

ZKUŠENOSTI Z PROVOZU WAMS – MĚŘENÍ A VYUŽITÍ AKTUÁLNÍCH PARAMETRŮ VEDENÍ

Antonín Popelka, Daniel Juřík, Petr Marvan, AIS spol. s r.o. Brno

Eduard Janeček,

ZČU Pizeň

Parametry vedení nejsou konstantními hodnotami. Na jejich aktuální velikost mají vliv podmínky, např. teplota vodiče ovlivňuje činný odpor vedení, příčný odpor závisí na kvalitě izolátorů, stáří vedení a na vzdušné vlhkosti. V systémech WAM je možné on-line vyhodnocovat parametry vedení a výsledků použít pro další aplikace.

Znalost aktuálních parametrů může upřesnit a ovlivnit výsledky funkcí dosud používajících fixní – statické hodnoty parametrů. Jsou to např. hodnocení kvality vedení, výpočet ztrát, limity přenosové kapacity vedení, výpočty sítí, estimace stavu soustavy, kontingenční analýza a j.

V příspěvku bude zmapována problematika měření parametrů vedení, uvedeny výsledky měření z provozu WAMS METEL v distribuční síti a naznačeny další možnosti využití aktuálních parametrů v energetické praxi – jak v provozu, tak v údržbě a obnově sítí.

1. ÚVOD

Wide Area Monitoring Systémy (WAMS) umožňují v současné době realizovat nové funkce pro řízení a rozvoj přenosových a distribučních sítí, např. průběžné hodnocení stability sítě, ampacity vedení, průběžné měření parametrů vedení a detekci kritických stavů sítě.

Systémy WAM jsou založeny na měření synchrofázorů napětí a proudů. Technologie WAMS se začala rozvíjet koncem devadesátých let především v Severní Americe a v současnosti se široce rozvíjí a nasazuje po celém světě a zvláště v prudce rozvíjejících se zemích Asie.

Společnost AIS nasazuje měření synchrofázorů od roku 2000. Systém WAMS METEL je zcela srovnatelný s podobnými systémy světových výrobců. V systému METEL je zpracována řada aplikací, které jsou provozovatelům k dispozici. Je to např.

- Podpora bezpečného spínání-kruhování ve vn sítích
- Monitoring komplexních napětí (velikosti a úhlů) mezi uzly
- Monitoring frekvence - Detekce a analýza systémových oscilací
Zahrnuje modální analýzu frekvence pro zjištění kritických systémových oscilací (např. události v síti ENTSO-E v únoru 2012)
- Detekce ostrovního provozu
Identifikuje oddělení části sítě a chování ostrova. Monitoruje podmínky pro přifázování
- Detekce snížení rezervy statické stability
- Monitoring stability napětí
- Identifikace provozních parametrů vedení
- Monitoring teploty vedení a aktuální přenosové kapacity vedení (Dynamic Rating)

Některé z uvedených aplikací jsou společné pro distribuční i přenosové sítě, jiné jsou vyvinuty speciálně jenom pro distribuční, nebo další jenom pro přenosové sítě.

Další funkce a aplikace se připravují a testují..

Od prosince 2011 je v trvalém provozu ověřovací a testovací systém WAMS METEL v oblasti sítě 110kV. Data získaná z tohoto systému a z měření pomocí mobilních terminálů PMU METEL v jiných sítích byla použita jako podklad pro tuto přednášku.

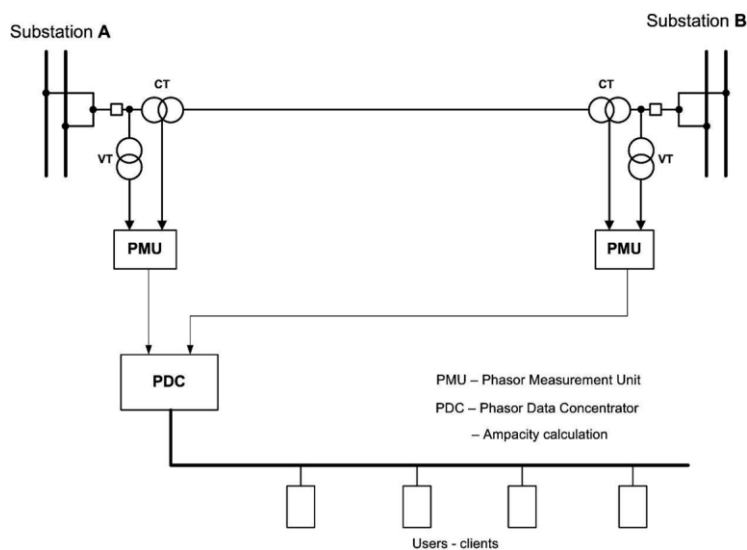
V přednášce se zaměříme na průběžné monitorování parametrů vedení a na možnosti jejich využití.

2. MONITORING PARAMETRŮ VEDENÍ

Monitorování parametrů vedení v systému WAMS MEEL se provádí on-line, tedy za provozu při provozních podmínkách. Na vedení je plné napětí, meteorologické podmínky jsou aktuální, tj. měnící se v čase.

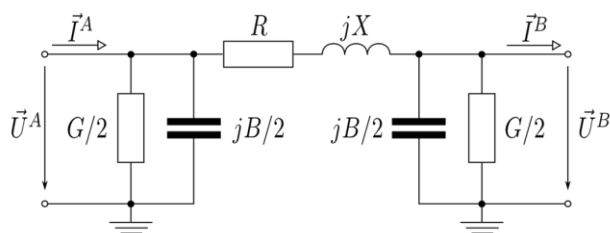
2.1. PRINCIP METODY

Pro zjištění parametrů vedení se měří synchrofázory napětí a proudu na obou stranách vedení dle schémat na obr. 1. Naměřené synchrofázory se přenáší do centrály PDC, kde se archivují v databázi, odkud jsou k dispozici aplikačním programům. Jedna z aplikací provádí výpočet aktuálních parametrů vedení.



Obr. 1: Schéma pro měření parametrů vedení

Náhradní schéma vedení předpokládáme ve formě π -článku. Ze znalosti současných fázorů napětí a proudu z obou stran vedení se podélná reaktance Z a příčná admittance Y v komplexním tvaru spočítají ze vztahů uvedených na obr. 2.



$$Z = R + Xj = \frac{UB^2 - UA^2}{UB * IA + UA * IB}$$

$$Y = G + Bj = 2 * \frac{IA - IB}{UA + UB}$$

Obr. 2: Náhradní schéma vedení a vzorce pro výpočet parametrů

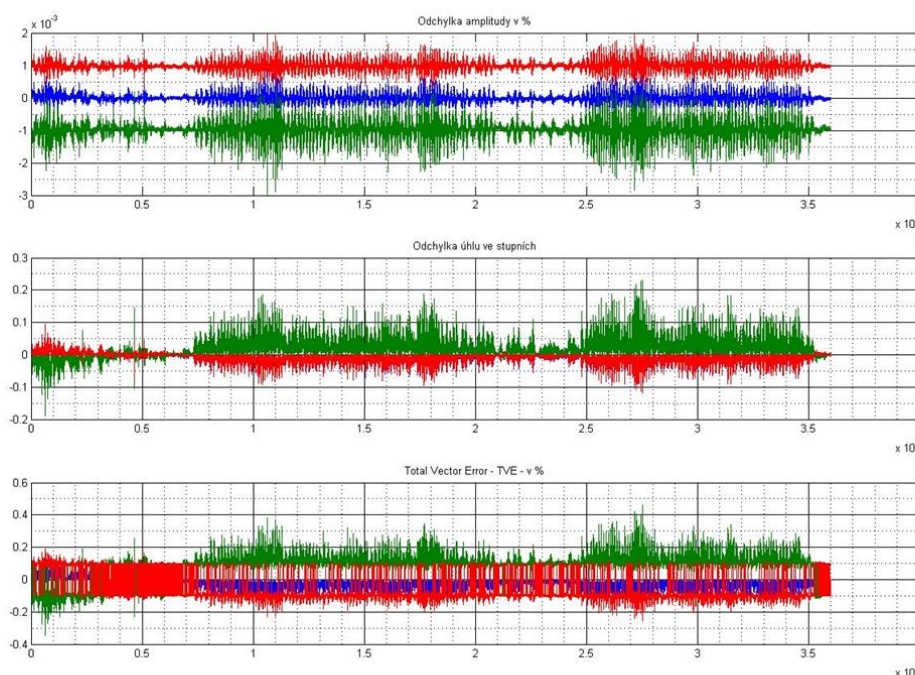
2.2. PŘESNOSTI MĚŘENÍ

Analýzou vztahů pro výpočet parametrů zjistíme citlivost výsledku na chybě měření. Impedance je více závislá na chybě napětí, admittance více na chybě proudu.

Např. pro vedení 110kV zatížené z 50% se změna (chyba) některého z napětí o desetiny procenta projeví změnou impedance o jednotky až desítky procent.

Na obr. 3 je průběh odchylky měření synchrofázorů napětí na třech vedeních od estimované hodnoty napětí v uzlu sítě 110kV. Měření synchrofázorů jsou zatížena chybami nahodilými a systematickými. Pro zpřesnění výsledků se nahodilé chyby mohou eliminovat filtračními metodami (obvykle za ztráty dynamických aspektů měření), pro snížení systematických chyb se dají použít estimační metody.

Na třetím grafu je průběh komplexní chyby TVE (Total Vector Error).



Obr. 3: Chyba měření synchrofázorů v síti 110kV

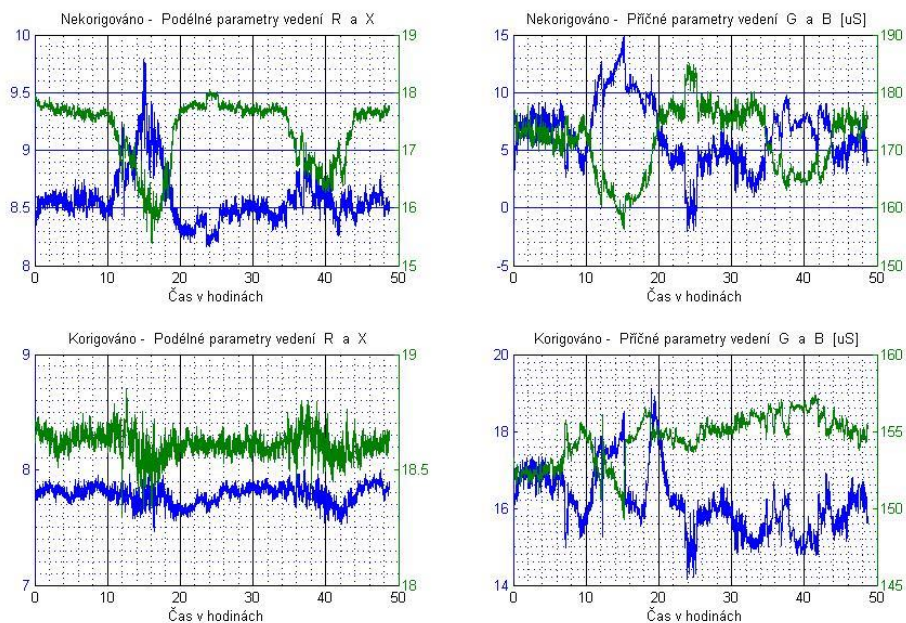
2.3. KOREKCE MĚŘENÍ

Ke zlepšení systematických chyb měření synchrofázorů napětí a proudů jsme použili řadu estimačních postupů. Všechny vycházely z fundamentální analýzy modelu vedení případně rozšířeného o okolí. Analýza používá známých znalostí o chování modelu vedení, které jsou aplikovány na určitý časový interval. Jsou to např. rovnováha činných a jalových výkonů, přechodová odezva podélného odporu vedení na změny podmínek a jiné.

Výsledkem jsou korekční koeficienty pro synchrofázory napětí a proudu.

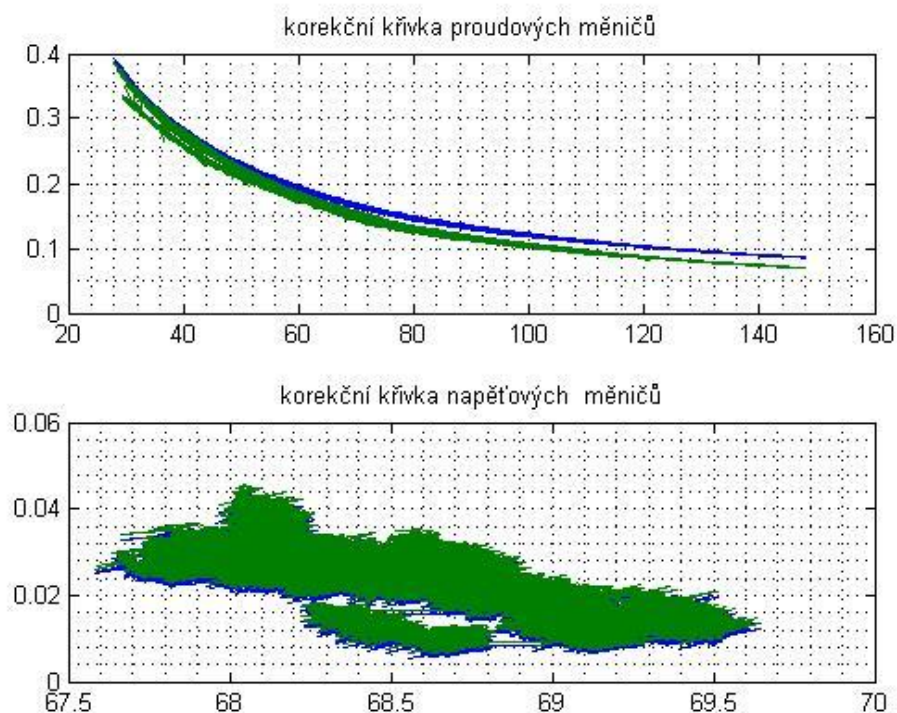
Na obr. 4 jsou zobrazeny parametry vedení 110kV (43km, AlFe185) vypočítané z měření v trvání 49 hodin. Začátek byl v 11 hodin dopoledne. V průběhu parametrů vypočítaných z nekorigovaných hodnot jsou evidentní anomálie – změna reaktance X až o 2Ω (měla by být konstantní), skokové změny odporu R a jiné.

Po estimaci měřených hodnot je průběh parametrů fyzikálně věrohodnější. Přetrvávající odchylky jsou v nočních hodinách, kdy zatěžovací a tedy i měřený proud dosahoval hodnoty 12% jmenovitého rozsahu měřících transformátorů proudu.



Obr. 4: Korigované a nekorigované parametry vedení

Dosud nezveřejňovanou možností systémů WAMS s použitím zmíněných postupů je odhad chyby převodu měřicích transformátorů. Z popsaných měření byly vyhodnoceny korekční křivky MTP a MTN, zobrazeny jsou na obr. 5.



Obr. 5: Vypočítané korekční křivky MTN a MTP

2.4. VÝZNAM PARAMETRŮ

Parametry R, X, G a B jsou projevem elektrických vlastností vedení. Jejich stručná interpretace je:

R – teplota vodiče, měřítko průvěsu vedení, činné ztráty

X – jalové ztráty, úbytek napětí na vedení, stabilita sítě

B – jalové ztráty, napětí naprázdno

G – činné ztráty, kvalita vedení.

3. PARAMETRY VEDENÍ

V této kapitole některé uvedeme výsledky monitoringu parametrů vedení a možnosti jejich interpretace.

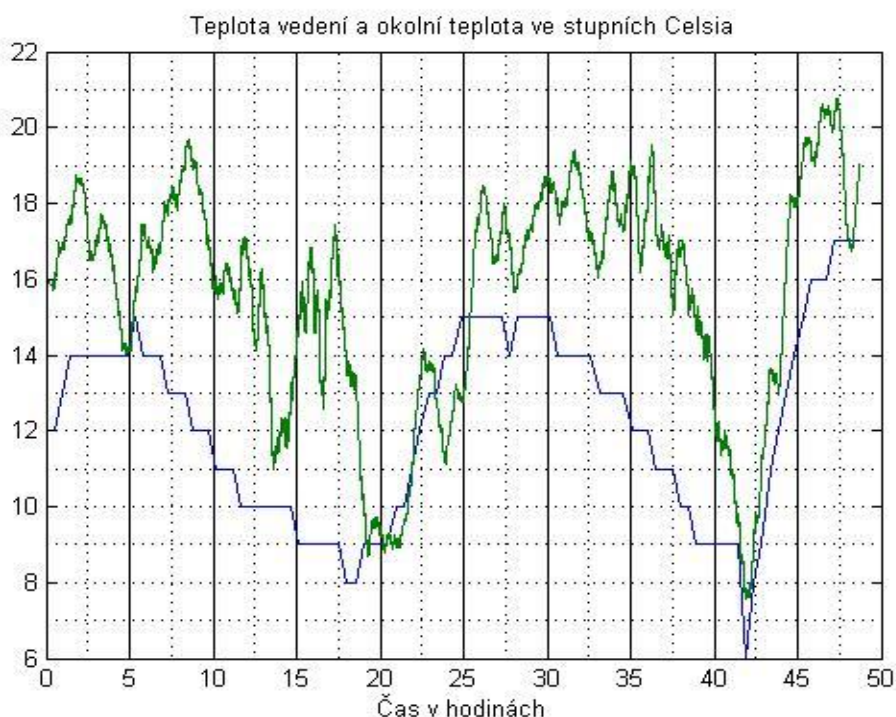
Parametry vedení potřebuje a používá provozovatel sítě k různým účelům. Slouží např. pro výpočty chodu sítí, pro estimace stavu, kontingenční analýz pro výpočet ztrát a pro nastavování ochran. Parametry jsou po vybudování vedení určeny z konstrukčních parametrů a z údajů výrobce vodičů. Dalším krokem někdy bývá následné měření parametrů při vypnutém stavu. Při tomto měření se používá frekvence a hladina napětí odlišné od provozních hodnot.

Takto získané parametry se většinou považují za pevné hodnoty v krátkodobém i dlouhodobém horizontu. Skutečné hodnoty parametrů se od používaných fixních hodnot liší a tím ovlivňují správnost výsledků v uvedených aplikacích.

Dále uvedeme některé výsledky s použitím výše uvedených postupů zjištění parametrů. Apacitou vedení se zabývala naše přednáška na konferenci CIREĐ v Táboře v r. 2012 a ve Stockholmu 2013, [4] a [5].

3.1. TEPLOTA VEDENÍ

Podélný činný odpor vedení je jednoznačným projevem průměrné teploty vedení. Teplota vedení je závislá na meteorologických podmínkách prostředí a na procházejícím proudu, dominantními vlivy jsou teplota okolí a tepelné projevy slunečního záření. Velikost a průběh odporu vedení je zcela obrazem velikosti a průběhu teploty. Na obr. 6 je průběh teploty vedení během zmíněného měření. V denních hodinách je znatelný pří-
spěvek slunečního záření.



Obr. 6: Průběh okolní teploty a teploty vedení

3.2. KVALITA VEDENÍ

Vedení v síti mají různé stáří, od nových až po desítky let. Během provozu se mění kvalita vedení a tato jiná kvalita se odráží ve změně parametrů.

X převážně odpovídá konstrukčním parametrům, geometrii fází, průměru vodičů. Stářím by se impedance neměla příliš měnit. Tabulková hodnota vedení je $19,071\Omega$, změřená průměrná hodnota je $18,71\Omega$. Vedení prošlo několika částečnými rekonstrukcemi.

R – konstrukčním parametrem je R_0 nebo R_{20} , odpor při teplotě 0°C nebo 20°C . Teplotní koeficient odporu se běžně neudává. Tyto hodnoty podléhají stárnutí vlivem nalomení či lámání pramenů a korozi materiálu. Aktuální odpor se samozřejmě mění s teplotou. Tabulkový R_0 vedení je $7,419\Omega$, průměrný odpor během měření je $7,7857\Omega$. Průměrná teplota okolí byla $12,3^\circ\text{C}$.

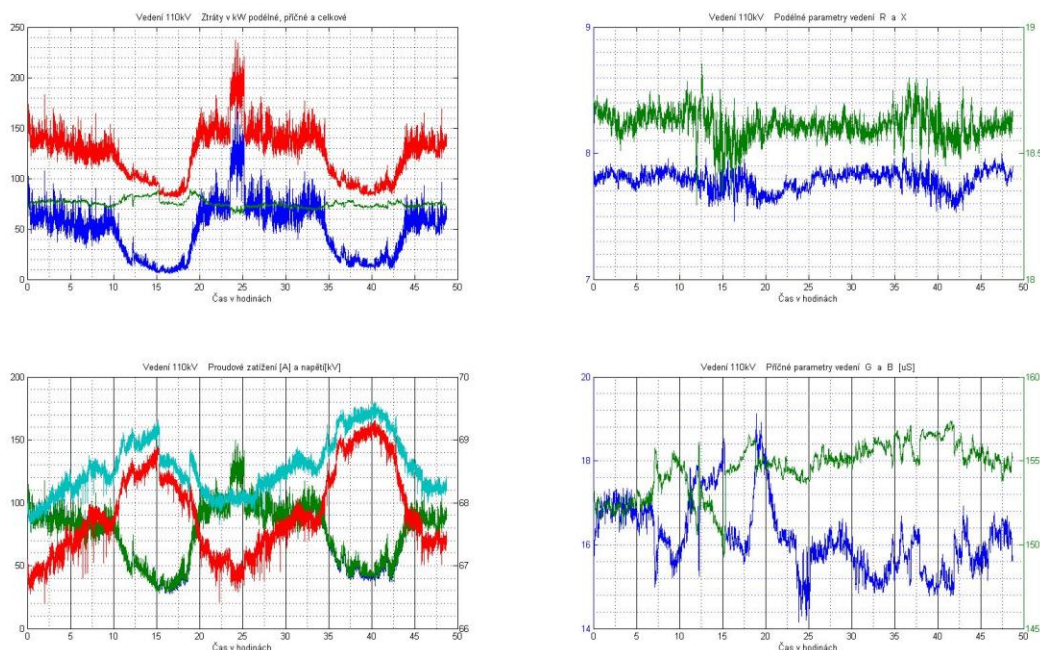
B je kapacitance vedení, je závislá na geometrii vodičů vedení, výšce vodičů od země a jejich vzdálenosti od okolí (stromy, budovy). Na stáří vedení je téměř nezávislá. Průměr měření B je $152\mu\text{S}$, tabulková velikost je $137\mu\text{S}$. Příčné parametry vedení jsou dominantně závislé na přesnosti měření fázorů proudů, která byla při zatížení vedení v rozsahu 12 – 27% jmenovité hodnoty MTP nízká.

G – konduktance – příčná vodivost – převrácená hodnota izolačního odporu vodičů proti zemi. Tato hodnota podléhá stárnutí ze všech parametrů nejvíc. Proti nízké hodnotě u nového vedení se zvyšuje vlivem zvýšené vodivosti povrchu izolátorů při usazování nečistot, částí kouře, exhalacemi a podobně. Vliv mají i průrazy a vnitřní narušení homogenity. Přispívá i počasí, především vlhkost vzduchu a vlhkost povrchu izolátorů. Je zřejmé, že tento parametr nejvíc reprezentuje kvalitu vedení a jeho velikost a změna může být jejím měřítkem. Všeobecně se považuje vodivost za tak nízkou, že ji není třeba ani uvažovat. Tabulková hodnota nového vedení je $0,0074\mu\text{S}$, průměrná hodnota během měření byla $16\mu\text{S}$. Tato hodnota je cca 2000x větší než tabulková. Příčina může být v metodice výpočtu nebo chybou v tabulce.

3.3. ZTRÁTY NA VEDENÍ

Parametry vedení a elektrické veličiny určují činné a jalové ztráty na vedení.

Na obr. 7 v prvním okně jsou činné ztráty na vedení podélné (modrá), příčné (zelená) a celkové. Příčné ztráty jsou v tomto případě velmi vysoké, jsou stejné jako podélné ztráty při zatížení vedení na 20%. Měříme i na jiných vedeních, této úrovně se jinde zdaleka nedosahuje.



Obr. 7: Ztráty na vedení

4. ZÁVĚR

Tato přednáška chce upozornit na možnosti využití výsledků ze systémů WAMS, na potenciál v aplikacích, které nejsou s dosavadní měřicí technikou možné. Přínosem je to, že výsledky jsou získány během normálního provozu v aktuálních provozních podmínkách.

Pro akceptování těchto postupů v distribučních společnostech je žádoucí metodiku WAMS ve více případech ověřit a výsledky srovnat s jinými metodami a zkušenostmi.

Domníváme se, že ke zvlášť perspektivním využitím patří monitorování kvality vedení a ampacity vedení.

Metodika měření parametrů prostředky WAMS byla částečně zpracována z prostředků projektu finančně podporovaného Technologickou Agenturou České Republiky.

5. LITERATURA

- [1] CIREĐ Turino 2005, příspěvek na konferenci
- [2] CIREĐ Frankfurt 2011, příspěvek na konferenci
- [3] Poděbrady 2010, příspěvek na odborný seminář
- [4] CIREĐ Tábor 2012, příspěvek na konferenci
- [5] CIREĐ Stockholm 2013, příspěvek na konferenci



Ing. Antonín Popelka

AIS spol. s r.o.
Palackého tř. 258/73, 61200 Brno
Tel.: +420541248812-3
E-mail: popelka@ais-brno.cz

Po absolvování elektrotechnické fakulty VUT, obor technická kybernetika, pracoval 26 let ve firmě ORGREZ, poslední roky byl vedoucím oddělení pro automatizaci a řízení ve výrobě a přenosu elektrické energie. V roce 1990 založil se spolupracovníky společnost AIS zabývající se vývojem a nasazováním moderních řídicích a komunikačních technologií, převážně v přenosu a v distribuci elektřiny. Od založení firmy do současné doby je jejím ředitelem. Jednou z prioritních oblastí činnosti jsou systémy Wide Area Monitoring a jejich využití v expertních aplikacích.



Ing. Daniel Juřík, Ph.D.

AIS spol. s r.o.
Palackého tř. 258/73, 61200 Brno
Tel.: +420541248812-3
E-mail: jurik@ais-brno.cz

Vystudoval obor Technická kybernetika FE VUT v Brně. Po absolvování byl zaměstnán v ORGREZu Brno. V letech 1990-1991 externě vyučoval na FE VUT Brno. V letech 1994-96 byl externím lektorem autorizovaného školicího střediska firmy Microsoft u PVT a.s. V roce 2003 obhájil doktorskou práci na téma „Sběr technologických dat v sítích Ethernet“. Od roku 1993 se ve firmě AIS spol. s r.o. specializuje na problematiku přenosu, zpracování a prezentace dat z technologických procesů.

**Ing. Petr Marvan**

AIS spol. s r.o.
Palackého tř. 258/73, 61200 Brno
Tel.: +420541248812-3
E-mail: marvan@ais-brno.cz

Absolvent elektrotechnické fakulty VUT v Brně. Následně pracoval jako technik a programátor řídicích mini a mikropočítačů v Tesle Eltos DIZ. V roce 1990 nastoupil do ORGREZ k.ú.o., kde se podílel na vývoji informačních a dispečerských systémů pro energetiku. Od roku 1993 se stejnou činností zabývá ve firmě AIS spol. s r.o.

**Doc. Ing. Eduard Janeček, CSc.**

Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 8, Plzeň
Tel.: +420377632542
E-mail: Janecek@kky.zcu.cz

Zabývá se metodami a algoritmy modelování, optimalizace, simulace, diagnostiky a spolehlivosti především energetických systémů a jejich uplatněním v praxi. Se svými doktorandy dosáhl významných aplikačních výsledků (více než 20 významných průmyslových projektů), jejichž principy byly publikovány jako kapitoly v knižních vydáních IEEE a on-line knize a prezentovány mimo jiné na světových kongresech International Federation on Automatic Control. Byl a je řešitelem nebo spoluřešitelem projektů v působnosti MŠMT, MPO, TAČR, EU-FP7 a několika projektů smluvního výzkumu pro firmy AREVA, ČEZ, ČEPS a Škoda Power.