

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**PREZENTACE MEZNÍ PROVOZNÍ OBLASTI SYNCHRONNÍHO ALTERNÁTORU V
IMPEDANČNÍ ROVINĚ**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Denis USTIUZHANIN**
Osobní číslo: **E17B0056P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Prezentace mezní provozní oblasti synchronního alternátoru v im-
pedanční rovině**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

Vytvořte prezentační interaktivní aplikaci pro web, ukazující parametricky pracovní oblast synchronního alternátoru:

1. Zapište algoritmus převodu mezních výkonových parametrů alternátoru do impedanční roviny.
2. Zpracujte algoritmus do interaktivní webové aplikace s proměnnými parametry včetně typických charakteristik pro alternátory.
3. Výsledné omezující křivky graficky znázorněte s respektováním získaných výsledků.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

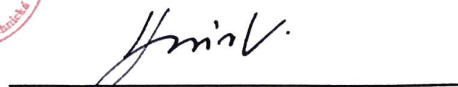
1. Beran M., Iblér Z. – Elektrárny II.
2. Beran M. – Elektrická zařízení tepelných elektráren.
3. Manuál PHP.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na tvorbu webové aplikace, pomocí které lze snadno převést hodnoty z P-Q roviny do roviny impedanční. Daná práce uvádí algoritmus a grafickou realizaci převodu dat v podobě grafické aplikace. Tento algoritmus využívá spojení "Javascript", "HTML" a "CSS". Tato aplikace by mohla být užita pro studijní účely, pro demonstraci změn impedancí v závislosti na změnách, prováděných v rovině P-Q. Dále jsou detailní popis funkčnosti aplikace a specifikace oblasti použití.

Klíčová slova

Synchronní alternátor, PQ diagram, impedanční rovina, web aplikace, převod dat.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the creating of the web application, that helps to convert values from a PQ plane to a impedance plane. This work shows the algorithm and graphical realization of this data conversion as graphical application. The algorithm is driven by "Javascript", "HTML" and "CSS". This application may be used for studing or demonstration of changes of impedance in depending on changes in P-Q plane. Both the features and the specification are situated further.

Key words

Synchronous alternator, PQ plane, impedance plane, web application, data converting.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Doc. Ing. Karlu Nohačovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 16.6.2020

Denis Ustiuzhanin

Obsah

Seznam symbolů.....	9
Obecné symboly.....	9
Symboly v kódu.....	10
Úvod.....	11
I. Princip synchronního stroje.....	12
1. Význam a použití synchronních strojů.....	12
2. Princip činnosti synchronního generátoru.....	12
3. Rozdělení.....	13
4. Režimy synchronních strojů.....	13
5. Řízení výkonu synchronního alternátoru.....	14
II. P-Q rovina.....	14
1. Princip P-Q diagramu.....	14
2. Omezení P-Q roviny.....	17
3. Princip převodu P-Q roviny do impedanční roviny.....	17
III. X-R impedanční rovina.....	20
1. Princip impedanční roviny.....	20
2. Použití impedanční roviny.....	21
IV. Tvorba algoritmu.....	21
1. Volba technologie.....	21
2. Popis jazyka “JavaScript”.....	21
3. Struktura programu.....	21
4. Obsluha programu.....	24
5. Technické požadavky na počítač.....	29
V. Závěr.....	30
VI. Seznam použitých pramenů.....	31
VII. Přílohy.....	32
Příloha 1. Pomocné matematické funkce.....	32
Příloha 2. Zaokrouhlovací funkce.....	32
Příloha 3. Vykreslovací funkce.....	33
Příloha 4. Skutečný diagram Tušimice.....	35

Seznam symbolů

Obecné symboly

I - Proud (proud alternátoru)

U - Napětí (svorkové napětí)

R - Odpor (odpor vinutí kotvy)

X - Reaktance

Z - Impedance

U_i - Výsledné indukované napětí v kotvě

U_{ib} - Indukované napětí v kotvě

X_{ad} - Reaktance respektující reakci kotvy

X_σ - Rozptylová reaktance

φ - Zatěžovací úhel

P - Činný výkon

P_n - Jmenovitý činný výkon

P_{max} - Maximální činný výkon

P_{min} - Minimální činný výkon

Q_n - Jmenovitý jalový výkon

S_n - Jmenovitý zdánlivý výkon

I_n - Jmenovitý proud

I_{max} - Maximální proud (statorový)

I_{ef} - Efektivní hodnota proudu

I_b - Budící proud

I_{bmax} - Maximální budící proud

I_{bmin} - Minimální budící proud

Symboly v kódu

I_{b_max} - Maximální budící proud

I_{b_min} - Minimální budící proud

I_{s_max} - Maximální statorový proud

I_s - Statorový proud

P_{t_max} - Maximální výkon turbíny

P_{t_min} - Minimální výkon turbíny

Static_stability_limit - Limita statické stability stroje

Overheating - Maximální ohřátí čel stroje

Úvod

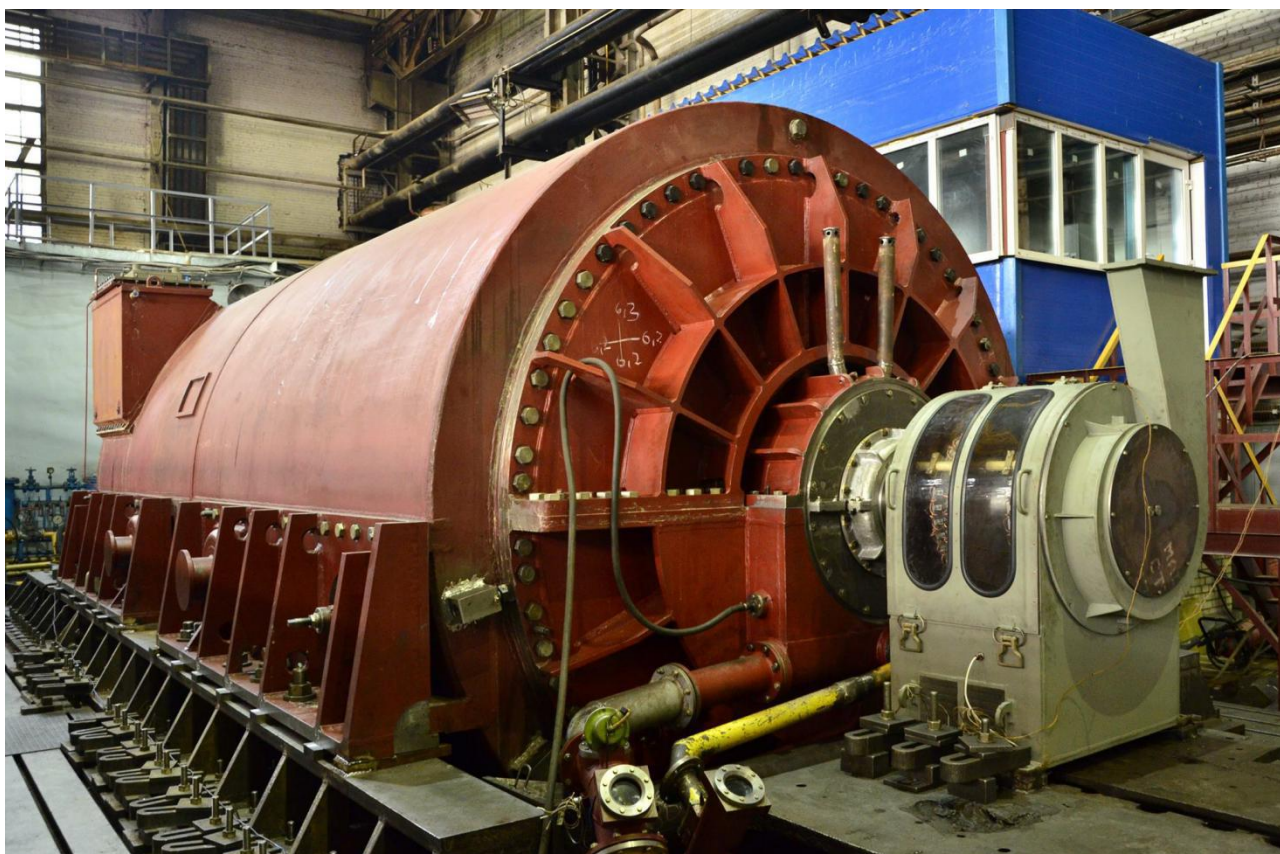
Synchronní alternátor je nejpoužívanější stroj pro výrobu elektrické energie v elektrárnách. Muže také pracovat v motorickém režimu. Tento typ alternátoru má poměrně vysokou účinnost a umí produkovat poměrně velké elektrické výkony.

Cílem mojí práce bylo vytvořit algoritmus, která dokáže převést mezní parametry zadaného P-Q diagramu na impedanční X-R rovinu. Toto může sloužit jako pomůcka při nastavování či návrhu budících systémů a systémů ochrany synchronního alternátoru.

I. Princip synchronního stroje

1. Význam a použití synchronních strojů

Synchronní stroj je v současné době využíván jako alternátor pro výrobu elektrické energie až přes 1000MW nebo motor pro pohon průmyslových zařízení velkých výkonů. Synchronní stroje umí pracovat s účinnkem blížícím se k jedné, to jest odebírají pouze činný výkon ze sítě.



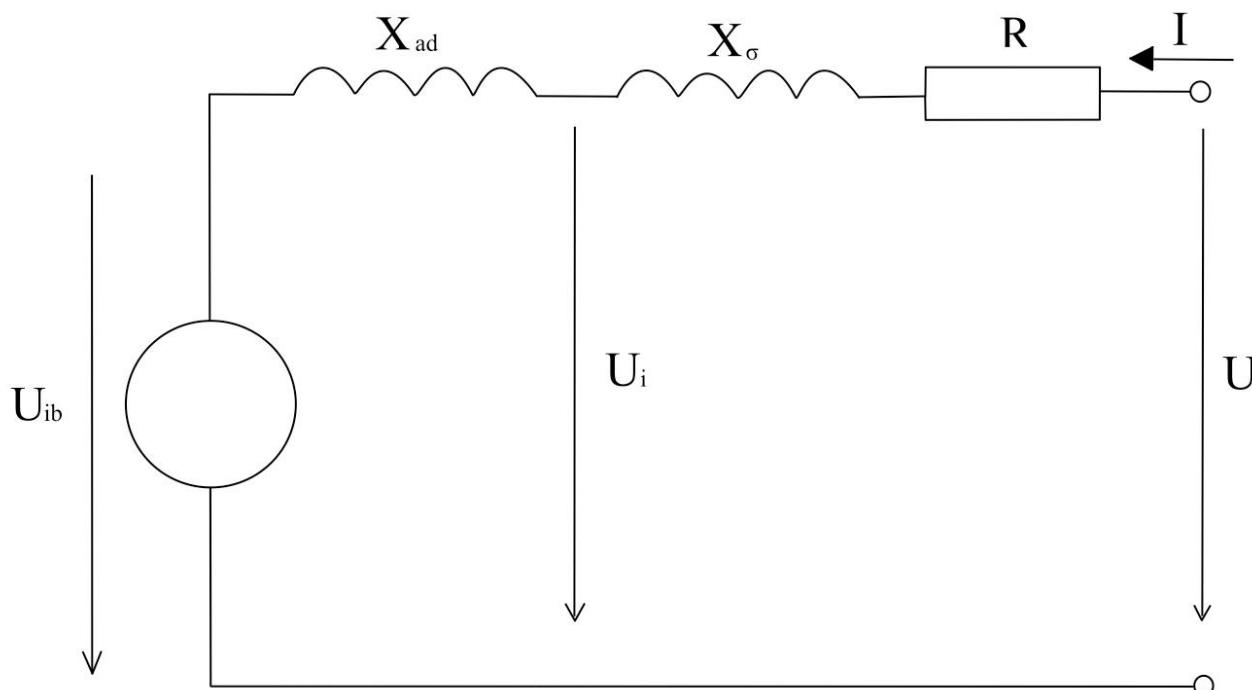
Obr. 1. Turboalternátor[1]

Synchronní stroje se používají pro zajištění dlouhodobé nepřetržité výroby energie na stálých otáčkách.

Jednu zvláštní skupinu tvoří synchronní kompenzátory. Jedná se v podstatě o motory, jejichž účelem je dodávání jalového proudu jiným zařízením, které jsou připojeny na danou síť. Tato dodávka se provádí v případech, kdy jiné generátory nejsou schopny dodat potřebné množství jalové energie[2].

2. Princip činnosti synchronního generátoru

Synchronní generátor je točivý stroj. Na statoru jsou vinutí fázově posunuta o 120° . Na rotoru jsou vinutí napájena stejnosměrným proudem, která tvoří stejnosměrné magnetické pole, siločáry tohoto pole se uzavírají přes stator. Když se rotor otáčí, siločáry protínají vinutí statoru a indukují se v těchto vinutích napětí.



Obr. 2. Náhradní schéma synchronního stroje[3]

Místo vinutí na rotoru mohou být permanentní magnety. Tyto stroje se však v současné době používají pouze pro malé výkony.

3. Rozdělení

Synchronní generátory lze rozdělovat na stroje s hladkým rotorem a stroje s vyniklými póly. Stroje s hladkým rotorem tvoří skupinu tak zvaných turbostrojů, používají se na elektrárnách s parní nebo plynovou turbínou. Tento typ strojů pracuje na velmi vysokých otáčkách. Vyniklé póly se projektují pro hydrostroje, které jsou většinou poháněny vodní nebo větrnou turbínou.

Synchronní motory jsou stroje, které pracují v motorickém režimu. Stejně jako u generátorů, motor může být vyroben ve dvou různých variantách, s hladkým rotorem nebo s vyniklými póly. Na rozdíl od generátoru je třeba pro motor zajistit rozběh buď pomocí pomocného asynchronního motoru, pomocí další rozběhové klece nebo dnes pomocí frekvenčního měniče.

4. Režimy synchronních strojů

Synchronní stroje mohou pracovat jak v motorickém, tak i v generátorickém režimu. Přechod z generátorického režimu do motorického probíhá, když poháněcí moment přejde na hřídeli v mechanické zatížení. Přechod z motorického režimu do generátorického proběhne při opačném procesu.

V rámci této bakalářské práce je ukázána pouze problematika generátorického režimu. Skutečný stroj však může pracovat v obou režimech v závislosti na požadavcích.

5. Řízení výkonu synchronního alternátoru

Výkon lze řídit buď změnou otáček rotoru, pomocí změny množství dodané páry nebo regulací budícího proudu.

V rámci této bakalářské práce při změně jednoho parametru lze očekávat změnu celého diagramu (resp. změnu obou diagramů). V podstatě změnou maximálního výkonu turbíny nejde přímo ovlivnit maximálně možný statorový proud, ale lze touto změnou ovlivnit část diagramu, kterou tyto parametry vymezují.

P-Q diagram může být vhodnou pomůckou při řízení provozu alternátoru.

II. P-Q rovina

1. Princip P-Q diagramu

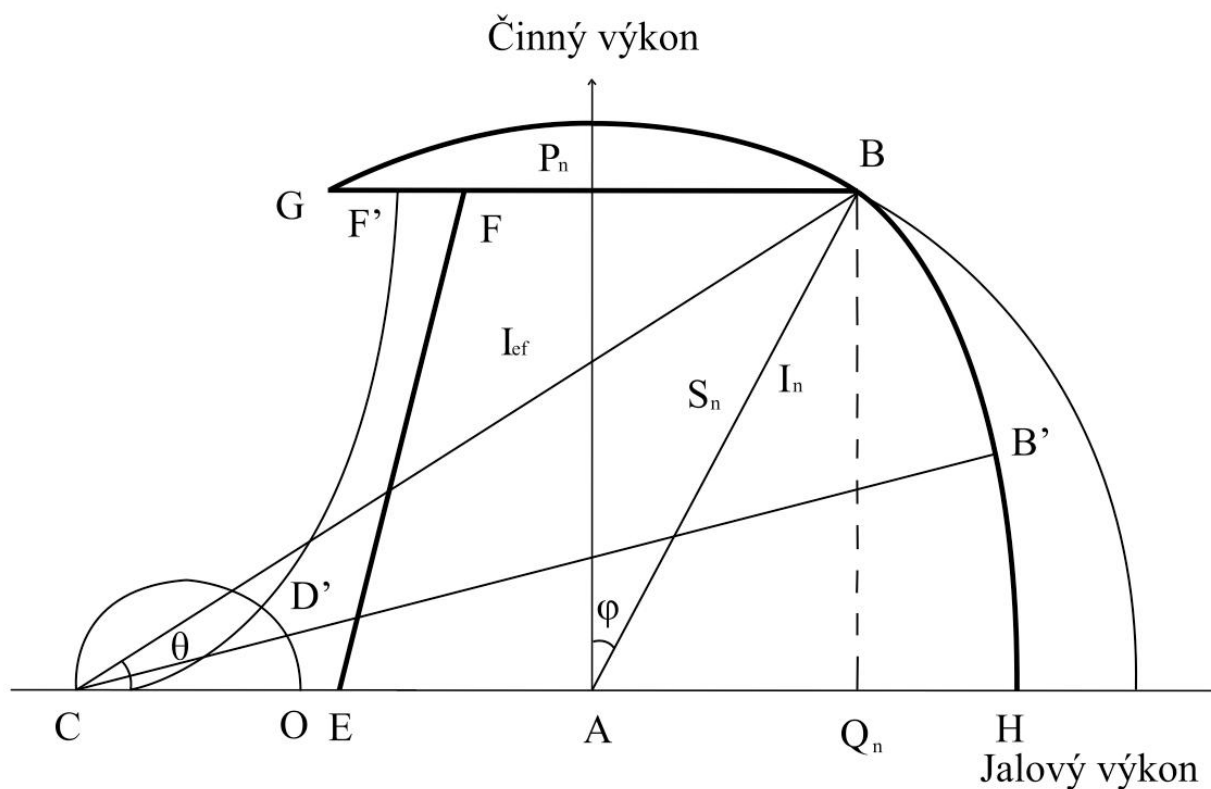
Provoz alternátoru je nutné řídit nejen podle velikosti činného výkonu dodávaného do sítě, ale je nutno také sledovat podíl jalového zatížení a směr toku jalové energie. Protože je spotřeba jalové energie v elektrizační soustavě během určitých časových úseků proměnná, proto je třeba mít u alternátorů k dispozici určitý regulační rozsah jalového výkonu k udržení stanovených mezí napětí v uzlových bodech soustavy. Z hlediska dispečerského řízení elektráren a přenosových sítí je vedle otázky řízení napětí nutno sledovat ekonomii přenosu jalové energie a s tím související zatěžování jednotlivých alternátorů a elektráren jalovým výkonem.

Při odlehčení elektrizační soustavy je třeba, aby alternátory byly schopny pracovat i ve stavu odbuzení. Při tomto stavu rostou nároky na kvalitu regulace napětí a požadavky na udržení stroje v synchronním chodu v oblasti umělé stability. Proto jsou u každého alternátoru stanoveny meze nejdůležitějších provozních hodnot, které jsou obvykle udány v pracovním P- Q diagramu alternátoru. Podle tohoto P-Q diagramu se nařizují regulační a ochranné systémy alternátoru, které automaticky regulují a udržují sledované hodnoty ve stanovených mezích[4].

Protože provoz alternátoru v motorickém chodu není dovolen, redukuje se oblast povolených stavů na I. a II. kvadrant[4].

P-Q diagram byl odvozen od klasického fázorového diagramu. Tento diagram je syntetický a vymezuje provozní oblast alternátoru s ohledem na zahřívání aktivních částí a statistickou stabilitu stroje. Diagram je sestaven v P-Q souřadnicovém systému, kde P je činný výkon, Q je jalový výkon. Změna jednoho parametru vede na změnu provozní oblasti celého diagramu.

V praxi se zjistilo, že mohou být použity jak teoretický diagram (odvozen z fázorového diagramu), tak i skutečný (kde křivky reprezentují izotermy nejvyšší přípustné teploty různých aktivních částí). Skutečný diagram musí být stanoven zkouškami. Normálně tyto dva diagramy jsou ekvivalentní, ale bylo ukázáno, že s časem vznikají rozdíly mezi těmito diagramy. V tomto případě se používá skutečný diagram.

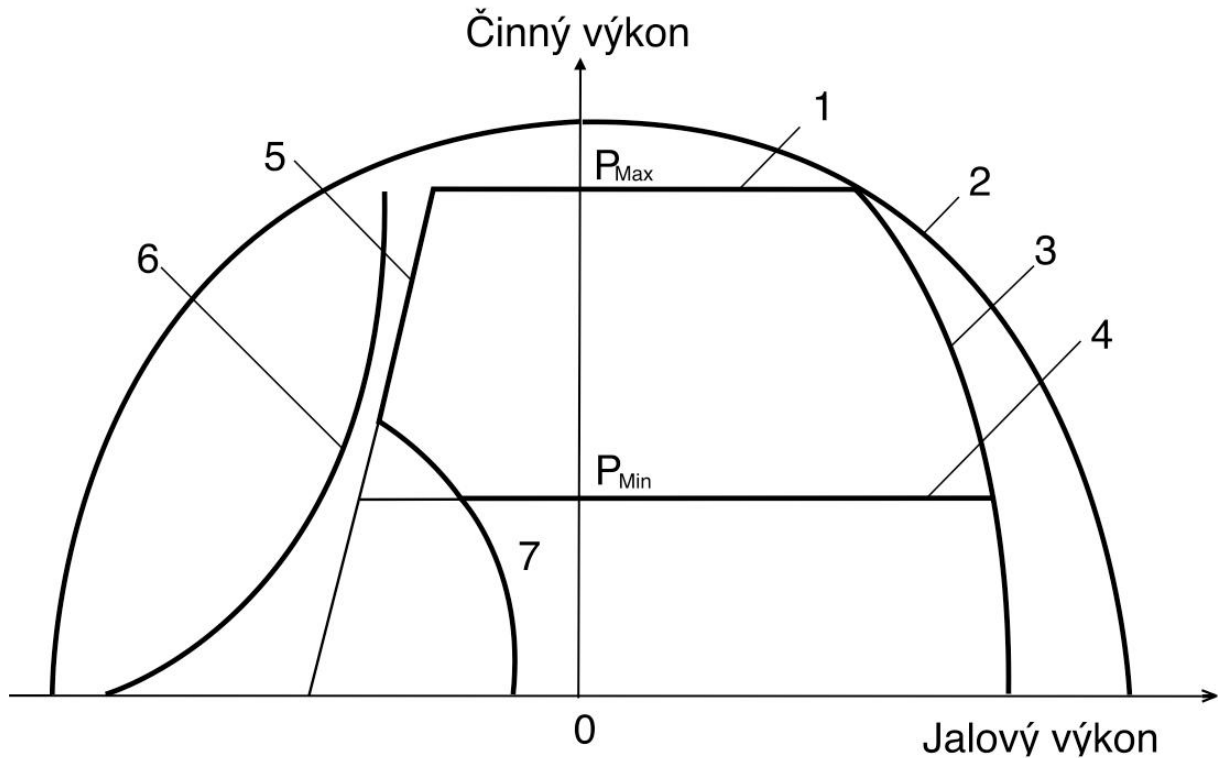


Obr. 3. Teoretický P-Q diagram hydroalternátoru[5]

Zde:

- AB - Maximální statorový proud
- BH - Kružnice maximálního budícího proudu
- CO - Kružnice minimálního budícího proudu
- CF' - Křivka mezní stability stroje
- EF - Mezní ohřátí čel stroje
- GB - Maximální výkon turbíny

Vzdálenost mezi středem kružnic budících proudů a středem kružnice maximálního statorového proudu je uměrná velikosti budícího proudu naprázdno[4].



Obr. 4. Skutečný P-Q diagram hydroalternátoru[5]

Zde:

- 1) Maximální výkon turbíny
- 2) Kružnice maximálního statorového proudu
- 3) Kružnice maximálního budícího proudu
- 4) Minimální výkon turbíny
- 5) Křivka maximálního ohřátí čel stroje
- 6) Křivka mezní stability stroje
- 7) Kružnice minimálního budícího proudu

Jak je vidět na obrázcích, jsou tady jak proudy tak i výkony. Diagramy těchto dvou veličin v proudové a výkonové rovině jsou podobné, liší se to pouze měřítkem. Pro lepší přehlednost tyto dvě roviny jsou “sjednoceny”. Pro proudy zde jsou zvoleny ampéry, pro výkon kilowatty.

Při tvorbě diagramu jsou důležité poměry některých veličin (proudů a výkonů). Tyto parametry znázorňují relativní velikost vůči všem parametrům v rámci této roviny. Níže jsou uvedeny nejsůležitější poměry.

$$\begin{aligned}I_b &= 3 \\I_{bmax} &= 3,5 \\I_n &= 1 \\I_{max} &= 1,5 \\P_{max} &= 1,1 \\P_{min} &= 0,6\end{aligned}$$

Tyto poměry jsou přibližné, platí pro běžnou konstrukci alternátoru. Pro korektní práci je vhodné je respektovat. U různých strojů se tyto poměry mohou lišit v závislosti na konstrukci.

Při dodržování těchto poměrů křivky a kružnice se blíží normálním. Jde toto aplikovat ve skutečném stroji, ale velikosti výkonů a proudů musí být přepočtené na relativní hodnoty.

2. Omezení P-Q roviny

P-Q diagram vymezují maximální popřípadě minimální budící proud, maximální statorový proud, maximální popřípadě minimální výkon turbíny, limita statické stability stroje a ohřev v čelním prostoru způsobený velkým magnetickým polem.

Maximální a minimální budící proud jsou kružnice s počátkem posunutém vůči nule o velikost, závislou na velikost proudů i_b .

Maximální statorový proud je ohraničen kružnicí s počátkem v nule o poloměru maximální hodnoty proudů stroje. Maximální statorový proud I_{\max} je dán dovoleným oteplením statorového vinutí a určuje tak mezní výkon alternátoru[4].

Minimální a maximální výkon turbíny jsou přímky, které nejsou úplně mezní parametry turbíny. V případě, že provoz turbíny není vhodný pod určitou hodnotou výkonu z hlediska nákladů, zavádí se omezující přímka minimálního výkonu. Přímka maximálního výkonu reprezentuje čistě maximální dostupný výkon elektrárenského bloku.

Při překročení limity statické stability stroje vypadne stroj ze synchronizmu. Tato limita je dána podmínkou stabilního chodu alternátoru[4]:

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} > 0 \quad (1)$$

Limitní křivka magnetického pole v čelech stroje omezuje pracovní oblast s ohledem na vliv tepelných účinků. Oteplení komtrukčních částí čelního prostoru souvisí s vířivými proudy, které jsou vyvolány magnetickým tokem vnikajícím z prostoru spojek statorového vinutí do čelní plochy magnetického obvodu státoru[4].

Hranice tohoto diagramu a X-R diagramu rozdělují prostor stavů přípustných a stavů nepřípustných[6].

3. Princip převodu P-Q roviny do impedanční roviny

Převod P-Q diagramu do impedanční roviny spočívá v získání obrazů parametrických funkcí všech omezujících křivek.

Pro převod je využívána analogie se symbolickou komplexní metodou. Pomocí parametrických rovnic kružnic nebo přímek z P-Q diagramu se stanoví body v omezeném, ale v dostatečném počtu tak, aby se na jejich základě dalo nakreslit inverzní kružnici. Pak se provádí získání zpětných recipročních hodnot. Z těchto hodnot lze sestavit výslednou

inverzní kružnici. Převod je inverzní, neboť se využívá inverzita ve smyslu nepřímé úměrnosti.

Dále je uveden postup pro převod hodnot:

$$\overline{bod} = x + iy \quad (2)$$

Ve vztahu (2) jsou znázorněny souřadnice jednoho bodu na P-Q diagramu.

$$abs = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

Vztah (3) pomáhá najít vzdálenost tohoto bodu od počátku.

$$\phi = \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4)$$

Tentokrát vztah udává úhel mezi osou "x" a přímkou spojující daný bod s počátkem.

$$\overline{bod} = abs \cdot e^{-j\phi} \quad (5)$$

Zde je poloha bodu v fázorovém tvaru:

$$\overline{bod}^{-1} = \frac{1}{\overline{bod}} \quad (6)$$

Vztah (6) ukazuje převrácenou hodnotu tedy hodnotu reciproční.

Pro maximální výkon turbíny by převod vypadal takto:

$$y = P_{max} \quad (7)$$

$$\phi = \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (8)$$

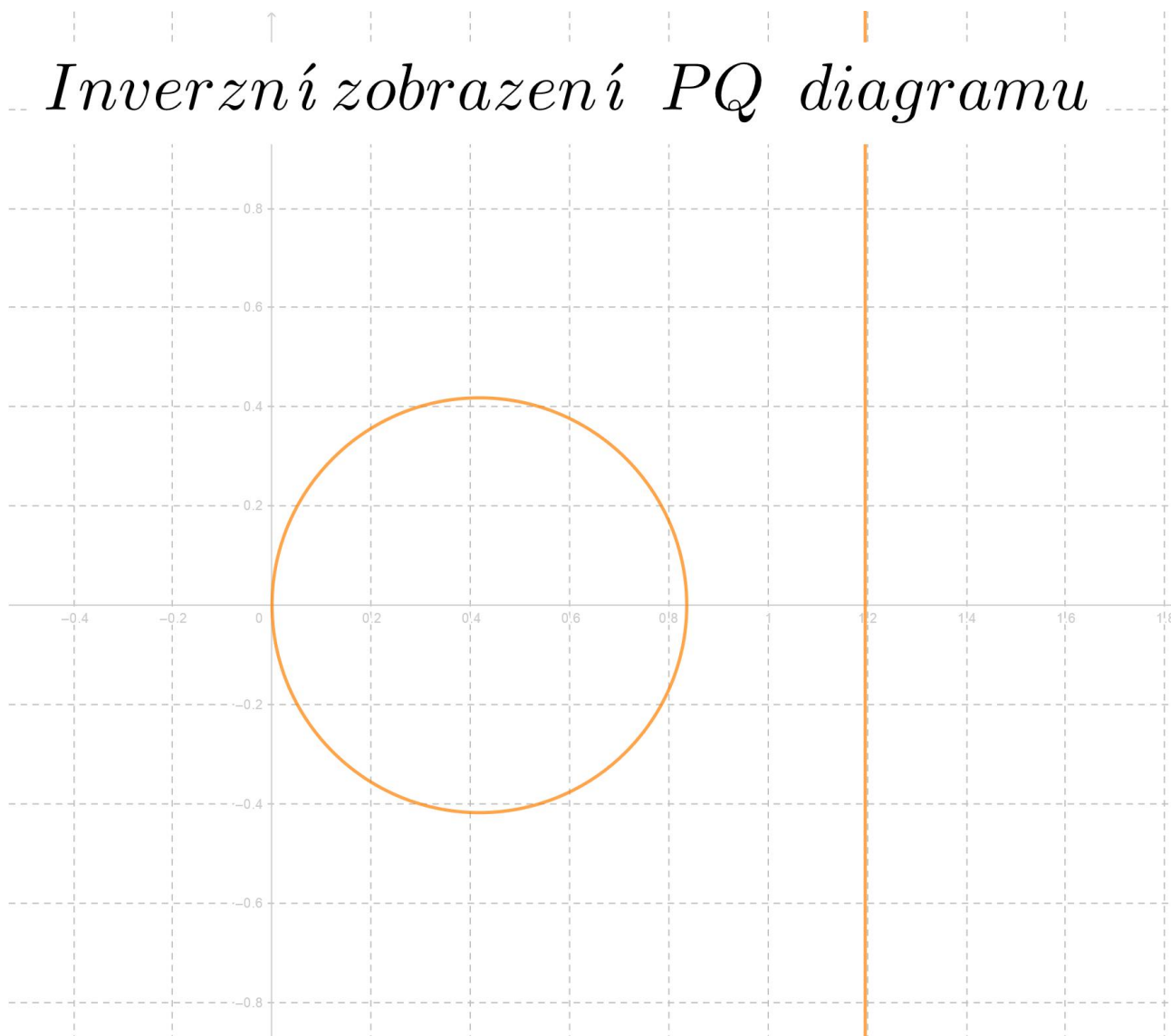
$$abs^{-1} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (9)$$

$$abs^{-1} \cdot e^{-j\phi} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + P_{max}^2}} \cdot e^{-j\phi} \quad (10)$$

Vztah (10) udává inverzní hodnotu maximálního výkonu turbíny ve komplexní formě. Lze toto brát jako souřadnice kružnice v impedanční rovině. Po jednoduchých úpravách rovnici (10) lze převést na následující tvar:

$$(abs^{-1})^2 = \cos^2(-\phi) \cdot (abs^{-1})^2 + \sin^2(-\phi) \cdot (abs^{-1})^2 = x^2 + y^2 \quad (11)$$

Poznámka: ve vztahu (11) "x" a "y" jsou souřadnice v impedanční rovině.



Obr. 5. Grafické znázornění uvedených vztahů pro P_{\max} . Ilustrace z programu, který byl vytvořen v prostředí "Geogebra"[9]

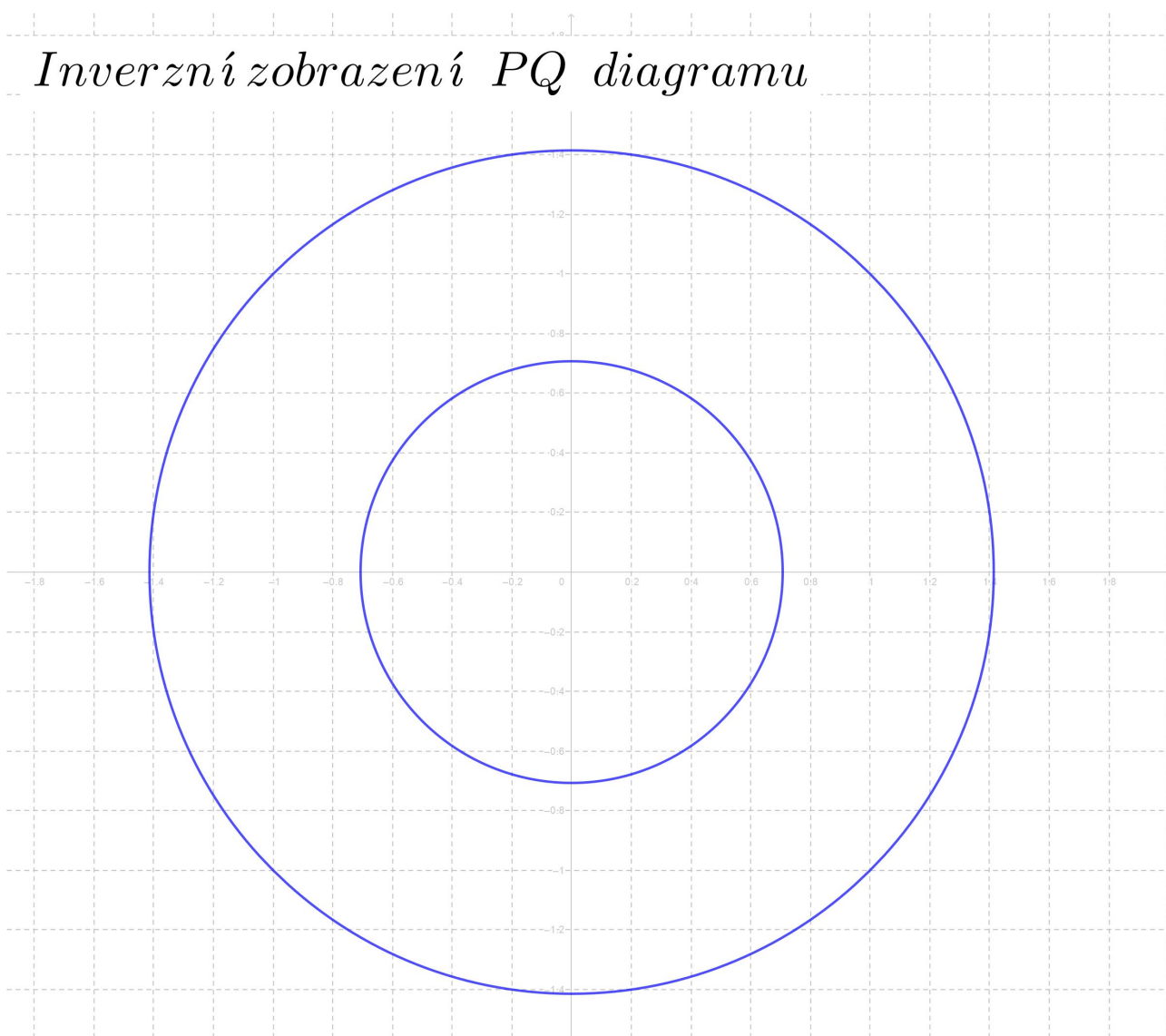
Pro maximální statorový proud by převod vypadal takto:

$$y = \pm \sqrt{I_{\max}^2 - x^2} \quad (12)$$

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (13)$$

$$\text{abs}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (14)$$

$$\text{abs}^{-1} \cdot e^{-j\phi} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + I_{\max}^2}} \cdot e^{-j\phi} \quad (15)$$



Obr. 6. Grafické znázornění uvedených vztahů pro I_{s_max} . Ilustrace z programu "Geogebra"[9](velká kružnice - P-Q roviny, malá kružnice - impedanční rovina)

III. X-R impedanční rovina

1. Princip impedanční roviny

Diagram o souřadnicích R-X se vytváří inverzí diagramu P-Q p a je výhodný pro mapování činnosti ochran bloku[6].

2. Použití impedanční roviny

Při návrhu stykačů a ochranných zařízení napájecího systému je třeba provést analýzu impedančního diagramu. V tomto diagramu se může sledovat trajektorie změny impedanční oblasti a také její chování při různých nastaveních, při zkratech a při odbuzování alternátoru. Tato informace je potřebná pro nastavování parametrů stykačů a relé[7].

IV. Tvorba algoritmu

1. Volba technologie

Jako základní technologie byl zvolen programovací jazyk "JavaScript". Tento prostředek má speciální knihovny pro tvorbu grafů ve webovém prostředí. také daný jazyk lze snadno začlenit do "HTML" souboru, což má za následek jednodušší provoz tohoto programu na serveru oproti programovacímu jazyku "Python", který by vyžadoval dodatečné zpracování vstupu a výstupu. Zároveň tato technologie zjednodušuje přístup k systému ze strany uživatele, protože dnes většina prohlížečů nepotřebuje žádnou změnu konfigurace nebo instalaci doplňků.

2. Popis jazyka "JavaScript"

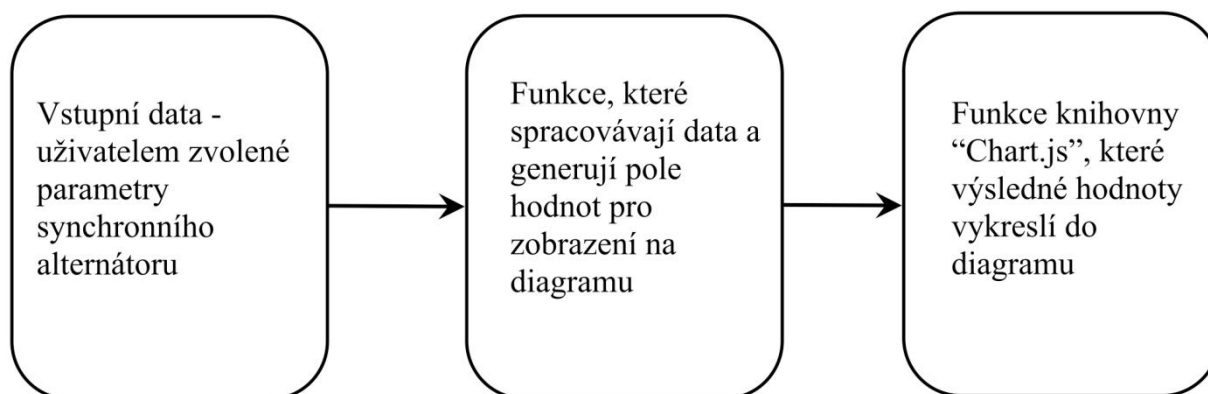
"JavaScript" je multiplatformní, objektově orientovaný, událostmi řízený skriptovací jazyk, jehož autorem je Brendan Eich z tehdejší společnosti Netscape[6]. Tento jazyk umožňuje rychlé psaní kódu díky jednoduché syntaxi. Jedna z výhod tohoto "JavaScriptu" je jeho dynamická typizace proměnných. Syntaxe přináší i další výhody, například dobrou přehlednost a snadnou přípravu a inicializaci vlastních funkcí.

V dnešní době se tento jazyk nejčastěji používá při napsání webových stránek jako doplněk k "HTML"[8].

Vzhledem k tomu, že pro "JavaScript" lze provádět pouze "just-in-time" kompilaci, je tento jazyk velice lehký a nenáročný z "hardwarevého" hlediska. Jinými slovy, programátor nepotřebuje nejmodernější procesor aby kompilace byla téměř okamžitá na rozdíl od programovacích jazyků "C", "C++" nebo "Java".

3. Struktura programu

Algoritmus byl vytvořen pomocí téměř 1500 řádků kódu "Javascriptu", "HTML" a "CSS"(viz. přílohy 1 a 2). Dané řešení má pouze globální proměnné, lokální proměnné a jednotlivé funkce, jejichž úkolem je sestavit pole hodnot, které následně knihovna "Chart.js"[10] dokáže zobrazit graficky v podobě webové aplikace.



Obr. 7. Schéma, popisující základní princip práce algoritmu pro P-Q rovinu

Program začíná inicializací všech proměnných, které ve výchozím stavu mají přednastavené doporučené hodnoty. Dojde-li k přenastavení jedné nebo více hodnot, program, v závislosti na tom, kterou proměnou uživatel změnil přiřadí nové hodnoty odpovídajícím proměnným.

Vstupní data si uživatel nastaví taková, jaká si bude přát. Tato data se ukládají do globálních proměnných, které jsou přístupné pro všechny funkce “uvnitř” tohoto programu.

Následně probíhá aktualizace polí hodnot a aktualizace grafu.

Na vstupu vykreslovací funkce knihovny “Chart.js” musí být pole hodnot. Tyto hodnoty se vypočítávají ve speciálních funkcích, přičemž každá funkce generuje hodnoty pouze pro jeden objekt z P-Q diagramu.

Pro návrat k výchozím nastavením se používá funkce, která přímo napojená na tlačítko "Reset". Tato funkce aktualizuje nejen hodnoty "uvnitř" programu, ale rovnou i hodnoty, které před sebou má uživatel v otevřeném HTML souboru.

Další důležitou funkcí je funkce, jejímž úkolem je zabezpečit tak velkou přesnost, jakou je třeba mít pro správné vykreslování prvků do diagramů. Tato funkce v podstatě provádí zaokrouhlování hodnot na odpovídající počet desetinných míst. Pro lepší přehlednost celého kódu a také z důvodu různých nároků, které jsou kladeny na objekty na prvním diagramu a na druhém diagramu, je tato funkce rozdělena na dvě nezávislé funkce.

První funkce nechává u čísla 3 desetinné místa. Toto se používá většinou na druhém diagramu a je to vhodné pro kreslení kružnic z velkého množství hodnot.

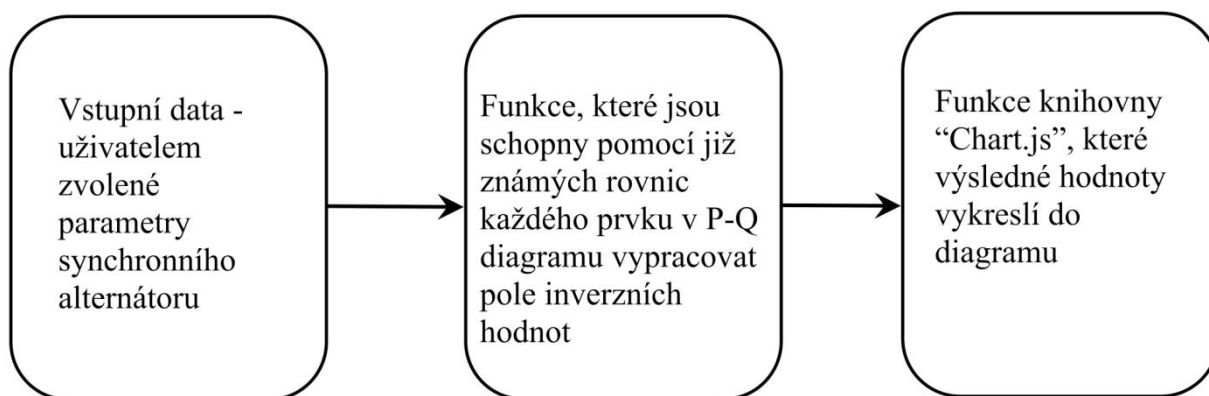
Druhá funkce zaokrouhluje pouze na 2 desetinné místa. Toto se používá na prvním diagramu pro vykreslování kružnic pomocí malé množiny bodů.

Aby bylo možné určit střed kružnic ib_{min} a ib_{max} , používá se funkce pro hledání středu těchto kružnic. Metoda hledání spočívá v tom, že jsou dány účinník, maximální velikost budícího proudu a maximální velikost statorového proudu. Zpočátku s repektováním účinníku je proložena přímka tak, aby tato přímka protнула kružnici is_{max} , z

tohoto bodu se kreslí (imaginárně, na výsledném diagramu tato kružnice není) kružnice o poloměru ib_{max} . Hledá se průsečík této kružnice a vodorovné osy. Tento bod je právě středem kružnic ib_{max} a ib_{min} .

Také stojí za pozornost řada důležitých matematických funkcí, které podstatně zjednodušily proces tvorby celé aplikace. Tyto funkce využívají standardní knihovnu "Math" a poskytují možnost pracovat s geometrickými funkcemi "sin", "cos", "tan" apod.

S využitím všech výše zmíněných funkcí lze sestavit odpovídající diagram v impedanční rovině. Převod se provádí "inverzí" hodnot pomocí již zmíněných vztahů (1) - (7). Při převodu přímky na inverzní kružnici, výsledná kružnice se skládá ze dvou polokružnic (někdy z čtvrtkružnic, například Is_{max} , která prochází všemi kvadranty). proto pro naplnění pole hodnot je zapotřebí vytvořit kladnou a zápornou sadu hodnot.



Obr. 8. Schéma, popisující základní princip práce algoritmu pro X-R rovinu

Znamé rovnice se vezmou z první části algoritmu, ve kterém se vypočítávají hodnoty pro P-Q rovinu.

Pro lepší přehlednost jsou v impedanční rovině osy umístěny jinak, než na P-Q diagramu. Aby při přepočtu hodnot šlo diagram ještě otočit, byla vymyšlena funkce, která hodí hodnoty z jednoho kvadrantu do druhého.

Pro zjednodušené nastavení parametrů křivky reprezentující maximální ohřátí čel stroje na P-Q diagramu je pouze úsečka, která spojuje 2 body. Aby se s touto křivkou dalo pracovat v rovině impedanční, byla vymyšlena funkce, která hledá parametry odpovídajícího objektu. Je třeba podotknout, že tato křivka je složena z jednotlivých přímek, proto se budou hledat právě parametry přímky.

Metoda hledání parametrů funkce přímky se používá pro zjišťování parametru "k" a parametru "b". Například, když jsou známé souřadnice dvou bodů přímky, lze je popsat pomocí vztahů (15) a (16).

$$y_1 = k \cdot x_1 + b \quad (16)$$

$$y_2 = k \cdot x_2 + b \quad (17)$$

Při odečtení (17) - (18) lze získat následující vztahy:

$$k = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (18)$$

Pro získání parametru "b" je třeba dosadit hodnotu, získanou ve vztahu (18) do vztahu (16) nebo (17).

$$b = y_1 - k \cdot x_1 \quad (19)$$

4. Obsluha programu

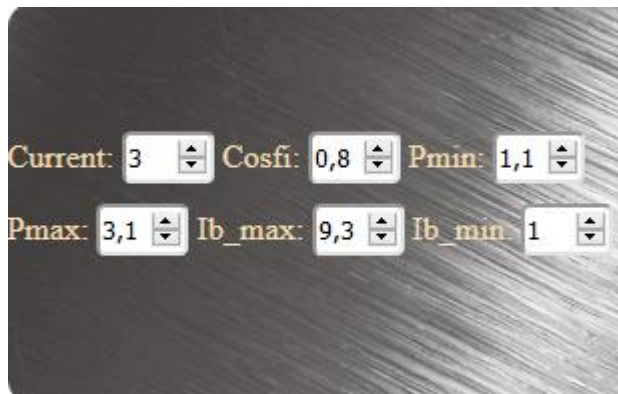
Při programování bylo nutné vytvořit rozhraní programu tak, aby se k němu mohl přistoupit dokonce i neskušený člověk. Uživatel by neměl nic doinstalovávat nebo nastavovat prvky, které se netýkají samotné práce algoritmu. Před uživatelem jsou pouze 2 diagramy a 5 bloků:

- 1) Nastavení parametrů proudů a výkonů
- 2) Nastavení parametrů křivky limity statické stability stroje
- 3) "Reset" a "Update" tlačítka
- 4) Blok výběru čar na P-Q diagramu
- 5) Blok výběru čar na X-R diagramu

V prvním bloku se nastavují hodnoty s krokem 0.1. Nastavují se následující hodnoty:

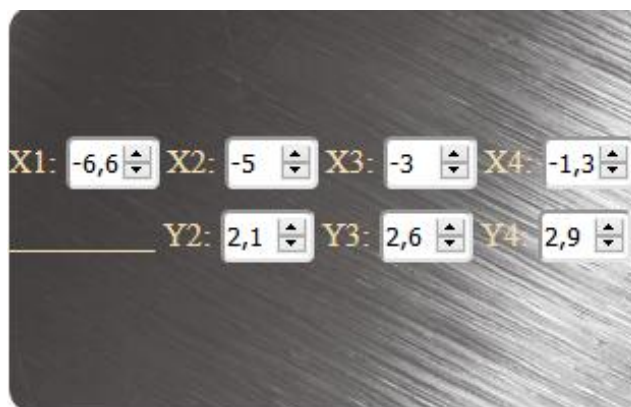
- 1) Maximální statorový proud
- 2) Účinník
- 3) Minimální výkon turbíny
- 4) Maximální výkon turbíny
- 5) Maximální budící proud
- 6) Minimální budící proud

Při nastavování je nutné dbát na to, aby hodnoty měly smysl, v jiném případě program uživateli ukáže upozornění ale nezamítne změny diagramu. Všechny změny se projeví až po stisknutí tlačítka "Update". Tyto změny ovlivní oba diagrmy najednou.



Obr. 9. 1. blok

V druhém bloku se nastavují pouze hodnoty křivky limity statické stability stroje. Jsou v tomto bloku souřadnice 4 bodů, přičemž u prvního bodu uživatel zadá pouze hodnotu "x" kvůli algoritmu vykreslování přímky maximálního ohřátí čel stroje (první bod leží na přímce maximálního ohřátí čel stroje, další body upravují tvar křivky). Při změně "x" souřadnice mění se i "y" souřadnice. Nastavování se provádí také s krokem 0.1. Pokud by přímka maximálního výkonu turbíny nebyla součástí diagramu (například, když je tato přímka umístěna tak vysoko, že ji nelze použít pro sestavení "uzavřeného" diagramu), bude automaticky křivka limity statické stability napojena na kružnici maximálního proudu statoru. Současně se změní i její hodnoty v textboxu.



Obr. 10. 2. blok

V třetím bloku je umístěno tlačítko "Reset". Tímto tlačítkem lze všem parametrům vnutit výchozí hodnoty. V případě vzniku jakýchkoli problémů na diagramech je použití tohoto tlačítka preferovanější, než použití tlačítka "Znovu načíst" v prohlížeči.



Obr. 11. 3. blok

Na prvním diagramu jsou zobrazeny jednotlivé křivky, části kružnice a přímky, které společně tvoří P-Q diagram. Pro lepší přehlednost byl tento diagram “oříznut” na provozní oblast alternátoru. V dané oblasti se také nachází přímka minimálního výkonu turbíny. Tento výkon reprezentuje spíše minimální možný z ekonomického hlediska výkon, není to ve skutečnosti minimální výkon, který je turbína schopná dodat. Pomocí přímky I_s lze sledovat změny účinníku.

Svislá osa reprezentuje kladnou reálnou osu, vodorovná osa plní funkci záporné imaginární osy.

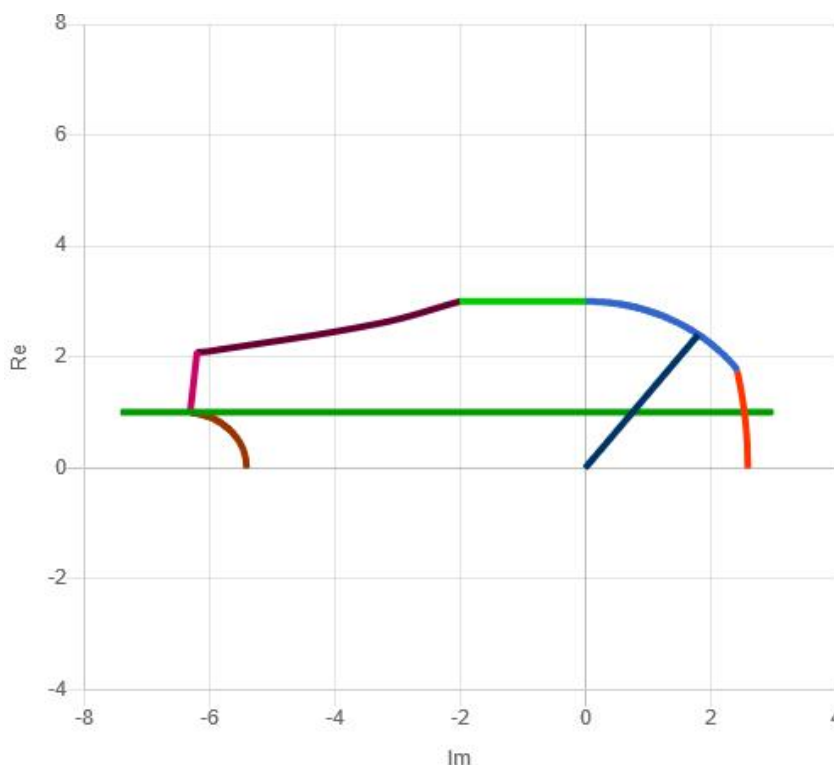
- Pt_max
- I_s
- I_s_{max}
- I_b_{max}
- Pt_min
- I_b_{min}
- Overheating
- Static_stability_limit

Obr. 12. 4. blok

V bloku 4 a 5 lze volit, které čáry budou na diagramech vykresleny.

- Pt_max_reversed
- Is_max_reversed
- Ib_max_reversed
- Ib_min_reversed
- Overheating_rev_0
- Overheating_rev_1
- Overheating_rev_2
- Static_stability_limit_reversed

Obr. 13. 5. blok



Obr. 14. P-Q diagram, ilustrační obrázek

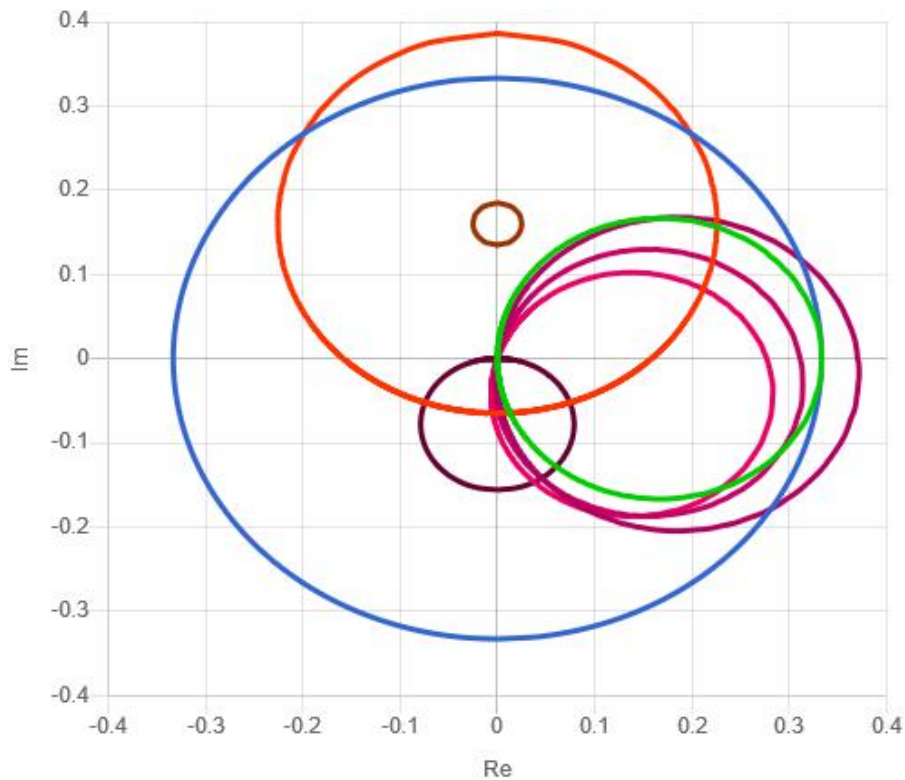
V horní části tohoto diagramu je speciální lišta. Tato lišta plní funkci legendy. Na této liště lze udělat některé křivky neviditelnými.



Obr. 15. Legenda P-Q diagramu

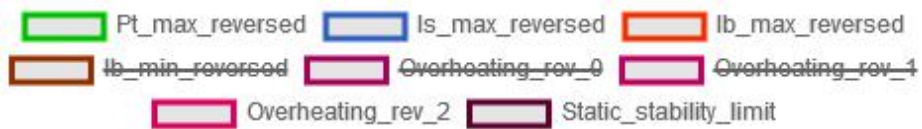
Na druhém diagramu je realizace impedanční roviny. Zde se mohou sledovat změny impedancí při změně jednotlivých parametrů v rovině P-Q. Kvůli většímu počtu prvků na tomto diagramu a jejich větším rozměrům zde chybí kružnice, reprezentující minimální výkon turbíny a kružnice, která odpovídá přímce statorového proudu.

Svislá osa zde reprezentuje imaginární osu, vodorovná osa nahrazuje reálnou osu.



Obr. 16. X-R diagram, ilustrační obrázek

Podobně, jako u prvního diagramu, druhý diagram je také vybaven nastavovací lištou ve své horní části. Je také třeba zdůraznit, že ani na prvním diagramu, ani na druhém není dolní ohraničení P-Q provozní oblasti a odpovídající kružnice v impedanční rovině. Udělal jsem takto kvůli zjednodušení digramu (téměř přesně nahrazuje tuto čáru vodorovná osa, v impedanční rovině je to svislá osa).



Obr. 17. Legenda X-R diagramu

Poslední důležitou věcí je "Error box". Do tohoto boxu se píše všechny detekované chyby nebo problémy, popřípadě jejich popis.

Error: Too high ib_min

Obr. 18. "Error box"

5. Technické požadavky na počítač

Aby v tomto programu bylo možné pracovat, musí počítač splňovat určité požadavky. Vzhledem k tomu, že program hlavně provádí matematické výpočty, musí procesor tohoto počítače mít co nejvyšší frekvence a minimálně 4 jádra. Operační paměť v daném programu není příliš využívána, stačí mít cca 400MB volné paměti (plus paměť pro samotnou práci prohlížeče).

V. Závěr

Cílem této bakalářské práce byla prezentace mezní provozní oblasti synchronního alternátoru v impedanční rovině. Hlavním výstupem je webová aplikace, která umí zmíněnou oblast zobrazit v impedanční rovině.

Tato webová aplikace se hodí pro snadné představení vlivů změn navržených charakteristik synchronního alternátoru na impedanci napájecího systému.

Existuje spousta dalších variant těchto diagramů a také spousta jejich zjednodušení, tato realizace je pouze jedna z mnoha možných. Například, v rámci této bakalářské práce byla čára maximálního ohřátí čel stroje sestrojena pomocí zjednodušeného předpokladu, že tato čára není kolmá na imaginární osu, ale je o 1 stupeň nakloněna dovnitř provozní oblasti na P-Q diagramu.

Aby uživatel mohl lépe pozorovat veškeré změny v impedanční rovině, bylo výhodné umístit oba diagramy vedle sebe. Toto rozhodnutí přineslo bohužel i spoustu komplikací. Například, to vedlo na výrazné omezení rozměrů obou grafů (500 pixelů na 500 pixelů), což způsobuje řadu problémů při používání aplikace na velkých monitorech. také do skupiny komplikací lze zařadit relativně velký počet použitých barev, což zhoršuje přehlednost. Aby bylo možné této situaci předejít, byly u maximálních a minimálních hodnot jednoho parametru (například výkon turbíny nebo budící proud) použity podobné barvy.

Další významnou částí bylo samotné programování v jazyce “JavaScript”. Důležitou okolností bylo to, že nebyly použity žádné třídy a tím pádem ani objektově orientované programování. Ale vzhledem k tomu, že kód programu obsahuje pouze výpočty a “vnucování” vypočítaných hodnot knihovně “Chart.js”, nebyl důvod tento typ programování zavádět.

S ohledem na výše uvedenou informaci, aplikace byla dokončena a vyzkoušena v prohlížečích “Firefox” a “Google Chrome”. Vzhledem k tomu, že program je vytvořen v “JavaScriptu”, nejsou kladeny požadavky na operační systém, ale na prohlížeč (musí podporovat “JavaScript”). Podpora běhu programu v tomto jazyce je překážkou pro spuštění v “Internet Exploreru”.

VI. Seznam použitých pramenů

- [1] Українське обладнання буде стояти на електростанції у Бангладеші. In: Промисловий портал [online]. 2018 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://uprom.info/news/cars/ukrayinske-obladnannya-bude-stoyati-na-elektrostantsiyi-u-bangladesh/>
- [2] Vývoj synchronních strojů [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/9443>. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [3] Náhradní schéma stroje. In: SPŠel it Dobruška [online]. Čs. odboje 670, 518 01 Dobruška: SPŠel it Dobruška [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>
- [4] BERAN, Josef. *Elektrická zařízení tepelných elektráren*. Plzeň: VŠSE v Plzni, 1988.
- [5] DETERMINATION OF THE ACTUAL PQ DIAGRAM OF THE HYDROGENERATORS, BEING IN SERVICE, IN ORDER TO ESTABLISH THEIR MAXIMUM OPERATING DOMAINS AND THEIR CAPACITY TO PROVIDE SYSTEM SERVICES. CIGRÉ. 2004, 2004, 8.
- [6] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [7] New Setting of Loss of Excitation Protection in P-Q Plan in Order to Maximize the Operation Area of the Capacity Curve of the Synchronous Machine. IEEE [online]. 2014, 2014, 6 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6934771>
- [8] JavaScript [online]. San Francisco: Wikimedia, 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/JavaScript>
- [9] *Geogebra* [online]. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.geogebra.org/>
- [10] *Chart.js* [online]. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.chartjs.org/>
- [11] *Final Report - Anlage / Appendix 4 - "P/Q - Diagram"* [online]. In: . s. 1 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/Prilohy/P-Q_Diagram_Tusimice-ETU-C.pdf

VII. Přílohy

Příloha 1. Pomocné matematické funkce

```
function power_angel(cosfi) {  
    var alfa;  
    alfa = Math.acos(cosfi);  
    return alfa;  
}  
  
function sin_angle(cosfi) {  
    var alfa;  
    alfa = Math.sin(Math.acos(cosfi));  
    return alfa;  
}  
  
function atn(x, y) {  
    var ang = Math.atan(y / x);  
    return ang;  
}  
  
function cos(ang) {  
    return Math.cos(ang);  
}  
  
function sin(ang) {  
    return Math.sin(ang);  
}
```

Příloha 2. Zaokrouhlovací funkce

```
function rounding(num) {  
    var n = num.toFixed(3);  
    var double = parseFloat(n);  
    return double;  
}  
  
function rounding2(num) {  
    var n = num.toFixed(2);  
    var double = parseFloat(n);  
    return double;  
}
```


Přiloha 3. Vykreslovací funkce

```
var reschart = new Chart(result, {  
  // The type of chart we want to create  
  type: 'scatter',  
  
  // The data for our dataset  
  data: {  
    datasets: [{  
      label: 'Pt_max_reversed',  
      borderColor: 'rgb(0, 204, 0)',  
      showLine: true,  
      pointRadius: 0,  
      borderWidth: 3,  
      fill: false,  
      data: Pt_max_reversed()  
    }, {  
      label: 'Is_max_reversed',  
      borderColor: 'rgb(51, 102, 204)',  
      showLine: true,  
      pointRadius: 0,  
      borderWidth: 3,  
      fill: false,  
      data: Is_max_reversed()  
    }, {  
      label: 'Ib_max_reversed',  
      borderColor: 'rgb(255, 51, 0)',  
      showLine: true,  
      pointRadius: 0,  
      borderWidth: 3,  
      fill: false,  
      data: Ib_max_reversed()  
    }, {  
      label: 'Ib_min_reversed',  
      borderColor: 'rgb(155, 51, 0)',  
      showLine: true,  
      pointRadius: 0,  
      borderWidth: 3,  
      fill: false,  
      data: Ib_min_reversed()  
    }, {  
      label: 'Overheating_rev_0',  
      borderColor: 'rgb(176, 0, 98)',  
      showLine: true,  
      pointRadius: 0,  
      borderWidth: 3,  
      fill: false,  
      data: overheat_reversed_0()  
    }, {  
      label: 'Overheating_rev_1',  
      borderColor: 'rgb(200, 0, 100)',  
      showLine: true,  

```

```
        pointRadius: 0,  
        borderWidth: 3,  
        fill: false,  
        data: overheat_reversed_1()  
    }, {  
        label: 'Overheating_rev_2',  
        borderColor: 'rgb(234, 0, 102)',  
        showLine: true,  
        pointRadius: 0,  
        borderWidth: 3,  
        fill: false,  
        data: overheat_reversed_2()  
    }, {  
        label: 'Static_stability_limit',  
        borderColor: 'rgb(102, 0, 51)',  
        showLine: true,  
        pointRadius: 0,  
        borderWidth: 3,  
        fill: false,  
        data: Static_stability_limit_rev()  
    }  
    ]  
},  
  
// Configuration options go here  
options: {  
  
    scales: {  
        yAxes: [{  
  
            scaleLabel: {  
                display: true,  
                labelString: "Im"  
            }  
        }],  
        xAxes: [{  
  
            scaleLabel: {  
                display: true,  
                labelString: "Re"  
            }  
        }]  
    }  
}  
});
```

Příloha 4. Skutečný diagram Tušimice [11]

