



# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

**Ing. Vladimír Vajnar**

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

**Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor:

Study branch

**Elektroenergetika**

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

**Nestandardní případy vypínání zkratů –  
interakce elektrických a mechanických dějů**

Školitel:

Supervisor

**Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c**

Oponent:

Opponent

**Prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

V úvodu práce autor popsal současný světový stav problematiky vypínání nestandardních stavů vysokonapěťových výkonových vypínačů. Samotná kapitola 1.2 je velice krátká. Navazuje na ni kapitola 2 a 3 a částečně i kapitola 4, které rovněž obsahují části mapující současné trendy ve vypínací technice. Tyto kapitoly považuji za velmi dobře a přehledně zpracované a je z nich naprosto zřejmé, že vybraná tematika dizertační práce je aktuální jak z hlediska průmyslu, tak i akademické sféry.

## Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Druhá a třetí kapitola práce popisují proces vypínání zkratu. Kapitola dvě je věnována popisu současného stavu vypínačů na hladinách vn až zvn. Podrobně popisuje technologie zhášení oblouku v různých provedeníh vypínačů. Kapitola tři se velmi podrobně zabývá jednotlivými intervaly vypínacího procesu. Autor v ní naznačuje problémy, které mohou během procesu nastat. Kapitola čtyři se věnuje popisu oblouku. První část shrnuje používané obvodové modely oblouku. Autor některé z modelů realizoval v prostředí Simulinku. Další část je věnována fyzikálnímu pohledu. Plasmatický výboj je popsán jako vzájemná interakce několika fyzikálních polí (zejména proudění stlačitelného plynu, elektrické proudové pole a magnetické pole). Kapitola pět se věnuje generátorovým vypínačům, a to zejména matematickému popisu jejich činnosti. Vztahy jsou dále realizovány v Matlabu a výsledky simulací diskutovány. Postrádám porovnání s experimentem. Kapitola šest navazuje na předchozí kapitolu a věnuje se třem typickým scénářům zkratů v sítích s alternátory. Je zpracována velmi pečlivě a obsahuje značné množství vlastních výsledků modelů. Opět postrádám porovnání s experimenty. Kapitola sedm posuzuje poměry při zkratu na základě posouzení matice soustavy. Autor využívá open-source výpočetní nástroj MATPOWER. Podstatná část prací na této kapitole vznikla během působení autora na univerzitě v Brunelu. Ačkoliv její obsah jistě souvisí s tématem disertační práce, její zařazení považuji za nadbytečné.

**Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Práce je silně teoreticky zaměřená. Autor vytvořil velké množství vlastních skriptů, které mohou být dále využity v aplikační i univerzitní sféře. Zpracování považuji za nadstandardní. Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, postrádám experimentální ověření předložených modelů.

**Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Práce je napsána v českém jazyce s minimem překlepů. Úroveň jazyka je na velmi vysoké úrovni psaní technického textu. Je rozdělena na 8 kapitol, které jsou dále logicky členěny do několika podkapitol. Dizertační práce dále obsahuje velmi podrobný seznam použitých symbolů. Obsahuje několik příloh, které obsahují zdrojové kódy v jazyce Matlab.

Dizertační práce obsahuje velké množství kvalitně zpracovaných grafů a obrázků, které vhodně doplňují vlastní text.

**Vyjádření k publikacím studenta**

Statement to student's publications

Autor v průběhu svého studia publikoval na 11 konferencích indexovaných ve Web of Science. Na tyto publikace jsou dvě cizí citace. Autorův h-index je 1. Vzhledem k rozsahu a kvalitě práce postrádám publikaci v impaktovaném časopise, kterou bych u studenta doktorského studijního programu očekával. I přes zmíněnou výtku považuji publikační činnost za dostatečnou. Jádrem disertační práce bylo veřejně publikováno.

**Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě**

Total evaluation and questions for defence

Ing. Vladimír Vajnar splnil stanovené cíle doktorské disertační práce. Dizertace obsahuje původní vědecké poznatky v oblasti vypínání zkratových proudů a modelování těchto procesů. Předložená práce je v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. a splňuje požadavky na úroveň doktorských disertačních prací. Doktorand prokázal schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce. Z výše uvedených důvodů doktorskou disertační práci doporučuji k obhajobě.

Otázky a komentáře k práci:

1. Na straně 59 a 60 je zmíněn matematický popis fyzikálního modelu založený na parciálních dif. rovnicích. Rovnice popisující elektromagnetické pole jsou uvedeny jako stacionární. Je tomu skutečně tak?
2. Kapitola 5 a 6 je věnována generátorovým vypínačům a jejich použití v síti. Jakým způsobem byly voleny parametry modelů? Byla provedena verifikace s experimentem, případně jinou prací?

Doporučuji disertační práci k obhajobě  
I recommend the dissertation for the defence

ano  x   
yes no

Datum  
Date

13. 9. 2019

Podpis oponenta:  
Signature of opponent



## POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Oponent: **doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav elektroenergetiky

Autor: **Ing. Vladimír Vajnar**

Název: **„Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických**

**a mechanických dějů“**

---

Předložená disertační práce Ing. Vladimíra Vajnara je zaměřena na problematiku mimořádných spínacích operací vysokonapětových výkonových vypínačů s důrazem kladeným na případy vypínání zkratů s nesymetrickým průběhem a rizikem výskytu oddálené proudové nuly.

Disertační práce sestává z 8 kapitol. V úvodní části práce je stručně představeno téma a jsou definovány cíle práce. V kapitole 2 je proveden základní přehled jednotlivých technologií vypínačů z pohledu principu zhášení oblouku a v kapitole 3 pak rozebrána problematika vypínání zkratů a jednotlivé fáze/intervaly vypínacího procesu.

V kapitole 4 autor popisuje oblouk, jakožto zásadní průvodní jev ovlivňující spínací proces, shrnuje publikované poznatky o jeho modelování, přičemž některé modely jsou ověřeny na praktickém příkladu realizovaném v prostředí Matlab.

Kapitola 5 pak obsahuje vlastní analýzu namáhání vypínače při generátorových zkratech ve dvou úrovních komplexnosti modelu a diskutuje problémy spojené s vypínáním generátorových zkratů. Tato analýza je pak rozpracována dále v kapitole 6, kde je model aplikován na jednoduchou elektrickou síť. Zde postrádám verifikaci vybraných modelů realizovaných v Matlabu.

Realizované studie završuje kapitola 7, kde je navržena metodika analýzy oddálených proudových nul na základě vyhodnocení impedanční matice soustavy, která je aplikována na 3 typy/rozsahy sítí. Jako zajímavý se jeví rozsáhlý model sítě EdF.

V závěru práce je provedeno shrnutí a jsou identifikovány další možné směry navazujícího výzkumu. S těmito lze souhlasit.

### *Zhodnocení významu disertační práce pro obor*

Disertační práce je zaměřena na analýzu problematiky vypínání zkratů v elektrizační soustavě, přičemž cílí na identifikaci potenciálně problémových míst, kde je zvýšené riziko selhání vypínače v důsledku nesymetrických zkratů s výskytem oddálené proudové nuly.

Selhání vypínače je závažnou poruchou v elektrizační soustavě a i přes sofistikovanější systémy chránění, které v případě selhání vypínače zkracují zpoždění působení záložních ochran, stále může vést k významným škodám jak z pohledu spolehlivosti dodávky elektrické energie, tak i poškození zařízení elektrizační soustavy.

Z toho důvodu považuji téma práce za **vysoce aktuální a současně velmi dobře využitelné v elektroenergetické praxi.**

### *Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle*

Autor při řešení práce postupoval standardním způsobem. Nejprve se podrobně seznámil s řešenou problematikou a shrnul základní znalosti a informace potřebné ke splnění cílů práce. Zde oceňuji snahu ověřit si přebírané publikované poznatky s pomocí vlastních simulací. Následně byly získané poznatky ověřeny s pomocí řady simulací, přičemž v závěru byla vytvořena a otestována metodika analýzy oddálených proudových nul na základě vyhodnocení impedanční matice soustavy.

**Použitý postup řešení problému považuji za správný.** Navržená metodika se jeví jako využitelná jak v navazujícím výzkumu, tak i v praxi.

Cíle práce jsou definovány v kapitole 1.3. Tyto lze rozdělit do několika částí. V první části se jedná o rešerši poznatků problematiky časové závislosti vypínací schopnosti a problematiky narušeného vypínání a jejich přehledné zpracování, následně lokalizace a typová definice nejhroženějších míst v soustavě a návrh dílčích protiopatření. Definované cíle jsou v disertační práci řešeny a dosaženy na dobré úrovni s výjimkou posledního uvedeného, kterým je návrh protiopatření. Tato problematika není uceleně popsána; dílčí poznatky je ale možné nalézt v rámci jednotlivých kapitol.

V druhé části kapitoly 1.3 je diskutován současný stav a tato věcně do kapitoly 1.3 nepatří.

I přes uvedenou výtku lze konstatovat, že **cíle práce byly splněny.**

#### ***Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce***

Za hlavní výsledky disertační práce lze považovat:

- ucelené shrnutí problematiky vysokonapěťových vypínačů,
- praktické shrnutí problematiky elektrického oblouku a jeho modelování,
- komplexní analýza zkratů v blízkosti synchronních generátorů z pohledu vypínací schopnosti generátorových vypínačů,
- návrh a ověření metodiky analýzy oddálených proudových nul na základě vyhodnocení impedanční matice soustavy.

Za významný původní přínos autora ke stavu poznání považuji zejména návrh a ověření metodiky analýzy oddálených proudových nul na základě vyhodnocení impedanční matice soustavy.

#### ***Připomínky***

Práce obsahuje určité formální nedostatky. Zejména se jedná o nejednotnost zápisu veličin, číselných hodnot a jednotek. Jednotky používané v textu jsou ve většině případů uváděny v hranatých závorkách a povětšinou psané kurzívou. Mezi číselnou hodnotou a procentem není vynechávána mezera. V některých případech jsou veličiny psány bez použití kurzívy, např. v případě frekvence v Tab. 2.4 na str. 11. Chemické sloučeniny jsou nezvykle psány kurzívou. Velmi nezvyklý je také zápis desetinných čísel, který je rozdílný v tabulkách – bez mezery za desetinnou čárkou a v textu práce s užitím mezery. V grafu na Obr. 2.4 (d) na str. 8 nejsou popsány osy. V Kapitole 2.4 na str. 25 je uvedeno, že plyn SF<sub>6</sub> je přibližně 5x „těžší“ než vzduch. Vhodnějším by bylo použít termín „hustota“ plynu. Pro vyjádření procentní hodnoty z desetinného tvaru je třeba hodnoty vynásobit 100 a ne je 100 vydělit, tak jak je chybně uvedeno na Obr. 3.2 na str. 33. V Kapitole 3.2.5 na str. 37 je chybně uvedena jednotka 245 kA namísto 245 kV. Na konci odstavce na str. 54 chybí tečka na konci věty. V některých kapitolách jsou titulky tabulek uváděny nad tabulkou, v některých pod tabulkou. V textu jsou velmi často jednopísmenné předložky na konci řádku. U některých obrázků, grafů a tabulek není uvedena reference nebo odkaz do seznamu literatury, přičemž se jeví, že jsou převzaté/upravené z použité literatury (např. Obr. 2.5, 2.6, 2.8, 2.10, 2.11, 2.14, 3.2, 4.1,.). V kapitole 6 je u řady grafů v titulku uvedeno: „Průběhy měřených proudů...“. V práci ale není žádný experiment popsán.

#### ***Dotazy***

- Byly nějakým způsobem verifikovány výsledky simulací z programu Matlab?

- Jaká základní dílčí protiopatření selhání vypínačů týkající se principu zhášení oblouku mohou být při identifikaci problémového místa použita?

### *Závěr*

Konstatuji, že **práce splnila zadaný cíl a obsahuje původní části s přínosem pro praxi.** Disertační práce je zpracována na **velmi dobré jazykové úrovni s dobrou grafickou úpravou a stylizována formou umožňující také pedagogické využití práce.** Uvedené připomínky jsou formálního charakteru.

V seznamu vlastních publikací je uvedeno 18 záznamů - článků v konferenčních sbornících, převážně z mezinárodních konferencí. Na WoS je ke dni zpracování posudku evidováno 10 záznamů, h-index 1.

**Jádro disertační práce bylo dostatečně publikováno. Celkově považuji publikační činnost autora za mírně nadprůměrnou, drobným nedostatkem je absence časopisecké publikace.**

Předložená disertační práce dokládá autorovy teoretické znalosti a schopnost aktivně využívat vědecké metody práce pro konkrétní řešení velmi aktuální technické problematiky.

Disertační práce splňuje požadavky kladené na doktorské disertační práce, a proto ji v souladu s §47 zákona č.111/1998 Sb. **doporučuji** k obhajobě před komisí pro doktorské disertační práce.

V Brně dne 30.8.2019

.....  
*podpis oponenta*

## Posudek disertační práce

Autor disertační práce: **Ing. Vladimír Vajnar**

Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, Dr.Sc., dr. h. c.

Pracoviště: ZČU v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Oponent: doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Katedra elektrických pohonů a trakce,

ČVUT FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

### Název dizertační práce: **Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických a mechanických dějů**

Předložená disertační práce je zaměřena na velice komplikované problémy související s provozem elektroenergetické sítě vysokého a velmi vysokého napětí za podmínek náhodných zkratů. Tento problém je velice závažný a jeho řešení je záležitostí všech předchozích, současných i budoucích generací elektrotechniků. Je to dáno vysokou variabilitou poměrů v energetické síti a vlastnostmi jejích klíčových komponent, tj. vypínačů, generátorů a vlastního vedení.

Práce je členěna do **osmi kapitol**, z nichž prvních pět je víceméně přehledových a uvádějících do řešeného problému. Jsou rozebírány základní vlastnosti vypínačů jak dříve používaných, tak současných, v rozvodech VN a VVN. S ohledem na současný stav je pak detailněji rozebrána problematika vakuových a SF<sub>6</sub> vypínačů.

**Třetí kapitola** je věnována teoretickému rozboru vypínání zkratů a detailnějšímu popisu vypínacího procesu již se zaměřením na vakuové a SF<sub>6</sub> vypínače.

Nedílnou součástí této problematiky je i rozbor vlastností elektrického spínacího oblouku a jeho počítačového modelování, popsanych ve **čtvrté kapitole**.

V této partii se již objevují prvé **vlastní přínosy** autora práce v podobě **black-box modelů** elektrického oblouku v programovém prostředí Simulink.

**Pátá kapitola** je věnována analýze zkratových poměrů na svorkách generátoru a namáhání generátorového vypínače. Pro tyto případy doktorand vytvořil **rozšířený analytický model**, využitelný pro analýzu dějů během zkratu za různých počátečních podmínek.

Funkčnost modelu je doložena prezentací naměřených výsledků v grafickém 2D a 3D zobrazení.

**Šestá kapitola** je pak určitou syntézou předchozích kapitol, v níž autor práce modeluje celou část energetické soustavy a analyzuje zkratové děje v různých místech této soustavy a jejich vliv na vypínače. V rámci této kapitoly byla provedena celá řada výpočtů, potřebných pro zadání výchozích parametrů do počítačového modelu. Poté byla provedena simulace řady jednofázových a třífázových jak symetrických, tak asymetrických zkratů a byly studovány vlivy okamžiku počátku zkratu na velikost asymetrie a míru oddálení nul proudu.

Předchozí části práce vyústily do **sedmé kapitoly**, kde si doktorand vytkl za cíl vyvinout nástroj pro apriorní identifikaci kritických míst energetické soustavy, založený na vyhodnocení parametrů X a R v jednotlivých místech sítě a tím prozkoumat možné nebezpečí výskytu zkratových proudů s velkou asymetrií a oddálenými proudovými nulami. Na základě výpočetního nástroje MATPOWER a jím navržených automatických skriptů pro analýzu impedanční matice soustavy provedl několik případových studií, vycházejících z již dříve publikovaných analýz sítě IEEE 14-Bus Case, IEEE 30-Bus Case a RTE 2848-BUS, na nichž ověřil svůj výpočetní nástroj.



Práce jako celek představu originální nástroj pro analýzu rizikových stavů v různých částech energetické sítě a z tohoto pohledu je naprosto ojedinělá.

Při jejím zpracování autor prokázal velkou erudici a hluboké znalosti z oblasti elektrických přístrojů, elektrických sítí a matematického modelování. Z tohoto pohledu je práce velice užitečnou syntézou všech výše zmíněných disciplín a **svými výsledky je skutečně ojedinělá.**

K práci nemám žádné výhrady, jen bych v rámci diskuse při obhajobě rád slyšel názor autora na následující problémy:

1. Je možné alespoň částečně verifikovat (bez rizika ohrožení chodu sítě) některé výsledky simulací?
2. Bylo by prakticky možné do kritických míst soustavy (např. rozvoden) trval instalovat rychlé záznamníky přechodných dějů, z nichž by bylo možné lépe stanovit potřebné parametry pro počítačové modely sítě?
3. Proč nebyla provedena případová studie provedena pro nějakou část sítě na území české republiky?

### **Závěrečné hodnocení**

Doktorand během svého studia prokázal dlouhodobé působení v oblasti elektroenergetiky a využití simulačních metod. Za dobu doktorského studia publikoval osmnáct příspěvků na konferencích a článků ve sbornících. Dále je spoluautorem dvou výzkumných zpráv, přednesl dvě odborné přednášky na zahraničních univerzitách a spoluautorem dalších devíti publikací, které nejsou přímo svázány s předmětem dizertační práce.

Vlastní doktorskou práci považuji za originální a velice přínosnou z hlediska identifikace potenciálně nebezpečných míst v energetických sítích a posuzování kritických parametrů spínacích přístrojů v těchto sítích.

**Práci doporučuji bez výhrad k obhajobě.**



V Praze, 29. 5. 2019

doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.