeru jadra $9,5 \text{ nm}$. Je zrejmé, že rozdiel takmer 4 nm sa pripisuje vrstve povrchovo aktívnej látky a mŕtvej vrstve magnetických nanočastíc. Distribúcia veľkosti častíc fullerénu je znázornená na Obr. 24b s dvomi odlišnými maximami. Pri strednej hodnote $1,1 \text{ nm}$ sa prvá nachádza pre jednotlivé nanočastice C_{60} . Okrem jednotlivých nanočastíc C_{60} obsahuje suspenzia pozoruhodné množstvo fullerénových zhlukov s priemernou veľkosťou okolo 180 nm , ako je znázornené na druhom maxime. Je známe, že fullerénové roztoky ľahko podliehajú oxidácii a zhlukovaniu, keď sú vystavené svetlu. Predpokladá sa teda, že prítomnosť detegováných zhlukov je indukovaná svetlom, keďže je dokázané, že zhlukovanie môže byť vyvolané aj expozíciou laboratórnemu svetlu počas manipulácie so vzorkou.



Obr. 24 a) Distribúcia veľkosti magnetických nanočastíc získaná z dynamického rozptylu svetla (DLS). Vložka zobrazuje distribúciu veľkosti magnetického jadra z magnetických meraní. b) Distribúcia veľkosti častíc fullerénu pomocou DLS

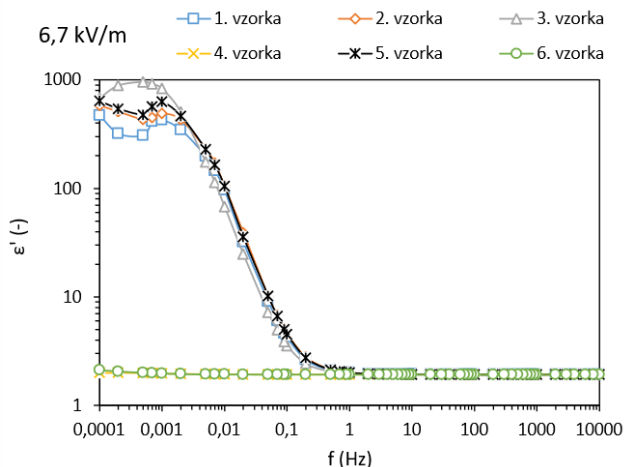
Dielektrické merania vzoriek hybridných nanokvapalín boli uskutočnené metódou impedančnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti. Experimentálne merania boli vykonávané v laboratórnych podmienkach (teplota vzduchu 21°C , tlak vzduchu 1013 hPa a vlhkosť vzduchu 36%) pri aplikovanom striedavom napätí 2 V (RMS) vo frekvenčnom pásme od $0,1 \text{ mHz}$ do 10 kHz . Aplikované napätie, zodpovedajúce intenzite striedavého elektrického poľa $6,7 \text{ kV/m}$, je generované meracím prístrojom IDAX 300, ktorý bol cez USB zbernicu pripojený k počítaču so softvérom IDAX 4.1.16. Ako elektródový systém bol použitý Keysight 16452A Liquid Test Fixture. Schéma zapojenia meracieho obvodu je na Obr. 25.



Obr. 25 Schéma zapojenia meracieho obvodu

b) Analýza nameraných výsledkov a diskusia

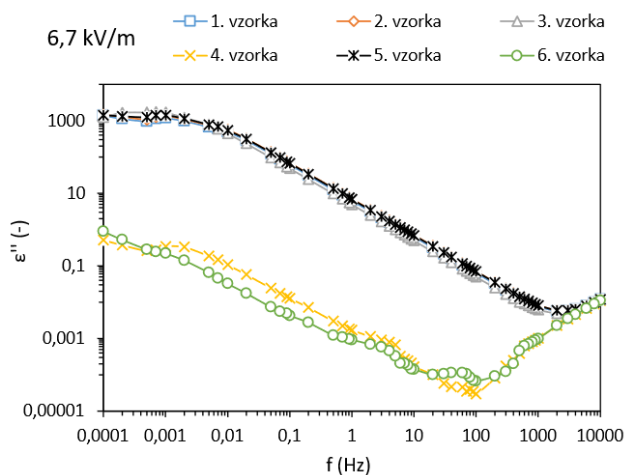
Obr. 26 znázorňuje grafickú závislosť ϵ' vzoriek hybridných nanokvapalín od frekvencie elektrického poľa f . Z grafických závislostí je možné vidieť výraznú dielektrickú disperziu vo frekvenčnom pásme 1 mHz – 1 Hz pre vzorky s magnetickými nanočasticami (1., 2., 3. a 5. vzorka). Táto disperzia chýba vo vzorkách 4 a 6 v získaných dielektrických spektrách. V nízkofrekvenčnom pásme od 0,1 mHz do 2 mHz, na úrovni statickej permitivity, vzorky obsahujúce magnetické nanočastice nevykazujú jednoznačný rozptyl hodnôt ϵ' so zvyšujúcou sa koncentráciou fullerénov v magnetickej nanokvapaline. Dielektrická disperzia spojená s relaxačným procesom vo vzorkách 1, 2, 3 a 5 sa zastaví pri frekvencii 1 Hz. Nad touto frekvenciou vykazuje reálna permitivita konštantné správanie so stabilnou hodnotou 1,92. Táto hodnota sa zhoduje s permitivitou nameranou pre transformátorový olej (vzorka 6) a nanokvapalinu, obsahujúcu iba nanočastice C_{60} (vzorka 4) v celom frekvenčnom rozsahu.



Obr. 26 Reálna časť komplexnej permitivity vo frekvenčnom pásme

Obr. 27 znázorňuje frekvenčne závislú imaginárnu časť komplexnej permitivity ϵ'' , charakterizujúcu dielektrické straty. Vyššie hodnoty ϵ'' sú zistené u vzoriek s magnetickými nanočasticami takmer v celom frekvenčnom rozsahu v porovnaní so vzorkami 4 a 6. Vyššie hodnoty reálnej aj

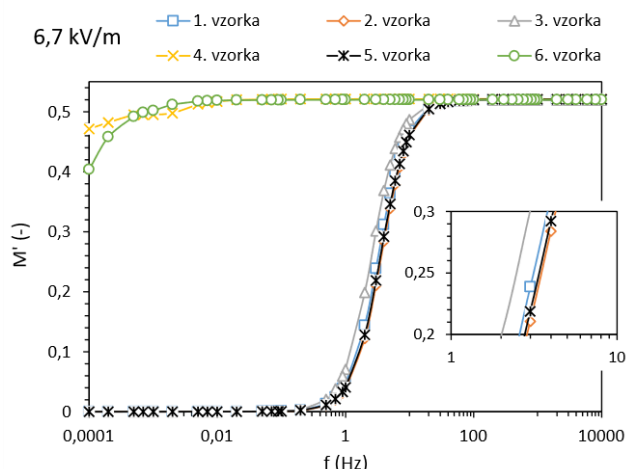
imaginárnej permitivity vzoriek nanokvapalín s magnetickými nanočasticami sú spôsobené vyššou polarizovateľnosťou magnetických nanočastíc. Okrem toho prítomnosť magnetických nanočastíc vedie k vyššej elektrickej vodivosti a prispieva k imaginárnej permitivite nanokvapalín. Vzorky obohatené magnetickými nanočasticami teda vykazujú polarizačný proces a príspevok vodivosti v nízkofrekvenčnom pásme, ako je prezentované v reálnych a imaginárnych spektrách permitivity. Dôkazom procesu relaxácie je maximum v imaginárnej permitivite, okolo 1 mHz. Pozorovaný proces polarizácie možno pripísať medzivrstvovej polarizácii, prebiehajúcej na magnetickom rozhraní nanočastice-olej. Navyše, medzivrstvová polarizácia magnetických nanočastíc je posilnená dodatočnou polarizáciou elektrických dvojitých vrstiev. Na druhej strane, pri vzorkách 4 a 6, je pozorovaný monotónny nárast imaginárnej permitivity s klesajúcou frekvenciou. Prezentovaný sklon možno pripísať elektrickej vodivosti a príspevku polarizácie elektród. Je zaujímavé, že okolo sieťových frekvencií (50 Hz a 60 Hz) vzorka 4 (pozostávajúca z oleja a 0,01 %m/V fullerénu) vykazuje nižšiu imaginárnu permitivitu, ako vzorka 6 (transformátorový olej) o približne 40 %. Toto zistenie je zaujímavé najmä z hľadiska praktickej aplikácie.



Obr. 27 Imaginárna časť komplexnej permitivity vo frekvenčnom pásme

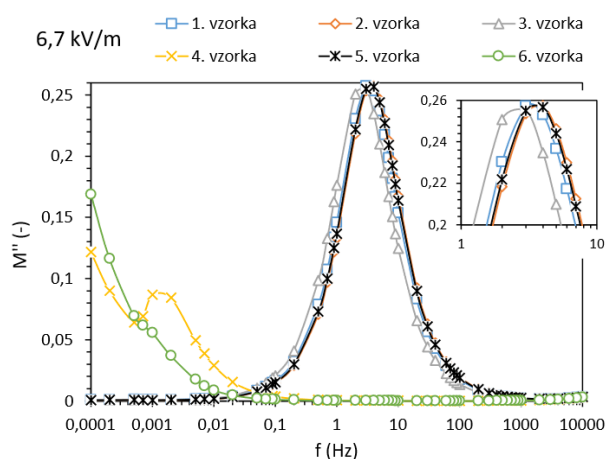
Podľa [11] má komplexná analýza elektrického modulu M^* lepšiu separáciu medzi relaxačnými procesmi a stratami vodivosti, ako ϵ^* . Poloha stratového píku pri M^* je posunutá k vyšším frekvenciám v dôsledku zmeny zvýšenia nízkofrekvenčnej vodivosti ϵ'' na ohmický relaxačný vrchol. V nízkofrekvenčnom rozsahu je ϵ^* ovplyvnená účinkom polarizácie elektród a vodivosti. Vplyv týchto faktorov eliminuje M^* s dôrazom na detaily relaxačných informácií. Preto boli namerané údaje ϵ' a ϵ'' prepočítané na hodnoty M' a M'' . M' na Obr. 28 vyjadruje vyššie popísaný posun relaxačného procesu v nanokvapalinách s magnetickými nanočasticami k stredným frekvenciám okolo 3 Hz, v porovnaní s ϵ' (0,02 Hz). Modulové spektrá vzoriek s magnetickými nanočasticami s rôznymi koncentraciami fullerénov sa v tomto frekvenčnom rozsahu líšili len minimálne. Najvýraznejší rozdiel je zistený pri 3. vzorke s koncentráciou C_{60} 0,03 %m/V. Efektivita premeny ϵ^* na M^*

sa prejavila v získaní rozvíjajúceho sa relaxačného javu 4. a 6. vzorky v nízkofrekvenčnom pásme.



Obr. 28 Reálna časť komplexného modulu vo frekvenčnom pásme

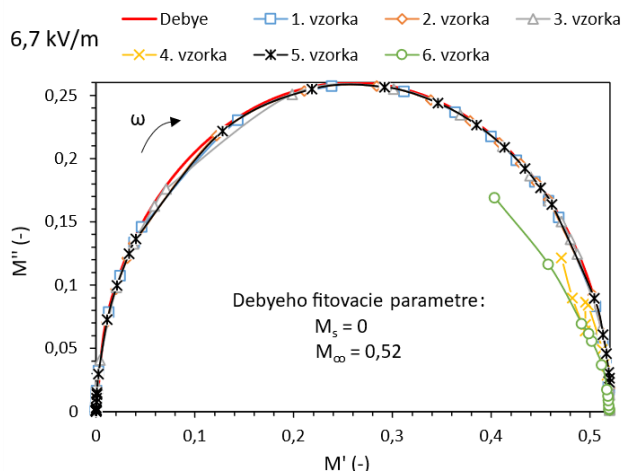
M'' na Obr. 29 zodpovedá M' , čo sa týka relaxačných mechanizmov. Vzorky magnetických nanokvapalín vykazujú krivky mierne odlišné od Debyeho relaxácie. Posun relaxačných profilov 4. a 6. vzorky priniesol určité rozloženie relaxačných časov, ktoré spresňuje priebeh pri frekvencii 1 mHz (4. vzorka). Je teda vidieť, že koncentrácia magnetických nanočastíc 0,01 %m/V transformuje relaxačný pik do ideálneho tvaru s minimálnou distribúciou relaxačných časov (interakcia 1. a 4. vzorky). 6. vzorka (GTL olej) má len minimálnu distribúciu relaxačných časov v porovnaní so vzorkou s koncentráciou fullerénu 0,01 %m/V (4. vzorka). V prípade nepolárneho základného oleja (6. vzorka) sa nízkofrekvenčný nárast imaginárneho modulu pripisuje polarizácii malého počtu polárnych zložiek, ako je vlhkosť a iné nečistoty.



Obr. 29 Imaginárna časť komplexného modulu vo frekvenčnom pásme

Ku komplexnej rovine Cole-Cole na Obr. 30 bola pripojená aj Debyeho charakteristika. V grafe bola použitá funkcia

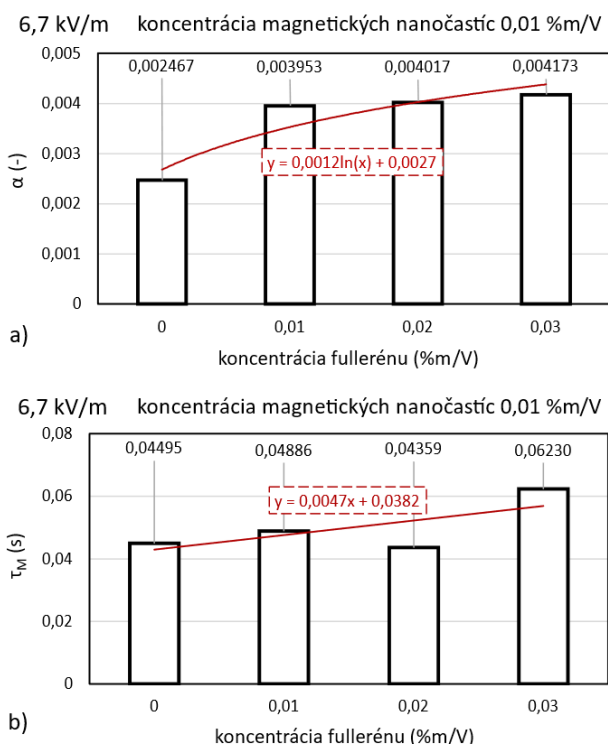
Debye s uvažovaním $\beta = 1$. Pri porovnaní profilov Cole-Cole získaných pre vzorky s magnetickými nanočasticami s Debyeho fitovacou funkciou je zrejmé, že sa zhodujú s charakteristikami Debye relaxácie s minimálnou disperziou. Fullerénové nanočastice tento relaxačný jav neovplyvňujú. Dôkazom je krivka 4. a 5. vzorky. Väčšia distribúcia relaxačných časov pri 4. a 6. vzorky bola potvrdená aj vynesím do komplexnej roviny.



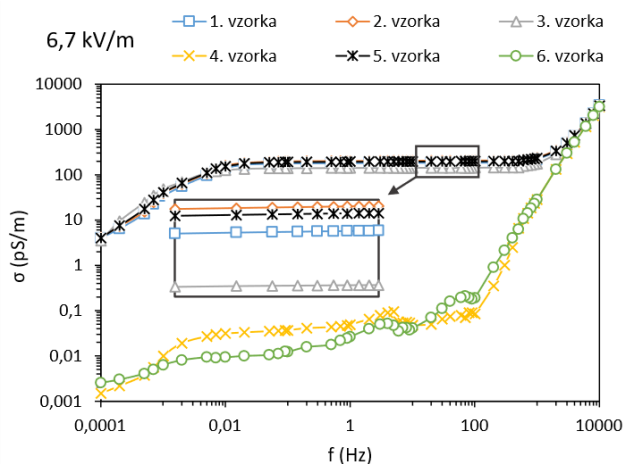
Obr. 30 Cole-Cole diagram komplexného modulu

Minimálna odchýlka od Debyeovej relaxácie je potvrdená prezentovaním parametra α na Obr. 31a. Pri lineárne rastúcej koncentrácii fullerénov (pri konštantnej koncentrácii magnetických nanočastíc 0,01 %m/V) je badateľný nárast parametra α , ktorý má logaritmický charakter. So zvyšujúcou sa koncentráciou fullerénu sa dielektrická relaxácia naťahuje a odchyľuje od ideálnej Debyeho relaxácie, charakterizovanej parametrom $\alpha = 0$. Okrem toho je naťahovanie relaxačného maxima sprevádzané rastúcim trendom relaxačného času τ_M , ako je znázornené na Obr. 31b. Zvyšovanie koncentrácie fullerénov v magnetickej nanokvapaline s konštantnou koncentráciou magnetických nanočastíc dáva vyššiu pravdepodobnosť kolízií interakcie fullerén – magnetické nanočastice. Zrážky potom môžu viesť k elektrostatickým interakciám a ovplyvniť medzivrstvové dielektrické relaxácie.

Pre komplexný popis dielektrických vlastností vzoriek magnetických nanokvapalín je potrebné brať do úvahy okrem relaxačných mechanizmov aj vodivostné procesy. Na Obr. 32 uvádzame elektrickú vodivosť vzoriek nanokvapalín v skúmanom frekvenčnom spektre. Grafické závislosti potvrdzujú popísané javy z Obr. 27. Elektrická vodivosť vzoriek s magnetickými nanočasticami je vyššia v celom frekvenčnom spektre, ako u vzoriek bez týchto nanočastíc. Pri porovnaní elektrickej vodivosti 4. a 5. vzorky so vzorkami zloženými z fullerénových a magnetických nanočastíc (1., 2., 3. a 5. vzorka) je najnižšia elektrická vodivosť vo frekvenčnom pásme 2 mHz – 3 kHz zistená pre 3. vzorku s najvyššou koncentráciou fullerénov 0,03 %m/V. Podobne, ako na Obr. 27, spôsobuje koncentrácia fullerénu 0,01 %m/V (4. vzorka) nižšiu elektrickú vodivosť pri sieťových frekvenciách 50 Hz a 60 Hz, ako čistá základová kvapalina (6. vzorka).



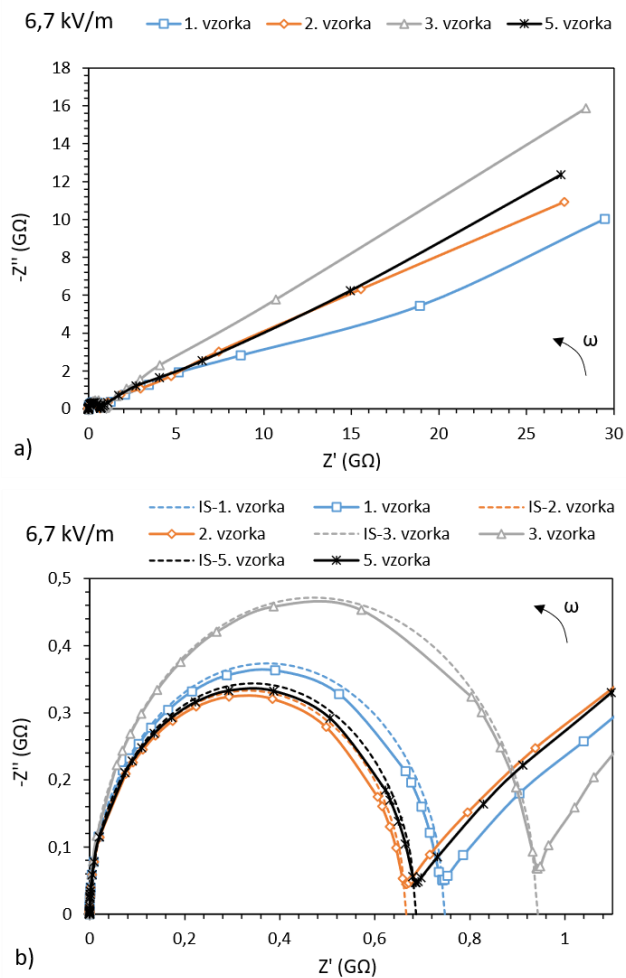
Obr. 31 Závislosť parametrov α a τ_M na koncentrácii fullerénov



Obr. 32 Elektrická vodivosť v závislosti od frekvencie

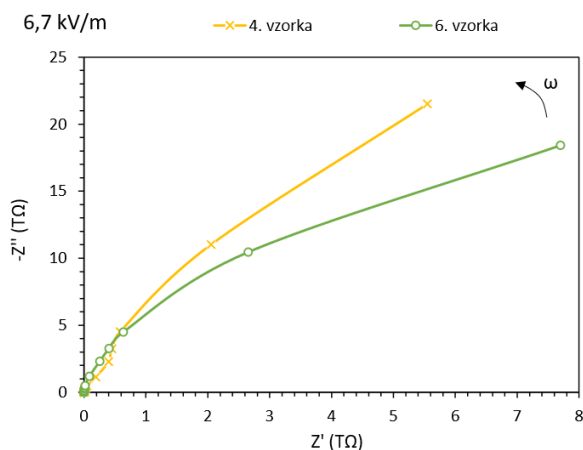
Pre rozšírenie analýzy širokopásmovej dielektrickej odozvy hybridných nanokvapalín je doplnená analýza komplexnej impedancie Z^* . Na Obr. 33 a Obr. 34 sú uvedené komplexné impedančné diagramy Cole-Cole Z^* . Obr. 33 znázorňuje správanie vzoriek s fullerénovými a magnetickými nanočasticami v dvoch pohľadoch a) a b). Na Obr. 33a je znázornený Cole-Cole diagram v celom rozsahu impedancií, kde je možné vidieť takzvané „chvosty“ v nízkofrekvenčnom rozsahu, ktoré zodpovedajú vyššej vodivosti magnetických nanočastíc (v porovnaní so 4. a 6. vzorkou). V stredných

a vyšších frekvenčných pásmach sa zložky Z' a Z'' komplexnej impedancie Z^* približujú k polkruhom, ktoré sú podrobne znázornené na Obr. 33b. V štúdií [12] sa uvádza, že namerané údaje vo forme polkruhov charakterizujú užší vzťah k čisto jednosmernej vodivosti materiálu. Priložením Debyeho ideálnych polkruhov (IS) na namerané hodnoty Z' a Z'' v komplexnej rovine pre jednotlivé vzorky s fullerénom a magnetickými nanočasticami je možné tvrdiť, že vodivosť týchto materiálov v striedavom elektrickom poli 6,7 kV/m je čisto jednosmerná.



Obr. 33 Cole-Cole diagram komplexnej impedancie s C_{60} a Fe_3O_4 nanočasticami

Impedančné spektrá na Obr. 34 opisujú 4. a 6. vzorku bez magnetických nanočastíc. Uvedené je samostatné grafické znázornenie z dôvodu vyššej impedancie (rádovo $T\Omega$) v porovnaní so vzorkami, ktoré obsahujú magnetické nanočastice (rádovo $G\Omega$). Z grafických závislostí Z^* 4. a 6. vzorky nie je možné vyjadriť ich vodivosť, pretože namerané údaje sa nepribližujú k polkruhu, pomocou ktorého je možné vyjadriť charakter vodivosti.



Obr. 34 Cole-Cole diagram komplexnej impedancie vzoriek bez nanočastíc Fe_3O_4

Vyššie uvedené výsledky teda odhaľujú dominantný príspevok medzivrstvovej polarizácie magnetických nanočastíc k celkovej dielektrickej odozve hybridných nanokvapalín. Magnetické nanočastice spôsobujú pozoruhodnú dielektrickú relaxáciu, ktorá sa odráža v nezanedbateľných dielektrických stratách. Takéto dielektrické straty boli nájdené v rôznych magnetických nanokvapalinách. Pri zvažovaní potenciálnej aplikácie magnetických nanokvapalín v elektrických zariadeniach sa predpokladá, že vynikajúce tepelné vlastnosti a účinok termomagnetickkej konvekcie môžu prekonať dielektrické straty premenené na teplo. V dostupnej literatúre sa výrazné nízkofrekvenčné dielektrické relaxačné maximum v magnetických nanokvapalinách často pripisuje aj medzivrstvovej polarizácii na magnetických nanočasticiach, berúc do úvahy elektrickú dvojvrstvu vytvorenú na rozhraní nanočastíc. V niektorých prípadoch môžu nanočastice a voľné ióny v takýchto nanokvapalinách vyvolať efekt polarizácie elektród, ktorý možno potlačiť analýzou elektrického modulu. Na druhej strane, prezentované výsledky ukazujú, že dielektrické spektrum nanokvapaliny na báze oleja obsahujúcej iba fullerénové nanočastice sa podobá spektru čistého transformátorového oleja. Avšak vo frekvenčnom rozsahu okolo sieťovej frekvencie sa dielektrické straty zdali byť nižšie, ako straty v čistom transformátorovom oleji. Na preskúmanie mechanizmu znížených dielektrických strát je potrebných viac experimentálnych štúdií a metód.

c) Zhodnotenie experimentu

Experiment odhalil dielektrickú odozvu nanokvapalín na báze transformátorového oleja, obsahujúcich nanočastice oxidu železa a nanočastice fullerénu. Ukázalo sa, že M^* popisuje proces dynamickej relaxácie presnejšie, ako ϵ^* . Hybridná nanokvapalina s najvyššou koncentráciou fullerénu 0,03 %m/V má najnižšie dielektrické straty pri sieťových frekvenciách. V okolí sieťových frekvencií boli dielektrické straty nanokvapaliny, obsahujúcej iba 0,01 %m/V fullerénu nižšie, ako straty čistého transformátorového oleja. Toto zistenie je atraktívne z praktického hľadiska. Výsledky tohto experimentu boli publikované v časopise Journal of Molecular Liquids (2022, Vol. 359, JCR 2020 – Q1) pod odkazom [13].

VI. EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA ZMIEN V PEVNÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOCH PROSTREDNÍCTVOM IMPEDANČNEJ SPEKTROSKOPIE

Táto časť práce obsahuje jeden experiment, ktorý je zameraný na analýzu zmien v XLPE izolácii počas urýchleného tepelného starnutia prostredníctvom impedančnej spektroskopie.

A. Výskum tepelnej degradácie XLPE izolácie

Cieľom tohto experimentu je odhadnúť životnosť XLPE izolácie počas urýchleného tepelného starnutia pomocou Arrheniovoho modelu. Tento model je bežne používaný pri urýchlenom testovaní životnosti na posúdenie vzťahu životnosti a tepelného namáhania.

a) Materiály a metódy

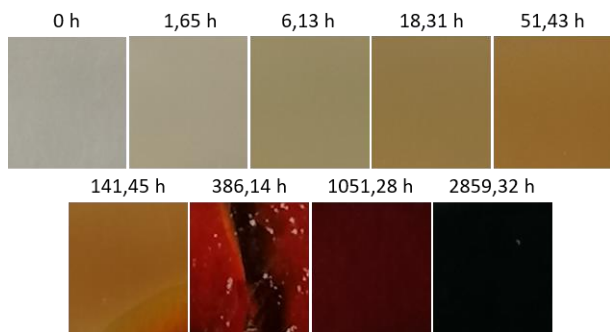
Experimentálnej procedúre bola podrobená nová vzorka vysokonapäťového XLPE kábla NA2XS2Y na menovité napätie 12/20 kV. Z kábla NA2XS2Y boli získané vzorky medzikružia XLPE izolácie, ktoré boli podrobené urýchlenému tepelnému starnutiu v univerzálnej sušičke Memmert UN 55^{plus} pri teplote 160 °C. Výber vzoriek zo sušičky bol realizovaný prostredníctvom Arrheniovoho exponenciálneho modelu tepelnej degradácie, pričom každé vybratie vzorky reprezentuje stupeň zostarnutia materiálu. Vplyv tepelného starnutia na dielektrické vlastnosti XLPE izolácie bol skúmaný prostredníctvom metódy impedančnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti. Bol použitý merací prístroj IDAX 300. Impedančná spektroskopcia bola realizovaná vo frekvenčnej oblasti v pásme 1 mHz – 10 kHz s aplikovaným striedavým elektrickým napätím 100 V. Elektrodový systém pozostával z dvoch valcovitých Rogowského elektród s priemerom 54 mm. Schéma zapojenia meracieho pracoviska je identická, ako na Obr. 8. Merania prebiehali v laboratórnych podmienkach s tlakom vzduchu 1013 hPa, teplotou vzduchu 20 °C a vlhkosťou vzduchu 36 %. Merania vzoriek XLPE izolácie boli uskutočňované s exponenciálne závislou dobou tepelného starnutia. Pri 0 h, po 1,65 h, po 6,13 h, po 18,31 h, po 51,43 h, po 141,45 h, 386,14 h, po 1051,28 h a po 2859,32 h. Po každej dobe tepelného starnutia boli vzorky vybraté zo sušičky a ochladnuté na izbovú teplotu pred samotným meraním.

b) Analýza experimentálnych výsledkov

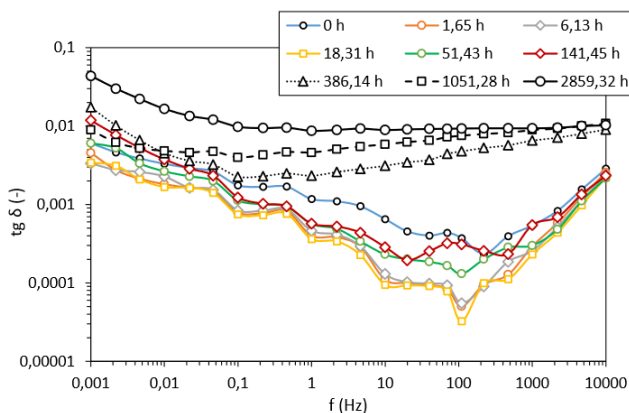
Tepelná degradácia všeobecne spôsobuje zmeny v štruktúre materiálu. Okrem chemických zmien sú zaznamenávané aj vizuálne zmeny, ktoré sa prejavujú zmenou farby materiálu. Na Obr. 35 sú uvedené farebné zmeny XLPE izolácie počas tepelného starnutia pri teplote 160 °C. So zvyšovaním doby tepelného starnutia dochádza k postupnému tmavnutiu izolácie.

Vizuálne zmeny sú ďalej doplnené meraniami elektrofyzikálnych parametrov prostredníctvom impedančnej spektroskopie. Nakoľko boli z kábla NA2XS2Y získané vzorky medzikružia XLPE izolácie s rôznou hrúbkou materiálu 1,7 mm ± 0,24 mm, nie je možné prezentovať zmeny kapacity C vo frekvenčnom pásme počas tepelného starnutia a teda ani zmeny ϵ^* a M^* . Na popis elektrofyzikálnych zmien je preto použitý činiteľ dielektrických strát $tg \delta$ a elektrická vodivosť σ . Na Obr. 36 je znázornený $tg \delta$ vo frekvenčnom spektre 1 mHz

– 10 kHz pri tepelnom starnutí. XLPE sa skladá z dvoch hlavných častí, sférolitov a amorfnej oblasti. Vplyvom aplikovaného elektrického poľa sa niektoré pohyblivé kladné a záporné náboje ukladajú na rozhraniach rôznych materiálov (častí XLPE) a vytvárajú taktiež niektoré druhy dipólov. V tomto prípade ide o rozhranie medzi sférolitmi a amorfnou oblasťou, na ktorom prebieha medzivrstvová polarizácia, ktorá je na Obr. 36 zachytená vo frekvenčnom spektre 200 Hz – 10 kHz. Prítomnosť medzivrstvovej polarizácie spôsobuje zvyšovanie $tg \delta$ v tomto frekvenčnom spektre so zvyšovaním frekvencie. Výrazné zvyšovanie $tg \delta$ v tomto frekvenčnom pásme je badateľné do doby tepelného starnutia 141,45 h, po tejto dobe dochádza k postupnej strate efektu medzivrstvovej polarizácie. S klesajúcou frekvenciou je viditeľný nárast stratového činiteľa (od frekvencie 20 Hz) vzoriek tepelne starnutých do doby 141,45 h. Pri vzorkách tepelne starnutých v rozmedzí 141,45 h – 2859,32 h je zachytený nárast $tg \delta$ od frekvencie 0,1 Hz. Nárast $tg \delta$ vzoriek v nízkofrekvenčnom pásme počas celej doby tepelného starnutia (0 h – 2859,32 h) je pripisovaný vplyvu vodivostných strát s efektom elektródovej polarizácie.



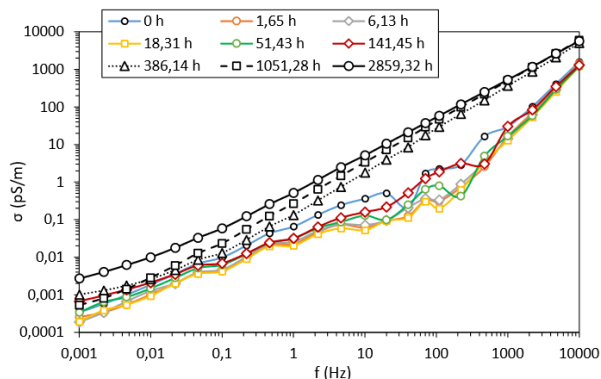
Obr. 35 Zmena farby XLPE izolácie počas tepelného starnutia pri 160 °C



Obr. 36 Stratový činiteľ vzoriek XLPE izolácie v závislosti na frekvencii

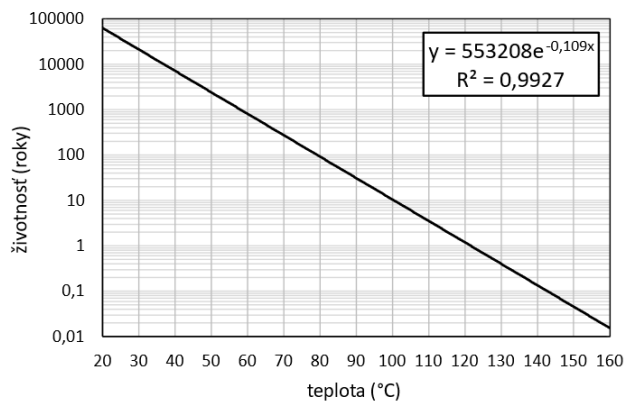
Na Obr. 37 je znázornená elektrická vodivosť vzoriek XLPE izolácie. Tak, ako bolo spomenuté na začiatku tohto experimentu, starnutie XLPE izolácie prebieha v troch fázach. V prvej fáze (0 h – 18,31 h) došlo k zníženiu $tg \delta$ a elektrickej vodivosti v celom frekvenčnom pásme, v dôsledku dotvrdzovania. V druhej fáze dochádza k postupnému

zvyšovaniu $tg \delta$ a elektrickej vodivosti pri tepelnom starnutí 51,43 h a 141,45 h. Táto a dlhšia doba tepelnej degradácie urýchľuje oxidačnú reakciu polyméru, pričom voľné radikály posilňujú polaritu XLPE izolácie. Zvyšuje sa aj vodivosť v dôsledku zvyšujúcej sa koncentracii voľného nosiča náboja. V tretej fáze dochádza k výraznému zvýšeniu stratového činiteľa a elektrickej vodivosti vo vysokofrekvenčnom pásme. Výrazné zvýšenie dielektrických parametrov je badateľné od doby tepelného starnutia 386,14 h, čo korešponduje s farebným kontrastom izolácie na Obr. 35.



Obr. 37 Elektrická vodivosť vzoriek XLPE izolácie v závislosti na frekvencii

Štúdie [14] a [15] skúmali životnosť XLPE izolácie pri tepelnom starnutí s cieľom poskytnutia presných informácií o ukončení prevádzkyschopnosti materiálu pre budúce štúdie. Z [14] bolo zistené, že s uvažovaním reálnych dát 100 %-ného zaťaženia vo svete sa teplota vodiča XLPE kábla (345 kV) pohybuje v rozmedzí 70 °C – 105 °C počas týždňa. V priemere je kábel zaťažovaný teplotou 87,5 °C, čomu zodpovedá životnosť 40 rokov. Obe štúdie použili Arrheniov model tepelného starnutia, výsledkom čoho bol rovnaký odhad životnosti. Získané dáta z týchto štúdií sú uvedené na Obr. 38.



Obr. 38 Životnosť XLPE izolácie v závislosti na teplote

V našom experimente boli vzorky namáhané teplotou 160 °C, čomu zodpovedá podľa Obr. 38 životnosť 0,0122 rokov, čiže 107 h. Z grafických závislostí na Obr. 36 a Obr. 37 je možné pozorovať, že krivka tepelného starnutia 141,45 h je

už po ukončení prevádzkyschopnosti XLPE izolácie a ďalším zvyšovaním tepelnej degradácie pri teplote 160 °C dochádza k výraznejším zmenám dielektrických strát a elektrickej vodivosti. Dochádza k vyčerpaniu prídavných antioxidantov a ku oksyločovaniu, čo spôsobuje oxidáciu, krehnutie, praskanie a prítomnosť elektrických stromčekov, ktoré vedú k elektrickému prerazu a úplnému zničeniu materiálu.

c) Zhodnotenie experimentu

Experimentálne merania stratového činiteľa a elektrickej vodivosti spolu s vizuálnym pohľadom poukazujú na tri fázy zmien v štruktúre materiálu. Prvá reflektuje zlepšovanie dielektrických vlastností, druhá odráža postupné zhoršovanie dielektrických vlastností a štruktúry XLPE izolácie a tretia poukazuje na výrazné zhoršenie dielektrických vlastností a premeny kryštalického stavu na stav amorfný, znamenajúci úplnú degradáciu materiálu. Dominanciu amorfnej fázy potvrdzuje úbytok vplyvu medzivrstvovej polarizácie sférolit – amorfná fáza vo vysokofrekvenčnej oblasti spektier činiteľa dielektrických strát. Jedným z prínosov je aj spojenie dvoch Arrheniových teplotných rozsahov životnosti XLPE izolácie. Na základe toho bola vyjadrená životnosť skúmaných vzoriek XLPE izolácie 107 h pri teplote 160 °C.

VII. EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA ZMIEN V KOMBINOVANÝCH IZOLAČNÝCH MATERIÁLOCH PROSTREDNÍCTVOM IMPEDANČNEJ SPEKTROSKOPIE

Táto kapitola článku obsahuje jeden experiment, ktorý je zameraný na analýzu zmien v kombinovanej izolácii olej-papier pri zmene intenzity aplikovaného elektrického poľa prostredníctvom impedančnej spektroskopie.

A. Výskum vplyvu intenzity striedavého elektrického poľa na dielektrickú odozvu izolačného systému hybridná nanokvapalina-papier

Cieľom tohto experimentu je odhadnúť životnosť XLPE izolácie počas urýchleného tepelného starnutia pomocou Arrheniovoho modelu. Tento model je bežne používaný pri urýchlenom testovaní životnosti na posúdenie vzťahu životnosti a tepelného namáhania.

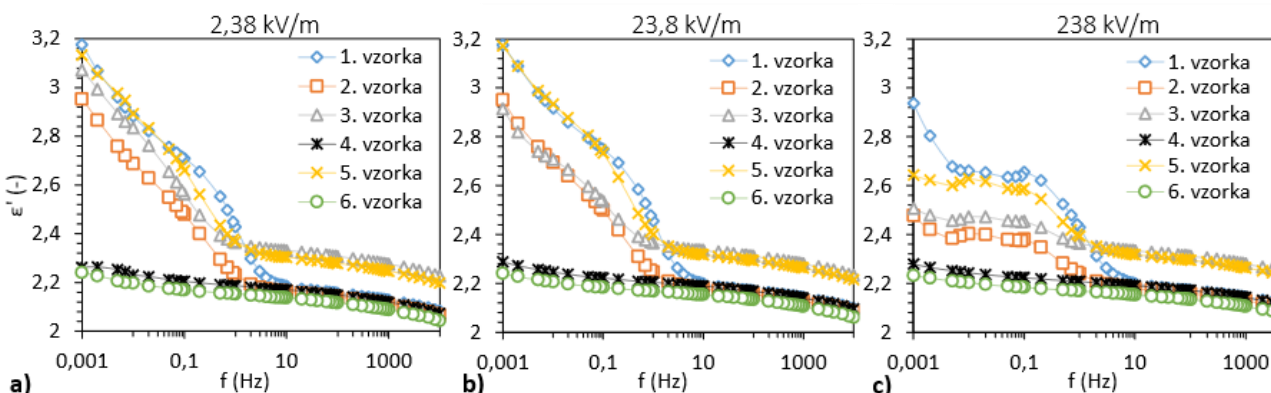
a) Materiály a metódy

Skúmanie dielektrickej odozvy bolo realizované na šiestich rôznych vzorkách izolačného systému olej-papier. Všetky vzorky boli impregnované základovým izolačným olejom Shell Diala S4 ZX-1. Každá vzorka disponovala rôznou koncentráciou nanočastíc suspendovaných v SD. Boli použité

magnetické nanočastice Fe₃O₄ (10 nm) a nanočastice fullerénu C₆₀ (1,1 nm). Klasifikácia vzoriek je uvedená v Experimente V.C. Prvá, druhá a tretia vzorka predstavujú impregnačnú hybridnú nanokvapalinu (ďalej označené ako „HIN-P“). Štvrtá, piata a šiesta vzorka sú nehybridné impregnačné nanokvapaliny (NIN-P). Pripravené vzorky kvapalín boli aplikované do Petriho misiek, kde prebehla impregnácia so vzorkami papiera. Experimentálne merania boli realizované prostredníctvom metódy impedančnej spektroskopie vo frekvenčnej oblasti pomocou prístroja IDAX 300 pri hrúbke vzorky impregnovaného papiera 0,42 mm. Z meracieho prístroja bolo generované dekadicky odstupňované napätie 1 V, 10 V a 100 V. Tieto napätia vytvorili intenzity striedavého elektrického poľa 2,38 kV/m, 23,8 kV/m a 238 kV/m. Elektroódový systém pozostával z dvoch valcovitých Rogowského elektród s priemerom 54 mm. Schéma zapojenia meracieho pracoviska je totožná, ako na Obr. 8. Experiment prebiehal v laboratórnych podmienkach s tlakom vzduchu 1013 hPa, teplotou vzduchu 20 °C a vlhkosťou vzduchu 36 %.

b) Analýza výsledkov prostredníctvom komplexnej permittivity

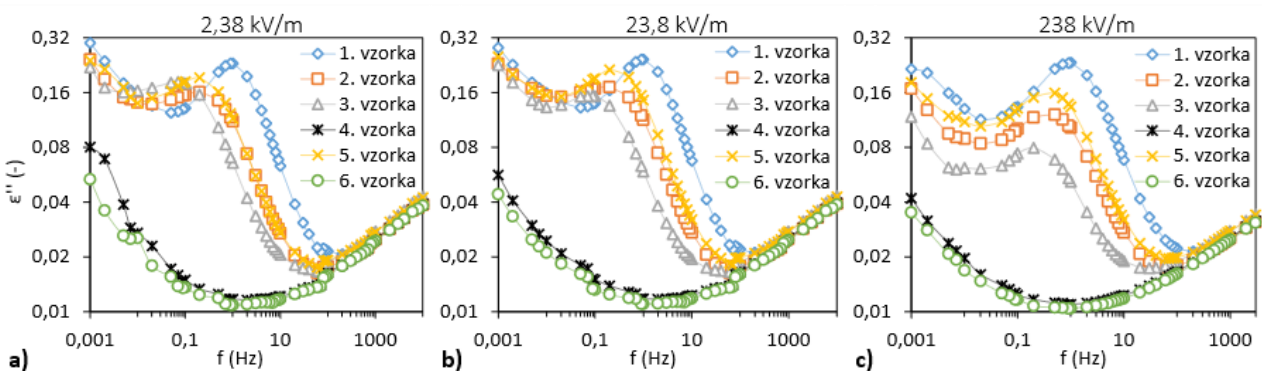
Na Obr. 39 sú znázornené spektrá ϵ' vo frekvenčnom pásme 1 mHz – 10 kHz. Pri intenzite 2,38 kV/m vykazujú vzorky HIN-P a 5. vzorka nárast ϵ' vo frekvenčnom pásme 2 Hz – 1 mHz. Uvedený nárast je pripisovaný dielektrickej relaxácii. Zvýšenie koncentrácie C₆₀ u vzoriek HIN-P nespôsobuje priamoúmernú disperziu ϵ' v nízkofrekvenčnom pásme. Zvyšovaním frekvencie smerom k 10 kHz dochádza k miernemu poklesu ϵ' u všetkých vzoriek. Pri porovnaní vzoriek NIN-P, spôsobuje koncentrácia C₆₀ 0,01 %m/V (4. vzorka) zvýšenie ϵ' o hodnotu 0,05 v meranom frekvenčnom pásme, oproti vzorke impregnovanej čistým olejom (6. vzorka). 5. vzorka s koncentráciou Fe₃O₄ 0,01 %m/V má najvyššiu ϵ' v porovnaní so 4. a 6. vzorkou, kvôli vyššej polarizovateľnosti magnetických nanočastíc. Vplyv desaťnásobného zvýšenia intenzity elektrického poľa na hodnotu 23,8 kV/m (Obr. 39b) nespôsobuje výraznejšie zmeny v dielektrickom správaní skúmaných vzoriek. Pri stonásobnom zvýšení intenzity elektrického poľa na 238 kV/m na Obr. 39c došlo k výraznejšej zmene dielektrickej odozvy vzoriek HIN-P a 5. vzorky, teda vzoriek s koncentráciou magnetických nanočastíc. Hodnoty ϵ' uvedených vzoriek klesli v nízkofrekvenčnom pásme 1 mHz – 0,2 Hz s dôsledkom, že tvar kriviek poodhaľuje ďalší možný polarizačný proces pri frekvencii 1 mHz. Z Obr. 39 je vidieť, že dekadické zvyšovanie intenzity elektrického poľa nemá vplyv na ϵ' vzorky impregnovanej čistým olejom (6. vzorka) a olejom obohateným o nanočastice C₆₀ (4. vzorka).



Obr. 39 Reálna permitivita vzoriek olej-papier pri rôznej intenzite elektrického poľa

Na Obr. 40 sú znázornené dielektrické straty v meranom frekvenčnom spektre prostredníctvom ϵ'' . Mierny pokles ϵ' v pásme vyšších frekvencií na Obr. 39 koreluje so zvyšovaním ϵ'' na Obr. 40. Uvedené zvyšovanie je pripisované medzivrstvovej polarizácii na rozhraní olej-papier, nakoľko je badateľná pri všetkých skúmaných vzorkách. Znižovaním frekvencie pod hodnotu 100 Hz je viditeľné zvyšovanie ϵ'' u vzorky s koncentráciou magnetických nanočastic (HIN-P a 5. vzorka). Tieto charakteristiky končia píkom, signalizujúcim relaxačný proces. Pretože zachytený pík vykazujú vzorky s magnetickými nanočasticami, pripisujeme túto relaxáciu elektrickej dvojvrstvovej polarizácii. Z charakteristík je vidieť, že postupným zvyšovaním koncentrácie C_{60} dochádza k postupnému znižovaniu dielektrických strát pri prevádzkových frekvenciách. Zvyšovanie koncentrácie C_{60} vo vzorkách HIN-P spôsobuje posunutie charakteristiky k nižším frekvenciám. Pri ďalšom znižovaní frekvencie aplikovaného elektrického poľa (1 mHz – 0,02 Hz) dochádza k opätovnému zvyšovaniu dielektrických strát vzoriek s magnetickými nanočasticami a podobne aj 4. a 6. vzorky. Z daných charakteristík nie je možné presne odhadnúť, či zvýšenie dielektrických strát je spôsobené vodivostným alebo polarizačným procesom. Na Obr. 40b sú prezentované hodnoty ϵ'' vzoriek pri desaťnásobnom zvýšení

intenzity elektrického poľa. Zmena nastala v jednoznačnom usporiadaní závislosti ϵ'' vzoriek HIN-P v okolí frekvencie 1 Hz. Pri ďalšom desaťnásobnom zvýšení intenzity elektrického poľa na Obr. 40c dochádza už k zmene celého frekvenčného spektra ϵ'' . Dielektrické straty sa znižujú v celom frekvenčnom spektre. Nakoľko ide o intenzitu elektrického poľa blízku prevádzkovej, je znižovanie dielektrických strát pozitívnym signálom pre aplikáciu týchto materiálov. Zvyšovanie koncentrácie C_{60} vo vzorkách HIN-P spôsobuje redukcii dielektrických strát v pásme 1 mHz – 100 Hz. Teda aj pri prevádzkových frekvenciách, čo sa prejavilo pri všetkých aplikovaných intenzitách elektrického poľa. Táto skutočnosť platí za predpokladu nasadenia magnetických nanočastic do vzoriek HIN-P. V opačnom prípade dochádza k miernemu zvýšeniu dielektrických strát. Dôkazom je porovnanie 4. a 6. vzorky. V nízkofrekvenčnom pásme je registrované zvyšovanie hodnôt ϵ'' aj pri intenzite elektrického poľa 238 kV/m. Všetky vzorky vykazujú rastúcu tendenciu. Výnimkou je 1. vzorka HIN-P, kde je zachytený relaxačný pík pri frekvencii 1 mHz. Táto relaxácia súvisí so zvýšením aplikovaného elektrického poľa na 238 kV/m, pretože voči intenzite 2,38 kV/m a 23,8 kV/m nedošlo k posunutiu charakteristiky ϵ'' do vyšších frekvencií.

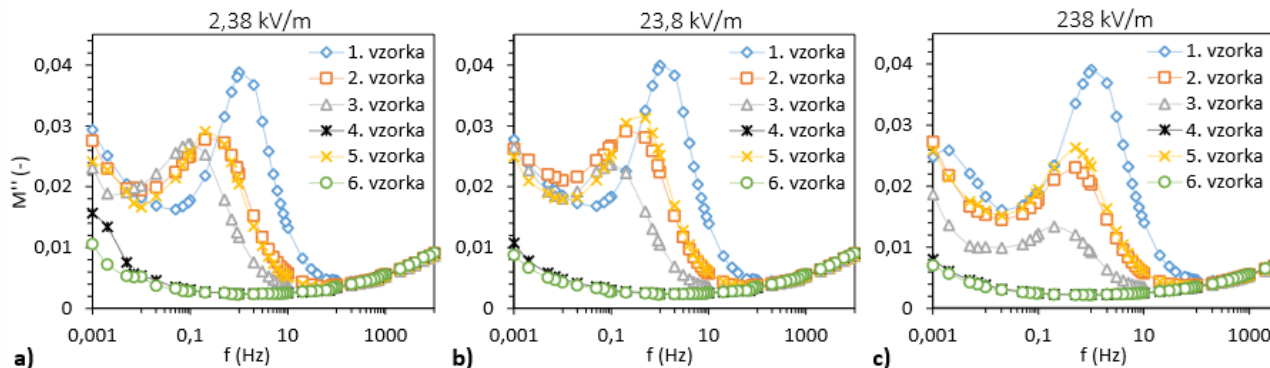


Obr. 40 Imaginárna permitivita vzoriek olej-papier pri rôznej intenzite elektrického poľa

c) *Analýza výsledkov prostredníctvom komplexného elektrického modulu*

Analýzou M^* je overované dielektrické správanie skúmaných vzoriek z hľadiska polarizačných procesov. Na Obr. 41 sú znázornené charakteristiky M'' . Je všeobecne známe, že porovnaním spektier ϵ'' a M'' pri skúmaní iba kvapalnej izolácie dochádza k posunutiu zachyteného

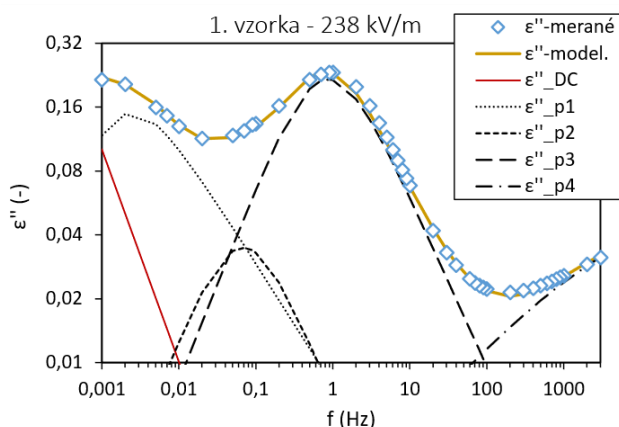
relaxačného procesu k vyšším frekvenciám. V tomto experimente pri skúmaní vzoriek olej-papier nedochádza k posunutiu relaxačných charakteristík k vyšším frekvenciám. To znamená, že kombináciou celulózového papiera a kvapalnej izolácie nedochádza k zmene polohy polarizačných pík vo frekvenčnom spektre. Tým pádom stratové charakteristiky M'' neodhaľujú relaxačné procesy, ktoré nie sú zachytené charakteristikami imaginárnej časti komplexnej permitivity ϵ'' .



Obr. 41 Imaginárny modul vzoriek olej-papier pri rôznej intenzite elektrického poľa

d) *Diskusia*

Tvrdenie, že v celom frekvenčnom spektre dominujú polarizačné procesy a vodivostné straty ϵ''_{DC} sú potláčané polarizačnými stratami ϵ''_p , je možné overiť modelovaním elektrofyzikálnych procesov pomocou funkcie Havriliak-Negami (H-N). Na Obr. 42 je uvedené modelovanie elektrofyzikálnych procesov 1. vzorky (HIN-P) pri intenzite 238 kV/m prostredníctvom H-N funkcie. Na základe toho je potvrdené vyjadrenie, že polarizačné straty dominujú nad vodivostnými stratami v meranom frekvenčnom spektre. Modelovaním dielektrických strát ϵ''_{model} je zistené, že HIN-P vykazuje štyri relaxačné procesy a vodivostný proces, ktorý nie je dominantný v nízkofrekvenčnom pásme. Modelovaná charakteristika dielektrických strát je zložená zo súčtu príspevkov polarizačných (ϵ''_{p1} , ϵ''_{p2} , ϵ''_{p3} , ϵ''_{p4}) a vodivostných strát (ϵ''_{DC}). Zachytená relaxácia pri frekvencii 2 mHz ϵ''_{p1} je spôsobená polarizáciou priestorového náboja pri zvyšujúcej sa intenzite elektrického poľa. V okolí frekvencie 0,07 Hz je zachytený relaxačný pík s relatívne menším príspevkom dielektrických strát ϵ''_{p2} . Táto polarizácia súvisí s magnetickými nanočasticami, ktoré majú snahu polarizovať sa s nosným kvapalným médiom. Z Obr. 40c je možné vidieť, že vzorky s magnetickými nanočasticami (HIN-P a 5. vzorka) vykazujú rovnaký trend správania sa pri relaxačnej frekvencii 0,07 Hz. To znamená, že relaxačný pík č. 2 je prítomný výlučne vďaka magnetickým nanočasticiam. Za prítomnosť tejto relaxácie nie sú zodpovedné nanočastice C_{60} , pretože 4. vzorka nemá príspevok ϵ''_{p2} pri tejto frekvencii. Ako už bolo spomenuté vyššie, príspevok ϵ''_{p3} je spôsobený elektrickou dvojrstvovou polarizáciou. Pretože všetky skúmané vzorky vykazujú rastúci trend vo frekvenčnom pásme 100 Hz – 10 kHz, je príspevok ϵ''_{p4} spôsobený medzivrstvovou polarizáciou olej-papier.



Obr. 42 Modelovanie dielektrických procesov využitím funkcie H-N

e) *Zhodnotenie experimentu*

Elektrická dvojrstvová polarizácia spôsobuje zvýšenie dielektrických strát pri prevádzkových frekvenciách 50 Hz a 60 Hz. Z charakteristík vzoriek HIN-P je vidieť, že postupným zvyšovaním koncentrácie C_{60} dochádza k postupnému znižovaniu dielektrických strát pri prevádzkových frekvenciách. Porovnaním 4. a 6. vzorky je vidieť, že koncentrácia C_{60} bez prítomnosti magnetických nanočastíc má opačný efekt na veľkosť dielektrických strát. Pri zvýšení intenzity elektrického poľa na hodnotu 238 kV/m dochádza k zmene celého frekvenčného spektra ϵ'' . Porovnaním spektier ϵ'' a M'' nedochádza k posunutiu relaxačných charakteristík k vyšším frekvenciám. Na základe funkcie H-N bolo potvrdené, že polarizačné straty dominujú nad vodivostnými stratami v meranom frekvenčnom spektre. Modelovaním

dielektrických strát bolo zistené, že 1. vzorka HIN-P vykazuje štyri relaxačné procesy a vodivostný proces, ktorý nie je dominantný v nízko-frekvenčnom pásme. Jednotlivé typy relaxačných procesov sú uvedené v diskusii.

VIII. ZÁVER

Táto publikácia odráža v prvých kapitolách súčasný prehľad elektroizolačných materiálov, používaných v širokej oblasti elektroenergetickej praxe a ich zmien vplyvom tepelného degradačného činiteľa. Problematika relaxačných javov v izolačných materiáloch je podrobne popísaná v tretej kapitole. Využitím impedančnej spektroskopie, ktorá je založená na experimentálne pozorovaných dielektrických odozvách voči intenzite elektrického poľa, je možné skúmať zmeny štruktúry v izolačných materiáloch. Práca ponúka experimentálne analýzy rôznych druhov izolačných materiálov na báze kvapalného, pevného a kombinovaného skupenstva.

Zvýšenie životnosti transformátora optimalizáciou prevádzkových podmienok pomocou vhodných a spoľahlivých diagnostických údajov, znamená veľkú úsporu nákladov pre prevádzkovateľa zariadenia. Získanie správnych diagnostických údajov je podmienené skúmaním vhodných dielektrických parametrov, akými sú komplexná permitivita a komplexný elektrický modul. Komplexný elektrický modul sa javí ako vhodný diagnostický parameter pre diagnostiku výkonových transformátorov z hľadiska relaxačných mechanizmov. V prípade samotnej olejovej izolácie môže poukázať na zmeny, ktoré sú ťažšie hodnotené pri analýze komplexnou permitivitou. Vykonané experimenty poskytujú odôvodnené návrhy na náhradu minerálneho oleja uhľovodíkovým olejom (syntetickým esterom) Shell Diala S4 ZX-1. Súvisí to so skúmanými frekvenčne závislými polarizačnými a vodivostnými spektrami pri rôznej intenzite elektrického a tepelného poľa, čo má priamy vplyv na prevádzku výkonových transformátorov. Rozloženie tepelného poľa vo výkonových transformátoroch je veľmi dôležité z hľadiska prevádzky zariadenia. Motivácia znížiť tepelný vplyv a zefektívniť prenos elektriny je celosvetovo obrovská. Všeobecnou požiadavkou je znižovanie dopadov na životné prostredie, čomu zodpovedá aj znižovanie ohrievania do ovzdušia spôsobeného neefektívnou prevádzkou výkonových transformátorov, čo má mierny príspevok ku klimatickým zmenám. Tieto skutočnosti súvisia s dielektrickými stratami kvapalnej izolácie vo výkonových transformátoroch. Jedným z riešení optimalizácie tepelného poľa vo výkonových transformátoroch je aplikácia magnetickej nanokvapaliny na báze uhľovodíkového oleja. Nevýhodou týchto kvapalín sú vyššie dielektrické straty, ktoré boli zaznamenané v experimentálnej analýze, ako dôsledok vyššej polarizovateľnosti a elektrickej vodivosti magnetickej nanočastíc. Pri zvažovaní potenciálnej aplikácie magnetickej nanokvapalín v elektrických zariadeniach sa predpokladá, že vynikajúce tepelné vlastnosti a účinok termomagnetickkej konvekcie môžu prekonať dielektrické straty premenené na teplo. V experimentálnej analýze bolo zistené, že hybridná nanokvapalina, obsahujúca magnetickej nanočastice Fe_3O_4 a nanočastice fullerénu C_{60} , by mohla znížiť dielektrické straty so zachovaním výborných tepelných vlastností. Za zníženie dielektrických strát pri prevádzkových frekvenciách 50 Hz

a 60 Hz je zodpovedná disperzia nanočastíc fullerénu v hybridnej nanokvapaline. Hybridná nanokvapalina s najvyššou skúmanou koncentráciou fullerénu (0,03 %m/V) má najnižšie dielektrické straty. V okolí sieťových frekvencií boli dielektrické straty nehybridnej nanokvapaliny, obsahujúcej iba 0,01 %m/V fullerénu nižšie, ako straty čistého transformátorového oleja. Toto zistenie je atraktívne z praktického hľadiska a môže predstavovať výzvu na preskúmanie fyzikálnych mechanizmov aplikáciou iných experimentálnych metód. Hybridné nanokvapaliny, ako impregnačné médiá transformátorového papiera (kombinované materiály), rovnako poukazujú na znižovanie dielektrických strát pri 50 Hz a 60 Hz so zvyšovaním koncentrácie fullerénu v systéme hybridná nanokvapalina-papier. Na druhej strane, zvýšenie koncentrácie fullerénu v systéme nehybridná nanokvapalina-papier spôsobuje zvýšenie dielektrických strát, čiže táto priamoúmernosť u nehybridných nanokvapalín platí iba pri kombinovaných systémoch (olej-papier), nie však pri samotnom kvapalnom systéme. V publikácii bolo zistené, že komplexný elektrický modul nie je pri skúmaní kombinovaných systémov olej-papier lepším diagnostickým parametrom, ako komplexná permitivita. Najlepším riešením pre analýzu dielektrického materiálu z komplexného hľadiska je využitie kombinácie dielektrických parametrov, komplexnej permitivity (modelovanie pomocou funkcie Havriliak-Negami) a komplexného elektrického modulu.

Nemenej podstatnou súčasťou elektrizačnej sústavy sú vysokonapäťové káble s XLPE izoláciou. Táto publikácia ponúka aj výskum zmien v elektro-fyzikálnej štruktúre XLPE izolácie počas urýchlenej Arrheniovej tepelnej degradácie. Výsledky poukazujú na tri fázy zmien v štruktúre materiálu. Tento experiment ponúkol pri teplote 160 °C dobu starnutia až 2859,32 h, pričom bolo zachytené ukončenie prevádzkyschopnosti materiálu a ďalšie zmeny, smerujúce k úplnej degradácii XLPE izolácie.

Ďalšie smerovanie výskumu v danej problematike by sa malo orientovať aj na využitie iných experimentálnych metód, hlavne chemického charakteru, na doplnenie analýzy impedančnej spektroskopie. Táto publikácia poskytuje užitočný náhľad do spektroskopie analýzy zmien v elektro-fyzikálnej štruktúre izolačného materiálu rôzneho skupenstva s aplikáciou komplexných dielektrických modelov na popis dynamického rozloženia elektrického náboja vo forme dielektrickej odozvy.

POĎAKOVANIE

Práca bola podporená MŠVVaŠ v rámci projektu VEGA 2/0011/20 a 1/0154/21 a Slovenskou agentúrou pre výskum a vývoj na základe zmlúv č. APVV-15-0438, APVV-17-0372 a APVV-18-0160.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi, *Electrical Insulation in Power Systems*. CRC Press, 2018.
- [2] R. Cimbala, J. Király, *Tepelná degradácia magnetickej kvapalín*. Vydanie 1. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2017.
- [3] A. Küchler, *High Voltage Engineering: Insulating materials*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, 2018.

- [4] C.G. Montanari et al., "Progress in Electrothermal Life Modeling of Electrical Insulation during Last Decades," IEEE, vol. 9, pp. 730-743, 2002.
- [5] R. Cimbala, P. Semančík, Tepelná degradácia kvapalných izolačných materiálov. Vydanie 1. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2016.
- [6] M.H. Shwehdi et al., "Thermal Aging Tests on XLPE and PVC Cable Insulation Materials of Saudi Arabia," 2003 Ann. Rep. Conf. Elektr. Insul. Diel. Phen., pp. 176-180, 2003.
- [7] V. Raicu, Y. Feldman, Dielectric Relaxation in Biological Systems: Physical Principles, Methods and Applications. United Kingdom: OUP Oxford, 2015.
- [8] R. Cimbala, S. Bucko, Moderné kvapalné izolačné materiály v elektroenergetike. Vydanie 1, Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2018.
- [9] V.F. Lvovich, Impedance spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [10] P. Havran et al., "Dielectric Properties of Electrical Insulating Liquids for High Voltage Electric Devices in a Time-Varying Electric Field," Energies, vol. 15, pp. 391, 2022.
- [11] M. Wübbenhorst, J. Turnhout, "Analysis of complex spectra. I. One-dimensional derivative techniques and three-dimensional modeling," J. Non-Crystal. Sol., vol. 305, pp. 40-49, 2002.
- [12] M. Asandulesa et al., "Molecular Dynamics and Conductivity of a PTB7:PC71BM Photovoltaic Polymer Blend: A Dielectric Spectroscopy Study," ACS App. Pol. Mat., vol. 3, pp. 4869-4878, 2021.
- [13] R. Cimbala et al. "Dielectric Response of a Hybrid Nanofluid Containing Fullerene C₆₀ and Iron Oxide Nanoparticles," J. Mol. Liq., vol. 359, pp. 1-9, 2022.
- [14] Y.J. Han et al., "Thermal aging estimation with load cycle and thermal transients for XLPE-insulated underground cable," 2017 IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom., pp. 205-208, 2017.
- [15] A.S. Alghamdi, R.K. Desuqi, "A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing," Heliyon, vol. 6, pp. 1-11, 2020.

Dynamika doménových stien vo feromagnetických mikrodrôtoch

Jana Horniaková

Katedra fyziky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE

Košice, Slovensko

jana.horniakova@tuke.sk

Jozef Onufer

Katedra fyziky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, TUKE

Košice, Slovensko

jozef.onufer@tuke.sk

Abstrakt—Príspevok sa zaoberá študovaním dynamiky jednej doménovej steny v magnetických sklom potiahnutých bistabilných mikrodrôtoch $\text{Fe}_{77.5}\text{B}_{15}\text{Si}_{7.5}$ so silným jednosmerovým efektom a $\text{Fe}_{62}\text{Ni}_{15.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ mikrodrôte bez jednosmerového efektu. Popísaný je nový experiment, ktorý poskytuje informácie o geometrii doménovej steny a jej zmenách. Prostredníctvom merania priestorového rozloženia axiálneho magnetického toku okolo pohybujúcej sa doménovej steny sa potvrdilo, že zvyšujúce sa tlmenie pohybu doménovej steny s rastúcim aplikovaným magnetickým poľom vedie k skracovaniu steny. Merania boli uskutočnené aj pod vplyvom axiálneho ťahového napätia a teploty. Účinky vplyvu aplikovaného axiálneho ťahového napätia sa prejavili ako dodatočné piky v indukovaných signáloch z dlhej snímačkej cievky. Tie predstavujú lokálne zvýšenie rýchlosti doménovej steny, čo je v rozpore s predpokladaným efektom záchytných centier.

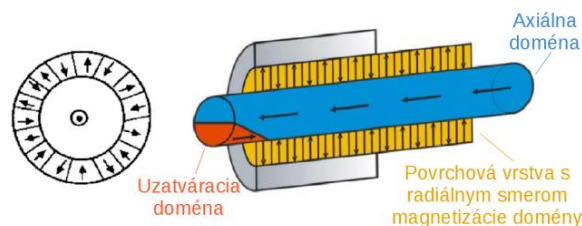
Keywords—doménová stena; amorfný bistabilný mikrodrôt; vnútorné napätia; geometria doménovej steny; rýchlosť doménovej steny

I. ÚVOD

Dopyt trhu po rozmerovo malých, ale výkonných a zároveň lacných magnetických materiáloch zvýšil pozornosť aj o amorfné feromagnetické sklom potiahnuté mikrodrôty s kladnou konštantou magnetostrikcie. Jedinečné fyzikálne vlastnosti a aplikačný potenciál ich k tomu predurčujú [1]-[5]. Momentálne sa využívajú v senzorike a možné aplikácie sú v medicíne, priemysle alebo pre informačné technológie, kde v zariadeniach pre ukládanie informácií [5] môže dĺžka doménovej steny (DS) obmedziť hustotu uložených informácií. Aj preto sa štruktúra (tvar) a dĺžka DS stávajú dôležitými oblasťami štúdia.

Sklom potiahnuté mikrodrôty sú pripravované Taylor-Ulitovského metódou [4], [6], [7], kde ťahaním a rýchlym ochladzovaním sklenenej kapiláry s kovovou taveninou sú pripravované mikrodrôty s charakteristickým rozložením mechanického napätia [8]. Rozloženie mechanického napätia v kombinácii s veľkosťou a znamienkom konštanty magnetostrikcie spôsobí vytvorenie typickej doménovej štruktúry. Doménová štruktúra mikrodrôtov s kladnou konštantou magnetostrikcie je tvorená veľkou axiálnou doménou v strede kovového jadra, s radiálnymi doménami v jeho vonkajšom plášti, pričom väčšinu objemu zaberá axiálna

doména [9]. Rozptyľové pole na koncoch mikrodrôtu spôsobí vytvorenie uzatváracích doménových štruktúr (Obr. 1). Pravouhlá hysteréza slučka je charakteristická pre tento typ mikrodrôtov. Spôsobená je špecifickým obrátením vektora magnetizácie, ktorý začína uvoľnením jednej DS z uzatváraciej doménovej štruktúry z konca mikrodrôtu, ktorá sa následne pohybuje pozdĺž celého mikrodrôtu ako veľký Barkhausenov skok [10], [11], [12].



Obr. 1 Doménová štruktúra mikrodrôtu s kladnou konštantou magnetostrikcie [13].

Analýza tvaru indukovaných signálov v snímacích cievkach v Sixtus-Tonks experimente je jednou z metód získavania informácií o geometrii DS. Avšak, tieto indukované signály sú silne závislé na parametroch snímačích cievok a ovplyvňuje ich aj rozptyľové pole okolo pohybujúcej sa DS (head-to-head resp. tail-to-tail) [4], [14]-[17]. O tvare DS už bolo publikovaných veľa štúdií [18]-[25], no napriek tomu sú výsledky stále nejednoznačné a navzájom sa nepodporujú. Vo viacerých prácach študujúcich dynamiku jednej DS v bistabilných mikrodrôtoch je DS považovaná za tuhý objekt, ktorý so zmenou aplikovaného poľa nemení svoje geometrické rozmery (tvar ani dĺžku). Ale pre interpretáciu experimentálne pozorovaného správania je možné uvažovať zmeny v štruktúre DS [14]-[16]. Preto otázky skutočného tvaru DS a zmien v jej geometrii sú stále otvorené.

II. PRÍNOSY TOHTO PRÍSPEVKU

Hlavné prínosy tohto príspevku sú nasledovné:

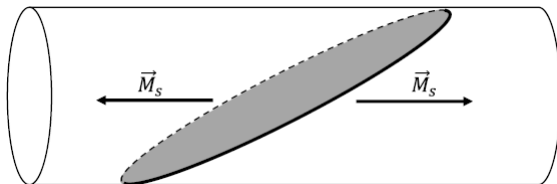
- uvedený prehľad uvažovaných modelov tvaru DS,
- vysvetlenie experimentálnych podmienok pre študovanie zmien v geometrii pohybujúcej sa

samostatnej DS v amorfných feromagnetických sklom potiahnutých mikrodrôtoch.

- analýza a diskusia výsledkov popísaného experimentu pri rôznych hodnotách axiálneho poľa a rôznych smeroch magnetovania (keď sa prejavuje resp. neprejavuje jednosmerový efekt).
- analýza vynesenej závislosti zmien v geometrii DS na aplikovanom axiálnom magnetickom poli (aj pod vplyvom rôznych teplotných podmienok a mechanického namáhania).

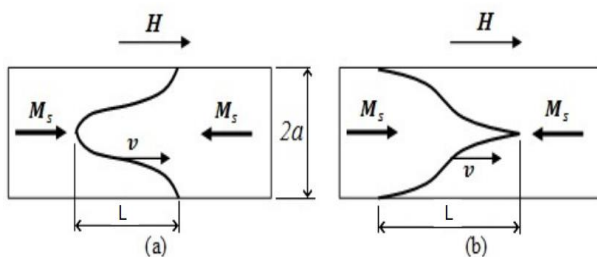
Vo všeobecnosti, ale aj pre aplikačné dôvody je podstatné poznať tvar a dĺžku DS. Napriek tomu, že existuje viacero modelov snažiacich sa určiť tvar DS, vzájomne sú nekoherentné. Medzi prvé uvažované tvary DS patrila rovinná stena [19], [26], kónická [27] a stena rúrkovitého tvaru - úprava z kónickej [28]. Medzi najnovšie modely, vychádzajúce z riešenia Landau-Lifshitzovej rovnice patria rovinná a kónická DS, ako aj ohnutá rovinná, deformovaná kónická a vortexová DS [23]-[25].

Najčastejšie uvažované tvary DS pri mikrodrôtoch sú rovinná (Obr. 2) a kónická DS (Obr. 3). Pre nanodrôty je to vortexový tvar DS [22].



Obr. 2 Rovinný tvar DS [4].

Kvôli tendencii znižovania magnetostatickej energie (v dôsledku rozptyľového poľa v blízkosti DS medzi odlišne zmagnetovanými doménami) vznikajú predĺžené DS. Zvýšenie energie DS však obmedzuje tento proces a z energetickej rovnováhy sa zistí dĺžka DS L (Obr. 3) [27]. Dva tvary DS, ktoré vyhovujú valcovej symetrii sú schematicky znázornené na Obr. 3. Tieto modely sú podstatné pre pohyb DS v nehomogénnych podmienkach tlmiacej sily – napr. v dôsledku vírivých prúdov.



Obr. 3 Dva typy DS s valcovou symetriou [18].

V okolí pohybujúcej sa DS (head-to-head resp. tail-to-tail) sa indukujú vírivé prúdy, ktoré vytvárajú nehomogénne tlmiace pole, ktorého intenzita je maximálna v strede mikrodrôtu a minimálna až rovná nule na povrchu mikrodrôtu. Ako je

schématicky zobrazené na Obr. 3 nehomogénne tlmenie od poľa vírivých prúdov je pre DS pohybujúcu sa konštantnou rýchlosťou kompenzované zmenami zakrivenia DS (Obr. 3a predĺžením, Obr. 3b skrátením DS).

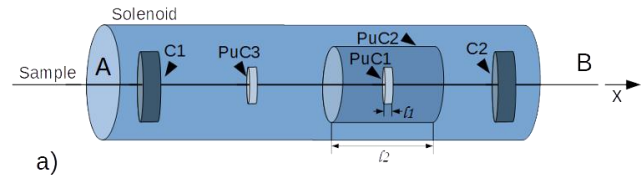
Predĺženie DS zapríčinené zvýšením rýchlosti (Obr. 3a) môže pri určitej hodnote kritického poľa viesť ku kolapsu DS [29], [30]. Naopak, skracovanie DS na Obr. 3b účinkom rastúcej rýchlosti nevedie ku kolapsu [18]. [20], [21], [31] a vo vyšších poliach možno očakávať vznik a šírenie tohto tvaru DS [18], [29], [30].

III. EXPERIMENT

A. Experimentálne usporiadanie

Experimentálne usporiadanie umožňujúce merať rýchlosť DS v poliach nižších ako je štartovacie pole (pole potrebné na uvoľnenie DS z uzatvárajacej doménovej štruktúry) a zároveň merať štyri rýchlosti DS pomocou Sixtus-Tonks metódy (aby bola zistená prítomnosť jednosmerového efektu [32]) boli navrhnuté v [18].

Pre popisovaný experiment bola do klasického Sixtus-Tonks experimentálneho usporiadania pridaná dlhá snímacia cievka PuC2 ako je to schematicky znázornené na Obr. 4a.



a)



b)

Obr. 4 Schematicky znázornené experimentálne usporiadanie a) a skutočný obraz experimentálneho usporiadania bez solenoidu b).

Reálne zobrazenie usporiadania je na Obr. 4b. Sústava cievok je tvorená tromi magnetizačnými (solenoid, C1, C2) a tromi snímacími cievkami (PuC1, PuC2 a PuC3), pričom snímacie cievky PuC1 a PuC2 sú koaxiálne. Parametre snímacích cievok PuC1 a PuC3 sú zhodné (dĺžka snímačnej cievky $l_1 = 0.5$ mm s priemerom 0.25 mm a počtom závitov $z_1 = 25$) a vzdialenosť medzi nimi je 36 mm. Dĺžka snímačnej cievky PuC2 je $l_2 = 20$ mm s priemerom 1 mm a počtom závitov $z_2 = 1360$. Počet závitov a geometria cievok C1 a C2 sú zhodné (dĺžka 5 mm, priemer 0.8 mm). Systém magnetizačných cievok (solenoid, C1, C2) sú používané na uvoľnenie jednej DS z konkrétneho konca mikrodrôtu. Pre podrobné zistenie fungovania a konfigurácie systému magnetizačných cievok (solenoid, C1, C2) pozri [18].

Priemernú rýchlosť pohybujúcej sa DS medzi dvoma snímacími cievkami PuC1 a PuC3 je možné merať pomocou

týchto snímacích cievok pri ich známej vzájomnej vzdialenosti. Meranie lokálnej rýchlosti DS (určené pomocou dlhej snímačkej cievky PuC2) je však pre získanie informácií o geometrii pohybujúcej sa DS dôležitejšie.

Bistabilný sklom pokrytý mikrodrôt s kladnou konštantou magnetostrikcie ($\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{15}\text{B}_{7.5}$ vyrobený Taylor-Ulitovského metódou) s dĺžkou 12.5 cm a polomerom kovového jadra 7.5 μm a hrúbkou skleneného obalu 7.5 μm bol použitý v tomto experimente.

B. Metóda spracovania získaných indukovaných signálov

Inšpiráciou pre navrhnutý experiment bola metóda experimentálneho spracovania dát [14], ktorá umožňuje detekciu zmien geometrie DS pomocou signálov indukovaných v snímacích cievkach. Pre túto metódu je okrem indukovaného signálu z krátkej snímačkej cievky PuC1 potrebná aj hodnota rýchlosti DS. Keďže hodnota rýchlosti určená pomocou Sixtus-Tonksovej metódy medzi dvoma krátkymi snímacími cievkami sa môže líšiť od lokálnej rýchlosti DS v mieste snímačkej cievky produkujúcej analyzovaný signál, navrhli sme použitie kombinácie dvoch snímacích cievok (krátkej PuC1 a dlhej PuC2). Táto kombinácia krátkej a dlhej cievky spĺňa predpoklad, že dlhá snímacia cievka je dostatočne dlhá na to, aby napätie indukované v dôsledku pohybu DS v jej strednej časti bolo priamo úmerné rýchlosti DS a krátka cievka, ktorá je s ňou koaxiálna, je umiestnená zhruba v jej strede. Takéto usporiadanie umožňuje získať lokálnu rýchlosť DS pohybujúcej sa vo vnútri krátkej snímačkej cievky.

Spracovanie indukovaných signálov z oboch cievok je realizované nasledujúcim spôsobom.

Celkové indukované napätie (Faradayov zákon) vo všetkých (n) závitoch snímačkej cievky je možné získať ako

$$u(t) = -v \frac{n}{l} (\Phi_R - \Phi_L) = -v \frac{n}{l} \Delta\Phi, \quad (1)$$

kde $\frac{n}{l}$ je počet závitov na jednotku dĺžky (dostatočne vysoká hustota) a Φ_L , Φ_R sú magnetické toky cez ľavý a pravý koncový závit cievky.

Koaxiálne snímacie cievky PuC1 a PuC2 spĺňajú tieto podmienky

1. krátka snímacia cievka PuC1 s dĺžkou l_1 menšou než rozmer oblasti nehomogénneho magnetického poľa okolo pohybujúcej sa DS.
2. dlhá snímacia cievka PuC2 s dĺžkou l_2 oveľa väčšou ako je rozmer oblasti nehomogénneho magnetického poľa okolo pohybujúcej sa DS.

Rovnicu (1) je vhodné pre krátku snímaciu cievku prepísať ako

$$\frac{u_1}{v}(x) = \frac{-z_1}{l_1} \Delta\Phi_1 \quad (2)$$

Veličina na ľavej strane rovnice vynesená ako funkcia polohy DS x poskytuje informácie o zmenách geometrie DS. Aj keby sa menila rýchlosť DS, tak pre tuhú DS sa táto veličina

nemení. Pre získanie tejto veličiny je potrebné merať signál v krátkej snímačkej cievke u_1 súčasne s rýchlosťou DS, ktorou sa DS pohybuje vo vnútri krátkej snímačkej cievky – lokálnou rýchlosťou. Túto lokálnu rýchlosť možno určiť pomocou rovnice

$$v = \frac{-l_2}{z_2} \frac{u_2}{\Delta\Phi_2} = l_2 \frac{u_2}{\Delta\Phi_{2tot}} \quad (3)$$

kde $\Delta\Phi_2$ predstavuje zmenu magnetického indukčného toku v dlhej snímačkej cievke (v prípade ak je poloha DS dostatočne vzdialená od koncov dlhej snímačkej cievky, tak rozptyľové pole neprispieva k $\Delta\Phi_2$) a $\Delta\Phi_{2tot}$ získame časovou integráciou indukovaného signálu v dlhej snímačkej cievke.

Polohu DS je možné získať z rovnice

$$x = \frac{l_2}{\Delta\Phi_{2tot}} \int_0^t u_2 dt \quad (4)$$

A pomocou rovníc (2) a (3) získame veličinu

$$\frac{\Delta\Phi_1}{l_1} = \frac{-\Delta\Phi_{2tot} u_1}{l_2 z_1 u_2} \quad (5)$$

kde l_1 , l_2 , z_2 sú konštanty, u_1 a u_2 indukované napätia v snímacích cievkach PuC1 a PuC2. S cieľom analyzovať zmeny v geometrii DS počas jej pohybu pri rôznych hodnotách aplikovaného axiálneho magnetického poľa, by mala byť veličina v rovnici (1) vykreslená ako funkcia polohy DS určenej z rovnice (4).

C. Experimentálne výsledky

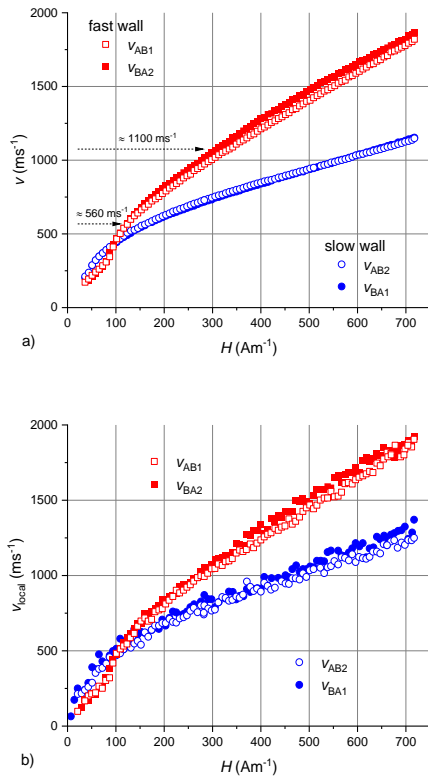
Merania boli uskutočnené na vzorke so silným jednosmerovým efektom, čo dokazujú namerané závislosti rýchlosti od aplikovaného vonkajšieho magnetického poľa Obr. 5a). Rýchlosti pri jednosmerovom efekte spĺňajú podmienku

$$v_{AB1}(H) \approx v_{BA2}(H) \neq v_{AB2}(H) \approx v_{BA1}(H),$$

kde indexy A, B označujú konce vzorky, a teda smer šírenia DS a indexy 1 a 2 predstavujú typ DS (head-to-head, resp. tail-to-tail). DS pohybujúce sa vyššími rýchlosťami v_{AB1} , v_{BA2} (resp. nižšími v_{AB2} , v_{BA1}) v tejto závislosti sú pre jednoduchosť ďalej označované ako rýchle DS (pomalé DS). Priemerné rýchlosti DS získané Sixtus-Tonksovou metódou za použitia dvoch krátkych snímacích cievok PuC1 a PuC3 sú na Obr. 5a. Ako už bolo spomenuté, pri vyhodnocovaní zmien v geometrii DS je lepšie použiť lokálnu rýchlosť DS v mieste snímačkej cievky PuC1. Získané hodnoty lokálnej rýchlosti z indukovaného napätia v dlhej snímačkej cievke PuC2 a za pomoci rovnice (3) sú vykreslené na Obr. 5b. Porovnaním závislosti priemerných a lokálnych rýchlostí vidíme, že sú kvalitatívne rovnaké, avšak lokálne rýchlosti sú o niečo väčšie a viac rozhádzané.

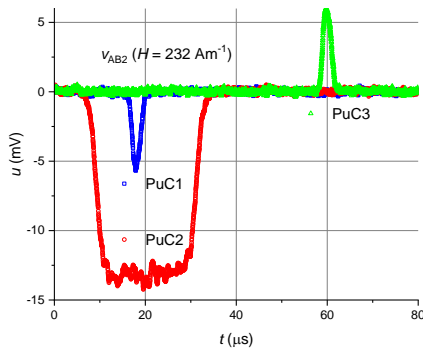
Štandardne merané indukované signály zo snímacích cievok PuC1, PuC2 a PuC3 sú na Obr. 6. Spracovanie týchto signálov pomocou rovníc (4) a (5) poskytuje závislosť $\frac{\Delta\Phi_1}{l_1}$ ako funkcie polohy DS. Takto získané závislosti, pre prípad šírenia sa DS z konca mikrodrôtu A po koniec B pre rýchle aj pomalé DS sú na Obr. 7. Závislosti veličiny $\frac{\Delta\Phi_1}{l_1}$ pri nízkych

a vysokých poliach sú vynesené na Obr. 7a), zatiaľ čo pri rovnakých rýchlostiach DS na Obr. 7b).



Obr. 5 Štyri rýchlosti DS vypočítané metódou Sixtus-Tonks a) a lokálne rýchlosti b) v závislosti na veľkosti aplikovaného magnetického poľa.

Ako bolo spomenuté vyššie, ak by bola DS tuhá (nezmení svoj tvar), tak vykreslené signály veličiny $\frac{\Delta\phi_1}{l_1}$ od polohy x by nemali byť závislé na rýchlosti DS (resp. veľkosti aplikovaného poľa).

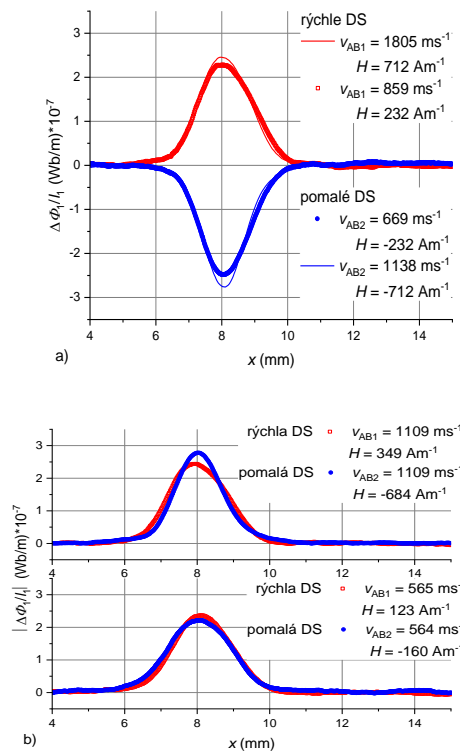


Obr. 6 Namerané indukované signály zo snímacích cievok PuC1, PuC2 a PuC3.

Na Obr. 7 ale vidíme rozdiely pri rôznych hodnotách aplikovaných polí, a to aj pri rovnakej rýchlosti pre rýchle aj pomalé DS. Z toho je zrejmé, že DS nie je tuhým objektom a pri rôznych podmienkach má rôzny tvar. Hodnoty vynesené v závislosti na Obr. 7 môžu byť kladné alebo záporné. Obrátený signál je v dôsledku rôznych typov pohybujúcej sa DS (head-to-head alebo tail-to-tail). Aby sme mohli tieto signály porovnávať, budeme ďalej uvažovať absolútne hodnoty tejto veličiny.

Za predpokladu, že lokálna rýchlosť v krátkej snímačej cievke je konštantná, plocha pod krivkami na Obr. 7 sa nemení, je nezávislá od veľkosti rýchlosti DS. Ak maximálna hodnota signálu klesá, tak jeho šírka sa zväčšuje a naopak. Nízka maximálna hodnota signálu (široký signál) znamená dlhú DS. Vysoká maximálna hodnota signálu (úzky signál) znamená krátku DS. Namerané závislosti na Obr. 7, ukazujú, že DS šíriaca sa menšou rýchlosťou je dlhšia než DS pohybujúca sa väčšou rýchlosťou.

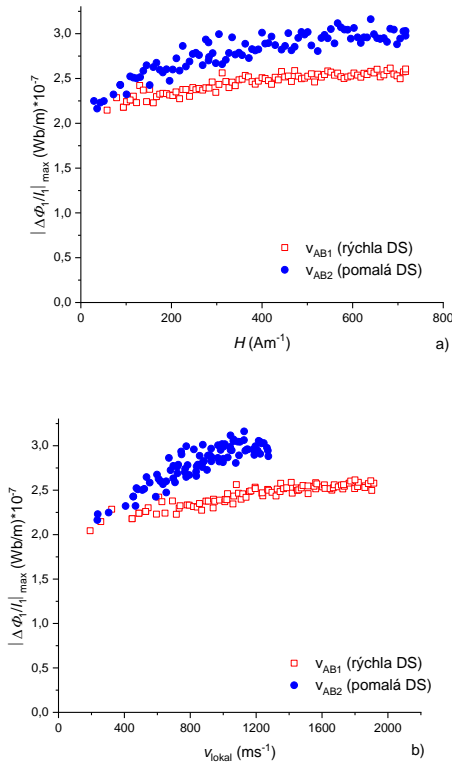
Takto vynesené maximálne hodnoty $\left| \frac{\Delta\phi_1}{l_1}(x) \right|$ pri rôznych aplikovaných magnetických poliach a rôznych rýchlostiach DS sú zobrazené na Obr. 8 pre pomalé aj rýchle DS.



Obr. 7 Závislosti $\frac{\Delta\phi_1}{l_1}$ od polohy pre rýchle (v_{AB1}) a pomalé (v_{AB2}) steny šíriace sa rovnakým smerom pri nízkych a vysokých vonkajších magnetických poliach a). Závislosti $\frac{\Delta\phi_1}{l_1}$ od polohy pre pomalú (v_{AB2}) a rýchlu (v_{AB1}) stenu pri rovnakých rýchlostiach (~ 1109 m/s, ~ 565 m/s) b).

Nárast hodnoty $\left| \frac{\Delta\Phi_1}{I_1} \right|_{max}$ so zvyšujúcou sa rýchlosťou (aplikovaným magnetickým poľom) je možné pozorovať pre rýchlej aj pomalé DS. To naznačuje, že nárast rýchlosti (zvýšenie aplikovaného magnetického poľa) vedie k skráteniu DS v oboch prípadoch.

Zároveň je možné pozorovať vyššie hodnoty $\left| \frac{\Delta\Phi_1}{I_1} \right|_{max}$ pre pomalé DS, a teda účinok magnetického poľa (resp. rýchlosti) je silnejší pre pomalé DS než pre rýchle DS a že pomalá DS by mala byť kratšia než rýchla DS.



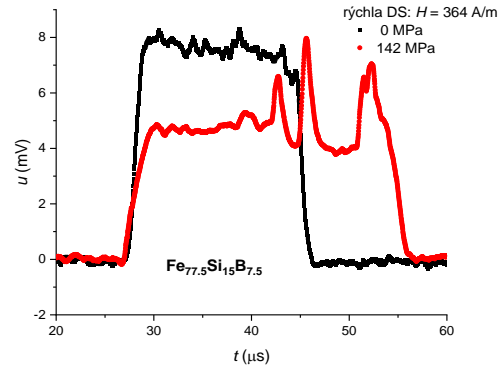
Obr. 8 Maximálne hodnoty $\left| \frac{\Delta\Phi_1}{I_1} \right|_{max}$ ako funkcia aplikovaného magnetického poľa a) a lokálnej rýchlosti DS b).

Nehomogénne magnetické pole od vírivých prúdov by mohlo byť dôvodom zmien v geometrii DS. Ak uvažujeme toto tlmenie za hlavnú príčinu skracovania DS, tak zo základných modelov tvaru DS (rovinný/eliptický a dva kónické na Obr. 3), iba model na Obr. 3b vyhovuje podmienke, že DS nevedie ku kolapsu vo vyšších magnetických poliach a zároveň silnejšie tlmenie vírivých prúdov zapríčini jej skrátenie [18].

So zámerom modifikovania magnetoelastické anizotropie mikrodrôtu, bol skúmaný vplyv axiálneho ťahového napätia a zníženie teploty na geometriu DS:

D. Vplyv ťahového namáhania

Použité bolo rovnaké experimentálne usporiadanie modifikované o úchyt pre aplikáciu axiálneho ťahového napätia. Skúmané boli sklom pokryté mikrodrôty Fe_{77.5}Si₁₅B_{7.5} s jednosmerovým efektom [32] a Fe₆₂Ni_{15.5}Si_{7.5}B₁₅ bez jednosmerového efektu pripravené Taylor-Ulitovskeho metódou.



Obr. 9 Namerané signály indukovaného napätia zo snímačnej cievky bez aplikovaného ťahového napätia (čierna) a s aplikovaným ťahovým napätím (červená) pre vzorku Fe_{77.5}Si₁₅B_{7.5}.

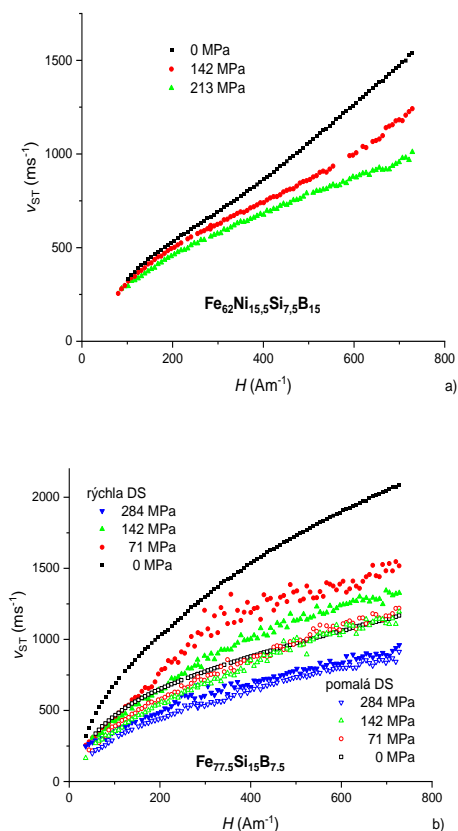
Porovnaním signálov indukovaného napätia v dlhej snímačnej cievke (PuC2) s (červená) a bez (čierna) aplikovaného mechanického ťahového napätia (Obr. 9), boli pozorované dodatočné napät'ové piky pri aplikovanom ťahovom namáhaní

Zaujímavé je, že amplitúdy niektorých dodatočných pikov sú porovnateľné s priemernou hodnotou indukovaného signálu. Pravdepodobne preto, že pozorovaný výrazný rozptyl nameraných hodnôt rýchlosti DS (Sixtus-Tonks) od veľkosti aplikovaného magnetického poľa po aplikovaní ťahového namáhania (Obr. 10b). S rastúcim aplikovaným ťahovým napätím sa $v(H)$ závislosti stávajú menej strmými pre rýchle aj pomalé DS pri meraniach na mikrodrôtoch s jednosmerovým efektom. Pôsobenie ťahového namáhania zvyšuje magnetoelastickú anizotropiu mikrodrôtu, čo spôsobí zvýšenie energie DS na jednotku plochy a jej následné skrátenie. V dôsledku skrátenia DS sa zníži jej pohyblivosť [18]. Rovnaké správanie vykazuje aj $v(H)$ závislosť pre Fe₆₂Ni_{15.5}Si_{7.5}B₁₅ vzorku na Obr. 10a avšak rozptyl bodov pri tejto vzorke nie je až tak výrazný.

Silnejší účinok ťahového namáhania je pri rýchlych DS v prípade vzorky Fe_{77.5}Si₁₅B_{7.5} s jednosmerovým efektom. So zvyšujúcim sa ťahovým namáhaním sa $v(H)$ závislosti pre pomalé a rýchle DS sa navzájom približujú, až sa prekryjú (pri hodnote aplikovaného napätia 284 MPa) a jednosmerový efekt nie je ďalej pozorovaný. Ide však o reverzibilný proces.

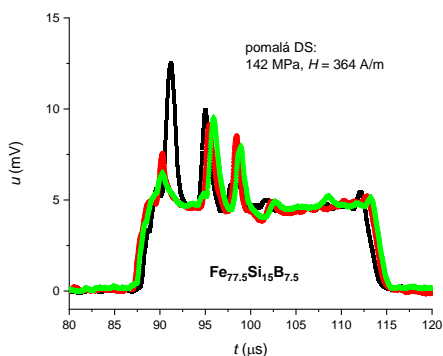
Keďže sú indukované signály zo snímačnej cievky používané na sledovanie zmien v geometrii DS, je evidentné, že kvôli silným lokálnym pikom (Obr. 9) je vyhodnotenie experimentu ťažko realizovateľné. Z tohto dôvodu bola pozornosť venovaná základným vlastnostiam a pôvodu dodatočných pozorovaných lokálnych pikov. Hlavnými

otázkami sú, či majú piky fyzikálny význam a či sú náhodné alebo reprodukovateľné?



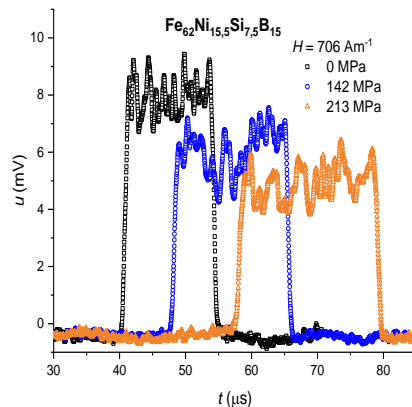
Obr. 10 Závislosti rýchlosti DS od axiálneho magnetického poľa získané pre rôzne hodnoty ťahového napätia aplikovaného na vzorku v axiálnom smere, pre Fe₆₂Ni_{15.5}Si_{7.5}B₁₅ vzorku a) a pre Fe_{77.5}Si₁₅B_{7.5} vzorku pre pomalé (prázdne symboly) a rýchle (plné symboly) DS b).

Aj keď priebehy indukovaných signálov v rôznych aplikovaných poliach pôsobia dojmom náhodnosti, opakované merania (Obr. 11) pri rovnakých podmienkach (poli) sú skôr systematické než náhodné.



Obr. 11 Namerané indukované signály zo snímačovej cievky s aplikovaným ťahovým napätím 142 MPa v magnetickom poli $H = 364 \text{ Am}^{-1}$ (každá farba zodpovedá samostatnému opakovanému meraniu).

Účinky aplikovaného ťahového napätia na signály indukované v dlhej snímačovej cievke pre Fe₆₂Ni_{15.5}Si_{7.5}B₁₅ vzorku sú zobrazené na Obr. 12. Pozorované sú podobné výrazné variácie indukovaného napätového signálu, ako pri Fe_{77.5}Si₁₅B_{7.5} vzorke, len častejšie a s nižšími amplitúdami.



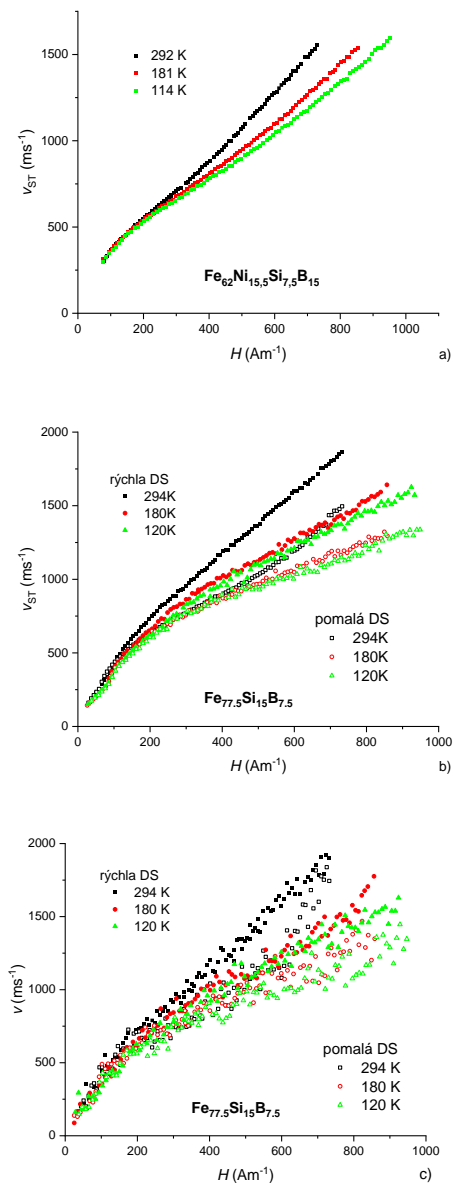
Obr. 12 Namerané signály indukované v snímačovej cievke s aplikovaným ťahovým napätím vo vzorke Fe₆₂Ni_{15.5}Si_{7.5}B₁₅.

E. Vplyv nízkej teploty

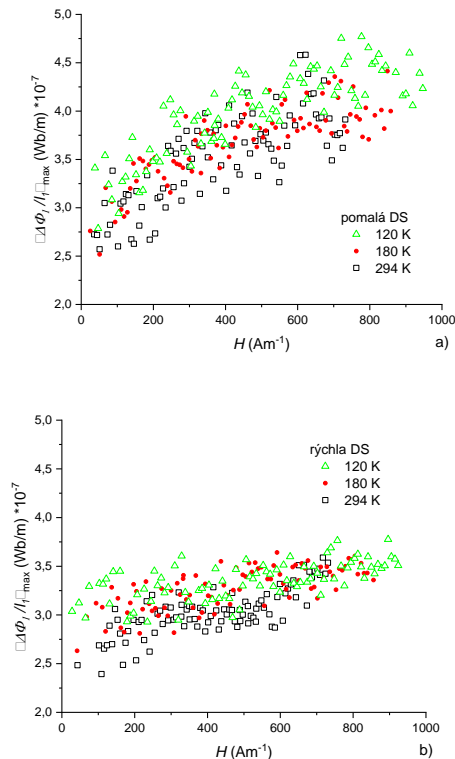
Pre teplotné merania sme systém cievok vložili do aparatury na meranie teplotných závislostí [33]. Zníženie teploty zvyšuje intenzitu vnútorných napätí vo vzorke [21], [33]. Priemerné (Sixtus-Tonks) rýchlosti DS Obr. 13a), b) a vypočítané lokálne rýchlosti DS Obr. 13c) ako funkcie aplikovaného magnetického poľa pre tri rôzne teploty sú zobrazené pre rovnakú Fe₆₂Ni_{15.5}Si_{7.5}B₁₅ vzorku ako pri ťahových meraniach a pre Fe_{77.5}Si₁₅B_{7.5} vzorku, kde bol použitý iný kus vzorky toho istého zloženia ako pri aplikácii ťahového napätia. Rýchlosť DS klesá s klesajúcou teplotou u oboch vzoriek. Ak za zdroj ťahového napätia v kovovom jadre pri znížení teploty uvažujeme rozdiel medzi koeficientmi tepelnej rozťažnosti skla a kovu, tak interpretácia klesajúcej rýchlosti DS môže byť založená na rovnakom mechanizme ako pri priamom účinku ťahového napätia. Jemný rozptyl bodov vo $v(H)$ závislosti bol pozorovaný pri znížení teploty. Nie je však porovnateľný s rozptylom bodov pri priamej aplikácii ťahového napätia. Účinok zníženia teploty na jednosmerový efekt je podobný ako pre priame aplikovanie napätia. Pomocou SAMR metódy [34] bola experimentálne určená zmena axiálneho ťahového napätia z izbovej teploty na 120 K (čo predstavuje podmienky teplotných meraní nášho experimentu) na približne 100 MPa. Ak si v predchádzajúcej časti všimneme maximálne priame aplikované ťahové napätia, tak 100 MPa predstavuje zhruba len jednu tretinu tohto maxima. Pravdepodobne je to možný dôvod menej výrazných účinkov teploty.

Z vynesných maximálnych hodnôt $\left. \frac{\Delta\phi_1}{I_1} \right|_{max}$ ako funkcie aplikovaného magnetického poľa pre pomalé a rýchle

DS (Obr. 14) je pozorované zýšenie hodnoty $\left| \frac{\Delta\phi_1}{l_1} \right|_{max}$ s rastúcim magnetickým poľom. To opäť naznačuje, že zvýšením aplikovaného magnetického poľa sa DS skracuje. Vyššie hodnoty $\left| \frac{\Delta\phi_1}{l_1} \right|_{max}$ pre pomalú DS ako pre rýchlu DS a silnejší účinok magnetického poľa pre pomalú DS naznačujú, že pomalá DS je kratšia než rýchla DS. Aj napriek veľkému rozptylu hodnôt na Obr. 14. Je tendencia rastu $\left| \frac{\Delta\phi_1}{l_1} \right|_{max}$ hodnôt so znižujúcou sa teplotou evidentná. To znamená, že s klesajúcou teplotou sa znižuje aj axiálny rozmer DS (čo je v súlade aj s klesajúcou rýchlosťou DS pri znižovaní teploty).



Obr. 13 Priemerné (Sixtus-Tonks metódou) rýchlosti DS a), b) a vypočítané lokálne rýchlosti DS c) ako funkcie aplikovaného magnetického poľa pre tri rôzne teploty.



Obr. 14 Maximálne hodnoty $\left| \frac{\Delta\phi_1}{l_1} \right|_{max}$ v závislosti na aplikovanom magnetickom poli pre pomalé a) a rýchle b) DS.

IV. ZÁVER

V príspevku je predstavený experiment a metóda spracovania dát pre skúmanie priestorového rozloženia axiálneho magnetického toku okolo šíriacej sa DS v bistabilných mikrodrôtoch. Spracované namerané dáta priniesli informácie o skracovaní DS s rastúcim aplikovaným poľom. Pomalá DS vo vzorke s jednosmerovým efektom je viac tlmená a mohlo by to vysvetľovať jednosmerový efekt pozorovaný v bistabilných mikrodrôtoch. Prezentovaný je aj vplyv aplikovaného axiálneho ťahového napätia a nízkej teploty na geometriu DS.

POĎAKOVANIE

Tento výskum bol podporený Agentúrou na výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-16-0079, grantom VEGA č. 1/0250/21 od Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva SR a grantom FEI v rámci zmluvy č. FEI-2022-89 udelená Technickou univerzitou v Košiciach

LITERATÚRA

[1] M. Vazquez, H. Kronmuller, S. Parkin (Eds.), Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials, vol. 4, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 2007, pp.1–34.
 [2] A. Zhukov, V. Zhukova, „Magnetic Properties and Applications of Ferromagnetic microwires with Amorphous and Nanocrystalline Structure (Nova)“, Science Publishers Inc, Hauppauge (2009), p.12.

- [3] M. Vázquez, H.Chiriac, A. Zhukov, L. Panina, T. Uchiyama, „On the state of the art in magnetic microwires and expected trends for scientific and technological studies“ in *Phys. Status Solidi A* 208 (2011) 493–501. <https://doi.org/10.1002/pssa.201026488>
- [4] M. Kladvivová, J. Ziman, „Properties of a domain wall in a bi-stable magnetic microwire“, *J. Magn. Magn. Mater.* 480 (2019) 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.058>
- [5] P. A. Ekstrom, A. Zhukov, „Spatial structure of the head-to-head propagating domain wall in glass-covered FeSiB microwire“, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (2010) 205001 (6pp). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/20/205001>
- [6] H. Chiriac, T. A. Ovari, „Amorphous glass covered magnetic wires: preparation, properties, applications“, *Prog. Mater. Sci.* 40 (1996) 333–407. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(97\)00001-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(97)00001-7)
- [7] S. V. Larin, A. Torcunov, A. Zhukov, J. González, M. Vazquez, L. Panina, „Preparation and properties of glass-coated microwires“, *J. Magn. Magn. Mater.* 249 (2002) 39–45. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00501-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00501-2)
- [8] H. Chiriac, T.A. Óvari, G.h. Pop, „Internal stress distribution in glass-covered amorphous magnetic wires“, *Phys. Rev. B* 52 (1995) 10104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.10104>
- [9] R.Sabol, M. Rovnak, P.Klein, „Mechanical stress dependence of the switching field in amorphous microwires“, *IEEE Transactions on Magnetics* 51 (2015) 1-4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2357580>
- [10] K. Mohri, F.R. Humphrey K. Kawashimay K. Kimura and M. Mizutani, „Large Barkhausen and Matteucci effect in FeCoSiB, FeCrSiB, and FeNiSiB amorphous wires“, *IEEE Transactions on Magnetics*, 26 (1990). <https://doi.org/10.1109/20.104526>
- [11] J. Sixtus, L. Tonks, „Propagation of large Barkhausen discontinuities“, *Phys. Rev.*, 37 (1931) 930–959. DOI: 10.1103/PhysRev.37.930
- [12] K. J. Sixtus, L. Tonks, „Propagation of large Barkhausen discontinuities“ – II, *Phys.Rev.*, 42 (1932) 419e435. DOI: 10.1103/PhysRev.42.419
- [13] J. Horniaková, „Skúmanie vlastností amorfných bistabilných mikrodrôtov pomocou malouhlovej rotácie magnetizácie“, Košice 2019, 54 s.
- [14] M. Kladvivová, J. Ziman, P. Duranka, „Axial domain wall dimension in a bistable glass-coated microwire“, *Acta Physica Polonica A* 137 (2020) 855–857. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.855>
- [15] Alejandro Jiménez, Rafael P. del Real, and Manuel Vazquez, „Controlling depinning and propagation of single domain-walls in magnetic microwires“, *Eur. Phys. J. B.* 86 (2013) 113. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2013-30922-9>
- [16] S. A. Gudoshnikov, Yu. B. Grebenshchikov, B. Ya. Ljubimov, P. S. Palvanov, N. A. Usov, M. Ipatov, A. Zhukov, and J. Gonzalez, „Ground state magnetization distribution and characteristic width of head to head domain wall in Fe-rich amorphous microwire“, *Phys. Status Solidi A* 206 (2009) 613–617. <https://doi.org/10.1002/pssa.200881254>
- [17] M. Kladvivová, J. Ziman, J. Kecer, P. Duranka, „Study of Axial Dimension of Static Head-to-Head Domain Boundary in Amorphous Glass-Coated Microwire“, *Acta Physica Polonica A* 131 (2017) 639–641. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.639>
- [18] J. Onufer, J. Ziman, P. Duranka, M. Kladvivová, „The influence of annealing on domain wall propagation in bistable amorphous microwire with unidirectional effect“, *Physica B: Condensed matter* 540 (2018) 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.04.011>
- [19] D.-X. Chen, N. M. Dempsey, M. Vtiguez, and A. Hemando, „Propagating Domain Wall Shape and Dynamics in Iron-Rich Amorphous Wires“, *IEEE Transactions on Magnetics* 31 (1995) 781. <https://doi.org/10.1109/20.364597>
- [20] Fabio Beck, Josué Neroti Rigue, and Marcos Carara, „Effect of Electric Current on Domain Wall Dynamics“, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49 (2013) 4699. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2259803>
- [21] P. Duranka, J. Onufer and J. Ziman, „Effect of Temperature on Domain Wall Dynamics in Magnetic Microwire“, *AIP Conference Proceedings* 1996 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5048860>
- [22] A. Janutka, Przemyslaw Gawronski, „Structure of magnetic domain wall in cylindrical microwire“, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (2015). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2374555>
- [23] A. Janutka, „Effect of spin transfer via eddy current on propagating domain wall in ferromagnetic microwire“, *IEEE Transactions on Magnetics* 56 (2020). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.2990530>
- [24] M. Vereshchagin, I. Baraban, S. Leble, V. Rodionova, „Structure of head-to-head domain wall in cylindrical amorphous ferromagnetic microwire and a method of anisotropy coefficient estimation“, *J. Magn. Magn. Mater.* 504 (2020) 166646. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166646>
- [25] M. Vereshchagin, „Structure of domain wall in cylindrical amorphous microwire“, *Physica B: Condensed matter* 549 (2018) 91–93. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.10.065>
- [26] J.E.L. Bishop, *IEEE Trans. Magn.* 13, 1638 (1977)
- [27] L.V. Panina, M. Ipatov, V. Zhukova, A. Zhukov, „Domain wall propagation in Fe-rich amorphous microwires“, *Physica B* 407 (2012) 1442–1445.
- [28] R.C. O’Handley, *J. Appl. Phys.* 46, 4996 (1975)
- [29] W. J. Carr Jr., „Magnetic domain wall bowing in a perfect metallic crystal“, *J. Appl. Phys.* 47 (1976) 4176.
- [30] M. Kladvivová, J. Ziman, „Velocity and profile of the boundary between circular domains in cylindrical ferromagnetic samples“, *J. Mag. Mater.* 299 (2) (2006), pp. 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.05.008>
- [31] F. Beck, J.N. Rigue, M. Carara, „The profile of the domain walls in amorphous glass-covered microwires“, *J. Magn. Magn. Mater.* 435 (2017) 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.03.003>
- [32] J.Onufer, J. Ziman, M. Kladvivová, „Unidirectional effect in domain wall propagation observed in bistable glass coated-microwire“, *J. Magn. Magn. Mater.* 396 (2015) 313–317, DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.08.055
- [33] J. Onufer, J. Ziman, M. Rezníčák and S. Kardoš, „The Influence of Temperature on Unidirectional Effect in Domain Wall Propagation“, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, No. 4, Vol. 131 (2017).
- [34] P. Duranka, J. Ziman, J. Onufer and S. Kardoš, „Magnetoelastic Anisotropy in Glass-Coated Microwires Studied using SAMR Method“, *Proceedings of the 17th Czech and Slovak Conference on Magnetism, Košice, Slovakia, ACTA PHYSICA POLONICA A*, No. 5, Vol. 137 (2020). DOI: 10.12693/APhysPolA.137.868

Plne optické komunikačné siete

Tomáš Huszaník

Department of Electronics and Multimedia
Communications,
Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical
University of Košice,
Košice, Slovakia
tomas.huszanik@tuke.sk

Ján Turán

Department of Electronics and Multimedia
Communications,
Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical
University of Košice,
Košice, Slovakia
jan.turan@tuke.sk

Abstrakt—Informačno-komunikačné technológie dnes dominujú v životoch ľudí a neustále sa zvyšujúce požiadavky na dostupnosť online služieb a technológií stavia výskumníkov a konštruktérov do nových výziev. Vďaka požiadavke mať obľúbené online služby dostupné kedykoľvek a kdekoľvek sa prenosové komunikačné systémy v posledných dvadsiatich rokoch vo veľkej miere pretransformovali. Dnes, z pohľadu spoľahlivosti a rýchlosti prenosu, sú optické vláknové komunikačné systémy vedúcou technológiou na poli prenosových systémov. Optické vláknové komunikačné systémy dnes tvoria chrbticové siete a v podstate na nich závisí chod všetkých online služieb. To, čo robí optické vlákno takým neprekonateľným prenosovým médium v porovnaní s metalickými či bezdrôtovými médiami, je šírka pásma, ktorá je prakticky neobmedzená. Keďže sa dáta prenášajú vo forme svetelnej vlny, nie sú signály prenášané optickým vláknom ovplyvňované elektromagnetickým rušením. Vlnové multiplexovanie (WDM – Wavelength Division Multiplexing) je technológia, ktorá umožnila prenos obrovského množstva dát vysokou prenosovou rýchlosťou jedným optickým vláknom. Exponenciálne rastúci dopyt po prenosovej kapacite vo vysokorýchlostných prenosových systémoch na dlhé vzdialenosti prinútil optické vláknové komunikačné technológie, aby si ako životaschopné riešenie osvojila systém multiplexovania s hustým vlnovým delením DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Pre maximalizáciu výkonu takýchto optických sietí sa kritickou oblasťou výskumu stali vhodné stratégie návrhu komunikačného systému na optimalizáciu parametrov súvisiacich s prenosom dát v rámci vlastností kanála. Kapacita optického kanála je zvyčajne ovplyvnená tvarom signálu, disperznými a nelineárnymi charakteristikami optického vlákna. Predmetom tejto práce je návrh a analýza 32-kanálového Ultra-DWDM systému s adaptáciou rôznych vysokospektrálnych modulácií, ako nástrojom na regulovanie nežiaduceho vplyvu lineárnych a nelineárnych javov, ktoré sú hlavným faktorom, ktorý limitujú kapacitu a prenosovú vzdialenosť optického komunikačného systému.

Abstract—Today, information and communication technologies dominate in people's lives, and the relentless demand for the availability of online services and technologies puts researchers and designers in new challenges. Due to the requirement to have popular online services available anytime and anywhere, transmission communication systems have largely been transformed in the last twenty years. Today, in terms of reliability and transmission speed, optical fiber communication systems are the leading technology in the field of transmission

systems. Today, optical fiber communication systems form backbone networks and, in essence, the operation of all online services depends on them. What makes an optical fiber such an unbeatable transmission medium, compared to metallic or wireless media, is the bandwidth, which is practically unlimited. Since the data is transmitted in the form of a light wave, the signals transmitted by the optical fiber are not affected by electromagnetic interference. Wavelength Division Multiplexing (WDM) is a technology that has enabled the transmission of huge amounts of data at high transfer rates over a single optical fiber. The exponentially growing demand for transmission capacity in high-speed long-distance transmission systems has forced optical fiber communication technology to adopt a Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) multiplexing system as a viable solution. To maximize the performance of such optical networks, appropriate strategies for the design of a communication system to optimize parameters related to data transmission within the channel characteristics have become a critical area of research. The capacity of an optical channel is usually affected by the shape of the signal, the dispersive and non-linear characteristics of the optical fiber. The subject of this paper is the design and analysis of a 32-channel Ultra-DWDM system with adaptation of various high-spectral modulations as a tool to control the adverse effects of linear and nonlinear effects, which are the main factor limiting the capacity and transmission distance of optical communication system.

Key words—DWDM; EDFA; nelineárne javy; optické modulácie; ROA; SOA; Ultra-DWDM

I. ÚVOD

V posledných niekoľkých desaťročiach inovácie optických komponentov, subsystémov, systémov a sietí umožnili uspokojiť rastúci dopyt po sieti, ktorá je výsledkom aplikácií s vysokou šírkou pásma, ktoré vyžadujú koncoví užívatelia. Dnes používané 40 až 80 kanálové optické komunikačné systémy s prenosovou rýchlosťou 10 Gb/s len s ťažkosťami splňajú požiadavky na vysokokapacitné prenosové systémy. Už v tomto čase sú v procese vývoja optické komunikačné systémy novej generácie schopné pracovať pri dátovej rýchlosti 40 až 100 Gb/s na kanál určené pre diaľkové prenosy, zatiaľ čo v prípade prístupových sietí sú cieľom rozhrania pre 10 Gb/s prístup. Očakáva sa, že v blízkej budúcnosti bude dátový prenos vďaka rýchlo rastúcemu využívaniu vysokorýchlostných online služieb a

širokopásmových aplikácií, ako sú telepresence, televízia s vysokým rozlíšením (HDTV), telekonferencie, telemedicína, atď. rásť exponenciálne. Tento trend naďalej tlačí širokopásmovú komunikačnú infraštruktúru do vyšších prenosových rýchlostí, väčšej kapacity a dlhšieho dosahu bližšie ku koncovému používateľovi.

S úspešnou komercializáciou systémov WDM (Wavelength Division Multiplexing) a príchodom hustého WDM (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) bola optická prenosová sieť (OTN – Optical Transmission Network) štandardizovaná medzinárodnou telekomunikačnou úniou (ITU-T) ako základná infraštruktúra siete. To umožňuje správu služieb s použitím viacerých rôznych vlnových dĺžok svetla pri prenose rovnakými optickými vláknami. To umožňuje sieť prenášať obrovské množstvo dát, ktoré sú potrebné pre mnohé súčasné a budúce komunikačné služby a aplikácie. Technológia WDM bola prvýkrát nasadená ako bod-bod systém, v ktorom sa optické vlákno použilo ako priama náhrada, v tom čase na poli prenosových médií dominujúcej medenej linky. Pre tento vývojový stupeň WDM systémov bolo charakteristické, že prepínanie a spracovanie dát prebiehalo v elektrickej podobe, a teda optický signál prenášaný optickým vláknom bol konvertovaný v každom bode siete (prepínač alebo router) na elektrický signál. Kľúčový zlom na poli optických komunikačných sietí nastal koncom 90-tych rokov a začiatkom nového tisícročia. Hlavným dôvodom bolo prvé nasadenie úplne nového DWDM systému a ďalších technológií, ktoré nakoniec označujeme druhou generáciou optických sietí, v ktorých sa funkcie zabezpečenia a obnovy presunuli do optickej časti siete [1][2].

DWDM systémy si našli uplatnenie aj v transoceánskych optických sieťach. Hlavným predstaviteľom moderného DWDM systému je transoceánska linka TAT-14 (15 428 km), prvýkrát spustená v roku 2001, spájajúca východné pobrežie USA so Spojeným kráľovstvom, Francúzskom, Holandskom, Nemeckom a Dánskom. TAT-14 je navrhnutý pre maximálnu prenosovú kapacitu 9,38 Tb/s. V súčasnosti na tejto linke operuje DWDM systém a podporuje rozhrania STM-1, STM-4 a STM-16. Momentálne je kapacita systému 3,2 Tb/s – 2 x 4 páry optického vlákna x 40 kanálov 10Gb/s DWDM [3][4]. Optické komunikačné systémy novej generácie už však budú operovať na prenosovej rýchlosti 40–100 Gb/s. Dopyt po multimédiách exponenciálne rastie, a preto je potrebné DWDM systémy uspôsobiť tak, aby tieto nároky zvládli. Na maximalizovanie potenciálu DWDM sietí je potrebné analyzovať vlastnosti prenosového média a optimalizovať všetky parametre systému. Optický kanál je zvyčajne najviac ovplyvnený tvarom signálu, disperznými a nelineárnymi charakteristikami prenosového média. Obzvlášť problematický je simultánny prenos viacerých optických kanálov pri vysokej prenosovej rýchlosti. Tieto degradačné vplyvy sú škodlivé vo viackanálovom optickom prenose, najmä pri vyššej dátovej rýchlosti za prítomnosti nelineárnych javov. Preto, aby sa využila čo najlepšie prenosová kapacita systému s najnižšou degradáciou signálu, dôležitým problémom sa stáva dôkladné pochopenie, modelovanie a

charakterizovanie správania viackanálových optických systémov v rôznych prevádzkových prostrediach. Hlavnými faktormi, ktoré v značnej miere limitujú viackanálový prenos optickými vláknami, sú optické lineárne a nelineárne javy, v dôsledku ktorých narážame na obmedzenia v oblastiach prekenuiteľnej vzdialenosti systému, použiteľného vysielačieho výkonu, prenosovej rýchlosti na kanál či samotnej kapacity systému. S nástupom novej generácie optických komunikačných sietí je potrebné preskúmať nové možnosti v návrhu DWDM systémov. V optických sieťach novej generácie sa však už nepočíta s niektorými technológiami známymi z predošlej generácie. Jednou z týchto technológií je aj optická modulácia [5-7].

II. NÁVRH POKROČILÝCH MODULAČNÝCH FORMÁTOV PRE ULTRA-DWDM SYSTÉMY

V konvenčnom optickom komunikačnom systéme sa poruchy spôsobené nelinearitou, ako sú XPM (Cross-Phase Modulation) a FWM (Four Wave Mixing), môžu riadiť zvyškovou lokálnou disperziou vlákna alebo úpravou kanálového odstupe na dostatočne veľkú hodnotu. Je zrejmé, že disperzia je lineárny proces. Disperzia akumulovaná pozdĺž prenosového vlákna sa môže vyrovnáť vykonávaním disperznej kompenzácie buď periodicky pozdĺž spoja, alebo na konci prijímača pomocou DSP modulu. Avšak kompenzácia na strane prijímača zvyšuje zložitosť v porovnaní so systémami, ktoré používajú optické vlákna s relatívne menšími hodnotami disperzie. Alternatívou je zvýšenie odstupe kanálov, čo však zhoršuje využitie šírky pásma, čo vedie k nižšej účinnosti spektra. Hlavným účelom rozmiestnenia kanálov dostatočne ďaleko od seba alebo použitím vlákien s primeranou disperziou je potlačenie porúch vznikajúcich v medzikanálovom priestore. Určitá interkanálová interakcia medzi disperziou a nelineárnymi javmi však stále existuje a spôsobuje zhoršenie výkonu na danom kanáli. Aj keď disperzia môže byť kompenzovaná až na požadovanú úroveň, riadenie nelineárnych javov vlákien je pre výskumníkov stále výzvou. Interakcia medzi disperziou a nelineárnymi javmi (XPM a FWM) pozdĺž hlavného prenosového vlákna spôsobuje lokálnu fázovú degradáciu tvaru vlny aj v disperznej kompenzovanom spoji. Z prieskumu literatúry sme zistili, že degradácia signálu v rámci kanála sa dá minimalizovať, ak má vysielačný signál nejakú zvláštnu charakteristiku. To vedie k zaujímavej možnosti skúmať výber niektorých nových formátov optickej modulácie smerom k zmierneniu vplyvu nelineárnych javov vo vlákne [8-12].

Jedným z dôležitých problémov pri návrhu systému je porozumieť kódovanej impulzovej odozve v kanáli, ktorá má určité špecifické vzory. Optická spektrálna šírka pásma signálu, tolerancia voči chromatickej disperzii, odolnosť proti nelineárnemu presluchu, citlivosť na nahromadený šum a ďalšie opatrenia týkajúce sa výkonu systému sú v skutočnosti priamo spojené s formátom optickej modulácie. Aby sa minimalizovali lineárne aj nelineárne javy prenosového vlákna, je potrebný optimálny modulačný formát. Modulačný formát s úzkym optickým spektrom môže

zvýšiť spektrálnu účinnosť a tolerovať väčšie skreslenie vplyvom CD. Modulačný formát s konštantným optickým výkonom môže byť menej citlivý na SPM a XPM. Naopak modulačný formát s viacerými úrovňami signálu bude prenášať viac informácií ako binárne signály a jeho dlhšie trvanie symbolov zníži skreslenie vyvolané CD a PMD [13-16].

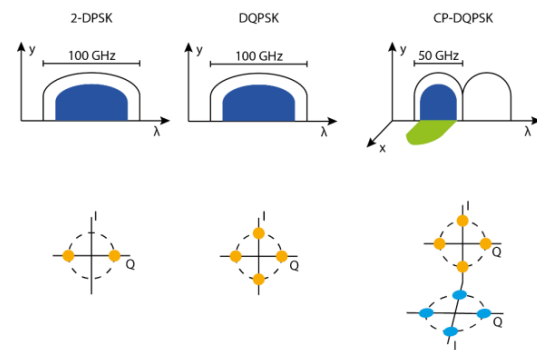
V našej výskumnej činnosti sme sa zaoberali niekoľkými optickými modulačnými formátmi pre systémy DWDM a Ultra-DWDM. Pre účely analýzy vplyvu lineárnych a nelineárnych javov sme vychádzali z dobre známych optických modulačných formátov, napr. NRZ/RZ-OOK, 2-DPSK či DQPSK, ktoré sme modifikovali tak, aby sme dosiahli požadované vlastnosti (vzhľadom na požadované hodnoty BER a Q-faktoru) pre systémy Ultra-DWDM s prenosovými rýchlosťami 40 Gb/s, 112 Gb/s a 400 Gb/s na kanál.

Pre DWDM systémy operujúce s prenosovou rýchlosťou 40 Gb/s na kanál sme zvolili nasledovné modulačné formáty: NRZ-OOK, RZ-OOK, CSRZ-OOK, Duobinary a modifikovaný Duobinary. CSRZ-OOK je pseudo-viacúrovňový modulačný formát a vyznačuje sa obrátením znamienka optického poľa pri každom bitovom prechode. Znižuje vplyv nelineárnych javov v kanáli a zlepšuje spektrálnu účinnosť v systémoch s vysokou bitovou rýchlosťou. Optické duobinárne a modifikované duobinárne modulačné formáty sa tiež ukázali ako rozumné voľby, pretože majú vysokú toleranciu voči CD, lepšiu nelineárnu toleranciu a môžu prejsť úzkopásmovým optickým filtrovaním, sú teda vhodné pre medzikanálové odstupy menšie ako 100 GHz, aby sa zlepšila spektrálna účinnosť. Ďalej je ľahké ich implementovať, pretože zmeny vo vysielaní sú relatívne malé a prijímač ostáva nezmenený – IM/DD. Celkové nastavenie systému s intenzívnymi modulačnými formátmi (NRZ/RZ, CSRZ, DUOBINARY) je jednoduchšie v porovnaní s inými konkurenčnými formátmi, ako sú DPSK a DQPSK, ktoré vyžadujú úpravy na vysielaní a prijímači, čo ďalej zvyšuje systémové náklady a zložitosť. Na druhej strane tieto formáty fázovej modulácie umožňujú prenosy na väčších prenosových rýchlostiach a taktiež dosahujú väčšiu spektrálnu účinnosť. Znižujú tiež účinky SPM a XPM, čo vedie k zníženiu skreslenia signálu, ktoré sa hromadí v optickom signáli prenášanom cez optické vlákno, a preukázalo sa, že je silným kandidátom pre systémy Ultra-DWDM [17-20]. Systémy DWDM s prenosovou rýchlosťou 112 Gb/s sme analyzovali s modulačnými formátmi DPSK a DQPSK s rôznymi modifikáciami na dosiahnutie požadovaných vlastností za účelom zvýšenia spektrálnej účinnosti a potlačenia nelineárnych javov.

III. SIMULAČNÝ MODEL ULTRA-DWDM SYSTÉMU

V tejto kapitole sa zameriame na štúdium výkonnosti modulačného formátu DPSK a DQPSK pre systém DWDM. Porovnanie týchto modulácií je zobrazené na Obr. 1 a porovnanie základných vlastností je v Tab. 1. Oba tieto formáty preukázali veľmi sľubné výsledky pri zavádzaní

technológie 40 Gb/s do existujúcich 10 Gb/s DWDM prenosových infraštruktúr [21][22]. Keďže experimentálne a praktické výsledky modulačných formátov DPSK a DQPSK s prenosovou rýchlosťou 40 Gb/s sú už dobre známe, budeme naše experimenty optimalizovať pre prenosové rýchlosti 112 Gb/s, čo sa považuje za nový budúci štandard pre budúce Ultra-DWDM systémy. Aj keď tieto schémy vyžadujú komplexnú architektúru prijímača v porovnaní s metódou IMDD, poskytujú významné zlepšenie citlivosti prijímača. V tejto kapitole je najskôr skúmaná vhodnosť formátu modulácie DPSK pre optické spojenie DWDM s dlhou vzdialenosťou navrhnutím simulačného modelu 32-kanálového prenosového Ultra-DWDM systému. Ďalej je v prostredí Optisystem navrhnuté spojenie s 32 kanálmi s prenosovou rýchlosťou 112 Gb/s založené na DQPSK. Nasledujúce sekcie predstavujú funkčné architektúry vysieláčov založených na DPSK a DQPSK použité v simulačnej štúdií.



Obr. 1. Optické modulácie vhodné pre DWDM systémy s prenosovou rýchlosťou viac ako 112 Gb/s na kanál

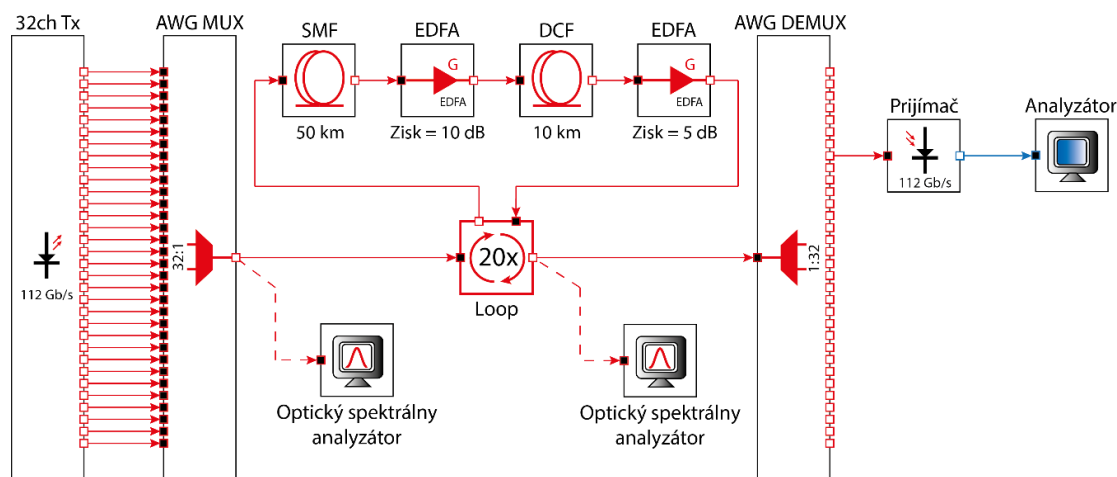
Tab. 1. Porovnanie optických modulácií

Modulácia	NRZ/RZ- OOK	2- DPSK	DQPSK	CP- DQPSK
Koherentná/nekoherentná	Nekoh.	Nekoh.	Nekoh.	Koh.
Počet bitov na symbol	1	1	2	2x2
Symbolová rýchlosť (Gdb/s)	112	112	56	28
Odporúčaný DWDM rozostup (GHz)	200	100	100	50
Kompatibilita s 10G a 40G	áno	áno	áno	áno

Návrh Ultra-DWDM systému prebiehal nasledovne: začali sme návrhom jednocanálového optického spojenia využívajúceho modulačné formáty DPSK a DQPSK pri prenosovej rýchlosti 112 Gb/s, navrhnutého pre optimálny výkon. Potom sa počet kanálov postupne zvýšil na 32 s kanálovým odstupom 100 GHz, aby sa dosiahla celková kapacita 3,584 Tb/s. Simulačná analýza bola vykonaná v C-pásme (1 530 nm – 1 565 nm) pre jednovidové optické vlákno s uvažovaním nelineárnych javov. Navrhovaná schéma 32 kanálového systému Ultra-DWDM je znázornená na Obr. 2

so strednou frekvenciou prvého kanála 193,0 THz. V literatúre boli tieto formáty skúmané s kanálovým odstupom 50 GHz a 100 GHz, ale s menším počtom kanálov alebo pri prenosovej

rýchlosti 10 Gb/s a 40 Gb/s. V tejto práci sú vybrané fázové modulácie študované pri prenosovej rýchlosti 112 Gb/s.



Obr. 2. Navrhnutý simulačný model 3,584 Gb/s Ultra-DWDM systému

Kombinovaný optický signál sa privádza do SMF, pričom sa berie do úvahy jednosmerný tok signálu, stimulovaný Ramanov rozptyl, Kerrova nelinearita a disperzia. Usudzuje sa, že skalárny model oboch segmentov vlákien neguje účinok PMD. SMF má útlm 0,22 dB/km, hodnotu disperzie $D = 17$ ps/km/nm a disperzným sklonom $S = 0,08$ ps/nm²/km pri 1550 nm, nelineárny index lomu $n_2 = 2,6 \times 10^{-20}$ m²/W a bola uvažovaná účinná plocha jadra vlákna A_e je 80 μm^2 . Konštrukcia prenosového spojenia sa uskutočňovala pomocou techniky periodického riadenia disperzie, pričom vlákna s normálnym a anomálnym GVD sa kombinujú, aby vytvorili disperznú mapu tak, že GVD je lokálne vysoká po celej dĺžke spojenia, ale udržuje celkovú nízku priemernú hodnotu. CD je kompenzovaná metódou *post-compensation*. Segment DCF použitý v každom rozpätí má útlm 0,5 dB/km, $D = -85$ ps/km/nm, $S = -0,45$ ps/nm²/km pri 1 550 nm, $n_2 = 2,6 \times 10^{-20}$ m²/W a $A_e = 30$ μm^2 . Celková simulovaná dĺžka optického spojenia je 1000 km.

Vysielač DWDM pozostáva z generátora pseudonáhodnej bitovej postupnosti (PRBS), CW laserov, optických a elektrických modulátorov a optického multiplexora. Generátor PRBS generuje bitové sekvencie rýchlosťou 112 Gb/s, dĺžka sekvencie je 6 5536 bitov a symbolová rýchlosť 28×10^9 symbolov za sekundu. Celková kapacita navrhnutého Ultra-DWDM systému je teda 3,584 Tb/s. Emisné frekvencie CW lasera sú rovnomerne rozmiestnené a nachádzajú sa v rozmedzí 193,0 – 196,1 THz s frekvenčným odstupom 100 GHz medzi susednými kanálmi v prípade DPSK a DQPSK modulácií a 193,0 – 194,05 THz s frekvenčným odstupom 50 GHz v prípade CP-DQPSK. Hlavný typ modulátora je MZM. Extinkčný pomer MZM je nastavený na 30 dB. Vysielací výkon sa líši v závislosti od modulácie a je špecifikovaný v konkrétnej analýze dosiahnutých výsledkov. Optické signály z 32 takýchto dátových modulátorov sa privádzajú do 32 vstupných portov optického multiplexora AWG. Aby sa

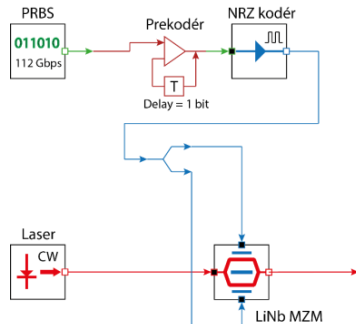
zabezpečilo oddelenie medzi kanálmi vo frekvenčnej oblasti, pred multiplexovaním sa každý kanál opticky filtruje optickým filtrom s úzkym prenosom. Tu sme uvažovali Gaussovský filter druhého rádu so šírkou pásma 100 GHz, resp. 50 GHz v prípade CP-DQPSK. Kanálové rozostupy a prevádzkové vlnové dĺžky sú definované v štandardoch ITU-T.

Prijatý signál je demultiplexovaný a následne demodulovaný v príslušných demodulátoroch a detektoroch, ktorých štruktúra bude približená v nasledujúcich častiach práce. Analýza signálu prebieha v elektrickej doméne, z prijatých diagramov oka boli vypočítané príslušné hodnoty BER a Q-faktor. Vzhľadom na vysoký počet kanálov, nie je analyzovaný každý kanál osobitne. Vo zverejnených výsledkoch sa zaoberáme vždy najhorším prípadom – t.j. vyberáme najvyššie dosiahnuté hodnoty BER pre každý prípad.

A. Modulácie typu DPSK

Obr. 3 zobrazuje blokovú schému vysielača NRZ-DPSK. Signál je najskôr diferencne kódovaný podobne ako pri duobínarnej modulácii, čím sa predíde šíreniu chýb, ku ktorým môže dôjsť diferencálnym dekódovaním v prijímači. Tento DPSK kódovaný elektrický signál sa potom používa na pohon elektro-optického fázového modulátora na generovanie DPSK optického signálu. Digitálna 1 je predstavovaná fázovou zmenou π medzi po sebe nasledujúcimi dátovými bitmi v optickom nosiči, zatiaľ čo medzi po sebe nasledujúcimi dátovými bitmi v optickom nosiči neexistuje žiadna fázová zmena pre symbol 0. Veľmi dôležitou vlastnosťou NRZ-DPSK je to, že jej optický výkon je vždy konštantný. Optické pole sa však posúva medzi „1“ a „-1“ (alebo fázové posuny medzi „0“ a „ π “). V dôsledku toho v jeho optickom spektre neexistuje nosná zložka, na rozdiel od prípadu NRZ-OOK, ktorý má silnú nosnú zložku. Intuitívne, kvôli jeho konštantnému optickému výkonu, by výkon NRZ-DPSK

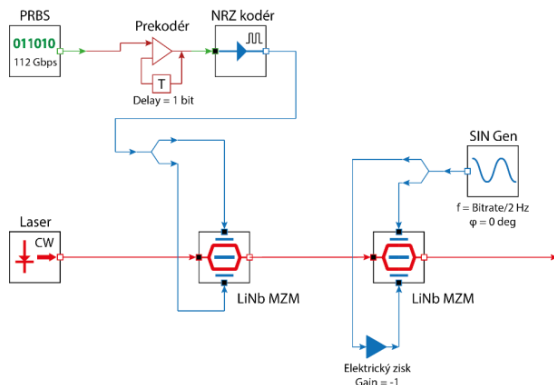
nemal byť ovplyvňovaný nelineárnymi javmi súvisiacimi s optickým výkonom, ako sú SPM a XPM. Ak sa však vezme do úvahy chromatická disperzia, tento záver nie je úplne pravdivý. Fázové modulácie sa dajú pomocou GVD previesť na moduláciu intenzity a potom môžu SPM a XPM do určitej miery prispieť k skresleniu tvaru vlny. V systémoch s DPSK na veľké vzdialenosti s optickými zosilňovačmi je nelineárny fázový šum obvykle obmedzujúcim faktorom. Niekoľko článkov preukázalo, že optické modulácie PSK alebo DPSK sú citlivé na nelineárny fázový šum, jav nazývaný Gordon-Mollenaurov efekt.



Obr. 3. Simulačný model NRZ-DPSK

V prípade RZ-DPSK sme na generovanie DPSK modulovaného signálu použili kaskádne zapojenie dvoch MZM, ako v prípade NRZ-DPSK. Bloková schéma RZ-DPSK vysieláča je na Obr. 4. Komplexné elektrické pole v základnom pásme označujeme $E(t)$. Vzťah medzi vstupným a výstupným elektrickým poľom v každom MZM použitom v našom modulátore ($i = 1, 2$) je:

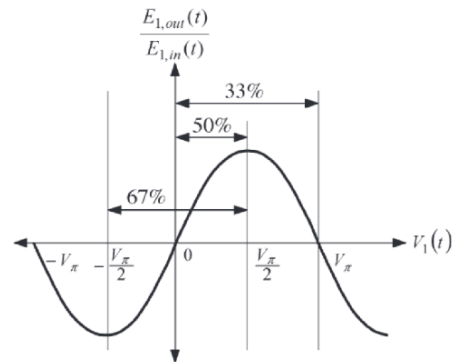
$$E_{i,out}(t) = E_{i,in}(t) \sin\left(\frac{\pi V_i(t)}{2V_\pi}\right), \quad (1)$$



Obr. 4. Simulačný model RZ-DPSK

V závislosti od typu MZM, $V_i(t)$ reprezentuje budiace napätie v prípade SD-MZM (Single-Drive MZM) alebo algebraický rozdiel medzi budiacimi napätiami DD-MZM (Dual-Drive

MZM), ktoré musia byť komplementárne, aby sa vytvoril nulový chirp. Pre obidva typy modulátorov predstavuje V_π zmenu vo $V_i(t)$, ktorá je potrebná na zmenu intenzity z minima na maximum. Predpokladáme, že prvý modulátor – známy ako pulse carver – je poháňaný sínusovou vlnou $V_1(t)$, aby vytvoril optickú impulznú vlnu. Druhý modulátor moduluje NRZ elektrický signál vlny $V_2(t)$. Pri našich experimentoch predpokladáme, že modulátor dát má nekonečnú modulačnú šírku pásma. V závislosti od napätia $V_1(t)$ sínusového generátora môžeme produkovať rôzne varianty RZ-DPSK signálu s pracovným cyklom 33 %, 50 % a 66 %, ako to je zobrazené na Obr. 5.



Obr. 5. Prenosová charakteristika modulátora 2 naznačujúca odchýlku tvaru vlny $V_1(t)$ pre generovanie impulzných tvarov RZ s pracovným cyklom 33 %, 50 % a 66 %

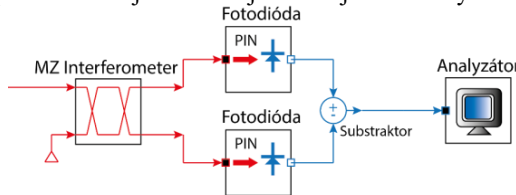
Kritickým prvkom v akomkoľvek systéme DPSK je demodulátor, ktorý prevádza fázovú moduláciu na intenzitnú moduláciu pre detekciu v prijímači pomocou fotodiódy. Demodulovanie signálov PSK vyžaduje znalosť fázy nosiča, aby sa obnovili informačné bity. Ak kanál indukuje fázové rotácie alebo skreslenia, je potrebná technika na odhadnutie fázy nosiča pri prijíme. To sa dosahuje pomocou synchronného optického nosiča, ktorý sa obnovuje v prijímači, takže informácie o absolútnej fáze sa môžu správne extrahovať bez dvojznačnosti. Toto sa nazýva koherentná detekcia, ktorá ponúka vysokú citlivosť prijímača, ale vyžaduje nákladné a zložité komponenty vrátane optických fázových slučiek a zariadení na porovnávanie fáz. Za predpokladu, že fázové rotácie indukované kanálom sú pomalšie ako symbolová rýchlosť, t. j. účinky kanála sa môžu považovať za konštantné najmenej pri dvoch symboloch, demodulovanie sa môže zjednodušiť použitím diferenciálneho kódovania informácií. Nosič potom nemusí byť regenerovaný a namiesto toho je možné použiť nekoherentné autonómne (interferometrické) detekčné schémy.

V schéme prijímača DPSK, je diferenciálna fázová modulácia konvertovaná na moduláciu amplitúdy pomocou interferometra Mach-Zehnderovho oneskorovacieho vedenia (MZDI), ktorý koreluje každý bit so svojim susedom a uskutočňuje konverziu z fázy na intenzitu. Demoduluje diferenciálne fázové rozhranie medzi každým dátovým bitom a jeho nástupcom, ktorý implementuje diferenciálne dekódovanie DPSK modulácie. Rozdeľuje signál na dve

kópie, oneskoruje jednu kópiu o jednu bitovú periódu ΔT a potom ju kombinuje s druhým ramenom, aby vytvoril optické rušenie. Funkcia prenosu MZDI je definovaná prostredníctvom:

$$u_{\pm}(t) = r(t) \pm \exp(j\Delta\phi)r(t - \Delta T), \quad (2)$$

kde $u_{\pm}(t)$ je konštruktívna a deštruktívna zložka, $r(t)$ je vstupný signál a $\Delta\phi$ je fázový rozdiel medzi oboma ramenami interferometra. Fázový rozdiel ($\Delta\phi$) je ideálne rovný 0 alebo $\pm\pi$. Toto je možné pochopiť tak, že sa v prípade tohto fázového posunu a nemodulovaného vstupného signálu vyskytuje deštruktívna interferencia na jednom z výstupov a konštruktívna interferencia na druhom výstupe. Preto sa výstupné porty MZDI označujú ako konštruktívny a deštruktívny port. Pre konštruktívny port, keď sú dva po sebe idúce bity vo fáze, sa pridávajú do MZI a výsledkom je vysoká úroveň signálu; v opačnom prípade, ak je medzi fázami rozdiel π fáz, navzájom sa rušia v MZI a výsledkom je nízka úroveň signálu. V deštruktívnom prípade je to naopak. Konštruktívny aj deštruktívny výstupný port MZDI nesie úplné informácie o signáli DPSK. Preto postačuje detekcia iba konštruktívneho alebo deštruktívneho výstupu. Toto je známe ako detekcia s jedným koncom (z angl. „single-ended detection“). Aby sa však dosiahlo zlepšenie DPSK o 3 dB v porovnaní s OOK moduláciou, je potrebné signál detegovať na oboch výstupných portoch MZDI súčasne. Toto je známe ako vyvážená detekcia, ktorá používa dve fotodiódy nasledované diferenciálnym zosilňovačom. Takýto prijímač sme použili v našej simulačnej štúdii a je zobrazený na Obr. 6.



Obr. 6. Simulačný model DPSK prijímača

B. Modulácie typu DQPSK

Kvôli rozdielnej povahe dekódovania v DQPSK je potrebná funkcia predkódovania na zabezpečenie priameho mapovania dát zo vstupu na výstup, pričom sa zabezpečí, aby prijaté dátové toky boli identické s pôvodnými prenášanými dátovými tokmi. Predkodér pre vysieláč DQPSK pracuje s taktovacím kmitočtom, ktorý je polovicou celkovej rýchlosti prenosu dát. Pretože signál DQPSK sa skladá z dvoch ortogonálnych obrazcov, mali by byť známe vzorce I aj Q . DQPSK predkodér bol implementovaný do simulačnej štúdie. Pri použití predkodéra sa pôvodné vstupné dátové signály U_k a V_k mapujú na fázové zmeny $\Delta\Phi_k$. Fázová zmena zodpovedá fázovému rozdielu medzi súčasnou fázou Φ_k a predchádzajúcou fázou Φ_{k-1} . Tento fázový rozdiel obsahuje prenášané informácie, ktoré sa dajú extrahovať v prijímači dekódérom DQPSK. Funkčná prevádzka predkodéra DQPSK je opísaná z hľadiska logických funkcií takto:

$$I_k = V_k \oplus \overline{I_{k-1}Q_{k-1}} + U_k \oplus (I_{k-1}\overline{Q_{k-1}}), \quad (3)$$

$$Q_k = U_k \oplus \overline{I_{k-1}Q_{k-1}} + V_k \oplus (I_{k-1}Q_{k-1}), \quad (4)$$

kde U_k a V_k sú pôvodné vstupné binárne dátové toky, I_k a Q_k sú predkódované dátové toky po prekódovaní, I_{k-1} a Q_{k-1} sú verzie bitového oneskorenia výstupov predkodéra I_k a Q_k . Dva predkódované signály I_k a Q_k sa používajú na pohon MZM na generovanie optických signálov DQPSK.

Optický DQPSK modulátor je tvorený generátorom pseudonáhodnej binárnej sekvencie (PRBS), ktorý generuje pseudonáhodnú bitovú sekvenciu s bitovou rýchlosťou 112 Gb/s. Dáta sú potom prekódované pomocou 4-DPSK predkodéra a následne elektricky modulované pomocou modulátora NRZ. Signál NRZ je potom modulovaný dvoma MZM. V jednom z ramien je optický fázový modulátor, ktorý vytvára ortogonálny signál k druhému ramenu modulátorovej štruktúry, a tak vytvára komponent I (vo fáze) a Q (kvadratúrny). Optická nosná vlna je generovaná laserom s postupnou vlnou (CW). Indukovaný fázový rozdiel medzi dvoma ramenami IQ modulátora je vyjadrený nasledujúcou rovnicou:

$$\Delta\varphi_I(t) = \frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi \quad \Delta\varphi_Q(t) = \frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi, \quad (5)$$

kde $\Delta\varphi_I(t)$ a $\Delta\varphi_Q(t)$ sú fázy I a Q ramien, $u_I(t)$ je napätie aplikované na ramená modulátorov LiNbO₃ MZM a V_π je hnacia amplitúda na prepínanie predpätí. Prenosová funkcia navrhnutého DQPSK modulátora je:

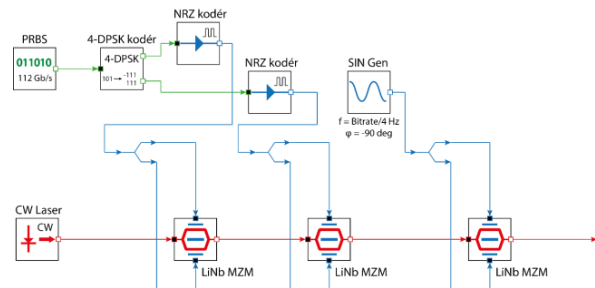
$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\varphi_I(t)}{2}\right) + j \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\varphi_Q(t)}{2}\right). \quad (6)$$

Potom amplitúdová modulácia $A_{IQM}(t)$ a fázová modulácia $\varphi_{IQM}(t)$ DQPSK modulátora je:

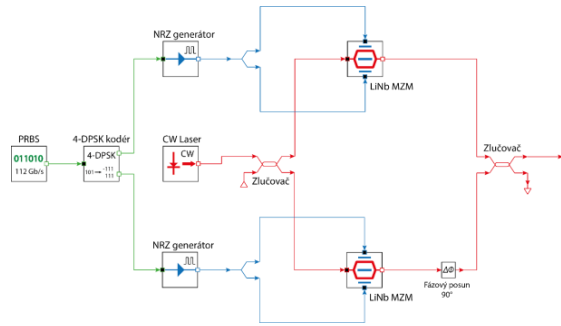
$$A_{IQM}(t) = \left| \frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} \right| = \frac{1}{2} \sqrt{\cos^2\left(\frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi\right) + \cos^2\left(\frac{u_Q(t)}{V_\pi} \pi\right)}, \quad (7)$$

$$\varphi_{IQM}(t) = \arg \left[\cos^2\left(\frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi\right) \cdot \cos^2\left(\frac{u_Q(t)}{V_\pi} \pi\right) \right]. \quad (8)$$

Optický DQPSK modulátor možno realizovať v dvoch verziách: v sériovom zapojení (Obr. 7) alebo v paralelnom zapojení (Obr. 8).



Obr. 7. 112 Gb/s sériový DQPSK modulátor



Obr. 8. 112 Gb/s paralelný DQPSK modulátor

Kombinovaný efekt nelineárnych javov a CD zodpovedá časovo-frekvenčnému skresleniu prenášaných optických impulzov. CD ovplyvňuje amplitúdu a šírku optického spektra prenášaného optického impulzu. Nelineárne javy ako SPM a XPM nemajú vplyv na obálku impulzov. Tento príspevok CD a nelineárnych javov vedie k časovo-frekvenčnému skresleniu. Korekcia prenosu ovplyvnená časovo-frekvenčným skreslením sa môže uskutočniť zavedením transformácie, ktorá koriguje časovo-frekvenčnú rotáciu. Túto korekciu je možné vykonať pomocou frakčnej Fourierovej transformácie (FrFT – Fractional Fourier Transformation). FrFT je založená na konvenčnej Fourierovej transformácii (FT). FT sa široko používa v rôznych oblastiach. Umožňuje transformovať signál z časovej domény na frekvenčnú doménu. Koncept konvenčnej Fourierovej transformácie je veľmi dobre známy. Funkcie f a F sú Fourierova transformačná dvojica, ak:

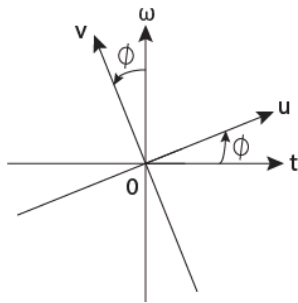
$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(v)e^{i2\pi vx} dv \tag{9}$$

$$F(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i2\pi vx} dx. \tag{10}$$

Frakčná Fourierova transformácia je všeobecnou formou konvenčnej Fourierovej transformácie. Frakčná Fourierova transformácia sa dá definovať ako:

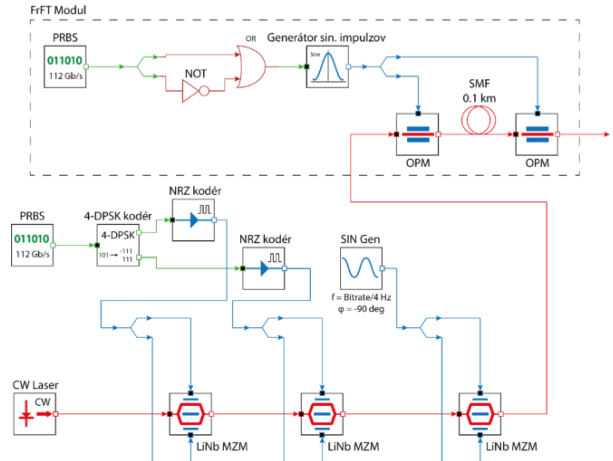
$$X_{\phi}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)K_{\phi}(t, u)dt, \tag{11}$$

V rovnici (91) je $\phi=p(\pi/2)$, p je rád FrFT. Ak $\phi=\pi/2$, FrFT zodpovedá konvenčnej FT. FrFT s parametrom ϕ možno vidieť ako uhol rotácie v časovo-frekvenčnej rovine (Obr. 9).



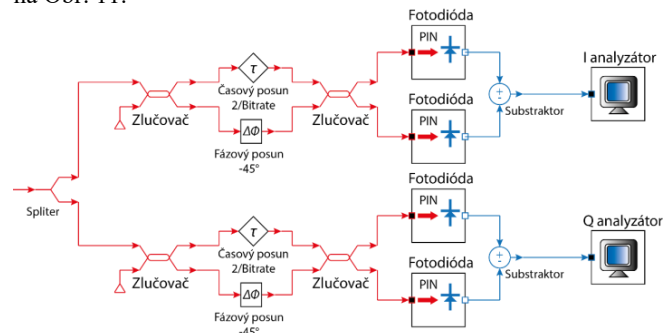
Obr. 9. Uhol rotácie v časovo-frekvenčnej rovine

FrFT sa teda vykonáva ako operácia rotácie časovo-frekvenčnej distribúcie. Ak je rotácia $\phi = 0$, pri použití FrFT nedôjde k žiadnej zmene a $\phi = \pi/2$ sa rovná FT. Modul FrFT sa skladá z dvoch optických fázových modulátorov a disperzného optického média, ako je znázornené na Obr. 10. Dva optické fázové modulátory sú poháňané periodickým parabolickým elektrickým signálom a disperzným médiom (optické vlákno), ktoré môžu fungovať ako filter, ktorý vykonáva aproximovanú operáciu konvolúcie.



Obr. 10. FrFT-DQPSK modulátor

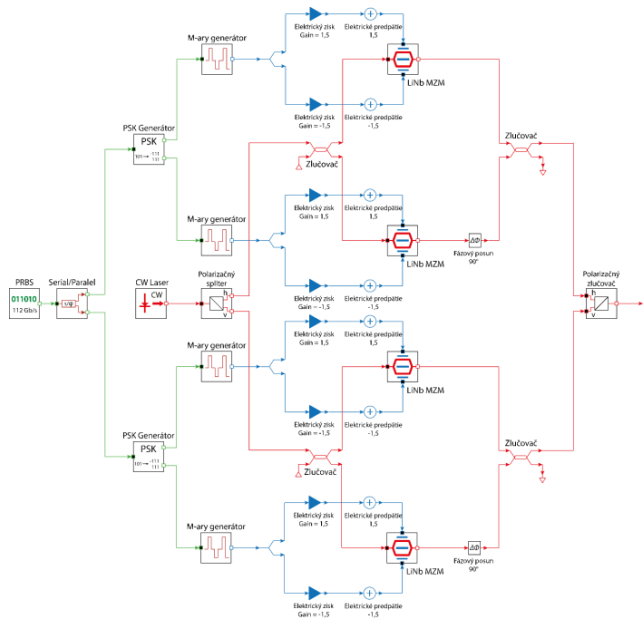
Prijímanie OOK modulovaných signálov sa uskutočňuje pomocou jedinej fotodiódy. Demodulovanie signálov DQPSK je komplexnejšie. Na detekciu zmeny fázy, ktorá je nanesená na optickú nosnú, sa používa dvojitý Mach-Zehnderov interferometer (MZI) na prevod fázových zmien na elektrické signály. Tento interferometer sa skladá z dvoch demodulátorov s oneskorením jedného symbolu DBPSK (Dual Binary Phase Shift Keying) s fázovým posunom $\pm \pi/4$. Prijímač DQPSK sa teda môže považovať za dva bitovo synchronizované prijímače DPSK; jeden pre každý z dvoch stavov DQPSK (I a Q). Bloková schéma DQPSK prijímača je na Obr. 11.



Obr. 11. DQPSK prijímač

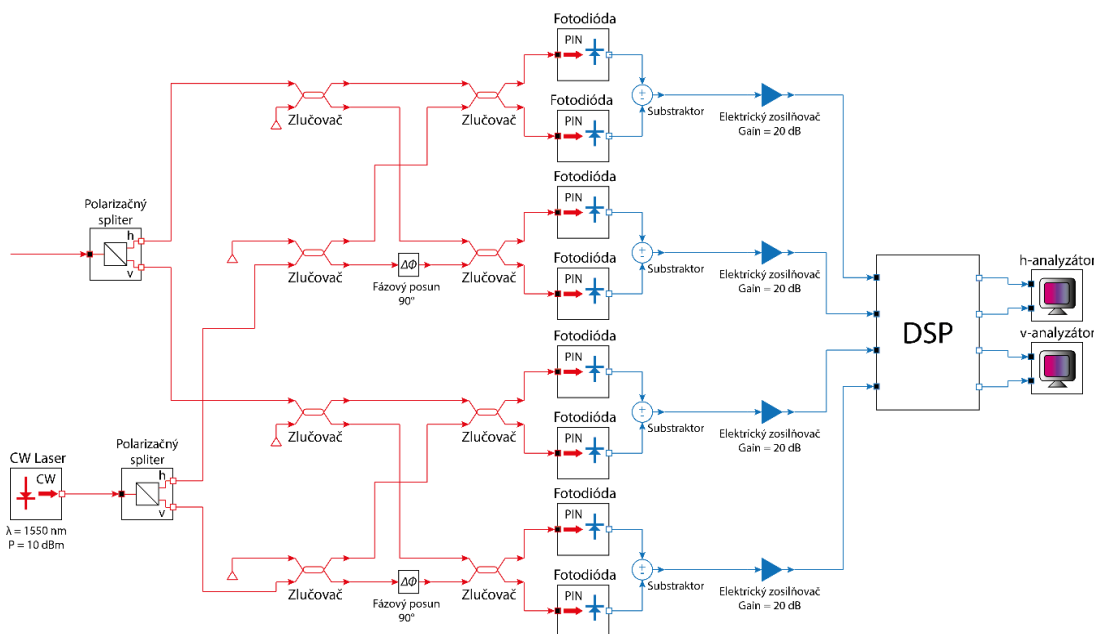
Modulovaním dátového streamu na viacero polarizačných stavov v rámci signálu o jednej frekvencii, resp. vlnovej dĺžky je veľmi sľubná metóda ako zvýšiť kapacitu DWDM systému.

Takouto moduláciou je CP-DQPSK. Schéma simulačného modelu CP-DQPSK je na Obr. 12.



Obr. 12. Simulačný model 112 Gb/s CP-DQPSK

Konfigurácia CP-DQPSK modulátora je nasledovná: svetlo CW lasera je rozdelené pomocou polarizačného splitera na zložku h (horizontálna polarizácia) a v (vertikálna polarizácia). Každá polovica je modulovaná pomocou DQPSK pomocou vlastného lithiumniobátového (LiNbO₃) duálneho paralelného Mach-Zehnderovho modulátora a tvorí jeden z dvoch polarizačných kanálov. Tieto dva polarizačné kanály sú multiplexované polarizačným kombinátorom, aby produkovali vysielacia s duálnou polarizáciou DQPSK. Modulátory vysielacia sú poháňané 10 Gbaud pomocou štyroch RF ovládačov. Medzikanálové rozostupy navrhnutého Ultra-DWDM systému sú nastavené na 50 GHz, 100 GHz a 200 GHz. Následne je vykonané porovnanie výkonnosti Ultra-DWDM systému. Počas simulácie nie je kompenzovaná PMD. GVD je kompenzovaná tak pomocou vlákna DCF. Prijímač CP-DQPSK, zobrazený na Obr. 13 je koherentný optický prijímač s fázovou a polarizačnou diverzitou. CP-DQPSK principiálne vychádza z DQPSK prijímača. Prijatý optický signál prechádza polarizačným deličom lúčov a duálnym polarizačným optickým 90° hybridom. Tak vzniknú signálové zložky: fázová (I) a kvadráturná (Q) optického poľa na každom z dvoch ortogonálnych polarizácií a vstupujú do štyroch opticko-elektrických (O/E) prevodníkov (PIN).



Obr. 13. CP-DQPSK prijímač

C. Analýza dosiahnutých výsledkov s DPSK

V tejto časti sa podrobnejšie pozrieme na analýzu navrhnutého Ultra-DWDM systému s vybranými fázovými moduláciami. Pre účely analýzy sme navrhli niekoľko experimentov, ktoré otestujú odolnosť navrhnutého Ultra-DWDM systému voči

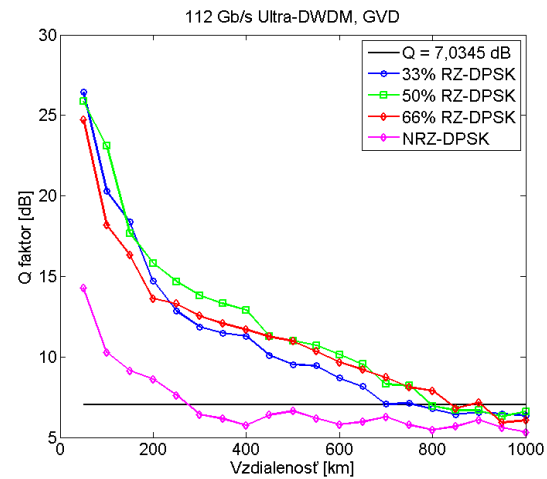
GVD a nelineárnym javom ako hlavnými obmedzujúcimi faktormi. Poruchy spôsobené v dôsledku GVD obmedzujú výkonnosť systému zavedením ISI (intersymbolová interferencia) pri vysokých prenosových rýchlostiach. V prvom kroku sme však museli nastaviť optimálnu hodnotu dĺžky DCF na udržanie

zvyškovej disperzie RDPS (Residual Dispersion-Per-Span). Pomocou optimalizačného doplnku k programovému balíku OptiSystem™ sme v tomto prípade dosiahli 95 % kompenzáciu, čo ďalej zmiernuje vplyv nelineárnych javov FWM a XPM pre systémy s DPSK a DQPSK. Na základe optimalizácií po samotnej simulácii sa vybrala dĺžka DCF pre systém s DPSK 9,992 km a s DQPSK 9,986 km. Toto nastavenie nám umožňuje skúmať navrhovaný Ultra-DWDM systém pri degradáciách vyvolaných GVD, pričom sa ale ignorujú účinky PMD.

Nelineárny jav XPM sa stáva dominantnejším s vyššími hodnotami vysielacieho výkonu. Keďže jav XPM je rovnako ako jav SPM závislý od intezity signálu naviazaného na optické vlákno, sú degradačné účinky XPM dobre viditeľné práve pri zmene vysielacieho výkonu. Východzia hodnota vysielacieho výkonu všetkých simulácií, aby sa zabránilo nelineárnym javom, je 0 dBm. K zmene vysielacieho výkonu dochádza v rozpätí -10 dBm až 20 dBm v prípade systému s DPSK a 0 dBm až 10 dBm v prípade systému s DQPSK. Segment SMF má dĺžku 50 km a DCF 9,992 km pre DPSK systém a 9,986 km pre DQPSK systém. Predpokladáme, že EDFA má hodnotu šumu 3 dB.

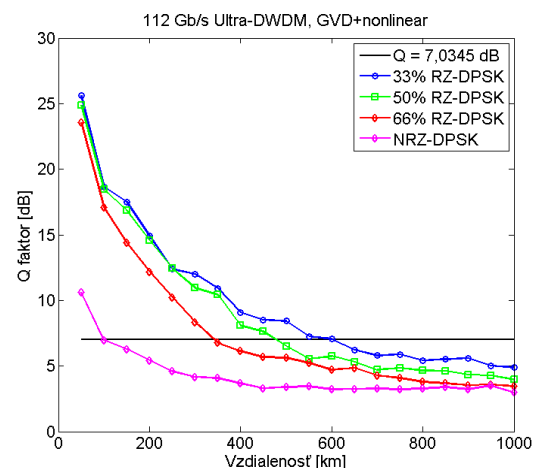
Výkonnosť navrhnutého Ultra-DWDM systému je analyzovaná pomocou diagramov oka prijatých signálov, z ktorých sú následne vypočítané hodnoty BER, Q factor a Eye Opening (otvorenosť oka). Je nutné dodať, že požadované BER pre systémy s PSK je na úrovni $1E-12$, čo zodpovedá hodnote $Q = 7,0345$ dB.

Ako prvé sa pozrieme na 32 kanálový Ultra-DWDM systém s moduláciami typu DPSK. Vysielací výkon na každý kanál bol nastavený na 0 dBm. Prípád s GVD, bez uvažovania nelineárnych javov, je na Obr. 14 a s GVD a nelineárnymi javmi na Obr. 15. Systém s NRZ-DPSK vykazuje spomedzi vyšetrovaných modulačných formátov najnižšie hodnoty Q-faktoru. Maximálna dosiahnuteľná vzdialenosť v GVD limitujúcom systéme je 250 km s hodnotami $BER = 1,27E-14$ a $Q = 7,6196$ dB. RZ-DPSK modulačné formáty vykazujú vyššiu odolnosť voči GVD. V prípade 33 % RZ-DPSK sme dosiahli 750 km vzdialenosť s $BER = 6,62E-12$ a $Q = 7,1032$ dB, systém s 50 % RZ-DPSK dosiahol maximálnu vzdialenosť 800 km a hodnotu $BER = 1,80E-12$ a $Q = 7,0365$ dB, po tejto vzdialenosti už hodnoty BER a Q-faktoru nie sú pre moderné prenosové systémy akceptovateľné. Dosah 900 km sme dosiahli s moduláciou 66 % RZ-DPSK s $BER = 4,88E-12$ a $Q = 7,1531$ dB.



Obr. 14. Závislosť Q-faktoru od prenosovej vzdialenosti Ultra-DWDM systému pre rôzne DPSK modulácie s uvažovaním GVD

Na Obr. 15 je zobrazená rovanká grafická závislosť, ale pre prípad s GVD aj nelineárnymi javmi. Vplyvom nelineárnych javov sa maximálna prenosová vzdialenosť, na ktorú sme schopní prijať BER na úrovni $1E-12$, značne skrátila. Z daných grafických závislostí je možné vidieť, že Ultra-DWDM systém s 33 % RZ-DPSK je najodolnejší voči kombinovanému vplyvu GVD a nelineárnych javov. Tu je nutné pripomenúť, že rozostup kanálov je 100 GHz. Systém s NRZ-DPSK dosiahol hodnoty $BER = 1,15E-12$ a $Q = 6,9761$ dB na vzdialenosti 100 km. Na vzdialenosť 450 km sme dosiahli $BER = 1,20E-14$ a $Q = 7,6270$ dB s 50 % RZ-DSPK. So 66 % RZ-DSPK bola dosiahnutá prenosová vzdialenosť 250 km a $BER = 3,99E-17$ a $Q = 8,3315$ dB. Najvyššiu odolnosť voči GVD a nelineárnym javom preukázala v tomto experimente modulácia 33 % RZ-DPSK s prenosovou vzdialenosťou 600 km a $BER = 8,20E-13$ a $Q = 7,0621$ dB.

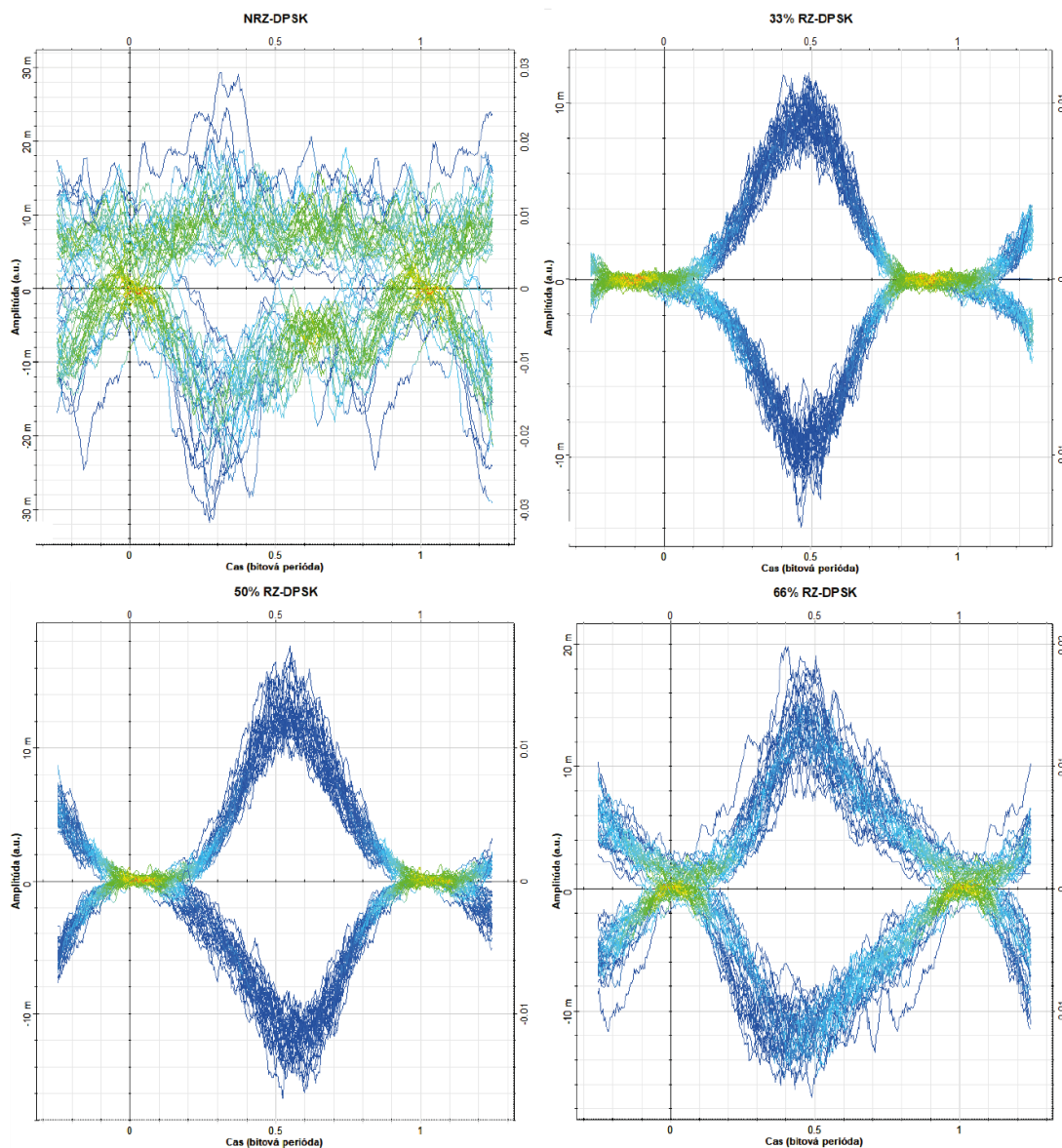


Obr. 15. Závislosť Q-faktoru od prenosovej vzdialenosti Ultra-DWDM systému pre rôzne DPSK modulácie s uvažovaním GVD a nelineárnych javov

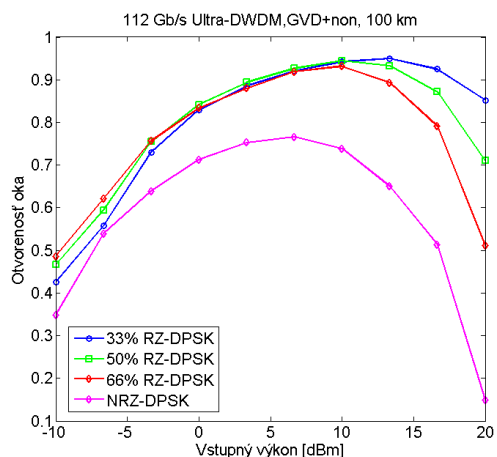
Obr. 16 zobrazuje diagramy oka prijatých signálov jednotlivých modulácií na vzdialenosti 300 km s GVD a nelineárnymi javmi. Vizuálnym znakom, ktorý indikuje dobré BER, je otvorenosť oka. Ako vidieť, v prípade NRZ-DPSK je oko len veľmi málo otvorené, čo značí vysokú hodnotu BER a nízku hodnotu Q-faktora. Naopak modulácie RZ-DPSK majú vysokú otvorenosť oka na danej vzdialenosti. Dôležitá je aj hrúbka samotného oka, ktorú ovplyvňuje prenosová rýchlosť, v tomto prípade 112 Gb/s. Rozmazanie čiar značí prítomnosť šumu.

Otvorenosť oka sa určuje na intervale 0 až 1, kde 1 znamená maximálne otvorenie. V tomto zmysle sme pristúpili k ďalšiemu experimentu. Zmenou vstupného výkonu Ultra-DWDM systému dochádza ku generovaniu nelineárnych javov

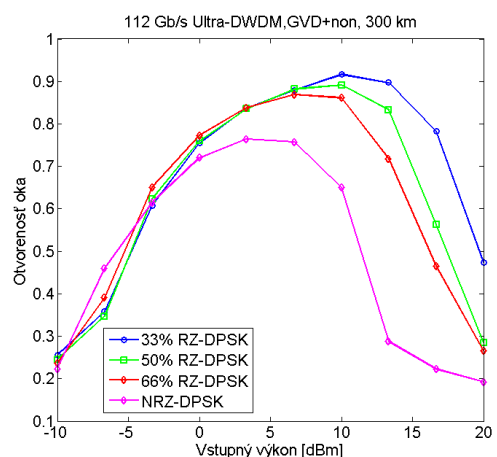
SPM a XPM, ktoré ako už bolo viackrát spomenuté, sú závislé intezity signálu prenášaného optickým vláknom. Zmenou vstupného (vysielacieho) výkonu v rozsahu -10 dBm až 20 dBm sme určili optimálny vysielací výkon pre konkrétny typ modulácie. Na Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 19 sú zobrazené závislosti vstupného výkonu od otvorenosti oka pre vyšetované DPSK modulácie s uvažovaním GVD a nelineárnych javov na vzdialenosti 100, 300 a 400 km. Vo všetkých troch grafoch je možné pozorovať, že približne po prekročení hranice vstupného výkonu 5 dBm otvorenosť oka prestane stúpať a začne postupne klesať. Na základe toho je možné určiť ideálnu hodnotu vstupného výkonu pre konkrétny typ modulácie a špecifickú prenosovú vzdialenosť.



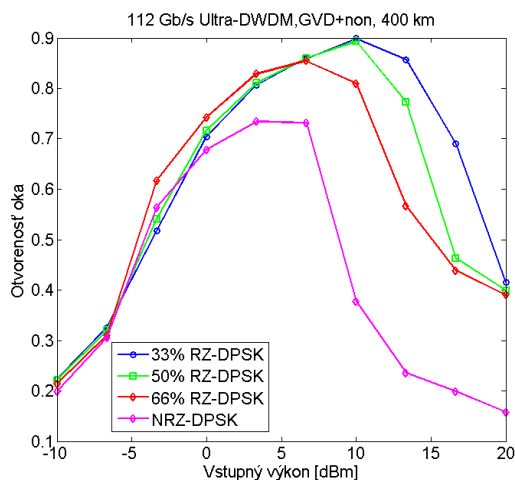
Obr. 16. Diagramy oka prijatého signálu DPSK modulácie pri prenosovej rýchlosti 112 Gb/s na vzdialenosti 300 km s uvažovaním GVD a nelineárnych javov



Obr. 17. Závislosť otvorenosti oka od vstupného výkonu Ultra-DWDM systému na vzdialenosť 100 km



Obr. 18. Závislosť otvorenosti oka od vstupného výkonu Ultra-DWDM systému na vzdialenosť 300 km



Obr. 19. Závislosť otvorenosti oka od vstupného výkonu Ultra-DWDM systému na vzdialenosť 400 km

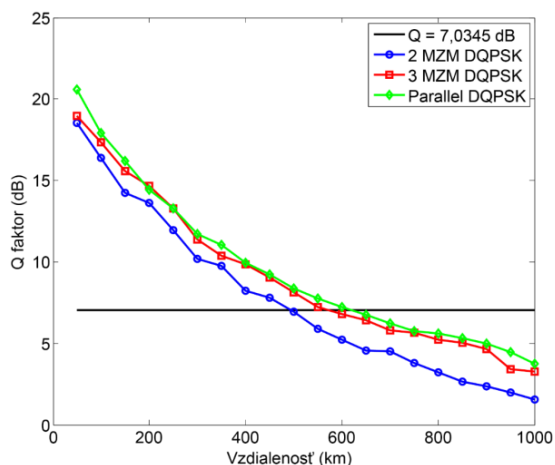
D. Analýza dosiahnutých výsledkov s DQPSK

Navrhovaný simulačný model Ultra-DWDM s moduláciou DQPSK je vyhotovený v rôznych scenároch. Ako prvé sa pozrieme na závislosť Q-faktoru od prenosovej vzdialenosti s uvažovaním GVD a nelineárnych javov. Táto závislosť je zobrazená na Obr. 20. Tu môžeme vidieť, že hodnoty Q-faktoru pri použití DQPSK založenej na troch MZM a na paralelnej štruktúre sú veľmi podobné a poskytujú lepšie hodnoty Q-faktoru ako sériové DQPSK s dvojicou MZM. Z danej simulácie vyplýva, že maximálna prenosová vzdialenosť je:

- 450 km pri použití 2 MZM DQPSK s hodnotami BER = 1,02E-12, Q = 7,0375 dB,
- 500 km pri použití 3 MZM DQPSK s hodnotami BER = 2,15E-13 Q = 7,2458 dB,
- 550 km pri použití Parallel DQPSK s hodnotami BER = 2,43E-13 Q = 7,2292 dB.

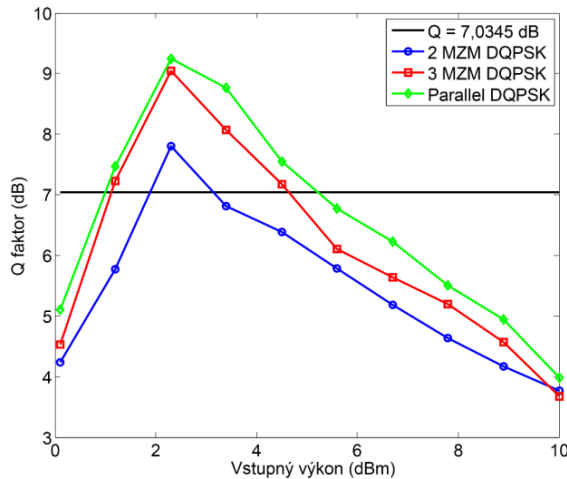
Paralelná štruktúra DQPSK sa teda zdá byť ako najvhodnejšia pre navrhovaný Ultra-DWDM systém.

Rovnako ako v prípade DPSK, aj pre DQPSK modulácie je vstupný výkon CW lasera dôležitým parametrom. V tomto prípade sme zvolili vyšší vstupný výkon ako v porovnaní s DPSK. Dôvodom je väčší počet komponentov v štruktúre DQPSK vysielača. Rozsah testovaného vstupného výkonu je 0 dBm – 10 dBm. Vstupný výkon je zvyšovaný lineárne. Cieľom je stanoviť hodnotu vstupného výkonu, pri ktorom je príspevok nelineárnych javov najnižší. Prenosová vzdialenosť v tomto experimente je nastavená na 450 km. Závislosť vstupného výkonu a Q-faktoru je na Obr. 21. Optimálny výkon v prípade 2 MZM DQPSK je 2,3 dBm. Pri tomto výkone dosiahneme hodnoty BER = 6,24E-12, Q = 7,7110 dB. Ako použiteľný sa javí byť aj výkon blízky hodnote 4 dBm (viď. graf). Pri vstupnom výkone 2,3 dBm sme dosiahli hodnoty BER = 7,47E-20, Q = 9,0452 dB pre 3 MZM DQPSK a BER = 9,98E-21, Q = 9,2626 dB pre Parallel DQPSK. Maximálny použiteľný výkon je 4,5 dBm pre 3 MZM DQPSK (BER = 2,56E-13, Q = 7,2221 dB) a Parallel DQPSK (BER = 3,26E-14, Q = 7,4972 dB).



Obr. 20. Závislosť Q-faktoru od prenosovej vzdialenosti Ultra-DWDM systému s DQPSK

Prenosovú vzdialenosť Ultra-DWDM systému s DQPSK je možné zvýšiť aplikovaním FrFT vo vysieláči DQPSK. Vysielač FrFT-DQPSK je navrhnutý s ohľadom na zvýšenú odolnosť voči nelineárnym javom. Preto sme sa v ďalšom experimente zamerali na porovnanie vplyvu prenosovej vzdialenosti od Q-faktoru pre systém Ultra-DWDM s GVD bez uvažovania nelineárných javov a s uvažovaním nelineárných javov. Táto závislosť je zobrazená na Obr. 22.

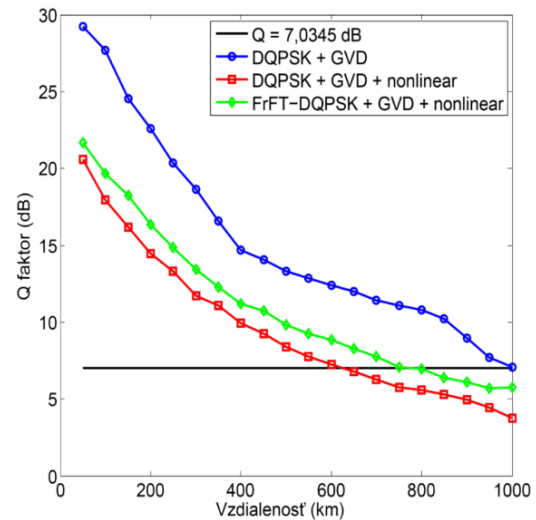


Obr. 21. Závislosť Q-faktoru od vstupného výkonu Ultra-DWDM systému s DQPSK

Dosiahnuté maximálne prenosové vzdialenosti, hodnoty BER a Q-faktor sú:

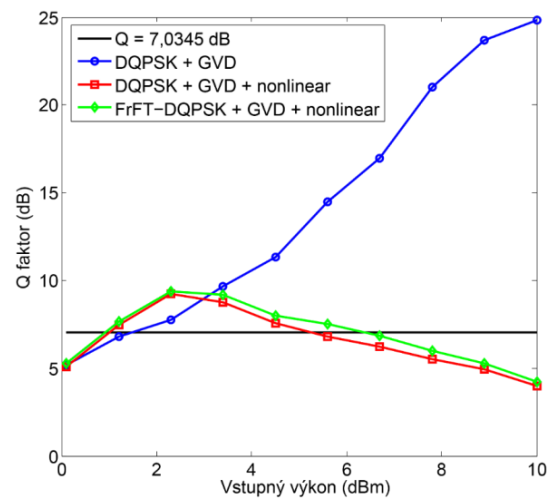
- 1000 km pri použití DQPSK s GVD bez uvažovania nelineárných javov s hodnotami BER = 1,25E-13, Q = 7,3189 dB,
- 550 km pri použití DQPSK s GVD a nelineárnymi javmi s hodnotami BER = 2,43E-13, Q = 7,2292 dB (Obr. 117),
- 800 km pri použití FrFT-DQPSK s GVD a nelineárnymi javmi s hodnotami BER = 1,02E-12, Q = 7,0317 dB (Obr. 117).

FrFT-DQPSK teda poskytuje zvýšenú odolnosť voči GVD a nelineárnym javom a umožňuje prenos na vzdialenosť 800 km v navrhnutom Ultra-DWDM systéme, teda 250 km zlepšenie v porovnaní s konvenčným DQPSK vysielaním.



Obr. 22. Porovnanie vplyvu nelineárných javov a GVD na Ultra-DWDM systém s DQPSK

Na Obr. 23 je zobrazená závislosť vstupného výkonu a Q-faktoru pre Ultra-DWDM systém s GVD bez uvažovania nelineárných javov a s uvažovaním nelineárných javov. Prenosová vzdialenosť v tomto experimente je 550 km. Ako je možné vidieť, FrFT nemá veľký vplyv na kvalitu prenosu, t.j. krivky DQPSK+GVD+nonlinear a FrFT-DQPSK+GVD+nonlinear sú veľmi blízko seba. Modrá krivka (DQPSK+GVD) stúpa – to je znak neprítomnosti nelineárných javov.



Obr. 23. Vplyv vstupného výkonu Ultra-DWDM systému s DQPSK a porovnanie vplyvu s nelineárnymi javmi a GVD

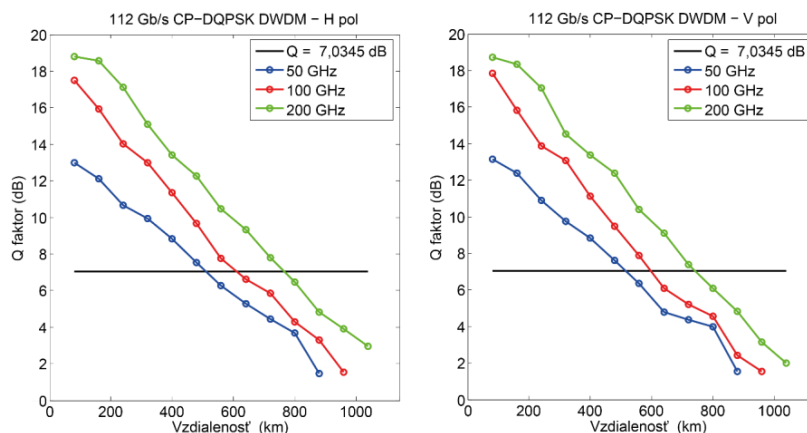
E. Analýza dosiahnutých výsledkov s CP-DQPSK

Nakoniec sme vyhodnotili navrhnutý 32 kanálový Ultra-DWDM systém s CP-DQPSK. Obr. 24 zobrazuje závislosť rôznych kanálových rozstupov od hodnoty Q-faktoru. Rozdiel vo výkone medzi stavom polarizáciou H a V simulácie je veľmi malý. Znamená to, že vplyv polarizačnej módovej disperzie (PMD) je malý. Rozstup 200 GHz má najlepši

výkon, za ktorým nasledujú rozostupy 100 GHz a 50 GHz. Maximálny dosah systému pri rozostupe 200 GHz je 750 km s hodnotou BER = 2,56E-15 a Q = 7,8239 dB (H pol.) a BER = 8,06E-14 a Q = 7,3776 dB (V pol.). Vďaka rozostupu kanálov 100 GHz môžeme dosiahnuť 600 km a BER = 3,58E-15 a Q = 7,7816 dB (H pol.) a BER = 1,47E-15 a Q = 7,8934 dB (V pol.). Maximálny dosah systému s odstupom 50 GHz je 600 km s BER = 2,74E-14 a Q = 7,5199 dB (H pol.) a BER = 1,24E-14 a Q = 7,6229 dB (V pol.).

V nasledujúcom experimente analyzujeme vplyv zvýšenia vstupného výkonu CW lasera na vytváranie nelineárnych javov. Prenosová vzdialenosť je nastavená na 600 km (12 slučiek). Vysielací výkon CW lasera je lineárne menený v rozsahu 0 dBm až 10 dBm lineárne. Opäť sa analyzuje „najhorší“ kanál a vypočíta sa hodnota BER a Q-faktor. Táto

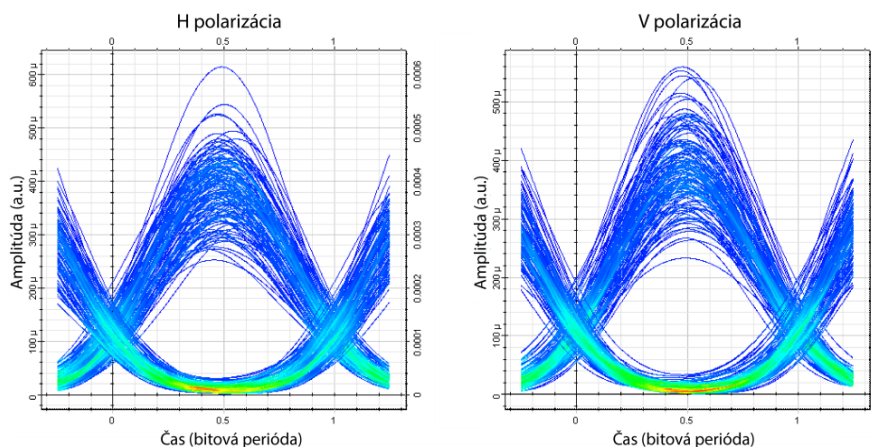
závislosť je vyobrazená na Obr. 26. Ako možno vidieť, na simulovanej vzdialenosti 650 km je vhodný vstupný výkon 1,2 dBm pre 50 GHz rozostup. Pre stav polarizácie je však prijaté BER = 4,21E-12, Q = 6,8312 dB nedostatočné. Pre stav polarizácie V sú hodnoty BER a Q-faktor nasledovné: BER = 1,32E-12, Q = 6,9957 dB. V prípade rozostupu 100 GHz je maximálny vstupný výkon 2,3 dBm a hodnoty BER a Q-faktor sú nasledovné: BER = 6,33E-12, Q = 7,1262 dB pre stav polarizácie H a BER = 8,12E-12, Q = 7,2148 dB pre stav polarizácie H. Vplyv GVD a nelineárnych javov je najnižší pri rozostupe 200 GHz. Maximálny použiteľný vstupný výkon je 3,2 dBm a hodnoty BER a Q-faktor sú nasledovné: BER = 2,56E-13, Q = 7,2221 dB pre stav polarizácie H a BER = 8,56E-13, Q = 7,0561 dB pre stav polarizácie H.



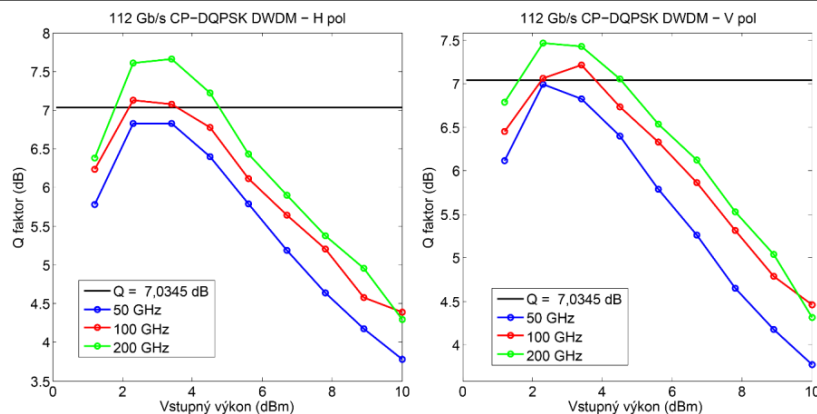
Obr. 24. Porovnanie prenosovej vzdialenosti v závislosti od medzikanálových rozostupov Ultra-DWDM systému s CP-DQPSK

Na Obr. 25 sú diagramy oka pre systém s rozostupom kanálov 100 GHz (vzdialenosť 600 km a BER = 3,58E-15 a Q =

7,7816 dB (H pol.) a BER = 1,47E-15 a Q = 7,8934 dB (V pol.)).



Obr. 25. Diagramy oka prijatých signálov pre 50 GHz rozostup, prenosová vzdialenosť 600 km



Obr. 26. Porovnanie vplyvu zmeny vstupného výkonu v závislosti od medzikanálových rozstupov Ultra-DWDM systému s CP-DQPSK

Znižovaním medzikanálových rozstupov sa účinnosť Ultra-DWDM systému znižuje. Medzikanálové rozstupy sú pri vysokokapacitných optických prenosových systémoch, akým je CP-DQPSK Ultra-DWDM, kľúčový parameter pre dosiahnutie požadovanej vzdialenosti. Hodnoty BER a Q-faktor sú veľmi podobné pre stav polarizácie H a V. To značí len minimálny vplyv PMD.

IV. ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo realizovať návrh, analýzu a optimalizáciu optického komunikačného systému DWDM pre použitie vo vysokokapacitných aplikáciách s použitím pokročilých optických modulačných techník s ohľadom na reguláciu vplyvu GVD a nelineárnych javov.

Vykonané experimenty nám umožnili realizovať návrh simulačného modelu 32 kanálového DWDM a Ultra-DWDM systému s kapacitou 3,584 Tb/s s rôznymi optickými modulačnými formátmi.

Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že zmenou tvaru vstupného signálu je možné vo veľkej miere ovplyvniť vznik a vplyv GVD a nelineárnych javov v DWDM systémoch. Výskum v tejto oblasti je nesmierne dôležitý a umožňuje dosahovať stále vyššie prenosové kapacity a prenosové vzdialenosti DWDM systémov. Lepšie prenosové charakteristiky možno dosiahnuť aplikovaním RZ-DPSK modulácie, ktorá poskytuje značné zlepšenie odolnosti voči GVD, XPM a FWM v systémoch DWDM s EDFA. Napokon prezentujeme použitie optickej DQPSK modulácie. Aplikovaním FrFT do DQPSK vysielača sme dosiahli mierne zlepšenie prenosových charakteristík navrhnutého Ultra-DWDM systému. Ako poslednú modulačnú techniku prezentujeme CP-DQPSK. Vplyv tejto modulácie na generovanie GVD a nelineárnych javov v 32 kanálovom DWDM systéme je však doposiaľ len málo známy.

Na základe poznatkov autora v skúmanej oblasti a implementácie vybraných metód analýzy boli dosiahnuté nasledujúce vedecké prínosy:

- Analýza nelineárnych javov SPM, XPM a FWM v DWDM systémoch s 32 kanálmi a prenosovými rýchlosťami 40 Gb/s a 112 Gb/s.

- Analýza a optimalizácia parametrov optických zosilňovačov EDFA, ROA a SOA pre použitie vo vysokokapacitných DWDM systémoch.
- Návrh a analýza 1,28 Tb/s DWDM systému s moduláciami OOK s cieľom regulácie vplyvu GVD a nelineárnych javov.
- Návrh a analýza 3,584 Tb/s DWDM systému s moduláciami typu PSK s cieľom regulácie vplyvu GVD a nelineárnych javov.
- Analýza vplyvu nelineárnych javov zmenou pracovného cyklu RZ-DPSK modulácie implementovanej do 32 kanálového DWDM systému s prenosovou rýchlosťou 112 Gb/s.
- Návrh modelu DQPSK vysielača s FrFT operujúcom na prenosovej rýchlosti 112 Gb/s a jeho implementácia do navrhnutého Ultra-DWDM systému.
- Návrh a implementácia CP-DQPSK do 3,584 Tb/s Ultra-DWDM systému s uvažovaním vplyvu GVD a nelineárnych javov SPM, XPM a FWM.

POĎAKOVANIE

Práca na tomto príspevku bola podporená prostriedkami z nasledujúcich výskumných grantov: KEGA 023TUKE-4/2017, VEGA 1/0772/17 a APVV-17-0208.

LITERATÚRA

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, G. H. Sasaki. "Optical Networks," 2010. 928p. ISBN 978-0-12-374092-2.
- [2] J. M. Simmons, "Optical Network Design and Planning," 2014, 529 p. ISSN: 1935-3847, DOI: 10.1007/978-3-319-05227-4.
- [3] W. Ji and J. Chang, "Design of WDM-RoF-PON for wireless and wire-line access with source-free ONUs," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 2, pp. 127-133, February 2013. DOI: 10.1364/JOCN.5.000127.
- [4] M. Seimetz, "High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-93770-8.
- [5] J. Tóth, E. Ovseník, J. Turán, L. Michaeli, M. Márton, "Classification prediction analysis of RSSI parameter in hard switching process for FSO/RF systems", *Measurement*, vol. 116, pp. 602-610, 2018, 10.1016/j.measurement.2017.11.044
- [6] V. Bobrovs, A. Udaļcovs, I. Trifonovs. "Evaluation of Nonlinear Effect Impact on Optical Signal Transmission over Combined WDM System," *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2013)*,

- Taiwan, Taipei, 25-28 March, 2013. Taipei: The Electromagnetics Academy, pp.303-307, 2013. ISBN 978-1-934142-24-0. ISSN 1559-9450.
- [7] P. Ivaniga, T. Ivaniga, J. Turán, L. Ovseník, M. Márton, D. Solus, J. Oravec, T. Huszanik. "The Influence of FWM with AWG Multiplexor in DWDM System," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2018, no. 4, pp. 113-117, 2018. DOI:10.15199/48.2018.04.28.
- [8] T. Huszanik, J. Turán, L. Ovseník, "Comparative analysis of optical IQ modulation in four-channel DWDM system in the presence of fiber nonlinearities," *Proceedings of the 2018 19th International Carpathian Control Conference, ICC 2018*, p. 468-473. DOI:10.1109/CarpathianCC.2018.8399675.
- [9] P. Cho, Y. Achiam, G. Levy-Yurista, M. Margalit, Y. Gross, and J. Khurgin, "Investigation of SOA Nonlinearities on the Amplification of DWDM Channels with Spectral Efficiency Up to 2.5 b/s/Hz," *Photonics Technology Letters*, IEEE, vol. 16, no. 4, 2004. doi: 10.1109/LPT.2004.823687.
- [10] A. Rani, M. Singh, "Impact of Different Modulation Data Formats on DWDM System Using SOA with Narrow-Channel Spacing," *Journal of Optical Communications*, vol. 40, no. 4, p. 1-5, 2017. doi: 10.1515/joc-2017-0093.
- [11] J. Ruzbarsky, J. Turan, and L. Ovsenik, "Stimulated Brillouin scattering in DWDM all optical communication systems," in Proceedings of the in 26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA '16), pp. 395–398, April 2016.
- [12] ITU-T, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," Recommendation G.694.1, 2012.
- [13] T. Huszanik, J. Turán, and L. Ovsenik, "Mitigation of Fiber Nonlinear Effects in 1.28 Tbps DQPSK Modulated DWDM System," *Electronics ETF*, vol. 23, no. 1, pp. 1-8, 2019. doi: 10.7251/ELS1923003H.
- [14] T. Huszanik, J. Turán and L. Ovsenik, "On Mitigation of Four-Wave Mixing in High Capacity Ultra-DWDM System," *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Krakow-Wieliczka, Poland, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8766021.
- [15] T. Ivaniga, J. Turán and L. Ovseník, "Verification of the SPM Impact in DWDM System Using AWG Multiplexer/Demultiplexer," *Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 1, pp.17–22, 2017. doi:10.15546/aeci-2017-0003.
- [16] J. M. SIMMONS, "Optical Network Design and Planning," 529 p., 2017. ISSN: 1935-3847, doi: 10.1007/978-3-319-05227-4.
- [17] L. G. Kazovsky, W. T. Shaw, D. Gutierrez, N. Cheng, S. W. Wong, "Next-Generation Optical Access Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 11, 2017. doi: 10.1109/JLT.2007.907748.
- [18] W. Steingartner, M. A. M. Eldojali, D. Radakovic, J. Dostal, "Software support for course in semantics of programming languages," Paper presented at the *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics, INFORMATICS 2017 - Proceedings, , 2018-January*, p. 359-364. DOI:10.1109/INFORMATICS.2017.8327275.
- [19] J. Kahn, K. P. Ho, "Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, no. 2, p. 259-272 (2004). ISSN: 1558-4542. DOI: 10.1109/JSTQE.2004.826575.
- [20] R. Maharjan, I. Lavrinovica, A. Supe, and J. Porins, "Minimization of FWM effect in nonlinear optical fiber using variable channel spacing technique," *Advanced Wireless Optical Communication RTUWO 2016*, vol. 3, no. 3, pp. 1–4, 2016, DOI: 10.1109/RTUWO.2016.7821844.
- [21] A. Kaur, S. Dewra, "Comparative Analysis of Different Modulation Techniques in Coherent Optical Communication System," *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 3, issue 8, p. 7193 – 7200, August 2015. ISSN: 2320-9801.
- [22] O. Kovac, P. Lukacs, I. Gladisova, "Textures classification based on DWT," Paper presented at the *2018 28th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2018*, p. 1-5. DOI:10.1109/RADIOELEK.2018.8376379.

Emulátor dynamických momentov

Jozef Ivan

Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
jozef.ivan@tuke.sk

František Ďurovský

Katedra elektrotechniky a mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
frantisek.durovsky@tuke.sk

Abstrakt — Tento príspevok prezentuje sumarizáciu dizertačnej práce, ktorá sa venuje problematike emulovania dynamických momentov. V úvode sú prezentované spôsoby testovania elektrických pohonov s využitím Hardware In the Loop (HIL) metód, z ktorých najpokročilejšou je emulácia dynamických momentov (EDM). Hlavná časť práce je venovaná návrhu a realizácii emulátora vhodného na testovanie vysoko presných aktuátorov v priemyselnej praxi. V práci je prezentovaná úprava existujúcej riadiacej štruktúry metódy emulácie založenej na nelineárnom riadení pre potreby navrhovaného emulátora. Súčasťou návrhu regulačnej štruktúry emulátora je unikátne vyšetrenie účinnosti prevodoviek a eliminácia ich negatívneho vplyvu na presnosť emulácie. Navrhnutá regulačná štruktúra bola realizovaná v simulačnom prostredí a následne implementovaná do riadiacej jednotky priemyselného meniča na reálnom emulátore. Správna funkcia systému je dokumentovaná experimentálnymi výsledkami, pri ktorých boli otestované dva typy emulovaných záťaží.

Kľúčové slová – Emulácia záťaží, Emulátor, Dynamometer, Dynamická emulácia mechanických záťaží, HIL simulácie

Abstract — This article presents a summary of the dissertation thesis dedicated to the emulation of dynamic loads. The introduction presents Hardware In the Loop (HIL) techniques for electric drive testing of which emulation of dynamic loads is the most advanced one. The main part of the article is dedicated to the design and construction of emulator suitable for high precision actuator testing in industrial practice. The article presents a unique investigation of the gear's efficiencies and elimination of their negative influence on emulation precision. Knowledge from the investigation was used for the enhancement of existing emulation method based on nonlinear control. The designed control structure was implemented in the simulation environment and also into the control unit of the industrial drive in a real testing facility. The functionality of the system was examined by experimental results using two types of emulated load.

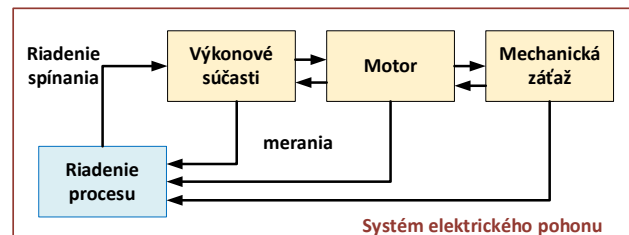
Keywords— Load emulation, Emulator, Dynamometer, Dynamic emulation of mechanical loads, HIL simulation

I. ÚVOD

Pri návrhu a realizácii nových technologických zariadení a ich riadiacich algoritmov zohráva čoraz dôležitejšiu úlohu testovanie a verifikácia ich vlastností pred samotným uvedením do pracovného procesu. V oblasti

elektrických pohonov sa jedná o testovanie kompletného pohonu: jeho riadiaceho systému, výkonového meniča a elektrického motora s poháňanou mechanikou. Keďže záznamníci v priemysle nie sú naklonení experimentovaniu na reálnej linke, je nutné vykonať čo najviac testov v prípravnej fáze. Najväčším problémom je náhrada reálnej mechaniky (technológie), ktorú má testovaný pohon poháňať. Táto technológia sa zvyčajne nedá v laboratóriu inštalovať, preto sa hľadali metódy, ako realizovať testy tak, aby sa riadenie pohonu dalo overiť v laboratórnych podmienkach. Testovanie a ladenie pohonov môže prebiehať vo viacerých etapách. Prvotné testy sú väčšinou realizované v simulačnom prostredí pomocou matematických modelov. Následne sa prechádza na postupné overenie funkčnosti jednotlivých komponentov pohonu, pričom správanie mechaniky sa nahrádza iným systémom. Takýto spôsob testovania môžeme nazývať aj Hardware In the Loop testovanie/simulácia (HIL).

Pri HIL simuláciách sa časť reálneho zariadenia nahradí matematickým modelom, ktorý beží v reálnom čase na paralelne pracujúcom počítači. Systém elektrického pohonu tak vieme rozdeliť do subsystémov (Obr. 1).



Obr. 1 Subsystém elektrického pohonu

Podľa [1] vieme oblasť HIL simulácií pre odvetvie elektrických pohonov rozdeliť na tri základné úrovne:

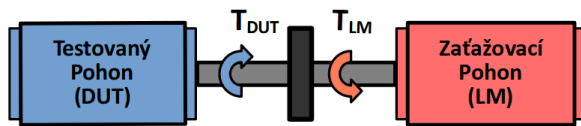
- Úroveň riadenia,
- Úroveň výkonových súčastí,
- Úroveň mechaniky (motor),

Pre každú úroveň sa využíva iný počet a typ hardvérových zariadení zapojených do HIL simulácie. V úrovni riadenia je do HIL simulácie zapojená len riadiaca

jednotka, počítač alebo zariadenie, ktorého úlohou je riadiť proces. Ďalšie súčasti systému ako výkonová a mechanická časť sú simulované v reálnom čase pomocou programového vybavenia ako napr. dSpace alebo RT-Lab. Na úrovni výkonových súčastí je do HIL simulácie zapojená riadiaca jednotka spoločne s výkonovými časťami systému (menič). Mechanická časť (elektromotor s mechanickou záťažou) je simulovaná v reálnom čase pomocou programového vybavenia. Úroveň mechaniky predstavuje najvyššiu úroveň testovania na finálnom zariadení, kedy je testovaný celý elektrický pohon so všetkými súčastami (riadiaca jednotka, výkonový menič, elektromotor) a mechanická záťaž je simulovaná. Simulovať mechanickú záťaž je možné viacerými spôsobmi, pričom medzi najpokročilejšie metódy patrí emulácia momentu.

II. EMULÁCIA MOMENTOV

Zariadenie, ktoré dokáže simulovať (napodobniť, emulovať) záťaž sa nazýva emulátor. Emulátorom je najčastejšie ďalší elektromotor, tzv. zaťažovací pohon, označovaný ako Load Machine (LM), ktorý je k testovanému pohonu označovanému aj ako Drive Under Test (DUT) pripojený pevným hriadeľom, ako je zobrazené na Obr. 2, kde T_{DUT} predstavuje moment vyvíjaný testovaným pohonom a T_{LM} je moment vyvíjaný zaťažovacím pohonom. Na takejto zostave je možné testovať rýchlostné ale aj nadradené polohové algoritmy emulácie zaťažovacích momentov.



Obr. 2 Mechanizmus emulátora

Pri návrhu riadenia je dôležité zvoliť správnu metódu emulácie. Metódy emulácie je možné usporiadať chronologicky nasledovne:

A. Jednoduchý dynamometer

Jedná sa o základný spôsob emulácie, kde zaťažovací pohon vytvára konštantný moment, skokové zmeny momentu alebo moment, ktorý je úmerný rýchlosti pohonu (priamo alebo nepriamo). Testovanie je vhodné pre pohony, ktoré pracujú v ustálenom stave alebo len s veľmi pomalými prechodovými dejmi. V prácach sa takto testovali neriadené pohony. Takýmto spôsobom možno testovať aj riadené pohony, avšak pomocou uvedených metód nedokážeme určiť ich správanie sa pri dynamických dejoch. Monitorovanými veličinami pri testovaní sú oteplenie, dosiahnutie maximálneho momentu, výkon testovaného pohonu a pod. Podrobnejšie je tento typ zaťažovania opísaný v prácach [2] a [3].

B. Emulácia v otvorenej slučke

V tomto prípade emulovaná záťaž nie je súčasťou nadradenej rýchlostnej alebo polohovej slučky. Zaťažovací pohon je riadený momentovo, čo v špecifických prípadoch

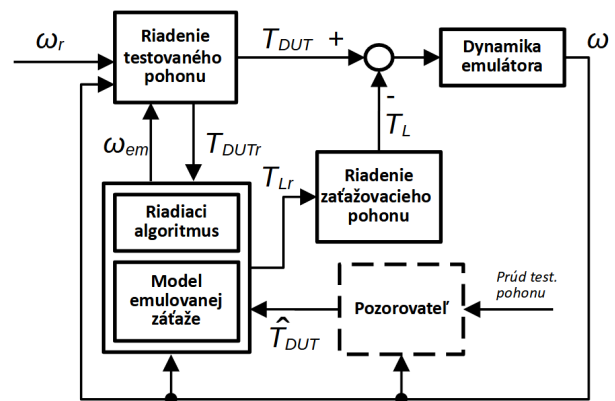
umožňuje aj rýchle zmeny momentu s vysokou dynamikou. Zaťažovací moment sa predpisuje pomocou momentových charakteristík, ktoré navrhuje užívateľ. Podrobnejšie je tento typ zaťažovania opísaný v prácach [4], [5] a [6].

C. Emulácia v uzavretej slučke

Testovaný pohon je súčasťou uzavretej regulačnej slučky (rýchlostnej alebo polohovej). Emulovanú záťaž je možné ľubovoľne meniť na základe matematického modelu, ktorý presne kopíruje predpísanú dynamiku. Podrobnému opisu metód dynamickej emulácie (EDM) je venovaná nasledujúca sekcia.

III. EMULÁCIA DYNAMICKÝCH MOMENTOV (EDM)

Emulácia, ktorá má spĺňať najvyššie požiadavky, si vyžaduje prevádzku v uzavretej slučke. Testovaný pohon je vo väčšine prípadov riadený v nadradenej rýchlostnej alebo polohovej slučke a zaťažovací pohon v momentovej slučke. Riadiaci algoritmus ráta žiadané hodnoty momentu pre zaťažovací pohon. Vstupnými veličinami algoritmu sú hodnoty žiadaného momentu testovaného pohonu a uhlová rýchlosť alebo poloha hriadeľa v závislosti na zvolenej regulačnej štruktúre. Univerzálna schéma platná pre väčšinu typov dynamickej emulácie je zobrazená na Obr. 3.



Obr. 3 Univerzálna riadiaca štruktúra emulácie dynamickej momentov

T_{DUT} a T_L sú hodnoty momentu testovaného a zaťažovacieho pohonu, T_{DUTr} a T_Lr sú žiadané hodnoty testovaného a zaťažovacieho pohonu, ω_r je referenčná uhlová rýchlosť, ω_{em} je emulovaná rýchlosť počítaná na základe modelu emulovanej záťaže. V niektorých metódach riadiaci algoritmus namiesto žiadaného momentu testovaného pohonu z regulátora využíva hodnotu momentu \hat{T}_{DUTr} získanú z pozorovateľa. Pozorovateľ určuje tento moment na základe sledovania prúdov testovaného pohonu a uhlovej rýchlosti mechanizmu emulátora.

Základný vzťah pre dynamiku emulátora môžeme zapísať ako:

$$T_{DUT} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega. \quad (1)$$

Kde ω je mechanická uhlová rýchlosť, J je celkový moment zotrvačnosti pohonu a B je celkový koeficient viskózneho trenia. Potom pre vzťah medzi elektrickým momentom motora a uhlovou rýchlosťou platí:

$$\frac{\omega(s)}{T_{DUT}(s)} = F(s) = \frac{1}{Js + B}. \quad (2)$$

Cieľom EDM je, aby sa vzťah medzi uhlovou rýchlosťou hriadeľa a elektrickým momentom testovaného pohonu rovnal akejkolvek žiadanej lineárnej alebo nelineárnej záťaži, ktorú si zvolí užívateľ. V prípade, že uvažujeme lineárnu záťaž s momentom zotrvačnosti a viskóznym trením, požadovaný vzťah bude mať tvar:

$$\frac{\omega(s)}{T_{DUT}(s)} = F_{em}(s) = \frac{1}{J_{em}s + B_{em}}, \quad (3)$$

kde J_{em} a B_{em} sú emulované hodnoty momentu zotrvačnosti a trenia zadané užívateľom. Emulácii dynamických momentov sa venovali napr. práce [6], [8], [9], [10] a [11].

IV. EMULÁTOR DYNAMICKÉHO MOMENTU VHODNÝ PRE PRIEMYSELNÚ PRAX

Doteraz publikované práce z oblasti EDM sa zaoberajú návrhom a realizáciou metód EDM pre zariadenia v laboratórnych podmienkach. Regulačné štruktúry týchto systémov sú najčastejšie implementované do výpočtového vysoko výkonných zariadení, ktoré pracujú s vysokými vzorkovacími frekvenciami a majú vysokú obstarávaciu cenu. Realizácia takýchto emulátorov je vhodná na overenie správnosti využívaných regulačných štruktúr, otestovanie ich presnosti a dosiahnuteľných dynamických vlastností v takmer ideálnych podmienkach.

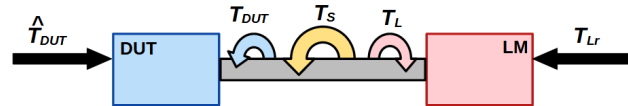
V priemyselnej praxi sa EDM dá využívať v dvoch prípadoch. Prvým prípadom je overovanie nového riadiaceho algoritmu na pohon priemyselného zariadenia. To si vyžaduje vo fáze ladenia experimentovanie na reálnej linke. Zákazníci z priemyslu však neradi poskytujú priestor na takéto experimentovanie. Dôvodom je jednak výpadok produkcie, ako aj možnosť poškodenia zariadenia. Preto je vhodné nový algoritmus pripraviť vopred a odladiť v laboratóriu. Keďže mechanická časť zariadenia, resp. technológia sa v laboratórnych podmienkach často nedá umiestniť, nahrádza sa emulátorom. Druhým prípadom je overenie, či daný pohon, napr. aktuátor, bude pre plánovanú mechaniku schopný zabezpečiť požadovanú dynamiku. Aj v tomto prípade je vhodné, ak sa požadovaný zaťažovací profil dá experimentálne overiť v laboratóriu.

V oboch prípadoch je výhodné, ak sa pri testovaní využije priemyselný menič. V prvom prípade sa bude riadenie vyvíjať priamo pre finálnu platformu, takže odpadá prepis riadiaceho algoritmu z HIL simulátora do priemyselného meniča. Pri overovaní sa zároveň zohľadnia všetky možnosti a prípadné obmedzenia priemyselného meniča. Zaťažovací pohon by v tomto prípade mohol byť napájaný z HIL simulátora. Problémom však môže byť komunikácia medzi priemyselným meničom a HIL simulátorom. Ak sa celý

systém postaví na jednej platforme, problém s komunikáciou odpadá.

V druhom prípade sa predpokladá, že testy sa budú robiť u systémového integrátora, ktorý dáva prednosť použitiu komerčných meničov, ktoré sú podstatne lacnejšie ako HIL systémy.

Emulátory, realizované v publikovaných prácach boli realizované ako dva pohony spojené pevným hriadeľom. Náčrt mechanizmu aj s príslušnými momentmi, ktoré na pohon pôsobia, je zobrazený na Obr. 4. Výhodou takejto zostavy je, že rýchlosti na oboch pohonoch sú rovnaké. Vo výpočtoch sa pre zjednodušenie tento hriadeľ uvádza ako dokonale tuhý, čo umožňuje zanedbať vplyv tlmenia a pružnosti hriadeľa na systém.



Obr. 4 Mechanizmus bežného emulátora

V regulačnej štruktúre sa predpokladá, že moment zaťažovacieho pohonu (LM) vplyva priamo na hriadeľ testovaného pohonu (DUT), preto vzťah pre výstupný moment na hriadeľi vieme vyjadriť ako:

$$T_s = T_{DUT} - T_L. \quad (4)$$

Ak uvažujeme len prepojenie testovaného a zaťažovacieho pohonu, tak takýto typ emulátora umožňuje emulovať len rozsah momentov a rýchlostí daných typom, parametrami a konštrukčným vyhotovením použitého zaťažovacieho pohonu. Tým pádom aj na strane testovaného pohonu je možné otestovať len pohony, ktoré spadajú do výkonovej úrovne zaťažovacieho pohonu. V práci [9] bol pre emulovanie vysokých rýchlostí predstavený postup ako upraviť regulačnú štruktúru tak, aby bolo možné zaťažovací pohon prevádzkovať aj pri odbudení. Podľa dostupných informácií však emulovaniu vysokých záťažových momentov bola venovaná len práca [11], kde bolo možné v pomerných veličinách emulovať vysoké momenty a momenty zotrvačnosti aj na testovacom zariadení nízkeho výkonu. Emulované momenty v doposiaľ publikovaných prácach dosahovali len nízke úrovne záťažových momentov.

Zámerom tejto práce bolo použiť EDM na testovanie aktuátorov s cykloidnými prevodkami. Takýto aktuátor obsahuje synchronný motor s permanentnými magnetmi, cykloidnú prevodovku, snímač polohy a prípadne parkovaciu brzdu. Tento typ aktuátora sa používa najmä v aplikáciách, kde je požiadavka na vysoký moment, presné polohovanie a zároveň udržanie kompaktných rozmerov. Medzi takéto aplikácie patria napr. obrábacie stroje, rezačky, robotické ramená, automatické frézy a pod. Pri návrhu nových typov aktuátorov by takýto emulátor dokázal vyšetriť vplyv reálnej záťaže na vlastnosti aktuátora ešte pred uvedením do skutočnej prevádzky, a taktiež určiť jeho životnosť využitím dlhodobých záťažových testov pri presne definovanej záťaži.

V. NÁVRH EDM PRE TESTOVANIE VYSOKO PRESNÝCH AKTUÁTOROV

Emulátor pre testovanie vysoko presných aktuátorov bude mať rozdielnu mechanickú a riadiacu štruktúru ako emulátor na Obr. 4. Testovaným pohonom bude aktuátor, ktorý je zložený z elektromotora a vysoko presnej cykloidnej prevodovky. Jednotlivé časti budú v nasledujúcich častiach označované ako motor DUT, prevodovka DUT a pohon DUT, ktorý bude predstavovať celý uzol testovaného aktuátora.

Na realizáciu zaťažovacieho pohonu existuje viacero alternatív, z ktorých najlepší pomer ceny k dosiahnuteľnému záťažovému momentu pri zachovanej dynamike predstavuje využitie elektrického pohonu s prevodovkou. Na strane pohonu LM nie je nutné využiť vysoko presnú prevodovku, ale je potrebné aby kombinácia zvoleného motora a prevodovky dosahovali na výstupe úroveň momentu vhodnú pre testovanie aktuátorov. Zaťažovací pohon bude v nasledujúcom texte označovaný ako pohon LM a jeho komponenty ako motor LM a prevodovka LM. Návrh finálneho systému s oboma pohonmi je zobrazený na Obr. 5.

Je potrebné zdôrazniť, že v reálnom systéme sú oba motory neoddeliteľne spojené s príslušnými prevodovkami. Hriadele motorov nie sú prístupné a na obrázku sú znázornené len pre jednoduchšie znázornenie aplikovaných momentov. Orientácia jednotlivých momentov zodpovedá orientácii momentu a uhlovej rýchlosti po konverzii cez prevodovku. Pre výstupný moment na spoločnom hriadeľi T_S platí:

$$T_S = T_{DUTs} - T_{Ls}, \tag{5}$$

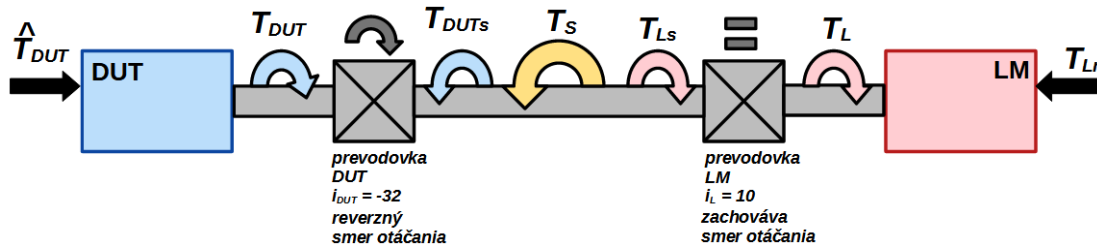
kde pre prepočítané momenty na spoločný hriadeľ T_{DUTs} a T_{Ls} platí:

$$T_{DUTs} = T_{DUT} i_{DUT} \eta_{DUT}, \tag{6}$$

$$T_{Ls} = T_L i_L \eta_L. \tag{7}$$

Hodnoty i_{DUT} , i_L a η_{DUT} , η_L sú prevodové pomery a účinnosti prevodoviek DUT a LM. Hodnoty aktuálnych momentov na vstupe prevodovky je možné získať pomocou estimátora, pozorovateľa alebo je možné túto hodnotu odčítať priamo z meniča. Hodnota prevodu je známa zo štítku alebo katalógu zvolenej prevodovky. Jedinou neznámou vo vzťahoch (6) a (7) je hodnota účinnosti, ktoré sú značne závislé od vstupného momentu, vstupnej uhlovej rýchlosti a od teploty prevodovky príslušného pohonu, čo môžeme zapísať ako:

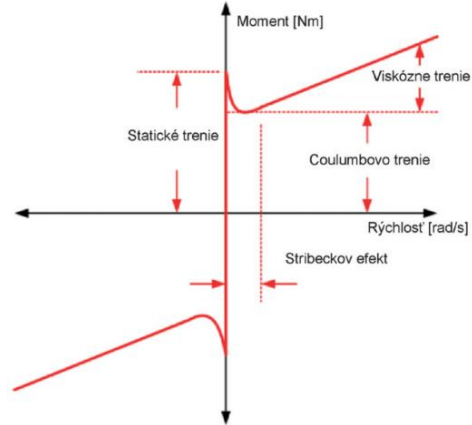
$$\eta_{DUT} = f(T_{DUT}, \omega_{DUT}, t_{DUT}), \tag{8}$$



Obr. 5 Mechanizmus navrhovaného emulátora

$$\eta_L = f(T_L, \omega_L, t_L). \tag{9}$$

Účinnosť znižujú najmä straty v trení vnútorných komponentov. Trenie pozostáva z troch základných zložiek a to statického trenia, Coulombovho trenia a viskózneho trenia. Jav poklesu trecieho momentu po odlepení pohonu je nazývaný ako Stribeckov jav [12]. Jednotlivé zložky sú zobrazené na Obr. 6.



Obr. 6 Zložky trenia podľa [12]

VI. VYŠETRENIE ÚČINNOSTI PREVODOVIEK

Pri návrhu EDM sa ukázalo, že je potrebná podrobná analýza správania sa prevodoviek tak na strane DUT ako aj LM, predovšetkým čo sa týka ich účinnosti. Preto je v nasledujúcej časti venovaná pozornosť práve vyšetrovaniu účinnosti pohonov s prevodovkami, použitými na meracom stende. Vyšetrené vlastnosti prevodoviek budú využité pri návrhu riadiacej štruktúry emulátora. Na spoločnom hriadeľi je k dispozícii momentový snímač, ktorý bude využitý pri meraniach.

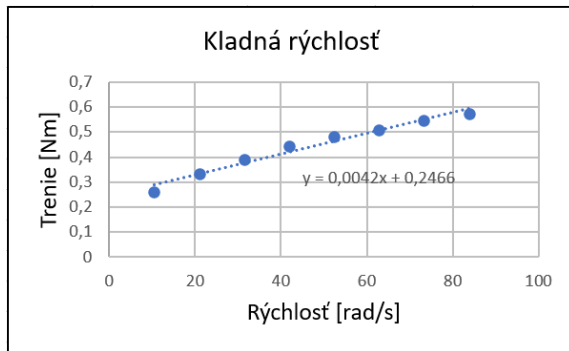
A. Pohon LM

Na strane pohonu LM bola použitá planétová prevodovka. Tento typ prevodovky je charakteristický svojou jednoduchou konštrukciou a vysokou účinnosťou. Pre zjednodušenie výpočtov a následného modelovania v simulačnom prostredí bude pri vyšetrení účinnosti pohonu LM uvažované len s viskóznym a Coulombovým trením. Tieto trenia je možné zmerať jednoducho záznamom aktuálneho momentu motora pri zmene uhlovej rýchlosti. Meranie bolo realizované aj s pripojeným testovaným pohonom, čím sa do výsledného trenia pohonu LM premietne aj vplyv pripojeného pohonu DUT.

Pre elimináciu trenia pohonu DUT bol využitý momentový snímač na spoločnom hriadeľi. Tretí moment pohonu DUT prepočítaný na spoločný hriadeľ je označený ako T_{fDUTs} . Ten bol následne prepočítaný na stranu motora LM a odčítaný od aktuálneho momentu na motore LM. Pre výpočet výsledného trenia zaťažovacieho pohonu preto platí:

$$T_{fL} = T_L - \frac{T_{fDUTs}}{i_L} \quad (10)$$

Výsledné trenie bolo vyšetrované pre oba smery s rozsahom otáčok 100 až 800 ot/min resp. (-100 až -800 ot/min) na motore LM s krokom zmeny otáčok 100 ot/min. Všetky merané hodnoty boli zaznamenané pomocou funkcie Trace v programe Simotion SCOUT a následne vyhodnotené v softvéri MATLAB a MS Excel, kde s využitím jednoduchej lineárnej aproximácie bol stanovený predpis funkcie trenia na strane motora LM. Nameraná hodnota pre kladnú rýchlosť a lineárne aproximovaná funkcia trenia sú zobrazené na Obr. 7.



Obr. 7 Vyšetrenie trecích strát pohonu LM

Funkcia trecích strát T_{fL} má takmer identickú hodnotu pre oba smery otáčania a výsledná hodnota bola stanovená ako ich priemer. Pre výpočet trecích strát následne platí:

$$T_{fL} = f_{fL} \cdot \omega_L + T_{fCL} \quad (11)$$

kde f_{fL} je koeficient viskózneho trenia pohonu LM prepočítaný na stranu motora LM, ω_L je aktuálna rýchlosť motora LM a T_{fCL} predstavuje Coulombovo trenie na strane motora LM. Coulombovo trenie tvorí významnú časť strát v trení najmä pri nízkych rýchlostiach a je možné ho zapísať ako:

$$T_{fCL} = \begin{cases} 0 & , ak |\omega_L| < \omega_0 \\ -T_{fCL} \operatorname{sgn} \omega_L & , inak \end{cases} \quad (12)$$

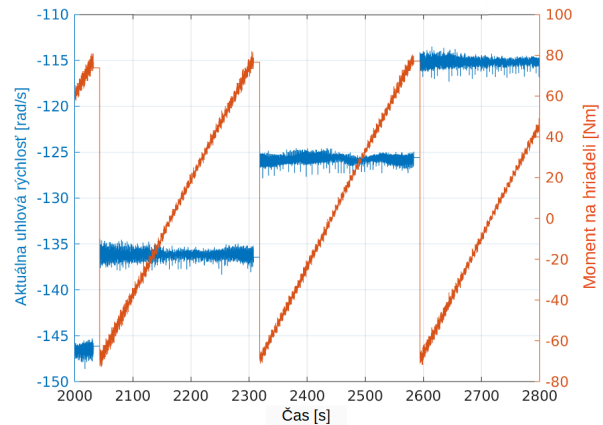
kde hodnota ω_0 predstavuje hraničnú hodnotu rýchlosti, kedy je Coulombovo trenie aplikované na pohon.

B. Pohon DUT

Pre vyšetrenie účinnosti pohonu DUT bolo navrhnuté meranie, ktoré umožní podrobne opísať účinnosť prevodovky vo všetkých pracovných oblastiach t.j. vo všetkých štyroch kvadrantoch pre všetky zložky trenia. Meranie prebehlo pri kompletne zapojenej zostave, kde výstupné hriadele prevodoviek sú pripojené na spoločný hriadeľ. Na realizáciu tohto merania je potrebné poznať aj aktuálny moment na spoločnom hriadeľi, na čo bol využitý snímač momentu na spoločnom hriadeľi. Počas merania boli zaznamenané

hodnoty aktuálneho momentu na motoroch LM aj DUT, aktuálny moment na spoločnom hriadeľi a aktuálne rýchlosti oboch pohonov.

Samotný proces merania pozostáva z postupného zvyšovania momentu pohonu LM zo záporných do kladných hodnôt pri konštantnej rýchlosti pohonu DUT. Toto zvyšovanie momentu bolo opakované pri rýchlostiach na motore DUT v rozmedzí -2000 až 2000 ot/min pri skokových zmenách rýchlosti o 100 ot/min. Detail priebehu merania je zobrazený na Obr. 8. Perióda záznamu hodnôt je 100 ms, graf zobrazuje 800 sekúnd z celkových viac ako troch hodín merania. Rozsah meraných hodnôt bol prispôbený pracovnej oblasti pohonu DUT. Celý priebeh merania bol automatizovaný a naprogramovaný v štruktúrovanom texte v softvéri SIMOTION SCOUT.



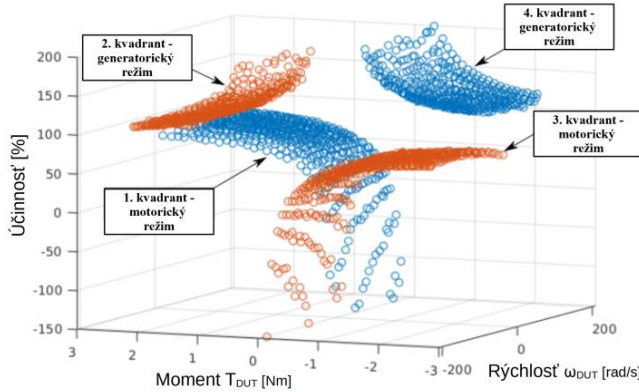
Obr. 8 Detail priebehu merania účinnosti prevodovky DUT

Podľa vzťahu (8) má na účinnosť prevodovky vplyv aj jej teplota. Tú však nie je možné merať vnútri prevodovky ale len na jej vonkajšom obale. Takto získanú teplotu, môžeme kvôli teplotnej zotrvačnosti prevodovky považovať len za informatívnu hodnotu nakoľko teplota vnútorných komponentov sa môže značne líšiť. Z toho dôvodu bola prevodovka pred meraním zahriata na pracovnú teplotu, aby sa predišlo vplyvu výrazných zmien teploty počas merania. Teplotu prevodovky sme potom považovali za konštantnú počas celej doby merania. Využitím nameraných a následne spriemerovaných dát vieme účinnosť vypočítať pomocou vzťahu:

$$\eta_{DUT} = \frac{T_{DUTs}}{i_{DUT} T_{DUT}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Grafické znázornenie spriemerovaných nameraných hodnôt je zobrazené na Obr. 9. Červenými bodmi sú zobrazené hodnoty účinnosti pri zápornej orientácii otáčania a modrou farbou sú znázornené hodnoty pri kladnej orientácii otáčania. Z grafu je zrejmé, že pri generátorickom režime hodnoty účinnosti prekračujú hodnotu 100%, čo je dané tým, že vzťah (13) platí pre motorický režim. Kvôli zjednodušeniu výpočtu bol použitý rovnaký vzťah pre motorický aj generátorický režim. Z toho dôvodu budú mať účinnosti v generátorickom režime hodnoty vyššie ako 100%. Pri

prechode nulou sa hodnoty účinnosti limitne blížia k pozitívnemu alebo negatívnemu nekonečnu, čo je do veľkej miery spôsobené statickým trením prevodovky. To dokáže udržať malú hodnotu záťažového momentu aj bez aplikovaného momentu na testovanom pohone, alebo aj s malým momentom na testovanom pohone v rovnakom smere otáčania.



Obr. 9 Grafické znázornenie vypočítaných hodnôt účinností

Pre využitie takto nameraných dát v regulačnej štruktúre je potrebné vytvoriť matematický model účinnosti. V priebehoch zobrazených na Obr. 9 je možné pri zmene smeru otáčania pozorovať diskontinuitu, kedy môže účinnosť skokovo narásť pri nezmenenom záťažovom momente. Z toho dôvodu by bolo potrebné aproximovať každý kvadrant samostatne. Keďže aj napriek tomu môže dochádzať k výrazným skokom v účinnosti pri prechodových dejoch medzi jednotlivými kvadrantmi, bolo potrebné navrhnúť nový postup na definovanie účinnosti prevodoviek s využitím pôvodného súboru nameraných dát.

Pri návrhu nového prístupu je potrebné uvážiť, že takéto straty môžu byť najjednoduchšie modelované ako:

$$T_{fDUT} = B\omega_{DUT}, \quad (14)$$

kde T_{fDUT} sú trecie straty a B je koeficient viskózneho trenia. Ak znova uvážime konštantnú prevádzkovú teplotu, straty môžu byť definované ako:

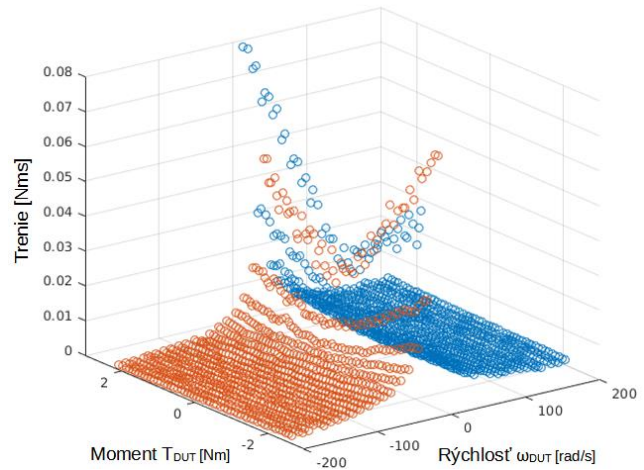
$$T_{fDUT} = \omega_{DUT} f_{fDUT}(T_{DUT}, \omega_{DUT}), \quad (15)$$

kde f_{fDUT} je funkcia trecej charakteristiky pohonu DUT, ktorú môžeme zapísať ako:

$$f_{fDUT}(T_{DUT}, \omega_{DUT}) = \frac{T_{DUT} - T_{DUTs}}{\omega_{DUT}}, \quad (16)$$

Výsledná trecia charakteristika je zobrazená na Obr. 10. Charakteristika je prezentovaná z perspektívy vstupného momentu a uhlovej rýchlosti motora DUT. Body zobrazené červenou farbou predstavujú oblasť so zápornou orientáciou rýchlosti a body označené modrou farbou oblasť s kladnou orientáciou rýchlosti. V porovnaní s Obr. 9 je možné

konštatovať, že v grafe trecej charakteristiky sa nenachádzajú diskontinuity, ktoré by mohli zapríčiniť skokové zmeny momentu pri prechode nulou. Treciu charakteristiku môžeme rozdeliť na dve pracovné oblasti a to podľa kladnej a zápornej hodnoty uhlovej rýchlosti. Tento prístup zjednoduší ďalšie spracovanie dát a uľahčí proces matematickej aproximácie, ktorej výsledkom bude funkcia definujúca vlastnosti prevodovky pri rôznej záťaži a uhlovej rýchlosti. Takúto funkciu bude následne možné implementovať do riadiacej štruktúry emulátora. Pre zabezpečenie vysokej presnosti aproximácie je potrebné namerané body aproximovať v dvoch osiach.



Obr. 10 Trecia charakteristika zaťažovacieho pohonu

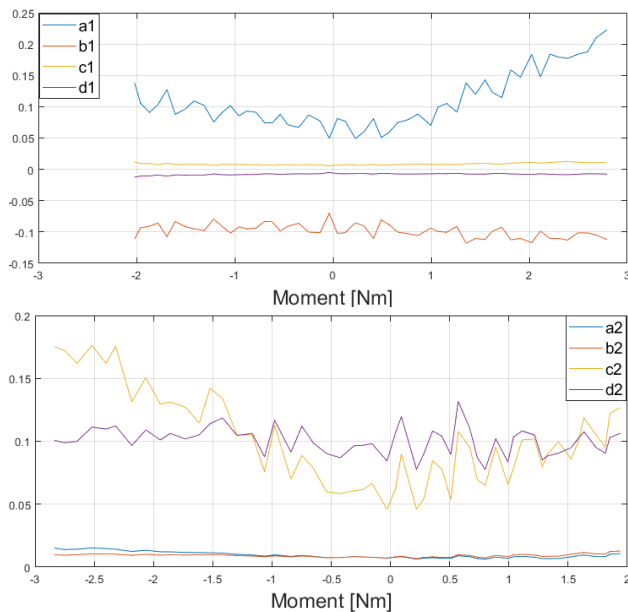
Prvotne boli namerané body aproximované z pohľadu vstupného momentu T_{DUT} . Tie viditeľne vykazovali exponenciálny charakter, a preto boli aproximované exponenciálnou funkciou, a to zvlášť pre kladnú i zápornú rýchlosť:

$$f_{fDUT}(T_{DUT} = konšt., \omega_{DUT}) = a^b \omega_{DUT} + c^d \omega_{DUT}. \quad (19)$$

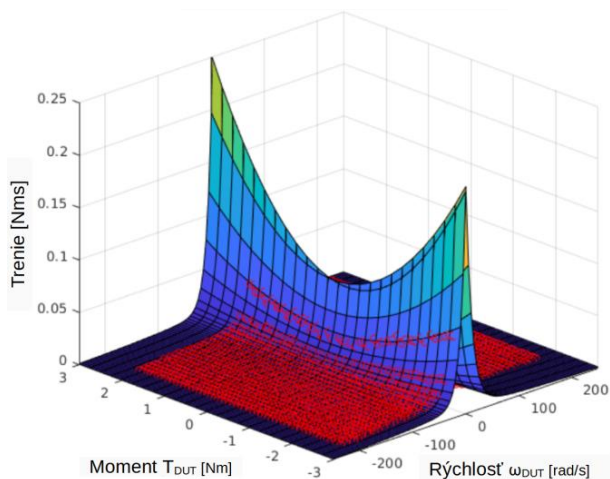
Následne boli parametre funkcie a, b, c, d porovnané a vykreslené pre každú hodnotu momentu ako závislosť momentu. Na vykreslených grafoch bolo možné pozorovať potenciálnu aproximáciu jednotlivých parametrov, kde pre kladnú rýchlosť hodnoty parametra a vykazovali kvadratickú závislosť, parameter b lineárnu závislosť a hodnoty c a d takmer konštantnú hodnotu v celom rozsahu. Pre záporné rýchlosti, kde parameter a, b a d vykazovali takmer konštantné hodnoty a parameter c bol aproximovaný kvadratickou funkciou. Grafy aproximovaných koeficientov sú na Obr. 11. Výsledné funkcie sú uvedené vo vzťahoch (17) a (18) kde jednotlivé koeficienty p_{ix} predstavujú koeficienty náhradných funkcií parametrov a, b, c, d . Index $j=1$ platí pre kladné rýchlosti a $j=2$ pre záporné rýchlosti.

$$f_{fDUT1}(T_{DUT}, \omega_{DUT}) = (p_{11} T_{DUT}^2 + p_{12} T_{DUT} + p_{13}) e^{(p_{14} T_{DUT} + p_{15}) \omega_{DUT}} + p_{16} e^{p_{17} \omega_{DUT}}, \quad (17)$$

$$f_{fDUT2}(T_{DUT}, \omega_{DUT}) = p_{21} e^{p_{22} \omega_{DUT}} + (p_{23} T_{DUT} + p_{24}) e^{p_{25} \omega_{DUT}}, \quad (18)$$



Obr. 11 Vyhodnotenie parametrov aproximovanej funkcie pre kladné a záporné hodnoty rýchlosti



Obr. 12 Aproximovaná funkcia trenia prevodovky porovnaná s nameranými hodnotami

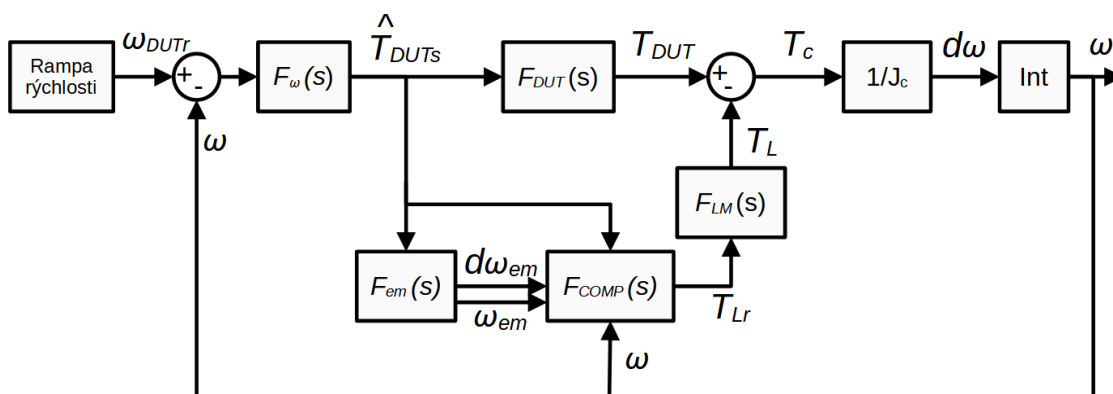
Výsledná funkcia porovnaná s nameranými hodnotami je zobrazená na Obr. 12. Presnosť aproximácie meraných bodov funkciou trenia je s využitím metódy R^2 rovná hodnote 0.988, pričom hodnota 1 prezentuje úplnú zhodu.

Takéto vyšetrenie prevodovky je nutné realizovať pre každý nový pohon DUT predtým, ako sa pristúpi k samotnej emulácii momentu. Po vyšetrení je možné realizovať EDM aj na testovacom zariadení, ktoré nedisponuje výstupným snímačom momentu. Všetky postupy merania boli po prvom meraní výrazne zautomatizované a je možné ich jednoducho využiť pri vyšetrení akéhokoľvek aktuátora v budúcnosti. Koeficienty trecej charakteristiky sú uvedené v Príloha 1

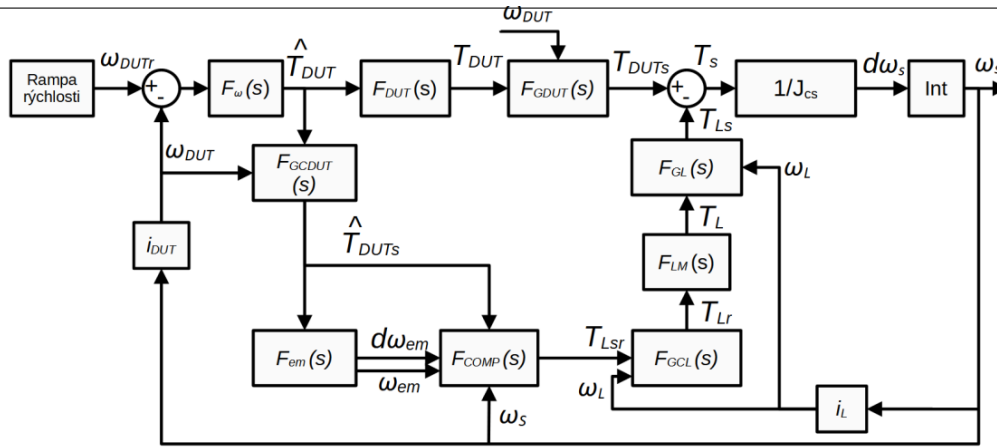
VII. VOĽBA METÓDY EDM

Pri realizácii emulátora je dôležité zvoliť vhodnú riadiacu štruktúru, ktorá bude spĺňať dynamické a implementačné požiadavky finálneho systému. V systéme s dvoma prevodovkami môže jednoducho dôjsť k zavedeniu nepresností pri zlom určení momentu zotrvačnosti a trenia mechaniky emulátora, a preto je hlavnou požiadavkou na emulačnú metódu dostatočná robustnosť pre využitie v systéme s prevodovkami. Ďalšou požiadavkou je možnosť implementácie takejto metódy do priemyselného meniča. Preto je potrebné zvoliť metódu, ktorá pre svoju správnu funkciu využíva údaje prístupné priamo v meniči. V práci [11] bola do priemyselného meniča implementovaná metóda emulácie založená na nelineárnom riadení, ktorá je podrobnejšie opísaná v [8]. Táto metóda je dostatočne robustná pre použitie v navrhovanom systéme. Metóda založená na nelineárnom riadení môže byť realizovaná dvoma spôsobmi a to s využitím PI regulátora alebo PI estimátora. Vhodnejšou voľbou je využitie PI estimátora, pretože je jednoduchšie implementovateľná a dosahuje lepšie výsledky emulácie. Bloková schéma metódy založenej na nelineárnom riadení je na Obr. 13.

Blok F_ω predstavuje PI regulátor rýchlosti, F_{em} blok emulovanej záťaže, ktorý počíta žiadanú uhlovú rýchlosť a uhlové zrýchlenie s akým by sa mal hriadeľ otáčať pri aplikovaní požadovanej záťaže. F_{COMP} je kompenzátor, ktorého úlohou je kompenzovať dynamiku systému emulátora a bloky F_{DUT} a F_{LM} reprezentujú pohony DUT a LM.



Obr. 13 Bloková schéma riadiacej štruktúry emulátora využívajúceho nelineárne riadenie



Obr. 14 Upravená štruktúra emulátora

Pre využitie tejto metódy emulácie je potrebné doplniť riadiacu štruktúru o ďalšie bloky, aby bolo možné eliminovať vplyv nepresností, ktoré do systému zavádzajú prevodovky. Navrhovaná štruktúra emulátora je zobrazená na Obr. 14.

Do štruktúry pribudli bloky prevodoviek F_{GDUT} , F_{GL} a taktiež bloky konverzií týchto prevodoviek F_{GCDUT} a F_{GCL} . Bloky prevodoviek predstavujú fyzické prevodovky v systéme emulátora, ktorých vlastnosti boli preskúmané. Bloky konverzií prevodoviek predstavujú matematické vyjadrenie funkcií týchto prevodoviek, ktoré umožní regulačnému systému predikovať straty na prevodovkách a adekvátne ich kompenzovať tak, aby výsledný záťažový moment na hriadeľ testovaného pohonu mal rovnaké parametre, ako keby naň pôsobila reálna mechanická záťaž. Riadiaca štruktúra pracuje s veličinami prepočítanými na spoločný hriadeľ. Emulované uhlové zrýchlenie a emulovaná uhlová rýchlosť sú počítané ako rýchlosť a zrýchlenie spoločného hriadeľa, a preto je aj výsledná žiadosť momentu pre zaťažovací pohon v hriadeľových veličinách. Žiadosť momentu pre pohon LM je následne potrebné prepočítať späť do motorových veličín cez blok F_{GCL} s uvažovaním prevodového pomeru a trecích strát prevodovky. Prepočítaná žiadosť momentu sa následne privádza na motor LM.

VIII. POUŽITÝ HARDVÉR

Na realizáciu emulátora dynamických momentov bol využitý testovací stend, ktorý pôvodne slúžil na dlhodobé záťažové testy presných aktuátorov. Na zostavenie emulátora bol využitý menič SINAMICS S120 a riadiaca jednotka SIMOTION D445-1. Pohony oboch aktuátorov sú napájané zo striedačov (Single Motor Module - SMM) pripojených k spoločnej jednosmernej zbernici (DC link). DC link je napájaný rekuperačným usmerňovačom (Active Line Module - ALM). Na strane zaťažovacieho pohonu bol využitý motor SIEMENS 1FK7063-2AC71-1DG0 s prevodovkou APEX DYNAMICS AD110-P0. Parametre pohonu sú uvedené v Tab. 1.

Parametre pohonu LM	
Napätie [V]	273
Nominálny prúd [A]	4,4
Nominálne otáčky [ot/min]	2000
Nominálny moment [Nm]	8,9
Prevodový pomer prevodovky	10
Nominálny moment prevodovky [Nm]	230

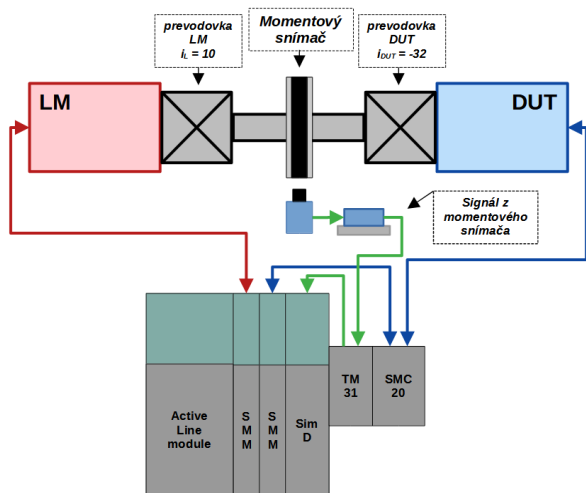
Tab. 1 Základné parametre pohonu LM

Na zostavenie a otestovanie emulátora bol ako pohon DUT použitý aktuátor s parametrami uvedenými v Tab. 2. Prevodový pomer prevodovky je uvedený ako záporné číslo, ktoré reprezentuje zmenu smeru rotácie výstupného hriadeľa k vstupnému hriadeľu prevodovky.

Parametre pohonu DUT	
Napájacie napätie [V]	560
Nominálny prúd motora [A]	2,81
Nominálne otáčky motora [ot/min]	3000
Nominálny moment motora [Nm]	4,05
Prevodový pomer prevodovky	-32
Nominálny moment aktuátora [Nm]	122

Tab. 2 Základné parametre testovaného aktuátora

Na spoločnom hriadeľi je umiestnený snímač momentu - Magtrol TF213 s rozsahom merania do 500 Nm s možným preťažením až do 200% a presnosťou 0,1%. Na to, aby bolo možné spracovať signál zo snímača momentu priamo pomocou meniča, bol systém S120 rozšírený o prídavnú kartu TM31, ktorá dokáže spracovať výstupný analógový signál z prevodníka snímača momentu. Celá zostava systému S120 spolu s prídavnými kartami a snímačom momentu je zobrazená na Obr. 15.



Ob

r. 15 Zostava emulátora so systémom SIEMENS S120 a momentovým snímačom

IX. PRENOS RIADIACEJ ŠTRUKTÚRY DO PRIEMYSELNÉHO MENIČA

Na parametrovanie a naprogramovanie meniča s nadradenou riadiacou jednotkou Simotion D sa využíva softvér Simotion SCOUT. Po pridaní všetkých komponentov emulátora do projektu, je potrebné vykonať automatické nastavenie parametrov pohonov, kde sa taktiež zistí moment zotrvačnosti celého systému J_{CS} a trecie straty systému. V prípade oboch pohonov sú ich trecie straty kompenzované už v riadiacej štruktúre emulátora, preto bolo potrebné vypnúť ich kompenzáciu. Pohon LM je riadený v momentovej slučke a pohon DUT v rýchlostnej slučke. Na programovanie riadiacej štruktúry v priemyselnom meniči bol využitý jazyk Štrukturovaný text. Riadiaca štruktúra využíva na výpočty aktuálne hodnoty momentov a uhlových rýchlostí, ktoré sú prístupné priamo v meniči. Na prístup riadiacej jednotky k týmto hodnotám ich bolo potrebné prenášať s využitím telegramov, ktoré slúžia na komunikáciu medzi zariadeniami v systéme SINAMICS S120.

Dôležitým bodom počas implementácie riadiacej štruktúry do priemyselného meniča je správne pochopenie orientácie uhlovej rýchlosti a momentov nielen na strane snímačov ale zároveň aj na strane žiadaných hodnôt, ktoré vystupujú z regulačnej štruktúry. Pre jednoduchšie porozumenie orientácií smerov otáčania a momentov na motoroch, ako aj prechodov medzi jednotlivými režimami je k dispozícii Tab. 3.

Režim chodu DUT	ω_{DUT}	T_{DUT}	T_L	ω_L	Režim chodu LM
Motor	+	+	+	-	Generátor
Motor	-	-	-	+	Generátor
Generátor	+	-	+	+	Motor
Generátor	-	+	-	-	Motor

Tab. 3 Tabuľka orientácie motorových veličín DUT a LM

X. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

Na realizáciu EDM sú využívané rôzne modely záťaží zostavené na základe fyzikálnych vzťahov, ktoré definujú jednotlivé technologické zariadenia. Tieto modely majú čo najvernejšie napodobniť veličiny vplyvajúce na pohon v reálnej prevádzke. Predstavený emulátor bol otestovaný pre dva typy záťaže a to moment zotrvačnosti systému a bremeno na rameno.

Experimentálne výsledky z fyzicky realizovaného emulátora je možné porovnávať buď priamo s dátami z reálnej záťaže z prevádzky aktuátora v reálnom pracovnom prostredí alebo s priebehmi zo simulačného prostredia, kde je aktuátor namodelovaný s aplikovanou záťažou. Pre určenie, či je emulátor funkčný, má pri prvotných testoch vyššiu výpovednú hodnotu práve porovnanie so simulačnými dátami, pretože model emulovanej záťaže je v reálnom emulátore identický s tým v simulačnom programe. Ak by boli namerané dáta porovnávané priamo s reálnou záťažou, na výsledných priebehoch by sa mohli prejaviť aj nepresnosti vnesené do systému nedostatočne presným modelom emulovanej záťaže. Jedinou zadávanou žiadanou veličinou do systému, je žiadaná uhlová rýchlosť pohonu DUT.

V grafoch jednotlivých meraní merané hodnoty predstavujú namerané veličiny priamo z meniča fyzického emulátora a podávajú informáciu o jeho funkčnosti. Hodnoty označené ako simulačné predstavujú simuláciu celého systému emulátora v simulačnom prostredí. Ideálne hodnoty reprezentujú reálnu záťaž pôsobiacu na hriadeľ pohonu DUT získané zo simulačného softvéru. Pri získavaní experimentálnych výsledkov boli PI regulátory otáčok a prúdov pohonov v simulačnom prostredí aj na fyzickom emulátore nastavené na pôvodnú hodnotu, pri akej prebehlo prvotné nastavenie parametrov pohonov na fyzickom emulátore pre moment zotrvačnosti rovný momentu zotrvačnosti systému.

Najdôležitejšou sledovanou hodnotou pri experimentoch je moment na motore DUT T_{DUT} , ktorý podáva informáciu o tom, či je testovaný pohon zaťažovaný podľa požadovanej emulovanej záťaže.

A. Emulácia momentu zotrvačnosti systému

Základným modelom pre emuláciu záťaže je emulácia momentu zotrvačnosti systému emulátora. V tomto prípade sa jedná o moment zotrvačnosti systému zložený z momentov zotrvačnosti testovaného aktuátora, zaťažovacieho pohonu s prevodovkou a taktiež spoločného hriadeľa. Pre hodnoty emulovanej uhlovej rýchlosti ω_{em} a emulovaného uhloveho zrýchlenia $d\omega_{em}$ platí:

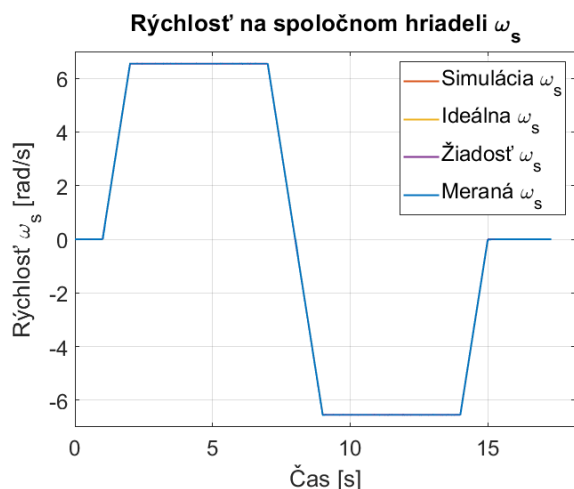
$$d\omega_{em} = \frac{1}{J_{em}} (\hat{T}_{DUTs} - \omega_{em} B_{em}) \tag{20}$$

$$\omega_{em} = \int d\omega_{em} dt \tag{21}$$

kde J_{em} a B_{em} sú moment zotrvačnosti a viskózne trenie systému získané pri automatickom nastavení parametrov zostavy. Pri správnom nastavení emulátora, by v ustálenom stave mal pracovať testovaný pohon ako v stave na prázdno,

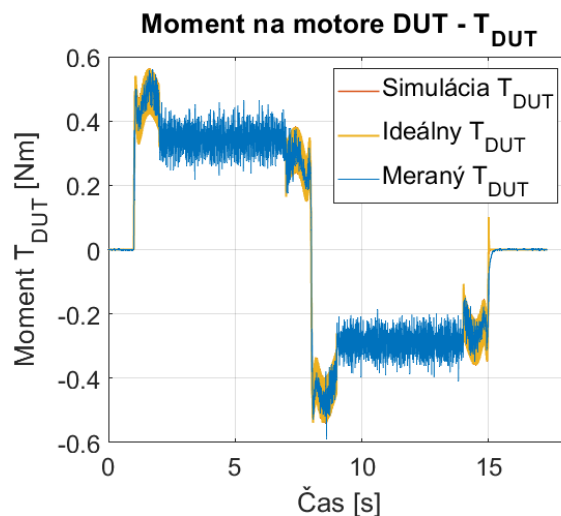
čiže výstupný hriadeľ testovaného pohonu DUT by nemal byť zaťažovaný žiadnym záťažovým momentom. Pohon LM by mal vykompenzovať vplyv vlastného momentu zotrvačnosti a viskózneho trenia na systém. Meranie prebehlo pri rýchlosti 6,54 rad/s na spoločnom hriadeľi (2000 ot/min z perspektívy motora DUT). Žiadaná rýchlosť narastala po rampe za čas 1 s, po behu pri ustálenej rýchlosti po dobu 5 s sa po rovnakej rampe zmenil smer otáčania pohonu do záporných hodnôt. Takýto priebeh zaručuje otestovanie pohonu pri dynamických dejoch, ustálenom stave a aj prechode cez nulovú hodnotu rýchlosti.

Hodnota aktuálneho momentu na pohone DUT T_{DUT} na Obr. 17 s vysokou presnosťou kopíruje ideálny priebeh momentu T_{DUT} . Pri takto nízkych hodnotách emulovaného momentu zotrvačnosti a viskózneho trenia systému je správnu funkciu emulácie možné odsledovať najmä z priebehov momentu na pohone LM, pretože najväčšiu zložku záťažového momentu vyvíjaného na pohon DUT tvorí práve trenie v cykloidnej prevodovke, ktoré musí prekonať pri udržaní požadovanej rýchlosti. Zakmitanie meraného momentu T_{DUT} pri prechodových dejoch zapríčiňuje vplyv nelineárnych vlastností prevodovky pohonu DUT.

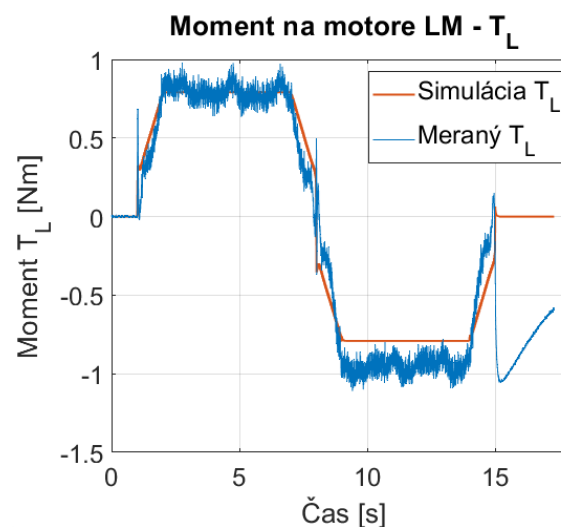


Obr. 16 Priebeh rýchlosti na spoločnom hriadeľi pri 6,54 rad/s

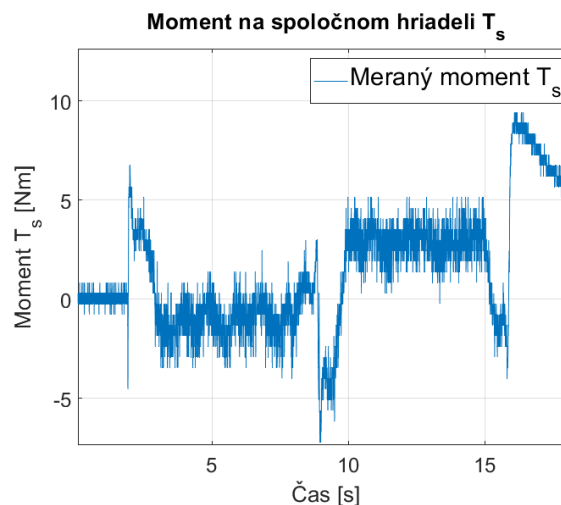
Na priebehu momentu pohonu LM T_{LM} , na Obr. 18 je vidieť, že pohon musí pri takto nízkych hodnotách rýchlosti a momentu zotrvačnosti kompenzovať len svoje trenie, kedy aj pri motorickom režime pohonu DUT ($\omega_{DUT} > 0, T_{DUT} > 0$), pohon LM pracuje taktiež v motorickom režime ($\omega_L > 0, T_L > 0$). Hodnota simulovaného záťažového momentu sa v ustálenom stave a najmä pri zápornom smere otáčania mierne odlišuje od meraných hodnôt na fyzickom emulátore, čo môže byť zapríčinené nesprávnym určením hodnoty trecích strát prevodovky LM. Špičky zaznamenané pri rozbehu a prechode nulovou hodnotou rýchlosti sú zapríčinené statickým trením a vôľou v zuboch, ktoré nie sú namodelované v simulačnom prostredí. V závere merania dochádza ku skokovej zmene momentu T_L , kde sa prejavuje povolenie napnutia pružných členov na spoločnom hriadeľi.



Obr. 17 Priebeh momentu na motore DUT



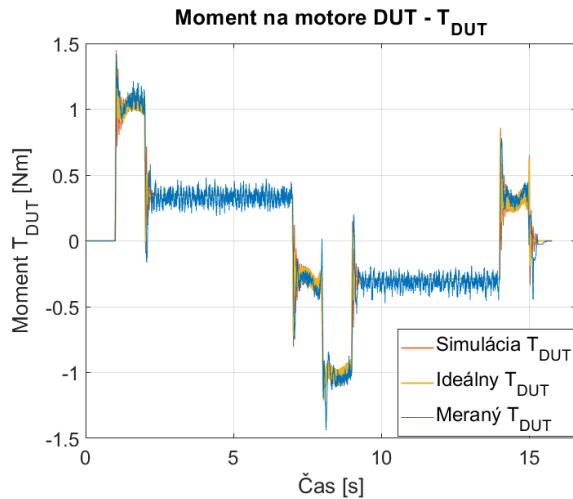
Obr. 18 Priebeh momentu na motore LM



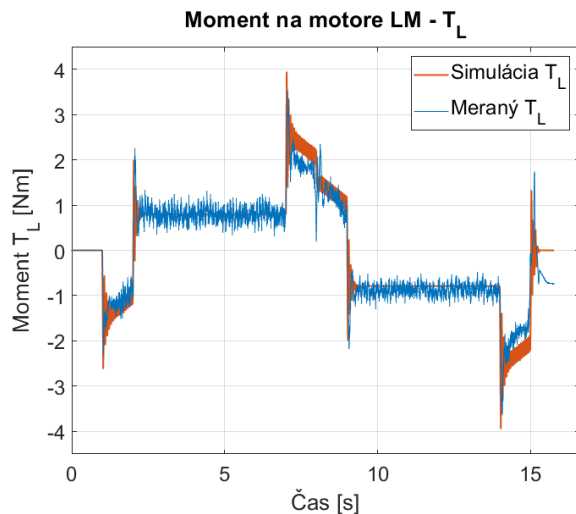
Obr. 19 Priebeh momentu na spoločnom hriadeľi

Graf aktuálneho momentu na hriadeľi na Obr. 19 prezentuje, že na hriadeľi je možné namerať moment T_S aj v oblasti ustáleného stavu. Je však dôležité poznamenať, že s ohľadom na trenie v prevodovkách a prítomnosť pružnej spojky na hriadeľi sa jedná o očakávaný jav. Hodnoty momentov na spoločnom hriadeľi do úrovne 5 Nm však pri uvážení vysokého prevodu a účinnosti prevodovky DUT, nemajú výrazný vplyv na motor DUT.

Pre lepšie odsledovanie správnej funkcie emulátora najmä pri prechodových dejoch bol otestovaný aj násobok momentu zotrvačnosti systému v podobe $J_{em} = 7 * J_{CS}$ pri rovnakom profile rýchlosti testovaného pohonu.



Obr. 20 Priebek momentu na motore DUT pre $J_{em} = 7 * J_{CS}$



Obr. 21 Priebek momentu na motore LM pre $J_{em} = 7 * J_{CS}$

Na priebehu na Obr. 21 je možné pozorovať funkciu pohonu LM, ktorý pri rozbehu pracuje ako generátor ($\omega_L > 0, T_L < 0$) a brzdí pohon DUT v motorickom režime ($\omega_{DUT} > 0, T_{DUT} > 0$). Po prechode do ustáleného stavu udržiava konštantný moment v motorickom režime ($\omega_L > 0, T_L > 0$), ktorým kompenzuje straty na svojej prevodovke a následne pri brzdení zvýši hodnotu záťažového momentu v motorickom režime, kedy

emuluje moment zotrvačnosti, ktorý sa pohon DUT snaží ubrzdiť v generátorickom režime ($\omega_{DUT} > 0, T_{DUT} < 0$). Rovnaký princíp platí aj pre reverznú rýchlosť.

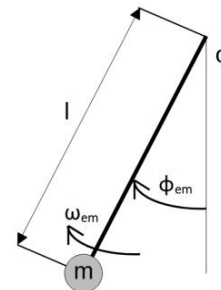
B. Emulácia bremena na ramene

Druhou emulovanou záťažou je model bremena na ramene. Emuláciou tejto záťaže bude možné overiť funkčnosť systému pri vyšších záťažových momentoch. Model bremena na ramene predstavuje dokonale tuhú tyč o dĺžke l so závažím o hmotnosti m na jej konci. Hmotnosť tyče je v porovnaní s hmotnosťou závažia zanedbateľná a je pevne uchytená o hriadeľ pohonu. Počas prevádzky sa závažie otáča okolo osi hriadeľa motora pričom naň pôsobí variabilným záťažovým momentom v závislosti od aktuálnej polohy závažia. Rameno s bremenom je zobrazené na Obr. 22. Model bremena na ramene vieme matematicky zapísať ako:

$$\omega'_{em} = \frac{1}{J_c} (T_{DUT} - B\omega_{em} - mgl \sin\phi_{em}),$$

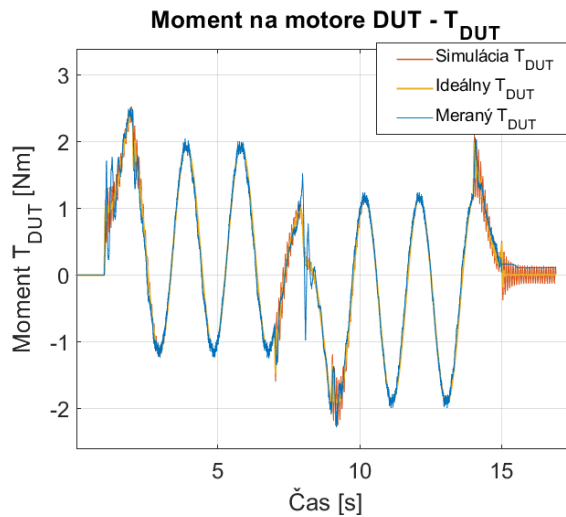
$$\dot{\phi} = \omega_{em},$$

$$J_c = m l^2$$
(22)

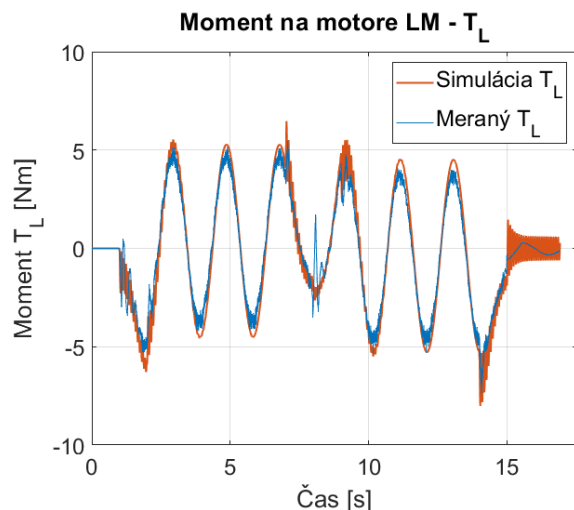


Obr. 22 Rameno s bremenom

Žiadosť rýchlosti zostala zachovaná ako pri emulácii momentu zotrvačnosti systému. Otestovaná bolo bremeno o hmotnosti $m_{BR} = 5$ kg s dĺžkou ramena $l_{BR} = 1$ m. Hodnota aktuálneho momentu na motore DUT je zobrazená na Obr. 23 a presne kopíruje ideálny a simulovaný priebeh momentu.



Obr. 23 Aktuálny moment na motore DUT (5 kg, 1m)



Obr. 24 Aktuálny moment na motore LM (5 kg, 1m)

Na Obr. 24 je zobrazený moment na motore LM. Pri prechode nulovou rýchlosťou dochádza na meraných priebehoch k skokovej zmene momentu, ktorú zapríčiňuje statické trenie a vôľa v zuboch pohonov, ktoré nie je namodelované v simulácii. Pri bremene s hmotnosťou 5kg, bol na motor DUT vyvíjaný záťažový moment na úrovni 2,6 Nm, čo predstavuje približne 65% nominálneho momentu. Pre emuláciu vyšších záťaží je potrebné prestaviť parametre regulátorov rýchlosti, aby nedochádzalo k rozkmitaniu systému. Prezentované priebehy dokazujú, že emulátor zvláda emulovať aj vysoké záťažové momenty.

XI. ZÁVER

Príspevok sa venuje problematike emulovania dynamických momentov (EDM), ktorá je využiteľná v širokom rozmedzí priemyselných aplikácií na overenie vlastností pohonu pred jeho nasadením v reálnej prevádzke. V úvodnej časti boli prezentované spôsoby testovania elektrických pohonov pomocou HIL simulácií, z ktorých najpokročilejšou metódou je práve emulácia dynamických momentov s využitím zaťažovacieho pohonu. V práci bol navrhnutý a realizovaný emulátor na testovanie vysoko presných aktuátorov s rozšírenou metódou emulácie založenou na nelineárnom riadení. Rozšírenie tejto metódy spočívalo v implementácii nových blokov do regulačnej štruktúry, ktoré zohľadňujú prítomnosť prevodoviek v mechanizme emulátora a potláčajú ich negatívny vplyv na presnosť emulácie. Riadiaca štruktúra bola realizovaná v simulačnom prostredí a taktiež bola implementovaná do priemyselného meniča. Správnosť navrhovaného emulátora bola overená experimentálnymi výsledkami realizovanými v simulačnom prostredí i na fyzickom emulátore. Emulovanou záťažou boli moment zotrvačnosti systému a bremeno na ramene, ktoré potvrdili správnu funkciu emulátora. Budúci výskum sa bude zameraný na testovanie emulátora pod vplyvom rôznych typov mechanických záťaží a určenie dynamických a mechanických limitov emulátora.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol s podporou Slovenskej Agentúry na Podporu Vedy a Výskumu pod číslom projektu APVV-15-0750 a Vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva Slovenskej republiky pod číslom projektu VEGA 1/0493/19.

PRÍLOHY

Koeficienty trecej charakteristiky DUT	
P_{11}	0,017
P_{12}	0,0065
P_{13}	0,0704
P_{14}	-0,0038
P_{15}	-0,0968
P_{16}	0,0085
P_{17}	-0,0078
P_{21}	0,0094
P_{22}	0,0092
P_{23}	0,014
P_{24}	-0,0035
P_{25}	0,0713
P_{26}	0,1004

Príloha 1. Koeficienty trecej charakteristiky DUT

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Bouscayrol, A.: „Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives,” 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, pp. 2146-2151, doi: 10.1109/ISIE.2008.4677304.J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.ñ
- [2] Wasko, C. R.: „A universal AC dynamometer for testing motor drive systems,” in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1987, pp. 409–412.
- [3] Wiliamson, A.C.: "An Improved Engine-Testing Dynamometer", in Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives, IEE Conference Publication 310, 1989, pp. 374-378.
- [4] Collins, E. R., Huang, Y.: „A programable dynamometer for testing rotating machinery using a three-phase induction machine,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 9, pp. 521–527, Sept. 1994
- [5] Newton, R. W., Betz, R. E., Penfold, H. B.: “Emulating dynamic load characteristics using a dynamic dynamometer,” in Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems, 1995, vol. 1, pp. 465–470.
- [6] Sandholdt, P., Ritchie, E., Pedersen, J.K., Betz, R.E.: „A Dynamometer Performing Dynamical Emulation of Loads with Non-linear Friction”, in Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'96), Warsaw, Poland, 1996, Part 2, pp. 873-878.
- [7] Akpolat, Z. H., Asher, G. M., Clare, J. C.: „Emulation of high bandwidth mechanical loads using vector controlled AC dynamometer,” in Proc. 8th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (PEMC'98), 1998, vol. 5, pp. 133–138.
- [8] Rodič, M., Jezernik, K., Trlep, M.: „Dynamic emulation of mechanical loads - approach based on nonlinear control.” In 2005 European Conference on Power Electronics and Applications (2005): 10 pp.-P.10.
- [9] Gan, C., Todd, R., M. Apsley, J.: „Drive System Dynamics Compensator for a Mechanical System Emulator.” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 70-78, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2327581.
- [10] de Oliveira, C. M. R., de Aguiar, M. L., Guazzelli, P. R. U., de Castro, A. G., d. Santos, S. T. C. A., Monteiro, J. R. B. A.: „Analysis of the Dynamic Emulation Problem for Validation of Position Control Algorithms in Machine Drives,” 2018 13th IEEE International

- Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Paulo, Brazil, 2018, pp. 1266-1273, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627077
- [11] Kyslan, K., Ďurovský, F. (2013). Dynamic Emulation of Mechanical Loads—An Approach Based on Industrial Drives' Features. *automatika*, 54(3), 356-363.
- [12] Hric, M., Ďurovský, F., Fedák, V. " Vplyv nelinearít cykloidnej prevodovky na presnosť polohovania ". *ATP Journal*, vol. 9/2012, str. 42–44
- [13] Suchý, L. , Kyslan, K., Ferková Ž., Ďurovský, F.: „Dynamic emulation of mechanical loads — Analysis and implementation into industrial drive.“ 2016 *ELEKTRO*, Strbske Pleso, 2016, pp. 238-242, doi: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512072.

Výskum technológií WAMS systémov v oblasti riadenia elektrizačných sústav

Vladimír Kohan

Katedra elektroenergetiky
Technická univerzita v Košiciach, FEI
Košice, Slovenská republika
vladimir.kohan@tuke.sk

Michal Kolcun

Katedra elektroenergetiky
Technická univerzita v Košiciach, FEI
Košice, Slovenská republika
michal.kolcun@tuke.sk

Zsolt Čonka

Katedra elektroenergetiky
Technická univerzita v Košiciach, FEI
Košice, Slovenská republika
zsolt.conka@tuke.sk

Abstrakt—Tento výskum sa zaoberá problematikou moderných technológií WAMS, ktoré slúžia na monitorovanie elektroenergetických systémov v reálnom. V úvode práce je zahrnutá stavba a štruktúra WAMS systémov s popisom využitia základných prvkov. V krátkosti vysvetľuje integráciu WAMS systémov do flexibilných zariadení FACTS a prenosových vysokonapäťových jednosmerných vedeniach HVDC. Hlavným výskumom príspevku je implementácia týchto systémov do elektrizačnej prenosovej sústavy pre dispečerské monitorovanie a riadenie prevádzky. Dôležitou úlohu nie je len monitorovanie a riadenie, ale aj ochrana, estimácia či nastavovanie alarmov pre detekciu napr.: ostrovej prevádzky, prekročenie limitných hraníc napätí, prúdov, uhlov, či detekcie kývania generátorov a oscilácií frekvencie a prenášaných výkonov. Príspevok obsahuje teoretické spracovanie a praktického uplatnenie WAMS zariadení s vizuálnymi pohľadmi a ich všestranné použitie počnúc monitorovaním až po pokročilé riadenie ES, ktoré je pre liberalizáciu trhu s elektrinou a nasadením veľkého množstva obnoviteľných zdrojov napr. v sústave ENSTO-E veľmi prospešné. Systémy WAMS sa ďalej rozvíjajú a stávajú sa neodmysliteľnou súčasťou elektroenergetického priemyslu – zvyšovaním bezpečnosti, kvality a zväčšovaním prenosovej kapacity (ampacity) vedení a to v stabilnej prevádzke so zreteľom na najvyššiu ochranu voči Black-Out.

Keywords—WAMS; PMU; PDC; synchrofázor; riadenie; monitorovanie stability oscilácií

Abstract— This research is characterized by the issue of modern WAMS technology, which is used to monitor power systems in real-time view. The introduction includes the construction and structure of WAMS systems with a description of the use of basic elements. It briefly explains the integration of WAMS systems into flexible FACTS devices and HVDC high-voltage transmission lines. The main research of the paper is the implementation of these systems in the power transmission system for dispatch monitoring and operation control. An important task is not only monitoring and control, but also protection, estimation or setting of alarms for detection of e.g.: island operation, exceeding the limits of voltages, currents, angles, or detection of generator swinging and oscillations of frequency and transmitted power. The paper contains theoretical elaboration and practical application of WAMS devices with visual views and their versatile use, from monitoring to advanced PS control, which is for the liberalization of the electricity market and the deployment of a large number of renewable sources, e.g., very beneficial in the ENSTO-E system. WAMS systems are

further developing and becoming an integral part of the electricity industry - by increasing the safety, quality and increasing the transmission capacity (ampacity) of overhead lines in stable operation with regard to highest protection against Black-Out.

Keywords—WAMS; PMU; PDC; synchrophasor; control; oscillation stability monitoring

I. ÚVOD

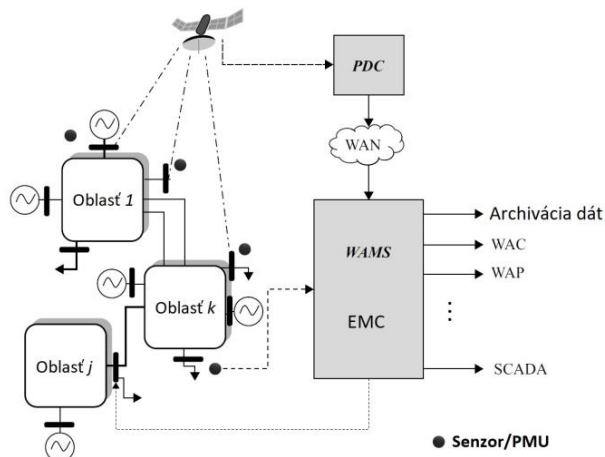
Vývoj pokročilých rozsiahlych monitorovacích systémov WAMS založených na technológií synchrofázorov poskytuje bezprecedentné pohľady na dynamické správanie elektroenergetického systému so zvýšeným rozlíšením a presnosťou. Okrem zvýšenia množstvu dát sa zvýšila aj rozmanitosť meracích prístrojov. V tejto súvislosti, pokrok v oblasti vývoja a inštalácie sofistikovaných nízko-napäťových záznamových zariadení viedlo k nasadeniu veľkého počtu senzorov, ktoré prenášajú dáta do špecializovaných koncentrátorov dát [1], [2]. Pretože sa veľkosť a zložitosť elektroenergetických sietí neustále zvyšuje, monitorovanie a predpovedanie dynamických procesov v reálnom čase „real-time“ sa stáva čoraz dôležitejším. Toto zvýšenie, oboch, objemu a rozmanitosti údajov si vyžaduje pokrok v metodike automatického porozumenia, spracovania a sumarizácie meraných dát.

Za posledné dve dekády boli vyvinuté rôzne formy WAMS systémov na monitorovanie a sledovanie správania oscilácií elektrizačných sústav [3]. V hlavnej podstate je WAMS inteligentným systémom s nepretržitou identifikáciou (kontrolou) stavu elektroenergetického systému.

Kľúčovými prvkami WAMS technológie sú znázornené na Obr. 1. Konceptne sa WAMS systém skladá z rôznych komponentov, ako sú napríklad zapisovače frekvenčných porúch, fázorové jednotky (PMU), digitálne relé, pokročilú komunikačnú linku a technológiu spracovania signálu [1], [4]. Technológia synchronizovaného merania poskytuje fázorové dáta rýchlosťou až 60 vzoriek za sekundu (moderné trendy popisujú vo vývoj až 100+ vzoriek), čo umožňuje monitorovanie správania sa systému v reálnom čase bez oneskorenia (s minimálnym skreslením) [5].

Štruktúra WAMS je hierarchická a možno ju rozdeliť na dve majoritné úrovne: lokálnu a globálnu [6]. Na lokálnej

úrovni sú zaznamenané údaje automaticky zhromažďované, synchronizované a archivované monitorovacím a riadiacim centrom známym ako koncentrátor fázorových dát (PDC). Tieto informácie sa ďalej odosielajú do globálneho koncentrátora dát (v lit. známe aj ako Super PDC) pre systém monitorovania dynamiky v reálnom čase (RTDM), širokoplošné riadenie (WAC) a široko-plošnú ochranu (WAP) na vyhodnotenie (za účelom) estimácie/odhadu, riadenia a ochranných špecifikácii [5].



Obr. 1 Všeobecný princíp štruktúry WAMS

Vstupné dáta môžu byť nedokonalé – chybné, korelačné, dynamicky nekonzistentné a v nezlučiteľných formách alebo modalitách. Monitorovanie poskytuje kritické údaje, ktoré sa spracovávajú a používajú pre riadiace a ochranné funkcie na zastavenie (elimináciu) degradovania elektrizačnej sústavy [3]. Úspešná implementácia zariadení monitorovania a spracovávania dát v reálnom čase založenej na technológií synchrofázorov si vyžaduje integráciu niekoľkých úrovní spúšťania a nastavení, ktoré detekujú zhoršujúce sa podmienky systému za prítomnosti normálneho správania sa (v ustálenom chode) elektroenergetického systému [5].

Pre tieto technológie bola popísaná rozmanitá škála aplikácií. Medzi posledné aplikácie týchto technológií patria:

- Okamžité uvedenie si situácie pomocou WA – dáta v reálnom čase
- Odhad stavu elektrizačnej sústavy
- Vyhodnocovanie bezpečnostných limitov (rezerv/rozpätí)
- Celková prenosová kapacita v reálnom čase (TTC)
- Monitorovanie oscilácií v rámci elektroenergetickej sústavy
- Dynamická identifikácia parametrov
- Validácia modelu (kontingenčná analýza; kritérium N-1)
- Posúdenie integrity systému po poruche
- Monitorovanie fázového uhla
- Monitorovanie stability napätia
- Archivácia údajov na základe udalostí

Detekciu a charakterizáciu prechodových (dočasných) oscilácií v nameraných dátoch značne komplikujú rôzne faktory. V praxi môže okolitý a merací šum znehodnocovať namerané dáta v takej miere ako aj nečistoty a jednotlivé komponenty, čo vedie k falošným výstraham/alarmom a následne chybným prevádzkovým rozhodnutiam. Ďalej, komunikačné chyby môžu spôsobiť poškodenie dát a ovplyvniť interpretáciu analyzovaných dát [5].

Široko-rozsiahly monitorovací systém (WAMS) s fázorovými meracími jednotkami (PMU) poskytuje kľúčové technológie pre monitorovanie, odhad stavu, ochranu systému a riadenie široko rozsiahlych prepojených elektrizačných sústavách (systémoch) [3]. Priame, presnejšie a presnejšie monitorovanie je možné dosiahnuť technikou fázorových meraní a časového signálu globálneho polohovacieho systému (GPS). Správne uchopenie a implementácia WAMS do súčasného stavu ES s flexibilným celoplošným riadením a inteligentnou prevádzkou rieši významné diania na udržanie celoplošnej stability v komplikovanej sieti s výrazne rastúcim prenikaním výroby a obnoviteľných zdrojov energie do distribučných sietí [7].

Predkladaný výskum v poskytuje v reakcii na existujúce výzvy integrácie pokročilého merania, výpočtov, komunikácie a riadenia do vhodných úrovní PSMC komplexné pokrytie chápania, analýzy a realizácie PSMC s využitím systémov WAMS [2], [7]. Fyzické obmedzenia a technické aspekty PSMC boli plne zvážené a implementované do PSMC stratégie a sú vysvetlené pomocou zaznamenaných reálnych údajov WAMS prostredníctvom distribuovaných PMU a GPS prijímačov na Slovensku v ES SR.

II. PREHLAD PROBLEMATIKY A POPIS VYUŽITIA WAMS SYSTÉMOV

Považovať schopnosť merať veľkosť napätia a jeho fázového uhla na každej zbernici/prípojnicí a veľkosti prúdu a jeho fázového uhla v každej vetve/odbočke (vedeniach, transformátoroch a ostatných prvkoch) v elektrizačnej sústave súčasne a nepretržite a mať ich okamžite dostupné a k dispozícii tam, kde ich potrebujeme. Toto je presný spôsob funkcie systému WAMS s použitím synchrofázorov.

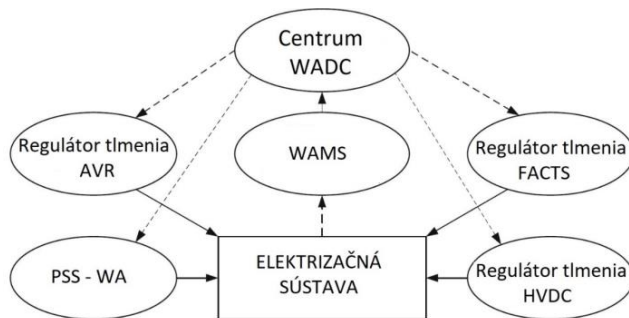
A. Implementácia WAMS systémov a rozširovanie fázorových jednotiek merania „PMU“

Konkrétna definícia a diskusia o implementácii PMU (Phasor Measurement Unit) je prezentovaná v ďalších kapitolách kde sú tieto systémy detailnejšie spracované a podrobne rozoberané ako vývojom tak aj ich štruktúrou, zapojením a pod. [5], [9]. Úvodná kapitola sa zameriava na čo najjasnejšie vysvetlenie základného konceptu toho, čo sú WAMS systémy tak, aby zreteľne uviedla čitateľa do danej problematiky a s pochopením ho vnorila do tejto rýchlo rozvíjajúcej sa oblasti merania a riadenia v elektroenergetike [10].

B. Základná štruktúra a princíp riadenia prevádzky tlmenia s regulátormi FACTS a jednosmerných prenosov HVDC pomocou rozsiahlych systémov WAMS

S technickým vývojom a znižovaním nákladov na výkonovú elektroniku (polovodičové zariadenia – tyristory, tranzistory a pod.), sa v elektrizačných sústavách uplatňujú čoraz viac a viac systémov FACTS a to najmä v moderných elektroenergetických systémoch smerujúcim ku inteligentným sieťam „smart grid“. Zariadenia FACTS môžu jednoducho upravovať/regulovať sieťové parametre (napr. reaktanciu, susceptanciu a pod.), flexibilne a výhodne optimalizovať toky výkonov, zvýšiť úroveň prenášaného výkonu, zlepšiť stabilitu napätia v uzloch sietei (zbernici a pod.) a mnoho iného [14], [16]. Zároveň s čoraz viac narastajúcou aplikáciou technológie synchronizovaného merania fázora (PMU), sa do elektroenergetických systémov v čoraz väčšej miere dostáva aj technológia WAMS, ktorá je taktiež jasným znakom technológie inteligentných sietei. Preto, by bolo úžasne a technicky vyspelé zostaviť doplnkovú stratégiu riadenia napr. plošného (wide-area) tlmenia pomocou FACTS systémov záložného na WAMS technológii, aby sa zabránilo nízkofrekvenčným osciláciám (najmä kmitania v rámci oblasti) so zvýšením globálnej stability elektrizačnej sústavy [16].

Vďaka implementáciám technológie rozsiahleho meracieho systému v elektroenergetických systémoch vnáša WAMS technológia jednoduchší a sofistikovanejší prístup na monitorovanie a prenášanie informácií o stave a prevádzke v globálnom rozsahu (prevádzkové parametre). Spravidla, WAMS systém môže prostredníctvom globálneho pozičného systému (GPS) a komunikáciou cez optické vlákna alebo iných pokrokových komunikačných technológií vykonávať synchronizované meranie s centralizovaným spracovaním vzdialených fázorových údajov (dát) [13]. Ďalej, na zvýšenie stability systému, optimalizovanie toku výkonu, zvýšenie schopnosti ochrán alebo iný pozitívny účel/cieľ na zlepšenie prevádzky elektrizačnej sústavy. Takýmto spôsobom by bolo možné využiť systémy WAMS, a zvoliť diaľkový signál ako vstup pre riadenie spätnej väzby na implementáciu rôznych rozsiahlych oblasti v rámci riadiacich a ochranných stratégií. Na Obr. 2 je zobrazený základný koncept, ktorý využíva hlavné riadiace zariadenia a WAMS na implementáciu stratégie regulácie tlmenia na rozsiahlej oblasti [1], [14].



---> Široko-rozsiahly signál —> Lokálny riadiaci signál

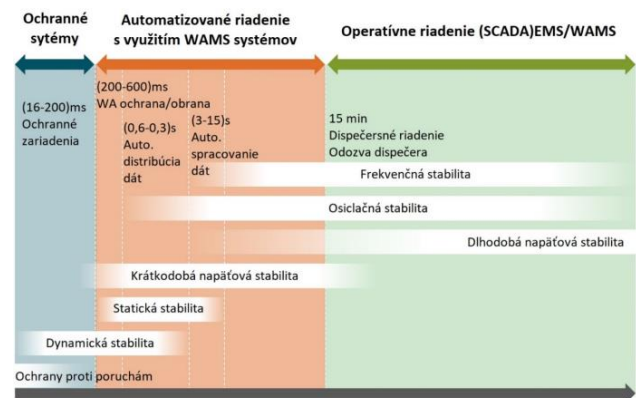
Obr. 2 Základná štruktúra tlmenia oscilácií pomocou WAMS

III. ŠPECIFIKÁCIA, ROZBOR A PRINCÍP FUNKCIE WAMS SYSTÉMOV

Úlohou dnešných moderných prevádzkovateľov prenosových sústav (TSO) je riadiť vysokonapäťovú elektrizačnú sústavu (elektroenergetické systémy s napäťovými hladinami VVN, ZVN a UVN – platí aj pre jednosmerné prenosové systémy HVDC) a zaručovať jej bezpečnú prevádzku, požadovanú kvalitu a dostupnosť v každom čase. K tomu je však potrebné vykonať niekoľko analýz, ktoré sú naliežite implementované pomocou špeciálneho softvéru (ďalej len „aplikácie“) a musia byť vykonávané obojstranne, a to online a offline [14], [15]. Tieto aplikácie vyžadujú na vstupe čoraz viac informácií o systéme na predikciu dynamického vývoja elektrizačnej sústavy, za každých prevádzkových podmienok. V prípade ohrozenia prevádzky bezpečného a stabilného systému je potrebné správne implementovať príslušné protopatrenia. Bohužiaľ táto úloha nie je tak jednoznačná aby priamo viedla ku rýchlemu a jednoduchému riešeniu kvôli:

- a) Zložitosť príslušnej dynamiky sústavy, ktorá sťažuje predikciu správania sa systému.
- b) Technologických limitov konvenčných kontrolných systémov a zberu dát (SCADA - RTU) [6].

Použitie meraní synchrofázorov sa vzťahujú v mnohých rôznych podmienkach na širokú škálu problémov. To zahŕňa prenosové a distribučné aplikácie a distribuované mikrosiete. V závislosti od súvisiacich časových rozsahov javov siete (Obr. 3) môže byť kontrolná schéma nasledovná [18]:



Obr. 3 Prechodné deje v siete

A. Základné princípy technológie synchrofázora

Fázor predstavuje komplexnú veličinu, ktorej uhol sa mení s normovaným časom a konštantnou rýchlosťou. Pre jednoduchšie porozumenie či vysvetlenie je najlepšie v prvom rade pochopiť Eulerov vzorec pre komplexnú analýzu:

$$e^{ix} = \cos x + i \cdot \sin x; \text{ kde, } i = \sqrt{-1}$$

B. Využitie synchronizovaných fázorov pre bezpečnú a spoľahlivú prevádzku elektrizačnej sústavy

Fázorová meracia jednotka (PMU) je zariadenie, ktoré meria napätia a prúdy v elektrizačnom systéme pomocou spoločného zdroja času a synchronizuje ich [16]. Časové označenie každého merania na spoločnú časovú referenciu umožňuje synchronizovať synchronizované merania v reálnom čase z rôznych miest el.energetického systému [18].

Fázorový dátový koncentrátor (PDC) je základným komponentom WAMS. PDC je možné implementovať ako samostatnú jednotku, ktorá zhromažďuje dáta a opätovne ich distribuuje do iných aplikácií. Funkcie PDC je možné integrovať aj do iných systémov, napríklad do monitorovacích/riadiacich platforiem [13].

C. Koncept rozsiahleho využitia WAMS systémov

Konvenčné systémy riadenia a zberu dát (SCADA) poskytujú stabilné, nesynchronne informácie o elektroenergetickom systéme s časovým rozlíšením medzi 1 a 10 s. Bežné SCADA systémy sú obmedzené na merania v ustálenom stave a nemožno ich použiť na pozorovanie dynamiky systému [17]. Použitie Wide Area Monitoring System (WAMS) umožňuje neustále monitorovať dynamické správanie energetického systému. WAMS poskytuje časovo synchronizované informácie každých 20 ms (v 50 Hz systémoch); každá vzorka údajov je vybavená pečiatkou koordinovaného svetového času (UTC). Údaje sú navyše synchronizované s minimálnou presnosťou 1 μ s [18].

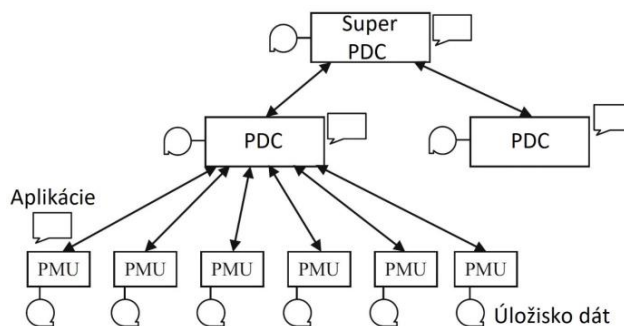
D. Architektúra WAMS

Moderné architektúry WAMS poskytujú stratégiu na zhromažďovanie údajov z rôznych senzorov a koncentrátorov fázorových dát (PDC) a na prepojenie týchto informácií s rôznymi algoritmi a technikami spájania/zlučovania dát na monitorovanie dynamických oscilácií elektroenergetického systému [5].

E. Hierarchia jednotky fázorového merania PMU

Fázorové meracie jednotky sú inštalované v rozvodných staniách elektrizačných sústav. Výber rozvodní, kde sa tieto inštalácie uskutočňujú, závisí od použitia meraní, ktoré poskytujú. Optimálne umiestnenie PMU jednotiek závisí teda od funkcie merania, sledovania či riadenia elektrizačnej sústavy [4], [19], [20].

Vo väčšine aplikácií sa fázorové dáta používajú na miestach vzdialených od PMU. Teda, musí existovať architektúra zahŕňajúca jednotky PMU, komunikačné linky a dátové koncentrátory, aby sa mohol plne využiť prínos systému merania PMU. Všeobecne akceptovaná architektúra takéhoto systému je znázornená na Obr. 4 [4].



Jednotky PMU umiestnené v rozvodných staniách

Obr. 4 Hierarchia systémov fázorového merania a úroveň koncentrátorov fázorových dát

F. Všeobecne využitie a vývoj WAMS

Výhody zhromažďovania fázorových dát na hodnotenie a analýzu stavu elektrizačnej sústavy sú uznávané mnohými organizáciami. Najdôležitejšou aplikáciou WAMS systému je on-line hodnotenie stability elektrizačnej sústavy, obzvlášť pri monitorovaní (dohľade) nad kritickými koridorami (zahraničné vedenie, vedenie dôležitého významu a pod.). Monitorovacie systémy založené na synchrofázorových meraniach umožňujú riadiacim či dispečerským centráram lepšie porozumieť obmedzeniam/limitom a správaniu sa ich elektrizačným systémom (prenosovým sústavám a distribučným sieťam), či pripraviť lepšie nápravné opatrenia (obnovenie po poruche a pod.) pre budúce implementácie (modernizáciu a budovanie nových rozvodní, elektrární, vedení a iné) [16], [17]. Na monitorovanie sú už dnes dostupné „run-time“ aplikácie založené na takýchto meraniach. Synchrofázory môžu komunikovať so SCADA/EMS systémom s cieľom zlepšiť napr. kvalitu odhadu stavu sústavy (estimáciu). Hoci vysoko sofistikované algoritmy na automatické riadenie stability ešte nie sú komerčne dostupné ako bežné výrobky (doplňky), operátor má aspoň jasnú informáciu (indikáciu) o tom, ako ďaleko je systém od „zrútenia“ a že musí včas reagovať na daný problém/poruchu [6], [8], [16], [17].

G. Implementácia a využitie WAMS v praxi

Hlavným cieľom/funkciou WAMS systémov je schopnosť poskytnúť okamžitú indikáciu stavu elektrizačnej sústavy na základe synchrofázorových meraní a on-line výsledkov aplikácií. Rovnako ako v prípade akéhokoľvek iného systému, môže počiatočné nasadenie WAMS systémov využívať dva rôzne prístupy:

- Zdola-nahor: PMU sú k dispozícii ako prvé a aplikácie sa vyvíjajú alebo integrujú neskôr.
- Zhora-nadol: PMU sa špecifikujú a inštalujú podľa požiadaviek aplikácií [8].

H. Možnosť využitia WAMS v Slovenskej elektrizačnej prenosovej sústave

Predmetom výskumu „Využitie WAMS v prostredí ES SR“ je zabezpečiť predpoklady pre rozšírenie existujúceho on-line zberu a vyhodnotenia údajov z jednotiek PMU (Phasor Measurement Unit), zvýšiť kvalitu prezentácie informácií pre podporu riadenia ES SR a zabezpečiť nadväznosť na výstupy pilotného projektu IPDE (International Phasor Data Exchange) zameraného na overenie možností výmeny údajov z PMU inštalovaných v tých TSO (Transmission System Operator), ktoré prejavujú o výmenu a vstup do IPDE záujem.

IV. IMPLEMENTÁCIA A PRAKTICKÉ VYUŽITIA WAMS SYSTÉMOV A ZVÄČŠUJÚCA SA INTEGRÁCIA PMU JEDNOTIEK V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

WAMS systémami je možné zvýšiť špecifikáciu systému podpory LFC presnejšími meraniami výkonu na hraničných vedeniach a výpočtu cezhraničnej výmeny. V tomto prípade, Informácie z PMU slúžia na verifikáciu presnosti použitých prevádzkových meraní prípadne ako záložný vstup do LFC. – teoretický rozbor merania f a jeho špecifikácia pri zmenách zaťaženia. Meranie hodnôt frekvencie pri zmenách zaťaženia a meranie výkonu na hraničných vedeniach (U, I – P, Q). WAMS merajú aktuálne hodnoty v danom čase, ktoré budú následne slúžiť na výpočet cezhraničných výmen podľa daného algoritmu alebo pre vstup do záložných LFC [13], [17].

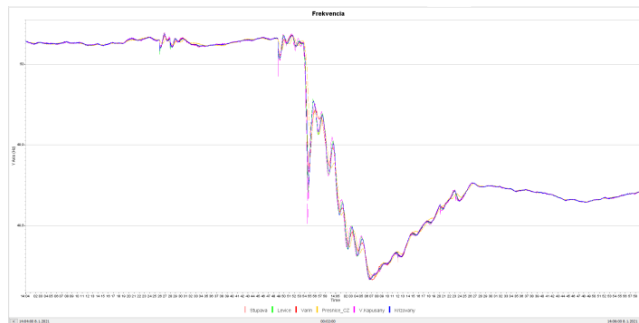
Integráciou PMU jednotiek je možné zlepšiť systémovú špecifikáciu výpočtu výkonovej reakcie ES SR na skokové zmeny frekvencie v zmysle metodiky ENTSOE. Výstupy z výpočtov sú ďalej zasielané na ENTSOE, kde slúžia ako vstup na výpočet K-faktora synchrónnej zóny RG-CE. – teoretický rozbor merania f (λ – výkonové číslo) a jeho špecifikácia pri skokových zmenách frekvencie. Meranie hodnôt výkonu (P, Q) a jeho reakcie pri skokových zmenách frekvencie. Pomocou výstupných hodnôt zo systémov PMU sa vypočítajú hodnoty výkonovej reakcie ES SR a následne vykreslia v grafickej podobe. Vypočítané hodnoty sa budú následne zasielať do databázy ENTSOE [12], [16].

V. ROZŠÍRENIE TECHNOLOGIE WAMS NA PODPORU OPERATÍVNEHO RIADENIA PRE ŠPECIFICKÉ POTREBY ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

Využitie dát zo systémov WAMS pre možnosť aplikácie v estimácii hodnôt pre kontingenčnú analýzu v riadiacich centrách môže byť z dôvodu malého počtu PMU jednotiek inštalovaných v ES bezvýznamný. Pre výpočet kontingenčnej analýzy sa v ES SR využíva v viac ako 2000 vstupných hodnôt. Ak by nahradili len niektoré jednotky RTU za PMU (množstvo inštalovaných PMU v sústave SR je približne 23 ks) prinieslo by to len minimálne (ak vôbec nejaké) rozdiely vo výsledku výpočtu [15]. Význam využitia dát z WAMS sa ukázali ako odôvodnené pre výpočet k- faktora, kde sú rozdiely vo výpočtoch značne odlišné. To je ovplyvnené tým, že v prípade výpočtu k-faktora s pomocou WAMS sa všetky vstupné dáta využívajú výhradne z PMU [19], [20].

Vysokou vzorkovacou frekvenciou WAMS systémov (PMU jednotkami) je možné aplikovať do riadiacich sústav potrebné výpočtové hodnoty (parametre), ktoré by mohli byť použité na zobrazenie pre dispečera pri operatívnom riadení ES **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..** Zobrazením príslušných parametrov elektrizačnej sústavy v real-time vyhotovení, je možné dostať veľmi presný obraz o dianí v aktuálnej prevádzke riadiaceho centra elektrizačnej sústavy. Stálym vývojom a zdokonaľovaním systémov WAMS sa ich implementácia dostáva do popredia aj pre distribučné siete v oblasti smart-gridov **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.. Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..**

A. Monitorovanie elektrických parametrov pomocou systémov WAMS meracími jednotkami PMU



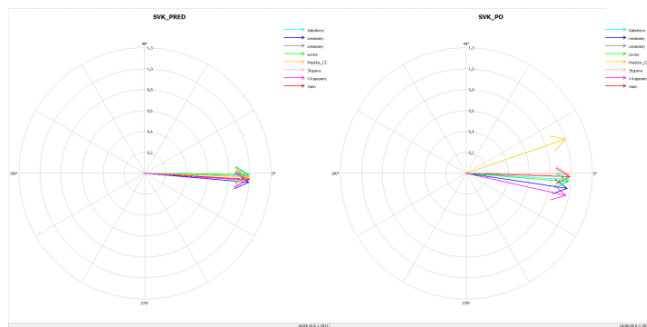
Obr. 5 Priebeh frekvencie v stanicích ES SR a ES CZ počas poruchy (08.01.2021)

Monitorovanie v reálnom čase prináša pre užívateľa (dispečera, technika, vývojára, a pod.) vizuálny prehľad vybraných parametrov s vysokým rozlíšením až na úrovni dynamickej stability. Rozšírením systémov WAMS do komerčného SCADA zobrazenia je operátor schopný pozorovať dáta (priebeh parametrov) bez časového oneskorenia (so zanedbateľnou chybou vzorky s časovým údajom) [18]. Reálne dáta zo zaznamenatej poruchy (08.01.2021 – rozdelenie EU) boli spracované pomocou programu PhasorPoint GE a vykreslené v grafických podobách (viď. Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7). V porovnaní s jednotkami PMU sú bežné meracie jednotky RTU pomalšie (nízka vzorkovacia frekvencia) a neschopné merať fázový uhol (fázor napätia a prúdu – polárny graf) [11], [19].



Obr. 6 Meranie uhlov napätia pomocou PMU jednotiek - ref. Stanica V. Kapušany

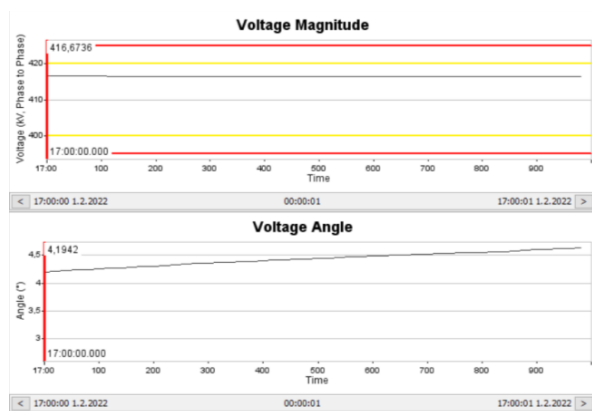
Simulácie priebehov uhlov napätí na vedeniach (Obr. 6) je možné detekovať veľkú poruchu, či nebezpečenstvo vzniku ostrovej prevádzky a rozpadu sústavy až do Black-out. Prínosom systémov WAMS a jednotiek PMU je aj vizualizácia (Obr. 7) synchrónnych fázorov napätí (uhol napätia α a veľkosť napätia napr. v p.u.) [4], [5].



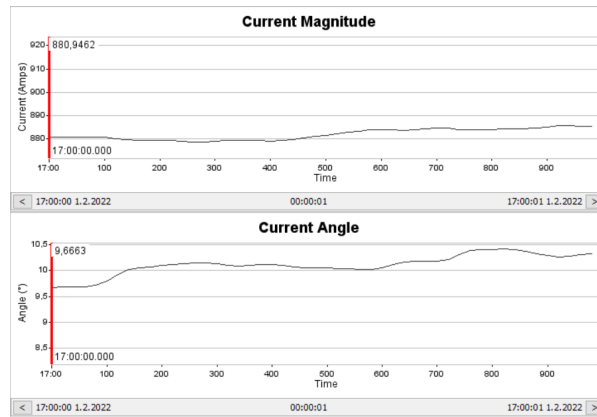
Obr. 7 Porovnanie uhlov napätia v polárnom grafe pri udalosti 08.01.2021

B. Meranie smeru toku jalového výkonu pomocou PMU jednotiek

Pre analýzu určovania smeru toku jalového výkonu medzi susednými sústavami bol pre ukážku vytvorený výpočtový model z konkrétnych dát z dňa 01.02.2022 o 17:00 na vedení V404 Varín – Nošovice.



Obr. 8 Napätie v rozvodni Varín



Obr. 9 Tok prúdu v rozvodni Varín

Matematický výpočet pre určenie smeru toku jalového výkonu:

Zadané (namerané) hodnoty:

Napätie: $U = 416,6736 \text{ kV}$

Uhol napätia: $\alpha_U = 4,1942^\circ \Rightarrow 0,0732 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Napätie v komplexnom tvare:

$$\dot{U} = U \times e^{j \cdot \alpha_U} = 416,6736 \times e^{j \cdot 4,1942} \text{ kV}$$

alebo:

$$\dot{U} = U \times e^{j \cdot \alpha_U} = (415,5577 + j \times 30,4743) \text{ kV}$$

Prúd: $I = 880,9462 \text{ A}$

Uhol prúdu: $\alpha_I = 9,6663^\circ \Rightarrow 0,1687 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Prúd v komplexnom tvare:

$$\dot{I} = I \times e^{j \cdot \alpha_I} = 880,9462 \times e^{j \cdot 9,6663} \text{ A}$$

alebo

$$\dot{I} = I \times e^{j \cdot \alpha_I} = (868,4388 + j \times 147,9193) \text{ A}$$

Výpočet fázového posunu medzi napätím a prúdom:

$$\Delta\alpha = \alpha_U - \alpha_I = -4,1942 - 9,6663 = -5,4721^\circ$$

$$\Rightarrow -0,0955 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Zdanlivý výkon: $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 635,7787 \text{ MVA}$

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \sqrt{3} \times \dot{U} \times \dot{I}^* = \sqrt{3} \times 416,6736 \times e^{j \cdot 4,1942} \times \\ &880,9462 \times e^{-j \cdot 9,6663} = \\ &= 632,8813 \cdot 10^3 - j \times 60,6285 \text{ MVA} \end{aligned}$$

alebo:

$$\dot{S} = \sqrt{3} \times U \times I \times e^{j \cdot \Delta\alpha} = \sqrt{3} \times 416,6736 \times 880,9462 \times e^{j \cdot -5,4721} = 632,8813 \times 10^3 - j \times 60,6285 \text{ MVA}$$

Kontrolný výpočet:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\Delta\alpha) = \sqrt{3} \times 416,6736 \times 880,9462 \times \cos(-5,4721) = 632,8813 \text{ MW}$$

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin(\Delta\alpha) = \sqrt{3} \times 416,6736 \times 880,9462 \times \sin(-5,4721) = -60,6285 \text{ MVar}$$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{632,8813}{635,7787} = 0,9954 \text{ [-]}$$

Pre kapacitnú a induktívnu zložku zdanlivého výkonu platí:

$$S_c = P - j \times Q$$

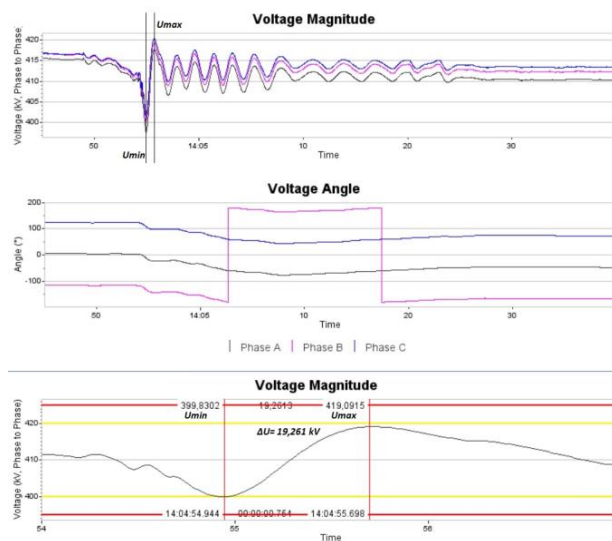
$$S_L = P + j \times Q$$

Ak hodnota činného výkonu P je kladného charakteru a hodnota jalového výkonu Q je záporná hodnota tak vieme, že činný výkon P tečie v smere toku prúdu (reálnej zložky prúdu) avšak výkon Q je záporný takže tečie opačným smerom (imaginárnej zložky prúdu) preto $\cos\varphi$ (účinník) je kladný. Pre tento príklad, teda tečie jalový výkon zo SEPS do ČEPS a činný výkon opačne z prenosovej sústavy ČEPS do SEPS.

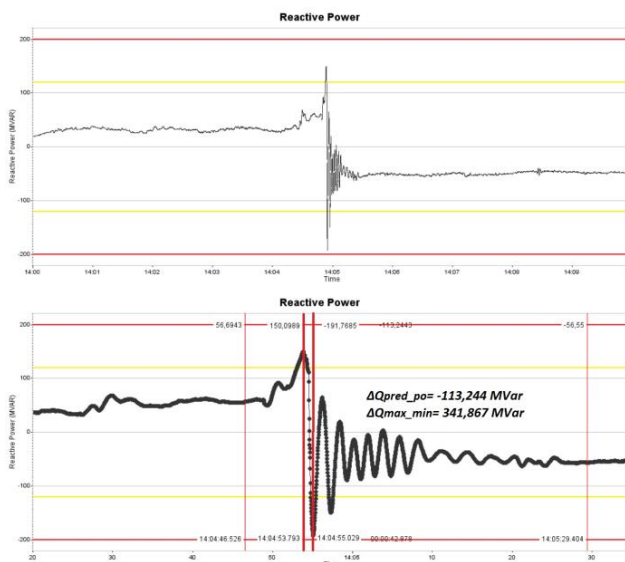
Hodnota prúdu vo fázorovom tvare (komplexnej rovine) určuje smer toku činného výkonu podľa znamienka reálnej zložky (+ v súhlasnom smere, - v opačnom smere) v mieste merania. Tok jalového výkonu môžeme taktiež určiť pomocou prúdu a to podľa znamienka imaginárnej zložky. V tomto prípade sa tok jalového výkonu určuje naopak a to tak, že ak je Q záporné, t.j. tečie v smere toku prúdu a ak je Q kladné tak tečie v opačnom smere toku prúdu. Vychádzame aj z pravidla (rovnice) kedy pri výpočte zdanlivého výkonu S je člen prúdu v súčine komplexne združená hodnota [14], [17]. Teda ak je reálna zložka prúdu kladná a imaginárna zložka prúdu záporná, tak činný výkon P a jalový výkon Q majú súhlasný tok. Rovnako to platí aj v prípade opačných znamienok, ak reálna zložka prúdu je záporná a imaginárna zložka prúdu je kladná, tak činný výkon P a jalový výkon Q majú súhlasný smer a tečú rovnakým smerom. V prípade ak je reálna a imaginárna zložka súhlasného znamienka (oba kladné alebo oba záporné) tak činný výkon tečie opačným smerom ako jalový výkon (resp. opačne).

C. Možnosti interaktívnych výpočtov pri implementovaní PMU jednotiek

Pre off-line analýzu v rámci stanice (rozvodne, transformovne, vývody elektrárni a iné.) by pomocou tejto vizualizácie bolo možné vykresliť a analyzovať jednotlivé základné parametre ako napätie U (susledná, spätná a netočivá zložka), prúd I (súsledná, spätná a netočivá zložka) frekvencia f, fázor, atď.; z uloženej databázy historických dát pre konkrétnu časovú periódu (potrebné rozpätie udalosti). Technik by mal okamžitú informáciu o maximálnej a minimálnej hodnote danej premennej, ako aj informáciu o veľkosti zmeny napätia a pod (Obr. 10 a Obr. 11) [2], [7].

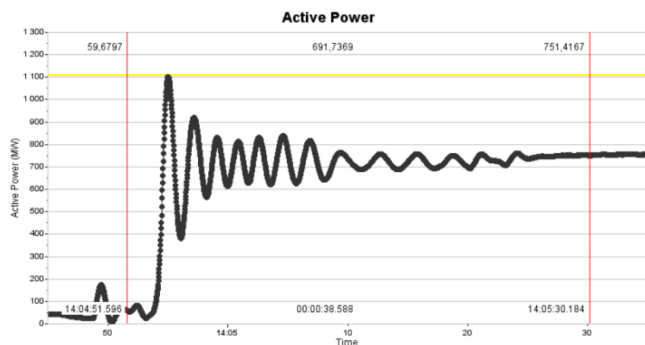


Obr. 10 Grafické znázornenie vybraných parametrov



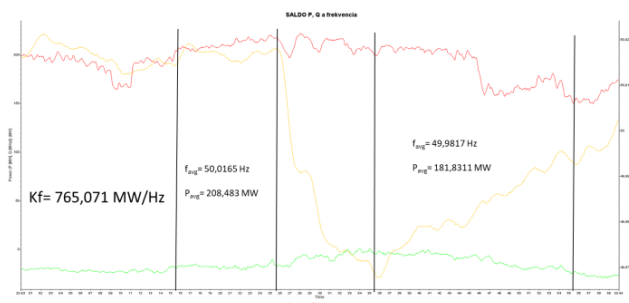
Obr. 11 Vizualizácia jalového výkonu

Takéto zobrazenie by slúžilo na analýzu jalového výkonu obzvlášť medzi hraničnými vedeniami pre kontrolu maximálnych dovolených limitných hodnôt. Umožňuje tiež odčítať veľkosť zmeny jalového výkonu (aj možnosť merania jeho smeru) pri prechodných dejoch. Pre PMU merania je možnosť sledovať/monitorovať aj dynamické priebehy (dynamiku sústavy) či odčítať ich maximálny a minimálny kvy/osciláciu. Rovnako ako v prípade jalového výkonu, aj v prípade činného výkonu je možné realizovať podobné analýzy.



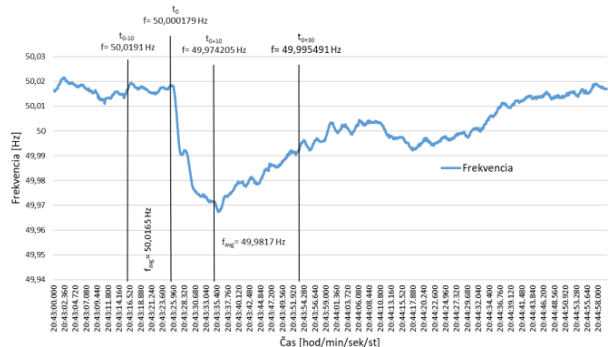
Obr. 12 Vizualizácia činného výkonu

V prípade analýzy k-faktora by technik zadaním času vzniku poruchy t_0 dostal informácie v grafickej aj číselnej podobe. Tým dokáže overiť čas vzniku poruchy a v prípade nepresnosti upraviť čas t_0 podľa reálne nameranej poruchy. Na obrazovke tak dostane informáciu o priemernej hodnote frekvencie pred a po poruche ako aj o priemernej hodnote salda a taktiež výslednú hodnotu k – faktora ako to udáva smernica z normy ENTSO-e.

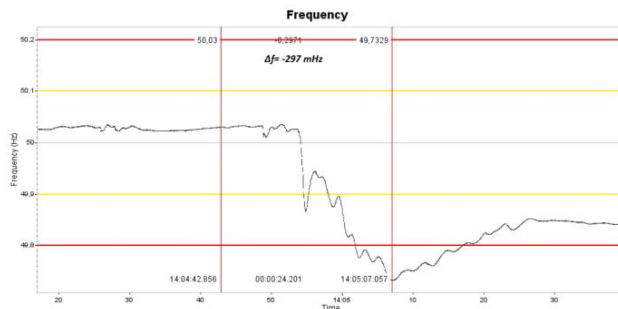


Obr. 13 Vizualizácia výpočtu k-faktora

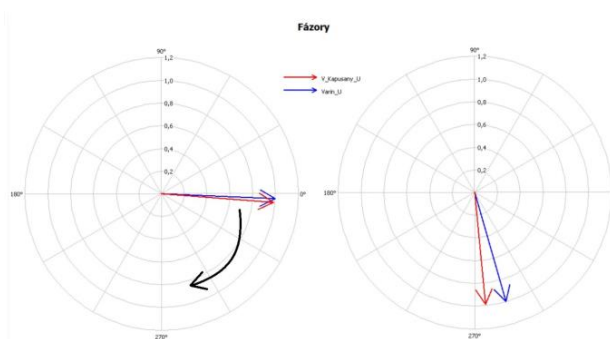
Priebeh frekvencie pre udalosť č.1 - výpočet k-faktor



Obr. 14 Interaktívne zobrazenie vybraných bodov v krivke s možnosťou matematických operácií



Obr. 15 Vizualizácia priebehu frekvencie



Obr. 16 Vizualizácia fázora

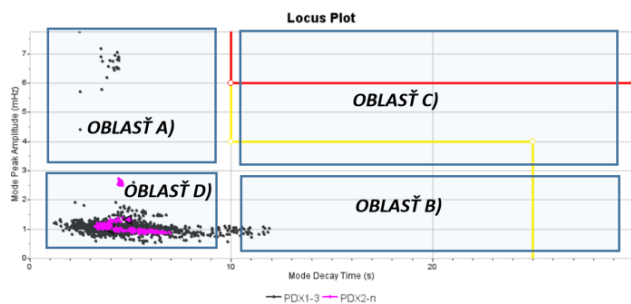
Vizualizácia fázorov v polárnom grafe vo vybranej časovej perióde umožňuje technikovi „prehrat“ priebeh poruchy na fázoroch. Tým získa lepší obraz o priebehu udalosti a o jeho vplyve na elektrizačnú sústavu.

D. Analýza oscilácia pomocou signálu o amplitúde a tlmení - „Locus plot“

Prepojenie elektro-energetickej siete umožňuje jednotlivým prevádzkovateľom TSO znížiť kapacity rezervnej el. energie v prevádzke elektrizačnej sústavy s tým, že sa celý dynamický proces stáva zložitejším. Vo veľkých vzájomne prepojených elektrických energetických systémoch sa môžu vyskytnúť medzi-oblastné elektromechanické oscilácie v dôsledku slabých spojení medzi energetickými systémami alebo lokálnych problémov súvisiacich s prevádzkou systému. Tieto oscilácie zahŕňajú výmenu el. energie (výkonu) a tiež oscilácie napätia a prúdu, ktoré môžu spôsobiť vypnutie vedení alebo generátorov a tým viesť k vážnym poruchám [8], [16], [17].

Využitím vysokej vzorkovacej frekvencie fázorových meracích jednotiek je dynamika systému vizualizovaná a dokumentovaná v programe (PhasoPoint GE, Synchronwave SEL, a iné). Účelom vývoja tohto mechanizmu detekcie udalostí je pomôcť personálu riadiacich miestností (t.j. dispečingu) rýchlo identifikovať škodlivé/nežiaduce alebo ohrozujúce oscilácie aj v bežných variáciách riadenia systému. S online rozložením na jednotlivé módy v konkrétnom programe bola dynamika systému rozložená v rôznych spektrách a reálnom čase s veľkosťou oscilácie a časom poklesu ako dvoma kritickými ukazovateľmi na meranie závažnosti oscilácií **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj**

odkazov.. Čím väčšia je amplitúda a čím dlhší je čas tmenia, tým silnejšia je oscilácia. Zatiaľ čo pri malých amplitúdach a rýchlo sa tmených kmitoch oscilácie je zrejme, že nespôsobujú vážne problémy a sú bežnou praxou v prevádzke, nie je potrebné ich zachytiť v medziach výstrah a alarmoch. Oscilácie, ktoré sú pretrvávajúce s veľkými výkyvmi by mali dispečeri zachytiť v čo najrýchlejšom čase **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov., Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..**



Obr. 17 Vizualizácia a význam oblastí v Locus Plot

Oblasť A predstavuje časť oscilácií, ktoré sú neopodstatnené, keďže sú v sústave/sieť veľmi krátky čas, aj keď s vysokou amplitúdou. Oscilácie v danej oblasti sa nepokladajú za nebezpečné a zanikajú veľmi rýchlo. Vznikajú obzvlášť pri spínacích procesoch, akými sú napr. manipulácia s vypínačmi, odpojovačmi (zapínanie vedení) a pod. Taktiež sa môžu naskytnúť pri prepätiach, ktoré sú automaticky tlmene aj pomocou zvodičmi prepätia. Veľká časť je tlmene samotnou impedanciou vedení a elektrickými prvkami v sieti. Body v tomto rozhraní môžu byť reakciou taktiež na výpadky blokov generátorov, elektrární či náhlou zmenou odberu (zaťaženie el. sústavy). V prípade poruchy je možné pomocou tzv. locus plot zaznamenať aj rýchle rozdelenie sústavy na ostrovy.

Oblasť B je obdobná oblasti A avšak so zmenou časom trvania tmenia oscilácií a veľkosťou ich amplitúd. Oscilácie v tejto oblasti sú zanedbateľné a považujú sa za nekritické pre ustálený chod elektrizačnej sústavy. Ich zdrojom môžu byť napríklad oblúkové pece, chybný regulátor na generátore či nevhodne riadené (funkčnosť) FACTS systémov, ktoré prispievajú nízkymi amplitúdami oscilácií s dlhou časovou odozvou. Oscilácie v oblasti B môžu byť generované aj kvôli spínacím manévrom (napr. zdroj v oblasti A môže vyvolať oscilácie v oblasti B) či atmosférickým vplyvom. Oscilácie sú tlmene a potláčané samotnou sústavou, k čomu napomáha aj robustnosť vďaka jej prepojeniu do veľkého celku ako napríklad sústava ENTSO-e [13].

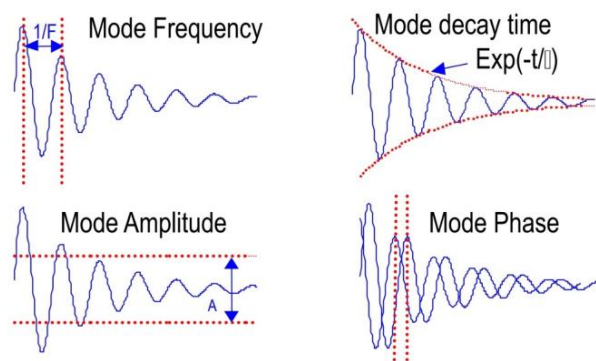
Oblasť C naznačuje potenciálne nebezpečenstvo až kritické hodnoty oscilácií, ktoré majú za následok vážne poruchy (vypínanie vedení, výpadok generátorov zo synchronizmu či nestabilitu siete) a dokonca až rozpad sústavy do tzv. Black-out. Podľa typu módu (napr. 0,01 – 4 Hz) je možné monitorovať rozsiahle oscilácie šíriace sa naprieč celou

sústavou (oscilácie nižšieho módu) či sledovať oscilácie vnútri vlastnej elektrizačnej sústavy (oscilácie vyššieho módu). Na základe týchto poznatkov je možné vykonať potrebné opatrenia na ich tlenie či celkovú elimináciu alebo nájsť generátor či skupinu generátorov, ktoré danú osciláciu vytvárajú [16], [18].

Oblasťou D je bežný (normálny) ustálený stav, ktorý nastáva pri bežnej prevádzke a riadení bilancie medzi výrobou a spotrebou, poskytovaní podporných služieb, manipuláciou prvkov v rozvodných staniaciach a pod. Všetky tieto oscilácie sú pod limitom kritických hodnôt a nepovažujú sa za nebezpečné a nemajú vplyv ani na spoľahlivosť výroby, prenosu a spotreby el. energie. Výsledkom týchto oscilácií je prirodzené „dýchanie sústavy“ (reakcie regulátorov AVR, PSS a iné) na udržanie výkonovej bilancie výroby a spotreby pri udržaní nominálnej frekvencie.

Každý prevádzkovateľ prenosovej sústavy si môže určiť svoje hodnoty módu (napr. rozdelenie frekvencie na 7 módu od 0,01 Hz – 4 Hz). Počiatočne sa nastavujú hranice výstrah a alarmov, ktoré je vhodné počas určitej časovej periódy lepšie prispôsobiť a upraviť podľa historických dát analýzou z archívu (alebo iných TSO so týmito skúsenosťami). Takýmto spôsobom boli nastavované hodnoty týchto limitov pre Slovenskú prenosovú elektrizačnú sústavu [16].

Na Obr. 18 sú graficky znázornené jednotlivé módy potrebné na analýzu oscilácií. Aby bolo možné určiť hodnotu frekvencie nízkeho rádu je nutné použiť „Mode Frequency“. Meranie je v reálnom čase, počas ktorého algoritmus nepretržite monitoruje a vykresľuje módy nízkych frekvencií týchto oscilácií s konkrétnou hodnotou (vykreslenie je aj podľa rozdelenia intervalu od-do t.j. mód). Podstatnými ukazovateľmi v Locus plot je „Mode decay/damping time“ a „Mode Amplitude“.



Obr. 18 Atribúty monitorovania stability systémových elektromechanických oscilácií

Tlmiaci mód dáva užívateľovi informáciu o tom, ako je daná oscilácia resp. mód v sieti tlmene (určuje sa aj percentuálnym hodnotením pričom pod 3% sa považuje tlenie za nebezpečné [13]). Z toho vyplýva, čím je útlm

menší (pomalší), tým viac to prináša väčšie riziko pre spoľahlivú prevádzku v ustálenom alebo prechodovom stave. A opačne, ak je útlm veľký (rýchlejší), tým menej je nebezpečnejší pre prevádzku elektrizačnej sústavy, výroby, prenosu a sústavu ako celok [18].

Správanie pri „veľmi nízkej frekvencii“ (0,002 – 0,1) Hz má zvyčajne podobu oscilácií v bežnom režime, kde sa celý energetický systém zrýchľuje a spomaľuje takmer jednotne. Tie zvyknú byť spôsobené tým, že riadiace systémy regulátora otáčok generátora otvárajú alebo zatvárajú „kohútik“ vody/pary napájajúcej generátor na udržanie určitej rýchlosti (frekvencie siete) [15]. Osciláciami veľmi nízkeho radu sú dotknutí všetci prevádzkovatelia prenosových sústav v celej prepojenej oblasti, nakoľko sú takéto oscilácie len veľmi mierne tlmené. Pre real-time merania WAMS VLF (viď. Príloha C) [12].

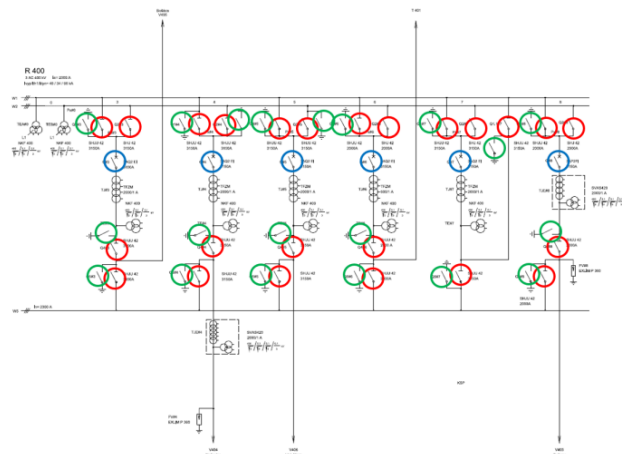
„Nízka frekvencia“ (0,1 – 4) Hz Elektromechanické správanie, ktoré zvyčajne zahŕňa generátory a ich rýchlejšie riadiace systémy – kde sa segmenty el.- energetického systému „kývajú“ proti sebe, čo má za následok toky el. energie ako „hojdačky“ cez sieť. Môžu zahŕňať celú sieť alebo môžu byť obmedzené na menšiu oblasť okolo konkrétnej elektrárne. V systéme ENTSO-e je už nejaký čas známych niekoľko špecifických režimov, ktoré sú regulované pomocou riadiacich systémov PSS generátora „Stabilizátor energetického systému“ a monitorované pomocou už existujúcich izolovaných WAMS inštalovaných v národnej sieti a TSO SPT (viď. Príloha B) [15], [18]. Týmto typom oscilácií sú dotknuté obzvlášť generátory (skupiny generátorov) k elektrizačným sústavám (elektroenergetickým systémom). Tieto typy oscilácií sa vyskytujú prevažne v interných (lokálnych) oblastiach a nešíria sa naprieč celým prepojeným systémom (oblasťou). Pri vyšších hodnotách (rozsahoch) v tomto intervale sú oscilácie vo veľkej miere potlačané samotnou húževnatosťou a robustnosťou sústavy [17].

„Subsynchrónne oscilácie“ (4 – 46 Hz) zavedené riadiacimi systémami vo výkonových elektronických meničoch, ako sú tie, ktoré sa nachádzajú vo veterných farmách a HVDC spojeniach, mechanickými rezonančnými torznými frekvenciami v hriadeľoch generátorov a sériovými kondenzátormi inštalovanými v prenosovej sieti [15].

E. Analýza ostrovej prevádzky elektrizačnej sústavy (jej časti) s využitím komplexného rozšírenia WAMS systémov

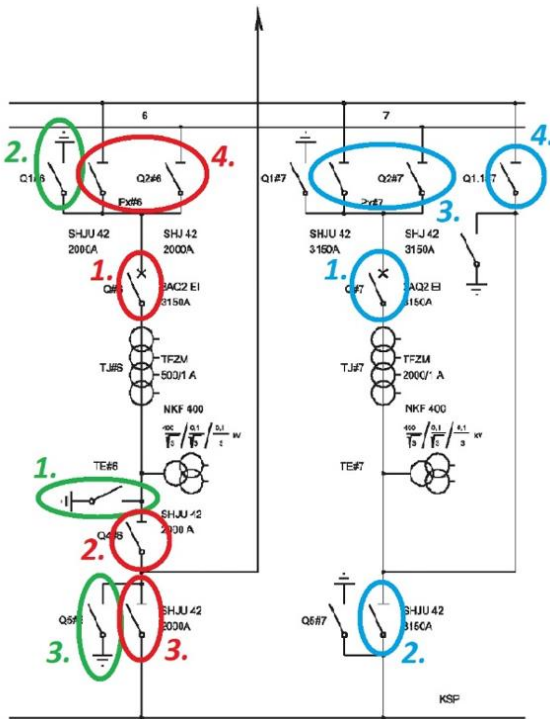
Počas analýzy rozšírenej detekcie ostrovej prevádzky sústavy doplnenej stavmi odpojovačov sa overila aj možnosť detekcie ostrovej prevádzky skombinovaním fázorov so stavom odpojovačov v rozvodniach. Výskum sa realizoval na jednotlivých rozvodniach. Analýza ukázala, že sledovanie stavov odpojovačov, ako aj kombinovanie fázorov so stavmi odpojovačov veľmi presné ale neefektívne z pohľadu množstvu dát. Výsledok analýzy je znázornený na príklade rozvodne Varín. Obr. 19 znázorňuje zapojenie rozvodne

Varín so zvýraznenými odpojovačmi [8]. Ako je možné vidieť, v rozvodni je inštalovaných celkom 24 odpojovačov. V prípade vzniku ostrovej prevádzky, vznikne veľké množstvo kombinácií zopnutých a vypnutých odpojovačov, neberúcich do úvahy zemnice. Ďalším veľmi dôležitým faktorom je to, že odpojovač slúži na viditeľné odpojenie a nedokáže vypnúť obvod pod napätím. Preto je dôležité sledovať aj stav výkonových vypínačov. Ak by sme výk. vyp. nesledovali, mohlo by dôjsť k situácii kedy bude odpojovač v stave zapnutý, avšak vypínač už bude vypnutý. Toto môže významne ovplyvniť správnosť detekcie ostrovov [9], [17], [20].



Obr. 19 Rozvodňa Varín so zvýraznenými odpojovačmi („červené“), zemnice („zelená“) a výkonové vypínače („modrá“)

V Tab. 1 je vyobrazený príklad simulácie dvoch oddelených samostatne prevádzkovaných ostrovov v rozvodni Varín. Jednotlivé ostrovy sú farebne zvýraznené červenou a zelenou farbou. Červenou farbou sú zvýraznené prvky rozvodne, ktoré sú súčasťou ostrova č.1 na prípojnici W1 s vývodmi V 495 (3) a V 404 (4). Zelenou farbou sú zvýraznené prvky rozvodne, ktoré sú súčasťou ostrova č.2 na prípojnici W2 s vývodmi V 406 (5), T401 (6), pomocnou prípojniciou a V 405 (8). V druhom prípade sú rovnaké ostrovy na opačných prípojniciach. Oranžovo vyznačené bunky v tabuľke vyznačujú zmenenu stavu prvkov (z 0 na 1 a opačne – teda z vyp. 0 na zap. 1). Kombinovaný spínač prípojnice má obdobnú zmenu s tým, že ak jeho stav nadobudne v každej bunke 0, tak pomocná prípojnicia bude bez napätia a mimo jednotlivých ostrovov. Takýto prípad je znázornený aj na Obr. 70.



Obr. 21 Vysvetlivky jednotlivých blokov v schéme spínacích prvkov a ich situovaní

Zelená oblasť „A“ vyhodnocuje stav uzemňovacích spínacích prvkov (každý cyklus má priradenú farebnú a číselnú hodnotu, ktorá je pre lepšie pochopenie následne vyobrazená vo výseku stanice vľavo na obrázku). Červená oblasť „B“ kontroluje stav výkonového vypínača a odpojovačov jednotlivých vývodov k pripojenej/odpojenej prípojnici. Stav kombinovaného spínača prípojnic KSP je v záverečnom cykle. Obdobným spôsobom sa určuje jeho stav avšak nie k vývodu, ale ku prípojniciam a pomocnej prípojnici KSP. Záverom je vyhodnotenie stavov zapojenia a možný počet zvytvorených ostrovov v stanici. Každý spínací prvok má priradený index podľa vývodu (sekcie/poľa a konkrétnu číselnú hodnotu radu v ktorom sa nachádza), ktorý je zobrazený podľa číselnej skupiny a farby bloku vo vývojovom diagrame [8].

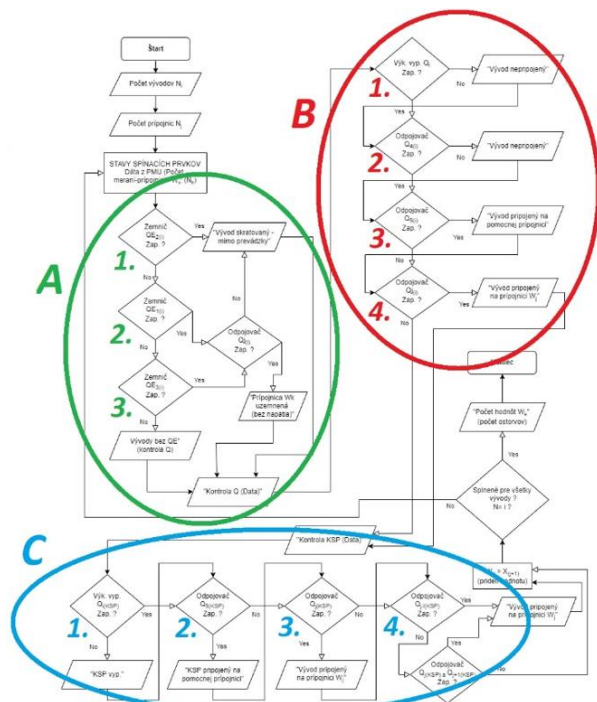
Výsledkom tejto analýzy je odporúčanie, aby sa detekcia ostrovej prevádzky nerealizovala iba sledovaním stavov odpojovačov a rovnako aby sa stav odpojovačov nekombinoval s fázormi. Kombinácia týchto údajov môže skomplikovať či spomaliť detekciu ostrovej prevádzky. Ako najvhodnejšie riešenie pre detekciu ostrovej prevádzky je rozšírenie meracích miest PMU jednotkami v jednotlivých rozvodniach. V prípade rozvodne Varín a iných rozvodní je navrhované rozšíriť meranie na oba prípojnice W1 a W2 (v prípade možnosti rozdelenie 1 prípojnice aj ďalšie 2ks PMU).

F. Zlepšenie spoľahlivosti z pohľadu riadenia ES s využitím PMU jednotiek

Vizualizácia prevádzkových parametrov pre dispečerov je jednou z kľúčových funkcionalít, ktoré výrazne napomáhajú pri predchádzaní a riešení správneho chodu el. sústavy a krízových situácií v nej. Správna voľba vizualizácie dokáže výrazne zlepšiť reakciu dispečera pri riešení kritických stavov.

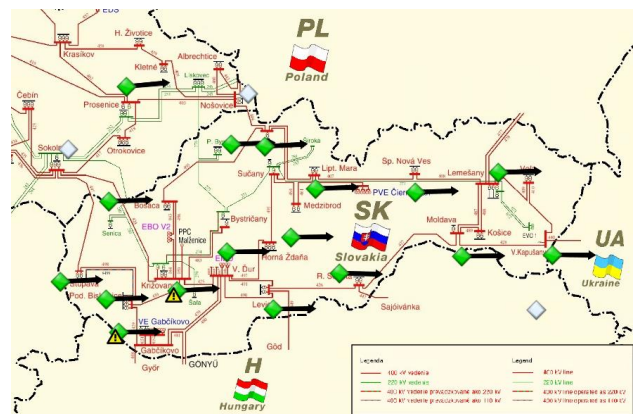
Vizualizácia fázorov napätia:

Monitorovanie fázorov resp. uhlov (napätia) a frekvencie pomôže odhaliť oddelenie systému na dve resp. viacero častí – teda ostrovnú prevádzku. Pomocou komerčne dostupných synchrofázorových monitorovacích programov ako napr. PhasorPointu je možné detegovať ostrovné prevádzky a taktiež zlepšiť a napomôcť k tzv. blackstartu prípadne resynchronizácii sústavy.



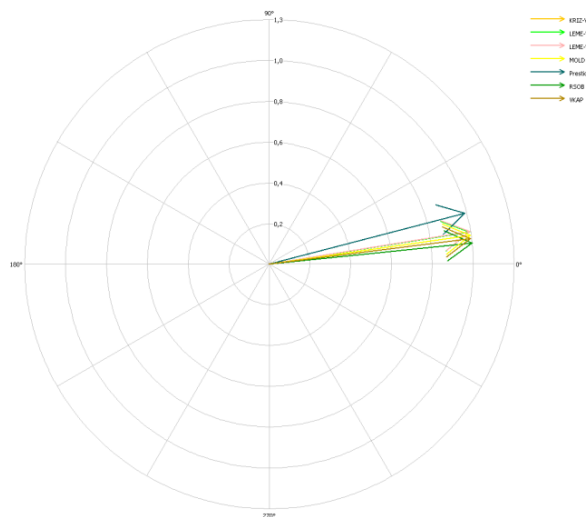
Obr. 22 Vysvetlivky jednotlivých blokov vývojového diagramu ku schéme spínacích prvkov a ich situovaní

Vývojový diagram sa skladá zo vstupných dát ako je počet prípojnic, počet vývodov a jednotlivých (potrebných) meraní.



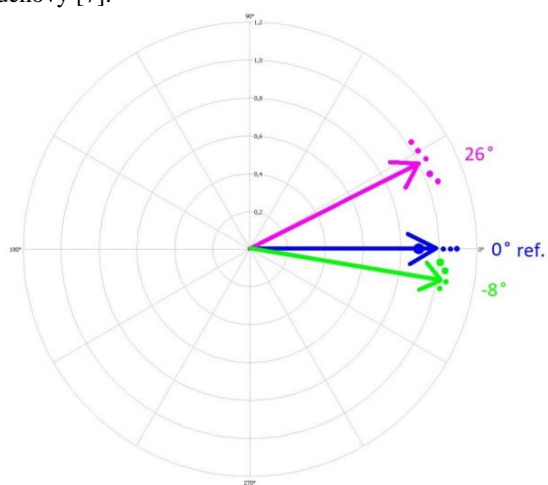
Obr. 23 Známenie fázorov jednotlivých PMU jednotiek na mape ES SR

Obr. 23 znázorňuje namerané fázory jednotlivými PMU jednotkami v ES SR. V prípade vzniku ostrovej prevádzky v rámci ES SR by sa fázory PMU jednotiek nachádzajúce sa v ostrove, ktorý nie je spojený s referenčným uzlom otáčali buď rovnakým smerom v kružnicovej trajektórii a/alebo rýchlejšie, či opačným smerom. Toto zobrazenie je prehľadné a dispečer získa okamžitý obraz o stave sústavy. Pri zobrazovaní fázorov je nutné zvoliť referenčný uzol t.j. PMU jednotku. Všetky ostatné fázory v grafoch sú rozdielom fázorov oproti referenčnému uzlu teda PMU jednotke. V prípade, že sa všetky fázory otáčajú, je silný predpoklad, že porucha je práve v referenčnom uzle alebo vybranej jednotke PMU [52].



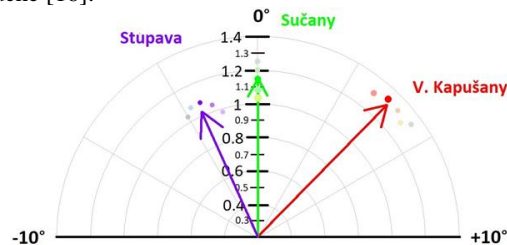
Obr. 24 Zobrazenie fázorov v polárnom grafe

Obr. 24 znázorňuje polárne zobrazenie fázorov. V tomto prípade pri ostrovej prevádzke časti sústavy sa bude fázor PMU jednotky nachádzajúcej sa mimo ostrova, do ktorej patrí referenčná PMU jednotka otáčať buď rýchlejšie, alebo opačným smerom. Potreba zvolenia jedného referenčného uzla / rozvodne – t.j. všetky fázory sú vzťahnuté k referenčnému. Pri rotovaní všetkých fázorov je možné, že práve referenčný je poruchový [7].



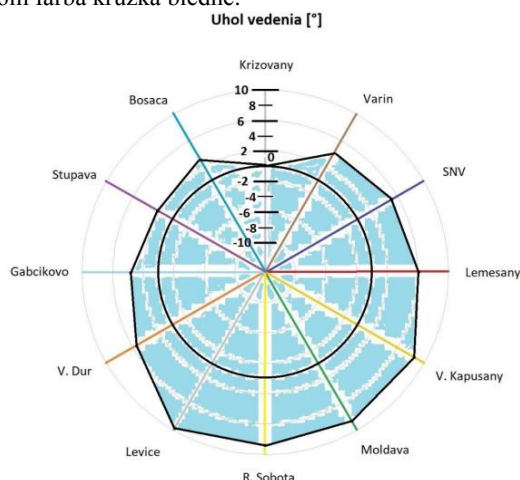
Obr. 25 Znáznornenie fázorov na 360° polárnom grafe

Návrh znázornenia fázorov na 360° polárnom grafe (Obr. 25) obsahuje oproti predchádzajúcemu zobrazeniu aj posledných 5 nameraných hodnôt. Krúžky vo farbe jednotlivých šípok označujú predchádzajúcu polohu fázora (amplitúdu aj uhol), veľkosť krúžka sa znižuje (alebo zasvetľuje) s postupom času, t.j. posledná nameraná hodnota je najväčšia a s časom sa krúžok zmenšuje. Takto dokáže dispečer omnoho skôr rozoznať, čo sa za posledných 5 sekúnd v sústave udialo a vidí aj trend nárastu, poprípade poklesu uhlov a amplitúdy medzi jednotlivými stanicami. Narastajúci uhol medzi jednotlivými uzlami môže svedčiť o blížiacей sa poruche [16].



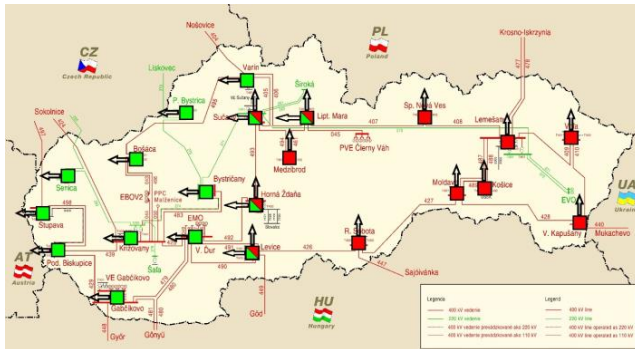
Obr. 26 Návrh zobrazenia fázorov

Návrh znázornenia fázorov na grafe (Obr. 26) obsahuje fázory jednotlivých PMU jednotiek. Rozsah uhlov fázorov je volený v rozsahu napr. -10° až +10°. Tieto hodnoty boli zvolené z dôvodu, že hodnoty rozdielov uhlov medzi referenčným a ostatnými uzlami v rámci ES SR v normálnej prevádzke je max cca 5°. Takéto zobrazenie je pre dispečera výrazne lepšie a umožňuje presnejšie odčítanie fázorov. V tomto prípade sú v grafe znázornené hodnoty fázorov ako je amplitúda a uhol. Veľkosť uhla a amplitúdy pre jednotlivé uzly je odchýlka uhla voči referenčnému uzlu. Referenčný uzol by si dispečer zvolil podľa aktuálneho stavu v ES SR ľubovoľne. V takejto vizualizácii je rovnako ako v predchádzajúcom prípade znázornených aj posledných 5 nameraných hodnôt. Krúžky vo farbe jednotlivých šípok označujú predchádzajúcu polohu fázora (amplitúdu aj uhol), v tomto prípade sa však mení farba krúžka, a to tak, že s postupom času, t.j. posledná nameraná hodnota je najtmavšia a s časom farba krúžka bledne.



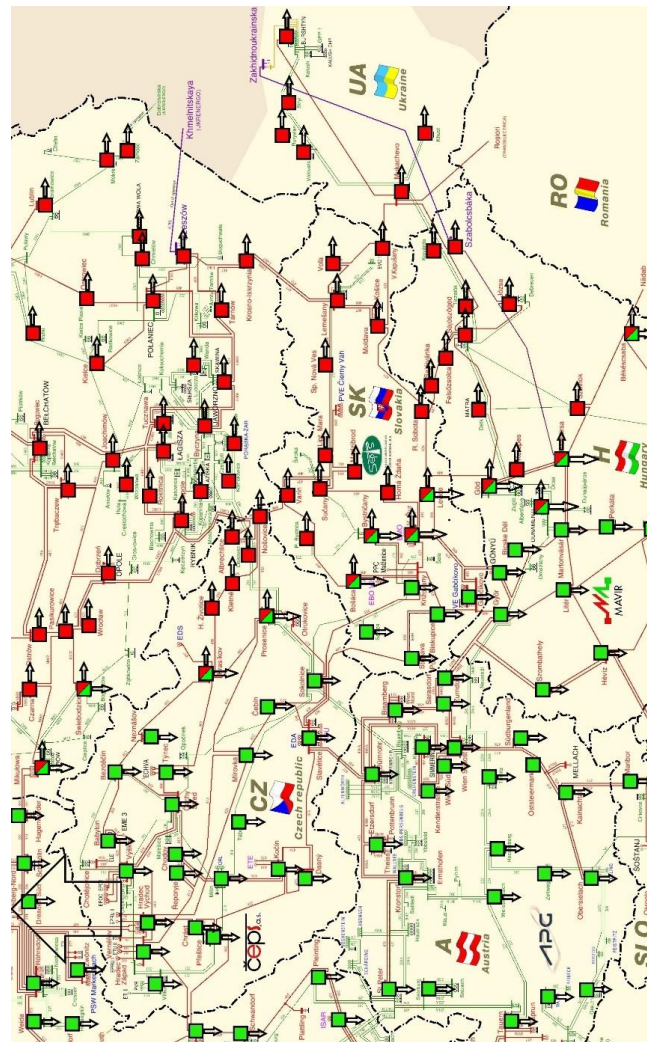
Obr. 27 Spider graf napätových uhlov na vedení

Obr. 27 znázorňuje tzv. „spider“ graf. V prípade tohto zobrazenia, je optimálne voliť takú referenčnú stanicu / PMU, ktorá je čo najviac v „strede“ sústavy (nie je to podmienkov). Následne sa podľa umiestnenia meracích bodov vytvorí kruhový graf, v ktorom sa vykresľuje rozdiel fázorov voči referenčnej stanici (PMU). Pri tomto zobrazení, je možné pozorovať vplyv rôznych prechodných javov na zmenu fázorov. Napríklad ak dôjde k odstávke zdroja/spotreby, alebo k poruche v sústave, môže dispečer sledovať, aký vplyv má daná porucha na rozdiely fázorov v sústave. Pri tomto zobrazení je veľmi priehľadne viditeľný vplyv porúch, poprípade rekonfigurácie na fázory v celej sústave [13].



Obr. 28 Zobrazenie fázorov na mape ES SR

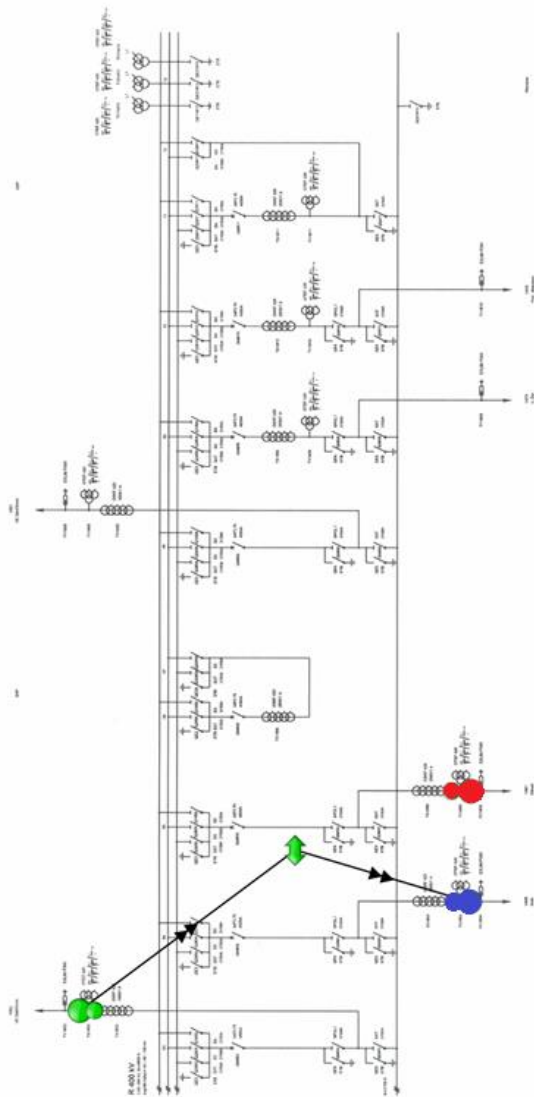
Obr. 28 znázorňuje ES SR s vyznačenými meracími bodmi. Farba jednotlivých meracích bodov sa mení v závislosti od prevádzkového stavu, t.j. ak dôjde k vytvoreniu ostrovej prevádzky v rámci ES SR, tak časť sústavy, ktorá je v synchronizme s referenčným uzlom bude označená napr. zelenou farbou a ďalšia časť – ostrov bude označený červeným sfarbením. Pre vizuálnu kontrolu ostrovej prevádzky, sú v jednotlivých uzloch doplnené šípky, ktoré reprezentujú jednotlivé fázory vzťahnuté k referenčnému fázoru (uhlu napätia). V prípade ostrovej prevádzky sa budú fázory namerané v ostrove otáčať inou rýchlosťou a môžu mať aj opačnú smer otáčania voči referenčnému. V prípade, že v danej rozvodni bude inštalovaných viac PMU jednotiek, a dôjde k rozdeleniu sústavy na ostrovy v tejto rozvodni, tak farebné vyznačenie meracích bodov sa zmení na zeleno-červenú (viď. Obr. 29). Takto má dispečer okamžite informáciu o bodoch rozdelenia sústavy. V prípade, ak v danej rozvodni bude inštalovaný väčší počet PMU jednotiek, tak po vzniku ostrova by si dispečer po otvorení konkrétnej rozvodne, vedel overiť, ktoré PMU jednotky sú súčasťou jednotlivých ostrovov. PMU jednotky nachádzajúce sa v rozličných ostrovoch budú zafarbené rôznymi farbami (červená, zelená, modrá ... atď.) (Obr. 30) [13], [20].



Obr. 29 Znáozornenie oblasti ES SR so susednými sústavami

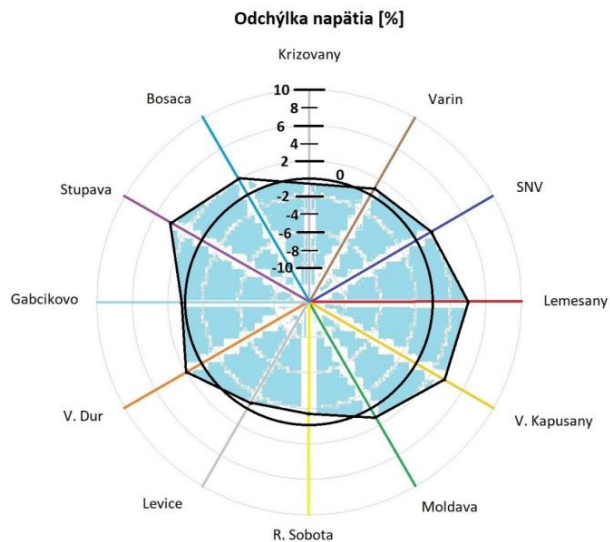
Obr. 29 je geograficky rozšírenou verziou Obr. 28. Toto zobrazenie bude možné využiť v prípade, ak dôjde k rozšíreniu výmeny dát z PMU jednotiek medzi susednými TSO. Dnes dochádza k výmene dát z PMU jednotiek medzi SEPS a ČEPS, v blízkej budúcnosti by sa mal pripojiť MAVIR a poľský PSE. V prípade pripojenia ďalších TSO by sme dostali prehľad o stave prepojenej sústavy V4. Takýto náhľad by poskytol dispečerom okamžitý obraz o dianí v prepojenej sústave a v prípade vzniku ostrova (ako napr. 08.01.2021) by mali okamžite informáciu o vzniku a aj o presných bodoch a rozsahu ostrova. Keďže ostrov v prepojenej sústave nie je viazaný na štátne hranice, môže vzniknúť aj „rozrezaním“ jednotlivých sústav na ostrovy. Dispečeri dnes v prípade vzniku takejto rozsiahlej poruchy ovplyvňujúcej prevádzku celej ENTSO-e často dlhé minúty nevedia (dostanú informáciu o zmene frekvencie). V prípade využitia WAMS systémov bude dispečer vidieť v reálnom čase postup poruchy naprieč prepojenou sústavou (jednotlivé meracie body by napr. s postupom poruchy menili farbu). Ak by mali dispečeri okamžitú informáciu, dokázali by rýchlejšie

reagovať rôznymi protiopatreniami na zamedzenie ďalšieho šírenia poruchy, ktorá môže vyústiť až do Blackout-u [15], [12]. Aj takéto výhody prinášajú systémy WAMS a rozsiahla integrácia PMU jednotiek v elektrizačných sústavách – benefit sofistikovaného monitorovania fázora (uhla) el. veličín.



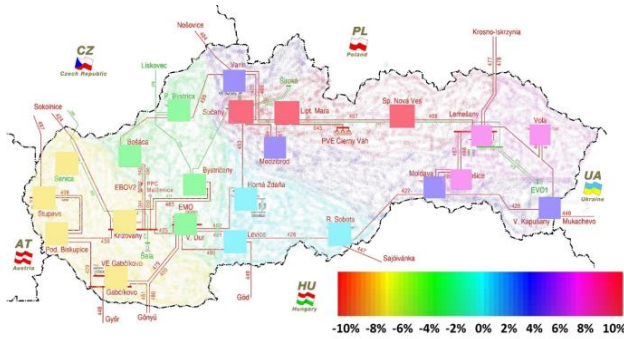
Obr. 30 Znáozmenenie PMU jednotiek v rozvodni Gabčíkovo v prípade vzniku 3 ostrovov v tejto rozvodni

Vizualizácia amplitúdy napätia:

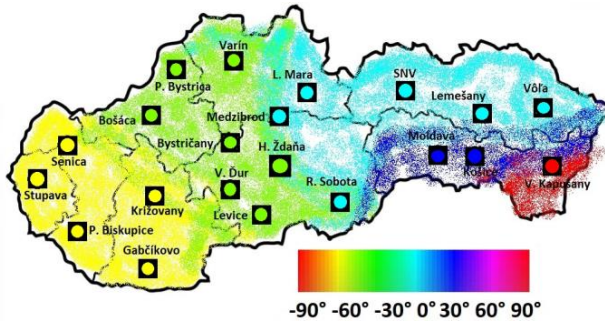


Obr. 31 Spider mapa zobrazenia napätí

Obr. 31 znázorňuje zobrazenie napätí v jednotlivých uzloch ES SR v „Spider“ grafe. Hlavnou výhodou tohto zobrazenia je, že dispečer má možnosť pozorovať vplyv jednotlivých úkonov v súvislosti na napätie v jednom grafe. Napríklad ak zapne, alebo vypne tlmivku, vidí ako tento prvok ovplyvňuje napätie v okolitých rozvodniach. Pri tomto zobrazení sa hodnoty napätí jednotlivých uzlov sústavy vynášajú do kruhového grafu. Hodnoty sa následne prepoja čiarou a vznikne spider mapa pripomínajúca pavučinu. Graf obsahuje aj stupnicu v percentuálnych hodnotách napätia. Pre ukážku je zvolená hodnota ±10%. V prípade tohto grafu je tiež možné vložiť hranice výstrah a alarmov. Rovnako ako v prípade vysokého, tak aj v prípade nízkeho napätia je možné vložiť kružnicu označujúcu hranicu alarmu a výstrahy. Dnes je v ES SR napätie udržiavane na vyšších hodnotách a nominálna hodnota napätia je už označovaná za nízke napätie. Hlavným dôvodom udržiavania vyššieho napätia je vyššia stabilita prevádzky a vyššia rezerva pre prípad rýchleho pádu napätia na kritickú hodnotu. Ak by napätie v niektorom z uzlov dosiahlo kritickú hodnotu ($UKRIT = 0,8 - 0,85 \times U_{nom}$) došlo by k tzv. lavíne napätia. Lavína napätia je nežiadúci jav, kedy samoregulačný efekt zatťaženia prestáva účinkovať a dochádza k prudkému poklesu napätia až na úroveň 10% U_{nom} t. j. výpadok stanice alebo časti oblasti prenosovej sústavy [10], [14].

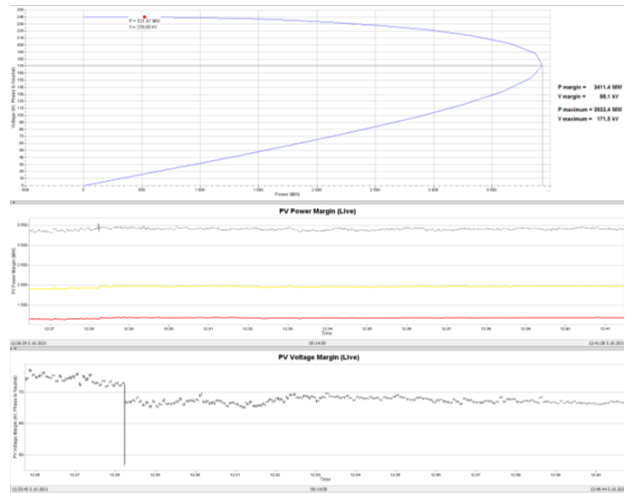


Obr. 32 Farebná vizualizácia napät'ových hladín v staniách ES SR



Obr. 33 Farebná vizualizácia ES SR podľa uhlov napätí v jednotlivých staniách

Obr. 32 a Obr. 33 znázorňuje farebné zobrazenie napät'ových hladín na mape ES SR. Toto zobrazenie znázorňuje percentuálnu odchýlku napätí od nominálnej (poprípade inej zvolenej hodnoty) hodnoty napätia. Takýmto zobrazením dostane dispečer obraz o stave napät'ovej hladiny v jednotlivých častiach sústavy. Farebná škála môže byť volená pestrofarebne, ale aj ako rôzne odtiene jednej farby. Obdobne Obr. 33 znázorňuje farebné zobrazenie napät'ových uhlov na mape ES SR. Zobrazenie znázorňuje uhlovú odchýlku napätí od referenčného uhla (ľubovoľne zvolené 1 PMU) napätia. Takýmto zobrazením dostane dispečer obraz o stave uhla napätia v jednotlivých častiach sústavy. Farebná škála môže byť volená pestrofarebne, ale aj ako rôzne odtiene jednej farby (rozsah -90° až $+90^\circ$ je len ukážka).



Obr. 34 Krivka PV

Krivka PV (Obr. 34) zobrazuje vzťah medzi napätím na konci vedenia koridoru a prenášaným činným výkonom. So zvyšovaním prenosu po vedení/koridoru sa napätie mení v závislosti na charakteristike vedenia/koridoru a záťaže až do bodu maximálneho prenášaného výkonu. Keď zaťažené rastie za bod maximálneho výkonu, napätie na konci vedenia a prenášaný výkon rýchlo klesne. To sa nazýva kolaps resp. lavína napätia [19].

Diagram PV zobrazuje krivku napät'ovej stability v aktuálnych prevádzkových podmienkach, pričom zahŕňa aj rezervu k bodu maximálneho výkonu. V grafe na osi x je činný výkon na konci vedenia a na osi y je napätie na konci vedenia. PhasorPoint automaticky vyznačuje kótu k maximálnemu odberu (vrchol krivky).

Pod hlavným zobrazením krivky PV je možné zobraziť priebehy výkonovej alebo napät'ovej rezervy v real-time zobrazení alebo za posledných 15 minút.

Výkonová rezerva: rozdiel medzi výkonom na konci vedenia a maximálnym výkonom na krivke PV.

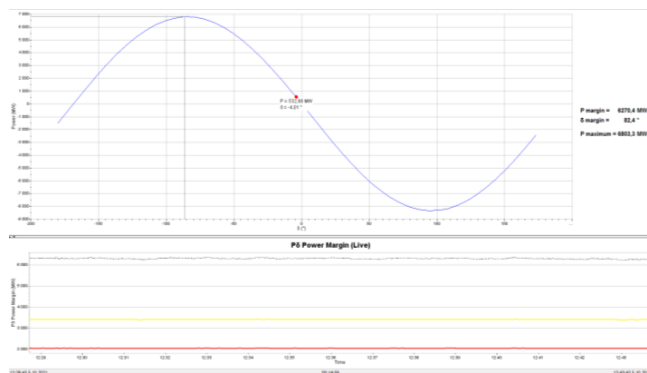
Napät'ová rezerva: rozdiel medzi napätím na konci vedenia a napätím v bode maximálneho výkonu.

Princíp výpočtu krivky PV (Výkon-Napätie) na vedení je na základe merania z PMU na oboch koncoch koridoru resp. vedenia a jeho parametrov. Konkrétne sa krivka PV počíta z nasledujúcich predpokladov:

- Veľkosť napätia na začiatku vedenia je konštantná s neobmedzenou rezervou jalového výkonu.
- Záťaž na konci vedenia má konštantný účinník.
- Začiatok a koniec vedenia sa nemení. Sú definované v konfigurácii vedenia a nemenia sa pri zmene smeru toku výkonu.
- Parametre vedenia sú známe.
- Koridor resp. vedenie môže mať viac prenosových vedení resp. potáhov/liniek a maximálne 1 uzol uprostred.

Aktuálny pracovný bod je znázornený na PV krivke (červená bodka), pričom rezerva stability je definovaná ako rozdiel medzi aktuálnym pracovným bodom a bodom maximálneho výkonu.

Existuje niekoľko faktorov, ktoré ovplyvňujú napätovú stabilitu, ale nie sú vzaté do úvahy pri rezerve stability. Napríklad náhla strata jedného alebo viacerých prenosových liniek v koridore či limity jalového výkonu generátorov [16].



Obr. 35 Krivka P δ

Krivka P δ (Obr. 35) zobrazuje závislosť uhlového rozdielu medzi oboma koncami koridoru/vedenia na prenášanom činnom výkone. Rozdiel uhlov sa úmerne zväčšuje so zvyšovaním prenášaného výkonu až do dosiahnutia maximálneho výkonu približne pri 90° uhlového rozdielu. Pri ďalšom zväčšovaní výkonu sa systém stáva nestabilným a ďalšie zväčšovanie uhlovej odchýlky vedie k zníženiu prenášaného výkonu či výpadku generátory zo synchronizmu [12].

Diagram P δ zobrazuje krivku statickej stability v aktuálnych prevádzkových podmienkach, pričom zahrňuje aj rezervu k bodu maximálneho výkonu. V grafe na osi x je rozdiel uhlov na začiatku (napájacím uzlom) a konci (odberovým uzlom) vedenia a na osi y je činný výkon na konci vedenia. Algoritmus automaticky vyznačuje kótu k maximálnemu odberu (zaťaženiu) – vrchol krivky.

Princíp výpočtu krivky P δ na vedení v aplikácii je na základe merania z jednotiek PMU na oboch koncoch koridoru/vedenia a jeho parametroch.

Krivka P δ sa vykresľuje za nasledujúcich predpokladov:

- Veľkosť napätia je konštantná na oboch koncoch vedenia s neobmedzeným zdrojom jalového výkonu.
 - Parametre vedenia sú známe.
- Aktuálny pracovný bod je znázornený na P δ krivke (červená bodka), pričom rozdiel medzi aktuálnym pracovným bodom a bodom maximálneho výkonu dáva rezervu statickej (uhlovej) stability. Tento limit nerešpektuje dynamickú stabilitu ani kontingenciu (náhodnej poruchy).

VI. ZÁVER

Zavedenie synchrofázorových meraní, rovnako ako pokrok v komunikácii a výkonných spracovaní vo výpočtoch umožnili technicky realizovať monitorovanie stability elektrizačných sústav on-line v reálnom čase (minimálne skreslenie – podľa počtu vzoriek za sekundu a chyby zariadenia PMU) s využitím perspektívy WAMS systému. Výhody zhromažďovania fázorov na vyhodnotenie analýzy prevádzky (post-mortem analýzy) sú pre niekoľké inštitúcie definitívne uznávané, ale najdôležitejšou WAMS aplikáciou je on-line hodnotenie stability elektrizačného systému, najmä pri dohľade/kontrola kritických koridorov.

Rozšírené monitorovania založené na synchrofázoroch môžu zahŕňať aj WAMS na riadenie a ochranu systému. Vývoj WAMS na WAMPACS bude narastať prirodzeným tempom spoločne s vývojom synchrofázorových technológií a vyššej úrovni chápania tejto technológie. Niektoré príklady pilotných inštalácií a výskumných prototypov sa zaoberajú týmto potenciálom pre riadenie s použitím synchrofázorov, ako napríklad: WAMS riadenie pre tlenie oscilácií s použitím FACTS/HVDC systémov alebo rýchleho budenia systému (generátorov), vyvažovanie ostrovnej prevádzky, zapínanie/vypínanie záťaže/výroby, riadenie ostrovov, riadenie prepínačov odbočiek a záťaží [8].

Predkladaná dizertačná práca je zameraná na rozbor WAMS systémov a ich prínosov pre prevádzkovateľov prenosových elektrizačných sústav (v menšom aj distribučných sieti). V úvodných kapitolách sú opísané jednotlivé prvky WAMS zariadení s ich funkciami pre monitorovanie, riadenie či ochranu elektrizačnej sústavy. Nie len graficky je popísaný vývoj WAMS systémov a to ako tieto zariadenia a ich implementácia v širokej škále vopred napreduje. Zvyšovaním nárokov na bezpečnosť, kvalitu či rastúci dopyt po elektrickej energii sa stávajú jednotky PMU čoraz viac bežnou praxou. Štruktúra hierarchického usporiadania je podrobnejšie opísaná v ďalších kapitolách spolu aj s komunikáciou, tokom, zberom a ukladaním dát – základná stavba WAMS zariadení. Tento výskum sa zaoberá modernými progresívnymi monitorovacími zariadeniami WAMS a to predovšetkým na špecifikáciu potrieb jej integrácie v čo najširšej škále nie len kvôli monitorovaniu, ale aj v závere, predísť nežiadúcemu výpadku typu Black-Out.

Prínosom výskumu v predkladanom dokumente je v prvom rade zhodnotenie meracích jednotiek PMU na účely skvalitnenia monitorovania a riadenia prenosových elektrizačných sústavách so zreteľom na čo najefektívnejšie zamedzenie nežiadúcich dejov, poruchových udalostí či čiastočnú alebo úplnú elimináciu vplyvu, ktorý by viedol k tzv. Black-Out rozpadu. Od počiatku sa práca snaží viesť čitateľa do danej problematiky WAMS systémov kde je stručne popísaný ich vývoj s vysvetlenými princípmi funkcie a zavádzaním do odvetví meraní a riadenia elektrizačných sústav. Stálym rozvojom tejto technológie je aktuálna integrácia aj medzi, už spomínanými, zariadeniami FACTS a systémami HVDC. Predstavovaná technológia WAMS a jej spolupráca s modernými FACTS a HVDC systémami je v krátkosti posudzovaná, kvôli schopnosti v pozitívnom zmysle a širokej škále zamedzovať a plynulo tmiť systémové oscilácie.

V skutku je možné tvrdiť, že pojem oscilácia je v každom prípade spájaná mimo ustáleného chodu prevádzky elektrizačnej sústavy – teda prechodných dejoch. Nehodnotiac zanedbateľné alebo veľmi kritické udalosti; ktoré sú všetky sprevádzané osciláciami jednotlivých elektrických veličín; keďže sa oscilácie nepretržite vyskytujú v el. sústavách a sieťach (obzvlášť veľké prepojené systémy). Tieto udalosti sú potvrdené aj systémami WAMS a vplyvom liberalizácie trhu s el. energiou sa neustále zvyšuje množstvo týchto oscilácií. Preto môžeme konštatovať, že dokonalý ustálený stav pre dispečerov síce naozaj existuje, ale z matematického hľadiska a praktického uváženia sa v elektroenergetických systémoch stále niečo deje (sústava „dýchala“). Preto je nutné dané oscilácie neustále pozorovať a monitorovať ich správanie (amplitúdu, dĺžku trvania, tlmenie). To je aj počiatkom vzniku kapitoly, oboznámiť čitateľa v úvode práce o porozumení významu slova „oscilácie“ a nutnosti tlmiť ich do priaznivých hodnôt.

Jadro práce tvoria praktické spracované kapitoly počnúc možnosťami implementácie a využitia WAMS v ES SR. Špecifikácie technológií WAMS pre podporu operatívneho riadenia ES so zameraním na napätovú a frekvenčnú stabilitu, detekciu ostrovnej prevádzky, kontrolu oscilácií a detekciu kývania, odhadu a estimácia stavu sústavy, statickú a dynamickú stabilitu či ampacitu vedení, lokalizáciu porúch a následnú obnovu ES po Black-Oute.

Podstatnou a jedinečnou výhodou WAMS systémov je schopnosť merať nie len amplitúdu napätia a prúdu ale predovšetkým uhol, z ktorého je možné dostať pomocou GPS prepojenia živé synchronizované dáta vektorového charakteru – fázor v polárnom grafe. Prínosom práce je teda v neposlednom rade analýza rozšírenia technológie WAMS pre riadenie elektrizačných sústav počnúc meraniami elektrických veličín a parametrov s konkrétnou hodnotou v komplexnej rovine premennej v rozličných zobrazeniach a navrhovaných grafických priebehoch aj na geografickom podklade s cieľom zvýšiť schopnosť operatívneho riadenia. Počnúc výskumom v oblasti WAMS, spracovaním údajov z PMU jednotiek a analýzou jednotlivých (vyššie spomínaných) tém boli následne spracované a vytvorené individuálne vizualizácie, výpočty či konkrétne možnosti využitia schopnosti WAMS systémov pre riadenie v reálnom čase, post-mortem analýzy a iné.

Predpokladá sa, že zariadenie WAMS založené na systéme synchrofázora (PMU) zohrajú dôležitú úlohu pri riadení, ochrane a monitorovaní nie len bežných elektrizačných sústav ale aj pri regulačných flexibilných systémoch FACTS, riadení vysokonapäťových jednosmerných prenosoch HVDC či moderných inteligentných sieťach „Smart Grid“ aj v distribučných sieťach [17]. Zohľadnením dosiahnutých výsledkov v práci, je možné konštatovať, že zariadenia WAMS sa budú naďalej inštalovať a expandovať v ES aj s novými možnosťami využitia a spracovania meraných dát PMU jednotkami. Celkovým vyhodnotením systémov WAMS je, že ponúkajú nový avantgardný pohľad na zvýšenie kvality el. energie, reguláciu, bezpečnosť a stabilitu prevádzky či zamedzeniam veľkým poruchám či Black-Outom elektrizačných sústav.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0576, ako aj Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a SAV, podporený grantom VEGA 1/0757/21.

LITERATÚRA

- [1] Y. Li, D. Yang, F. Liu, Y. Cao, Ch. Rehtanz, 2016. Interconnected Power Systems; Wide-Area Dynamic Monitoring and Control Applications, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 98-112 p. ISBN: 978-3-662-48625-6.
- [2] A. Monti, C. Muscas, F. Ponci, 2016. Phasor Measurement Units and Wide Area Monitoring Systems; From the Sensors to the System, London: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2016. 2-111 p. ISBN: 978-0-12-804569-5.
- [3] J. Ma, 2018. Power system; Wide-Area Stability Analysis and Control, Beijing-China: Wiley-Science Press Beijing, 2018. 23-154 p. ISBN: 9781119304876.
- [4] A. G. Phadke, J. S. Thorp, 2017. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, Second Edition, USA: Springer International Publishing, 2017. 14-243 p. ISBN: 978-3-319-50582-4.
- [5] A. R. Messina, 2015. Wide-Area Monitoring of Interconnected Power Systems, London: The Institution of Engineering and Technology, United Kingdom, 2015. 2-98 p. ISBN: 978-1-84919-853-0.
- [6] A. Vaccaro, A. F. Zobaa, 2016. Wide Area Monitoring, Protection and Control Systems; The enabler for Smarter Grids, London: The Institution of Engineering and Technology, United Kingdom, 2016. 3-86 p. ISBN: 978-1-84919-830-1.
- [7] H. Bevrani, M. Watanabe, Y. Mitani, 2014. Power System Monitoring And Control, New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc, Hoboken-IEEE Press, 2014. 31-185 p. ISBN: 978-1-118-45069-7.
- [8] L. F. Santos, G. Antonova, M. Larsson, F. Sergio, 2015. The Use of Synchronphasors for Wide Area Monitoring of Electrical Power Grids. [online]. Semantic Scholar: 1-15 p. [cit. 2020.09.21]. Dostupné na internete: <<https://library.e.abb.com/public/9357d370a88948e3adcd1f4c1a216741/The%20Use%20of%20Synchronphasors%20for%20Wide%20Area%20Monitoring%20of%20Electrical%20Power%20Grids.pdf>>.
- [9] T. Babnik, K. Görner, B. Mahkovec, 2014. Wide Area Monitoring System. [online]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1-18 p. [cit. 2020.07.10] Dostupné na internete: <https://www.kth.se/social/files/5829b140f276540cc86d5d1a9/9%20WAMMS.pdf>.
- [10] ABB. 2012. Wide Area Monitoring Systems: Portfolio, applications and experiences. [online]. ABB Group. 1-35 p. [cit. 2020.10.27]. Dostupné na internete: <<https://library.e.abb.com/public/94fab39c67b4ac00c125784f00293520/1KHL501042%20PSGuard%20WAMS%20Overview%202012-04.pdf>>.
- [11] ABB. 2015. Jornadas Técnicas Peru 2015 Protection, monitoring and control solutions using Wide Area Monitoring Systems. [online]. ABB Group. 1-29 p. [cit. 2020.11.07]. Dostupné na internete: <<https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/documentos-peru/presentaciones-primeras-jornadas-tecnicas-abb-peru/ps/wide-area-network-technology-and-synchronphasors.pdf?sfvrsn=2>>.
- [12] ENTSO-E. 2021. System Separation in the Continental Europe Synchronous Area on 8 January 2021 – update. [online]. ENTSO-E. [cit. 2021.01.16]. Dostupné na internete: <<https://www.entsoe.eu/news/2021/01/15/system-separation-in-the-continental-europe-synchronous-area-on-8-january-2021-update/>>.
- [13] ENTSO-E. 2021. System split registered in the synchronous area of Continental Europe – Incident now resolved. [online]. ENTSO-E [cit. 2021.01.16]. Dostupné na internete:

- <<https://www.entsoe.eu/news/2021/01/08/system-split-registered-in-the-synchronous-area-of-continental-europe-incident-now-resolved/>>.
- [14] L. Vanfretti, M. Baudette, J-L. Domínguez-García, M. S. Almas, A. White, J. O. Gjerde, 2016. A Phasor Measurement Unit Based Fast Real-time Oscillation Detection Application for Monitoring Wind-farm-to-grid Sub-synchronous Dynamics, Stockholm: Electric Power Components and Systems, 2016. 123-134 p. ISSN: 1532-5016.
- [15] H. Wang, W. Du, 2016. Analysis and Damping Control of Power System Low-frequency Oscillations; New York: Springer Science+Business Media, 2016. ISBN: 978-1-4899-7694-9; DOI: 10.1007/978-1-4899-7696-3.
- [16] M. Eremia, M. Shahidehpour, 2013. Handbook Of Electrical Power System Dynamics; Modeling, Stability, and Control; New Jersey: Published by JohnWiley & Sons, Inc., Hoboken, 2013. ISBN: 978-1-118-49717-3.
- [17] J. Fang, 2021. More-Electronics Power Systems: Power Quality and Stability; Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021. ISBN: 978-981-15-8589-0; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8590-6>.
- [18] U. Häger, Ch. Rehtanz, N. Voropai, 2014. Monitoring, Control and Protection of Interconnected Power Systems; Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,2014. ISBN: 978-3-642-53847-6; DOI: 10.1007/978-3-642-53848-3.
- [19] A-R. Messina, 2009. Inter-area Oscillations in Power Systems; A Nonlinear and Nonstationary Perspective; New York: Springer Science+Business Media, 2009. ISBN: 978-0-387-89529-1; DOI: 10.1007/978-0-387-89530-7.
- [20] M. Larsson, L. F. Santos, G. Antonova, 2013. Monitoring and Control of Power System Oscillations using FACTS/HVDC and Wide Area Phasor Measurements; Yekaterinburg, [online]. SCRIBD [cit. 2022.05.03]. Dostupné na internete: <<https://www.scribd.com/document/406890098/Larsson-Mats-Monitoring-and-Control-of-Power-System-Oscillations-using-FACTS-HVDC-and-Wide-Area-Phasor-Measurements-pdf>>

Metódy strojového učenia pre tvorbu klasifikačných modelov zameraných na kardiovaskulárne ochorenia

Zuzana Pella

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
zuzana.pella@tuke.sk

Ján Paralič

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovenská republika
jan.paralic@tuke.sk

Abstrakt — Kardiovaskulárne ochorenia sú celosvetovým problémom, ako z hľadiska vzrastajúcej prevalencie, tak aj z hľadiska počtu úmrtí v dôsledku kardiovaskulárnych ochorení. Nakoľko množstvo údajov nie len v tejto špecifickej oblasti, ale aj celej oblasti poskytovania zdravotnej starostlivosti má rovnako vzrastajúci trend, nie je v možnostiach ľudského mozgu ich skúmať a analyzovať. Predkladaná článok reflektujúci dizertačnú prácu teda prepája doménu kardiovaskulárnych ochorení a skúmanie rizikových faktorov spôsobujúcich aterosklerózu s inteligentnými metódami strojového učenia. Pochopeniu domény kardiovaskulárnych ochorení sme venovali pozornosť v rámci analýzy súčasného stavu riešenej problematiky, kde sme z rôznych uhlov pohľadu poukázali na využitie jednotlivých metód a prístupov strojového učenia v danej doméne. Experimentálna časť práce sa zaoberá analýzou vlastnej, retrospektívne získanej dátovej množiny pacientov hospitalizovaných vo Východoslovenskom ústave srdcových a cievnych chorôb v Košiciach za účelom vykonania selektívnej koronarografie pre potvrdenie aterosklerózy koronárnych ciev. Aplikačné využitie výsledkov experimentov je načrtnuté v závere popisovanej práce. Nasadenie výsledkov môže byť užitočné nie len pre pacientov z hľadiska zvýšenia prevencie kardiovaskulárnych ochorení, zameranie sa na najvýznamnejšie rizikové faktory (nie len tradičné, ale aj novoobjavené) a tým zvýšenie kvality ich života, ale aj pre medicínske zariadenia v zmysle šetrenia ich kapacitných a finančných možností.

Kľúčové slová — *analýza dát; diagnostické modely; kardiovaskulárne ochorenia; klasifikácia; medicínska diagnostika; vplyv atribútov; významnosť atribútov*

I. ÚVOD

Posledné obdobie so sebou prináša mnoho výziev. Pandemická situácia nasledovaná nielen informačnou vojnou ukázala ľudom množstvo slabín. Správne informácie sa v uvedenom kontexte javia dôležitejšie ako kedykoľvek predtým. Hľadanie správnych zdrojov informácií a následné narábanie, spracovanie a využívanie informácií sa náhle ukázalo ako podcenená skutočnosť. Informácie, často aj surové dáta, nie sú ničím neobvyklým v ktorejkoľvek oblasti ľudského života. K ich produkcii neprispieva len samotný človek, ale aj rôzne systémy alebo zariadenia, teda informačné alebo digitálne technológie. Technológie sú však nápomocné aj pri zbere, či spracovaní dát. Samotná interpretácia nie je až tak triviálna

záležitosť, človek musí okrem spracovaných informácií oplývať aj znalosťami, ako získané informácie správne interpretovať a následne využiť. Táto schopnosť nie je významnou len v rámci bežnej informovanosti ohľadom aktuálneho diania vo svete, ale častokrát je spájaná aj s inými benefitmi, či už hovoríme o denno-dennom rozhodovaní sa, prosperite firmy alebo kvalite ľudského života.

S kvalitou ľudského života je nepochybne spojená medicína, rovnako, ak nie dokonca ešte viac, bohatá na dáta a informácie ako ktorákoľvek iná doména spoločnosti. Rozmách informačno-komunikačných technológií v odvetví medicíny znamenal niekoľkonásobné zväčšenie objemu dát a informácií. To so sebou prinieslo výzvy týkajúce sa využitia týchto dát v prospech pacientov, skvalitnenia a zjednodušenia práce zdravotníckych pracovníkov, lepšieho využitia kapacít materiálu, ľudských zdrojov a diagnostických zariadení. To všetko by nebolo možné bez využitia metód strojového učenia (SU). Prepojenie medicíny a SU je interdisciplinárna oblasť, ktorá môže priniesť zaujímavé výsledky za predpokladu úzkej spolupráce expertov z oboch domén.

Odhaduje sa, že v roku 2020 bolo v rámci poskytovania zdravotnej starostlivosti vyprodukovaných dva ZB (1ZB = 1021B) dát [1]. Nakoľko ľudský mozog túto kapacitu nie je schopný spracovať, spojenie medicíny spolu ďalšími oblasťami výskumu je viac než opodstatnené. Nástroje na spracovanie prirodzeného jazyka je možné využiť nie len v rámci štrukturalizácie medicínskych záznamov, na ktoré je následne možné nasadiť napríklad aj metódy SU. Výsledkom takýchto metód môže byť odporúčací model či dokonca systém, systém na podporu rozhodovania alebo rôzne iné diagnostické systémy. To umožňuje nie len lekárom lepšie nakladať so svojimi časovými možnosťami, ale nezanedbateľným prínosom je aj lepšie využitie dostupných diagnostických a vyšetrovacích prístrojov, šetrenie kapacitných, časových a finančných možností jednotlivých medicínskych zariadení, ktoré rovnako prinášajú benefity aj pre pacientov.

Medicínskych oblastí, na ktoré možno zamerať výskum je mnoho, no nepochybne jednou z najzávažnejších je práve doména KVO. Jej závažnosť vyplýva práve zo skutočnosti, že ročne na následky KVO zomierajú milióny ľudí, pričom tento problém sa netýka len krajín s nižšou a strednou

socioekonomickou vyspelosťou. Podľa Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO, World Health Organization) zomrie na následky KVO každých 36 sekúnd jeden Američan [2]. V Európe spôsobujú KVO 46-krát viac úmrtí ako AIDS, tuberkulóza a malária [3]. Ázijským krajinám sa podľa správy WHO z roku 2019 pripisuje až 58% všetkých úmrtí v dôsledku KVO (z celkového množstva 18,6 milióna úmrtí) [4][5]. Pritom ako uvádza WHO, riešením behaviorálnych rizikových faktorov, včasnou detekciou a následným manažmentom ochorenia je možné predísť až 80% predčasných srdcových chorôb a mozgových príhod [5][6]. Dôležité je následky KVO nie len liečiť, ale aj včas a správne diagnostikovať nástup, prípadne riziko nástupu KVO. V minulosti vzniklo viacero veľkých štúdií zo zameraním na identifikáciu rizikových faktorov spôsobujúcich KVO. Za zmienku nepochybne stojí Framinghamská štúdia [7] (FHS, z angl. Framingham Heart Study), ktorá sledovala generácie pacientov. Do roku 1950 sa prevalencia KVO stala dvakrát bežnejšou ako rakovina [7].

V rámci popisovanej práce sme sa zamerali práve na oblasť KVO, konkrétne na oblasť vyšetrenia selektívnej koronarografie (SKG) pre potvrdenie aterosklerózy koronárnych ciev (KC), kde je našou snahou preukázať potenciál metód SU pre včasnú diagnostiku a prevenciu KVO. Na základe uvedeného špecifikujeme náš výskumný cieľ *Analýza potenciálu metód strojového učenia pre včasnú diagnostiku a prevenciu kardiovaskulárnych ochorení* s príslušnými pod cieľmi:

1. Vytvorenie vhodného nástroja pre získanie štruktúrovanej dátovej množiny pacientov hospitalizovaných za účelom vykonania vyšetrenia SKG vo VÚSCH v Košiciach pre potreby ďalších analýz nad touto dátovou množinou.
2. Návrh a vytvorenie modelov SU, vrátane ďalších postupov a metrík pre určenie závažnosti rizikových faktorov vedúcich ku subklinickej ateroskleróze na vzorke pacientov hospitalizovaných vo VÚSCH.
3. Pomocou vytvorených modelov, postupov a metrík verifikovať existenciu nových rizikových faktorov spôsobujúcich subklinickú aterosklerózu a určiť ich významnosť pomocou metód SU.
4. Návrh a vytvorenie modelov SU zameraných na diagnostické účely s cieľom predchádzať zbytočným invazívnym vyšetreniam. Pôjde o klasifikáciu pacientov do dvoch skupín:
 - pacienti odporúčaní na vyšetrenie SKG,
 - pacienti, u ktorých nie je nutné vykonanie SKG vyšetrenia pre potvrdenie alebo vyvrátenie prítomnosti aterosklerózy.
5. Verifikovať vytvorené modely a prípadne určiť potrebu vytvorenia ďalších modelov a spôsoby ich využitia so zameraním na vzájomné vzťahy medzi sledovanými atribútmi ako potencionálnymi rizikovými faktormi vedúcimi ku subklinickej ateroskleróze.

6. Návrh a overenie systému na podporu rozhodovania kardiológov, ktorý integruje viaceré spôsoby využitia SU pre podporu rozhodovania a výskumu KVO. Predstavuje tak praktickú integráciu všetkých predchádzajúcich čiastkových cieľov.

Reflektujúc vytyčené ciele dizertačnej práce, predkladaný článok popisuje experimenty vykonané nad vlastnou, retrospektívne získanou množinou pacientov hospitalizovaných vo Východoslovenskom ústave srdcových a cievnych chorôb (VÚSCH) v Košiciach. Podľa zadaných cieľov postupujeme aj v rámci experimentálnej časti, kde sa najskôr venujeme popisu tvorby systému na transformáciu údajov pacientov do štruktúrovanej podoby. Ďalšia časť sa sústreďuje na zhodnotenie vplyvu skúmaných atribútov a návrh vlastnej metriky pre hodnotenie ich významnosti. Pokračovali sme tvorbou diagnostických modelov zameraných na určenie potreby absolvovania SKG. V rámci tejto časti sme vytvorili niekoľko modelov, ktoré sme zhodnocovali na základe širokého spektra metrík, čoho výsledkom je odporúčanie na zameranie sa na niekoľko vytvorených modelov v závislosti od účelu ich použitia. Záver kapitoly je venovaný skúmaniu vzťahov medzi atribútmi pozorovaného súboru dát pomocou faktorovej analýzy (FA). Následne sme sa v rámci predkladanej práce orientovali na aplikačné možnosti popisovaných experimentov v rámci Systému pre podporu rozhodovania kardiológov, ktorý je výsledkom spolupráce niekoľkých záverečných prác.

II. NÁVRH A IMPLEMENTÁCIA RIEŠENIA ZVOLENEJ PROBLEMATIKY

Obsahom tejto kapitoly je opis samotného riešenia jednotlivých cieľov popisovanej dizertačnej práce. Všetky popisované experimenty a práca s dátovým súborom prebiehala v prostredí R Studio (verzia 1.4.1106 "Tiger Daylily") pomocou programovacieho jazyka R (verzia 4.0.2).

A. Získanie, pochopenie a príprava dátového súboru

Získanie medicínskych dát sa nezaobíde bez aplikácie viacerých úkonov. V prípade, ak sú lekárske záznamy v elektronickej podobe, nie je ničím zriedkavým ak ich obsahom je voľne písaný text obsahujúci vlastné skratky a terminológiu (pre daného lekára alebo pracoviisko, kde pracuje), prípadne rôzne preklepy slov. Ďalej môžu lekárske záznamy obsahovať výsledky laboratórných testov, výsledky špecializovaných vyšetrení (napr. rádiologické snímky), údaje z monitorovacích zariadení, prípadne zoznam liečiv [8][9][10].

Súbor pacientov, ktorý je obsahom predkladanej práce, pochádza z VÚSCH. Pacienti boli hospitalizovaní na I. Kardiologickej klinike (I.KK) za účelom vykonania SKG s cieľom určiť prítomnosť koronárnej obštrukcie ciev. Dátový súbor pacientov bol vybraný retrospektívne so zameraním na obdobie medzi júnom 2017 až marcom 2018. Inklúznymi kritériami boli vek nad 18 rokov, prítomnosť aspoň jedného zo známych rizikových faktorov KVO a subklinickej aterosklerózy zistenej pomocou CT angiografického alebo iného neinvazívneho zobrazovacieho vyšetrenia, prípadne na základe záťažových testov. Každý pacient musel mať vo svojej dokumentácii záznamy o výsledku koronarografického vyšetrenia (diagnostického a prípadne aj terapeutického)

pomocou SKG. Exklúznymi kritériami boli známe ochorenie KC a akútne koronárny syndróm. Zadaným kritériám vyhovovalo celkovo 876 pacientov [11].

Každý pacient, ktorý je hospitalizovaný vo VÚSCH podpisuje informovaný súhlas so spracovaním osobných údajov, okrem iného aj na účely výskumu. Riešenie našej práce je súčasťou interdisciplinárneho projektu s názvom KSC MR (Kosice Selective Coronarography Multiple Risk) Study, na ktorom sa podieľa niekoľko pracovísk. Menovite ide o Lekársku fakultu Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach (LF UPJŠ), VÚSCH a.s. a Katedru kybernetiky a umelej inteligencie Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach (KKUI FEI TUKE).

Vývoj aplikácie na extrakciu sledovaných atribútov

Získané údaje pacientov mali podobu textových dokumentov vo formáte *.rtf. Dokumenty boli čiastočne štruktúrované podľa jednotlivých sekcií, avšak sekcie obsahovali voľný text a skratky špecifické pre konkrétne oddelenie. Vznikla teda potreba dať údajom štruktúrovanú podobu. V spolupráci s medicínskym expertom sme špecifikovali požiadavky na prvú verziu softvéru pre spracovanie EHR [12]:

7. transformácia zdravotnej dokumentácie pacienta do jednoduchej štruktúrovanej podoby;
8. extrakcia iba relevantných informácií z EHR (na základe odporúčani doménového experta);
9. šifrovanie osobných údajov pacienta;
10. vývoj nástroja na prezentáciu výstupov;
11. dostupnosť pôvodného dokumentu pre prípad revízií údajov;
12. možnosť manuálnych opráv extrahovaných údajov.

Vývoj prototypu aplikácie na základe uvedených požiadaviek prebiehal v programovacom jazyku Python (verzia 2.6). Proces získavanie cieľového produktu, teda vývoj aplikácie zahŕňal niekoľko krokov, počnúc transformáciou formátu EHR (čím sa znížila výpočtová náročnosť ďalších krokov vývoja a zároveň sa zvýšila efektívnosť skladovania extrahovaných údajov), nasledovaný overením dostupnosti požadovaných informácií na základe špecifikácie doménového experta. Ďalšou etapou bolo ošetrovanie ochrany osobných údajov pacientov. Pokladali sme za potrebné vylúčiť údaje, ktoré priamo identifikujú pacientov. Do požadovaných výstupov neboli teda zahrnuté žiadne údaje obsahujúce meno, priezvisko, či bydlisko pacienta. Identifikátor rodného čísla sme však pre neskoršie potreby v zmysle spárovanie údajov v prípade rozšírenia medicínskych údajov o pacientoch z viacerých špecializovaných oddelení museli ponechať. Avšak jeho tvar bol pozmenený symetrickým šifrovacím algoritmom AES (z angl. Advanced Encryption Standard) s najvyšším 256 bitovým kľúčom [13].

Na samotnú extrakciu požadovaných údajov sme využili NLP algoritmus s pravidlami pre vyhľadávanie kľúčových slov. Kľúčové slová bolo potrebné kombinovať s regulárnymi výrazmi, keďže v nie zriedkavých prípadoch sa v EHR objavovali rôzne tvary toho istého slova či skratky, spôsobené

chybným zápisom, prípadne subjektívnym používaním skratiek toho ktorého lekára. Rovnako bolo dôležité overiť potvrdenie či negáciu jednotlivých javov a následnú prítomnosť slov a slovných spojení približujúcich obsah sledovaných termínov.

Negácia vo vetách bola ošetrovaná aplikáciou algoritmu Punkt Sentence Tokenizer (PST), obsiahnutom v knižnici NLTK (Natural Language Toolkit). Nevýhodou algoritmu PST bola absencia podpory slovenského jazyka. Automatické nastavenie na anglický jazyk vykazovalo známky vysokej chybovosti. Zmena jazyka na český výrazne zlepšila tokenizáciu. Miera chybovosti (približne 6%) bola pre nás akceptovateľná a podporila požiadavku na manuálnu zmenu údajov v rámci vyvíjanej aplikácie. V závere bolo aplikácii pridané jednoduché používateľské rozhranie.

V procese vývoja aplikácie sme mali k dispozícii celkovo 156 záznamov EHR. Nakoľko okrem samotného ladenia aplikácie bolo potrebné potvrdiť aj jej efektívnosť a presnosť extrakcie údajov, korpus dokumentov sme rozdelili na tréningovú a testovaciu časť v pomere 80:20. Výsledky tréningovej fázy (zahŕňajúcej 130 dokumentov) boli manuálne skontrolované a následne boli jednotlivé časti algoritmu priebežne aktualizované pre maximálne vyladenie jeho funkčnosti. Vyladený algoritmus aplikácie bol nasadený na zvyšných 26 EHR záznamov v rámci testovacej fázy. Výsledky boli taktiež manuálne prekontrolované, pričom celkovo sa vyskytlo 11 chýb (z 1690 extrahovaných hodnôt, chybovosť 0,6%) v 9 atribútoch.

Prvý prototyp aplikácie dostal názov PALS – Poloautomatické spracovanie lekárskeho správ a výsledok implementácie aplikácie PALS bol popísaný v [12]. Prehľad extrahovaných atribútov aplikáciou PALS uvádzame v publikáciách [14][15][16].

Analyza a príprava získaného dátového súboru pacientov

Výsledkom nasadenia uvedených metód a postupov v rámci aplikácie PALS sme získali súbor pacientov špecifikovaných pomocou 66 atribútov. Kontrolou zameranou na úplne popísané vyšetrenie SKG prešlo celkovo 808 záznamov. Prehľad dostupných atribútov a ich základných štatistík poskytujeme v publikácii [15].

Jedným z prvých krokov bolo odstránenie atribútov, ktoré nemajú prínos z hľadiska informačnej hodnoty pre nasledujúce analýzy. Konkrétne išlo o atribúty identifikačného čísla, rodného čísla a roku narodenia pacienta. Rok narodenia pacienta sme však najskôr transformovali do veku pacienta, kde sme okrem roku narodenia využili aj identifikačné číslo obsahujúce informáciu o roku, v ktorom bol pacient hospitalizovaný na I.KK VÚSCH. Týmto spôsobom sme získali vek pacienta v čase jeho hospitalizácie.

Ďalším krokom bolo ošetrovanie extrémnych hodnôt. Známky extrémnych hodnôt vykazovali atribúty *BMI*, *Výška*, *Váha*, *Tlak*, *Chol*, *HDL* a *AST*. Grafické znázornenie prostredníctvom tzv. boxplotov tento predpoklad potvrdilo, následne sme extrémne hodnoty ošetrili nahradením 5% a 95% percentilu hodnôt príslušných atribútov.

Na základe permanentne prebiehajúcich konzultácií s doménovým expertom z oblasti kardiológie sme sa rozhodli vytvoriť aj nový atribút popisujúci mieru kardiovaskulárneho rizika (KVR) pre najbližších desať rokov [17]. Atribút dostal názov ESC, pričom k jeho vytvoreniu boli použité atribúty *Vek*, *Pohlavie*, *Chol* a (systolický) *Tlak*. Rovnako sa zohľadňoval status fajčiara v atribúte *Fajcenie*.

Dátový súbor sa vyznačuje širokým rozsahom chýbajúcich hodnôt skrz jednotlivé atribúty. Niektoré atribúty obsahovali vysoký podiel chýbajúcich dát (50 – 80%). Nakoľko jedným z pod cieľov predkladanej práce je aj overenie významnosti nových potencionálnych rizikových faktorov, rozhodli sme sa ponechať všetky atribúty. Chýbajúce hodnoty by však mohli byť problematické pre implementáciu viacerých algoritmov SU. Vymazanie záznamov pacientov bolo pre nás neakceptovateľné (nízky počet kompletných údajov) rovnako ako odstránenie atribútov s vysokou mierou chýbajúcich údajov (naším cieľom je nájsť nové rizikové faktory aterosklerózy, čo vylučuje elimináciu určitého počtu sledovaných atribútov). Ako uvádzame v [18], po vykonaní súboru experimentov zameraných na posúdenie vhodnosti metódy doplnenia chýbajúcich údajov na našom súbore dát, algoritmus kNN sa javil ako úspešnejší (oproti porovnávanému MICE algoritmu). V tomto momente sa vyskytla otázka, do akej miery dokázalo doplnenie chýbajúcich údajov skresliť jednotlivé atribúty skúmaného dátového súboru.

Na overenie zachovania rozloženia hodnôt atribútov sme sa zamerali na štatistické testovanie hypotéz. Ako prvé bolo potrebné otestovať normalitu rozdelenia dát. Keďže literatúra [19] uvádza maximálne 5% mieru výskytu chýbajúcich hodnôt ako akceptovateľnú, štatistickým testom sme podrobili všetky atribúty obsahujúce viac ako 5% chýbajúcich dát. Išlo o 27 atribútov: *EKG_BLTR*, *EKG_BPTR*, *EKG_KES*, *EKG_Rytmus*, *EKG_STD*, *EKG_STE*, *EKG_SVES*, *EKG_T*, *Tlak*, *EKG_FR*, *Trigl*, *HDL*, *F_Doba*, *F_Pocet*, *Fajcenie*, *LDL*, *EKG_QRS*, *EKG_PQ*, *HIV*, *HBsAG*, *Alkohol*, *EKG_Q*, *AST*, *CRP*, *ESC*, *FBG* a *CL*. Pre numerické atribúty sme zvolili SW test, pre binárne, resp. kategorické premenné postačovalo určenie počtu hodnôt v jednotlivých kategóriách a ich zobrazenie vo forme histogramu. Pre všetky testované atribúty, v pôvodnom aj doplnenom dátovom súbore, bola zamietnutá nulová hypotéza o normálnom rozdelení. Následne sme pristúpili k Wilcoxonovmu, respektíve Chi-kvadrát testu podľa typu premennej. Numerické premenné boli porovnávané taktiež pomocou boxplotov, ktoré potvrdili závery Wilcoxonovho testu o zamietnutí nulovej hypotézy o rozdielnosti strednej hodnoty v sledovaných atribútoch. K rovnakému záveru sme dospeli na základe aplikácie Chi-kvadrát testu, ktorý zamietol nulovú hypotézu o nezávislosti sledovaných atribútov. Pre jednotlivé testy bola použitá hladina významnosti $\alpha = 0.05$. Vo všetkých prípadoch bola p-hodnota výrazne nižšia, prípadne vyššia na vyvodenie záverov o prijatí, respektíve zamietnutí nulovej hypotézy na základe zvoleného štatistického testu. Z vykonaných testov teda vyplýva, že doplnenie chýbajúcich hodnôt nám nijako významne nemení charakter analyzovaného dátového súboru.

Z dôvodu vyvarovania sa skreslenia výsledkov plánovaných analýz nad dátovým súborom sme dospeli k záveru, že najvhodnejšie bude odstrániť desať atribútov odpovedajúcich

percentuálnemu zúženiu KC. Ponechali sme len atribút *Nalez*, ktorý je distribuovaný do šiestich kategórií. Pre potreby neskorších analýz sme si taktiež pripravili súbor dát, ktorého cieľový atribút má len dve triedy, pričom trieda 0 odpovedá zdravému pacientovi a trieda 1 reprezentuje pacientov s akýmkoľvek zúžením KC.

B. Preukázanie vplyvu atribútov sledovaného dátového súboru na závažnosť koronarografického nálezu

Zvolili sme postup zakladajúci sa na využití jednotlivých metód SU, ktoré okrem iných podstatných informácií poskytujú aj informácie o významnosti atribútov na základe vlastných metrick. Celú problematiku popisujeme v [20]. Prieskum publikácií zameraný na meranie vplyvu atribútov nás nasmeroval na algoritmy CART, RF a algoritmus LR.

V prvom cykle experimentov sme ponechali súbor, ktorý obsahoval iba dve triedy cieľového atribútu. Následne sme dátový súbor rozdelili v pomere 80:20 pre tréningovú a testovaciu množinu. Experimenty boli vykonávané nad tréningovou množinou využitím 10-násobnej krížovej validácie (NKV) s cieľom vyladenia parametrov jednotlivých algoritmov SU. Pre zachovanie jednotného charakteru vyhodnotenia výstupov sme využili knižnicu *caret*. Tvorba modelov bola zabezpečená jej funkciou *train*, získanie vyhodnotenia dôležitosti atribútov pre jednotlivé modely sme zabezpečili prostredníctvom funkcie *varImp*. Testovacia množina slúžila ako overenie výkonnosti toho ktorého modelu. Výkonnosť jednotlivých modelov sme posúdili na základe viacerých dostupných metrick, pričom ich prehľad a orientácia na určité špecifiká modelu poslúžili pre vytvorenie vlastnej metriky hodnotenia významnosti atribútov.

Prvým vytvoreným modelom bol CART model, pričom v súlade s metodológiou uplatňovanou pri tvorbe tohto modelu bol deliacim kritériom Gini index. Pri tvorbe modelu bol sledovaný parameter *cp* (z angl. complexity parameter), ktorého optimalizácia napomáha výberu modelu s maximálnou presnosťou krížovej validácie. V našom prípade sme na základe ladenia parametra *cp* (optimálne *cp* = 0,0236) získali presnosť 68,92%. V rámci modelu CART bolo trináť atribútov považovaných za významných, napriek tomu v konštrukcii modelu boli použité len štyri. Prehľad hodnotenia atribútov prezentujeme v súhrnnej **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** pre všetky vytvorené modely.

Rovnakým spôsobom sme sa zaoberali modelom RF. Jeho parametre boli taktiež odladené s cieľom získať čo najvyššiu presnosť modelu na tréningovej množine. Na základe ladenia parametrov (*mtry* = 8, *nree* = 350) sme sa dopracovali na tréningovej množine k presnosti 71.57%. Prehľad dôležitosti sledovaných parametrov opäť prezentujeme v súhrnnej **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** Na rozdiel od modelu CART, model RF hodnotí model širším rozsahom hodnôt, kde okrem kladných hodnôt prideluje premenným aj záporné hodnoty.

Posledným modelom, ktorým sme sa zaoberali pri skúmaní dôležitosti atribútov, je model LR. Podobne ako v predchádzajúcich prípadoch, aj tu sme sa zamerali na metriku presnosti, keďže našim cieľom nie je vysoká úspešnosť predikcie pozitívnych prípadov, ale skúmanie dôležitosti atribútov v rámci modelu ako celku. Presnosť, ktorú sme na

trénovacej množine získali, dosahovala hodnotu 76,51%. Prehľad dôležitosti atribútov je rovnako ako v prípade predošlých modelov, obsahom TABUĽKA II.

Nakoľko obsahom jedného z pod cieľa predkladanej práce je aj návrh vlastnej metriky na hodnotenie dôležitosti sledovaných premenných, pokladali sme za potrebné určiť aj vhodnosť jednotlivých modelov na základe matice zámen (TABUĽKA I).

TABUĽKA I POROVNANIE VÝKONNOSTI MODELOV CART, RF A LR

	CART	RF	LR
Počet pozitívnych prípadov (trieda 0)	62		
Počet negatívnych prípadov (trieda 1)	99		
Prevalencia	38,51%		
Počet predikovaných pozitívnych prípadov	30	48	62
Počet predikovaných negatívnych prípadov	131	113	99
TP (True Positive)	21	32	37
FP (False Positive)	9	16	25
FN (False Negative)	41	30	25
TN (True Negative)	90	83	74
Presnosť	68,94%	71,42%	68,94%
PPV (Positive predictive value)	70%	66,67%	59,68%
NPV (Negative predictive value)	68,70%	73,45%	74,75%
FOR (False omission rate)	31,30%	26,55%	25,25%
FDR (False discovery rate)	30%	33,33%	40,32%
F1 skóre	0,4565	0,5818	0,5968
TPR (True positive rate), Senzitivita	33,87%	51,61%	59,68%
TNR (True negative rate), Špecificita	90,91%	83,83%	74,75%
FPR (False positive rate)	9,09%	16,16%	25,25%
FNR (False negative rate)	66,13%	48,39%	40,32%
LRa+ (Positive likelihood ratio)	3,7258	3,1935	2,3632
LRa- (Negative likelihood ration)	0,7274	0,5771	0,5395
Informedness	0,2478	0,3545	0,3442
Markedness	0,3870	0,4012	0,3442
MCC (Matthews correlation coefficient)	0,3097	0,3771	0,3442
DOR (Diagnostics odds ratio)	5,1220	5,5333	4,3808

Z uvedenej tabuľky vyplýva, že jednotlivé modely sú pomerne vyrovnané. Nie je možné jednoznačne povedať, ktorý z modelov je najlepší. Najčastejšie hodnotenými metrikami sú presnosť, F1 skóre, senzitivita a špecificita. Najpresnejším modelom sa javí model RF (presnosť_{RF} = 71,42%), nasledovaný modelom CART a LR (presnosť_{CART, LR} = 68,94%). Z hľadiska miery F1 skóre bol najúspešnejším model LR (F1_{LR} = 0,5968), nasledovaný modelom RF (F1_{RF} = 0,5818) a modelom CART (F1_{CART} = 0,4565). Hodnota senzitivity, teda miera správne klasifikovaných pozitívnych prípadov (v kontexte pozorovaného datasetu s VÚSCHu odpovedá pozitívna trieda absencie KN), uprednostňuje model LR (senzitivita_{LR} = 59,68%), pred modelom RF (senzitivita_{RF} = 51,61%). Za nimi výrazne zaostáva model CART (senzitivita_{CART} = 33,87%). Naopak, miera správne klasifikovaných negatívnych prípadov (v kontexte pozorovaného datasetu s VÚSCHu odpovedá negatívna trieda prítomnosti akéhokoľvek KN), teda špecificita, dáva model CART do popredia (špecificita_{CART} = 90,91%) pred modelmi RF (špecificita_{RF} = 83,83%) a LR (špecificita_{LR} =

TABUĽKA II DÔLEŽITOSŤ ATRIBÚTOV NA ZÁKLADE VÝSTUPU MODELOV CART, RF A LR A METRIKY VAMDA

Atribúty	CART		RF		LR		VAMDA	
	VICART	Por.CART	VIRF	Por. RF	VILR	Por. LR	VIVAMDA	Por.VAMDA
ESC	27.4563	4	9.1835	2	2.179	9	0.5343	3

74,75%). Úspešnosť správnej klasifikácie prípadov hodnotíme taktiež podľa mier PPV a NPV. V prípade hodnôt PPV sa model CART javí ako najschopnejší (PPV_{CART} = 70%), nasledovaný modelmi RF (PPV_{RF} = 66,67%) a LR (PPV_{LR} = 59,68%). Pre hodnoty NPV je poradie opačné (NPV_{LR} = 74,75%; NPV_{RF} = 73,45%; NPV_{CART} = 68,70%). Kvalitu modelov je možné hodnotiť aj na základe ich informovanosti o rozložení pozitívnych a negatívnych tried pozorovaných dát a taktiež podľa úrovne spoľahlivosti modelu z hľadiska klasifikácie hodnôt. Na tieto hodnotenia sa zameriavajú metriky Informedness a Markedness. Z hľadiska oboch uvedených mier je najlepšie hodnoteným modelom RF (Informedness_{RF} = 0,3545; Markedness_{RF} = 0,4012) pred modelmi CART (Informedness_{CART} = 0,2478; Markedness_{CART} = 0,3870) a LR (Informedness_{LR} = 0,3442; Markedness_{LR} = 0,3442). Zaujímavou mierou je MCC. Chicco a Jurman [21] dokonca uvádzajú, že v prípade nevyvážených súborov dát je vhodnejší ako „klasické“ miery úspešnosti. Túto podmienku skúmaný dátový súbor spĺňa, nakoľko miera absencie KN je 38,51% oproti 61,49% miere prítomnosti akéhokoľvek KN. Práve tento nepomer je v rámci koeficientu MCC pri binárnej klasifikácii zohľadnený a na základe neho sa model RF (MCC_{RF} = 0,3771) radí pred modely LR (MCC_{LR} = 0,3442) a CART (MCC_{CART} = 0,3097). Posledným hodnotiacim kritériom je DOR. V prípade tejto metriky sa pozerá len na to, aby jej hodnota bola nad úrovňou jednej, čo všetky tri modely spĺňajú (DOR_{RF} = 5,5333; DOR_{CART} = 5,1220; DOR_{LR} = 4,3808). Hodnota DOR nehovorí o sile modelu, ale skôr o jeho funkčnosti.

Na základe uvedených metrick pre jednotlivé modely vyplýva, že každý z vytvorených modelov má svoje silné, ale aj slabšie stránky, ktorými sa modely vzájomne dopĺňajú. Preto považujeme za potrebné zohľadniť vplyv všetkých troch modelov v konečnom premietnutí dôležitosti sledovaných atribútov. Zvolili sme výber metrick presnosti, senzitivity a špecificity ako odraz celkovej presnosti klasifikácie, miery správne klasifikovaných pozitívnych aj negatívnych prípadov, pričom vo voľbe jednotlivých metrick sa odráža silná stránka každého z vytvorených modelov. Tento výber sa uplatňuje pri tvorbe vlastnej metriky hodnotenia vplyvu sledovaných atribútov, ktorú sme nazvali Váženou aglomeratívnou metriku dôležitosti atribútov (VAMDA). Výber metrick presnosti, senzitivity a špecificity sa v novovytvorenej metrike odzrkadľuje ako súčin. Matematický zápis metriky VAMDA je nasledovný:

$$VAMDA = \sum_{i=CART,RF,LR} norm(VI_i) * Acc_i * Sens_i * Spec_i,$$

kde $norm(VI_i)$ odpovedá normalizovaným hodnotám dôležitosti atribútov získaných z jednotlivých modelov, Acc_i je hodnotou presnosti jednotlivých modelov, $Sens_i$ je hodnotou senzitivity jednotlivých modelov a $Spec_i$ je hodnotou špecificity jednotlivých modelov. Hodnoty dôležitosti atribútov boli normalizované pomocou min-max normalizácie. Výstup na základe metriky VAMDA taktiež prezentujeme v TABUĽKA II.

Vek	9.2887	7	4.3432	5	3.8243	2	0.3970	5
Pohlavie	38.9403	1	5.4696	3	3.7910	3	0.5858	2
R_ICHS	0	-	0.2077	32	0.9193	32	0.0876	31
R_CMP	0	-	0.4146	26	1.8694	12	0.1427	22
R_IM	0	-	1.9323	12	1.7917	14	0.1777	12
R_Hyperchol	0	-	0	33	0	50	0.0342	47
R_Hypertenzia	0	-	-1.3286	50	0.6542	44	0.0342	48
R_DM	0	-	-0.5568	41	0.0026	49	0.0199	50
R_AoS	0	-	0	33	0	50	0.0342	47
O_ICHS	35.8718	2	4.335	6	1.6291	19	0.4266	4
O_CMP	0	-	-0.1003	35	2.1731	10	0.1454	21
O_IM	23.1907	5	4.6572	4	0.9477	31	0.3300	6
O_Hyperchol	0	-	0.4980	23	0.5375	46	0.0751	38
O_Hypertenzia	0	-	-1.2422	49	0.7267	42	0.0402	46
O_DM	0	-	0.3978	27	2.2989	7	0.1648	16
O_AoS	0	-	1.272	17	1.0917	28	0.1240	24
Fajcenie	0	-	1.7714	13	1.8538	13	0.1768	14
F_Doba	0	-	-0.2764	37	1.4324	23	0.1020	29
F_Pocet	0	-	0.4391	25	0.8313	34	0.0889	30
Alkohol	0	-	-0.9126	46	1.2303	26	0.0751	37
Vaha	0	-	0.3448	29	1.2563	24	0.1088	25
Vyska	0	-	1.3322	15	1.7671	15	0.1610	18
BMI	0	-	2.0448	10	1.4493	22	0.1627	17
Tlak	6.1589	8	0.2921	30	1.4591	21	0.1516	20
Urea	0	-	-0.8061	43	0.9670	30	0.0640	41
Kreat	0	-	0.2689	31	1.7142	16	0.1309	23
AST	0	-	-0.4358	39	0.7823	37	0.0639	42
Na	3.5982	11	1.3828	14	1.9578	11	0.1919	11
K	0	-	-1.0540	47	0.6576	43	0.0414	45
Chol	0	-	0.3651	28	0.5565	45	0.0726	39
Trig	3.4221	12	-1.1236	48	0.7419	41	0.0627	43
HDL	0	-	1.2960	16	1.6749	18	0.1552	19
LDL	0	-	-0.8406	44	0.1873	48	0.0222	49
CRP	0	-	0.8448	20	0.9739	29	0.1069	27
CL	3.8274	10	3.1369	7	0.8001	35	0.1776	13
FBG	0	-	2.0364	11	1.6987	17	0.1755	15
HIV	0	-	0	33	0	50	0.0342	47
HBsAG	0	-	0	33	0	50	0.0342	47
EKG_FR	0	-	-0.0269	34	0.7988	36	0.0752	36
EKG_Rytmus	0	-	2.0886	9	2.6793	4	0.2283	8
EKG_PQ	3.2619	13	0.4401	24	0.7503	39	0.1025	28
EKG_QRS	4.7327	9	0.7525	21	2.5476	6	0.2128	9
EKG_QT	0	-	-0.2473	36	1.5298	20	0.1079	26
EKG_BLTR	0	-	0	33	0	50	0.0342	47
EKG_BPTR	0	-	0.523	22	0.7434	40	0.0865	32
EKG_KES	0	-	-0.7926	42	1.2421	25	0.0788	34
EKG_SVES	0	-	-0.4026	38	1.1705	27	0.0851	33
EKG_STD	0	-	1.2300	18	0.2054	47	0.0765	35
EKG_STE	29.2528	3	10.6827	1	5.8683	1	0.7761	1
EKG_T	0	-	-0.4868	40	0.9166	33	0.0696	40
ECHO_EF	16.8490	6	2.1336	8	2.2466	8	0.2986	7
ECHO_PH	0	-	0.8875	19	2.6073	5	0.1936	10
SV_mostik	0	-	-0.8668	45	0.7540	38	0.0513	44

V prvej polovici poradia atribútov sa objavilo mnoho takých, ktoré sú považované všeobecne za významné. Ide o atribúty veku, pohlavia, osobnej anamnézy súvisiacej s infarktom myokardu, ischemickej choroby srdca, či diabetes mellitus II. typu, EKG rytmu, fajčenia, BMI, alebo systolického tlaku [22] [23]. Prekvapivo pomerne vysoko sa objavili aj atribúty, ktoré z hľadiska aterosklerózy KC nie sú až tak významné, resp. sú menej známe ako rizikové faktory aterosklerózy. Menovite ide o atribúty sodíka (Na), chlóru (CL), fibrinogénu (FBG), či HDL cholesterolu. Práve tieto atribúty boli aj medicínskym expertom označené za potenciálne zaujímavé a preto sme ďalej pristúpili k overeniu ich dôležitosti.

C. Verifikácia existencie nových rizikových faktorov pre subklinickú aterosklerózu

Umiestnenie niektorých atribútov v prvej polovici poradia bolo prekvapivé. Preskúmanie vplyvu týchto atribútov v rámci skúmaného dátového súboru bolo teda logickým dôsledkom s cieľom naplniť stanovený pod cieľ predkladanej práce. Na základe konzultácie s doménovým expertom sme sa orientovali najmä na atribút FBG, do nasledujúcich analýz sme však zahrnuli aj zvyšné atribúty uvedené v závere predchádzajúcej časti: HDL, Na a Cl.

V prvom rade sme sa pozreli na ich korelačné vzťahy navzájom, kde zahrnieme aj atribút popisujúci KN. Výstup korelačnej matice naznačuje, že vzťahy medzi jednotlivými atribútmi nie sú korelované, pričom na zvolenej hladine významnosti $\alpha = 0.05$ pre Pearsonov korelačný test je možné za štatisticky významné vzťahy považovať len tieto dva:

1. medzi fibrinogénom (FBG) a KN ($r = 0.11$, $p = 0.0012$);
2. medzi sodíkom (Na) a chlóróm (CL) ($r = 0.08$, $p = 0.0165$).

Na základe hodnoty korelačného koeficientu r sú však tieto atribúty len veľmi slabó korelované.

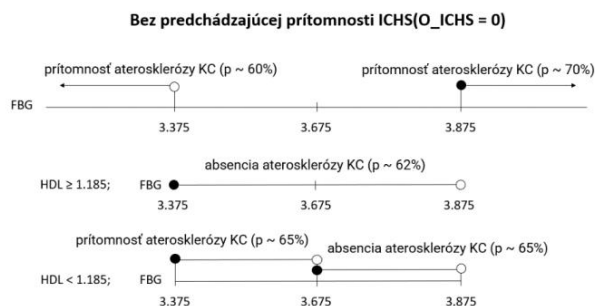
Taktiež sme sa na závislosť jednotlivých atribútov k cieľovému atribútu KN pozreli z hľadiska výsledkov Kruskal-Walis (KW) testu (neparametrická verzia ANOVA testu z dôvodu absencie normálneho rozdelenia dát). KW test preukázal významný vzťah medzi atribútmi FBG – Nalez ($p = 0.0002$), HDL – Nalez ($p = 0.0003$) a Na – Nalez ($p = 1.8 \times 10^{-5}$) na hladine významnosti $\alpha = 0.05$, teda pre jednotlivé hodnoty KN je významná variácia hodnôt FBG, HDL aj Na.

Nakoľko je pre nás v tejto fáze dôležité smerovať pozornosť na údaje odpovedajúce prítomnosti aterosklerózy na KC (v kontexte dátového súboru ide o negatívnu triedu), vyberieme pre tento účel model CART, ktorého hodnota špecificity, miera správne klasifikovaných negatívnych prípadov, bola najvyššia.

Dátový súbor sme ponechali v tvare, ako bol pripravený na predchádzajúcu tvorbu modelov, špecifikovali sme však atribúty, ktoré majú byť použité pri konštrukcii výsledného modelu a sledovali sme úspešnosť klasifikácie na testovacej množine a určenie hraničných hodnôt jednotlivých atribútov. Tradičné rizikové faktory boli vynechané z toho dôvodu, aby sa nepreukázala ich sila, čo by malo za následok potlačenie potencionálnej sily skúmaných atribútov vzhľadom ku záverom KN. Špecifikácia atribútov pre tvorbu modelov bola konzultovaná s doménovým expertom, pričom nie každá kombinácia vykazovala významné, prípadne použiteľné výsledky. Výstupy vykonaných experimentov je možné nájsť v publikácii [20].

Z nášho pohľadu bol v rámci tejto fázy experimentov najzaujímavejší výstup kombinácie *Koronarografický nález ~ O_ICHS + FBG + HDL*. Kombinácia atribútov FBG, HDL a záznamu o osobnej anamnéze ischemickej choroby srdca (ICHS) bola volená na základe neurčitých tvrdení štúdií ohľadom vplyvu HDL cholesterolu na aterosklerózu KC. Posledných 50 rokov bola pozorovaná súvislosť medzi koncentráciou HDL cholesterolu a kardiovaskulárnym rizikom. Randomizované štúdie za posledných 13 rokov však naznačujú, že zvýšená koncentrácia HDL cholesterolu v krvi nemá potenciál stať sa významnou v prevencii KVO [24]. Štúdie zamerané na skúmanie vzťahu FBG a HDL v nadväznosti na KVR doposiaľ neboli publikované. Jedinou menšou štúdiou skúmajúcou vzťah medzi glykovaným hemoglobínom (HbA(1c)), FBG a HDL cholesterolom na KVO vo vzťahu k diabetes mellitus II. typu sa potvrdil vzťah medzi HbA(1c) – FBG a medzi HDL – FBG, pričom významné boli len pri pacientoch s pozitívnou anamnézou KVO [25].

Postavením modelu na troch atribútoch (O_ICHS, FBG a HDL) sa na základe hodnotenia významnosti atribútov javí ako najdôležitejší práve FBG (21.71), nasledovaný HDL (14.20) a O_ICHS (13.99). V prípade, že pacient doposiaľ nemal diagnostikovanú ICCHS a hladina FBG bola nad úrovňou 3.875 g/l, pravdepodobnosť, že KN bude pozitívny, bola vyššia než 70%. Len o niečo nižšia (približne 60%) bola pravdepodobnosť pozitívneho KN v prípade, že FBG bol pod úrovňou 3.375 g/l. Hladiny FBG v intervale $<3.375; 3.875$) určovali pravdepodobnosť KN na základe koncentrácie HDL cholesterolu. Rozdelenie záverov je znázornené na Obrázok 10, pričom pri vyššej hladine HDL (nad 1.185 mmol/l) a hladine FBG v intervale $<3.375; 3.875$), pravdepodobnosť negatívneho nálezu koronarografie bola približne 62%. Pri nižšej hladine HDL (pod 1.185 mmol/l) a spodnom pozorovanom intervale FBG $< 3.375 ; 3.675$) bola pravdepodobnosť prítomnosti aterosklerózy KC, teda pozitívneho KN, okolo 65%. Rovnaká približná hodnota pravdepodobnosti, avšak pre absenciu aterosklerózy KC, bola pre horný pozorovaný interval hladiny FBG $<3.675; 3.875$). Pre jednoduchšiu vizualizáciu uvedeného textu pripájame OBRÁZOK I.



OBRÁZOK I ROZLOŽENIA HODNÔT FBG A HDL DO INTERVALOV S PŘIBLIŽNÝM PERCENTUÁLNÝM VYJADRENÍM KLASIFIKÁCIE DO JEDNOTLIVÝCH TRIED KN

Čo sa týka úspešnosti modelu, z hľadiska presnosti sme na testovacej množine dosiahli 69.57% presnosť, špecificita modelu bola na úrovni 83.84%. Vytvorený model naznačuje, že môže existovať spojitosť medzi hladinou FBG a HDL a ich účinku na KVR. Nevieime však určiť významnosť tohto spojenia, prípadne prítomnosť kolinearit atribútov FBG a HDL ku závažnosti KN.

K posúdeniu významnosti skúmaného vzťahu sme zopakovali experimenty na dátovej množine obsahujúcej všetkých šesť tried KN.

Najskôr sa zameriame na samotný FBG a jeho vplyv na závažnosť KN. Samotný FBG nemá výrazný vplyv na závažnosť KN, avšak výsledky KW testu preukazujú istú závislosť ($p = 0.0033$) na hladine významnosti $\alpha = 0.05$. Následne pomocou párového Wilcoxonovho testu (neparametrická verzia Tukeyho testu) dokážeme určiť, medzi ktorými dvojicami tried KN existuje významný rozdiel na základe hodnôt atribútu FBG. Významne významné rozdiely na základe p hodnoty pre hladinu významnosti $\alpha = 0.05$ je možné pozorovať medzi absenciou KN a tretím, respektíve štvrtým stupňom závažnosti KN. Medzi ostatnými dvojicami KN nie sú v podmienkach nami pozorovaných údajov žiadne významné

rozdielely medzi jednotlivými závažnosťami KN z hľadiska hodnôt FBG.

Obohatenie kombinácie FBG a O_ICHS o HDL prinieslo rozdelenie jednotlivých atribútov na viacero intervalov. Natrénovaný model rozdelil množinu dát na dve veľké skupiny. Prvá skupina, oddelená na základe parametra O_ICHS = 0 (teda absencia predchádzajúcej prítomnosti ICHS), klasifikovala väčšinu pacientov bez KN. Druhá skupina spadala pod hlavičku potvrdennej predchádzajúcej diagnózy ICHS a určenie závažnosti KN sa odvíjalo od spomínaných intervalov FBG a HDL.

Vyššie hladiny HDL by mali mať kardioprotektívny účinok. Samotná koncentrácia HDL však v podmienkach vytvoreného modelu nemá výrazný súvis so závažnosťou KN. V spojení s hladinami FBG je možné odpozorovať určité javy. Začnime od spodných intervalov pre HDL a vrchných intervalov pre FBG. Je zjavné, že väčšina pacientov odpovedajúca daným hodnotám FBG a HDL má závažnejší KN, avšak mierne zníženie hladín FBG, prípadné zvýšenie hladín HDL má za následok zmenu pomerov závažnosti KN. Následné zvyšovanie hladín HDL, pričom FBG ostáva rovnaký, ostávajú KN závažné, okrem intervalu hladín HDL <1.225 ; 1.365), kde je vyššia prevalencia absencie KN. Vysoké hladiny HDL nie sú úplne smerodajné, pokiaľ nevezmeme do úvahy aj hladiny FBG. Tu sa zdá, že napriek vyšším hladinám HDL pri vysokých, ale aj nízkych hladinách FBG, sú KN závažnejšie. Rovnako príliš nízke hladiny FBG bez ohľadu na hladiny HDL nie sú pravdepodobne úplne najvhodnejšie, avšak na hladine FBG v intervale <3.2 ; 3.345) sa ukazuje zvýšenie HDL ako účinné.

Pre úplnosť aj vzťah HDL a KN sme podrobili párovému Wilcoxonmu test, kde sa významne rozdiel preukázal medzi nasledovnými triedami KN: 0-4 ($p = 0.0102$); 0-5 ($p = 0.0003$); 1-5 ($p = 0.0068$) a 2-5 ($p = 0.0478$). Z toho teda môžeme usudzovať, že hodnoty HDL dokážu významne určiť rozdielnosť medzi KN s nižšou závažnosťou a KN s vysokou závažnosťou.

Z uvedeného teda môžeme vyvodit' záver, že ani príliš nízke ani príliš vysoké hladiny HDL a FBG nie sú z hľadiska závažnosti KN najvhodnejšie. Je potrebné medzi nimi nájsť určitý balans v zmysle určenia hraničných hodnôt, ktorý by mohol byť predmetom skúmania ďalších randomizovaných štúdií.

Na základe výsledkov rozloženia hodnôt FBG vzhľadom ku KN v modeli CART a rovnako aj na základe KW testu a párového Wilcoxonovho testu môžeme tvrdiť, že vo vzťahu medzi FBG a zvýšeným KVR v podobe závažnosti KN existuje významná závislosť. Rovnako významný vzťah sa preukazuje medzi hladinami HDL a závažnosťou KN. Z toho teda usudzujeme, že FBG potencionovaný silou dôkazov s inými parametrami (napr. HDL) môže byť významným prediktorom pri určovaní KVR. FBG má potenciál byť považovaný za zaujímavý rizikový faktor pri ateroskleróze, ale je potrebný ďalší výskum na väčších vzorkách pacientov, aby sa potvrdila jeho ekvivalencia s tradičnými rizikovými faktormi.

D. Diagnostické modely zamerané na koronarografický nález

Určenie významnosti sledovaných atribútov nedokáže správne klasifikovať samotných pacientov z hľadiska závažnosti KN. Dokáže však naviesť lekára ale aj pacienta, na určité opatrenia z hľadiska modifikovateľných rizikových faktorov aterosklerózy. V prípade že zdravotný stav pacienta indikuje určitý kardiiovaskulárny problém, nestačí sa zaoberať samotnými rizikovými faktormi, ale v tomto prípade je potrebné vykonať aj určité špecifické vyšetrenia. V prípade vytvorenia vhodných modelov zameraných na klasifikáciu pacientov z hľadiska absencie alebo prítomnosti KN vieme do určitej miery riziká spojené s vyšetrením SKG eliminovať. Dané modely by mali však len odporúčací charakter, konečné rozhodnutie by bolo na špecialistovi, ktorý posudzuje zdravotný stav pacienta.

K tvorbe diagnostických modelov sme využili výstup algoritmov na selekciu množiny atribútov. Na dátový súbor popísaný 54 atribútmi sme aplikovali metódy postupného dopredného výberu (FSS), spätnej eliminácie kandidátov (BSS) a regresnej metódy LASSO. Takto sme získali šesť dátových množín (pre FSS a BSS na základe kritérií *Adjusted Rsq*, *Mallow's Cp* a *BIC* 5 množín). Ďalšia množina bola vytvorená výberom 20 najlepšie hodnotených atribútov nami navrhnutou metrikou VAMDA. Posledná množina vznikla hlasovaním jednotlivých metód na selekciu množiny atribútov. Na pripravených osem množín údajov boli pomocou 10-NKV aplikované algoritmy CART, RF a LR. TABUĽKA III prezentuje priemerné dosiahnuté výsledky aplikácie metód SU na jednotlivých množinách atribútov.

TABUĽKA III PRIEMERNÉ HODNOTY VÝKONNOSTI MODELOV CART, RF, LR NAD JEDNOTLIVÝMI MNOŽINAMI VÝBERU ATRIBÚTOV

Priemerné hodnoty naprieč modelmi									
Množina	Presnosť _{train}	Presnosť _{test}	Senzitivita	Špecifita	TN	TP	FN	FP	AUC
FSS _{AR2}	70.84%	70.81%	48.92%	84.51%	84	30	32	15	0.667
FSS _{Cp}	70.22%	70.39%	47.85%	84.51%	84	30	32	15	0.662
F(B)SS _{BIC}	69.10%	72.44%	63.44%	78.12%	77	39	23	22	0.708
BSS _{AR2}	69.54%	70.60%	46.77%	85.52%	85	29	33	14	0.661
BSS _{Cp}	69.96%	69.15%	47.85%	82.49%	82	30	32	17	0.652
LASSO	70.27%	69.77%	46.77%	84.18%	83	29	33	16	0.655
Hlas.	70.57%	71.43%	51.08%	84.18%	83	32	30	16	0.676
VAMDA ₂₀	71.31%	68.74%	53.23%	78.45%	78	33	29	21	0.658
Pôvodná	70.58%	69.98%	48.39%	83.50%	83	30	32	16	0.659
CART	69.42%	69.56%	38.89%	88.78%	88	24	38	11	0.638
RF	69.72%	70.39%	50.36%	82.94%	82	31	31	17	0.666
LR	71.65%	71.14%	62.19%	76.77%	76	39	23	23	0.695

Priemerné hodnoty jednotlivých metrik indikujú, že najvhodnejším modelom v podmienkach skúmanej dátovej množiny sa z hľadiska presnosti, senzitivity a AUC hodnoty javí model LR. Z hľadiska špecificity je najvhodnejším modelom model CART. Čo sa týka priemernej úspešnosti modelov z hľadiska množín atribútov, najvyššiu priemernú presnosť, senzitivitu a AUC hodnotu zaznamenali modely vybudované na množine $F(B)SS_{BIC}$. Z hľadiska priemernej špecificity bola najvhodnejšou množinou BSS_{AR2} . Nakoľko sa zameriavame na triedu $KN = 1$, značiacu prítomnosť KN, podrobnejšej analýze podrobíme model CART vybudovaný na množine BSS_{AR2}

TABUĽKA IV MATICE ZÁMEN NAD MODELMI CART, RF A LR VYBUDOVANÝMI NAD VYBRANÝMI MNOŽINAMI VÝBERU ATRIBÚTOV

CART – BSS AR2			
Počet prípadov: 161	predikované pozitívne prípady: 30	predikované negatívne prípady: 131	Informovanosť: 0.2478
Pozitívne prípady: 62	TP: 21	FN: 41	Senzitivita: 9.09%
Negatívne prípady: 99	FP: 9	TN: 91	Špecificita: 90.91%
Miera označenia: 0.3870	PPV: 70.00%	NPV: 68.70%	AUC: 0.624
CART – FSS BIC			
Počet prípadov: 161	predikované pozitívne prípady: 54	predikované negatívne prípady: 107	Informovanosť: 0.3988
Pozitívne prípady: 62	TP: 36	FN: 26	Senzitivita: 58.06%
Negatívne prípady: 99	FP: 18	TN: 81	Špecificita: 81.81%
Miera označenia: 0.4237	PPV: 66.67%	NPV: 75.70%	AUC: 0.699
Random Forest – FSS BIC			
Počet prípadov: 161	predikované pozitívne prípady: 72	predikované negatívne prípady: 89	Informovanosť: 0.4006
Pozitívne prípady: 62	TP: 43	FN: 19	Senzitivita: 69.35%
Negatívne prípady: 99	FP: 29	TN: 70	Špecificita: 70.71%
Miera označenia: 0.3821	PPV: 59.72%	NPV: 78.65%	AUC: 0.700
Logistická regresia – FSS BIC			
Počet prípadov: 161	predikované pozitívne prípady: 57	predikované negatívne prípady: 104	Informovanosť: 0.4472
Pozitívne prípady: 62	TP: 39	FN: 23	Senzitivita: 62.90%
Negatívne prípady: 99	FP: 18	TN: 81	Špecificita: 81.81%
Miera označenia: 0.4631	PPV: 68.42%	NPV: 77.88%	AUC: 0.724

Uvedená tabuľka obsahuje množstvo informácií. Z hľadiska minimalizácie nadmerného absolvovania SKG vyšetrenia sa ako najlepší javí model RF (NPV = 78.65%), kde len niečo cez 22% pacientov absolvuje vyšetrenie navyše. Na druhej strane najmenej nezachytených pacientov, u ktorých je nutnosť dané vyšetrenie absolvovať, má model CART nad množinou atribútov BSS_{AR2} (PPV = 70.00%). Model CART a LR sa vyznačujú vysokou mierou zachytených pacientov s pozitívnym KN (bunky TN). O balanse medzi hodnotami PPV hovorí miera označenia. Tá bola najvyššia pre model LR (miera označenia = 0.4631). Z hľadiska hodnôt senzitivity a špecificity majú navrch modely RF (senzitivita = 69.35%) a CART nad množinou atribútov BSS_{AR2} (špecificita = 90.90%). Tieto hodnoty odkazujú na mieru správne zachytených prípadov. Dá sa teda povedať, že model RF lepšie zachytí pacientov, u ktorých nie je nutnosť podstúpiť SKG, naopak CART je úspešnejší pri zachytení pacientov, u ktorých je nutnosť SKG podstúpiť. Podobne ako pre hodnoty PPV a NPV, aj pre hodnoty špecificity a senzitivity existuje metrika, ktorá hodnotí akýsi balans medzi nimi. Ide o metriku informovanosti, ktorá bola opäť najvyššia pre model LR. Každopádne, z hľadiska benefitov pre pacienta je vždy lepšie, ak model zachytí vysoké percento pacientov, ktorí by mali vyšetrenie skutočne absolvovať (aj v prípade, že niekoľko pacientov podstúpi vyšetrenie navyše) – metrika špecificity a NPV. Z hľadiska šetrenia nákladov je výhodnejšia vysoká miera označenia pacientov, pre ktorých nie je nutnosť dané vyšetrenie absolvovať a zároveň je vysoká miera správne klasifikovaných pacientov bez KN – metrika senzitivity a PPV.

(najvyššia priemerná špecificita v rámci hodnotenia modelov bola zaznamenaná pre model CART).

Pozrime sa na hodnotenie jednotlivých modelov aj prostredníctvom matice zámen, ktorá poskytuje širšie spektrum informácií. Pre porovnanie sme vybrali štyri modely: tri modely na základe hodnôt AUC dosiahnutých implementáciou algoritmov CART, RF a LR na rôzne množiny atribútov (najvyššia hodnota AUC bola pre jednotlivé modely dosiahnutá vždy nad množinou $F(B)SS_{BIC}$) a model CART nad množinou BSS_{AR2} .

O všetky uvedené metriky sa zaujíma MCC. Tento koeficient dosahuje najvyššiu hodnotu pre jednotlivé modely v poradí LR (0.4551), CART pre FSS_{BIC} (0.4111), RF (0.3921) a CART nad BSS_{AR2} (0.3097). Jednoznačne určiť najvhodnejší model je teda pomerne náročné, nakoľko závisí aj od hľadiska, z ktorého model hodnotíme. Poskytuje však akúsi sumarizáciu toho, pre ktorý prípad je ktorý model najvhodnejší:

- zachytenie čo najvyššieho počtu pacientov, u ktorých je potrebné vykonanie SKG – CART nad BSS_{AR2} ;
- minimalizácia čo najväčšej miery nadbytočného absolvovania SKG, šetrenie nákladov – RF;
- zachytenie čo najvyššieho počtu pacientov, u ktorých nie je potrebné vykonanie SKG - CART nad BSS_{AR2} ;
- balans medzi horeuvedenými prípadmi – LR.

E. Modely faktorovej analýzy so zameraním na pochopenie vzťahov medzi sledovanými atribútmi

Popisu experimentov orientujúcich sa na FA sme sa venovali v publikácii [15]. Výsledky prezentované v popisovanej práci sú mierne odlišné, nakoľko spracovanie súboru sme prispôbili vyššie prezentovaným experimentom.

Prvým krokom pred samotnou aplikáciou FA bolo posúdenie vhodnosti dátového súboru pomocou Kaiser-Mayer-

Olkin (KMO) metriky a miery primeranosti vzoriek (MSA, z angl. Measure of Sampling Adequacy). V prípade metriky KMO je skúmaný dátový súbor vhodný pre aplikáciu FA. Metrika MSA poukazuje na atribúty, ktoré však nie sú vhodné (MSA pre jednotlivé atribúty je pod 0.5). Tieto atribúty (*Vaha, Vyska, BMI, AST, Na, Chol, EKG_SVES, SV_mostik a Tlak*) sme z nasledujúcich experimentov vylúčili.

Nasledujúcim krokom bolo určenie počtu faktorov. Na základe grafickej metódy Scree testu bolo odporúčané vytvoriť model so štyrmi faktormi. Dataset by mal podľa empirického Kaiserovho kritéria poskytovať základ pre 18 faktorov a podľa tradičného Kaiserovho kritéria 17 faktorov. Paralelná analýza odporúčala 19 resp. 12 faktorov. Tieto odporúčania sú však len orientačné. Využitím rotácie Varimax aj Oblimin bol pre dátový súbor vytvorený šesťfaktorový model, pričom sme v rámci tvorby modelu brali do úvahy hodnoty faktorových záťažů, či väzbu iba jednej záťaže na vytvorení faktor. Prehľad vytvorených modelov prezentujeme v TABULKA V.

TABULKA V PREHLAD FAKTOROV A ICH FAKTOROVÝCH ZÁŤAŽÍ (6-FAKTOROVÝ MODEL) PRE ROTÁCIE OSÍ VARIMAX A OBLIMIN

Faktor	SS loadings (DS s KN)	Faktorové záťaže
Rotácia Varimax		
1	1.5	Urea, FBG, EKG_Rytmus, ECHO_PH, Kreat, ECHO_EF, EKG_FR
2	2.06	Fajcenie, F_Pocet, F_Doba, Pohlavie, Alkohol
3	1.77	R_ICHS, R_IM
4	1.85	O_IM, O_ICHS, Nalez, O_CMP, P_DM
5	1.08	EKG_QRS, EKG_BPTR, EKG_PQ
6	1.17	Vek, ESC
Rotácia Oblimin		
1	1.36	FBG, Urea, EKG_Rytmus, Kreat, EKG_FR
2	2.03	Fajcenie, F_Pocet, F_Doba, Pohlavie, Alkohol
3	1.77	R_ICHS, R_IM
4	1.83	O_IM, O_ICHS, O_CMP
5	1.14	EKG_QRS, ECHO_EF, EKG_BPTR
6	1.28	Vek, ESC, EKQ_PQ, Nalez

Najdôležitejším faktorom v šesťfaktorového modelu využívajú rotáciu Varimax bol faktor odpovedajúci zlozvykom človeka (Faktor 2). Zlozvyky týkajúce sa fajčenia a pitia alkoholu sú celkovo považované za významné modifikovateľné rizikové faktory, čo potvrdzujú závery viacerých štúdií [26][27][28][29]. Rovnako závažným, ak nie ešte významnejším, je pohlavie pacienta. Tsai s kolektívom označujú pohlavie pacienta za signifikantný rizikový faktor [22]. Rovnako zostrojený faktor bol vytvorený pre dátový súbor bez KN. Druhým najvýznamnejším faktorom bol faktor odpovedajúci osobnej anamnéze pacienta (Faktor 4). Rovnako ako zlozvyky človeka, aj osobná anamnéza KVO je považovaná za významnú vo vzťahu ku ateroskleróze [30][31]. Obdobou osobnej anamnézy je rodinná anamnéza (Faktor 3). Štúdie posudzujúce dátový súbor nie len hľadiska KVO na základe aplikácie FA, považujú rodinnú predispozíciu za významný faktor [27][28]. Výsledky klinických vyšetrení obsahujúce renálne parametre (Urea, FBG a Kreat) v spojení s ECHO vyšetrením, frekvenciou srdca a srdcovým rytmom boli zlúčené pod Faktor 1. Samotnému FBG sme sa venovali aj my v predchádzajúcich experimentoch. Výsledky odzrkadľujúce sa v tomto faktore naznačujú možnú významnosť FBG vo vzťahu ku ateroskleróze. Podľa Guptu a

jeho výskumného tímu [32], biomarkery zápalu sú nepriamo spojené s mierami funkcie obličiek. Výsledkom ich analýz bolo, že pacienti s akútnym alebo chronickým zápalom obličiek majú zvýšené kardiovaskulárne riziko. V rámci svojej štúdie okrem iných pracovali aj s atribútmi popisujúcimi hladiny FBG a kreatinínu. Urea bola posudzovaná zasa ako záťaž na metabolický faktor [22]. V poradí ďalším významným faktorom je Faktor 6 tvorený atribútmi Vek a ESC. Tento faktor možno označiť ako Faktor kardiovaskulárneho rizika, nakoľko vek je významným rizikovým faktorom aterosklerózy a atribút ESC popisuje kardiovaskulárne riziko pacienta v priebehu najbližších desiatich rokov. Posledným faktorom z hľadiska jeho významnosti v rámci modelu bol Faktor 5 popisujúci EKG vyšetrenie. Štúdie s veľkou populáciou pacientov vyvodzujúce významnosť vzťahov medzi atribútmi viazanými na tento faktor neboli doposiaľ publikované. Niektoré klinické štúdie skúmali vzťah medzi systolickou funkciou ľavej predsiene a blokádu pravého Tawarového ramienka (EKG_BPTR) u pacientov po IM [33].

Výsledky za použitia rotácie Oblimin boli takmer identické. Drobné rozdiely vznikli v premiestnení niektorých atribútov, základ však ostal veľmi podobný.

F. Vyhodnotenie a diskusia k experimentom

Ďalším uvažovaným parametrom pre hodnotenie KVR je HDL cholesterol. Výskum kolektívu autorov v okolí Wanga [34] poukazuje na nepriamu spojitosť s KVR. Ako uvádzajú, FHS bola prvou štúdiou, ktorá preukázala silnú inverznú spojitosť medzi koncentráciou HDL cholesterolu a prevalenciou koronárnej choroby srdca. Následne sa uskutočnilo niekoľko štúdií na zvieratách, kde bol preukázaný pozitívny vplyv zvýšenej hladiny HDL cholesterolu vo vzťahu k riziku aterosklerózy. Wang a kol. však uvádzajú, že ľudská genetická analýza priniesla skepticizmus ohľadom dôležitosti HDL cholesterolu. Štúdia zameraná na efekt HDL terapeutickéj intervencie vzhľadom k nástupu koronárnej choroby srdca poukazuje na neistú príčinnú súvislosť medzi HDL cholesterolom a aterosklerózou [35]. Pappa a kol. [36] uvádzajú, že HDL nemožno považovať za robustný marker KVR, avšak poukazujú na to, že objasnenie celého komplexu HDL systému umožní vývoj akejkoľvek HDL terapie. Objasnenie komplexného systému fungovania HDL nemusí znamenať len pochopenie jeho pôsobenia v ľudskom tele do posledných detailov, môže to naznačovať aj jeho kooperáciu s inými markermi. Naše závery ohľadom sily FBG a HDL cholesterolu vo vzťahu k KVR potvrdzuje výskum Zhanga a kol. [37]. Svoju pozornosť zamerali na trojicu markerov, FBG, HDL cholesterolu a lipoproteínu. Výsledky ich multivariantnej analýzy naznačujú, že skúmané markery môžu byť nezávislými prediktormi cievej kalcifikácie. Výskum uzatvárajú tvrdením, že FBG je silnejším prediktorom aterosklerózy ako HDL cholesterol a lipoproteín. V našom prípade však FBG nevykazoval takú silu. Zistili sme, že skupina pacientov so zvýšenou hladinou FBG a HDL cholesterolu mala zvýšené KVR. Podobne to bolo aj s nízkymi hladinami FBG a HDL cholesterolu. Vyššie hladiny FBG a zároveň nižšie hladiny HDL však preukázali významnú koreláciu so zvýšeným KVR. V skúmanej skupine pacientov (vysoká hladina FBG a nižšia HDL) prevládala skupina pacientov s absenciou pozitívneho KN.

Samotné skúmanie jednotlivých atribútov je z nášho pohľadu prínosným krokom v rámci včasnej diagnostiky KVO. Samotná diagnostika sa však nezakladá len na pozorovaní významnosti jednotlivých markerov, respektíve rizikových faktorov. Častokrát za vznikom a rozvojom ochorenia stojí súhra viacerých faktorov. Pochopením vplyvu, kooperácie a vzťahov medzi faktormi je možné odhaliť ďalšie súvislosti vedúce k nástupu, či rozvoju ochorenia. Pre tento účel sme sa v rámci nášho výskumu zameriavali na použitie FA. Vyhodnotenie výsledkov experimentov FA sme popísali v predchádzajúcej časti uvádzanej kapitoly. Tu už iba zosumarizujeme, že výstupom experimentov bol šesť faktorový model deliaci atribúty do skupín popisujúcich zlozvyky pacientov, osobné anamnézu pacienta, rodinná anamnéza pacienta, renálne parametre spolu s ECHO a EKG vyšetrením, samostatne EKG vyšetrenie a faktor KVR. Skúmané faktorové záťažce na jednotlivé faktory do značnej miery odpovedajú známym záverom skôr uskutočnených štúdií [22][23][27][30][31][32][38][39]. Niektoré z faktorových záťažcí (napríklad viackrát spomínaný FBG alebo blokáda ľavého Tawarového ramienka) naznačovali existenciu vzťahov s inými atribútmi, ktoré doposiaľ neboli preukázané ako značne významné. Tejto problematike sme sa taktiež venovali aj my v rámci predchádzajúcich experimentov zameraných na vplyv atribútov vzhľadom k závažnosti KN.

Celková medicínska diagnostika sa nezakladá len na pozorovaní vplyvu a vzťahov medzi atribútmi, častokrát je jej súčasťou aj tvorba modelov určených k špecifickému cieľu. Z pohľadu predkladanej práce sme sa zameriavali na tvorbu diagnostických modelov pre potreby vykonania SKG. V závere experimentov sme poukázali na viacero uhlov pohľadu, kedy je ktorý z vytvorených modelov relevantný. Podobnej problematike sa venuje viacero vedcov. Príkladom je štúdia [40] pracujúca s dátovým súborom orientujúcim sa na detekciu KVO. Autori štúdie skúmali dátový súbor pomocou korelačnej analýzy, Gini indexu, informačného zisku a pomerového informačného zisku. Následne bol súbor pacientov, rozdelený pomocou krížovej validácie a taktiež na tréningovú a testovaciu množinu, postúpený do modelovacej fázy. Autori štúdie použili deväť algoritmov SU, kNN, NB, rozhodovací strom (RS), LR, indukcia pravidiel, GBT, lineárny model, hlboké učenie a RF. Výsledky experimentov hodnotili pomocou ROC kriviek a AUC hodnôt, presnosti, špecificity, senzitivity a hodnoty PPV. Najlepšie výsledky dosiahol model RS (75.82% presnosť), pričom celkovo boli výsledky jednotlivých modelov značne porovnateľné ($\pm 70\%$ presnosť). Autori štúdie na záver uvádzajú, že takéto výsledky nie sú dostatočné na implementáciu v klinickej praxi. Podobné výsledky sme v rámci nami vykonaných experimentov dosiahli taktiež, avšak tieto výsledky majú vždy iba odporúčací charakter, pričom zameranie sa na ďalšie metriky, napríklad špecificita, poukazuje na cielenejšie zameranie jednotlivých modelov.

Predikciu KVR športovcov v Chorvátsku sa zaoberala štúdia [41]. Na skúmaný dátový súbor nasadili autori štúdie pomocou nástroja WEKA algoritmus RS a LR v dvoch fázach. Prvá fáza prebiehala na celom dátovom súbore bez akýchkoľvek úprav hodnôt atribútov. Druhá fáza nasadenia algoritmov bola uskutočnená po vytvorení diskretných hodnôt pulzovej frekvencie. Modely vyhodnocovali pomocou hodnôt senzitivity,

špecificity a AUC. Zavedenie diskretných hodnôt pulzovej frekvencie sa ukázalo ako významný krok, nakoľko v rámci oboch modelov došlo k ich zlepšeniu medzi prvou a druhou fázou experimentov. Autori štúdie poukazujú na porovnateľnú výkonnosť modelov, čím možno model RS uprednostniť pred modelom LR, keďže je jednoduchšie pochopiteľný. Do istej miery toto tvrdenie podporuje aj závery nami uskutočnených experimentov. Jednotlivé modely nad rôznymi množinami atribútov dosiahli porovnateľné výsledky, pričom je evidentné, že vizualizácia RS je na pochopenie jednoduchšia ako matematický zápis LR.

III. SYSTÉM PRE PODPORU ROZHODOVANIA KARDIOLÓGOV

Posledným cieľom popisovanej práce je praktická integrácia všetkých predchádzajúcich čiastkových výsledkov. Integrácia výsledkov jednotlivých experimentov je úzko spätá so Systémom pre podporu rozhodovania kardiológov (SPPRK). Uvedený systém bol vytváraný v rámci projektu APVV-17-0550 (Determinanty zvýšeného kardiovaskulárneho rizika a ich prognostický význam analyzovaný pomocou strojového učenia pri diagnostike vysokorizikových jedincov) ako súčasť ôsmich diplomových prác zameriavajúcich sa na dátovú analýzu, ktoré autorka tejto práce pomáhala viesť ako konzultantka.

Úplný počiatok vývoja SPPRK siaha do práce zameranej na vytvorenie aplikácie PALS, popisovanej v úvode tohto článku, ktorá umožňovala previesť neštruktúrované údaje o pacientoch, v podobe prepúšťacích správ, do štruktúrovanej podoby.

Samotná funkčnosť SPPRK, zameriavajúca sa výlučne na dátovú analýzu nad súborom pacientov hospitalizovaných vo VÚSCH, sa skladá z nasledujúcich modulov:

1. Prípadové usudzovanie pri diagnostike kardiovaskulárnych ochorení [42]
2. Metódy dátovej analytiky pre analýzu vplyvu faktorov na včasné zachytenie kardiovaskulárneho rizika [43]
3. Faktorová analýza a jej využitie pre určovaní kardiovaskulárneho rizika [44]
4. Modelovanie vplyvu faktorov súvisiacich so vznikom artériosklerotických zmien [45]
5. Popisné modely špecifických skupín pacientov vzhľadom na ich kardiovaskulárne riziko [46]

Funkčnosť systému SPPRK sa zakladá na rade metód SU, ktoré pracujú nad dátovou množinou pacientov hospitalizovaných vo VÚSCH. Pacienti pri príchode do nemocnice podpisujú informovaný súhlas so spracovaním osobných údajov pre účely vedy a výskumu. Následne sú EHR záznamy nahrávané do aplikácie PALS, ktorá zabezpečí transformáciu týchto údajov do štruktúrovanej podoby. Algoritmy SU obsiahnuté v SPPRK je možné rozdeliť na tri skupiny: prípadové usudzovanie, prediktívne dolovanie a popisné dolovanie dát.

Prípadové usudzovanie je využívané v rámci modulu prípadového usudzovania pri diagnostike kardiovaskulárnych ochorení [202] a umožňuje používateľovi zadať údaje o novom

pacientovi a následne sú tieto údaje vyhodnocované z hľadiska najpodobnejších pacientov obsiahnutých v databáze na základe zvolenej metriky vzdialenosti. Pre výber najpodobnejších prípadov je využitý algoritmus k-NN s voliteľnou hodnotou k. Navyše je možné kombinovať výstup algoritmu k-NN so zhlukovacím algoritmom k-medoids alebo algoritmom rozhodovacieho stromu. Modul disponuje zobrazením záznamov pacientov v podobe predvolených skupín podľa závažnosti KN a skóre KVR (atribút ESC). Modul je rozšírený o grafickú vizualizáciu posudzovania podobnosti prípadov, taktiež o PCA analýzu.

Prediktívne dolovanie dát je obsahom modulu Metódy dátovej analytiky pre analýzu vplyvu faktorov na včasné zachytenie kardiovaskulárneho rizika [43]. Modul pracuje s modelmi CART, C5.0, modelom LR a modelom RF. Používateľ má pritom možnosť pracovať s celou dátovou množinou alebo s dátovou množinou, v rámci ktorej došlo k zúženiu množiny atribútov na základe výsledku algoritmu FSS. Model C5.0 obsahuje oproti modelu CART aj informáciu o percentuálnom využití jednotlivých atribútov v rámci modelu. Model LR ponúka používateľovi štatistický výstup dôležitosti na základe p-hodnoty. V rámci generovania modelu RF má používateľ možnosť nastaviť počet stromov a počet atribútov zoradených podľa dôležitosti. Výsledky implementácie tohto modulu sme prezentovali v publikáciách [18][20].

Popisné dolovanie dát spája zvyšné tri moduly SPPRK. Modul Faktorovej analýzy a jej využitia pre určovaní kardiovaskulárneho rizika [44] skúma pomocou implementácie FA vzťahy medzi atribútmi. Výsledky experimentov je možné ďalej nasadiť v rámci predchádzajúceho modulu. Využitie FA v podmienkach KVR sme sa venovali v publikácii [15].

Obdobou modulu orientujúceho sa na využitie FA je modul pre Modelovanie vplyvu faktorov súvisiacich so vznikom artériosklerotických zmien [45]. Využíva viacero popisných metód pre určenie dôležitosti a vplyvu jednotlivých atribútov. Prvú skupinu metód tvoria metriky Pearsonov korelačný koeficient, Chi2, metódy ReliefF, Shapley values a LIME, ktoré hodnotia lokálny vplyv atribútov v určitej skupine pozorovaných záznamov, prípadne sa môžu zameriavať na celú dátovú množinu. Na skúmanie vzťahov medzi atribútmi je určená časť vytvorená na základe algoritmu Bayesovej siete. Tá okrem grafickej reprezentácie vzťahov poskytuje pridanú informáciu ohľadom podmienených pravdepodobností výskytu jednotlivých hodnôt atribútov. Aplikáciou Bayesovskej siete na skúmaný súbor dát je možné sledovať zmeny jednotlivých hodnôt atribútov vyvolané zmenou iného atribútu. Prínosom takejto funkcionality by mohlo byť skúmanie vplyvu liečby, prípadne zmeny životného štýlu pacienta na riziko vzniku aterosklerózy, príp. iné atribúty odzrkadľujúce zámer výskumu.

Samostatnou časťou je modul Popisných modelov špecifických skupín pacientov vzhľadom na ich kardiovaskulárne riziko [46] využívajúci metódy asociačných pravidiel a zhlukovacích algoritmov. V rámci generovania asociačných pravidiel má používateľ k dispozícii nastavenia pre vstupnú množinu záznamov aj atribútov, určenie hodnôt minimálnej podpory a spoľahlivosti, taktiež obmedzenie na dĺžku pravidiel a atribúty obsiahnuté v pravej časti pravidiel. Generované asociačné pravidlá je možné filtrovať podľa

zvolených požiadaviek na ľavú, či pravú stranu pravidiel. Vygenerované asociačné pravidlá je možné zobrazit' aj v grafickej podobe na základe metrick podpory, spoľahlivosti a liftu. Rovnako taktiež z hľadiska obsiahnutých atribútov vygenerovaných asociačných pravidiel. Zhlukovacie metódy poskytujú používateľovi možnosť zvolit' si počet zhlukov na základe navrhnutých analýz alebo grafických odhadov. Rovnako má používateľ možnosť nastaviť vstupnú množinu atribútov, prípadne selektovať záznamy. Generované zhluky je následne možné analyzovať, či už pomocou ich štatistických výpisov, prípadne doplnenými grafickými metódami vizualizácie súradnicového grafu alebo samotnou vizualizáciou výsledku zhlukovania. Následne je možné výsledky zhlukovania odoslať do časti pre generovanie asociačných pravidiel, kde sú jednotlivé pravidlá generované pre každý zhluk samostatne.

Uvedené moduly boli vyvíjané za prítomnosti pravidelných konzultácií s doménovým expertom špecializujúcim sa na oblasť kardiológie. Posledné dva moduly boli testované podľa testovacieho scenára, pripraveného taktiež v úzkej spolupráci s doménovým expertom. Úlohy testovacieho scenára boli pripravené tak, aby odpovedali medicínskym záujmom. Testovania sa zúčastnili respondenti pôsobiaci v Univerzitetnej nemocnici Louisa Pasteura (UNLP) v Košiciach alebo vo VÚSCH. Respondenti sa zároveň podieľali na výučbovom procese medikov LF UPJŠ. Výsledok testovania bol hodnotený na základe dotazníka hodnotiaceho použiteľnosť implementovaného modulu. Návrh otázok sa riadil dotazníkom tzv. System usability scale. Výsledky dotazníka boli taktiež vyhodnotené príslušným spôsobom pre hodnotenie dotazníkom obdobného typu, pričom tento spôsob hodnotenia známkuje modul pre Modelovanie vplyvu faktorov súvisiacich so vznikom artériosklerotických zmien známku A a modul Popisných modelov špecifických skupín pacientov vzhľadom na ich kardiovaskulárne riziko známku B.

IV. ZÁVER

Kardiovaskulárne ochorenia sú momentálne na vrchole pomyselného rebríčka najzávažnejších ochorení v ľudskej populácii. Dôvodom je ich vysoká prevalencia, úmrtnosť a čoraz nižší vek nástupu a rozvoja ochorenia. Množstvo údajov, ktoré je denne produkované, je enormné a nie je v kapacitných možnostiach ľudskeho mozgu tieto údaje obsiahnuť, spracovať a vyvodit' z nich relevantné závery. Skupina inteligentných metód strojového učenia je túto úlohu schopná zastať a významne pomôcť v rámci medicínskej diagnostiky určiť smer zamerania sa lekárov na konkrétne charakteristiky, javy a markery určujúce nástup, včasnú diagnostiku, ale aj závažnosť ochorenia.

V rámci popisovanej práce sme skúmali problematiku kardiovaskulárnych ochorení z hľadiska absencie alebo prítomnosti koronarografického nálezu na základe vyšetrenia selektívnou koronarografiou pacientov hospitalizovaných vo Východoslovenskom ústave srdcových a cievnych chorôb v Košiciach. Dostupnosť dátového súboru bola podmienená tvorbou softvéru spracúvajúceho elektronický zdravotné záznamy pacientov do štruktúrovanej podoby. Následne bol dátový súbor podrobený základnej štatistickej analýze, doplneniu chýbajúcich hodnôt, či ošetreniu extrémnych hodnôt. Na takto pripravenom dátovom súbore sme vykonali radu

experimentov s ohľadom na stanovené pod ciele práce. Jednotlivé časti experimentov mali za úlohu naplniť hlavný cieľ popisovanej práce: Analýza potenciálu metód strojového učenia pre včasnú diagnostiku a prevenciu kardiovaskulárnych ochorení.

Na záver už môžeme len skonštatovať, že na hodnotenie vplyvu atribútov, skúmanie vzájomných vzťahov a tvorbu diagnostických modelov môžu byť využité rôzne metódy, od najjednoduchších, založených na štatistickej analýze, až po zložitejšie, napríklad použitím algoritmov hlbokého učenia. Použitie a účinnosť tej ktorej metriky do veľkej miery závisí aj od charakteru skúmaného dátového súboru, avšak jednotlivé techniky a prístupy môžu mať porovnateľnú úspešnosť, pričom v závere je možné zohľadniť aj iné faktory pre určenie toho najužitočnejšieho, ako napríklad výpočtový čas, jednoduchosť výstupu, robustnosť modelu a mnohé iné.

Niektoré zo záverov predstavených experimentov neposkytujú úplne jasné závery, čo otvára priestor pre ďalšie analýzy. Rozšírenie dátového súboru o viacero parametrov z ďalších odvetví medicíny by mohlo byť prínosné pre určenie širších vzťahov spôsobujúcich aterosklerózu koronárnych ciev. Tento krok je náplňou projektu KSC MR Study, ktorého súčasťou je aj popisovaná práca. Taktiež je možné dátovú množinu skúmať pomocou ďalších iných metód strojového učenia s aplikáciou rôznych techník cielených na prípravu dátového súboru. Príkladom môže byť normalizácia hodnôt, či ich diskretizácia, škálovanie tried, ale aj ošetrovanie nevybalansovania tried, aplikácia bayesovských sietí, ďalších algoritmov strojového učenia, metód vysvetliteľnosti a ďalších.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-17-0550 a Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV projekt č. 1/0685/21.

REFERENCIE

- [1] G. Quer, R. Arnaout, M. Henne, and R. Arnaout, "Machine learning and the future of Cardiovascular Care," *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 77, no. 3, pp. 300–313, 2021, doi 10.1016/j.jacc.2020.11.030.
- [2] "Heart Disease Facts | cdc.gov", Centers for Disease Control and Prevention, 2022. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/heartdisease/facts.htm>. [31.1.2022].
- [3] "Data and statistics", Euro.who.int, 2022. [Online]. Dostupné na internete: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/noncommunicable-diseases/cardiovascular-diseases/data-and-statistics>. [31.1.2022].
- [4] D. Zhao, "Epidemiological Features of Cardiovascular Disease in Asia", *JACC: Asia*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi 10.1016/j.jacasi.2021.04.007.
- [5] GBD Results Tool | GHDx", *Ghdx.healthdata.org*, 2022. [Online]. Dostupné na internete: <http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>. [31.1.2022].
- [6] "Cardiovascular diseases (CVDs)", Who.int, 2022. [Online]. Dostupné na internete: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)). [31.1.2022].
- [7] Framingham Heart Study: A Project of the National Heart, Lung, and Blood Institute and Boston University [Online]. Dostupné na internete: <https://www.framinghamheartstudy.org> [31.1.2022].
- [8] J. Zhao et al., "Learning from heterogeneous temporal data in electronic health records", *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 65, pp. 105–119, 2017. doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbi.2016.11.006>.

- [9] W. R. Hersh, "Adding value to the electronic health record through secondary use of data for quality assurance, research, and surveillance", *American Journal of Managed Care*, vol. 13, no. 6, part. 1, pp. 277–278, 2007.
- [10] T. Pham et al., "Predicting healthcare trajectories from medical records: A deep learning approach", *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 69, pp.218–229, 2017. doi 10.1016/j.jbi.2017.04.001.
- [11] D. Pella et al., "The possible role of machine learning in detection of increased cardiovascular risk patients – KSC MR Study (design)", *Archives of Medical Science*, vol. 18, no. 4, 2020. doi 10.5114/aoms.2020.99156.
- [12] Z. Pella, P. Milkovic and J. Paralic, "Application for Text Processing of Cardiology Medical Records", 2018 World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines (DISA), 2018. doi 10.1109/disa.2018.8490631.
- [13] P. S. Simar, M. Raman, "Comparison of data encryption algorithms", *IJCSC*, vol. 2, no. 1, 2011, pp. 125–127.
- [14] Z. Pella, J. Paralič and P. Milković, "Aplikácia zameraná na spracovanie lekárskeho správ", *Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, 2018. ISBN 978-80-553-2713-6.
- [15] Z. Pella et al., "Analysis of Risk Factors in Patients with Subclinical Atherosclerosis and Increased Cardiovascular Risk Using Factor Analysis", *Diagnostics*, vol. 11, no. 7, p. 1284, 2021. doi 10.3390/diagnostics11071284.
- [16] R. Bréda, "Informačný systém pre spracovanie lekárskeho správ", Diplomová práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, 2019.
- [17] M. Piepoli et al., "2016 European Guidelines on cardiovascular disease prevention in clinical practice", *European Heart Journal*, vol. 37, no. 29, pp. 2315–2381, 2016. doi 10.1093/eurheartj/ehw106.
- [18] O. Lohaj, Z. Pella and J. Paralič, "Data analytics methods for analyzing the impact of factors on early detection of cardiovascular risk," *IEEE 20th Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2022)*, 2022, (to appear).
- [19] W. Montelpare et al., "Working with Missing Data", *Pressbooks.library.upei.ca*. [Online]. Dostupné na internete: <https://pressbooks.library.upei.ca/montelpare/chapter/working-with-missing-data/>. [9.3.2022].
- [20] Z. Pella, O. Lohaj, D. Pella and J. Paralič, "Assessment of important cardiovascular risk factors using ML methods: a randomized controlled trial", *BMC Medical Informatics and Decision Making* (v recenznom konaní).
- [21] D. Chicco and G. Jurman, "The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation", *BMC Genomics*, vol. 21, no. 1, 2020. doi: 10.1186/s12864-019-6413-7.
- [22] T. Tsai et al., "Factor analysis for the clustering of cardiometabolic risk factors and sedentary behavior, a cross-sectional study", *PLOS ONE*, vol. 15, no. 11, p. e0242365, 2020. doi 10.1371/journal.pone.0242365.
- [23] G. De Backer et al., "Management of dyslipidaemia in patients with coronary heart disease: Results from the ESC-EORP EUROASPIRE V survey in 27 countries", *Atherosclerosis*, vol. 285, pp. 135–146, 2019. doi 10.1016/j.atherosclerosis.2019.03.014.
- [24] E. Kjeldsen, J. Thomassen and R. Frikke-Schmidt, "HDL cholesterol concentrations and risk of atherosclerotic cardiovascular disease – Insights from randomized clinical trials and human genetics", *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids*, vol. 1867, no. 1, p. 159063, 2022. doi 10.1016/j.bbalip.2021.159063.
- [25] A. Pacilli et al., "Role of relationship between HbA1c, fibrinogen and HDL-cholesterol on cardiovascular disease in patients with type 2 diabetes mellitus", *Atherosclerosis*, vol. 228, no. 1, pp. 247–248, 2013. doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2013.02.010.
- [26] C. Tsai et al., "Factor analysis of modifiable cardiovascular risk factors and prevalence of metabolic syndrome in adult Taiwanese", *Endocrine*, vol. 40, no. 2, pp. 256–264, 2011. doi 10.1007/s12020-011-9466-1.
- [27] A. Marušič, "Factor analysis of risk for coronary heart disease: an independent replication", *International Journal of Cardiology*, vol. 75, no. 2–3, pp. 233–238, 2000. doi 10.1016/s0167-5273(00)00337-5.

- [28] T. Collingwood, I. Bernstein and S. Blair, "The Interrelation of Coronary Heart Disease Risk Factors", *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation*, vol. 7, no. 5, pp. 234-238, 1987. doi 10.1097/00008483-198705000-00002.
- [29] R. Hagan, G. Parrish and J. Licciardone, "Physical Fitness Is Inversely Related to Heart Disease Risk: A Factor Analytic Study", *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 7, no. 4, pp. 237-243, 1991. doi 10.1016/s0749-3797(18)30920-6.
- [30] E. Mayer-Davis et al., "Cardiovascular Disease Risk Factors in Youth With Type 1 and Type 2 Diabetes: Implications of a Factor Analysis of Clustering", *Metabolic Syndrome and Related Disorders*, vol. 7, no. 2, pp. 89-95, 2009. doi 10.1089/met.2008.0046.
- [31] R. Pedrosa et al., "Análise de fatores do instrumento de medida do impacto da doença no cotidiano", *Revista Brasileira de Enfermagem*, vol. 69, no. 4, pp. 697-704, 2016. doi 10.1590/0034-7167.2016690412i.
- [32] J. Gupta et al., "Association between Albuminuria, Kidney Function, and Inflammatory Biomarker Profile in CKD in CRIC", *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, vol. 7, no. 12, pp. 1938-1946, 2012. doi 10.2215/cjn.03500412.
- [33] G. Piotrowski et al., "Left atrial and left atrial appendage systolic function in patients with post-myocardial distal blocks", *Archives of Medical Science*, vol. 6, pp. 892-899, 2010. doi 10.5114/aoms.2010.19298.
- [34] . Wang, G. Garruti, M. Liu, P. Portincasa and D. Wang, "Cholesterol and Lipoprotein Metabolism and Atherosclerosis: Recent Advances in Reverse Cholesterol Transport", *Annals of Hepatology*, vol. 16, pp. S27-S42, 2017. doi 10.5604/01.3001.0010.5495.
- [35] D. Rader and G. Hovingh, "HDL and cardiovascular disease", *The Lancet*, vol. 384, no. 9943, pp. 618-625, 2014. doi 10.1016/s0140-6736(14)61217-4.
- [36] E. Pappa et al., "Cardioprotective Properties of HDL: Structural and Functional Considerations", *Current Medicinal Chemistry*, vol. 27, no. 18, pp. 2964-2978, 2020. doi 10.2174/0929867326666190201142321.
- [37] J. Zhang et al., "Study on the predictive effect of fibrinogen on vascular calcification", *Vascular*, vol. 29, no. 6, pp. 952-958, 2021. doi 10.1177/1708538120985243.
- [38] B. Zhou et al., "Worldwide trends in diabetes since 1980: a pooled analysis of 751 population-based studies with 4.4 million participants", *The Lancet*, vol. 387, no. 10027, pp. 1513-1530, 2016. doi 10.1016/s0140-6736(16)00618-8.
- [39] R. D'Agostino et al., "General Cardiovascular Risk Profile for Use in Primary Care: The Framingham Heart Study", *Circulation*, vol. 117, no. 6, pp. 743-753, 2008. doi 10.1161/circulationaha.107.699579.
- [40] B. Martins et al., "Data Mining for Cardiovascular Disease Prediction", *Journal of Medical Systems*, vol. 45, no. 1, 2021. doi 10.1007/s10916-020-01682-8.
- [41] D. Barbieri et al., "Predicting Cardiovascular Risk in Athletes: Resampling Improves Classification Performance", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 21, p. 7923, 2020. doi 10.3390/ijerph17217923.
- [42] Z. Tocimáková, „Prípadové usudzovanie pri diagnostike kardiovaskulárnych ochorení“, Diplomová Práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, 2020.
- [43] O. Lohaj, „Metódy dátovej analytiky pre analýzu vplyvu faktorov na včasné zachytenie kardiovaskulárneho rizika“, Diplomová Práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, 2021.
- [44] J. I. Vanko, „Faktorová analýza a jej využitie pri určovaní kardiovaskulárneho rizika“, Diplomová Práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, 2021.
- [45] M. Pavlusová, „Modelovanie vplyvu faktorov súvisiacich so vznikom artériosklerotických zmien“, Diplomová Práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, 2022.
- [46] A. Pavlíček, „Popisné modely špecifických skupín pacientov vzhľadom na ich kardiovaskulárne riziko“, Diplomová Práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, 2022.

Využitie smart zariadení v medicínskej oblasti

Pavol Šatala

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Technická univerzita v Košiciach Košice, Slovensko
pavol.satala@tuke.sk

Peter Butka

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Technická univerzita v Košiciach Košice, Slovensko
peter.butka@tuke.sk

Abstrakt—V predloženej práci sa venujeme využitiu inteligentných zariadení v medicínskej oblasti. Práca v úvode ponúka prehľad existujúcich riešení. Následne popisuje ich využitie pri diagnostike spánkových porúch a stavu zmrazenia chôdze. Pre overenie efektivity využívania inteligentných zariadení v porovnaní s klasickým prístupom, bol realizovaný experiment porovnávajúci rehabilitáciu stavu zmrazenia chôdze klasickým spôsobom a s využitím inteligentných zariadení.

Keywords—intelligentné zariadenia, rozšírená realita, zber dát, rehabilitácia

Abstract—In the presented work we deal with the use of intelligent devices in the medical domain. The beginning of the paper offers an overview of existing solutions. It then describes their use in the diagnosis of sleep disorders and freezing of gait. To verify the effectiveness of the use of intelligent devices in comparison with the classical approach, an experiment was carried out comparing the rehabilitation of the state of walking freezing in the classical way and with the use of intelligent devices.

Keywords—intelligent devices, augmented reality, data collection, rehabilitation

I. ÚVOD

Medicína, zdravotníctvo a farmaceutický priemysel patrí k odvetviám s najväčším obratom. Dlhodobo sa celosvetový obrat tohto odvetvia pohybuje vysoko nad biliónom amerických dolárov [1]. Aj v tejto oblasti nachádzajú mobilné zariadenia široké uplatnenie. Od jednoduchých aplikácií pre bežné inteligentné telefóny vytvorené za účelom zmeny životného štýlu alebo evidenciu lekárskeho záznamov, až po senzorké aplikácie určené na rehabilitáciu pacientov.

II. OBLASTI VYUŽITIA

Medzi najrozšírejšie a na implementáciu najjednoduchšie oblasti využitia inteligentných zariadení v medicíne patria aplikácie slúžiace na sledovanie a záznam zdravotného stavu pacienta. Približne 25% používateľov inteligentných telefónov niekedy použilo aplikáciu na zlepšenie svojho zdravotného stavu a približne 38% používateľov sleduje svoju fyzickú aktivitu týmto spôsobom [3]. V ponuke aplikácií pre všetky mobilné operačné systémy nachádzame viac ako 100 000 takýchto aplikácií [2]. Hlavným

cieľom týchto aplikácií je umožniť používateľovi zaznamenať svoj zdravotný či fyzický stav. Umožňujú sledovanie týchto parametrov, prípadne ich zdieľanie ako motiváciu pre dosiahnutie lepších výsledkov.

Ďalším, sofistikovanejším spôsobom využitia inteligentných zariadení sú aplikácie, ktoré umožňujú rehabilitáciu pacienta. Zaujímavým riešením je aplikácia, ktorá využíva prvky rozšírenej reality na liečbu fóbií [4]. Užívateľovi sú do jeho prostredia vkladané prvky, ktoré u neho vyvolávajú strach. Riešenie sleduje reakcie pacienta a s postupným privykaním na podnety vytvára stále viac vyhrtené situácie. Toto riešenie bolo testované na liečbu rôznych fóbií ako strach z hmyzu, uzavretých priestorov ako aj post-vojnových syndrémov (syndróm vojny v Perzskom zálive) a pod. Nasledujúci obrázok č. 1 ilustruje obraz, ktorý postupne vidí pacient počas terapie.



Fig. 1. Ukážka aplikácie využívajúcej prvky rozšírenej reality na liečbu fóbií.

Rozšírené nositeľné zariadenia ako chytré hodinky, či rôzne fitness náramky umožňujú sledovať aktivitu používateľov a snímať ich pohyby s využitím akcelerometrov. Vďaka tomu vzniká množstvo aplikácií, ktoré sledujú fyzickú aktivitu či tep používateľov. Zariadenia sú bežne vybavené senzormi ako akcelerometer, gyroskop či senzor tehu. Okrem týchto bežne dostupných senzorov, firmy vyrábajú aj špecializované senzory.

Jedným z nich je aj zariadenie určené pre pacientov trpiacich cukrovkou. Cukrovka je ochorenie látkovej premeny, ktoré celosvetovo postihuje približne 8% populácie [5]. Je spôsobená poruchou produkcie inzulínu – hormónu, ktorý umožňuje rozklad a spracovanie cukru (glukózy) v organizme. Neliečená alebo zle manažovaná cukrovka spôsobuje kolísanie hladiny cukru. Vysoká hladina cukru (hyperglykémia) alebo nízka (hypoglykémia) spôsobuje chronické problémy: poškodenie malých ciev (s tým súvisiace poškodenie zraku, obličiek a pod.). Prípadne iné problémy spojené

s nedokonalým prekrvením mozgu a končatín, čo môže spôsobiť až amputáciu. Pri extrémnych odchýlkach aj krátkodobých môže dôjsť k akútnym problémom ako slabosť, nevoľnosť až po upadnutie do kómy a podobne. Z tohto dôvodu je veľmi dôležité sledovať a správne manažovať hladinu cukru pri pacientoch s cukrovkou.

Pre správny manažment ochorenia je dôležité vedieť aktuálnu hodnotu cukru. V súčasnosti prebieha meranie cukru invazívnou metódou, kedy je potrebné odobrať kvapku krvi z konca prsta. Toto meranie však umožňuje zistiť hodnotu iba pár krát za deň. Jedno z najnovších riešení, ktorá už je dostupná vo viacerých štátoch Európy, aj s podporou verejného poistenia umožňuje merať hladinu cukru aj v niekoľko minútových intervaloch. Senzor s názvom FreeStyle Libre, je malý senzor kruhového tvaru s priemerom 35mm (obr. 2), ktorý sa aplikuje na pokožku. Jemná veľmi tenká ihla prenikne do vrchnej vrstvy pokožky, čo umožňuje merať hladinu cukru.

Pre používateľa je táto ihla úplne necíiteľná a nosenie senzoru je pohodlné. Čítanie hodnoty prebieha pomocou protokolu NFC do mobilnej aplikácie. Toto riešenie odbremeni pacientov od nutnosti niekoľko krát do dňa odobrať krv z prsta [6].



Fig. 2. Senzor FreeStyle Libre aplikovaný na telo pacienta

III. VYUŽITIE INTELIGENTNÝCH ZARIADENÍ V NEUROLÓGIÍ

A. Diagnostika spánkových porúch

Motivovaní existujúcimi riešeniami, v tejto kapitole uvádzajú dve oblasti využitia inteligentných zariadení pri diagnostike a rehabilitácii pacientov v neurológii.

Viaceré zo spánkových porúch, ktoré spôsobujú závažné zdravotné komplikácie sa prejavujú nekontrolovanými pohybmi počas spánku. Tieto nekontrolované pohyby však nie sú pri všetkých ochoreniach rovnaké. Jednotlivé ochorenia je možné rozpoznať podľa rozdielnej intenzity pohybov a ich výskytu počas spánkového cyklu. Najčastejšími ochoreniami spojenými s nekontrolovanými pohybmi sú:

Spánkové apnoe (CSA) je vážne spánkové ochorenie spojené s problémami s dýchaním, ktoré sa vyznačuje náhlymi prerušeniami dýchania počas spánku. Je spojená s hlasným chrápaním a únavou ráno po zobudení. Toto ochorenie je spojené s náhlymi pohybmi v pravidelných intervaloch počas noci [7].

Ochorenie iRBD (z anglického rapid eye movement sleep behavior disorder) je spojené so stratou bežného uvoľnenia počas REM fázy spánku. Pacient vyzerá, ako keby reagoval a zapájal sa do deja svojich snov. Je spojené s výraznými nekontrolovanými pohybmi nôh, rúk a hlasnými výkrikmi v REM fáze spánku. Tieto pohyby sa vyskytujú prevažne v druhej tretine spánkového cyklu. Toto ochorenie má vysoké riziko progresu do iných závažnejších neurologických ochorení ako napr. Parkinsonova choroba, demencia s Lewyho telieskami a pod. [8].

Syndróm nepokojných nôh (Restless legs syndrome - RLS) je charakterizovaný pocitom nekomfortu v nohách, čo núti pacienta pohybovať s nimi. Tieto pohyby komplikujú zaspávanie. Pohyby sa najčastejšie vyskytujú vo večerných hodinách. A len zriedkavo počas samotnej noci [9].

Periodické pohyby nôh počas noci - Periodic leg movements (PLMS) je ochorenie spojené s pravidelnými pohybmi nôh počas spánku. Toto ochorenie je spojené s pohybmi v pravidelných časových intervaloch. Ako ukazuje obr. č. 3 podľa oficiálnych diagnostických kritérií musí byť trvanie jednotlivých po sebe nasledujúcich udalostí medzi 5 až 90 sekúnd [10].

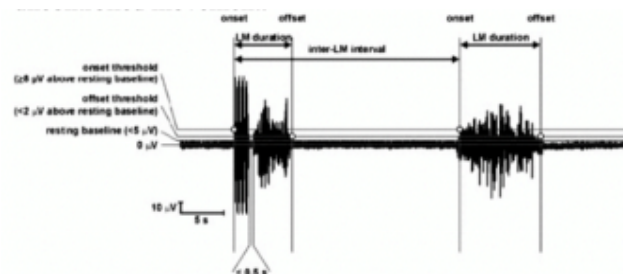


Fig. 3. Pohyby charakteristické pre ochorenie PLMS

Na základe [7, 8, 9, 10] a osobnej konzultácie s medicínskych pracovníkom sme vytvorili obr. 4, ktorý ilustruje rozloženie náhodných pohybov počas noci pre jednotlivé ochorenia. Horizontálna línia znázorňuje čas a vertikálna ilustruje pohyb mimovoľných pohybov.

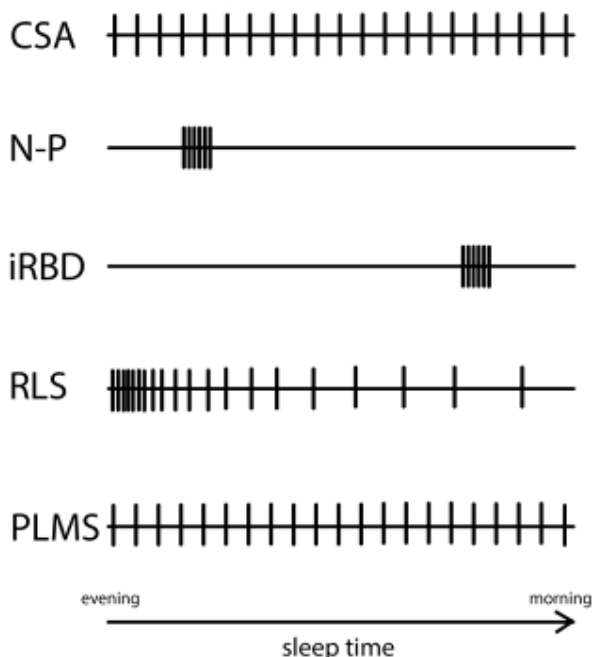


Fig. 4. Charakteristika pohybov pre jednotlivé ochorenia

B. Diagnostika poruch chôdze pri Parkinsonovej chorobe

S Parkinsonovou chorobou sa hlavne v jej pokročilejšom štádiu spája nepríjemný syndróm nazývaný zmrázanie chôdze (z anglického Freezing of Gait - FoG). Tento nepríjemný syndróm sa v cca 26% vyskytuje aj v prvotných štádiách choroby [11]. FoG je klinicky pozorovaný, keď pacient bez zjavnej vonkajšej príčiny nie je schopný ďalej pokračovať v chôdzi. Pri tomto type pacient netrpí celkovou neschopnosťou pohybu – iba nie je schopný spraviť ďalší krok. Vyskytuje sa najmä v momente začiatku chôdze, pri otočkách, alebo prechodoch zúženými priestormi. Podľa [12] väčšina epizód FoG netrvá dlhšie ako 10 sekúnd a iba v zriedkavých prípadoch zaberie viac ako 30 sekúnd. Obrázok č. 5 predstavuje záznam sily nohy pôsobiacej na podložku (mera reakčných síl na zemi) pre ľavú (L) a pravú (R) nohu. Na zázname sú dva subjekty A: kontrolná vzorka – zdravý pacient a B pacient s Parkinsonovou chorobou so zmrázením chôdze FoG. Počas chôdze je možné pozorovať jasné cyklické zmeny. Ak nie je pohyb (pacient sedí alebo stojí), pozorujeme plochú čiaru. FOG sa vyznačuje malými, výkyvmi signálu (úseky v zázname zvýraznené vodorovnou čiarou).

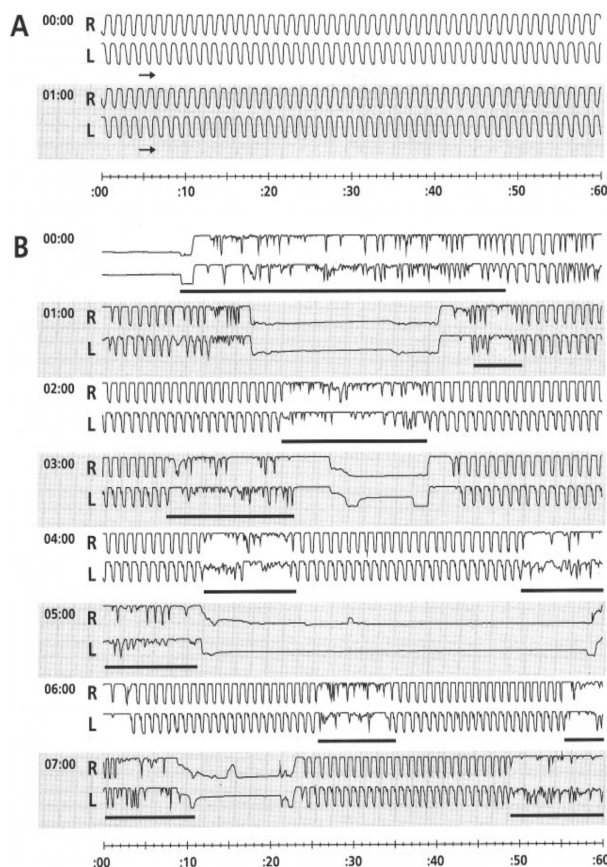


Fig. 5. Porovnanie síl pôsobiacich na podložku pri chôdzi zdravého pacienta a pacienta trpiaceho FoG [12]

Práve sledovanie pohybu je jedným z najčastejších spôsobov na detekciu zmrázania chôdze. V prehľade literatúry [13] sleduje 22 prác, ktoré využívajú na detekciu FoG rôzne senzory. Ako aj obr. 6 znázorňuje ide najčastejšie o senzory zamerané na sledovanie pohybov.

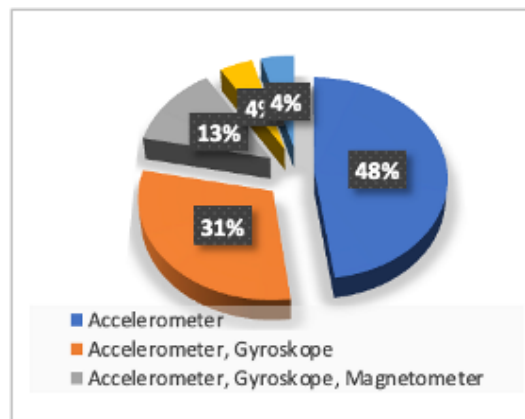


Fig. 6. Senzory použité na detekciu syndrómu zmrázania

V pohybovej oblasti môžeme sledovať výrazne rozdiely medzi zdravou chôdzou a prípadom zmrázania chôdze. Pri

výskyte zmrzenia chôdze nie je pacient úplne nehybný. Práve naopak pacient sa snaží spraviť krok, čoho však nie je schopný a preto robí rýchlejšie ale menšie trhavé pohyby čo zvyšuje frekvenciu pohybov. Tento posun frekvencie pohybov môžeme vidieť aj na frekvenčnom spektre týchto pohybov, čo je viditeľné aj na nasledujúcom obrázku č. 7.

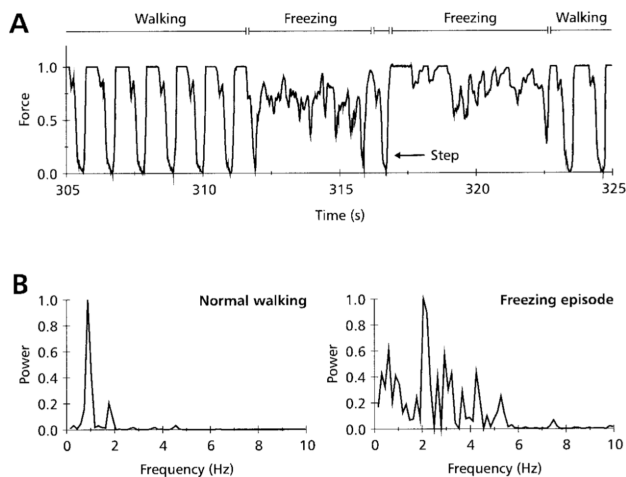


Fig. 7. Porovnanie frekvencie pohybov zdravej chôdze a výskytu zmrzenia chôdze

IV. MOŽNOSTI SLEDOVANIA POHYBOV S VYUŽITÍM INTELIGENTNÝCH ZARIADENÍ

Ako potvrdzujú predchádzajúce dve kapitoly, sledovanie pohybov tvorí dôležitú oblasť pri diagnostike rôznych chorien. Práve takéto sledovanie je jednoducho realizovateľné s využitím inteligentných, nositeľných či iných zariadení. Cieľom je vytvoriť platformu, ktorá v medicínskych podmienkach je schopná sledovať pohyby používateľa a odosielať ich na vizualizáciu medicínskym pracovníkom pre podporu diagnostiky či spracovanie algoritmi umelej inteligencie. Je možné vytvoriť jednotnú platformu zberu dát pre rôzne aplikácie. Súčasný trh ponúka niekoľko hardvérových zariadení vybavených senzormi schopnými sledovať pohyb. Patria sem:

- **Inteligentné telefóny** – z minimálnych hardvérových požiadaviek operačných systémov iOS a Android vyplýva, že tieto zariadenia musia byť vybavené akcelerometrom s frekvenciou min. 100Hz doplnené o gyroskop či kompas. Práve prvý zo spomínaných senzorov je najčastejšie používaný na sledovanie pohybov používateľa. Telefóny sú používateľmi bežne nosené prevažne vo vreckách nohavíc.
- **Inteligentné hodinky** – inteligentné hodinky sú zariadenia vybavené dotykovou obrazovkou pre vstup od používateľa ako aj doplnkovými senzormi. Prevažne sa jedna o senzory na sledovanie pohybov a

tepu používateľa. Tieto zariadenia sú vyrábané širokým spektrom výrobcov.

- **Inteligentné náramky** – sú zariadenia podobné inteligentným hodinkám, ktoré sú však rozmerovo menšie. Zvyčajne nie sú vybavené dotykovým displejom ale sú vybavené senzormi.
- **IMU (z angl Inertial Measurement Unit)** – je elektronické zariadenie určené na sledovanie lineárnej akcelerácie rotácie či magnetického poľa v okolí zariadenia. Existuje niekoľko takýchto zariadení, ktoré sú vybavené akcelerometrom, gyroskopom magnetometrom či barometrom a pod. Tieto zariadenia sú väčšinou schopné komunikovať pomocou BLE (Bluetooth s nízkou spotrebou energie). Obrázok č. 8 ilustruje jednu z realizácií IMU jednotky.



Fig. 8. Inertial Measurement Unit

Cieľom architektúry zberu dát je následne spracovanie týchto dát. Keďže inteligentné hodinky, náramky a IMU jednotky zvyčajne nie sú schopné komunikovať priamo s internetom ani vykonávať zložité výpočty je použitý inteligentný telefón pre zber dát z periférnych zariadení. Ich následne spracovanie a odosielanie na server ilustruje obr. č. 9.

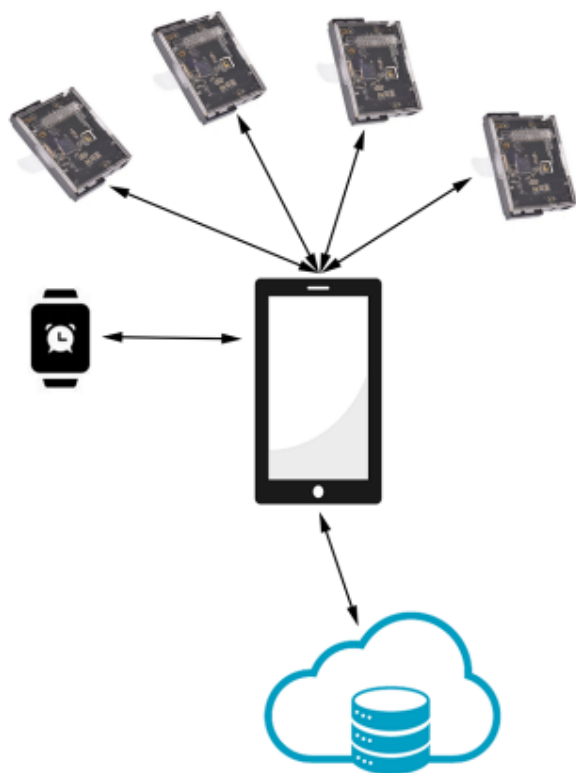


Fig. 9. Architektúra systému zberu dát

V. REHABILITÁCIA PORUCH CHÔDZE PRI PARKINSONOVEJ CHOROBE

Zmrazenie chôdze často nie je uspokojivo riešiteľné farmakologickou cestou a preto sa používajú behaviorálne intervencie, ktoré poskytujú dobre známe triky na prekonanie stavu FoG. Princípom ich fungovania je presun riadenia chôdze z automatického (naučeného/reflexného) na cieľný pohyb [14]. Tieto intervencie využívajú vizuálne, akustické a dotykové pomôcky na to, aby pacienta donútili vykonávať chôdzu vedome - sústrediť sa na ňu. Pri optických pomôckach je hlavnou podstatou vizualizovať pacientovi cieľ, ktorý musí nasledovať alebo prekážku, ktorú musí prekročiť. Pri dotykových a akustických pomôckach ide hlavne o rytmické udalosti podporujúce pravidelnosť chôdze. Existuje veľké množstvo pomôcok. Podľa [14] medzi základne patria:

- Vizualne pomôcky:
 - Paralelné čiary na zemi
 - Laserové ukazovadlo
- Akustické pomôcky
 - Metronóm
 - Jednorazový zvukový signál

- Vibračné
 - Rytmické vibračné odozvy

Na základe [15] vibračné pomôcky dokázali zrýchliť chôdzu pacientov a taktiež vylepšiť spôsob ich chôdze. V [16] bolo uskutočnené porovnanie vizuálnych a akustických pomôcok. Testovacia skupina pozostávala zo 14 mužov a 10 žien s idiomatickou Parkinsonovou chorobou. Pred meraním všetci pacienti vylúčili lieky proti parkinsonizmu aspoň 12 hodín. Následne boli pacienti požiadaní o prejde dráhy dlhý 7.26 metra najprv bez pomôcok a následne s vizuálnou, akustickou a oboma pomôckami. Ako vizuálna pomôcka bola na podlahu nalepená žltá páska a ako akustickú pacient počul metronóm o frekvencii 25% väčšej, ako bola kadencia chôdze bez pomôcky. Následne bol pre každý subjekt a testovací prípad vypočítaný počet krokov za minútu ako aj priemerná dĺžka kroku ako aj priemerná rýchlosť chôdze. Efekt pomôcok na celkovú dĺžku a kadenciu chôdze znázorňujú obr. 10 a 11.

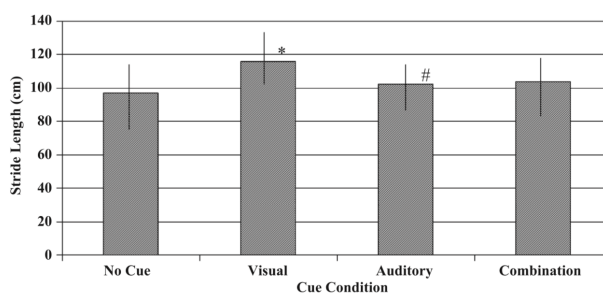


Fig. 10. Vplyv použitej pomôcky na dĺžku kroku

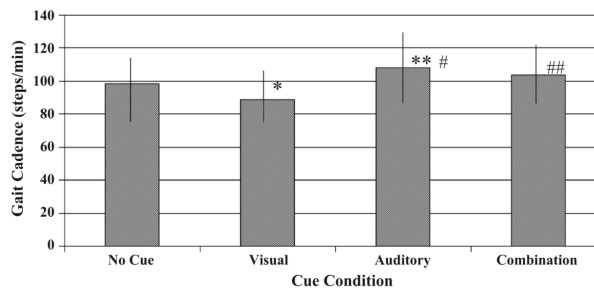


Fig. 11. Vplyv použitej pomôcky na rýchlosť chôdze

Na základe predchádzajúcich teoretických záverov sme vytvorili aplikáciu, na poskytnutie vibračných pomôcok pacientom trpiacim FoG s využitím nositeľných zariadení. Aplikácia pozostáva z inteligentného telefónu, bezdrôtových slúchadiel a inteligentných hodienok upevnených na zápästí alebo členku pacienta. Aplikácia v stanovených intervaloch vytvára vibračný prípadne akustický impulz. Dĺžka trvania impulzu aj jeho frekvenciu nastavoval medicínsky pracovník počas experimentu. Cieľom bolo overenie účinnosti pomôcok realizovaných pomocou nositeľných zariadení

Experiment prebiehal s dobrovoľníkmi trpiacimi pokročilou Parkinsonovou chorobou. Testovacia dráha je tvorená dvomi miestnosťami. V prvej pacient prejde 4m,

následne prejde zúženým priestorom dverí do druhej miestnosti. V tej sa po prejdení 4m otočí a vráti sa po rovnakej dráhe. Dráha nie je vybavená žiadnymi vizuálnymi pomôckami. Rovnako v prostredí sa nevyskytujú žiadne rytmické zvuky a pacient je požiadaný, aby nepoužíval iné vlastne pomôcky proti zmrazeniu chôdze. Chôdzu pacienta sledoval a vyhodnocoval zdravotnícky pracovník, ktorý bol schopný rozpoznať výskyt zmrazenia chôdze. Rovnako sa meral čas potrebný na prejdenie trasy. Počas kontrolnej trasy bol okrem celkového času meraný aj čas chôdze počas prvých troch metrov. Rovnako bol počítaný počet krokov na základe čoho sme určili priemernú prirodzenú periódu chôdze pacienta ako:

$$p = \frac{t_1 - t_2}{n_{\text{krokov}}}$$

kde t_1 je celkový čas a t_2 je čas zmrazenia chôdze počas meraného intervalu. Potom p je priemerná perióda chôdze.

Experimenty zvyčajne začínali akustickými pomôckami. Pomôcky sa testovali s frekvenciami 60, 90 a 120 BPM. Následne boli testované vibračné pomôcky, ktorých perióda bola pri testovaní závislá od prirodzenej periódy chôdze.

Experimentu sa zúčastnilo 11 respondentov (4 ženy a 7 mužov). Priemerný vek účastníkov bol $66,44 \pm 4,5$. Účastníci trpeli Parkinsonovou chorobou priemerne osem rokov. Priemer celkového času potrebného na prejdenie trasy bolo $42,43 \pm 19,43$ sekundy a zmrazenie chôdze sa vyskytlo 1,95 \pm 1,27 krát.

Všetky pokusy s akustickou pomôckou preukázali určitú mieru zlepšenia u pacientov. Detailne výsledky akustických pomôcok sú uvedené v tabuľke č. 1

TABLE I. VÝSLEDKY TESTOVANIA AKUSTICKEJ POMÔCKY

Priemerné hodnoty	60 BPM n = 5	90 BPM n = 8	120 BPM n = 6
Celkový čas T (s)	28,032	36,776	25,26
FoG	0,318	0,4545	0,333
T zlepšenie (s)	2,508	5,63	7,35
T zlepšenie (%)	9,295	11,25	23,03
FoG zlepšenie	1,6	1,56	2,25
FoG zlepšenie (%)	64,28	62,50	58,33

Rovnako, efektívitu prejavili aj vibračné pomôcky, ktoré sme testovali na troch periódach: p – prirodzená perióda chôdze pacienta, $p/2$ polovica prirodzenej periódy chôdze a $p/4$ štvrtina tejto periódy.

TABLE II. VÝSLEDKY TESTOVANIA VIBRAČNEJ POMÔCKY

Priemerné hodnoty	p n = 5	p/2 n = 5	p/4 n = 2
Celkový čas T (s)	34,122	35,206	26,225
FoG	0	0	0
T zlepšenie (s)	2,994	1,86	2,755
T zlepšenie (%)	5,88	2,45	11,09
FoG zlepšenie	1,4	1,4	1,5
FoG zlepšenie (%)	80	80	100

ZÁVER

Uvedené informácie z prehľadu existujúcej vedeckej literatúry z informatickej ako aj lekárskej domény nasvedčujú rozsiahlemu potenciálu nositeľných a inteligentných zariadení v medicínskej oblasti. Následne práca ponúkla návrh univerzálnej platformy na zber pohybových dát a potenciálne oblasti jej využitia pri diagnostike symptómov Parkinsonovej choroby, prípadne spánkových porúch. Následne práca potvrdzuje efektívitu pomôcok na prekonanie stavu zmrazenia chôdze realizovaných pomocou inteligentných zariadení, ktoré preukázali zrýchlenie chôdze až do 23% a zároveň preukázali výrazne zníženie výskytu udalosti zmrazenia chôdze.

POĎAKOVANIE

Tato práca bola podporená APVV grantom – APVV-17-0550 a grantom VEGA č. 1/0685/21.

REFERENCES

- [1] Revenue of the worldwide pharmaceutical market from 2001 to 2020, Statista, (online: <https://www.statista.com/statistics/263102/pharmaceutical-market-worldwide-revenue-since-2001/>)
- [2] L. Shelemy, Behaviour change techniques in smartphone health apps, Natinal Elf Service, 2017 (online: <https://www.nationalelfservice.net/treatment/self-management-treatment-and-prevention/behaviour-change-techniques-smartphone-health-apps/>)
- [3] D. E. Conroy, C-H Yang, P. Maher: Behavior Change Techniques in Top-Ranked Mobile Apps for Physical Activity, (Am J Prev Med)
- [4] C.M. Botella, M.C. Juan, R.M. Banos a kol: Mixing Realities? An Application of Augmented Reality for the Treatment of Cockroach Phobia, CYBERPSYCHOLOGY & BEHAVIOR Volume 8, 2005
- [5] AG. IAKW – Austria Center Vienna: Smart insulin pumps deliver – improving quality of life for diabetics, Vienna, 14 February 2018
- [6] D. Ahn: Abbott's Euro approved wearable glucose monitor is different than anything on the market, iMedicalApps, September 9, 2014
- [7] Mayo Clinic Staff, LDiseases and Conditions Sleep apnea", *Mayo Clinic*, Aug. 25, 2015
- [8] L. Strambi, W. Oertel, Y. Dauvilliers, Autonomic symptoms in idiopathic REM behavior disorder: a multicentre case-control study, *J Neurol*, pp. 1112-1118, 2014
- [9] Ch. Earley, „Restless Legs Syndrome“, *The New England Journal of medicine*, May 22, 2003

- [10] M. Zuccon et al., The official World Association of Sleep Medicine (WASM) standards for recording and scoring periodic leg movements in sleep (PLMS) and wakefulness (PLMW) developed in collaboration with a task force from the International Restless Legs Syndrome Study Group (IRLSSG), *Sleep medicine*, vol. 7, pp. 175-183, March 2006
- [11] N. Giladi, M.P. McDermott, S. Fahn, et al. Freezing of gait in PD: prospective assessment in the DATATOP cohort. *Neurology*. 2001, *Zv.* pp. 1712-1721.
- [12] B. R. Bloem, J. M. Hausdorff, J.E. Visser, N. Giladi., Falls and Freezing of Gait in Parkinson's Disease: A Review of Two Interconnected, Episodic Phenomena. *Movement Disorders Vol. 19*. 2004, *Zv.* pp. 871-884.
- [13] A. Lima, L. Evers, et al, Freezing of gait and fall detection in Parkinson's disease using wearable sensors: a systematic review, *J Neurol*, 2017
- [14] S.J.G. Lewis, R.A. Barker. A pathophysiological model of freezing of gait in Parkinson's disease. *Park. Relat. Disord.* 15. 2009.
- [15] K.N. Winfree, A. Pretzer, D. Hilgart, et al. The effect of step-synchronized vibration on patients with Parkinson's disease: case studies on subjects with freezing of gait or an implanted deep brain stimulator. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 21. 2013, pp. 806-811
- [16] M. Suteerawattananon, G.S. Morris, B.R. Etnyre, J. Jankovic et al. Effects of visual and auditory cues on gait in individuals with Parkinson's disease. *Journal of the Neurological Sciences*. 2004, pp 63-69.

QuoVadis Research @ FEI

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach Fakulta elektrotechniky a informatiky

Sídlo: Letná 9, 042 00 Košice

Elektronická adresa: <http://quovadis.fei.tuke.sk>

Periodicita: 2-krát ročne

Založenie časopisu: September 2018.

Jazyk: V časopise sú články v anglickom a slovenskom jazyku.

ISSN: 2585-9587