

## 1.1. MĚŘENÍ PJ SPECIALIZOVANÝMI PROSTŘEDKY

### 1.1.1. Přenosný rychlý monitor PRYM firmy EGU Brno

PRYM je navržen pro měření a záznam přechodových jevů a poruchových událostí střídavých napětí a proudů trojfázových sítí nn, vn a vvn. Při zadání nižší rychlosti vzorkování jej lze výhodně použít i pro provádění delších měření ustálených a pomalu proměnných stavů. Realizované způsoby spouštění záznamu umožňují použití monitoru PRYM jak při měření jednorázově připravených experimentů, tak při dlouhodobých sledováních náhodných událostí. Je možno zaznamenat také zvolený časový úsek před vznikem události. V průběhu jednoho měření lze zaznamenat sekvenci až čtyř shodně, případně různě definovaných událostí.

Ve vstupním protokolu je možné definovat tyto druhy zahájení (startu) měření:

- § okamžitě,
- § po zadaném čase,
- § od kombinace externích signálů A a B,
- § od kombinace externích signálů A a B po zadaném čase.
- § Čas zahájení měření sestává z datumu a časového okamžiku s rozlišením na 1 s.

Změřená data jsou ukládána do kruhově organizovaného paměťového prostoru vyhrazeného první události. Při zaplnění paměťového prostoru přepisují postupně nová data stará. Jakmile se vyskytne vstupním protokolem definovaná první událost, odměří monitor PRYM pro první událost definovaný počet vzorků po události a ukončí záznam do paměťového prostoru vymezeného první události. Zůstane zde nepřepsaná doplňující část s daty naměřenými před vznikem první události (tzv. pretrigger). Po ukončení měření a záznamu první události očekává monitor naplnění podmínky, popřípadě podmínek zahájení měření druhé události. Po splnění podmínek startu druhého měření monitor měří zadané kanály a měřené hodnoty postupně ukládá do paměťového prostoru vyčleněného druhé události. Při výskytu druhé události monitor doměří požadovaný počet vzorků po druhé události. Pak monitor přechází na měření a vyhodnocování třetí, posléze čtvrté události. Podmínku splnění záznamu události lze naprogramovat pro každou ze čtyř událostí samostatně.

Měřená napětí	3 galvanicky oddělených střídavých napětí $U_{im}$ - 57,73 V - 100 V - 230 V
Přesnost měření	Při $f = 50$ Hz 1 % z $U_{im}$ Rozlišovací schopnost 7 bitů + znaménko
Měřené proudy	3 střídavé vzájemně galvanicky oddělené proudy $I_1, I_2, I_3$ Měření proudů vždy pomocí klešťových transformátorů
Jmenovité hodnoty měřených proudů	1 A, 5 A, 30 A, 150 A Klešťový transformátor PRYM s přepínačem 100 A, 300 A, 600 A, 1000 A Klešťové transformátory MT
Maximální vzorkovací frekvence	7,2 kHz
Start měření, stop měření	Dvě externí spouštěcí stejnosměrná napětí A, B
Rozsah a organizace paměti	Kapacita datové paměti 128 kB nebo 512 kB Možnost záznamu až 4 událostí do paměti minimální prostor pro záznam události 32 kB nebo 128 kB
Referenční teplota	20 °C
Teplota okolí	-20 °C až 60 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	85 %
Pracovní poloha	Libovolná, přednostně svislá
Napájení	180 V až 260 V
Příkon	3 VA
Rozměry	150 x 200 x 60 mm

Hmotnost	1 kg
----------	------

Tab. 1 Technické parametry monitoru PRYM

### 1.1.2. Sdružený síťový analyzátor BK550 firmy Elcom Praha

Sdružený síťový analyzátor BK 550 – měřicí systém pro identifikaci a analýzu rušivých a zpětných vlivů v napájecích sítích, pro měření základních a kvalitativních parametrů elektrické energie, tj. harmonické a mezipharmonické napětí a proudů, efektivní hodnoty napětí a proudů, činné, zdánlivé a jalové výkony, kolísání napětí, analýza napětí podle ČSN EN 50160.

Tento výkonný přístroj byl vyvinut a realizován na bázi technologie virtuální instrumentace v souladu s evropskými standardy a IEC doporučeními. Je dodáván v různých provedeních. V analyzátoru BK 550 je v současné době integrováno až devět přístrojů a modul analýzy naměřených dat:

- § FFT analyzátor harmonických a mezipharmonických pro 4 napěťové a 4 proudové měřené kanály
- § osciloskop
- § monitor výkonů a energií
- § vektorskop
- § měření blikání (flickermetr)
- § monitor napětí podle ČSN EN 50160
- § zapisovač rychlých dějů (transient recorder)
- § zapisovač pomalých dějů
- § modul zpracování naměřených dat

Kromě těchto měřicích přístrojů obsahuje sdružený analyzátor sítí BK 550 softwarový modul zpracování naměřených dat a software pro komunikaci mezi analyzátozem a UPS. BK 550 používá měřicí kartu firmy National Instruments a jeho firmware je naprogramován ve vývojovém prostředí LabVIEW. Hardware analyzátoru je založen na průmyslovém PC Dewetron 3010 (2010) vybaveném dotykovým aktivním 10,4" TFT displayem.

Z hlediska zadaného úkolu práce je výhodnou funkcí zapisovač rychlých dějů (transient recorder). Může uložit 65535 vzorků pro každý ze čtyř měřených napětí a čtyř měřených proudů po dosažení spouštěcí podmínky. Je možno nastavit až 12 typů spouštěcích podmínek: strmost napětí, strmost proudu, špičková hodnota napětí, špičková hodnota proudu, RMS hodnota napětí, RMS hodnota proudu, RMS hodnota vybrané harmonické napětí, RMS hodnota vybrané harmonické proudu, THD hodnota napětí, THD hodnota proudu, nesymetrie napětí, externí TTL signál. Pro každou podmínku lze nastavit referenční hodnotu a podmínku větší/menší než. Všechny podmínky lze kombinovat logickými funkcemi OR nebo AND.

Vzorkovací frekvence závisí na počtu povolených kanálů:

- § 2 kanály – 25,6 kHz
- § 6 kanálů – 12,8 kHz
- § 8 kanálů – 6,4 kHz

V následující tabulce jsou uvedeny důležité technické parametry deklarované výrobcem.

Měřená napětí	4 galvanicky oddělená střídavá napětí do 2 kV
Rozlišení	12 bit
Měřené proudy	4 střídavé vzájemně galvanicky oddělené proudy; měření proudů vždy pomocí klešťových transformátorů
Vzorkovací frekvence	6,4 kHz / kanál
Procesor systému	AMD K6, 2400 MHz
RAM	128 MB
HDD	4 GB

Rozhraní	1 x LPT, 1 x RS-232, Ethernet
Referenční teplota	20 °C
Teplota okolí	pro měření 0 °C až 50 °C, pro ukládání -20 °C až 70 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	10 % až 80 %
Napájení	180 V až 265 V
Příkon	50 VA
Rozměry	372 x 238 x 150 mm
Hmotnost	6 kg

Tab. 2 Technické parametry sdruženého síťového analyzátoru BK 550

Je třeba poznamenat, že ani firma Elcom neuvádí počet A/D převodníků měřícího přístroje, což je v případě tak nákladného zařízení poměrně nekorektní.

## 1.2. MĚŘENÍ PJ DIGITÁLNÍM OSCILOSKOPEM

Osciloskop je v analogové podobě zařízení určené pro snímání a následné zobrazování periodických signálů, popřípadě je možno po krátkou dobu uchovat jednorázovou změnu měřeného signálu, máme-li k dispozici osciloskop s paměťovou obrazovkou. Jak již bylo dříve uvedeno, analogový osciloskop je pro zadaný úkol zcela nevyhovující.

Revoluci v možnostech využití osciloskopů přinesl dynamický vývoj číslicové techniky. Digitální osciloskopy současných konstrukcí jsou schopny nejen ukládat měřená data a tato data opětovně zobrazovat v libovolných intervalech, ale také zpracovávat a analyzovat naměřené údaje rozličnými metodami.

V následujících podkapitolách se budu věnovat podrobnějšímu popisu digitálních osciloskopů firem:

- § LeCroy, typ 9314 A, produkce USA,
- § YOKOGAWA, typ DL 708 E japonské produkce.

### 1.2.1. Osciloskop LeCroy 9314 A

Firma LeCroy patří se svými produkty v oblasti analogových a digitálních osciloskopů mezi absolutní světovou špičku (spolu s firmami Hewlett-Packard, Tektronix, atd.).

V osciloskopu je pro každý kanál k dispozici jeden 8 bitový A/D převodník s rychlostí vzorkování 100 MS/s, tj. 100 milionů vzorků (samples) za sekundu. Tato násobná architektura A/D převodníků zaručuje souvztažnost absolutních amplitud a fází měřených signálů. Srdcem osciloskopu je mikroprocesor firmy Motorola, který provádí výpočty a řídí činnost osciloskopu. Mikroprocesor řídí také bránu rozhraní GPIB, stejně jako bránu RS-232C pro propojení osciloskopu s plotterem, tiskárnou, se vzdáleným terminálem či jiným pomalým zařízením. Veškerá vnitřní komunikace probíhá po 16 bitové sběrnici.

V následující tabulce jsou uvedeny důležité technické parametry osciloskopu:

Počet kanálů	4 galvanicky oddělené se samostatnými A/D převodníky
Rozlišení	8 bit / kanál
Vzorkovací frekvence „Single shot“	100 MHz / kanál (pro neperiodické signály)
Vzorkovací frekvence „RIS“	10 GHz / kanál (pro periodické signály)
Šířka pásma	400 Mhz
Procesor systému	Motorola (bez bližších informací)
Akviziční paměť (mezipaměť)	1 MB
HDD	neuveďeno, možnost připojení PCMCIA HDD
FDD	3,5 palce 1,44 MB
Rozhraní	GPIB, RS-232C, PCMCIA, LPT Centronics, SCSI
Referenční teplota	20 °C
Teplota okolí	5 °C až 40 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	menší než 80 %

Napájení	180 V až 250 V
Příkon	neuveden
Rozměry	neuvedeny
Hmotnost	neuvedena

Tab. 3 Technické parametry osciloskopu LeCroy 9314 A

Je možno zvolit vnitřní nebo vnější časovou základnu. V závislosti na zvolené časové základně je možno nastavit z těchto režimů vzorkování:

- § jednorázový sběr dat (Single shot) – shromážděná data se skládají z nepřerušené řady naměřených hodnot, snímaných ve stejných časových intervalech, přiřazených k jedné události spuštění; tento systém používá většina digitálních osciloskopů,
  - § náhodné prokládané vzorkování (Random Interleaved Sampling – RIS) – umožňuje zvýšit efektivní vzorkovací rychlost ze 100 MS/s až na 10 GS/s.
  - § režim rolování – jednorázový sběr dat při nastavení časové základny pomalejší než 0,5 s/dílek
  - § režim sekvence – rozšířený režim jednorázového sběru dat
- Spouštění měření osciloskopu (trigger) určuje dobu, kdy se aktivuje a zastaví sběr dat.

Možnosti spouštění lze rozdělit do dvou tříd:

- § EDGE (spouštění hranou) – jednoduché spouštění náběžnou hranou vstupního signálu, spouštění odvozené ze sítě, spouštění s časovým blokováním
- § SMART (inteligentní) – spouštění šířkou impulsu spouštěcího signálu, spouštění šířkou intervalu mezi spouštěcími impulsy, spouštění odvozené od vf signálů (TV, Dropout)

Osciloskop LeCroy zvládá mnoho metod analýzy signálu, z nichž nejdůležitější z hlediska zadané práce je rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation – FFT) pro spektrální analýzu naměřeného signálu.

Obrazovku osciloskopu tvoří LCD (Liquid Crystal Display) úhlopříčky 9 palců s rozlišením 810 x 696 bodů.

### 1.2.2. Osciloskop YOKOGAWA DL 708 E

Osciloskopy YOKOGAWA japonské produkce jsou představiteli střední třídy této oblasti měřících přístrojů.

Celá koncepce typu DL 708 E je založena na filosofii tří bloků, přičemž prvním blokem je blok vstupních modulů (Module Block) se vstupními obvody a A/D převodníkem. Je možno připojit až osm vstupních modulů. Obdobně jako u osciloskopu LeCroy, velikou výhodou je přítomnost samostatného A/D převodníku pro každý vstupní modul, zaručující souvztažnost absolutních amplitud a fází měřených signálů. Moduly, které jsou k dispozici na katedře elektroenergetiky jsou typu 701852 – „High-resolution, High voltage, isolation module“ – tj. modul se vstupními obvody pro zpracování vysokonapěťových signálů do 850 V. A/D převodník modulu tohoto typu disponuje vzorkovací frekvencí 100 kS/s. Dalším blokem je blok předzpracování a meziuložení získaných dat (Acquisition Block) a konečně třetím blokem je blok finálního zpracování, uložení a zobrazení naměřených dat.

Obdobně jako u osciloskopu je možno zvolit vnější či vnitřní časovou základnu. Spouštění (Trigger) je možno volit jednoduché (Simple) odpovídající režimu „Edge“ osciloskopu LeCroy, popřípadě rozšířené (Enhanced) odpovídající režimu „Smart“ osciloskopu LeCroy.

Osciloskop YOKOGAWA disponuje mnohými metodami analýzy naměřených signálů včetně rychlé Fourierovy transformace pro spektrální analýzu.

Obrazovku osciloskopu tvoří barevný TFT LCD display úhlopříčky 10,4 palců s rozlišením 640 x 480 bodů.

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry osciloskopu:

Počet kanálů	8 galvanicky oddělených se samostatnými A/D převodníky
Rozlišení	16 bit / kanál
Vzorkovací frekvence	100 kS/s
Šířka pásma	40 kHz
Procesor systému	neuvedeno
Akviziční paměť (mezipaměť)	400 kB/kanál
HDD	2,1 GB
FDD	3,5 palce 1,44 MB
Rozhraní	GPIO, RS-232C, LPT Centronics, SCSI
Referenční teplota	23 °C
Teplota okolí	-20 °C až 60 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	20 % až 80 %
Napájení	200 V až 240 V
Příkon	Max. 250 VA
Rozměry	370 x 260 x 183 mm
Hmotnost	6,8 kg

Tab. 4 Technické parametry osciloskopu YOKOGAWA DL 708 E

### 1.3. MĚŘENÍ PJ POČÍTAČOVOU MĚŘÍCÍ KARTOU

Rozmach digitálních technologií přinesl v oblasti měřicí techniky nový fenomén – počítačové měřicí karty. Jedná se o zařízení připojitelné k určité sběrnici dat PC. Počítačová měřicí karta je tvořena blokem vstupů a výstupů (jak analogových, tak digitálních), blokem vstupních obvodů, blokem zpracování vstupního signálu (A/D, respektive D/A převodníkem s podpůrnými obvody) a blokem rozhraní pro zmíněné připojení k PC.

Z hlediska měření analogových veličin lze počítačové měřicí karty zásadně rozdělit dle použitého typu A/D převodníku. Toto rozdělení je detailně rozebráno v kapitole 3.1. Další dělení je možno provést na základě konkrétních technických parametrů jak použitého A/D převodníku, tak ostatních funkčních bloků karty.

Oproti metodám měření popsaných v kapitolách 3.2. a 3.3., veškeré zpracování naměřené veličiny (popřípadě více veličin) provádí PC, z čehož vyplývá určitá nevýhoda z hlediska kompaktnosti měřicího přístroje jako celku.

V následujících podkapitolách provedu podrobnější rozbor těchto měřicích karet:

- § Tedia PCA 1228 české produkce,
- § ADAB, taktéž české produkce,
- § National Instruments NI PCI-6115 produkce USA.

#### 1.3.1. **Měřicí karta Tedia PCA 1228**

Multifunkční PC karta Tedia PCA-1228 je zařízením pro běžné i rozsáhlé aplikace s vyšší vzorkovací frekvencí v rámci výrobních řad Tedia pracujících v prostředí operačních systémů Windows 95, 98, a NT.

Karta je vybavena vyrovnávací pamětí typu FIFO (tzn. fronta dat typu „první dovnitř - první ven“ – „First In First Out“) jež je v cestě toku informací mezi A/D převodníkem a sběrnicí počítače. V případě PCA-1228 umožňuje vyrovnávací paměť při obvyklém způsobu přenosu dat pětsetdváctkrát redukovat frekvenci volání přerušení a karta, resp. více karet pak umožňuje realizovat celkově až 250000 měření za sekundu.

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry měřicí karty:

Počet kanálů	8 multiplexovaných
Rozlišení	12 bit

Vzorkovací frekvence	80 kS/s
Vyrovnávací paměť	2 kB typu FIFO
Vstupní impedance	10 MΩ
Vstupní rozsah napětí	±5 V, ±10 V
Zesílení vstupního zesilovače	1 x, 2 x, 4 x, 8 x, 16 x (programově nastavitelné)
Doba převodu	12,5 μs
Integrální nelinearita	Neuvedeno
Diferenciální nelinearita	Neuvedeno
Teplotní drift	Neuvedeno
Rozhraní pro připojení k PC	ISA (Industry Standard Architecture, 16 bit)

Tab. 5 Technické parametry karty Tedia PCA 1228

Karta disponuje jedním A/D převodníkem o vzorkovacím kmitočtu 80 kHz. Multiplexer vstupů řídí mikropočítač podporující až 128 měřených kanálů. Pro případ ještě většího počtu měřených signálů nebo nároků na vyšší vzorkovací frekvenci je karta vybavena tzv. „multicard master-slave” logikou (pomůcka pro synchronizaci chodu více karet) umožňující efektivní rozšiřování systému paralelním řazením více karet. Karta PCA-1228 však umožňuje i jednoduché rozšíření základních 8 analogových vstupů na 32 externím multiplexerem OPT-832 v provedení koncového panelu - svorkovnice. Součástí je také D/A převodník, kterým se však nebudu detailněji zabývat, jelikož v zadaném úkolu nenachází uplatnění. Software pro komunikaci s kartou, pro zpracování a prezentaci naměřených dat není součástí sady. To samozřejmě představuje zvýšení nákladů na pořízení měřicí soupravy.

### 1.3.2. Měřicí karta ADAB

Měřicí karta ADAB je produktem někdejšího agrokombinátu Slušovice a je zařízením srovnatelných parametrů s popisovaným produktem firmy Tedia. Je však staršího provedení, tudíž veškerý software pro komunikaci, pro zpracování naměřených dat a pro jejich prezentaci je vytvořen v prostředí systému MS DOS. Oproti výše uvedenému konkurenčnímu výrobku je ovšem tento software součástí měřicí sady. Software karty umožňuje mnoho metod zpracování naměřeného signálu, mimo jiné spektrální analýzu rychlou Fourierovou transformací (FFT).

Karta disponuje jedním A/D převodníkem pracujícím se vzorkovací frekvencí 27 kHz. Dále pak 16 multiplexovanými vstupy, přičemž doba ustálení analogového řetězce na 1 LSB při přepnutí kanálu činí asi 10 μs (při zesílení vstupního zesilovače A = 1).

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry měřicí karty:

Počet kanálů	16 multiplexovaných
Rozlišení	12 bit
Vzorkovací frekvence	27 kS/s
Vyrovnávací paměť	neuvedeno
Vstupní impedance	100 MΩ
Vstupní rozsah napětí	±2,5 V, ±5 V, ±10 V
Zesílení vstupního zesilovače	1 x, 10 x, 100 x (programově nastavitelné)
Doba převodu	30 μs
Integrální nelinearita	maximálně 1,5 LSB
Diferenciální nelinearita	maximálně 1,5 LSB
Teplotní drift	maximálně 60 ppm/K
Rozhraní pro připojení k PC	ISA (Industry Standard Architecture, 16 bit)

Tab. 6 Technické parametry karty ADAB

N rozdíl od konkurenčního výrobku, technická dokumentace karty ADAB zahrnuje velice detailní rozbor chyb měření, jež by měl být součástí každého produktu tohoto druhu.

Společnou vlastností je dispozice jednoho A/D převodníku. Může tedy nastat kolize v případě potřeby souvztažnosti absolutních amplitud a fází měřených signálů.

### 1.3.3. Měřicí karta National Instruments NI PCI-6115

Firma National Instruments (NI) je jedním z předních špičkových výrobců počítačových měřících karet. Typ NI PCI-6115, i když nejjednodušší produkt firmy NI v oblasti měřících karet, je svými technickými parametry s výše uvedenou konkurencí nesrovnatelný.

Technologie NI PCI-6115 koresponduje s nejnovějšími směry v oblasti vnitřní stavby PC. Součástí karty je paměť typu SDRAM, která napomáhá efektivnímu sběru dat. Paměť je organizována jako FIFO. A/D převodník pracuje se vzorkovacím kmitočtem 10 MHz s dvanáctibitovým rozlišením. K dispozici jsou 4 analogové vstupy se samostatnými A/D převodníky. Tato koncepce zaručuje souvztažnost absolutních amplitud a fází měřených signálů. Každý vstup má k dispozici programovatelný frekvenční filtr pracující v rozmezí 50 až 500 kHz.

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry měřící karty:

Počet kanálů	4 nezávislé se samostatným A/D převodníkem
Rozlišení	12 bit
Vzorkovací frekvence	10 MS/s na kanál
Vyrovňovací paměť	32 MS s možností rozšíření na 64 MS
Vstupní impedance	Neuvedeno
Vstupní rozsah napětí	$\pm 0,2$ V, $\pm 0,5$ V, $\pm 1$ V, $\pm 2$ V, $\pm 5$ V, $\pm 10$ V, $\pm 20$ V, $\pm 42$ V
Zesílení vstupního zesilovače	Neuvedeno
Doba převodu	Neuvedeno
Integrovaná nelinearita	Neuvedeno
Diferenciální nelinearita	Neuvedeno
Teplotní drift	Uváděn zvlášť pro jednotlivé rozsahy
Rozhraní pro připojení k PC	PCI (32 bit)

Tab. 7 Technické parametry karty National Instruments NI PCI-6115

Oproti zvyklostem českých výrobců, NI udává chyby měření přístroje v poněkud jiné formě. Popisuje chyby v závislosti na zvoleném rozsahu měření. Vzniká tak serióznější obraz předpokládaného měření. Jak již bylo výše řečeno, výrobek firmy NI je s ostatními dvěma nesrovnatelný co do technických parametrů. Vzhledem k těmto skutečnostem a věhlasnosti výrobce se tyto disproporce nemalou měrou promítají do ceny výrobku.

## 2. SROVNÁNÍ MĚŘÍCÍCH METOD PRO MĚŘENÍ PJ

Z důvodu značné odlišnosti filosofii popsaných metod měření elektromagnetických přechodných jevů při zkratech a zemních spojeních není možnost absolutního srovnání uvedených přístrojů. Proto v následujících kapitolách provedu nejprve srovnání jednotlivých přístrojů dané kategorie, posléze zvolím ze tří nejvhodnějších zástupců jednotlivých kategorií nejvhodnější měřící metodu.

Jelikož měření bude probíhat trojfázově, tzn. budou měřena tři fázová napětí a tři proudy tekoucí fázovými vodiči, bude hlavním kritériem počet měřících kanálů (alespoň 6). Pro možnost měření dalších důležitých veličin, zejména napětí a proudu kompenzační tlumivkou při zemním spojení, je dispozice dalších měřících kanálů výhodou. V úvahu bude brán také počet A/D převodníků na měřící kanál.

Významným kritériem bude vzorkovací kmitočet, a to takový, který zaručí správné navzorkování měřeného signálu včetně nejvyšší směrodatné harmonické (zvolený vzorkovací

kmitočet musí být podle vztahu 3.1. větší nebo roven dvojnásobku frekvence dané nejvyšší směrodatné harmonické) a nejrychleji odehrávajících se významných procesů. Navrhovaná souprava má pouze zachycovat abnormální stavy, konkrétně dobu vzniku a odeznění, popřípadě dobu vypnutí poruchového stavu. Účelem není harmonická analýza či podrobné zkoumání průběhu obvodových veličin při přechodném ději. V drtivé většině výskytů poruch v oblasti distribučních a průmyslových sítí, tedy v oblasti vn, se jedná o zemní spojení. Druhou nejčastější poruchou je dvoufázový zemní zkrat s pravděpodobností výskytu asi 20 % (viz. kapitola 1.2.4.). Následuje dvoufázový zkrat s pravděpodobností výskytu asi 10 % (viz. kapitola 1.2.5.). Uvedené poruchy jsou směrodatné zvláště pro venkovní vedení vn, která jsou objektem zadaného měření. Abnormální stav se v případě zmíněných poruch projevuje již v první harmonické napětí významným vzrůstem či poklesem amplitudy. Z těchto důvodů nebude požadována vysoká vzorkovací frekvence. Avšak pro variabilnost měřicí soupravy volím minimální vzorkovací frekvenci 4 kHz, což podle vztahu 3.1. umožňuje snímání nejvyšší harmonické měřené veličiny, odpovídající čtyřicetinasobku frekvence základní harmonické, tj. 50 Hz.

Dalším důležitým kritériem bude rozlišení (též rozlišovací schopnost) A/D převodníku, související s chybou kvantování. Jedná se o nejmenší možnou změnu výstupní veličiny vyvolanou změnou vstupního čísla mezi dvěma sousedními hodnotami a vztaženou k plnému rozsahu vyjádřenému největší možnou hodnotou vstupního čísla (viz. kapitola 3.1.1.). Běžným rozlišením A/D převodníků je 8 bitů, tj. 256 úrovní pro kvantování navzorkované veličiny. Toto rozlišení je zároveň pro danou aplikaci zcela postačující.

Podstatným kritériem bude také dispozice nadstandardního vybavení měřicího přístroje (ostatní vybavení). Jedná se zejména o prostředky pro analýzu naměřených signálů, jako například možnost FFT a jiných matematických funkcí. Dále pak hardwarové i softwarové prostředky pro komunikaci s PC a pro následující zpracování a uchování naměřených dat. V úvahu jsou brány i prostředky pro zpracování a uchovávání naměřených dat integrované do měřicích přístrojů.

Neméně významným, ba dokonce v praxi nejvýznamnějším kritériem, bude poměr užitných vlastností konkrétního přístroje vzhledem k jeho pořizovací ceně.

Souhrn kritérií pro výběr konkrétního měřicího systému:

1. počet měřicích kanálů - minimálně 6 (vyhovuje, nevyhovuje)
2. vzorkovací frekvence alespoň 4 kHz na kanál (vyhovuje, nevyhovuje)
3. rozlišení A/D převodníku alespoň 8 bitů (vyhovuje, nevyhovuje)
4. ostatní vybavení (bodování 1 - nejhorší až 5 - nejlepší)
5. poměr užitná hodnota/cena (příznivý, nepříznivý)

Kritérium	Druh měřicího přístroje		
	Specializované prostředky		
	PRYM	BK 550	-
počet měřicích kanálů	vyhovuje	vyhovuje	-
vzorkovací frekvence	nevyhovuje	vyhovuje	-
rozlišení A/D převodníku	vyhovuje	vyhovuje	-
ostatní vybavení	1 bod (1 až 5 bodů)	5 bodů (1 až 5 bodů)	-
Poměr užitná hodnota/cena	příznivý	nepříznivý	-



	Digitální osciloskopy		
	LeCroy 9314 A	YOKOGAWA DL 708 E	-
počet měřících kanálů	nevyhovuje	vyhovuje	-
vzorkovací frekvence	vyhovuje	vyhovuje	-
rozlišení A/D převodníku	vyhovuje	vyhovuje	-
ostatní vybavení	5 bodů (1 až 5 bodů)	4 body (1 až 5 bodů)	-
Poměr užitná hodnota/cena	nepříznivý	příznivý	-
	Počítačové měřicí karty		
	Tedia PCA 1228	ADAB	NI - PCI 6115
počet měřících kanálů	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje
vzorkovací frekvence	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
rozlišení A/D převodníku	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
ostatní vybavení	2 body (1 až 5 bodů)	4 body (1 až 5 bodů)	5 bodů (1 až 5 bodů)
Poměr užitná hodnota/cena	příznivý	příznivý	nepříznivý

Tab. 8 Přehled vstupů pro výběr nejvhodnější měřící metody

### 3. VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍ METODY MĚŘENÍ PJ

Do konečného výběru metody měření PJ vstupují přístroje: BK 550 firmy Elcom Praha jako zástupce metody měření PJ specializovanými prostředky, YOKOGAWA DL 708 E jako zástupce metody měření PJ digitálním osciloskopem a konečně ADAB jako zástupce metody měření PJ počítačovou měřicí kartou.

#### 3.1. STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA Kladů a záporů jednotlivých metod

Sdružený síťový analyzátor BK 550 je přístroj úzce specializovaný pro tzv. monitoring sítě, tzn. sledování a záznam důležitých síťových ukazatelů. Jeho uplatnění v jiných aplikacích měření je proto poměrně problematické. Jelikož zadané měření využije jen zlomek funkcí přístroje, jeví se být jeho použití vzhledem k velmi vysokým pořizovacím nákladům (cca 700000 Kč) značně předimenzované.

Využitelnost digitálního osciloskopu YOKOGAWA DL 708 E je daleko širší než v případě síťového analyzátoru BK 550. Přístroj sdružuje celky pro měření, ukládání, zpracování i zobrazení naměřených dat, přičemž kapacita paměti pro ukládání těchto dat je značná (HDD 2,1 GB). Samozřejmostí je možnost komunikace s PC pro další zpracování dat. Díky svým rozměrům a hmotnosti je přístroj velice kompaktní. Pořizovací cena však není v žádném případě zanedbatelná, i když výrazně nižší, než u BK 550.

Měřicí počítačová karta ADAB je v podstatě obdobou měřících bloků obou výše uvedených přístrojů. Blok pro ukládání, zpracování a prezentaci naměřených dat zde tvoří hardware PC a jeho periferie. Za určitých předpokladů tedy mohou být parametry zpracování a prezentace dat mnohem kvalitnější, v případě potřeby prostor pro archivaci dat podstatně větší. Z důvodu nutnosti použití PC a potřebných periférií je však tento měřicí systém relativně nekompaktní. Je tedy nutno pečlivě zvážit podmínky měření. Uvážíme-li však skutečnost, že PC postačujících parametrů je v dnešní době součástí téměř všech oblastí lidského života, je bezkonkurenční výhodou měřicí karty její nízká pořizovací cena. Ta se ve třídě karet typu ADAB a Tedia PCA 1228 pohybuje v řádu jednotek tisíců Kč.

## **4. ANALÝZA A ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT**

Jak již bylo dříve řečeno, navržený měřicí systém má být součástí zařízení pro monitorování sítě. Cílem monitorování sítě je záznam všech abnormálních jevů, tj. stavů vymykajících se stanoveným normálním provozním poměrům. Z důvodu omezené kapacity paměťového media zařízení, k němuž je měřicí karta systému připojena, není rozumné archivovat všechna data naměřená monitorovacím systémem. Má smysl archivovat pouze sekvence měření, ve kterých je zmíněný abnormální jev zachycen.

Z tohoto důvodu je třeba aplikovat takový softwarový prostředek, který zajistí spolehlivou detekci abnormálního stavu, tzn. dobu jeho počátku a konce, daného odezněním tohoto stavu, respektive jeho vypnutím. Je tedy nutno určit kritérium, na jehož základě lze spolehlivě konstatovat normální či abnormální stav. Toto kritérium může být založeno na principu změn protékajících proudů fázemi, popřípadě na principu změn fázových napětí, respektive sdružených napětí, tedy vektorového rozdílu fázových napětí.

Detekce abnormálního stavu pomocí sledování fázových proudů nemusí být, a zpravidla není, v oblasti elektroenergetiky distribučních a průmyslových sítí zcela spolehlivá. Hodnoty provozních proudů jsou v této oblasti značně proměnlivé v relativně krátkých časových úsecích. Druhým problémem, v tomto případě závažnějším, je fakt, že poruchové proudy jsou často svou hodnotou velmi podobné provozním proudům, zvláště pak při zemním spojení.

Řešením tedy bude detekce abnormálních stavů založená na sledování fázových napětí. Změny fázových napětí v závislosti na odběru spotřebitelů nejsou na rozdíl od změn velikosti protékajících proudů radikální. I když dojde k poklesu či vzrůstu fázových napětí v závislosti na zatížení soustavy, je tato změna daná maximálními tolerancemi pro případ vzrůstu i poklesu velikosti napětí (viz. kapitola 1.4.). Jsou-li provozní proudy v závislosti na odběru maximální, tj. je-li odběr spotřebitelů maximální, musí být snižené napětí v tolerovaných mezích. Není-li tato podmínka splněna, neodpovídá dimenze vedení maximálním provozním nárokům a může pak dojít k chybné detekci.

Každá z poruch popisovaných kapitole 1. se projevuje jistou změnou napěťových poměrů, a to vzrůstem či poklesem napětí trvalejšího charakteru, popřípadě přepětím, které doprovází vznik některých poruchových stavů. Při vypínání všech druhů poruch je určité přepětí pravidlem z důvodu LC charakteru vypínacího obvodu. Jelikož zdaleka nejčastější poruchou v oblasti venkovních vedení distribučních a průmyslových sítí je zemní spojení, dochází téměř vždy k přechodným přepětím při vzniku poruchy i při vypínání poruchy.

Pro lepší orientaci a shrnutí předchozích úvah uvádím dva zásadní důvody výběru napětí, jakožto veličiny pro detekci poruchy v síti:

- § za normálních provozních podmínek se napětí mění pouze ve známých dovolených mezích, pokud ne, neodpovídá dimenze vedení požadavkům zátěže,
- § změna napětí dlouhodobého či krátkodobého charakteru doprovází téměř každou poruchu v oblasti distribučních a průmyslových sítí.

V následujících podkapitolách bude proveden podrobný popis programů pro systém Windows vytvořených za účelem výše popisovaného oddělení naměřených dat vykazujících abnormální stav obvodových veličin. Pro programování bylo použito objektově orientovaného vývojového prostředí Delphi 3.0 firmy Borland. Delphi využívá většiny příkazů a syntaxí příkazů programovacího jazyka Pascal. Zjednodušujícím faktorem prostředí Delphi je značně automatizovaná a vizualizovaná generace grafického prostředí tvořených aplikací.

#### **4.1. MOŽNOSTI DETEKCE PORUCHY ANALÝZOU MĚŘENÝCH NAPĚTÍ**

Na základě výše uvedených myšlenek lze začátek a konec drtivé většiny poruch v síti detekovat analýzou fázových napětí.

Nejjednodušším principem detekce poruchového stavu je detekce přepětí, je-li však toto přepětí doprovodem uvažované poruchy. Nastavíme-li maximální povolenou odchylku napětí, pak porovnáváním této odchylky s okamžitou hodnotou měřeného napětí zjistíme první hodnotu přepětí u vzorku, který dané podmínce neodpovídá. Takovým způsobem však zjistíme n-tou hodnotu periody přepětí, která neodpovídá dané podmínce. Je však pravděpodobné, že několik předchozích vzorků je již součástí uvažovaného přepětí. Vzhledem k zadané podmínce jsou ovšem tyto vzorky korektní. Značnou nevýhodou uvedeného algoritmu je neschopnost detekovat poruchu projevující se poklesem maximální hodnoty napětí v několika periodách. Takovýto průběh napětí vnímá algoritmus v každém jeho vzorku jako korektní. Popsaný princip je aplikován v programu s pracovním názvem „Program s odchylkami“, jehož detailní rozbor provedu v podkapitole 7.3.

Další možností detekce poruchového stavu je porovnávání okamžitých hodnot měřených napětí, tedy jednotlivých vzorků kanálů měřících fázová napětí s hodnotami modelovaného průběhu napětí, respektive tří napětí trojfázové soustavy. Tímto principem detekujeme již první hodnotu průběhu přepětí, i když je tato hodnota menší než maximální napětí za normálního provozního stavu. Další výhodou tohoto principu je možnost aplikace pro detekci zkratů, projevujících se poklesem fázových napětí porušených fází či disproporcí předpokládaného průběhu napětí v trojfázové soustavě (viz. základní napěťové poměry v trojfázové síti při zkratech v kapitole 1.). Tento princip je aplikován v programu s pracovním názvem „Program s modelovanou sinusoidou“, jehož detailní rozbor provedu v podkapitole 7.4.

Druhý popisovaný princip vyžaduje modelování tří referenčních napětí. Je nutno stanovit soustavu tří analytických rovnic srovnatelných se skutečnými průběhy napětí. Naměřené hodnoty je tedy třeba proložit křivkou a tu následovně aproximovat funkcí sinus (respektive cosinus). Na základě úvah kapitoly 3.1. je možno vzorkovaný signál rekonstruovat, je-li splněna podmínka Shannon – Kotělnikovova teorému. Tohoto principu využívají D/A převodníky, ovšem jeho programování by bylo značně komplikované. V podkapitole 7.4. je proto využito jednoduššího algoritmu.

#### **4.2. PROGRAM PRO ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRACUJÍCÍ NA ZÁKLADĚ DETEKCE PŘEPĚTÍ**

Program využívající principu detekce přepětí má pracovní označení „UCorrect“ a je spouštěn souborem ucorrect.exe. Program včetně zdrojového textu je uložen na přiloženém médiu v adresáři „Program s odchylkami“ (cesta: Programy\Program s odchylkami). Jak bylo řečeno v kapitole 7.2., program vyhledá počáteční řádek záznamu dat a od tohoto řádku

probíhá pomocí cyklu až do posledního řádku souboru separace dat fázových napětí. V provedených měřeních byla fázová napětí na čtvrté, šesté a osmé pozici. Okno programu je na obrázku Obr. 7.2.

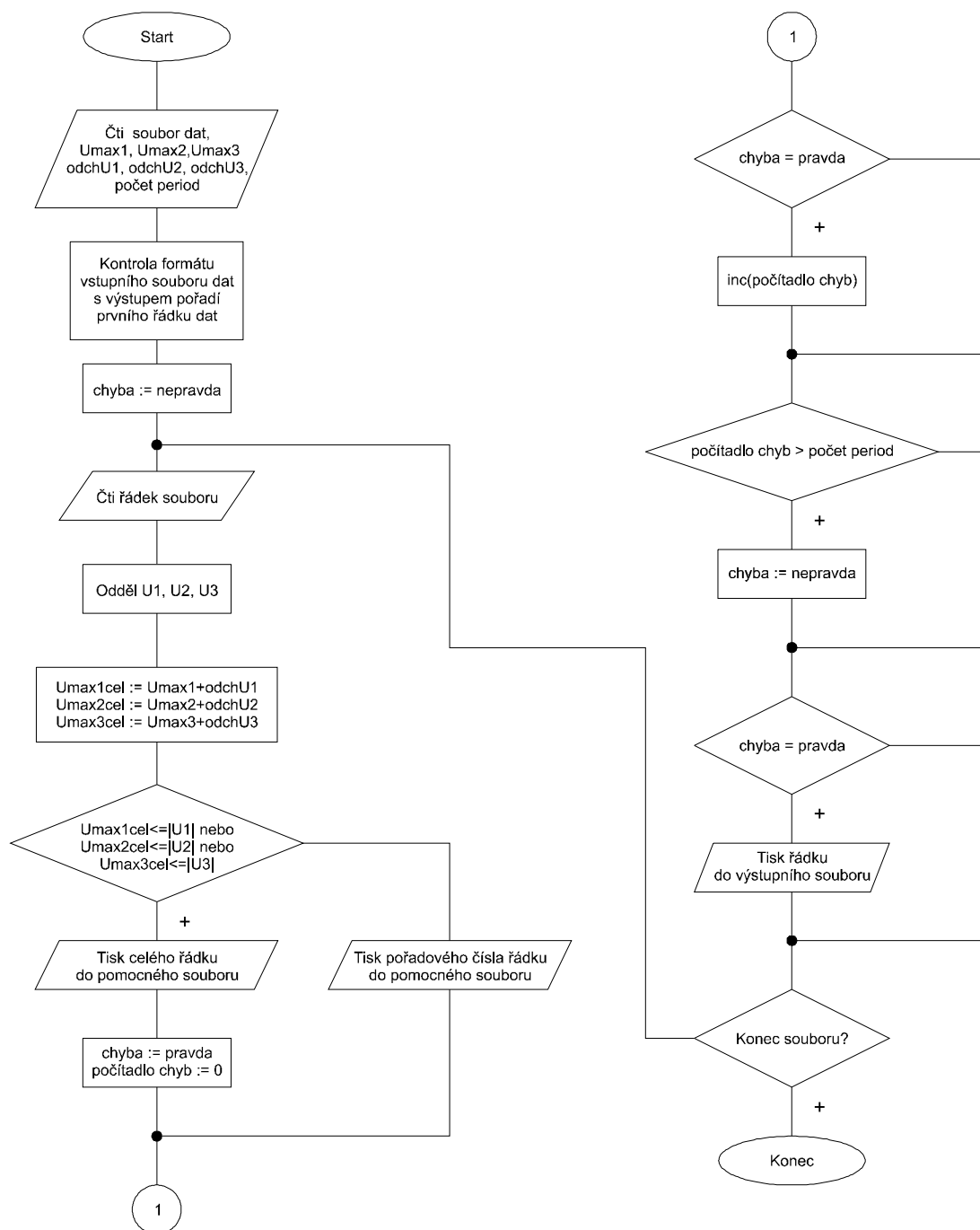
#### 4.2.1. Vstupní parametry pro zpracování dat

The screenshot shows the 'UCorrect v. 1.0' window. It has a title bar with standard Windows window controls. The main area is divided into sections. The 'Vstupní údaje' (Input data) section contains: 'Zdroj dat:' (Data source) with a text box and an ellipsis button; 'Počet period k určení normálního stavu:' (Number of periods for normal state determination) with a text box containing '100'; a 'Start' button with a green checkmark icon; and three columns of input fields for 'Umax1 [kV]', 'Umax2 [kV]', and 'Umax3 [kV]', each with a value of '22'. To the right of these are three fields for 'Povolená odchylka napětí U1 [kV]', 'U2 [kV]', and 'U3 [kV]', each with a value of '0'. The 'Výstup (chyby dat)' (Output (data errors)) section at the bottom contains a 'Memo1' text area.

Obr. 7.2. Okno programu pracujícího na základě detekce přepětí

Všechny proměnné uváděné v následujících odstavcích jsou v souladu s proměnnými použitými v programu, viz. zdrojový text.

Na základě vstupních parametrů programu (7.3.1.) jsou spočítána referenční napětí  $U_{max1cel}$  až  $U_{max3cel}$ , přičemž každé referenční napětí je rovno součtu maximální hodnoty fázového napětí a povolené odchylky fázového napětí dané fáze. V cyklu s opakováním od počátečního řádku naměřených dat po poslední řádek souboru jsou v jednotlivých řádcích oddělována fázová napětí  $U_1$ ,  $U_2$  a  $U_3$ . Pro každý krok cyklu je pak porovnáváno referenční napětí dané fáze s absolutní hodnotou naměřeného napětí dané fáze. Absolutní hodnota naměřeného napětí zajišťuje detekci přepětí v záporné půlperiodě.



Obr. 7.3. Zjednodušený vývojový diagram programu

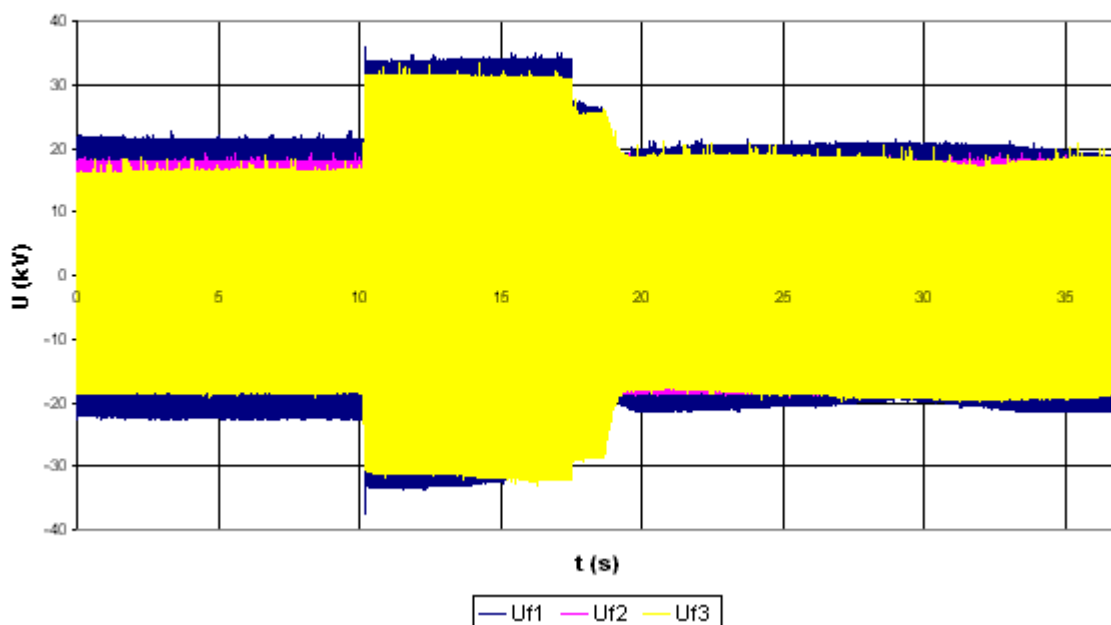
Je-li velikost naměřeného napětí v určitém čase, respektive absolutní hodnota velikosti alespoň jednoho ze tří naměřených napětí v určitém čase, větší než referenční napětí, je proměnná *chyba* nastavena na logickou úroveň „pravda“ a proměnná *počítadlo chyb* nastavena na nulu. V další podmínce téhož cyklu je stanoven předpoklad „chyba = pravda“. Je-li podmínka splněna, stav proměnné *počítadlo chyb* je inkrementováno, tzn. jeho stav se zvýší o jednu. Je-li *počítadlo chyb* větší než *počet period*, tedy větší než vstupní proměnná vyjadřující počet period vzorkování pro určení poruchového stavu (viz. kapitola 7.1.), je proměnná *chyba* nastavena na logickou úroveň nepravda. V poslední podmínce cyklu je opět stanoven předpoklad „chyba = pravda“. Je-li podmínka splněna, tiskne se aktuální řádek cyklu do souboru „vystup.dat“. Není-li zpracováván posledním řádek souboru dat, vstupuje do

cyklu zpracování následující řádek. Zjednodušený vývojový diagram programu je na obrázku Obr. 7.3.

#### 4.2.2. Příklad použití programu

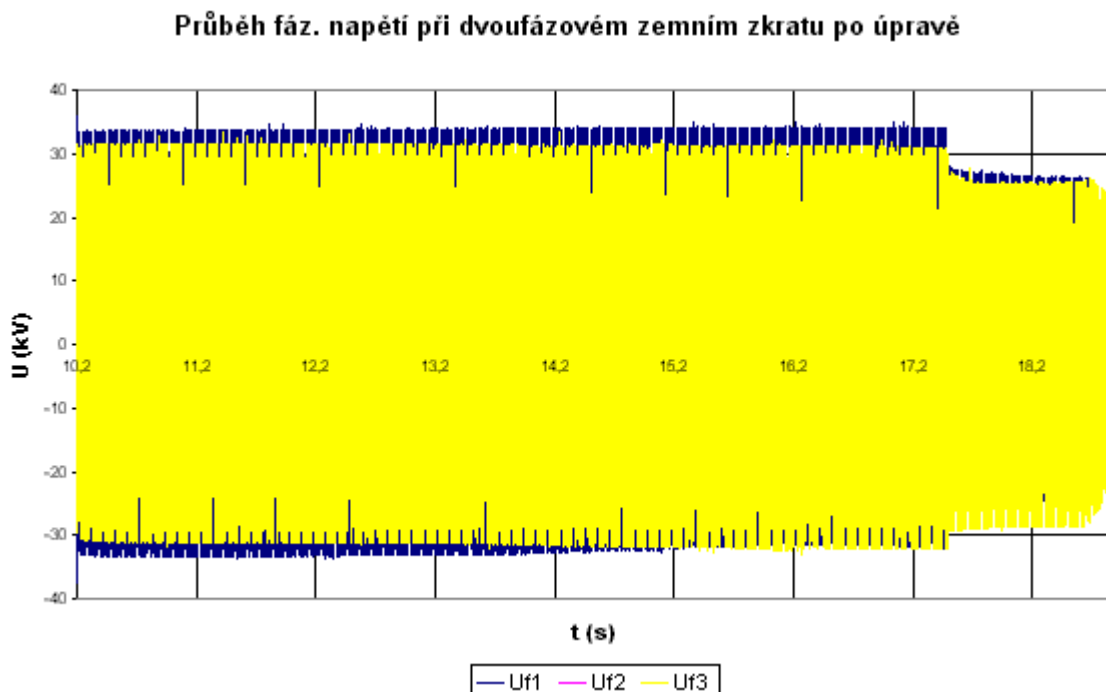
Příklad použití programu pracujícího na principu detekce přepětí bude proveden na souboru dat „2Aut000.cfg“ (viz. přiložené paměťové médium, cesta Data\Naměřeno), tzn. soubor s daty dvoufázového zemního zkratu popsaného v kapitole 6.4.7. Na obrázku 7.4. uvádím graf celého naměřeného souboru. Vstupní data pro graf jsou importována do programu MS Excel z převedeného souboru naměřených dat „2Auto000.cfg“ programem INMES. Pro větší přehlednost uvádím v následujících grafech z deseti měřených veličin pouze tři fázová napětí, tedy data měřená kanály 4, 6 a 8.

**Průběh fáz. napětí při dvoufázovém zemním zkratu z kapitoly 6.4.7.**



Obr. 7.4. Graf naměřených napětí před úpravou souboru

Pro ukázkou funkce programu uvádím na obrázku 7.5. graf výstupu programu. Po dobu trvání poruchy vykazovala vždy alespoň jedna fáze napětí proti zemi vyšší než dovolené provozní napětí. Soubor dat převedený programem INMES ze souboru binárních data na soubor dat textových ve formátu ASCII je otevřen a zpracován ve vytvořeném programu. Do programu MS Excel je nyní importován soubor „vystup.dat“, což je název výstupního souboru vytvořeného programu.



Obr. 7.5. Graf napětí upraveného souboru

#### 4.3. PROGRAM PRO ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRACUJÍCÍ NA ZÁKLADĚ SROVNÁNÍ S MODELOVANÝM PRŮBĚHEM NAPĚTÍ

Program využívající principu detekce přepětí má pracovní označení „UCorrect“ a je spouštěn souborem „ucorrect.exe“. Program včetně zdrojového textu je uložen na příloženém médiu v adresáři „Program s modelovanou sinusoidou“ (cesta: Programy\Program s modelovanou sinusoidou). Jak bylo řečeno v kapitole 7.2., program vyhledá počáteční řádek záznamu dat a od tohoto řádku probíhá pomocí cyklu až do posledního řádku souboru separace dat fázových napětí. V provedených měřeních byla fázová napětí na čtvrté, šesté a osmé pozici. Podmínky jsou tedy totožné s podmínkami prvního popisovaného programu. Okno programu je na obrázku Obr. 7.6.

##### 4.3.1. Vstupní parametry pro zpracování dat

Obr. 7.6. Okno programu pracujícího na základě srovnání s modelovaným průběhem napětí

Do pole s popisem „Zdroj dat“ se zadává název soubor s naměřenými daty s úplnou cestou, případně je možno kliknout na tři tečky napravo pole, což vyvolá okno s možností

vizuálního pohybu v adresářové struktuře a výběru souboru dat. Do pole s popisem  $U_{\max}$  se zadává maximální hodnota napětí, kterou je třeba naměřit. Do pole s popisem „Perioda vzorkování“ se zadává převrácená hodnota zvolené vzorkovací frekvence měření, přičemž přednastavená hodnota odpovídá vzorkovací frekvenci 350 Hz. Do pole s popisem „Počet period k určení normálního stavu“ se zadává celistvý násobek periody vzorkování. Čas, který je roven součinu zadaného násobku a periody vzorkování je ve výstupním souboru přičten na začátek i konec tohoto souboru, včetně dat naměřených v tomto čase. Toto opatření je aplikováno z totožného důvodu, jako v případě předchozího popisovaného programu. Do pole s popisem „Povolená odchylka napětí“ se zadává maximální přijatelná odchylka od modelovaného napětí. Konečně do pole s popisem „Síťový kmitočet“ je možno zadat frekvenci sítě. Tato hodnota je přednastavena na 50 Hz.

#### 4.3.2. Algoritmus programu

Všechny proměnné uváděné v následujících odstavcích jsou v souladu s proměnnými použitými v programu, viz. zdrojový text.

Na základě vstupních parametrů programu (7.4.1.) jsou z prvních naměřených hodnot napětí vypočteny pomocné časy  $tpom1$  až  $tpom3$ , tj čas odpovídající času  $t$  ve vztahu:

$$u = U_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (V) \quad (7.1.)$$

Potom pro čas  $t$  platí:

$$t = \frac{\arccos \frac{u}{U_{\max}}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (s) \quad (7.2.)$$

Podle těchto časů jsou zpětně přepočítány první hodnoty naměřených napětí dle vztahu (7.1.). V každém dalším kroku cyklu je k časům  $tpom1$  až  $tpom3$  připočítána perioda vzorkování, respektive součin periody vzorkování a počítadla řádků. Dostáváme tak časy, podle kterých program vypočítá dle vztahu (7.1.) následující hodnotu napětí. Tímto postupem modelujeme tři fáze napětí, jejichž okamžité hodnoty v daném čase porovnáváme se skutečnými naměřenými hodnotami. Samotný algoritmus pak pracuje na základě porovnávání nastavené maximální přípustné odchylky napětí s vypočtenou odchylkou modelovaného a skutečného naměřeného napětí dle vztahu:

$$\Delta U = |U_{\text{skut}} - U_{\text{mod}}| \quad (V), \quad (7.3.)$$

kde:

§  $U_{\text{skut}}$  je okamžitá hodnota napětí naměřená v daném čase,

§  $U_{\text{mod}}$  je modelované napětí.

Pro detekci poruchového stavu musí platit:

$$\Delta U \geq \Delta U_{\text{nast}} \quad (7.4.)$$

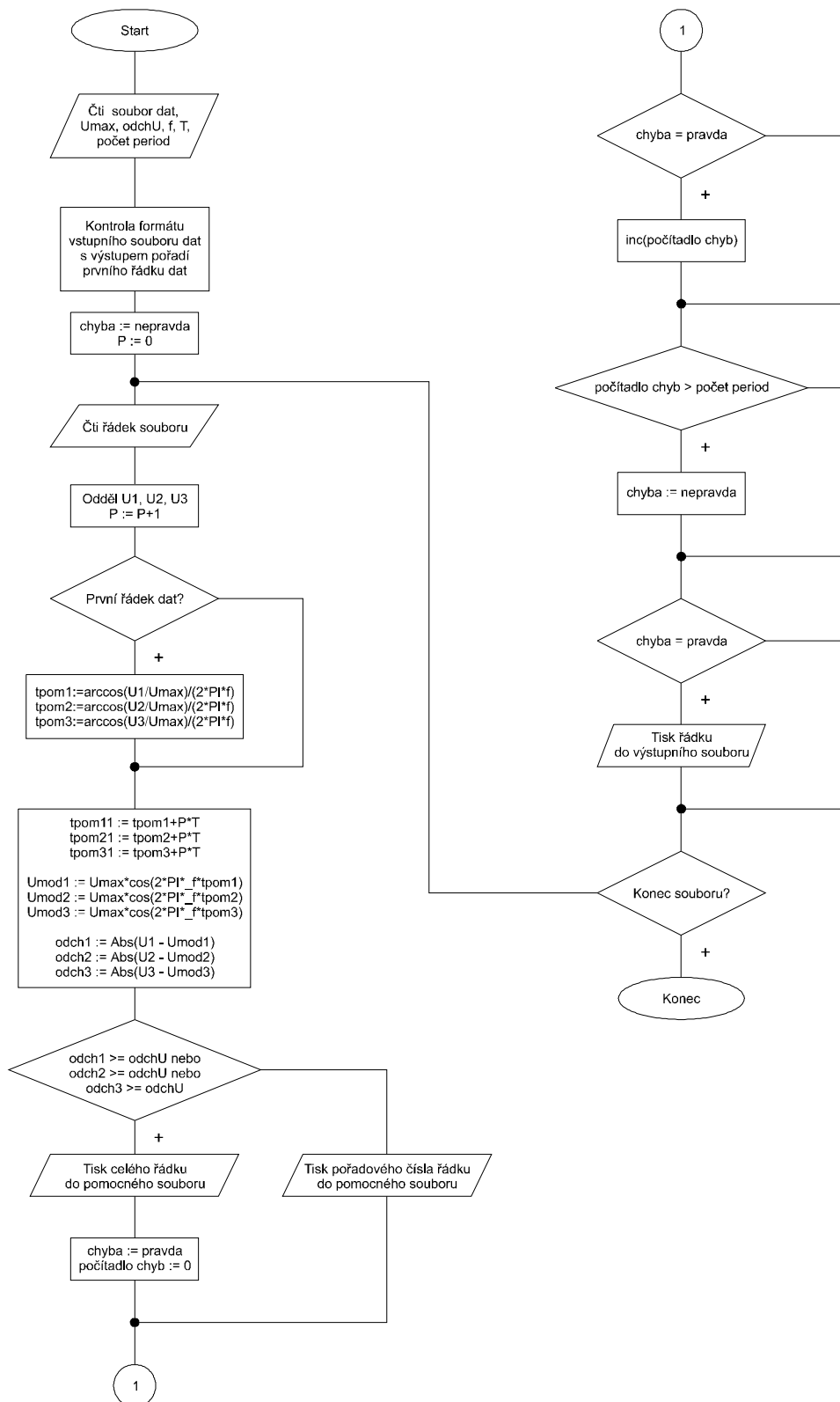
kde  $\Delta U_{\text{nast}}$  je nastavená odchylka napětí, viz. kapitola 7.4.1.

Je-li tedy velikost odchylky naměřeného napětí od modelovaného v určitém čase větší než stanovená maximální odchylka napětí, je proměnná *chyba* nastavena na logickou úroveň „pravda“ a proměnná *počítadlo chyb* nastavena na nulu. V další podmínce téhož cyklu je stanoven předpoklad „chyba = pravda“. Je-li podmínka splněna, stav proměnné *počítadlo chyb* je inkrementováno, tzn. jeho stav se zvýší o jednu. Je-li *počítadlo chyb* větší než *počet period*, tedy větší než vstupní proměnná vyjadřující počet period vzorkování pro určení poruchového stavu (viz. kapitola 7.1.), je proměnná *chyba* nastavena na logickou úroveň nepravda, tzn. záznam přechodného jevu do výstupního souboru je ukončen. V poslední podmínce cyklu je opět stanoven předpoklad „chyba = pravda“. Je-li podmínka splněna, tiskne se aktuální řádek cyklu do souboru „vystup.dat“. Není-li zpracováván posledním řádek souboru dat, vstupuje do cyklu zpracování následující řádek. Zjednodušený vývojový diagram programu je na obrázku Obr. 7.6.



Uvedený algoritmus je dokonalejší než algoritmus popisovaný v kapitole 7.3., jelikož nereaguje pouze na poruchy vykazující přepětí, nýbrž detekuje také poklesy napětí, doprovázející například některé druhy zkratů. Rozpozná poruchu již v počátku jejího vzniku, na rozdíl od algoritmu z kapitoly 7.3., a to v okamžiku, kdy naměřená hodnota neodpovídá podmínce (7.4.).

Problémem algoritmu je fakt, že při výpočtu modelovaných napětí dle vztahu (7.1.) není tímto způsobem aplikace funkce sinus jednoznačně dáno, má-li následující hodnota modelovaného napětí růst či klesat. Je tedy nutno použít funkci, která zjistí následující trend měřeného napětí. Výstupem funkce je pak příkaz růstu či klesání pro funkci sinus. **Jelikož provedená měření mají příliš malou vzorkovací frekvenci, nelze tento algoritmus pro dané zpracování použít.**



Obr. 7.6. Zjednodušený vývojový diagram programu