

Výpočet parametrov týkajúcich sa dynamickej ampacity vonkajších vedení

¹Nikola ŠTIEBEROVÁ, ²Lubomír BEŇA, ³Anastázia MARGITOVÁ,
⁴Martin KANÁLIK

^{1, 2, 3, 4} Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika

¹nikola.stieberova@student.tuke.sk, ²lubomir.bena@tuke.sk,
³anastazia.margitova@tuke.sk, ⁴martin.kanalik@tuke.sk

Abstract — Populačný rast, industrializácia a rozvoj priemyslu spôsobil neustále narastajúci dopyt po elektrickej energii. Pretože výstavba nových elektrických vedení je veľmi časovo a finančne náročná, pristupuje sa k zvyšovaniu prenosovej schopnosti už existujúcich elektrických vedení, a to zvyšovaním ampacity vodičov vonkajších elektrických vedení. Tento článok sa zaoberá výpočtom ustálenej teploty vodiča pri známej hodnote prúdu pretekajúceho vodičom. V praktickej časti je realizované porovnanie výpočtu teploty vodiča v závislosti od času analytickým riešením a numerickým teplotným krokováním podľa technickej príručky CIGRE 601.

Keywords — teplota vodiča, technická príručka CIGRE 601, skoková zmena

I. ÚVOD

Vodiče vonkajších elektrických vedení sú neoddeliteľnou súčasťou elektrizačnej sústavy. Používajú sa pri vysokých napätiach, a preto ich parametre musia spĺňať určité limity, aby sa zaistila bezpečná prevádzka. Jeden z najdôležitejších faktorov ovplyvňujúcich prenosovú schopnosť vedení je teplota vodičov. V prípade, ak teplo generované prúdom tečúcim vodičom prekročí určitý tepelný limit, dôjde k nezvratnému poškodeniu vodiča. Aby sa zabránilo poškodeniu vodičov elektrického vedenia, je potrebné určiť maximálnu hodnotu prúdu, ktorý môže pretekať vodičom. Ampacita je hlavným parametrom pri návrhu a prevádzke vonkajších elektrických vedení. Inými slovami, je to maximálna hodnota elektrického prúdu, ktorý môže pretekať cez vodič (elektrické vedenie), bez narušenia jeho mechanických a elektrických vlastností [1].

II. TEPELNÉ HODNOTENIE PRENOSOVEJ SCHOPNOSTI VEDENÍ

A. Statické tepelné hodnotenie (STH)

Jedná sa o tradičný spôsob prevádzkovania vedení. V niektorých prenosových sústavách sa používajú rôzne limitné obmedzenia ampacity pre letné a zimné mesiace. Tieto stanovené prúdové obmedzenia v jednotlivých ročných obdobiach predstavujú omnoho nižšie hodnoty ako tie hodnoty prúdu, ktoré môžu pretekať vedením za aktuálnych poveternostných podmienok. STH uvažuje s maximálnou povolenou prenosovou schopnosťou odvodenou od najhorších možných parametrov počasia [1].

STH prenosových vedení môže byť obmedzované tromi hlavnými faktormi [2]:

- stanovený dovoľený prúd tečúci vodičom,
- stanovená vzdialenosť vodiča od zeme,
- menovitý výkon transformátora.

B. Dynamické tepelné hodnotenie (DTH)

Poskytuje skutočnú ampacitu prenosových vedení pri uvažovaní prevádzkových podmienok v reálnom čase, ktorá je daná časovou konštantou a rozdielom medzi okamžitou a maximálnou hodnotou teploty vodiča. Hlavným cieľom DTH je zvýšiť prenosovú schopnosť existujúcich vedení, zmierniť preťaženie vedení, uľahčiť integráciu veternej energie, znížiť ekonomické

náklady a zlepšiť spoľahlivosť prevádzky elektrizačnej sústavy [1].

Parametre, ktoré môžu byť merané v reálnom čase, sú [3], [4]:

- poveternostné podmienky, ako napr. okolitá teplota, rýchlosť vetra, smer vetra, slnečné žiarenie a zrážky,

- charakteristiky vedení, ako napr. zaťaženie vedenia, vzdialenosť vodičov od zeme, priehyb vodičov, mechanické namáhanie vodiča a teplota vodiča.

Metódy DTH vonkajších vedení sú rozdelené do dvoch skupín [3], [5]-[8]:

- priame metódy – zariadenia na priame monitorovanie vonkajších vedení zbierajú údaje o charakteristických veličinách vedenia, ako je priehyb vodiča, mechanické namáhanie vodiča, výška vodiča nad zemou a teplota vodiča. Na určovanie DTH vedení sa používajú aj ďalšie údaje z meteorologických staníc.

- nepriame metódy – odhadnuté alebo merané údaje o počasí pozdĺž vedenia sa využívajú na výpočet prúdovej zaťažiteľnosti (ampacity) tohto vedenia. Monitorovanie počasia je najjednoduchší a najmenej invazívny systém monitorovania, pretože na vedení nemusí byť nainštalovaný žiaden monitorovací systém.

III. VYUŽITIE WAMS SYSTÉMOV

Širokoplošné monitorovacie systémy (WAMS) umožňujú realizáciu nových a pokročilých funkcií na podporu rozvoja a riadenia prenosových a distribučných sietí, konkrétne na hodnotenie stability prevádzky elektrizačnej sústavy, ampacity vedení a podobne [9], [10].

Online monitorovanie parametrov vonkajších vedení je pokročilou funkciou, ktorá je založená na predpoklade, že prevádzkové parametre nie sú statické hodnoty, ale sú ovplyvnené zaťažením siete, poveternostnými podmienkami a starnutím vodičov. Pri online výpočtoch prevádzkových parametrov vedenia sa musí brať do úvahy aj vplyv chyby meracích prístrojov prúdu a napätia [10].

Výhody využitia WAMS systémov pri hodnotení ampacity vonkajších elektrických vedení sú [10], [11]:

- vyšší povolený limit zaťaženia vedenia používaný na kontingenčnú analýzu, ktorá poukazuje na rezervy pri využívaní elektrických vedení,
- využitie možnosti vyššej prúdovej zaťažiteľnosti vedení v zime,
- úspora investícií na výstavbu nových vedení,
- využitie úplnej prenosovej zaťažiteľnosti vedení pri riešení kritických a núdzových situácií

IV. VÝPOČET TEPLOTY VODIČOV VONKAJŠÍCH ELEKTRICKÝCH VEDENÍ VÝPLÝVAJÚCI Z DYNAMICKEJ AMPACITY PODĽA TECHNICKEJ PRÍRUČKY CIGRE 601

A. Tepelná bilančná rovnica pre ustálený stav

Teplota vodičov vonkajších elektrických vedení závisí od prevládajúcich poveternostných podmienok, ako je rýchlosť a smer vetra, teplota okolia alebo slnečné žiarenie. Taktiež aj od elektrického prúdu, ktorý vodičom preteká. Predpokladá sa, že všetky tieto parametre sú konštantné v závislosti od času. V tom prípade je možné hovoriť o tom, že vodič je v ustálenom stave. Inými slovami, tepelný prírastok spôsobujúci oteplenie vodiča je rovný stratám tepla, ktoré sú zodpovedné za ochladenie vodiča, viď (1) [1], [3], [12], [13]:

$$\text{Tepelný prírastok} = \text{Tepelné straty}, \quad (1)$$

$$P_J + P_s + P_m = P_c + P_r, \quad (2)$$

kde

- P_J – oteplenie vodiča Jouleovými stratami (W/m),
- P_s – oteplenie vodiča slnečným žiarením (W/m),
- P_m – oteplenie vodiča magnetickým žiarením (W/m),
- P_c – ochladenie vodiča konvekciou (W/m),
- P_r – ochladenie vodiča radiáciou (W/m).

Postup výpočtu všetkých vyššie uvedených tepelných výkonov je uvedený v [1].

B. Tepelná bilančná rovnica pre ustálený stav

Tepelná bilančná rovnica pre prechodný stav vodiča berie do úvahy teplo akumulované vo vodiči. Zmenu teploty vodiča vonkajších elektrických vedení v závislosti od času je potom možné vyjadriť nasledovným spôsobom [14], [15]:

$$\text{Teplo akumulované vo vodiči} = \text{Tepelný prírastok} - \text{Tepelné straty} \quad (3)$$

$$m \cdot c \cdot dT_s/dt = P_J + P_m + P_s - P_c - P_r, \quad (4)$$

kde

m – hmotnosť vodiča na jednotku dĺžky (kg/m),

c – merná tepelná kapacita vodiča (J/(kg·K)).

Pre súčin hmotnosti na jednotku dĺžky a mernej tepelnej kapacity hliníkových vodičov vystužených oceľou, t. j. AlFe lán zložených z dvoch materiálov, v závislosti od teploty vodiča T_s platí [13]:

$$m \cdot c = m_a \cdot c_a + m_s \cdot c_s, \quad (5)$$

$$c_a = c_{a20} \cdot [1 + \beta_a \cdot (T_s - 20)], \quad (6)$$

$$c_s = c_{s20} \cdot [1 + \beta_s \cdot (T_s - 20)], \quad (7)$$

kde

m_a – hmotnosť hliníka (Al) na jednotku dĺžky (kg/m),

c_a – merná tepelná kapacita hliníka (Al) pri teplote T_s (J/(kg·K)),

m_s – hmotnosť ocele (Fe) na jednotku dĺžky (kg/m),

c_s – merná tepelná kapacita ocele (Fe) pri teplote T_s (J/(kg·K)),

c_{a20} – merná tepelná kapacita hliníka (Al) pri teplote 20 °C (J/(kg·K)),

β_a – teplotný súčiniteľ mernej tepelnej kapacity hliníka (Al) (1/K),

c_{s20} – merná tepelná kapacita ocele (Fe) pri teplote 20 °C (J/(kg·K)),

β_s – teplotný súčiniteľ mernej tepelnej kapacity ocele (Fe) (1/K).

Oteplenie a ochladenie vodiča, respektíve teplota vodiča závisí od oteplenia vodiča Jouleovými stratami, magnetickým žiarením a slnečným žiarením, a od ochladenia vodiča konvekciou a radiáciou. Tieto tepelné výkony sú závislé od klimatických podmienok (teplota okolia, rýchlosť a smer vetra, intenzita slnečného žiarenia) a od prúdu tečúceho vodičom. V Tabuľke I je uvedená závislosť medzi zmenou klimatických podmienok a oteplením/ochladením vodiča. Najjednoduchší spôsob, ako modelovať zmeny prevádzkových parametrov vodiča, je skoková zmena.

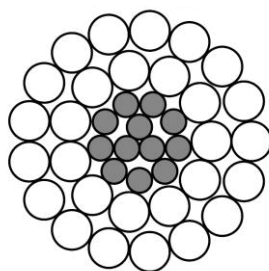
Tabuľka I Závislosť medzi zmenou klimatických podmienok a oteplením/ochladením vodiča

Prevádzkový parameter		ΔP_J	ΔP_s	ΔP_c	ΔP_r
Prúd	Zvýšenie	+			Zvýšenie
	Zníženie	–			Zníženie
Slnečné žiarenie	Zvýšenie		+		Zvýšenie
	Zníženie		–		Zníženie
Rýchlosť vetra	Zvýšenie			+	Zníženie
	Zníženie			–	Zvýšenie
Teplota okolia	Zvýšenie				–
	Zníženie				+

V. IMPLEMENTÁCIA ZVOLENÉHO DYNAMICKÉHO TEPELNÉHO MODELU NA VODIČE VONKAJŠÍCH ELEKTRICKÝCH VEDENÍ PRI REÁLNYCH PREVÁDZKOVÝCH PODMIENKACH

Ako skúmaný fázový vodič je zvolené lano 352-AL1/59-ST1A (350 AlFe 6, resp. AlFe 350/59), ktoré je bežne používané na Slovensku a jeho základné parametre sú uvedené v Tabuľke II. Konštrukčné vyhotovenie lana 352-AL1/59-ST1A je znázornené na Obr. 1.

Nakoľko má lano 352-AL1/59-ST1A dve hliníkové vrstvy, môže byť vplyv magnetického oteplenia podľa technickej príručky CIGRE 601 zanedbaný. Toto lano je špecifické tým, že má 3 osovú vodič (zvyčajne je to 1 osový vodič). Sivé vodiče na Obr. 1 predstavujú oceľové jadro a biele hliníkový plášť.



Obr. 1 Konštrukčné prevedenie lana 352-AL1/59-ST1A (350 AlFe 6)

Tabuľka II Technická špecifikácia lana 352-AL1/59-ST1A (350 AlFe 6)

Parameter	Hodnota
Vonkajší priemer	$D = 26,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Koeficient absorptivity povrchu	$\alpha_s = 0,35 \text{ (-)}$
Koeficient emisivity povrchu	$\varepsilon = 0,35 \text{ (-)}$
Striedavý odpor pri teplote 20 °C	$R_{ac 20} = 0,0816 \cdot 10^{-3} \text{ ohm/m}$
Teplotný súčiniteľ odporu	$\alpha = 4,03 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$
Merná tepelná kapacita ocele (Fe) pri teplote 20 °C	$c_{s 20} = 481 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
Merná tepelná kapacita hliníka (Al) pri teplote 20 °C	$c_{a 20} = 897 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
Teplotný koeficient mernej tepelnej kapacity ocele (Fe)	$\beta_s = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$
Teplotný koeficient mernej tepelnej kapacity hliníka (Al)	$\beta_a = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$
Hmotnosť ocele (Fe) na jednotku dĺžky	$m_s = 0,5119 \text{ kg/m}$
Hmotnosť hliníka (Al) na jednotku dĺžky	$m_a = 1,116 \text{ kg/m}$
Výška nad hladinou mora	$y = 208 \text{ m}$
Počet hliníkových drôtov (Al) vo vrstvách	11 + 17
Počet oceľových drôtov (Fe) vo vrstvách	3 + 9
Prierez hliníkových drôtov (Al)	$351,86 \text{ mm}^2$
Prierez oceľových drôtov (Fe)	$58,9 \text{ mm}^2$
Priemer hliníkových drôtov (Al)	4 mm
Priemer oceľových drôtov (Fe)	2,5 mm

A. Výpočet teploty reálneho vodiča vonkajších elektrických vedení podľa technickej príručky CIGRE 601 po zmene prevádzkových podmienok

Táto časť sa zaoberá výpočtom teploty lana 352-AL1/59-ST1A, ktorého parametre sú uvedené v Tabuľke II, a to dvoma metódami prezentovanými v technickej príručke CIGRE 601: analytickým riešením a numerickým teplotným krokovaním. V analytickom riešení do výpočtu vstupuje teplota vodiča pred zmenou, ale aj asymptotická teplota vodiča po skokovej zmene. Asymptotická teplota je maximálna teplota, ku ktorej sa blíži teplota vodiča, ale podľa analytického výpočtu nikdy túto teplotu nedosiahne (asymptota). Súčin hmotnosti vodiča na jednotku dĺžky m a mernej tepelnej kapacity vodiča c sa v prípade analytického riešenia počíta iba raz, pričom sa vychádza z teploty vodiča pred zmenou. Pri numerickom teplotnom krokovaní sa súčin $m \cdot c$ prepočítava v každom kroku (iterácii). Podrobná metodika výpočtu je uvedená v [16].

V Tabuľke III sú uvedené prevádzkové podmienky a tepelná špecifikácia skúmaného vodiča pred a po zmene všetkých prevádzkových parametrov. Ak sa zmenia všetky prevádzkové podmienky, budú sa na zmene teploty vodiča podieľať všetky tepelné výkony z bilančnej rovnice (4). Táto súčasná zmena všetkých parametrov vyvolá ochladenie vodiča v dôsledku najvýraznejšieho vplyvu, t. j. konvekcie, ktorá súvisí hlavne so zmenou rýchlosti vetra. Oteplenie vodiča Jouleovými stratami a slnečným žiarením nie je dostatočné, rovnako ako pokles miery ochladenia vodiča radiáciou.

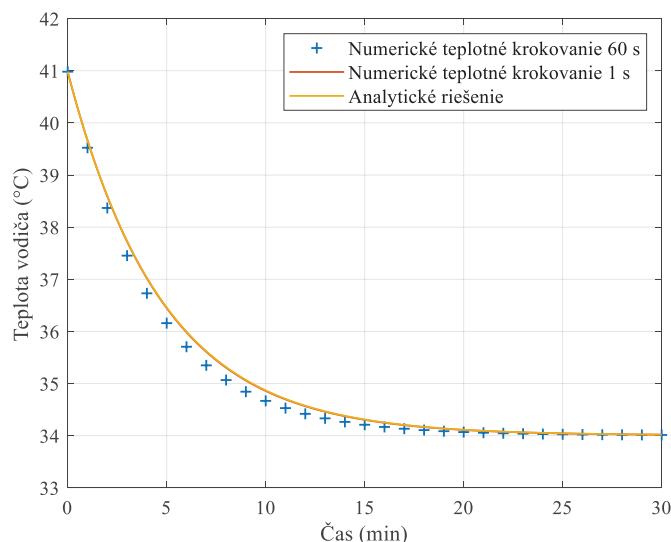
Záporné znamienka pri časových konštantách reprezentujú, že zmena daného prevádzkového parametra nekorešponduje s výslednou zmenou teploty vodiča. Tepelná časová konštanta vyjadruje časový interval, za ktorý sa zmení teplota vodiča z počiatočnej (východiskovej) teploty na cca 63,2 % z asymptotickej teploty. V Tabuľke. III je vidieť, že zvýšenie hodnoty oteplenia Jouleovými stratami a slnečným žiarením by malo viesť k otepleniu vodiča, no aj napriek tomu sa vodič ochladí. Časová konštanta prúdu a slnečného žiarenia je z toho dôvodu záporná. Taktiež zníženie miery ochladenia radiáciou (z dôvodu zvýšenia teploty okolia) by malo mať za následok oteplenie vodiča, ale záporné znamienko pri časovej konstante radiácie vyjadruje, že dochádza k opačnému javu (ochladeniu vodiča).

Na Obr. 2 je zobrazená závislosť teploty vodiča od času po súčasnej skokovej zmene všetkých prevádzkových parametrov uvedených v Tabuľke III. Z Obr. 2 vyplýva to, že analytické riešenie

je takmer totožné s numerickým teplotným krokovaním s krokom 1 s. Výpočet numerickým teplotným krokovaním s krokom 60 s má podobne väčší odklon od analytického riešenia. Z uvedeného vyplýva, že aj numerické teplotné krokovanie s vhodne zvoleným krokom prináša dostatočne presné výsledky.

Tabuľka III Prevádzkové podmienky a tepelná špecifikácia vodiča pred a po súčasnej skokovej zmene všetkých prevádzkových parametrov

Parameter	Pred zmenou	Po zmene
Teplota okolia (°C)	21	24
Rýchlosť vetra (m/s)	0	5
Smer vetra (°)	45	45
Intenzita slnečného žiarenia (W/m ²)	0	400
Prúd (A)	400	700
Ustálená/asymptotická teplota vodiča (°C)	40,9822	34,0071
Oteplenie vodiča Jouleovými stratami (W/m)	14,1518	43,3398
Ochladenie vodiča konvekciou (W/m)	10,4383	74,3786
Ochladenie vodiča radiáciou (W/m)	3,7135	3,2019
Oteplenie vodiča slnečným žiarením (W/m)	0	3,7100
Časová konštanta prúdu (min)		-5,0015
Časová konštanta konvekcie (min)		2,2831
Časová konštanta radiácie (min)		-285,3764
Časová konštanta slnečného žiarenia (min)		-39,3489
Globálna časová konštanta (min)		4,7816



Obr. 2 Závislosť teploty vodiča od času po súčasnej skokovej zmene všetkých prevádzkových parametrov

VI. ZÁVER

Cieľom tohto článku je čitateľovi priblížiť problematiku výpočtu teploty vodičov vonkajších elektrických vedení súvisiaci s dynamickou ampacitou podľa metodiky uvedenej v technickej príručke CIGRE 601. Hlavným zámerom je poukázať na skutočnosť, že jednotlivé prevádzkové parametre (klimatické podmienky a prúd tečúci vodičom) majú vplyv na teplotu vodiča a menia sa v čase. Konkrétne sa skúma vplyv prevádzkových parametrov na teplotu vodiča po ich skokovej zmene, t. j. závislosť teploty vodiča od času. Výpočet sa realizuje dvoma metódami, analytickou a numerickou. V prípade skokovej zmeny teploty okolia, intenzity slnečného žiarenia a prúdu platí medzi týmito parametrami a teplotou vodiča priama úmernosť. Medzi teplotou vodiča a zmenou rýchlosti vetra platí nepriama úmernosť: čím je vyššia rýchlosť vetra, tým nižšia je teplota vodiča. V prípade súčasnej zmeny všetkých prevádzkových parametrov sa podieľajú na zmene teploty vodiča všetky tepelné výkony, ktoré prispievajú k otepleniu/ochladeniu vodiča. Výsledné oteplenie/ochladenie vodiča je závislé od najvýraznejšieho vplyvu. V prípade rozoberanom v tomto článku je to vplyv konvekcie, ktorá súvisí hlavne so zmenou rýchlosti vetra.

POĎAKOVANIE

Prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18 „Výskum pôsobenia SMART sietí na distribučnú sústavu“.

LITERATÚRA

- [1] M. Kanálik, A. Margitová, L. Beňa, „Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE Technical Brochure 601 in Slovakia.“ In *Journal of Electrical Engineering 101(16)*, 2019, s. 921 – 933
- [2] S.D. Kim, M.M. Morcos, „An application of dynamic thermal line rating control system to up-rate the ampacity of overhead transmission lines.“ In *IEEE Transactions on Power Delivery 28(2)*, 2013, s. 1231 – 1232
- [3] S. Karimi, P. Musilek, A.M. Knight, „Dynamic thermal rating of transmission lines: A review.“ In *Renewable and Sustainable Energy Reviews 91*, 2018, s. 600 – 612
- [4] Y. Wang, Yanling et al., „Uncertainty analysis of dynamic thermal rating based on environmental parameter estimation.“ In *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018
- [5] M. Ntuli et al., „Increasing the capacity of the transmission lines via uprating: an updated review of benefits, considerations and developments.“ In *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2016
- [6] R. Adapa, D.A. Douglass, „Dynamic Thermal Ratings: Monitors and Calculation Methods.“ In *IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, 2005, s. 163 – 167
- [7] D.A. Douglass et al., „A Review of Dynamic Thermal Line Rating Methods with Forecasting.“ In *IEEE Transactions on Power Delivery 34(6)*, 2019, s. 2100 – 2109
- [8] E. Fernandez et al., „Review of dynamic line rating systems for wind power integration.“ In *Renewable and Sustainable Energy Reviews 53*, 2016, s. 80 – 92
- [9] CIGRE, Working Group B2.36, „Guide for Application of Direct Real-Time Monitoring Systems,“ Technical Brochure 498, 2012
- [10] A. Popelka et al., „ADVANCED APPLICATIONS OF WAMS.“ In *22nd International Conference on Electricity Distribution*, 2013
- [11] V. Krištof, S. Kušnir, M. Kolcun, „Základy technológie WAMS.“ In *Electric Power Engineering 2011 : proceedings of the 12th international scientific conference*, 2011, ISBN 978-80-248-2393-5
- [12] B. Pouckovic, Z. Djuricic, „Current carrying capacity of overhead line that connects wind power plant to the grid.“ In *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2011
- [13] CIGRE, Working Group B2.43, „Guide for thermal rating calculation of overhead lines,“ Technical Brochure 601, 2014
- [14] J. Hosek et al., „Effect of time resolution of meteorological inputs on dynamic thermal rating calculations.“ In *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011
- [15] V.T. Morgan, „Rating of bare overhead conductors for intermittent and cyclic currents.“ In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers 116(8)*, 1969, s. 1361 – 1376
- [16] Štieberová Nikola, „Výpočet dynamickej ampacity vonkajších vedení,“ Diplomová práca, 2020, s. 27 – 33