

Roman Jakubčák, Ľubomír Beňa, Miroslav Kmec

Minimalizácia činných strát a riadenie toku výkonu v elektrizačných sústavách s využitím FACTS zariadení

Tento článok sa zaoberá minimalizáciou činných výkonových strát v elektrizačných sústavách (ES). Hlavnou úlohou v uvažovanej sieti bolo posúdiť vplyv použitia FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) zariadení za účelom zníženia činných výkonových strát. Uvažovali sme použité tyristorovo riadeného sériového kondenzátora (TCSC) a statického kompenzátora jalového výkonu (SVC). Nakoľko hlavnou úlohou TCSC je riadenie toku výkonu, sledovali sme taktiež zmeny tokov výkonov v sieti.

Kľúčové slová: elektrizačná sústava, optimalizácia, FACTS zariadenia

This article discusses about optimization in power system (PS). Main task is minimizing active power losses in considered network without and with using FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) devices. We considered use TCSC (thyristor controlled series capacitor) and SVC (Static Var Compensator). Because TCSC is mainly used for power flow control in this case we observed power flow changes also. (Active power losses minimalization and power flow control in power system with FACTS devices)

Keywords: power system, optimization, FACTS devices.

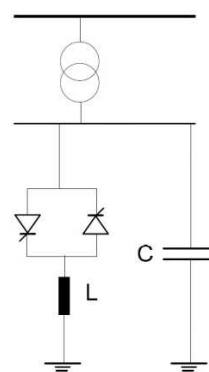
ÚVOD

V súčasnosti je väčšina elektrizačných sústav navzájom prepojených (taktiež aj na úrovni medzinárodnej). Je to hlavne z ekonomických dôvodov, zvýšenia spoľahlivosti dodávok elektrickej energie a zníženia nákladov na elektrinu. Tento trend spôsobuje problémy v riadení ES. Z týchto dôvodov prevádzkovatelia ES začínajú využívať nové možnosti riadenia ES. Nasadením FACTS zariadení môžeme riadiť toky výkonov v ES, zvýšiť napätovú stabilitu a tlmiť výkonové oscilácie v sieti, znížiť aktívne straty výkonu v sieti a zvýšiť prenosovú schopnosť už existujúcich vedení.

FACTS ZARIADENIA

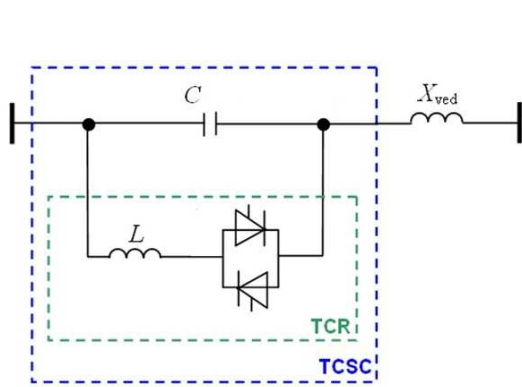
- A. *Statický kompenzátor jalového výkonu (SVC)* – ide o paralelne pripojený statický zdroj alebo spotrebič jalového výkonu. Jeho výstup je možné nastaviť pomocou zmeny kapacitného alebo indukčného prúdu a tak je možné udržať alebo riadiť špecifické parametre v ES (najčastejšie napätie v uzle). Statický kompenzátor jalového výkonu je všeobecný termín pre tyristorovo riadený, alebo tyristorovo spínaný kondenzátor alebo ich kombináciu. SVC v sebe zahŕňa zariadenia, ktoré umožňujú dodávať, alebo odoberať jalový výkon z/do siete (tyristorovo riadený/spínaný reaktor pre odoberanie jalového výkonu z ES a tyristorovo spínaný kondenzátor pre dodávanie jalového výkonu do ES). Inštaláciou SVC do jedného alebo viacerých uzlov v ES je možné dosiahnuť zvýšenie prenosovej schopnosti vedení a zníženie strát ku ktorých dochádza pri prenose elektrickej energie, vyrovnať napätový profil pri rôznych podmienkach a zmierniť oscilácie činného výkonu [3].
- B. *Model SVC zariadenia* – model SVC pozostáva z premenlivého zdroja jalového výkonu zapojeného do uzla siete. SVC môže pracovať v kapacitnom móde, keď do siete jalový výkon dodáva alebo v indukčnom móde, keď zo siete jalový výkon odoberá. Uvažovalo sa, že maximálny možný dodávaný/odoberaný jalový výkon je 50 MVar.

$$-50 \leq Q_{SVC} \leq 50 \quad (1)$$



Obr. 1. Statický kompenzátor jalového výkonu.

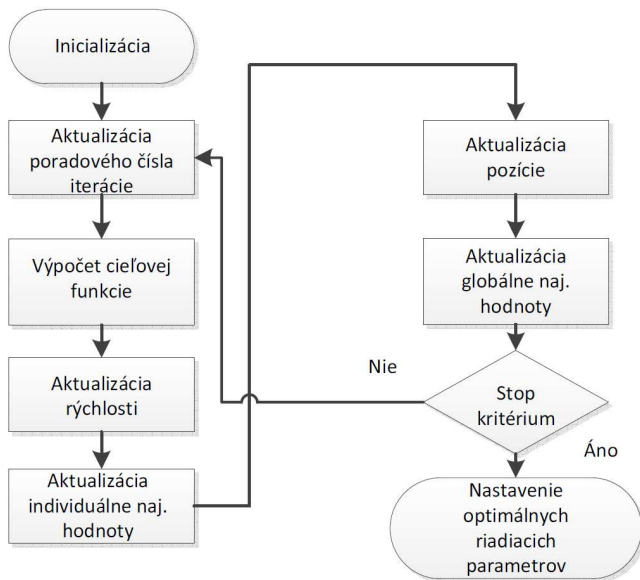
- C. *Tyristorovo riadený sériový kondenzátor (TCSC)* – TCSC zariadenie využíva tyristorovo riadený reaktor (TCR), ktorý je paralelne pripojený ku kondenzátoru. Táto kombinácia umožňuje pri základnej frekvencii plynulo meniť reaktanciu v širokom rozsahu až do stavu, kedy antiparalelne zapojené tyristory vedú nepretržite a zariadenie má vtedy indukčný charakter [1]. Zapojenie TCSC do vedenia umožňuje rýchlu a spojitú zmenu impedancie vedenia, dynamické riadenie toku činného výkonu vo vybranom vedení, umožňuje obmedziť vznik kruhových tokov výkonov, tlmiť kývanie výkonu v sieti, zvyšuje úroveň ochrany pre sériový kondenzátor, pretože je schopný počas poruchy tento kondenzátor rýchlo premostiť [4].
- D. *Model TCSC* – Model TCSC pozostáva z premenlivej impedancie (X_{TCSC}) zapojenej v sérii s vedením (X_V). Výsledkom toho je zmena celkovej impedancie vedenia (X_C).



Obr. 2. Tyristorovo riadený sériový kondenzátor.

OPTIMALIZAČNÁ METÓDA

Metóda roja častíc (Particle Swarm Optimization) je pomerne nová stochastická metóda. Jedná sa o výpočtovú matematickú metódu, ktorá optimalizuje problém pomocou opakovaného skúšania a vylepšovania kandidátov na riešenie s ohľadom na ich meranú kvalitu. PSO optimalizuje problém tým, že má populáciu kandidátov na riešenie, nazývaných častice a tieto častice sa pohybujú v preskúvanom priestore podľa jednoduchého matematického vzorca. Pohyb každej častice je ovplyvnený jej najlepšou známou pozíciou v preskúvanom priestore a taktiež je vedená smerom k najlepšej známej pozícii v preskúvanom priestore, ktorá bola nastavená ako najlepšia pozícia, ktorá bola dosiahnutá inými časticami. Týmto spôsobom sa očakáva pohyb častíc k najlepšiemu riešeniu [2]. Celý proces výpočtu je zhrnutý na obr. 3.



Obr. 3. Metóda roja častíc.

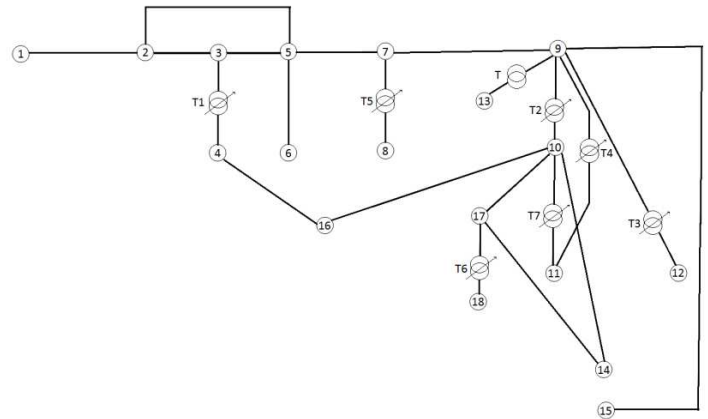
UVAŽOVANÁ SIETĽ A FORMULÁCIA PROBLÉMU

Uvažovali sme sieť z obr. 4. Uzly č. 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9 a 15 sú na napät'ovej hladine 400 kV, uzly č. 4, 10, 14, 16 a 17 sú na napät'ovej hladine 220 kV a uzly č. 8, 11, 12 a 18 sú na napät'ovej hladine 110 kV. Uzol č. 13 je na napät'ovej hladine 34 kV.

V optimalizačnom procese sa využívali regulačné transformátory s uvedenými parametrami:

(2)

- T1 – regulačný transformátor 400/231 ± 8 x 1,1%
- T2 – regulačný transformátor 400/231 ± 8 x 1,1%
- T3 – regulačný transformátor 400/121 ± 9 x 1,1%
- T4 – regulačný transformátor 400/121 ± 9 x 1,1%
- T5 – regulačný transformátor 400/121 -8/8 x -1,37/1,26%
- T6 – regulačný transformátor 231± 11 x 1,45%/121
- T7 – regulačný transformátor 231± 6 x 2%/121



Obr. 4. 18 uzlová sieť.

TABUĽKA I
Výroba/Spotreba v jednotlivých uzloch siete

Č. uzla	Výroba/Spotreba		Č. uzla	Výroba/Spotreba	
	P [MW]	Q [MVar]		P [MW]	Q [MVar]
1	0	0	10	-83	-153
2	169	-11,6	11	-45	25
3	-47	-54	12	-31	-24
4	-10	75,1	13	0	0
5	-185	0	14	72	-11,4
6	-104	-35	15	245	27
7	-87	7	16	-138	-64,2
8	-1,3	22	17	0	0
9	356	-50	18	18	-27

V optimalizačnom procese sme uvažovali tieto obmedzenia:

1. Hodnoty napätí v uzloch – uvažuje sa maximálna dovolená odchýlka 5 % na napät'ovej hladine 400 kV a 220 kV. Na napät'ovej hladine 110 kV sa uvažuje dovolená odchýlka 10 %.
2. Max./min. hodnoty nastavených odbočiek na transformátoroch. Uvažovala sa regulácia odbočiek na sekundárnej strane u transformátoroch T1 – T5, a na primárnej strane u transformátoroch T6 – T7.
3. Tepelné obmedzenia všetkých prenosových vedení, t.j. maximálny tok prúdu daným vedením nesmie prekročiť maximálnu možnú hodnotu.
4. Max./min. možný dodávaný/odoberaný jalový výkon SVC zariadením nesmie byť väčší ako ± 50 MVar.
5. TCSC zariadenie môže odkompenzovať maximálne 60 % pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia.
6. Maximálny počet súčasne pracujúcich FACTS zariadení nesmie byť vyšší ako 1.

Všetky uvedené obmedzenia sú zahrnuté v cieľovej funkcii vo forme penalizácií. Výroba/Spotreba vo všetkých uzloch siete je daná

v tab. 1. Kladná hodnoty v tabuľke znamenajú výrobu a záporné spotrebu činného/jalového výkonu v jednotlivých uzloch siete.

Hlavou úlohou optimalizačného procesu je určiť najvhodnejšie umiestnenie FACTS zariadenia a hodnotu jeho parametrov tak, aby sa dosiahlo minimum celkových činných strát v sieti. Za týmto účelom sme využili optimalizačnú metódu, nazývanú metóda roja častíc. Cieľová funkcia zahŕňa rovnicu na výpočet celkových činných strát v uvažovanej sieti a penalizačnú funkciu. Táto penalizačná funkcia nadobúda nulové hodnoty v prípadoch, keď sú všetky obmedzenia splnené.

Uvažovali sme tieto tri prípady:

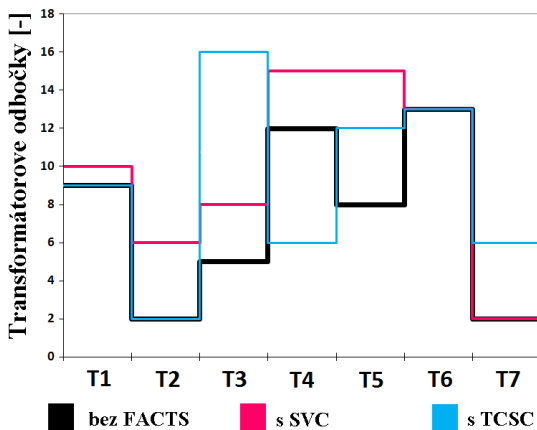
Optimalizácia bez použitia FACTS zariadení – v tomto prípade sa neuvažuje využitie žiadneho FACTS zariadenia. Riadiacimi premennými sú iba odbočky na regulačných transformátoroch.

Optimalizácia s využitím SVC zariadenia – v tomto prípade sa do optimalizačného procesu pridávajú dve riadiace premenné, ktoré definujú miesto (uzol) pripojenia a hodnotu (dodávaného/spotrebovaného) jalového výkonu SVC zariadením.

Optimalizácia s využitím TCSC zariadenia – v tomto prípade sa do optimalizačného procesu taktiež pridávajú dva riadiace premenné (v porovnaní s prvým prípadom). Definujú miesto (vedenie) pripojenia a hodnotu (stupeň kompenzácie) TCSC.

VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

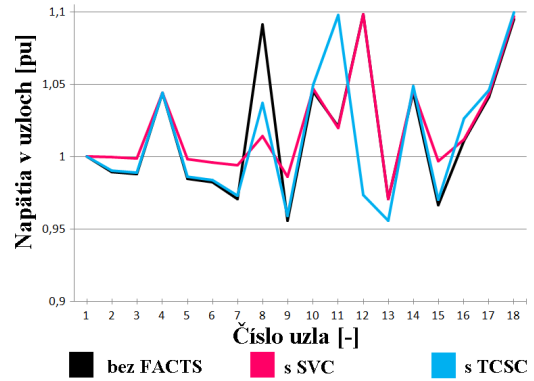
V optimalizácii bez použitia FACTS zariadení sme dosiahli minimálne celkové činné straty 9,81 MW. V prípade, keď sme uvažovali použitie SVC zariadenia, pomocou optimalizačného procesu bolo určené za najvhodnejšie miesto jeho pripojenia uzol č. 10. Keď SVC zariadenie je pripojené v uzle č. 10 a dodáva do siete 50 MVar (t. j. pracuje v kapacitnom móde), bol dosiahnutý najlepší výsledok z hľadiska minimalizácie činných strát. Celkové činné straty pre tento prípad boli 8,95 MW. V prípade použitia len TCSC zariadenia boli celkové činné straty v uvažovanej sieti 9,55 MW. Optimalizačným procesom bolo určené za najvhodnejšie miesto jeho pripojenia vedenie medzi uzlami č. 4 a 16. Zariadenie pracovalo v kapacitnom móde a teda znižovalo reaktanciu vedenia o 60 %. Všetky spomenuté výsledky boli dosahované za súčasnej zmeny transformátorových odbočiek na regulačných transformátoroch (obr.5).



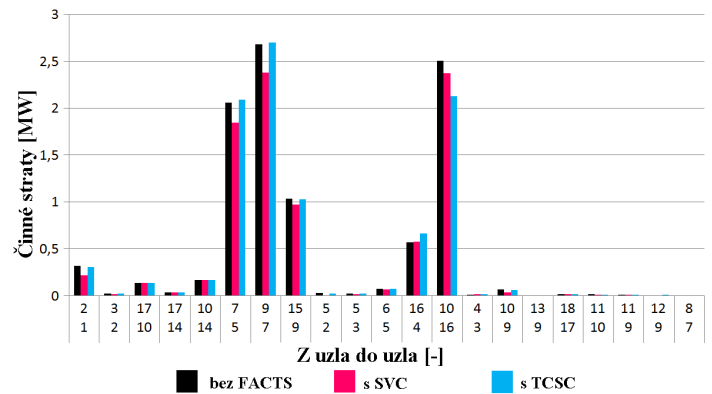
Obr. 5. Nastavenie transformátorových odbočiek.

Výsledky všetkých simulácií sú zhrnuté v nasledujúcich grafoch. Obr. 6 zobrazuje zmenu napätí vo všetkých uzloch pre všetky uvažované prípady. Ako je jasne vidieť z grafu, napätia vo všetkých uzloch sú povolených toleranciách. Obr. 7 a obr. 8 reprezentuje zmeny činných strát a tokov činných výkonov vo všetkých vedeniach pre všetky tri uvažované prípady. Ako je možné vidieť z priložených

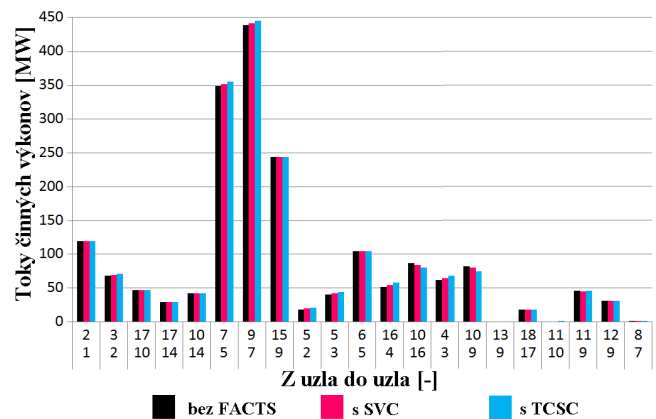
grafov, nie vo všetkých vedeniach sa činné straty po optimalizácii s využitím niektorého z FACTS zariadenia znížili. V prípade použitia SVC zariadenia boli činné straty vo vedeniach nižšie, alebo u niektorých vedení takmer bezo zmeny v porovnaní s prípadom bez použitia FACTS zariadení. V prípade použitia TCSC zariadenia v niektorých vedeniach boli činné straty dokonca vyššie v porovnaní s prípadom bez použitia FACTS zariadení (napr. vedenie medzi uzlami č. 16 a č. 4).



Obr. 6. Napätový profil.



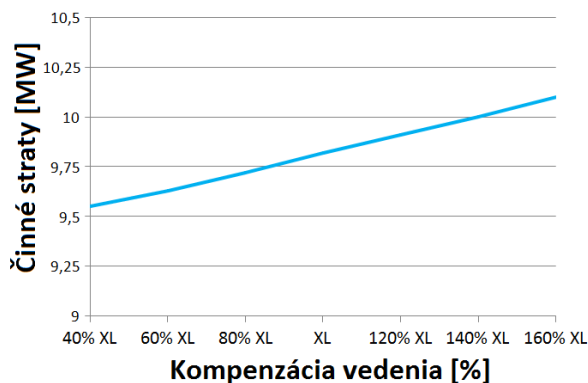
Obr. 7. Zmeny činných strát vo všetkých vedeniach.



Obr. 8. Zmeny tokov činných výkonov vo všetkých vedeniach.

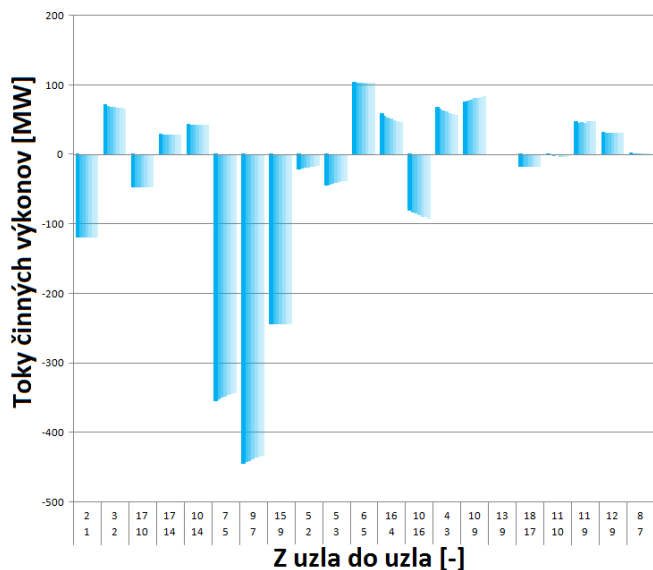
Nakoľko hlavnou úlohou TCSC je riadenie toku činného výkonu, po určení miesta pripojenia TCSC zariadenia medzi uzly č. 4 a č.16 sme sledovali zmeny toku činných výkonov v jednotlivých vedeniach počas zmeny stupňa kompenzácie vedenia od 40 % do 160 % pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia s krokom 20 %.

Obr. 9 reprezentuje celkové činné straty počas zmeny kompenzácie vedenia. V každom kroku sa taktiež nastavovali odbočky regulačných transformátorov s cieľom dosiahnuť minimum celkových činných strát. Ako je možné vidieť, činné straty v sieti sa zvyšovali so znižovaním kompenzácie vedenia pomocou TCSC zariadenia. Graf len potvrdzuje vhodnosť nastavenia TCSC zariadenia optimalizačným procesom (najnižšie celkové činné straty sú ak je vedenie odkompenzované na 40 % pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia).



Obr. 9. Zmeny činných strát počas zmeny kompenzácie vedenia pomocou TCSC.

Obr. 10 reprezentuje zmenu tokov činných výkonov vo všetkých vedeniach počas zmeny kompenzácie vedenia z 40 % na 160 % pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia (vedenie medzi uzlami č. 4 a č. 16).



Obr. 10. Zmeny tokov činných výkonov vo všetkých vedeniach.

ZÁVER

Ako bolo ukázané v tomto článku, použitím SVC a TCSC zariadenia v ES sme schopní nie len riadiť napätia v uzloch siete, resp. riadiť toky činných výkonov, ale aj znížiť činné straty výkonu, ku ktorým dochádza v dôsledku prenosu elektrickej energie. K dosiahnutiu čo najlepších výsledkov je nutné nájsť najvhodnejšie umiestnenie (miesto pripojenia) v ES pre tieto zariadenia, je nutné optimálne nastaviť ich regulovateľné parametre a taktiež, ak je to možné, nastaviť optimálne parametre na ďalších regulačných zariadeniach v ES, ak sú dostupné.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0388/13.

ODKAZY NA LITERATÚRU

- [1] Johns, A. T., TER-GAZARIAN, A., WARNE, F., "Flexible ac transmission systems (FACTS)," The Institution of Electrical Engineers, 1999, 592 pp. ISBN 0-85296-771-3.
- [2] SOLIMAN, S. – MANTAWY, A.: Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems. University of Florida, 2011. 426 s. ISBN 978-1-4614-1751-4
- [3] Static Var Compensator [online], Available on internet: <http://www.abb.com/cawp/gad02181/c1256d71001e0037c1256bd60043b75c.aspx>.
- [4] HINGORANI, G. N. - GYUGYI, L.: Understanding FACTS. Concepts and technology of Flexible AC transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8

ADRESY AUTOROV

Ing. Roman Jakubčák, Technická Univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 041 20, Slovenská republika, Roman.Jakubcak@tuke.sk
 doc. Ing. Ľubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 041 210, Slovenská republika, Lubomir.Bena@tuke.sk
 Ing. Miroslav Kmec, Technická Univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 041 20, Slovenská republika, Miroslav.Kmec@tuke.sk