

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky
Faculty of electrical engineering and communication
Department of electrical power engineering

ODOLNOST SPOTŘEBIČŮ NA KRÁTKO- DOBÉ POKLESY A VÝPADKY NAPĚTÍ

**THE APPLIANCES IMMUNITY TO SHORT VOLTAGE DIPS
AND INTERRUPTIONS**

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE: Ing. JAROMÍR BOK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2011

Bibliografická citace práce:

BOK, J.: *Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 165 stran. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW) uvedené v příloženém seznamu.

.....

Poděkování

Na tomto místě si dovoluji vyjádřit poděkování svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. který se svým odborným vedením, vysoce profesionálním přístupem a v průběhu celého studia poskytovanými cennými radami výrazně zasloužil o mé absolvování celého čtyřletého studia a dokončení disertační práce. Velké poděkování rovněž směřuji svým rodičům, kteří mi po celou dobu studia poskytovali materiální a finanční zajištění, díky čemuž jsem mohl postgraduální studium vůbec absolvovat, a též svým přátelům, kteří mi zejména v kritických etapách čtyřletého studia poskytovali výraznou psychickou podporu.

V Brně, 21.9.2011

Jaromír Bok



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Dizertační práce

Odolnost spotřebičů na krátkodobé poklesy a výpadky napětí

Ing. Jaromír Bok

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Doctoral Thesis

The appliances immunity to short voltage dips and interruptions

Ing. Jaromír Bok

Supervisor: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Disertační práce je věnována problematice poklesů a krátkodobých přerušení napětí, souhrnně označovaných jako události na napětí, vyskytujících se v el. sítích a jejich vlivu na připojené el. spotřebiče, přičemž se výhradně specializuje na spotřebiče jednofázové. Velmi úzce se tak dotýká oblasti elektromagnetické kompatibility, neboť v podstatě řeší problémy spolehlivého chodu různých typů el. zařízení během působení elektromagnetického rušení, za které se dají poklesy a krátkodobá přerušení napětí zcela jistě považovat. Přenosovou cestu mezi zdroji rušení a ohroženými spotřebiči tvoří el. napájecí síť, přes kterou jsou všechna el. zařízení navzájem propojena.

Odolnost spotřebičů je v současné době testována na poklesy a přerušení napětí striktně zadaných parametrů, které jsou určeny pouze třídou elektromagnetického prostředí, v němž je použití daného spotřebiče doporučováno. Při testech odolnosti jsou preferovány obdélníkové průběhy událostí, jejichž hlavními určujícími veličinami jsou zbytková napětí a délky trvání událostí. Takto definované zkušební poklesy však příliš nesouvisí s parametry napěťových událostí skutečně se vyskytujících v reálných el. sítích, kde nejenže se vyskytují poklesy a přerušení napětí variabilních délek trvání i zbytkových napětí, ale do celkového vlivu poklesu napětí na připojená zařízení promlouvají také další charakteristiky napětí. Disertační práce se tak zabývá nalezením dalších parametrů poklesů napětí, které mají významný vliv na odolnost el. zařízení, a také zefektivněním procesu testování odolností různých typů el. zařízení.

Ačkoli není výskyt událostí na napětí v el. sítích legislativně nijak omezen a události na napětí jsou chápány pouze jako informativní parametr kvality napětí, je důležité výskyt napěťových událostí v el. sítích monitorovat. Monitorovací zařízení musí být schopno dlouhodobého záznamu a musí s dostatečnou přesností detekovat parametry zaznamenaných napěťových událostí. Přesnost detekovaných parametrů a rychlost detekce událostí závisí na vlastnostech detekčního algoritmu, na jehož základě monitorovací zařízení pracuje. Část disertační práce je proto věnována porovnání vlastností vybraných detekčních algoritmů a jejich schopností správně zaznamenat parametry detekovaných napěťových událostí.

Hlavním smyslem disertační práce je snaha o propojení systému hodnocení událostí na napětí v el. sítích se systémem hodnocení el. spotřebičů právě na tyto události. Na základě provedených zkoušek odolnosti u vybraného souboru el. zařízení a rovněž na základě dlouhodobého monitoringu výskytu poklesů a krátkodobých přerušení napětí v el. sítích jsou navrženy kompatibilní úrovně, jejichž dodržování ze strany provozovatele el. sítě a současně ze strany výrobců el. zařízení přinese výrazné zlepšení spolehlivosti chodu všech připojených el. zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA:

elektrický spotřebič, odolnost, křivka odolnosti, kvalita el. energie, pokles napětí, přerušení napětí, monitor událostí, detekční algoritmus, RMS (1/2), Rozšířený Kalmanův filtr, kompatibilní úroveň, elektromagnetická kompatibility

ABSTRACT

This Ph.D. thesis deals with problems about voltage dips and short voltage interruptions, generally named as voltage events, which origin in power supply networks and have a negative influence for all connected electric appliances. In this thesis single phase appliances are considered. These problems closely relate with area of electromagnetic compatibility which solve all questions about correct operation of different types of electric appliances during electromagnetic disturbances impact. Voltage events are ones of the many types of electromagnetic disturbances. The connection between disturbance sources and sensitive electric appliances is created by power supply lines.

The immunity of electric appliances to voltage dips and short interruptions is currently tested via voltage dips with strictly defined parameters which are intended by class of electromagnetic environment in which the usage of electric appliance is recommended. During immunity tests the rectangular shape of voltage dips is preferred. The main descriptive parameters of testing voltage events are the residual voltage and the event time duration. But voltage dips and short interruptions defined by this way do not closely relate with parameters of real voltage dips and interruptions occurred in public supply system where parameters of voltage dips are variable. Moreover in the power supply system there are many of others voltage parameters which can have a significant influence to immunity level of connected electric appliances. This Ph.D. thesis also deals with finding more voltage event parameters.

Although the voltage events occurrence in the power supply system is not limited and voltage events are considered only as informative voltage parameter it is important to monitor voltage events occurrence. The monitoring device has to be able to operate for long time period and it has to detect parameters of voltage events with adequate accuracy. The accuracy of detected event parameters and the detection delay depends on the detection algorithm characteristics. That is why the part of this thesis relates with a comparison of several detection algorithms and their abilities to correct detection of voltage event parameters.

The main purpose of this thesis is the proposal of connection between classification of voltage dips and short interruptions occurred in power supply system with the classification of electric appliances immunity to these voltage events. On the base of many of provided electric appliances immunity tests and also on the base of long time period voltage events monitoring the special compatibility levels are proposed in this thesis. The observation of proposed compatibility levels will bring the increasing level of reliable operation of all connected electric appliances.

KEYWORDS:

electric appliance, immunity, immunity curve, power quality, voltage dip, short voltage interruption, voltage event monitor, detection method, RMS (1/2), Extended Kalman filter, compatibility level, electromagnetic compatibility

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	17
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	18
1 ÚVOD	21
2 PŘEHLED DOSAVADNÍHO VÝVOJE	23
2.1 POKLESY NAPĚTÍ A KRÁTKODOBÉ VÝPADKY NAPĚTÍ	23
2.1.1 DEFINICE	25
2.1.2 PARAMETRY UDÁLOSTÍ NA NAPĚTÍ A DALŠÍ TRÍDĚNÍ.....	25
2.1.3 VZNIK A ŠÍŘENÍ POKLESŮ NAPĚTÍ V EL. SÍTÍCH.....	32
2.1.4 ÚČINKY POKLESŮ NAPĚTÍ A KR. PŘERUŠENÍ NA PŘIPOJENÁ EL. ZAŘÍZENÍ	35
2.1.5 DETEKCE POKLESŮ A KR. PŘERUŠENÍ NAPĚTÍ – ZNÁMÉ DETEKČNÍ ALGORITMY.....	39
2.1.6 PROSTŘEDKY K POTLAČENÍ NEGATIVNÍCH ÚČINKŮ POKLESŮ NAPĚTÍ NA EL. ZAŘÍZENÍ.....	45
2.2 ODOLNOST ZAŘÍZENÍ VŮČI UDÁLOSTEM NA NAPĚTÍ	54
2.2.1 FUNKČNÍ KRITÉRIA ODOLNOSTI	55
2.2.2 TESTOVÁNÍ ODOLNOSTI SPOTŘEBIČŮ V SOULADU S EN 61000-4-11.....	56
2.2.3 MĚŘENÍ KŘIVEK ODOLNOSTI EL. ZAŘÍZENÍ.....	59
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	62
4 PARAMETRIZACE KŘIVEK ODOLNOSTI EL. SPOTŘEBIČŮ	63
4.1 ZAŘÍZENÍ PODROBENÁ ZKOUŠKÁM ODOLNOSTI.....	63
4.2 ROZBOR VYBRANÝCH PARAMETRŮ OVLIVŇUJÍCÍCH ODOLNOST EL. ZAŘÍZENÍ.....	65
4.2.1 TOPOLOGIE A KONSTRUKČNÍ PŘEVODNÍ EL. ZAŘÍZENÍ.....	65
4.2.2 ZVOLENÉ FUNKČNÍ KRITÉRIUM	67
4.2.3 AKTUÁLNÍ ZATÍŽENÍ ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ.....	69
4.2.4 VELIKOST NAPĚTÍ PŘED A PO SKONČENÍ POKLESU NAPĚTÍ.....	69
4.2.5 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ PŘED VZNIKEM, PO SKONČENÍ A BĚHEM POKLESU NAPĚTÍ	70
4.2.6 FÁZOVÝ ÚHEL VZNIKU A ZÁNIKU POKLESU NAPĚTÍ.....	70
4.2.7 TVAR POKLESU NAPĚTÍ	71
4.2.8 SEKVENČNÍ POKLESY NAPĚTÍ	71
4.3 TESTOVACÍ SYSTÉM A POPIS SAMOTNÉHO PROCESU TESTOVÁNÍ	72

4.3.1	TESTOVACÍ A MĚŘÍCÍ SYSTÉM	72
4.3.2	TESTOVACÍ PROCEDURA	73
4.4	ZMĚŘENÉ KŘIVKY ODOLNOSTI	78
4.4.1	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV TOPOLOGIE.....	78
4.4.2	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV FUNKČNÍHO KRITÉRIA	79
4.4.3	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV ZATÍŽENÍ EL. ZAŘÍZENÍ.....	81
4.4.4	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV VELIKOSTI NAPĚTÍ.....	81
4.4.5	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ	83
4.4.6	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV FÁZOVÉHO ÚHLU VZNIKU POKLESU.....	84
4.4.7	KŘIVKY ODOLNOSTI VYJADŘUJÍCÍ VLIV TVARU POKLESU/PŘERUŠENÍ NAPĚTÍ.....	85
4.5	ZHODNOCENÍ	86
5	ALGORITMY PRO MĚŘENÍ A DETEKCI UDÁLOSTÍ NA NAPĚTÍ	88
5.1	ALGORITMY ZÁVISLÉ NA DÉLCE OKNA VS. TRACKOVACÍ ALGORITMY	88
5.1.1	RMS (1/2)	89
5.1.2	RMS 10ms.....	89
5.1.3	KLOUZAJÍCÍ RMS (1/2).....	90
5.1.4	KLOUZAJÍCÍ RMS 10ms.....	90
5.1.5	DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE (DFT).....	91
5.1.6	„ZIARANI“ ALGORITMUS.....	91
5.1.7	KALMANŮV FILTR.....	94
5.1.8	VLNKOVÁ ANALÝZA (WAVELET ANALYSIS).....	97
5.1.9	SHRnutí	98
5.2	SIMULACE, PRŮBĚH TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH DETEKČNÍCH ALGORITMŮ A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	98
5.2.1	SIMULACE 1 – VLIV „NÁHODNĚ“ ZVOLENÉ KOMBINACE PARAMETRŮ DEFINUJÍCÍCH DANOU UDÁLOST NA CITLIVOST DANÉHO ALGORITMU.....	99
5.2.2	SIMULACE 2 – VLIV PROMĚNNÉ HLOUBKY POKLESU NAPĚTÍ NA CITLIVOST DANÉHO ALGORITMU	104
5.2.3	SIMULACE 3 – VLIV PROMĚNNÉ DÉLKY TRVÁNÍ POKLESU NAPĚTÍ NA CITLIVOST DANÉHO ALGORITMU	106
5.2.4	SIMULACE 4 – VLIV PROMĚNNÉHO OKAMŽIKU VZNIKU POKLESU NAPĚTÍ NA CITLIVOST DANÉHO ALGORITMU	108
5.2.5	SIMULACE 5 – VLIV MÍRY HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ SINUSOVÉ KŘIVKY NAPĚTÍ NA CITLIVOST DANÉHO ALGORITMU.....	110
5.2.6	SHRnutí	114

5.3	POUŽITÍ VYBRANÝCH ALGORITMŮ PRO ZÁZNAM UDÁLOSTÍ NA NAPĚTÍ V REÁLNÉ EL. SÍTI	116
5.4	SHRNUTÍ.....	120
6	PROPOJENÍ SYSTÉMU HODNOCENÍ UDÁLOSTÍ NA NAPĚTÍ SE SYSTÉMEM HODNOCENÍ ODOLNOSTÍ EL. ZAŘÍZENÍ	122
6.1	TESTOVÁNÍ ODOLNOSTI EL. ZAŘÍZENÍ VŮČI POKLESŮM NAPĚTÍ REÁLNÝCH ZMĚŘENÝCH PARAMETRŮ	122
6.2	KONCEPCE KOMPATIBILNÍ ÚROVNĚ PRO POKLESY A KRÁTKODOBÉ VÝPADKY NAPĚTÍ.....	124
6.3	HODNOCENÍ POKLESŮ A KR. PŘERUŠENÍ NAPĚTÍ S OHLEDEM NA ODOLNOST EL. ZAŘÍZENÍ	133
7	ZÁVĚR.....	136
	LITERATURA.....	140
	VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST	144
	ŽIVOTOPIS – CURRICULLUM VITAE	146
8	PŘÍLOHY	147
8.1	VYHODNOCOVACÍ APLIKACE PRO TESTOVÁNÍ ODOLNOSTÍ SVĚTELNÝCH RESP. POČÍTAČOVÝCH ZDROJŮ.....	147
8.2	ZAZNAMENANÉ PRŮBĚHY DŮLEŽITÝCH VELIČIN BĚHEM TESTOVÁNÍ ODOLNOSTÍ.....	148
8.3	DETEKOVANÉ PARAMETRY HARMONICKY ZKRESLENÉHO NAPĚTÍ.....	163
8.4	KOMPATIBILNÍ ÚROVNĚ S OHLEDEM NA TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ EL. ZAŘÍZENÍ.....	165

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Zjednodušená struktura ES vč. vyobrazených napěťových hladin používaných v ČR [4].....	23
Obr. 2	Průběh okamžité a ef. hodnoty napětí během poklesu, přerušení napětí a zvýšení napětí.....	26
Obr. 3	Schematické rozdělení událostí na napětí.....	28
Obr. 4	Průběhy vybraných událostí na napětí. Délka trvání části charakterizované ustálenou hodnotou zbytkového napětí u průběhu „Pila 2“ je 10ms.	28
Obr. 5	Typický pokles napětí v 3f soustavě, s naznačením jednotlivých částí poklesu [10].....	29
Obr. 6	Rozdíly ve tvarech poklesů napětí.....	33
Obr. 7	Zóny původu vzniku poklesů a přerušení napětí.....	33
Obr. 8	Typy poklesů napětí podle počtu poklesem postižených fází [14][15][16].....	35
Obr. 9	Vliv volby vzorkovací frekvence na správnost interpretace spojitého signálu v diskrétní rovině.....	41
Obr. 10	Schematické znázornění procesu výpočtu efektivních hodnot napětí z diskrétního vstupního signálu.....	42
Obr. 11	Grafické vyjádření zaznamenaných poklesů a přerušení napětí v distribuční síti nn společnosti E.ON.....	43
Obr. 12	Rozmístění možných opatření ke zmírnění účinků poklesů napětí na el. spotřebiče.....	46
Obr. 13	Princip činnosti vypínače automatiky přizemnění postižené fáze v síti vn [22].....	48
Obr. 14	Schéma zapojení omezujícího reaktoru [23].....	49
Obr. 15	Jednopolové schéma zapojení jednotky SSC [23].....	50
Obr. 16	Různá konstrukční uspořádání soustrojí motor-generátor (EGS).....	51
Obr. 17	Rozdíly v provedení statických UPS.....	52
Obr. 18	Blokové schéma obvodu se zařízením zabraňujícím nežádoucímu vypínání relé a stykačů [24].....	53
Obr. 19	Princip funkce omezovače rozběhového proudu asynchronních motorů [23].....	53
Obr. 20	Zdroj nepřerušovaného napájení (UPS) v offline a online provedení [23].....	53
Obr. 21	CBEMA křivka vs. křivka IEEE.....	54
Obr. 22	Průběh efektivní hodnoty zkušební poklesu napětí (vlevo) a zkušební přerušení napětí (vpravo).....	57
Obr. 23	Skutečná křivka odolnosti vybraného el. zařízení a její zjednodušená podoba.....	60
Obr. 24	Rozdíly mezi topologiemi světelných zdrojů [26].....	66
Obr. 25	Rozdíly mezi topologiemi různých počítačových zdrojů.....	67
Obr. 26	Blokové schéma testovacího systému určeného k testování odolnosti světelných zdrojů (vlevo) a k testování počítačových zdrojů (vpravo).....	73
Obr. 27	Vývojový diagram automatizovaného testovacího systému.....	77
Obr. 28	Křivky odolnosti vyjadřující vliv topologie sv. zdrojů (nahore) a pc zdrojů (dole).....	78

Obr. 29	Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů vyjadřující vliv zvoleného funkčního kritéria	80
Obr. 30	Srovnání křivek odolnosti vybraných sv. zdrojů pro funkční kritéria AB1 a BC	80
Obr. 31	Křivky odolnosti sv. zdroje L10 vyjadřující vliv regulace výstupního sv. toku na 10% φ_n (vlevo) a vliv zatížení u vybraných pc. zdrojů (vpravo)	81
Obr. 32	Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů (nahore) a vybraných pc zdrojů (dole) vyjadřující vliv velikosti napětí před vznikem a po skončení poklesu napětí.....	82
Obr. 33	Rozdíly v křivkách napětí pro sinusový průběh a harmonickými deformované průběhy Overswing a Flattop při $THD_U = 8\%$	83
Obr. 34	Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů (nahore) a vybraných pc. zdrojů (dole) vyjadřující vliv harmonického zkreslení křivky napětí před vznikem, během působení a po skončení poklesu napětí; $THD_U = 8\%$	84
Obr. 35	Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů vyjadřující vliv proměnného fázového úhlu vzniku poklesu napětí.....	85
Obr. 36	Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů (nahore) a vybraných pc. zdrojů (dole) vyjadřující vliv tvaru poklesu napětí.....	86
Obr. 37	Odlišnosti v detekovaných průbězích poklesu napětí testovaných RMS metod.....	91
Obr. 38	Blokové schéma „Ziarani“ trackovacího algoritmu [37]	93
Obr. 39	Vliv koeficientů μ_1 , μ_2 , μ_3 na chod „Ziarani“ algoritmu. Červená linie: $\mu_1 = 200$, $\mu_2 = 20000$, $\mu_3 = 0,02$; zelená linie: $\mu_1 = 500$, $\mu_2 = 10000$, $\mu_3 = 0,02$	93
Obr. 40	Procentuální míra nepřesnosti parametrů detekovaných událostí simulace č.1	101
Obr. 41	Detail rychlosti algoritmů při detekci události a) č.1, b) č. 5, c) č.6, d) č.9.....	103
Obr. 42	Závislost chyby algoritmy detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí na velikosti skutečného zbytkového napětí poklesu (krok 1% U_n)	104
Obr. 43	Závislost prodlevy při detekci poklesu na velikosti zbytkového napětí poklesu (krok 1% U_n)	106
Obr. 44	Vliv délky trvání poklesu na velikost chyby detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí.....	106
Obr. 45	Závislost prodlevy při detekci poklesů napětí na délce trvání poklesů (krok 1ms).....	108
Obr. 46	Závislost chyby algoritmy detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí na skutečném počátečním fázovém úhlu vzniku poklesu (krok 5°).....	108
Obr. 47	Závislost prodlevy při detekci poklesu na skutečném počátečním fázovém úhlu vzniku poklesu (krok 5°).....	109
Obr. 48	Ukázka zvolených deformovaných průběhů napětí	111
Obr. 49	Pohled na čelní panely vytvořeného analyzátoru vč. výřezu blokového diagramu zobrazujícího vyhodnocovací logiku pro detekci událostí.....	116
Obr. 50	Výpis ze souboru obsahujícího informace ohledně počátečního nastavení monitoru událostí na napětí.....	118
Obr. 51	Výpis ze souboru obsahujícího parametry analyzovaných událostí na napětí.....	119

Seznam obrázků

Obr. 52	Čelní panely a výřez blokového diagramu aplikace umožňující dodatečnou analýzu událostí na napětí	120
Obr. 53	Poklesy a přerušení napětí zaznamenané v el. síti s vyobrazenými zkušebními úrovněmi pro testování odolnosti el. zařízení dle [7][25].....	123
Obr. 54	Poklesy a přerušení napětí zaznamenané v el. síti v kontextu se základní imunitní křivkou sv. zdroje L7 odpovídající kritériu BC.....	124
Obr. 55	Optimální úroveň odolnosti spotřebiče v závislosti na míře výskytu elmag. rušení [50]	125
Obr. 56	Imunitní křivky různých spotřebičů v kontextu s navrženými kompatibilními úrovněmi	127
Obr. 57	Navržené kompatibilní úrovně pro různé třídy elektromagnetického prostředí	127
Obr. 58	Zóny příčin vzniku poklesů napětí a jejich vazba na navržené kompatibilní úrovně.....	128
Obr. 59	Celkový návrh koncepce kompatibilních úrovní pro všechna tři prostředí sítí nn.....	129
Obr. 60	Význam vytvořeného kódu pro omezení četností výskytů poklesů/přerušení napětí	130
Obr. 61	Vymezení působnosti stanovených povolených limitů max. četností výskytů poklesů a přerušení napětí pro jednotlivé třídy prostředí: a) prostředí třídy 1; b) prostředí třídy 2; prostředí třídy 3. Oblasti působnosti jsou vyznačeny šedými plochami.	132
Obr. 62	Čelní panel vytvořené aplikace pro výpočet indexu závažnosti poklesu napětí SI a pravděpodobnosti spolehlivé funkce el. zařízení.....	134
Obr. 63	Aplikace v LabVIEW pro záznam a vyhodnocování testování odolností světelných zdrojů	147
Obr. 64	Aplikace v LabVIEW pro záznam a vyhodnocování testování odolností pc zdrojů.....	147
Obr. 65	L1_AB1_nom_2ms_172V	149
Obr. 66	L1_AB1_nom_10ms_227,1V	149
Obr. 67	L1_AB1_nom_3s_228,8V	149
Obr. 68	L1_AB3_nom_10ms_200V	149
Obr. 69	L1_AB3_nom_300ms_220,2V	149
Obr. 70	L1_AB3_nom_1s_220,2V	149
Obr. 71	L1_AB4_nom_10ms_153,4V	150
Obr. 72	L1_AB4_nom_300ms_207,1V	150
Obr. 73	L1_AB4_nom_10s_207,1V	150
Obr. 74	L2_AB1_nom_100ms_229V	150
Obr. 75	L2_AB1_úhel90_10ms_227,2V	150
Obr. 76	L2_AB1_flattop_50ms_229,1V.....	150
Obr. 77	L2_AB1_overswing_5ms_224,8V.....	150
Obr. 78	L2_AB1_pila_3s_228,7V	150
Obr. 79	L2_BC_nom_1s_100V	151
Obr. 80	L2_BC_úhel90_1s_100,7V.....	151
Obr. 81	L2_BC_flattop_100ms_91,1V	151

Seznam obrázků

Obr. 82	L2_BC_flattop_3s_100,4V	151
Obr. 83	L2_BC_overswing_70ms_77,3V	151
Obr. 84	L2_BC_predip207_60ms_56V	151
Obr. 85	L2_BC_pila_500ms_69,6V	151
Obr. 86	L4_AB1_úhel90_100ms_227,6V	151
Obr. 87	L4_AB1_Flattop_4ms_191V	152
Obr. 88	L4_AB1_Flattop_100ms_227,6V	152
Obr. 89	L4_AB1_Overswing_4ms_167V	152
Obr. 90	L4_AB1_Overswin_30ms_227,6V	152
Obr. 91	L4_AB1_predip207_5ms_191,8V	152
Obr. 92	L4_AB1_predip207_100ms_205V	152
Obr. 93	L4_AB1_pila_1s_226,8V	152
Obr. 94	L4_AB4_nom_10ms_193,2V	152
Obr. 95	L4_AB4_nom_10s_208,8V	153
Obr. 96	L4_BC_nom_28ms_0V	153
Obr. 97	L4_BC_nom_30ms_84V	153
Obr. 98	L4_BC_nom_300ms_87V (+)	153
Obr. 99	L4_BC_nom_300ms_86V	153
Obr. 100	L4_BC_nom_1s_86V	153
Obr. 101	L4_BC_nom_3s_87V	153
Obr. 102	L4_BC_úhel90_100ms_86V	153
Obr. 103	L4_BC_Flattop_1s_82V (+)	154
Obr. 104	L4_BC_predip207_12ms_76V	154
Obr. 105	L4_BC_predip207_100ms_86,5V	154
Obr. 106	L4_BC_pila_70ms_36V	154
Obr. 107	L4_BC_pila_1s_82V	154
Obr. 108	L5_AB1_nom_3ms_174V	154
Obr. 109	L5_AB1_nom_10ms_221,5V	154
Obr. 110	L5_AB1_nom_300ms_226V	154
Obr. 111	L5_AB1_flattop_10ms_221,2V	155
Obr. 112	L5_AB1_predip253_4ms_221V	155
Obr. 113	L5_AB1_predip253_100ms_248,8V	155
Obr. 114	L5_AB1_pila_1s_225,1V	155
Obr. 115	L5_BC_nom_300ms_115V	155
Obr. 116	L5_BC_nom_1s_112V	155
Obr. 117	L5_BC_overswing_1s_108V (+)	155
Obr. 118	L5_BC_overswing_1s_107,5V	155
Obr. 119	L5_BC_predip253_1s_115V	156
Obr. 120	L5_BC_predip253_1s_112,5V	156
Obr. 121	L5_BC_pila_500ms_84V	156
Obr. 122	L6_AB1_nom_6ms_222,8V	156
Obr. 123	L6_AB1_nom_1s_226,6V	156
Obr. 124	L6_BC_nom_30ms_67V	156
Obr. 125	L6_BC_nom_1s_103V	156

Seznam obrázků

Obr. 126	L6_BC_nom_10s_105V	156
Obr. 127	L10_AB1_nom_10ms_159V	157
Obr. 128	L10_AB1_nom_100ms_202,4V	157
Obr. 129	L10_AB1_nom_1s_202,3V	157
Obr. 130	L10_AB1_nom_10s_202,3V	157
Obr. 131	L10_AB3_nom_20ms_84,2V	157
Obr. 132	L10_AB3_nom_100ms_162,3V	157
Obr. 133	L10_AB3_nom_1s_162,3V	157
Obr. 134	L11_AB1_nom_1s_225,5V	157
Obr. 135	L11_BC_nom_100ms_29V	158
Obr. 136	L11_BC_úhel90_300ms_30,2V.....	158
Obr. 137	L11_BC_predip253_1s_30,3V	158
Obr. 138	L11_BC_pila_500ms_8,3V	158
Obr. 139	PC1_AC_nom_91ms_0V.....	158
Obr. 140	PC1_AC_nom_120ms_10V.....	158
Obr. 141	PC1_AC_pila_250(122)ms_20V	158
Obr. 142	PC1_AC_pila_440(130)ms_90V	158
Obr. 143	PC1_AC_70W_210(45)ms_140V	158
Obr. 144	PC1_AC_100W_18ms_90V.....	159
Obr. 145	PC5_AC_overswing_200(121)ms_80V	159
Obr. 146	PC5_AC_pila_236(134)ms_10V	159
Obr. 147	PC5_AC_pila_305(132)ms_0V	159
Obr. 148	PC8_AC_nom_150ms_0V.....	159
Obr. 149	PC8_AC_nom_1000(810)ms_40V	159
Obr. 150	PC8_AC_úhel90_170ms_38V.....	159
Obr. 151	PC8_AC_predip207_500(180)ms_0V	159
Obr. 152	PC8_AC_predip207_600(252)ms_25V	159
Obr. 153	PC8_AC_predip207_900(792)ms_35V	160
Obr. 154	PC8_AC_predip207_angle90_185ms_0V	160
Obr. 155	PC8_AC_predip253_500(212)ms_20V	160
Obr. 156	PC8_AC_predip253_500(362)ms_30V	160
Obr. 157	PC8_AC_predip253_900(810)ms_35V	160
Obr. 158	PC8_AC_predip253_1s_41V.....	160
Obr. 159	PC8_AC_overswing_250(189)ms_10V	160
Obr. 160	PC8_AC_overswing_700(270)ms_25V	160
Obr. 161	PC8_AC_overswing_úhel270_190ms_0V	161
Obr. 162	PC8_AC_overswing_1s_39V	161
Obr. 163	PC8_AC_flattop_500(188)ms_10V.....	161
Obr. 164	PC8_AC_flattop_500(370)ms_30V.....	161
Obr. 165	PC8_AC_flattop_950(824)ms_35V.....	161
Obr. 166	PC8_AC_pila_10s(219ms)_30V.....	161
Obr. 167	PC8_AC_50W_500(120)ms_0V	161
Obr. 168	PC8_AC_50W_500(144)ms_25V	161
Obr. 169	PC8_AC_70W_500(84)ms_10V	161

Seznam obrázků

Obr. 170	PC8_AC_70W_500(118)ms_30V	162
Obr. 171	PC8_AC_70W_500(194)ms_40V	162
Obr. 172	PC8_AC_100W_500(68)ms_0V	162
Obr. 173	PC8_AC_100W_750(176)ms_45V	162
Obr. 174	Navržené kompatibilní úrovně se zohledněním tepelného namáhání el. zařízení	165

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Typy elektrických sítí podle napět'ové hladiny (převzato z [5]).....	24
Tab. 2	Výčet parametrů poklesů napětí dle [10]	30
Tab. 3	Definice příčin vzniku poklesů a přerušení napětí v elektrických sítích	34
Tab. 4	Klasifikace poklesů a krátkodobých výpadků napětí v napájecích sítích nn [2]	44
Tab. 5	Klasifikace přerušení napětí v napájecích sítích nn [2]	44
Tab. 6	Klasifikace krátkodobých zvýšení napětí v napájecích sítích nn [2]	44
Tab. 7	Tabulka četností výskytu poklesů napětí zaznamenaných v reálné síti za standardní vyhodnocovací období jednoho roku	44
Tab. 8	Klasifikace všech událostí na napětí zaznamenaných v napájecích sítích nn	45
Tab. 9	Přednostní zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy napětí [7]	56
Tab. 10	Přednostní zkušební úrovně a doby trvání pro krátká přerušení napětí [7]	57
Tab. 11	Specifické vlastnosti testovacího generátoru [7]	58
Tab. 12	Seznam testovaných světelných zdrojů	64
Tab. 13	Seznam testovaných počítačových zdrojů	65
Tab. 14	Barevné označení testovaných detekčních algoritmů v zobrazených grafech	99
Tab. 15	Parametry simulovaných událostí na napětí	100
Tab. 16	Srovnání parametrů různými výpočetními algoritmy detekovaných událostí na napětí	101
Tab. 17	Přehled RMS metodami detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí pro úroveň zkreslení $THD_U = 8\%$	112
Tab. 18	Přehled trackovací algoritmy detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí s úrovní deformace $THD_U = 8\%$	112
Tab. 19	Zavedené nové členění poklesů a kr. přerušení napětí s omezením max. četností výskytů v jednotlivých zónách	130
Tab. 20	Přehled RMS metodami detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí pro úroveň zkreslení $THD_U = 12\%$	163
Tab. 21	Přehled trackovací algoritmy detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí pro úroveň zkreslení $THD_U = 12\%$	164

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**Symbols**

A	stavová veličina amplitudy napětí	V
$H(k)$	stavová matice prvků měřeného systému v okamžiku k	-
I	jednotková matice	-
$K(k)$	koeficient Rozšířeného Kalmanova filtru	-
N	počet vzorků vyhodnocovacího intervalu	-
$P(k)$	odhad kovarianční matice P(k)	-
$Q(k)$	kovarianční matice nastavující dynamickou odezvu Kalmanova filtru	-
$R(k)$	kovarianční matice nastavující dynamickou odezvu Kalmanova filtru	-
T	perioda střídavého signálu	s
T_s	časová vzdálenost dvou po sobě následujících vzorků	s
U	efektivní hodnota napětí	V
U_c	dohodnutá hodnota napětí	V
U_d	zbytkové napětí poklesu	V
U_h	efektivní hodnota h-té harmonické složky napětí	V
U_m	amplituda napětí	V
U_n	jmenovitá hodnota napětí	V
f	frekvence	Hz
f_{vz}	frekvence vzorkování	$S.s^{-1}$
h	řád harmonické složky	-
n	řád nejvyšší uvažované harmonické složky	-
t	čas	s
t_{det}	zpoždění při detekci událostí na napětí	s
t_f	doba trvání sestupné části poklesu napětí	s
t_r	doba trvání vzestupné části poklesu napětí	s
t_s	doba trvání ustálené části poklesu napětí	s
u	okamžitá hodnota napětí	V
u_d	procentní hodnota zbytkového napětí poklesu vzhledem ke jmenovité hodnotě napětí	%
u_i	okamžitá hodnota napětí i-tého vzorku	V
$v(k)$	náhodná proměnná vyjadřující velikost měřicího šumu	-
$w(k)$	náhodná proměnná vyjadřující velikost procesního šumu	-
$x(k)$	stavový vektor Rozšířeného Kalmanova filtru	-

Seznam symbolů a zkratk

$x(k)'$	odhad stavového vektoru $x(k)$	
$z(k)$	vektor měřených vstupních hodnot Rozšířeného Kalmanova filtru	-
ΔU	hloubka poklesu napětí	V
Δt	délka trvání poklesu napětí	s
$\Phi(k)$	přechodová matice stavů Rozšířeného Kalmanova filtru	
φ_{konec}	fázový úhel zániku poklesu napětí	°
φ_{zacatek}	fázový úhel vzniku poklesu napětí	°
μ_1, μ_2, μ_3	koeficienty ovlivňující chod „Ziaraniho“ algoritmu	-
ω	úhlová rychlost	rad s ⁻¹

Zkratky

ANSI	American National Standards Institute
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufacturers
ČR	Česká republika
DFT	Diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier Transform)
EGS	soustrojí motor-generátor (Engine Generating Sets)
EKF	rozšířený Kalmanův filtr (Extended Kalman Filter)
EMC	elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic Compatibility)
ES	elektrizační soustava
FCL	omezovač zkratového proudu (Fault Current Limiter)
IPC	(Internal Point of Coupling)
ITIC	Information Technology Industry Council
KF	Kalmanův filtr (Kalman Filter)
NI	National Instruments
OZ	opětné zapnutí
PCC	(Point of Common Coupling)
PFC	Power Factor Corrector
RMS	efektivní hodnota (Root Mean Square)
SMD	součástka pro povrchovou montáž plošných spojů (surface mount device)
SMPS	spínaný zdroj napájení (Switch Mode Power Supply)
SMT	technologie pájení součástek přímo na povrchu plošného spoje (surface mount technology)
SSC	statický sériový kompenzátor (Static Series Compensator)
STFT	krátkodobá Fourierova transformace (Short Time Fourier Transform)
TRMS	skutečná efektivní hodnota (True Root Mean Square)

Seznam symbolů a zkratk

UPS	zdroj nepřerušitelného napájení (Uninterruptible Power Supply)
ZZE	zákon zachování energie
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
zvn	zvlášť vysoké napětí

1 ÚVOD

Elektrizační soustava (ES) je systém vzájemně vodivě propojených zařízení zahrnujících výrobní (elektrárny tepelné, spalovací, vodní, větrné, fotovoltaické, geotermální, a jiné), přenos, transformaci a distribuci elektrické energie, systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky a v neposlední řadě také elektrické spotřebiče přeměňující elektrickou energii v jiné druhy energií, nejčastěji tepelnou, mechanickou, světelnou apod. Všechny uvedené prvky tvoří jeden (jsou propojeny v) kompaktní celek – systém, který dynamicky reaguje na veškeré stavy vzniklé uvnitř systému, bez ohledu na to, zda se jedná o stavy spojené s klasickým provozem soustavy (manipulační procesy, spínací procesy), nebo o stavy poruchové. Jako celek je také elektrizační soustava hodnocena, a to podle parametrů kvality dodávané elektrické energie. Z pohledu zákazníka neboli odběratele lze elektrickou energii chápat jako určitý druh zboží, pro nějž jsou, stejně jako u ostatních výrobků, výrobcem případně distributorem deklarovány parametry určující jeho kvalitu. Kvalita elektrické energie je posuzována na základě dvou základních hledisek – kvalitou dodávky a kvalitou napětí. Zatímco kvalitou dodávky se rozumí především spolehlivost dodávky el. energie, kvalita napětí je posuzována zejména podle následujících charakteristik [1][2]: *frekvence, velikost napájecího napětí, odchylky napájecího napětí, rychlé změny napětí, flickr, krátkodobé poklesy napětí, krátkodobá a dlouhodobá přerušení napájecího napětí, dočasná a přechodná přepětí, nesymetrie napětí, harmonické napětí*. Zmíněné kvalitativní parametry napětí jsou v současné době dále členěny na parametry závazné a parametry nezávazné (doporučené). Zatímco závazné parametry napětí mají ve veřejných distribučních soustavách stanoveny dovolené meze, v nichž se musí dané parametry pro splnění požadavků kvality napětí po přesně určenou dobu měřicího intervalu pohybovat, charakteristiky nezávazné mají stanoveny „doporučené“ meze, jejichž překročení však není žádným způsobem postihováno a tyto charakteristiky jsou monitorovány pouze pro účely statistického vyhodnocování. Monitoring všech charakteristik napětí (závazných i nezávazných) vede k získání většího povědomí o kvalitě napětí v daném místě ES.

Kvalita napětí má přímý dopad na správnou funkci všech elektrických zařízení připojených k elektrické napájecí síti. Každé elektrické zařízení (spotřebič) je navržen a zkonstruován tak, aby vykazoval optimální provozní charakteristiky právě při jmenovitých parametrech napájecího napětí. V případě, že je zařízení provozováno při jiných než jmenovitých parametrech napájecího napětí, jeho provoz již může vykazovat zhoršené charakteristiky – většinou dochází k poklesu účinnosti provozovaného zařízení, ke zkrácení doby životnosti, a zejména, mění se odolnost zařízení vůči různým typům elektromagnetického rušení přenášeným po elektrické síti. Jak již bylo vysvětleno, ES je složitý systém, pomocí něhož je elektrická energie distribuována z elektráren až ke konečným spotřebitelům. Spolu s přenášenou elektrickou energií se však prostřednictvím elektrické sítě šíří též elektromagnetické rušení, jež je superponováno na parametry jmenovitého napájecího napětí a více či méně jeho parametry mění. Zdrojem elektromagnetického rušení může být každý prvek ES, který je buďto nevhodně navržen a zkonstruován, pracuje v podmínkách výrobcem nedoporučených pro jeho provoz nebo je napájen napětím s nevyhovujícími parametry. Stejně jako může být každé elektrické zařízení zdrojem elektromagnetického rušení, tak každé elektrické zařízení může být (a zpravidla jím také je) i přijímačem elektromagnetického rušení. V praxi existují dva základní způsoby šíření elmag. rušení od zdrojů rušení k přijímačům rušení [3]: a) přímo po vedení prostřednictvím galvanického propojení zdroje rušení s přijímačem rušení, nebo b) vyzařováním ve formě elektromagnetického pole. Pro elektrický spotřebič ale není až tak důležité, jakým způsobem se elektromagnetické rušení ke spotřebiči dostane, jako spíše to, zda rušení dosahuje

úrovní, které již vyvolají nežádoucí změnu funkce daného zařízení či nikoli. Všechna elektrická zařízení lze hodnotit podle jednoho společného hlediska – odolnosti vůči elektromagnetickému rušení. V ES se vyskytuje velké množství různých typů elmag. rušení, které lze v souladu s [3] rozčlenit podle následujících kritérií:

- 1) Podle příčiny vzniku
 - a. Technické rušení – generováno technickými prostředky (umělými zdroji)
 - b. Přírozené rušení – atmosférické poruchy, blesky, galaktický šum
- 2) Podle systémového hlediska
 - a. Rušení vnější – zdroj rušení se nachází mimo rušené zařízení
 - b. Rušení mezi-systémové – mezi různými systémy a zařízeními
 - c. Rušení vnitro-systémové – zařízení je citlivé na rušení, které samo produkuje
- 3) Podle frekvenční oblasti
 - a. Nízkofrekvenční – harmonické složky, meziharmonické složky, kolísání zatížení, proudové rázy, poklesy a výpadky napětí, nesymetrie napětí, síťová signalizace, nízkofrekvenční elektrická pole, nízkofrekvenční magnetická pole
 - b. Vysokofrekvenční – užitečné vysílače, průmyslová el. zařízení, zařízení informační techniky, rozhlasové přijímače, výkonové měniče, zářivky, výbojové světelné zdroje, koróna, komutátorové procesy
 - c. Impulsní – atmosférické výboje, elektrostatické výboje, spínací procesy

Problematikou elektromagnetického rušení a jeho šířením, odolností elektrických zařízení vůči rušení a vzájemného ovlivňování činnosti připojených elektrických zařízení se zabývá samostatný vědní obor s názvem Elektromagnetická kompatibilita (EMC).

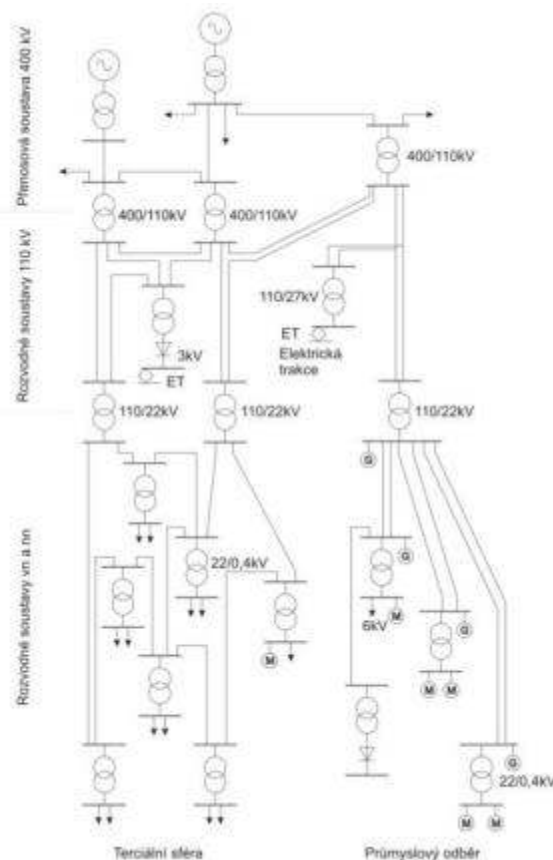
Disertační práce se úzce dotýká problematiky poklesů a krátkodobých výpadků napětí, tzn. dle výše uvedeného třídění elmag. rušení [3] se jedná o nízkofrekvenční vnější rušení, které se prostřednictvím elektrické napájecí sítě šíří od svého zdroje ke všem odběratelům potažmo všem elektrickým spotřebičům. Detailně jsou rozebrány příčiny vzniku tohoto rušivého jevu, jeho šíření elektrickou sítí, možnosti potlačení jeho příčin případně jeho účinků, dále princip a možnosti detekce poklesů napětí (všeobecně událostí na napětí). Poklesy a krátkodobé výpadky napětí ovlivňují činnost všech elektrických zařízení připojených k elektrické napájecí sítí, mohou vyvolat náhlé anomálie v chování připojených zařízení, takže patřičná pozornost je věnována také poklesy napětí ohroženým zařízením, míře jejich odolnosti vůči tomuto rušení a možnostmi zvyšování jejich odolností, problematice relevantního testování elektrických zařízení atd.

2 PŘEHLED DOSAVADNÍHO VÝVOJE

Kapitola obsahuje přehled aktuálního stavu a vyvíjených vylepšení týkajících se poklesů a kr. přerušení napětí a odolností el. spotřebičů. Postupně je rozebrána problematika vzniku poklesů a kr. přerušení napětí, jejich účinků na připojená elektrická zařízení a možných opatření vedoucích k potlačení těchto negativních účinků, dále je pozornost věnována aktuálně uznávané metodice detekce událostí na napětí. Co se týče elektrických spotřebičů a jejich odolnosti právě vůči poklesům napětí, je zde popsán proces testování odolnosti spotřebičů jak v souladu s aktuálně platnými předpisy, tak podle zahraničními autory prezentovaných doporučení, která mimo jiné uvažují víceparametrový popis napěťových událostí a proměření celé imunitní křivky konkrétního el. spotřebiče.

2.1 Poklesy napětí a krátkodobé výpadky napětí

Poklesy napětí a krátkodobé výpadky napětí (označovány také jako přerušení napětí) patří do skupiny nízkofrekvenčních elektromagnetických rušivých jevů, které se, společně se zvýšením napětí, souhrnně označují pojmem „události na napětí“. Jak plyne ze samotného názvu, tento druh elektromagnetického rušení ovlivňuje v elektrárnách vyráběnou a prostřednictvím elektrické sítě ke koncovým odběratelům distribuovanou sinusovou křivku napětí především co do její velikosti. ES jako celek obsahuje zařízení několika napěťových hladin (viz Obr. 1), přičemž spojovacím článkem mezi zařízeními dvou různých napěťových hladin je trafostanice osazená transformátorem odpovídajících parametrů (dány nejen velikostí napětí primární a sekundární strany, ale také hodnotou přenášeného výkonu).



Obr. 1 Zjednodušená struktura ES vč. vyobrazených napěťových hladin používaných v ČR [4]

Z obrázku Obr. 1 je zřetelné, že celá ES je rozdělena na dvě stěžejní části, a sice soustavu přenosovou a soustavu distribuční, přičemž pro každou část soustavy je charakteristickým rysem použití zařízení jiné napěťové hladiny. Zatímco přenosová část ES slouží výhradně k přenosu velkých výkonů na dlouhé vzdálenosti (a tedy s výhodou používá zařízení nejvyšší napěťové hladiny – zvn), distribuční část ES již slouží k místnímu rozvodu elektrické energie (menší vzdálenosti) k jednotlivým zákazníkům a využívá napěťových hladin nižších (vvn, vn, nn). Přehled v ČR používaných napěťových hladin s definovanými rozsahy napětí uvádí tabulka Tab. 1 [5].

Tab. 1 Typy elektrických sítí podle napěťové hladiny (převzato z [5])

Typ el.sítě	Rozsah napětí (vodič-zem)
Síť nízkého napětí (nn)	$100\text{V} < U \leq 1000\text{V}$
Síť vysokého napětí (vn)	$1\text{kV} < U \leq 35\text{kV}$
Síť velmi vysokého napětí (vvn)	$35\text{kV} < U \leq 230\text{kV}$
Síť zvlášť vysokého napětí (zvn)	$245\text{kV} \leq U$

Každá napěťová hladina z tabulky Tab. 1 samozřejmě může sestávat z několika dalších typů sítí, které jsou pak označovány podle hodnoty jmenovitého napětí dané sítě. Nejznámější elektrickou sítí v kategorii nn je síť s označením 3x400/230V, pomocí níž je distribuována elektrická energie ke všem zákazníkům se statusem „maloodběratel“ – prakticky všechny domácnosti [58]. Z označení el. sítě 3x400/230V vyplývá, že se jedná o trojfázovou el. síť o jmenovitém napětí 230V měřeným mezi fázovým vodičem a uzlem (efektivní hodnota fázového napětí) a jmenovitém napětí 400V měřeným mezi dvěma různými fázovými vodiči (efektivní hodnota sdruženého napětí). Deklarovaná hodnota napětí udává, že v místě připojení zákazníka k el. rozvodné síti (tzv. odběrné místo) by v ideálním případě mělo být trvale měřitelné napětí o efektivní hodnotě rovné jmenovitému napětí sítě. Již v úvodní kapitole však bylo uvedeno, že celá ES je velmi složitý systém slučující el. zařízení různých typů od elektráren až po koncové spotřebiče, a že tento systém velmi pružně reaguje na veškeré nastalé změny stavů, které uvnitř systému neustále probíhají. Odezva systému na danou změnu stavu je vždy nejprve automatická, kdy dojde k přirozené změně parametrů jednotlivých prvků ES a souvisejícím změnám parametrů napětí v el. síti, a poté, vyžádá-li si to situace, dojde k zásahu ochrany či operátora. Ať je však odezva systému jakákoliv, každá změna stavu má za následek neustálou fluktuaci parametrů napětí a prakticky nemožnost trvale udržet parametry napětí v různých místech ES na jejich jmenovitých hodnotách. Z tohoto důvodu má každý závazný parametr napětí ve veřejných distribučních soustavách stanoveny povolené meze, v nichž se musí daný parametr po přesně definovanou dobu určeného vyhodnocovacího intervalu pohybovat. Všeobecně pro události na napětí jsou směrodatné charakteristiky *Velikost napájecího napětí* a *Odchylky napájecího napětí*. Dle [1] platí následující:

„Normalizované jmenovité napětí U_n pro veřejnou síť nízkého napětí je pro čtyřvodičové trojfázové soustavy rovno $U_n = 230\text{V}$ mezi fází a uzlem, a pro třívodičové trojfázové soustavy rovno $U_n = 230\text{V}$ mezi fázovými vodiči.“

„Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95% průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu $U_n \pm 10\%$.“
A zároveň: „Všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $U_n +10\% / -15\%$.“

Z definic je patrné, že překročí-li efektivní hodnota (RMS) napětí meze povoleného intervalu $U_n \pm 10\%$, vzniká napěťová událost.

Obdobným způsobem jsou definovány i ostatní charakteristiky napětí [1]. V bezporuchovém stavu by tedy zákazník měl mít ve svém odběrném místě (anglicky PC – point of coupling) na vstupních svorkách napětí o předepsaných parametrech, tzn. efektivní hodnota napětí v povolených tolerancích, frekvence v povolených tolerancích, sinusová křivka napětí s dovolenou mírou harmonického zkreslení (*THD* – total harmonic distortion) v povolených mezích, atd.

2.1.1 Definice

V souladu s [1][6] je pokles napětí chápán jako náhlé snížení efektivní hodnoty napětí v určitém bodu elektrického rozvodného systému pod úroveň prahové hodnoty poklesu, následované zvýšením hodnoty napětí zpět nad prahovou hodnotu definující konec poklesu. Prahová hodnota vzniku poklesu bývá obvykle spjata s minimální hodnotou napětí, která se může v napájecí soustavě trvale vyskytovat, přičemž pro napájecí soustavu nízkého napětí je tato hodnota stanovena na 90% U_n . U vícefázových systémů pokles napětí začíná okamžikem, kdy efektivní hodnota napětí minimálně jedné fáze poklesne pod prahovou hodnotu vzniku poklesu, a končí v okamžiku, kdy napětí všech fází dosáhne (nebo je vyšší) prahové hodnoty pro konec poklesu napětí.

Přerušení napětí jakožto druhý zastupitel událostí na napětí může být vykládán dvěma možnými způsoby. Co se týče aktuálně platných a uznávaných standardů (například [1][2][6][7][9]), přerušení napětí je krajním případem poklesu napětí, kdy efektivní hodnota napětí v určitém bodě napájecí soustavy poklesne na nulovou hodnotu. Z důvodu problematického měření velmi malých hodnot napětí, a také při ztrátě potenciálu v případě přerušení bývá dohodou stanovena prahová hodnota přerušení napětí, která se v závislosti na typu sítě pohybuje v řádech jednotek procent hodnoty jmenovitého napětí. Dle [2] je za prahovou hodnotu přerušení napětí považována hodnota 5% U_n . Za přerušení napětí se pak považují poklesy napětí s úrovní napětí nižší než je dohodnutá prahová hodnota přerušení napětí. V případě trojfázových napájecích systémů se za přerušení napětí považuje pouze pokles napětí s úrovní napětí nižší než je prahová úroveň přerušení, a to současně ve všech třech fázích. Poklesy napětí pod prahovou úroveň přerušení napětí pouze v jedné nebo dvou fázích třífázového systému je označován jako pokles napětí, nikoli přerušení napětí. Co se však týče interpretace přerušení napětí z pohledu fyzikálního, přerušení napětí je chápáno jako rozpojení vodivé cesty mezi zdrojem elektrické energie a napájeným elektrickým spotřebičem, a to například pomocí vypínače, jističího prvku apod. To znamená, že přerušení napětí je dle fyziků charakterizováno nulovou hodnotou napětí na svorkách elektrického spotřebiče¹.

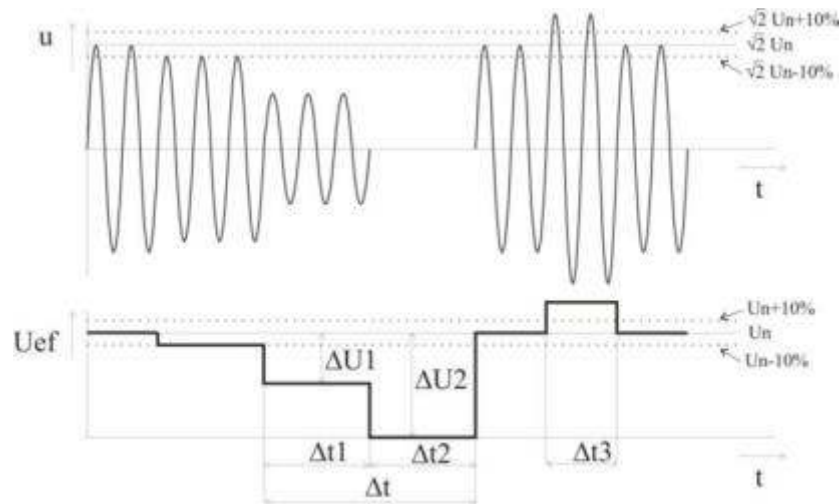
Třetím typem událostí na napětí je zvýšení napětí². Pro zvýšení napětí je typické náhlé zvýšení efektivní hodnoty napětí v určitém bodě elektrického systému nad úroveň prahové hodnoty zvýšení napětí, následované snížením hodnoty napětí zpět pod tuto prahovou hodnotu. Prahová hodnota zvýšení napětí je spjata s největší ef. hodnotou napětí, která se může v napájecí soustavě trvale vyskytovat – pro napájecí soustavu nízkého napětí je tato hodnota stanovena na 110% U_n .

2.1.2 Parametry událostí na napětí a další třídění

¹ Z fyzikálního úhlu pohledu je též pokles napětí chápán odlišně, nežli uvádějí platné standardy [1][2][6][7][9]. Pokles napětí je dle fyziků charakterizován snížením napětí v dané síti (tzn. i na hodnotu 0V), při kterém však zůstává zachováno galvanické propojení zdroje elektrické energie se spotřebičem.

² Zvýšení napětí bývá někdy chybně označováno za přepětí. Rozdíl mezi oběma pojmy je ten, že zvýšení napětí coby jedna z událostí na napětí je vztahována k efektivním hodnotám napětí, zatímco přepětí označuje transientní jev, který je vždy vztahován k okamžitým hodnotám napětí.

Události na napětí (poklesy, přerušení napětí, zvýšení napětí) jsou dle platných standardů [1][2][6][7][9] a dalších chápány jako dvourozměrné jevy popisované úrovní napětí během události a délkou trvání události. Příklad průběhu okamžité hodnoty napětí a odpovídající efektivní hodnoty napětí během všech tří typů událostí na napětí, včetně zobrazení všech popisných parametrů událostí je zobrazen na Obr. 2.



Obr. 2 Průběh okamžité a ef. hodnoty napětí během poklesu, přerušení napětí a zvýšení napětí

Nutno podotknout, že Obr. 2 zobrazuje pouze jeden z možných tvarů napěťových událostí, a sice tvar obdélníkový, kdy na počátku události napětí prudce klesá/roste na novou hodnotu, která trvá víceméně po celou dobu události, a pro konec události je typický opět prudký nárůst/pád napětí zpět do povoleného intervalu napětí. V elektrické napájecí síti se však vyskytují také události jiných tvarů, kterým bude věnována pozornost v některé z dalších částí této práce.

Jak je dále možné vidět z Obr. 2, délka trvání (Δt) značí časový interval mezi okamžikem, kdy efektivní hodnota napětí překročí hranice povoleného intervalu daného jmenovitou hodnotou napětí a povolenými odchylkami napětí (v sítích nn 230V \pm 10%) [1], a okamžikem, kdy se efektivní hodnota napětí do povoleného intervalu opět vrátí (prahová hodnota konce poklesu napětí bývá zvýšena ještě o hodnotu hystereze, která činí obvykle 2% U_n). Tato problematika bude detailněji rozebrána v kapitole 2.1.5 Detekce poklesů a kr. přerušení napětí). Naproti tomu úroveň napětí během události lze vyjádřit dvěma způsoby – zbytkovým napětím případně hloubkou poklesu³. Zbytkové napětí v sobě nese informaci o velikosti napětí během napěťové události (prakticky vyjadřuje extrémní hodnotu napětí dosaženou během události) a vyjadřuje se obvykle jako procentuální hodnota jmenovitého napětí soustavy:

³ V označování úrovní napětí během napěťových událostí různých typů nastává jistá terminologická „nelogičnost“. Užívané pojmy „zbytkové napětí“ případně „hloubka poklesu“ již z logické podstaty jejich názvů předpokládají, že úroveň napětí během události je nižší než jmenovité napětí soustavy (a tedy i hloubka poklesu dosahuje kladných hodnot), tzn., že budou použity pro popis poklesů případně přerušení napětí. V el. sítích však nastávají také události, při kterých úroveň napětí dosahuje vyšších hodnot než je jmenovité napětí soustavy, avšak popisné parametry odpovídajících názvů stanoveny nejsou. V případě potřeby popisu úrovně napětí u vyskytnuvších se zvýšení napětí se tedy používají popisné parametry stejně jako u poklesů a přerušení napětí, tzn., že zbytkové napětí bude nabývat hodnot vyšších než 110% U_n (případně hloubka poklesu, dle rovnice (2), bude u přepětí indikována záporným znaménkem před samotným číselným údajem). Ve většině případů se pro popis úrovně napětí během napěťových událostí používá parametr zbytkové napětí, čímž problém se zápornou hloubkou poklesu u přepětí odpadá.

$$u_{zb} = \frac{U_{zb}}{U_c} \cdot 100 \quad (\%; V, V) \quad (1)$$

Na rozdíl od zbytkového napětí hloubka poklesu dává přímou informaci o velikosti neboli intenzitě poklesu, přičemž je vyjádřena jako rozdíl jmenovitého napětí soustavy (případně velikosti napětí před nastalou událostí) a zbytkového napětí během události:

$$\Delta U = U_c - U_{zb} \quad (V; V, V) \quad (2)$$

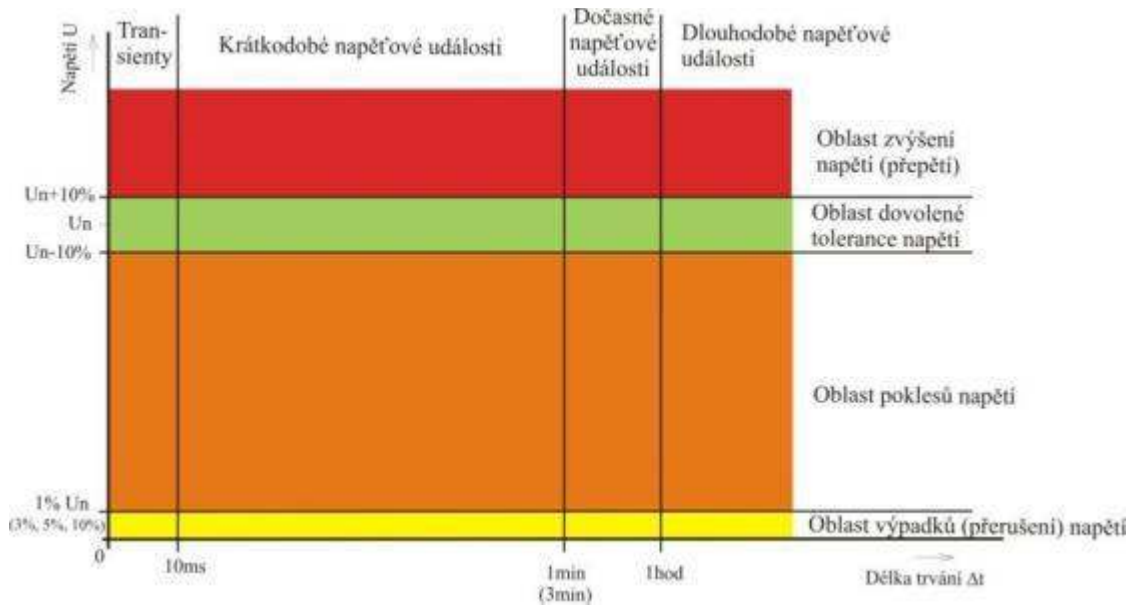
Symbole užívané v rovnicích (1) a (2) mají následující význam: u_{zb} je procentní hodnota zbytkového napětí (relativní veličina), U_{zb} je zbytkové napětí vyjádřené absolutní veličinou, U_c je dohodnutá hodnota napětí (v sítích nn je dohodnutá hodnota napětí rovna jmenovitému napětí soustavy) a ΔU je hloubka poklesu napětí.

Rozdílná interpretace událostí na napětí (fyzikální úhel pohledu vs. uznávané standardy) vyvolává značné nepřesnosti nejen při stanovování prahových úrovní přerušování napětí, ale také při samotném třídění událostí. Proto se většinou vychází z definic stanovených v aktuálně uznávaných standardech (např. [1][2][6][7][9]).

Události na napětí lze rozřadit podle jejich popisných parametrů. Při dodržení dvouparametrového popisu událostí na napětí (viz. [1][2][6][7][9]) jsou k dispozici dva hlavní třídící faktory – úroveň zbytkového napětí a délka trvání události. Události na napětí lze tedy dělit nejen podle úrovně zbytkového napětí, ale též podle délky trvání události. Zatímco dle úrovně napětí lze události rozdělit na již zmiňované a definované tři základní typy (poklesy napětí, přerušování napětí a zvýšení napětí), podle délky trvání lze události na napětí rozčlenit na události *přechodné* neboli *transientní* (prakticky se nejedná o události na napětí ale o rychlé změny napětí [1]) – s délkou trvání kratší než 10ms⁴, *krátkodobé* – s délkou trvání v rozmezí 10ms až 1 minuta (případně 3 minuty), a události *dlouhodobé* – s délkou trvání delší než 1 minuta (3 minuty). Pro účely této práce byla do třídění událostí podle délek trvání zaimplementována ještě kategorie *dočasných* událostí, pro které byl stanoven interval délek trvání v rozmezí 1 minuta (3 minuty) až 1 hodina. Kategorie dlouhodobých událostí se tak posouvá do intervalu délek trvání větších než 1 hodina. Zavedené členění událostí na napětí podle obou třídících hledisek přehledně dokumentuje obrázek Obr. 3.

⁴ Hodnota 10ms úzce souvisí s měřením události na napětí na základě detekční metody označované zkratkou RMS (1/2) (Root Mean Square), jejímž základním charakteristickým znakem je výpočet efektivních hodnot napětí v přesně definovaných časových intervalech. Délka časového intervalu (tzv. měřicí okno) je jedna perioda základní frekvence měřeného napětíového signálu (v sítích s frekvencí 50Hz je měřicí okno dlouhé přesně 20ms), a perioda opakování značící fázový posun následujícího vyhodnocovacího intervalu je nastavena na hodnotu poloviny periody základní frekvence měřeného napětíového signálu (v sítích 50Hz tedy 10ms). RMS (1/2) algoritmus s výše popsaným nastavením je schopen detekovat události s délkami trvání většími nebo rovnými hodnotě právě 10ms.

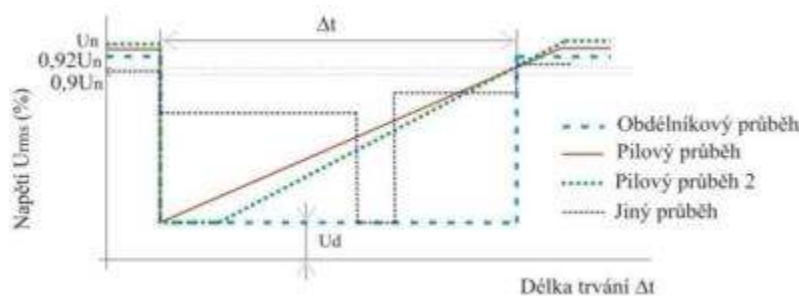
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 3 Schematické rozdělení událostí na napětí

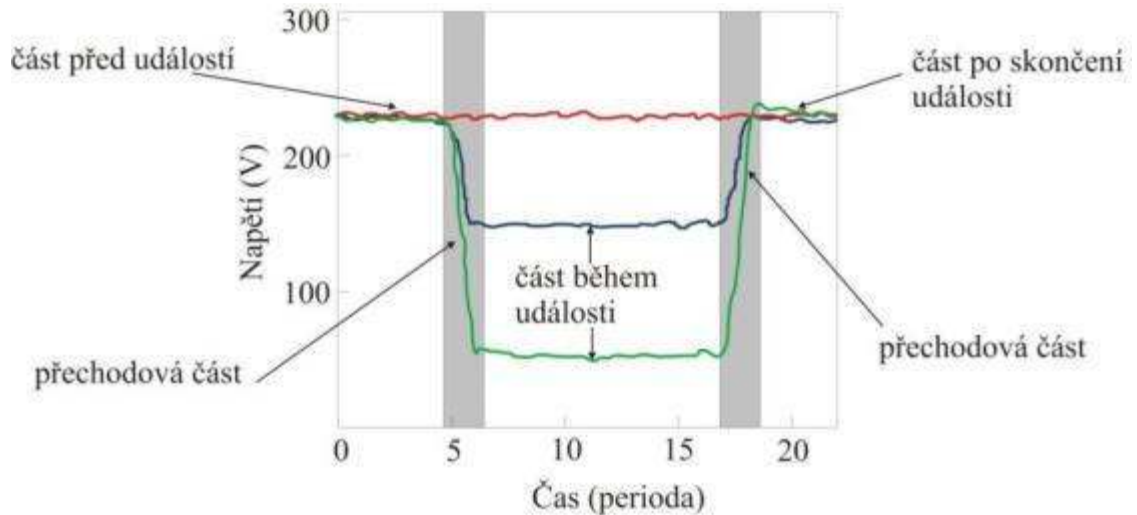
V posledních letech se vědci a odborníci začínají velmi intenzivně zabývat myšlenkou přesnějšího popisu v elektrické napájecí síti vyskytujících se poklesů a přerušení napětí (obecně všech událostí na napětí). Na prestižních zahraničních konferencích a v zahraniční literatuře (např. [10][11][12][13]) již byly publikovány první návrhy na zavedení většího počtu popisných parametrů událostí na napětí, které by přispěly k detailnější identifikaci dané události a na jejichž základě by také následně mohly být přesněji posuzovány i případné negativní účinky dané události na připojená elektrická zařízení a elektrické spotřebiče (více v kapitole 2.2 Odolnost zařízení vůči událostem na napětí).

Důkaz, že popis napěťových událostí prostřednictvím pouze dvou základních popisných parametrů (zbytkové napětí a délka trvání události) není dostačující pro jejich jednoznačnou identifikaci, vyplývá např. z obrázku Obr. 4, kde jsou zakresleny čtyři různé poklesy napětí. Různorodost zakreslených poklesů napětí nespočívá pouze v odlišném tvaru poklesů, při podrobnějším pohledu na jednotlivé poklesy jsou patrné také různé hodnoty napětí před vznikem respektive po skončení poklesů (přičemž napětí před vznikem a po skončení daného poklesu napětí je, až na pokles označený názvem *jiný průběh*, totožné). I když tedy není pochyb o tom, že poklesy napětí na Obr. 4 se na první pohled vzájemně liší, v případě použití dvouparametrového popisu jsou všechny čtyři poklesy chybně indikovány jako identické se striktně obdélníkovým průběhem (světle modrý průběh) a informace o hodnotě napětí před počátkem a po skončení poklesu většinou nejsou k dispozici. Navíc fázový úhel vzniku poklesu a případný fázový posuv napětí vzniklý během poklesu nejsou ze standardního dvouparametrového popisu událostí vůbec zřetelné.



Obr. 4 Průběhy vybraných událostí na napětí. Délka trvání části charakterizované ustálenou hodnotou zbytkového napětí u průběhu „Pila 2“ je 10ms.

K odstranění výše zmíněných nedostatků při potřebě přesně analyzovat poklesy napětí (potažmo všechny události na napětí) směřuje metoda *segmentace poklesu napětí* prezentována v [10]. Autoři zde navrhnou rozdělit pokles napětí z hlediska časové osy na několik fází (segmentů), pro něž je typický určitý průběh napětí. Metoda segmentace poklesu je znázorněna na obrázku Obr. 5.



Obr. 5 Typický pokles napětí v 3f soustavě, s naznačením jednotlivých částí poklesu [10]

Metoda segmentace poklesu napětí je zde (Obr. 5) ilustrována na příkladu trojfázové sítě, v níž nastal nesouměrný pokles napětí, který se projevil pouze ve dvou fázích (napětí třetí fáze zůstalo v povolených mezích blízkých jmenovité hodnotě). Pokles napětí je v časové ose rozdělen na následujících 5 částí:

- Část před vznikem poklesu (pre-event segment) – charakteristickým znakem je souměrné trojfázové napětí, kdy velikost napětí všech fází se pohybuje v povoleném intervalu kolem jmenovité hodnoty napětí.
- První přechodová část (the first transition segment) – efektivní hodnota napětí postižených fází poměrně prudce klesá z původní hodnoty napětí typické pro předcházející část (část před vznikem poklesu) a již se začíná projevovat nesymetrie poklesu. Taktéž se zde projeví případný fázový posuv napětí. V případě poklesu napětí vyvolaného zkratovou poruchou tato část indikuje okamžik vzniku poruchy.
- Část během poklesu (during-event segment) – ve většině případů se projevuje nesouměrnou hodnotou napětí jednotlivých fází, z nichž napětí v minimálně jedné fázi je nižší než prahová hodnota vzniku poklesu napětí. Průběh napětí v této části udává tvar poklesu – může být obdélníkový, pilový, ale i jiný (viz např. Obr. 4)
- Druhá přechodová část (the second transition segment) – efektivní hodnota napětí postižených fází se poměrně prudce navrácí zpět do oblasti povolené tolerance napětí a napětí všech tří fází jsou více-méně symetrická. V případě poklesu napětí vyvolaného zkratovou poruchou tato část indikuje konec poruchy a související obnovení napětí.
- Část po skončení poklesu (voltage recovery segment) – též nazývaná část obnoveného napětí, ve které jsou napětí jednotlivých fází symetrická a leží v povoleném intervalu kolem jmenovité hodnoty napětí.

Metodu segmentace poklesu napětí lze aplikovat téměř na všechny typy událostí na napětí. Počet užitých segmentů však není konstantní pro celé spektrum možných událostí, ale

bude se lišit podle typu analyzované události. Například existují poklesy napětí s pouze jednou přechodovou částí nebo naopak s více než dvěma přechodovými částmi a tomu odpovídajícímu počtu „during-event“ částí.

Každému segmentu poklesu napětí z předcházejícího dělení lze přiřadit charakteristické parametry napětí a jejich změny, které jsou typické vždy pro daný segment poklesu. Například dle [10] je možné každý pokles napětí rozdělit minimálně na pět částí, v souladu s obrázkem Obr. 5 (přičemž počet částí závisí na skutečném tvaru vzniklého poklesu). Pak parametry poklesu napětí včetně jejich stručného popisu udává tabulka Tab. 2.

Tab. 2 Výčet parametrů poklesů napětí dle [10]

Charakteristický parametr poklesu	Popis
Část před vznikem poklesu napětí (pre-event segment)	
Charakteristiky	Aktuální případně očekávaná rms hodnota napětí, fázový úhel napětí, harmonická napětí a další deformace křivky napětí, nesymetrie napětí (fázový posuv, amplituda), kolísání frekvence.
Část během poklesu napětí (during-event segment)	
Zbytkové napětí	Kvantifikuje snížení hodnoty napětí pod úroveň prahové hodnoty definující vznik poklesu napětí, obvykle vyjádřené efektivní hodnotou napětí (rms) vypočtenou ze změřených okamžitých hodnot napětí každé postižené fáze měřeného systému.
Délka trvání	Doba, po kterou je detekováno snížené napětí s hodnotou pod úrovní prahové hodnoty vzniku resp. konce poklesu, a to nejméně v jedné fázi vícefázového systému.
Průběh poklesu	Poklesy s konstantní úrovní napětí během celé délky trvání jsou označovány jako obdélníkové poklesy napětí; zatímco pro neobdélníkové poklesy napětí je typická proměnlivá efektivní hodnota napětí.
Nesymetrie napětí	U vícefázových poklesů napětí je efektivní hodnota napětí jednotlivých fází většinou různá.
Fázový posuv napětí	Změna efektivní hodnoty napětí je často asociována se změnou odpovídajících fázových úhlů napětí. U vícefázových poklesů, fáze s různými velikostmi napětí mají typicky odlišné velikosti fázových posuvů
Nesouměrnost fází napětí (dip phase angle unbalance)	U vícefázových poklesů napětí s různými efektivními hodnotami napětí a různými fázovými posuvy v jednotlivých fázích se také vyskytuje nesymetrie fázových úhlů napětí.
Deformace křivky napětí	Poklesy napětí způsobené nabíjením transformátorů (transformer energising) jsou doprovázeny vysokým stupněm harmonického rušení, zatímco některé poklesy mají vysokofrekvenční přechodné jevy implementované na základní složku okamžitého napětí během poklesu
Přechodová část poklesu napětí (transition segment)	
Vznik poklesu	První přechodová část označuje okamžik vzniku poklesu (tj. přechod mezi částmi před vznikem poklesu a během jeho trvání) projevující se náhlým snížením napětí pod úroveň prahové hodnoty vzniku poklesu
Okamžik vzniku poklesu	Fázový úhel napětí odečtený z křivky okamžitých hodnot napětí před vznikem poklesu právě v okamžiku vzniku přechodu mezi částmi před vznikem poklesu a během jeho trvání.
Fázový posuv vzniku	Většina poklesů napětí vyvolaných zkratovými poruchami jsou

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

poklesu	asociovány se změnou fázových úhlů napětí. Proto náhlé snížení napětí na počátku poklesu bývá obvykle doprovázeno výraznou změnou (skokem) fázového úhlu napětí odpovídající fáze.
Vicestupňový počátek poklesu	Pro některé poklesy napětí není přechod mezi napětími před vznikem a během trvání poklesu tvořen jednoduchou skokovou změnou, ale může obsahovat více stupňů, což je typické především pro poklesy způsobené rozvíjejícími se zkratovými poruchami. Jednotlivé stupně mohou následovat v rozmezí až
Zánik poklesu	Poslední přechodová část je charakteristická náhlým zvýšením napětí. Je následována částí s obnovením napětí, během které může napětí stále dosahovat hodnot nižších než je prahová hodnota konce poklesu.
Okamžik skončení poklesu	Fázový úhel napětí, odečtený z křivky okamžitých hodnot napětí po skončení poklesu, právě v okamžiku zániku přechodu mezi částmi během trvání poklesu a po jeho skončení.
Fázový posuv skončení poklesu	Náhlé zvýšení napětí na konci poklesu bývá obvykle doprovázeno výraznou změnou (skokem) fázového úhlu napětí odpovídající fáze, která (ta změna) obvykle anulují všechny změny fázových úhlů v zasažených fázích, s výjimkou fázového posuvu napětí po skončení poklesu.
Vicestupňový zánik poklesu	Poklesy napětí vyvolané zkratovými poruchami mohou mít poslední přechodovou část (mezi částmi během trvání poklesu a po jeho skončení) složenou z více stupňů, což může být způsobeno rozdílným nastavením doby zotavení vypínačů v jednotlivých fázích systému či v různých částech distribuční soustavy.
Rychlost změny napětí	Přechod z jednoho ustáleného stavu do druhého ustáleného stavu (např. z části před vznikem poklesu do části během trvání poklesu) probíhá s určitou rychlostí. Odpovídající změna napětí korespondující s délkou přechodové části je označována jako rychlost změny.
Tlumené kmitání	Přechodové části mezi segmenty s ustálenými hodnotami napětí bývají často spojovány s tlumenými oscilacemi, jejichž frekvence kmitání a konstanta útlumu závisí na druhu zkratové poruchy, charakteristikách zatížení systému apod.
Část po skončení poklesu (post-event segment)	
Obnovení napětí	Napětí jednotlivých fází jsou obvykle symetrická a blízká nominálním hodnotám, nicméně mohou stále vykazovat tendenci k návratu do ustálených hodnot, tudíž stále mohou být pod hranicí prahové hodnoty konce poklesu.
„post-fault dip“ (Prolonged voltage recovery)	Po odstranění příčin vzniku poklesu následovaném postupným růstem efektivních hodnot napětí postižených fází může být ef. hodnota napětí stále pod prahovou úroveň konce poklesu. Tato část je nazývána jako po-poruchový pokles napětí.
Fázový posuv po skončení poklesu	Rozdíl mezi hodnotami fázových úhlů napětí ustálených stavů před vznikem a po skončení poklesu. Nastává při odpojení části sítě (s poruchou), neboť dochází ke změně impedance sítě
Vícenásobné poklesy napětí	Vícenásobné poklesy napětí se vznikají v rychlém sledu za sebou, v rozmezí od jedné sekundy do asi 1 minuty. Jako příklad lze uvést poklesy napětí vznikající během bouřky nebo poklesy způsobené funkcí automatik opětného zapínání.
Kombinované poklesy	V případě vícefázových poklesů napětí mohou být poklesy v některých z postižených fází doprovázeny krátkodobými přerušováními napětí případně přepětími v ostatních fázích.

Zatímco autoři v [10] popisují segmentaci poklesů napětí pomocí výše uvedených pěti částí (část před započítáním poklesu, první přechodová část, část během poklesu, druhá přechodová část a část po skončení poklesu) a těmto pěti segmentům přiřazují parametry napětí, autoři v [11][12][13] kladou důraz na tři hlavní segmenty každého poklesu napětí (část před vznikem poklesu, část během poklesu a část po skončení poklesu) a pouze těmto třem hlavním segmentům přiřazují odpovídající charakteristické parametry napětí. Dle [11][12][13] jsou pro jednotlivé segmenty poklesu napětí typické především následující parametry napětí:

- Parametry napětí před započítáním rušení – zejména zde patří efektivní hodnota napětí a frekvence, přítomnost harmonických napětí a případná napěťová nesymetrie více-fázových napájecích systémů.
- Parametry napětí během rušení – zde náleží typ události na napětí (pokles napětí, přerušování napětí), průběh poklesu či přerušování (obdélníkový, pilový, jiný), zbytkové napětí, délka trvání, fázový úhel napětí při vzniku a ukončení poklesu, fázový posuv napětí během poklesu.
- Parametry napětí po skončení rušení – příkladem je fázový posuv, který může vzniknout po skončení poklesů způsobených zkratovými poruchami. Jedná se o rozdíl fázových úhlů před vznikem poklesu a po jeho skončení. Dalším parametrem je efektivní hodnota napětí po skončení poklesu.

Z výše uvedeného segmentování poklesů napětí vyplývá, že pro úplný a jednoznačný popis daného poklesu napětí včetně možnosti přesné identifikace příčin jeho vzniku je zapotřebí změřit velmi mnoho parametrů. Na druhou stranu lze však říci, že takto detailní popis každé události na napětí by byl velmi náročný, což se týče hardwarových požadavků samotného měřicího a zaznamenávacího systému, ale také v časové náročnosti následné analýzy každé zaznamenané události. Přínos detailního popisu každé události na napětí by tak byl vykoupěn enormními finančními investicemi do zaznamenávacího zařízení, což by mohlo mít za následek negativní dopad na zavedení tohoto systému do praxe.

Ať je pro segmentaci poklesů napětí využito tři hlavních segmentů jednoduchého poklesu [11][12][13] nebo všech pěti segmentů (tři hlavní segmenty plus dva segmenty přechodových částí) [10], mezi nejdůležitější parametry poklesu napětí, které by měly být u každého poklesu napětí zaznamenány, lze považovat, kromě obou základních parametrů poklesu (zbytkové napětí a délka trvání), také napětí před okamžikem vzniku poklesu a po jeho skončení, tvar poklesu napětí, fázový úhel okamžiku vzniku poklesu; v případě trojfázových poklesů napětí také případná nesymetrie napětí jednotlivých fází před vznikem, během trvání a po skončení poklesu napětí.

2.1.3 Vznik a šíření poklesů napětí v el. sítích

Poklesy napětí, krátkodobá přerušování napětí a potažmo všechny události na napětí vznikají jako doprovodný jev během různých spínacích a manipulačních operací v elektrické síti, nebo při poruchových stavech vyvolaných buďto atmosférickými jevy či jinými provozními příčinami. Příčina vzniku poklesu napětí pak danému poklesu udává jeho charakteristické parametry, zejména pak jeho tvar a délku trvání, neboť druhý hlavní popisný parametr poklesu (zbytkové napětí) se mění s elektrickou vzdáleností od místa poruchy. Co se týče poklesů napětí, jejichž iniciátorem jsou zkratové poruchy v elektrické síti, tak pro tyto je charakteristickým obdélníkový průběh poklesu s velmi krátkou dobou trvání obou přechodových segmentů (sestupné a náběžné hrany). Během trvání poklesu obvykle nedochází k významnějším změnám napětí a toto se drží v podstatě na konstantní hodnotě. Naproti tomu poklesy napětí způsobené spínáním velkých zátěží především indukčního charakteru mají tvar podobný pilo-

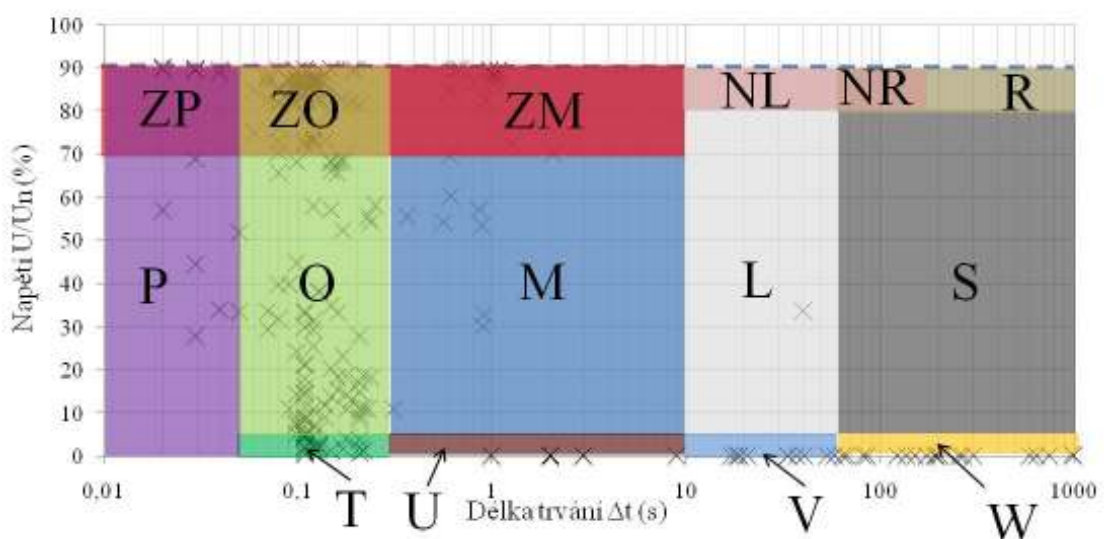
vému průběhu, kdy napětí nejprve vlivem velkého proudového rázu při připojení zátěže prudce klesne na svou minimální hodnotu během celého poklesu (označována jako zbytkové napětí), a následně pozvolna roste až do okamžiku skončení poklesu. Rozdíl mezi oběma uvedenými tvary poklesu napětí jsou zobrazeny na obrázku Obr. 6.



Obr. 6 Rozdíly ve tvarech poklesů napětí

Mimo tvaru poklesu, který je tedy dán především příčinou vzniku poklesu, dalšími charakteristickými parametry jsou zbytkové napětí a délka trvání poklesu napětí. Zbytkové napětí poklesu závisí na elektrické vzdálenosti od místa vzniku poruchy, která pokles napětí v síti vyvolala, neboť nejhlubší pokles napětí je v místě vzniku poruchy a s rostoucí vzdáleností od tohoto místa se hloubka poklesu snižuje, tzn., že klesá závažnost poklesu napětí. Naproti tomu délka trvání poklesu je v případech, kdy je iniciátorem poklesu zkratová porucha, ovlivněna zejména zabezpečovacími a ochrannými prvky sítě, ve které se daná porucha vyskytla, neboť podstatnou roli zde hraje důležitost dané sítě. Pro představu třeba sítě s vysokými nároky na nepřetržitost dodávky elektrické energie (např. distribuční síť vvn), nebo síť zásobující elektrickou energií významné odběratele (zákazníky), u nichž dlouhodobý výpadek napájení způsobí vysoké ekonomické ztráty, případně ohrozí zdraví zaměstnanců, jsou vybaveny automaticky opětného zapínání OZ, které se aktivují po nezbytném prvotním odpojení vedení postiženého poruchou a otestují tak, zdali nedošlo k samovolnému odstranění příčiny dané poruchy. Pakliže porucha přetrvává, je postižené vedení opět odpojeno, následně se provede lokalizace poruchy a nepostižené úseky vedení se opět připojí k napájení. Bez napájení tak zůstane pouze nezbytná část vedení, což způsobí dlouhodobý výpadek u minimálního počtu odběratelů.

V souladu s výše uvedeným lze na základě hlavních popisných parametrů poklesu napětí (zbytkové napětí, délka trvání) vytvořit tzv. zóny původu vzniku událostí na napětí, jež jsou zobrazeny na obrázku Obr. 7.



Obr. 7 Zóny původu vzniku poklesů a přerušení napětí

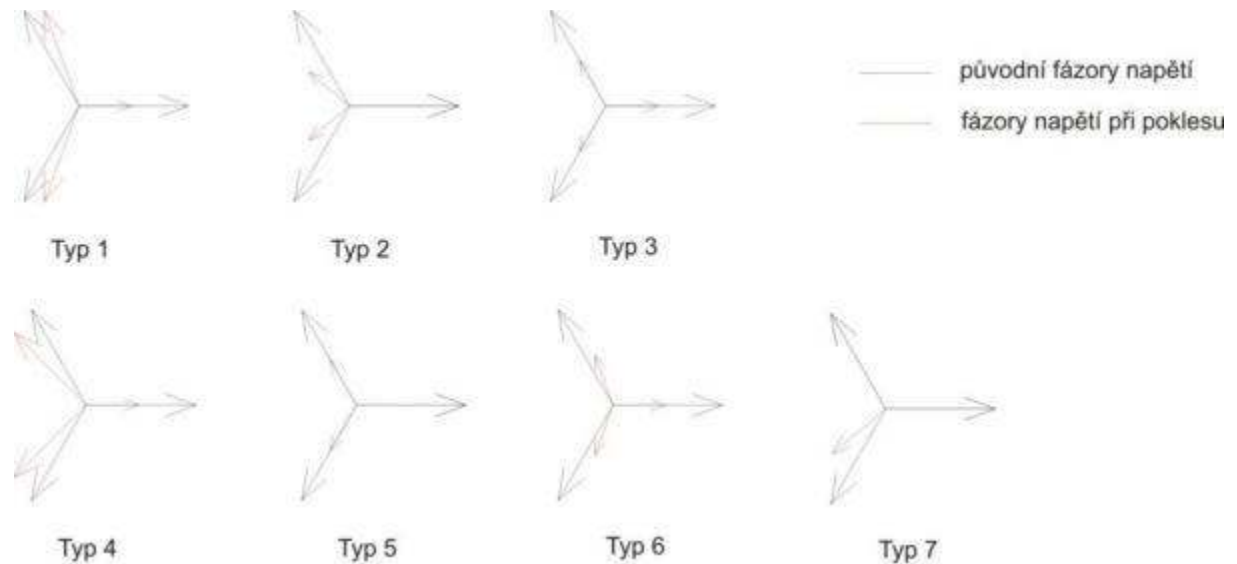
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

Z obrázku Obr. 7 je patrné, že celá oblast zahrnující všechny možné kombinace parametrů zbytkového napětí a délky trvání události byla rozdělena na několik zón (jež se více či méně překrývají), na jejichž základě lze poměrně přesně určit možnou příčinu vzniku dané události. Popis jednotlivých oblastí z obrázku Obr. 7 udává tabulka Tab. 3.

Tab. 3 Definice příčin vzniku poklesů a přerušení napětí v elektrických sítích

Oblast	Příčina poklesu/přerušení napětí
V	Přerušení napětí v místě za poruchou z pohledu od zdroje, v sítích s dlouhou časovou prodlevou automatik OZ
W	Přerušení napětí v místě za poruchou z pohledu od zdroje v sítích napájejících méně důležité odběratele, kdy provozní manipulace probíhají ručním přepojením
Z	Oblast poklesů obvykle vzniklých spínáním zátěží velkých výkonů
N	Poklesy napětí vzniklé obvykle jednofázovým zatížením trojfázové soustavy v důsledku velké impedance zpětné cesty
R	Poklesy jsou obvykle důsledkem nedostatečného dimenzování v síti či nevhodným nastavením regulátorů napětí
O	Poklesy napětí v místě mezi zdrojem a poruchou; souvisící s vypínáním poruch v sítích s krátkým zpožděním automatiky opětného zapínání
P	Poklesy napětí v místě před poruchou z pohledu od zdroje, tzn. v místě mezi zdrojem a poruchou
M	Stejně jako O, avšak v sítích se středně dlouhou dobou zpoždění opětného zapnutí OZ
L	Stejně jako O, ale v sítích s dlouhým zpožděním OZ
T	Přerušení napětí v místech za zkratovou poruchou z pohledu od zdroje; souvisící s vypínáním poruch v sítích s velmi krátkou dobou zpoždění automatik OZ
U	Stejně jako T, v sítích se středně dlouhým zpožděním automatik OZ
ZP	Kombinace příčin Z a P
ZO	Kombinace příčin Z a O
NR	Kombinace příčin N a R
ZM	Kombinace příčin Z a M
NL	Kombinace příčin N a L
S	Ostatní (speciální) příčiny poklesů

Poklesy napětí, případně přerušení napětí, se v elektrických sítích mohou vyskytovat v libovolném počtu fází dané sítě. Většina elektrických sítí v ČR bývá provozována jako trojfázová symetrická, tedy ve všech třech fázích by v ideálním případě mělo být napětí stejné velikosti, přičemž fázový posuv dvou po sobě jdoucích fází by měl být právě 120° . Vlivem extrémního rozmachu jednofázových elektrických spotřebičů však v elektrické síti vzniká nesymetrie napětí, což může mít za následek mimo jiné také to, že trojfázová symetrická porucha (zkrat) vyvolá v síti nesouměrnou napětíovou událost, například trojfázový pokles napětí s nestejnou velikostí zbytkového napětí jednotlivých fází (nebo jiné nesymetrické poklesy – dvoufázový, jednofázový pokles), které samozřejmě vznikají také zásluhou nesymetrických zkratových poruch vyskytujících se v elektrické síti. Symetrické poklesy a všechny typy nesymetrických poklesů napětí lze vyjádřit v trojpólovém zobrazení, jež demonstruje obrázek Obr. 8.



Obr. 8 Typy poklesů napětí podle počtu poklesem postižených fází [14][15][16]

Za předpokladu, že napájecí soustava byla před poruchou symetrická, lze podle velikosti napětí jednotlivých fází a jejich fázových posuvů určit příčinu vzniku daného poklesu. Z obrázku Obr. 8 lze identifikovat následující typy poruch [14][16]:

- **Typ 1:** (Typ 4) po odstranění nulové složky zkratu nebo transformace zkratu (Typ 2) přes transformátor v zapojení Dy
- **Typ 2:** dvoufázová porucha (zkrat mezi dvěma fázemi)
- **Typ 3:** trojfázová porucha (symetrický zkrat)
- **Typ 4:** jednofázová porucha
- **Typ 5:** dvoufázová zemní porucha
- **Typ 6:** dvoufázová zemní porucha (Typ 5) po transformaci přes transformátor v Dy zapojení
- **Typ 7:** dvoufázová zemní porucha (Typ 5) po druhé transformaci přes transformátor v Dy zapojení

2.1.4 Účinky poklesů napětí a kr. přerušení na připojená el. zařízení

Elektrický napájecí systém na jedné straně a elektrické spotřebiče na straně druhé vytváří dohromady jeden celek, který je znám pod pojmem elektrizační soustava. Mezi elektrickou sítí a spotřebiči tak existuje vzájemná vazba, jejíž platnost je nutnou podmínkou pro udržení funkce elektrizační soustavy. Provoz el. soustavy se řídí zákonem zachování energie (ZZE), který, zjednodušeně řečeno, říká, že energii nelze vyrobit ani zničit, ale pouze přeměnit v jiný druh energie. Podle ZZE tedy platí, že množství vyrobené elektrické energie v elektrárnách se v každém okamžiku musí rovnat množství spotřebované elektrické energie, což znamená, že pro zachování provozu schopné elektrizační soustavy jsou nutnou součástí systému jak elektrické zdroje, tak elektrické spotřebiče.

Elektrické spotřebiče považují elektrickou napájecí síť za jakousi zásobárnu energie, ze které si odebírají poměrnou část energie potřebnou pro korektní funkci daného spotřebiče. Přitom energetická kapacita sítě přímo závisí na aktuální velikosti napětí v dané síti. Pokles napětí či případné přerušení napětí tak vede k dočasnému snížení či úplnému zastavení toku energie ze sítě do spotřebiče, což může mít za následek negativní ovlivnění činnosti připojeného spotřebiče. Obecně lze říci, že žádné elektrické zařízení není trvale schopno vykonávat svou určenou funkci bez připojeného elektrického napájení. To, zda daný spotřebič bez újmy „přestojí“ vzniklý pokles či přerušení napětí, je dáno mírou odolnosti spotřebiče vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí, která záleží na mnoha faktorech, mezi něž patří též vnitřní konstrukce a topologie elektrického spotřebiče. Při uvažování složitějšího výrobního zařízení je pak jeho celková odolnost dána odolností jeho dílčích komponent, přičemž velký důraz bude kladen především na dodržení pokud možno stejné úrovně odolnosti jednotlivých komponent (velké rozdíly v odolnostech dílčích komponent způsobí, že odolnost výrobního zařízení jako celku bude dána odolností nejméně odolné komponenty). V praxi to znamená, že použitím nevhodných zařízení ve složitějším výrobním systému enormně roste riziko poruch celé výrobní linky, což bývá mimo jiné spojeno s velkou časovou náročností na uvedení výrobní linky opět do provozuschopného stavu. S délkou odstávky výrobního zařízení pak souvisí samozřejmě také velikost finančních ztrát. Detailněji bude tato problematika rozebrána v kapitole 2.2 Odolnost zařízení vůči událostem na napětí; nyní bude uveden pouze výčet poklesy napětí nejvíce ohrožených zařízení včetně krátké specifikace změn jejich funkce během výskytu poklesů a krátkodobých přerušení napětí.

Jak již bylo uvedeno, žádné elektrické zařízení není schopno trvale vykonávat svoji činnost bez elektrického napájení. Mezi širokým spektrem možných elektrických zařízení lze však najít ta zařízení, jejichž výpadek funkce má mnohem závažnější následky, ať už z hlediska vzniklých ekonomických ztrát, nebo z hlediska ohrožení bezpečnosti obyvatel, než výpadky funkce jiných běžně používaných zařízení. Ke skupině nejvíce citlivých zařízení patří zejména výrobní linky v papírnách, tiskárnách, ocelárnách, osvětlovací a bezpečnostní systémy na letištích, v nemocnicích, v elektrárnách, výpočetní technika (na jejíž spolehlivosti je závislý celý bankovní sektor, telekomunikace, apod.). [17]

Asynchronní motory

Asynchronní (indukční) motory jsou točivé elektrické stroje, které přeměňují elektrickou energii odebíranou z elektrické napájecí sítě na energii mechanickou, která je prostřednictvím hřídele (rotoru) stroje přenášena na poháněnou mechanickou zátěž. Točivé části stroje společně s poháněnou zátěží v sobě ukrývají poměrně velkou hmotu, která představuje ideální prostor pro akumulaci mechanické energie. Rotor motoru spojený s poháněnou zátěží tak ve skutečnosti tvoří tzv. setrvačnick, z něhož je zátěží odebírána energie v okamžicích, kdy motor pracuje s nižšími než nominálními parametry napájecího napětí. Díky setrvačnickým hmotám se asynchronní motor dokáže velmi snadno vyrovnat nejen s kolísajícím napětím kolem jmenovité hodnoty, ale také s velmi krátkými a hloubkou nepříliš významnými poklesy napětí, přičemž výstupní moment na hřídeli stroje zůstává takřka konstantní a poháněná zátěž tyto změny napájecího napětí není schopna zaznamenat. Déletrvajícím poklesy napětí s většími hloubkami poklesu již způsobují snížení točivého momentu stroje a zároveň snížení rychlosti otáčení rotoru, což je doprovázeno zvýšenou hodnotou proudu odebíraného z elektrické sítě. Obecně se má za to, že poklesy napětí s hloubkou méně než 30% se neprojeví na činnosti motoru; poklesy s hloubkou větší než 30% už mají negativní vliv na chod motoru. Po skončení poklesu napětí navíc dochází k tzv. restartování motoru (motor má na vstupních svorkách opět jmenovité napětí a snaží se opět roztočit na jmenovité otáčky), což je doprovázeno opětným proudovým rázem, který může v napájecí síti vyvolat další pokles napětí (podobně jako při zapnutí motoru z klidového stavu).

Synchronní motory

Synchronní motory nacházejí uplatnění v průmyslových aplikacích, které vyžadují v čase téměř konstantní rychlost otáčení hřídele motoru. Díky svému výkonu bývají napájeny ze sítě napěťové hladiny vn. Poklesy a krátkodobá přerušení napětí mohou vyvolat odběr zvýšeného proudu ze sítě, což může, v krajních případech, vést až ke ztrátě synchronismu. V takových případech je nezbytné motor zastavit a musí být provedeno jeho opětovné spuštění. Díky setrvačným hmotám na hřídeli motoru a možnosti přebuzení stroje jsou synchronní motory schopny překonat velmi krátké poklesy napětí s úrovní zbytkového napětí 80 až 75% jmenovitého napětí, avšak některé typy motorů jsou schopné odolat poklesům o zbytkovém napětí až 50%. Velkou pozornost je důležité věnovat rovněž budícím obvodům synchronních motorů, neboť vlivem poklesu napětí může dojít též ke ztrátě buzení motoru. [17][18]

Frekvenční měniče

Frekvenční měniče tvoří další skupinu na poklesy a krátkodobá přerušení napětí velmi citlivých zařízení. Jejich masivní rozvoj v posledních letech a zejména rostoucí výkony jednotek značně komplikují snahu o nalezení technicky proveditelných (a zároveň nepříliš finančně nákladných) opatření, jejichž účelem by bylo snížení negativního vlivu poklesů napětí na funkci samotného měniče. Frekvenční měnič je nutno považovat za složitější zařízení, které obsahuje větší počet dílčích komponent (usměrňovač, střídač, kontrolní obvody, řídicí obvody a mnoho dalších elektronických prvků), které ve spojení s napájeným asynchronním motorem tvoří dohromady jeden celek, u něhož případný pokles napětí v napájecí síti může vyvolat řadu problémů. Mezi typické příklady patří nedostatečná velikost napětí na výstupních svorkách měniče, omezení funkce kontrolních obvodů případně jejich celková nefunkčnost, vznik proudového rázu v okamžiku obnovení napětí na jeho původní velikost (po skončení poklesu), vznik proudového rázu a proudové nesymetrie během nesymetrického poklesu napětí (pokles pouze v jedné či dvou fázích třífázového systému) apod. Nejzávažnějším problémem se zdá být ovlivnění funkce kontrolních elementů, jejichž účelem je hlídat správný chod všech dílčích prvků měniče. Snížení napětí v elektrické síti vyvolá nižší napětí na výstupních svorkách měniče (a tedy na svorkách motoru), což se projeví nižším točivým momentem na hřídeli motoru, díky čemuž může dojít až k poruše či odstávce poháněného zařízení.

Relé, stykače a motorové spouštěče

Tento typ elektromechanických zařízení nalézá hojného využití při spínání silových i řídicích obvodů. Relé jsou s výhodou používány v řídicích obvodech jako logický prvek při spínání; stykače jakožto elektromagnetické spínače poskytují bezpečný a pohodlný způsob spínání silových obvodů; a motorové spouštěče jsou víceméně stykače vybavené navíc nadproudovou ochranou. Bez ohledu na způsob využití těchto spínacích prvků, největším problémem při výskytu poklesů napětí v elektrické síti je náhlé a nečekané rozepnutí/sepnutí (záleží na funkci a zvoleném typu kontaktů) jejich hlavních kontaktů, čímž dochází k nečekaným spínáním jimi ovládaných (většinou) silových obvodů. Pakliže dojde k nečekanému sepnutí/rozepnutí hlavních kontaktů stykače (relé, motorového spouštěče) vlivem poklesu či krátkodobého přerušení napětí, v ovládaném silovém obvodu se toto projeví jako dlouhodobé přerušení napětí, které trvá až do okamžiku znovuobnovení napětí na cívce stykače, jež bývá většinou nutné provést manuálně pomocí spouštěcího tlačítka. Důsledky nečekaných vybavení stykačů se liší od použité aplikace, vesměs ale dochází k neplánovaným odstávkám výrobních procesů a tím značným finančním ztrátám.

Výpočetní technika

Výpočetní technika zaznamenala v posledních dvou desetiletích tak dramatický progres, že dnes jsou počítače považovány za samozřejmou součást vybavení každé domácnosti a na-

cházejí hojného využití ve všech průmyslových odvětvích, kde zastávají funkci řídicích, ovládacích, kontrolních, zabezpečovacích a mnoha dalších členů daného výrobního procesu. Na bezchybné fungování počítače a všech jeho hardwarových doplňků je tak kladen enormní důraz, neboť každé jeho selhání zapříčiní neplánovaný výpadek počítačem řízeného procesu (zastavení výroby, nemožnost uskutečnění bankovních transakcí, selhání telekomunikační sítě, ztráta významných dat apod.) a bývá spojeno s časově velmi náročným procesem uvedení daného systému do původního provozuschopného stavu.

Každý počítač obsahuje spínaný zdroj, který přizpůsobuje (přeměňuje) vstupní střídavé napětí elektrické sítě na stejnosměrné napětí (3,3V, 5V, 12V) potřebné pro napájení všech periférií počítače. Spínaný zdroj se skládá z klasického dvoupulzního usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu, střídače, vysoko-frekvenčního transformátoru s feritovým jádrem a usměrňovače, na jehož výstup je připojen filtrační kondenzátor. Střídavé napětí z elektrické sítě (230V, 50Hz) je tak nejdříve usměrněno můstkovým usměrňovačem, kondenzátorem stejnosměrného meziobvodu je dc napětí vyfiltrováno, poté je spínacím obvodem převedeno opět na střídavé napětí, avšak o frekvenci 100 až 200kHz, následně malým feritovým transformátorem přetransformováno na napětí požadované velikosti, které je následně usměrněno a pomocí kvalitního vyhlazovacího kondenzátoru pak vyhlazeno. Velmi důležitou roli ve spínaném zdroji plní stejnosměrný meziobvod, který je v nejjednodušším případě zastoupen klasickým elektrolytickým kondenzátorem, jež zastává (mimo jiné) funkci zásobárny energie, a sice v okamžicích, kdy je v elektrické síti nižší napětí než na kondenzátoru. Čím větší je kapacita kondenzátoru v meziobvodu, tím delší dobu lze čerpat energii z kondenzátoru například během výskytu poklesu či přerušeni napětí. Spínané zdroje jsou typickým příkladem spotřebičů, pro které je hlavním charakteristickým znakem neharmonický průběh z elektrické sítě odebraného proudu a nízká hodnota skutečného účinníku odběru λ . Ten se u běžných spínaných zdrojů pohybuje kolem hodnoty 0,6. Pro zlepšení celkového účinníku odběru spínaných zdrojů a tím také snížení injekce vyšších harmonických proudů do elektrické sítě mívají modernější spínané zdroje ve stejnosměrném obvodu umístěný navíc ještě tzv. „*Power Factor Correction*“ (PFC) obvod, a sice v provedení aktivním či pasivním. Kromě zlepšení parametrů odebraného proudu přispívá PFC obvod také k větší odolnosti spínaného zdroje vůči různým druhům elektromagnetických rušení, mezi které mimo jiné patří i poklesy a krátkodobá přerušeni napětí.

Světelné zdroje

Světelné zdroje jsou elektrická zařízení, která slouží k přeměně elektrické energie na elektromagnetické záření o přesně daných vlnových délkách, které se člověku jako pozorovateli jeví ve formě viditelného světla. Běžně se za viditelné světlo považuje záření o vlnových délkách v rozsahu 350 až 750nm, což odpovídá frekvenčnímu rozsahu záření $8,57 \cdot 10^{14}$ až $4 \cdot 10^{14}$ Hz. Od roku 1879, kdy Thomas Alva Edison jako první vynalezl žárovku podobného vzhledu, jak ji známe v současnosti, dosáhl vývoj světelných zdrojů velkého rozmachu a bylo vyvinuto velké množství druhů světelných zdrojů lišících se jak v konstrukčním uspořádání, tak zejména v použitém principu vzniku světla (tepelné zdroje, výbojové zdroje, LED). Jednu vlastnost však mají všechny světelné zdroje stále zachovánu – pro svou funkci potřebují elektrickou energii v požadované kvalitě. Pokud v elektrické síti nastane pokles napětí, v závislosti na konstrukčním uspořádání a topologii světelného zdroje může dojít k viditelné změně vyzařovaného světelného toku, úplně ztratit funkce sv. zdroje, a sice krátkodobé nebo dlouhodobé, anebo se pokles napětí na vyzařovaném sv. toku nemusí vůbec projevit. Co se týče například klasické žárovky, v níž světelný tok vzniká díky rozžhavenému odporovému vláknu, tak velikost vyzařovaného světelného toku kopíruje změny velikosti napájecího napětí. Každá změna napětí tak vyvolá změnu světelného toku žárovky, avšak díky setrvačnosti wolframového vlákna a citlivosti lidského oka ne každá změna světelného toku je lidským okem pozoro-

rovatelná. U výbojových světelných zdrojů však může vlivem poklesu napětí dojít až k restartu světelného zdroje, přičemž obnovení jeho funkce u vysokotlakých výbojek obvykle následuje až po ochlazení světelného zdroje na teplotu přijatelnou pro opětovné zapálení výboje. Pokles napětí tak může vyvolat až několikaminutový výpadek osvětlení, což, pokud se jedná například o osvětlení výrobní haly, značně zvyšuje riziko ohrožení zdraví zaměstnanců a způsobí nemalé ekonomické ztráty v podobě prostojů, apod.

Jak již bylo uvedeno, všechny elektrické spotřebiče (bez ohledu na typ spotřebiče) potřebují pro vykonávání své určené činnosti elektrickou energii, která je jim distribuována prostřednictvím elektrické sítě. Při výskytu poklesu nebo přerušení napětí dojde k omezení přísunu energie ke spotřebiči, což má v dlouhodobějším časovém horizontu za následek omezení funkce či výpadek provozu daného spotřebiče. V této kapitole byly zmíněny pouze spotřebiče, které jsou na poklesy a krátkodobé přerušování napětí zvláště citlivé a jejichž omezení provozu s sebou přináší zvýšené riziko ohrožení zdraví obyvatel či velké ekonomické ztráty. Všeobecně lze ale říci, že co elektrický spotřebič, to poklesy napětí ohrožený „kus“.

2.1.5 Detekce poklesů a kr. přerušování napětí – známé detekční algoritmy

Z předchozího vyplývá, že poklesy napětí, krátkodobá přerušování napětí, ale i přepětí (souhrnně označovány jako „události na napětí“) jsou rušivé jevy, pro které je charakteristická především nemožnost jejich přesné predikce a též negativní vliv na všechny elektrická zařízení připojená do el. sítě v místě a okamžiku jejich výskytu. Přestože nelze učinit taková opatření, která by vedla k úplnému odstranění (potlačení) událostí na napětí z elektrického rozvodného systému, je zapotřebí výskyt těchto negativních jevů alespoň monitorovat a získat tak přehled o četnosti jejich výskytu v různých částech elektrizační soustavy. Z časových záznamů různých spínacích operací prováděných v el. síti případně zaznamenaných větrných smrští či jiných vlivů vyšší moci lze při důsledném monitoringu událostí poměrně velmi dobře zpětně identifikovat příčinu vzniklých napěťových událostí a, pakliže byla událost vyvolána v síti prováděnými manipulacemi, při dalších manipulačních procesech by bylo možné zvolit vhodnější postup, který by napěťovou událost buďto vůbec nevyvolal, případně vyvolal událost s méně škodlivými účinky pro připojená elektrická zařízení.

Poklesy a krátká přerušování napětí lze měřit jakýmkoliv přístrojem určeným pro analýzu parametrů kvality síťového napětí, který splňuje následující požadavky:

- Současné měření sdružených a fázových hodnot napětí, na napěťových vstupech 57, 100, 230 V ve všech fázích.
- Přesnost měření 2%.
- Schopnost záznamu informací v době trvání poklesu napětí.
- Možnost nastavení prahu záznamu na 10% pod jmenovitou hodnotu.
- Schopnost záznamu minimálního napětí při poklesu (půlperioda).
- Schopnost záznamu délky trvání poklesu od 1 půlperiody do 60 sekund (s ohledem na podmínky nastavování OZ se v sítích požaduje možnost záznamu trvání poklesu do 3 minut).
- Uchování naměřených údajů a nastavených parametrů při přerušování síťového napětí.

Měřiče poklesů a krátkých přerušování napětí obvykle pracují ve třech krocích. V prvním kroku je měřené síťové napětí upraveno a digitalizováno. Ve druhém kroku jsou v přesně definovaných intervalech vypočítávány efektivní hodnoty síťového napětí (standardizovaná me-

toda RMS (1/2) [9] bude detailně popsána v další části práce), načež jsou vypočtené ef. hodnoty napětí porovnávány s prahovou hodnotou vzniku poklesu napětí (jmenovité napětí zmenšené o dovolenou odchylku). Dojde-li k poklesu efektivní hodnoty napětí pod tuto prahovou hodnotu, považuje to měřič za počátek poklesu. Ve třetím kroku pak měřič indikuje konec poklesu jako okamžik, kdy vypočítaná efektivní hodnota napětí je vyšší než prahová hodnota konce poklesu. Následně se poklesu napětí přiřadí délka jeho trvání a jeho maximální hloubka (minimální napětí).

V souladu s výše uvedeným bývá k detekci událostí na napětí nejčastěji použiti buďto měřících analyzátorů kvality napětí, které mimo události na napětí zaznamenávají i ostatní kvalitativní parametry napětí (flikr, přítomnost harmonických, neharmonických napětí, nesymetrii napětí apod.), anebo záznamníků událostí na napětí, které, jak už z jejich názvu vyplývá, byly vyvinuty pouze pro záznam napěťových událostí. Oba typy přístrojů pro záznam událostí na napětí by však měly být srovnatelné, co se týče metodiky měření a vyhodnocování, a tedy i přesnosti zaznamenaných událostí. Jinými slovy, počet a parametry záznamníkem zaznamenaných událostí by měly být stejné jako počet a parametry událostí zaznamenaných měřícím analyzátozem. Shodnost dosažených výsledků obou přístrojů samozřejmě platí pouze za předpokladu, že oba typy přístrojů jsou připojeny ke stejnému bodu/uzlu elektrické sítě.

Standardizovaným detekčním algoritmem, na jehož základě pracují analyzátoři a monitory událostí na napětí, je algoritmus označovaný zkratkou „RMS (1/2)“ z anglického root mean square, který je založen na výpočtu efektivních hodnot napětí vstupního časově proměnného střídavého napěťového signálu. Velikost efektivní hodnoty napětí lze vypočítat dvěma způsoby, které se liší v závislosti na tom, zda vstupní napěťový signál je spojitý či diskrétního charakteru. Pro případ spojitýho vstupního signálu lze uplatnit následující vztah

$$U_{rms} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt \quad (V), \quad (3)$$

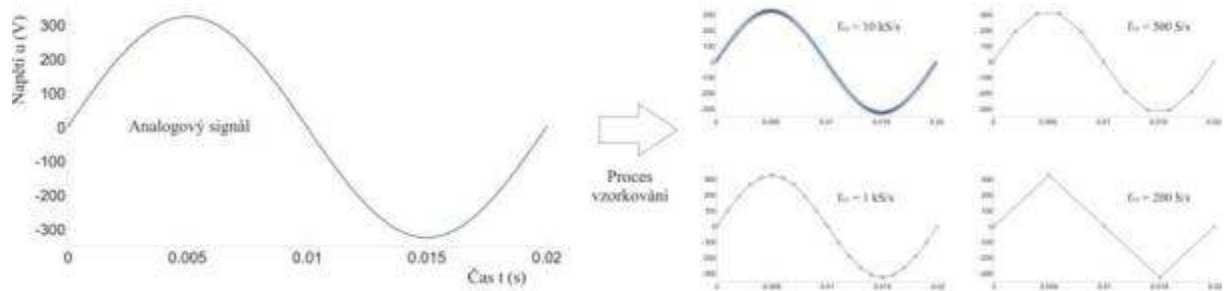
kde	U_{rms}	vypočtená efektivní hodnota napětí (V)
	T	perioda vstupního signálu napětí (s)
	$u(t)$	funkce popisující vstupní signál napětí
	t	čas (s)

Poměrně velkým problémem je však vyjádření funkce $u(t)$ popisující vstupní napěťový signál. Pro napětí je typickým sinusový průběh s frekvencí $f=50\text{Hz}$ a amplitudou $U_m=325,27\text{V}$, který se dá snadno vyjádřit jako

$$u(t) = U_m \cdot \sin \omega t, \quad (4)$$

kde veličina U_m značí právě amplitudu napětí. V elektrické napájecí síti se však ideálně sinusový průběh napětí prakticky nevyskytuje (naměřit jej lze snad jen přímo na výstupních svorkách alternátoru v elektrárně), neboť vlivem nelinearity prvků elektrické soustavy dochází k deformaci původně sinusového průběhu napětí harmonickými složkami vyšších řádů. Navíc úroveň harmonického zkreslení napětí není v čase konstantní a neustále kolísá, takže matematický popis takového signálu je takřka nemožný. Řešením je převést spojitý signál do diskrétní roviny (navzorkovat spojitý signál). Pro vzorkování je pak důležité vhodně zvolit vzorkovací frekvenci f_{vz} , která udává počet vzorků (samplů) vzorkovaného signálu za sekundu. Volba příliš nízké hodnoty vzorkovací frekvence má za následek chybnou interpretaci původního spojitýho signálu a tím také nesprávně vypočtené efektivní hodnoty napětí. Na druhou stranu, příliš vysoká hodnota vzorkovací frekvence výrazně omezuje riziko vzniku chybné interpretace při převodu spojitýho signálu do diskrétní oblasti, což je však vykoupeno

výrazně vyššími nároky algoritmu na paměť a rychlost procesoru. Vliv volby vzorkovací frekvence na převod spojitého signálu do diskrétní oblasti je vyjádřen na obrázku Obr. 9.



Obr. 9 Vliv volby vzorkovací frekvence na správnost interpretace spojitého signálu v diskrétní rovině

Na základě obrázku Obr. 9 lze konstatovat, že diskrétní signál s vhodně zvolenou vzorkovací frekvencí má prakticky stejnou vypovídající schopnost jako původní spojitý signál.

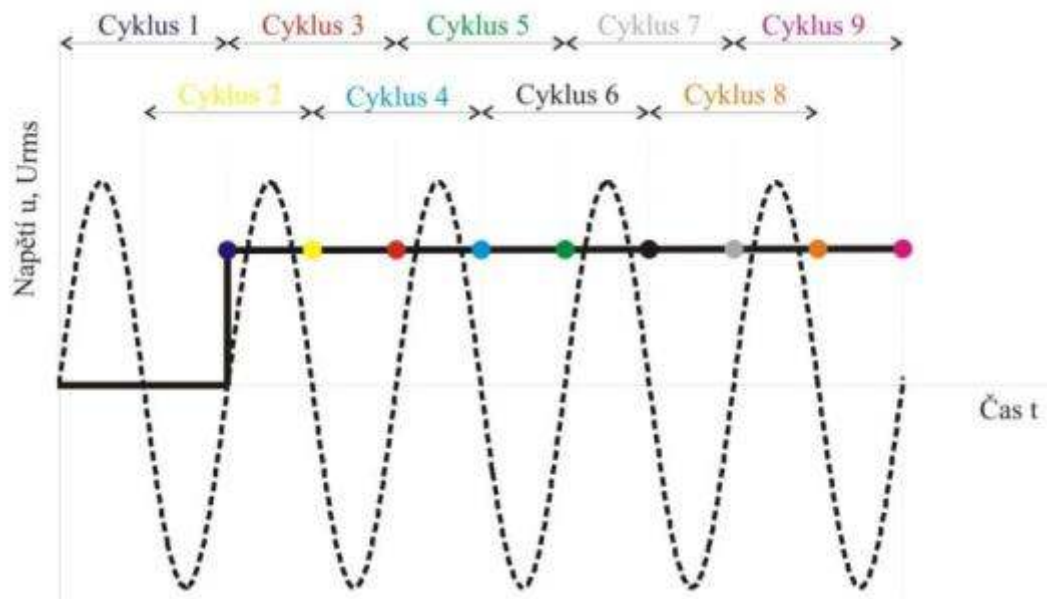
Výpočet efektivní hodnoty diskrétního signálu napětí se pak řídí vztahem

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (V; -, V) \quad (5)$$

V rovnici (5) vystupující veličiny mají následující význam:

- N počet vzorků v uvažovaném vyhodnocovacím intervalu
- u_i okamžitá hodnota napětí i -tého uvažovaného vzorku v daném vyhodnocovacím intervalu

Vlastní výpočet efektivní hodnoty je prováděn vždy v přesně stanovených intervalech, které jsou pro tyto účely dány délkou periody vstupního analyzovaného signálu. Vyhodnocovací interval, který někdy bývá označován též výrazem „délka okna“, tedy v případě analýzy napětí o v českých sítích užívané frekvenci 50Hz činí právě 20ms. Dalším důležitým parametrem algoritmu je perioda opakování výpočtu rms hodnot. Perioda opakování značí fázový posun počátku následujícího vyhodnocovacího intervalu, čímž je možno nastavit velikost překrytí jednotlivých intervalů. Je zřejmé, že větší překrytí vyhodnocovacích intervalů má za následek větší počet vypočtených efektivních hodnot, čímž na jednu stranu rostou nároky samotného výpočtu na paměť a rychlost měřicího přístroje, na druhou stranu však lze přesněji a rychleji detekovat případné změny napětí (například poklesy a kr. přerušování napětí). Perioda opakování výpočtu je zvolena jako polovina periody vstupního signálu, tedy pro české sítě rovných 10ms. Schematické znázornění procesu výpočtu efektivních hodnot napětí z diskrétního signálu napětí je uvedeno na obrázku Obr. 10.



Obr. 10 Schematické znázornění procesu výpočtu efektivních hodnot napětí z diskrétního vstupního signálu

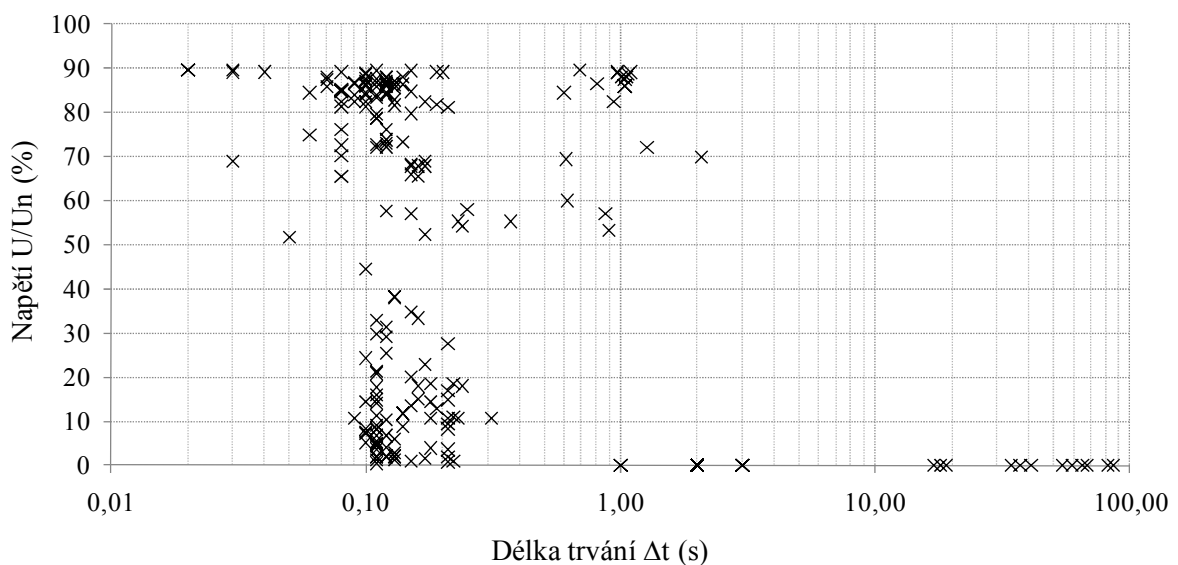
Z obrázku Obr. 10 je patrné, že při normami [6][9] definovaném nastavení parametru rms algoritmu (délka okna rovna 20ms, perioda obnovování rovna 10ms u sítí s frekvencí 50Hz) je první vypočtená efektivní hodnota k dispozici až po uplynutí jedné periody analyzovaného signálu (tedy 20ms), a každý další výpočet následuje vždy po 10ms (takto nastavený rms algoritmus bývá označován symbolem „RMS (1/2)“). Objektivně lze tedy říci, že, co se týče parametru „délka trvání“ události, rms algoritmus v obvyklém nastavení je schopen vyhodnocovat události na napětí pouze s přesností 10ms.

Dalšími algoritmy, které nejsou primárně určeny pro detekci událostí na napětí, ale přesto jich lze k tomuto účelu použít, jsou: Fourierova transformace (FT), Vlnková analýza, Kalmanův filtr, a mnoho dalších. Jejich podrobnější popis bude uveden v kapitole 5, jež má název: Algoritmy pro měření a detekci událostí na napětí.

Ať je do měřicího přístroje implementován kterýkoliv z uvedených detekčních algoritmů, detekce napětových událostí se odvíjí od výrobcem či uživatelem nastavené oblasti dovolené tolerance napětí, tzn. rozmezí, ve kterém se může efektivní hodnota napětí (rms) trvale pohybovat. Co se týče sítí napětové hladiny nn, je dovolená tolerance napětí stanovena na $U_n \pm 10\%$ [1][2][6][9]. Princip měření poklesů a krátkodobých přerušení napětí vyplývá z definic těchto událostí. Jakmile algoritmem vypočtená rms hodnota napětí překročí hranice dovoleného pásma ($90\% U_n$ až $110\% U_n$), aktivuje se proces záznamu události a začne se měřit čas události až do okamžiku, kdy se vypočtená rms hodnota napětí vrátí zpět do dovolené oblasti. Z důvodu možného kolísání napětí kolem hraniční hodnoty (čímž by docházelo k záznamu mnoha bezvýznamných událostí a tím i k předčasnému zaplnění paměti měřicího přístroje) byla stanovena hystereze 2%. Záznam události tedy trvá až do okamžiku, než rms hodnota napětí překročí hodnoty $U_n \pm 8\%$. Ke každé události (pokles napětí, přerušení napětí, zvýšení napětí) je zaznamenáván také průběh efektivních hodnot napětí, přičemž četnost zaznamenaných rms hodnot a tím také aktuálnost (vypovídací schopnost) zaznamenaného průběhu události vzhledem ke skutečnému průběhu je dána právě typem detekčního algoritmu. Následně je každé události přiřazena extrémní hodnota napětí dosažená v průběhu události (minimální hodnota napětí v případě poklesu a přerušení napětí; maximální hodnota napětí v případě zvýšení napětí) a též časový údaj znamenající délku trvání dané události. Popis za-

znamenanych napět'ových událostí pomocí uvedených dvou parametrů (délka trvání, extrémní hodnota napětí) v podstatě znamená, že každá zaznamenaná událost na napětí je deklarována jako událost obdélníkového průběhu. Během trvání události může efektivní hodnota napětí značně kolísat (např. pilový průběh poklesu napětí způsobený sepnutím velké zátěže indukativního charakteru), případně se může vyskytnout velmi krátká extrémní výchylka (špičková hodnota neboli peak), která má za následek, při současné metodice vyhodnocování událostí na napětí, velkou nepřesnost zaznamenaných parametrů události vzhledem ke skutečným parametrům vzniklé události. Událost s nastalým napět'ovým peakem je pak vyhodnocena jako obdélníková, přičemž deklarovaná hodnota zbytkového napětí během celé události je rovna extrémní hodnotě napět'ového peaku – viz Obr. 4.

Poklesy a krátkodobá přerušeni napětí jsou dle [1][2] kvalitativními parametry napětí, pro něž ale nejsou stanoveny žádné limitní meze či jiná omezení. Jejich význam je pouze informativní. Informace o jejich výskytu v elektrických napájecích sítích lze získat jejich dlouhodobým měřením a následným statistickým zpracováním naměřených dat. Znalost těchto dat je však velmi důležitá – pro různé typy sítí budou k dispozici údaje o parametrech nejčastěji se vyskytujících událostí, jež budou tvořit základ pro případné stanovení kompatibilních úrovní v dané síti. Zaznamenaná data o událostech se vyhodnocují podle úrovní obou hodnotících parametrů, přičemž výstupem je graf zaznamenaných událostí (každá událost je představována křížkem) – viz Obr. 11, který je možné převést do tabulky četností výskytů událostí.



Obr. 11 Grafické vyjádření zaznamenaných poklesů a přerušeni napětí v distribuční síti nn společnosti E.ON

Přesný standardizovaný systém třídění událostí na napětí není nikde definován (různé standardy používají rozdílné třídění událostí), proto se v různých publikacích uváděné tabulky četností liší, a to jak v členění událostí podle velikosti zbytkového napětí, tak v členění událostí podle délky jejich trvání. Navíc zde hraje důležitou roli správná interpretace poklesu a přerušeni napětí (viz rozpor mezi fyzikální definicí a obecně uznávanou definicí obou jevů popisovanou v kapitole 2.1.1 Definice). V souladu s [2] jsou tabulky četností separátně vytvořeny pro každý typ napět'ové události, jak ostatně dokazují tabulky Tab. 4, Tab. 5, Tab. 6.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

Tab. 4 Klasifikace poklesů a krátkodobých výpadků napětí v napájecích sítích nn [2]

Délka trvání t [s]	10ms	100ms	200ms	500ms	1s	3s	20s	1m
Zbytkové napětí [%]	$\leq t < 100\text{ms}$	$\leq t < 200\text{ms}$	$\leq t < 500\text{ms}$	$\leq t < 1\text{s}$	$\leq t < 3\text{s}$	$\leq t < 20\text{s}$	$\leq t < 1\text{m}$	$\leq t < 3\text{m}$
$85 \leq d < 90$	N ₁₁	N ₂₁	N ₃₁	N ₄₁	N ₅₁	N ₆₁	N ₇₁	N ₈₁
$70 \leq d < 85$	N ₁₂	N ₂₂	N ₃₂	N ₄₂	N ₅₂	N ₆₂	N ₇₂	N ₈₂
$40 \leq d < 70$	N ₁₃	N ₂₃	N ₃₃	N ₄₃	N ₅₃	N ₆₃	N ₇₃	N ₈₃
$5 \leq d < 40$	N ₁₄	N ₂₄	N ₃₄	N ₄₄	N ₅₄	N ₆₄	N ₇₄	N ₈₄
$d < 5$	N ₁₅	N ₂₅	N ₃₅	N ₄₅	N ₅₅	N ₆₅	N ₇₅	N ₈₅

Přestože 5% všech průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10minut se může pohybovat pod hranicí dovolené odchylky napětí $U_n-10\%$ [1], pro detekci poklesů napětí je směrodatná hranice napětí $U_n-10\%$. Pásmo dovolených hodnot napětí se tak překrývá s intervalem poklesů napětí 85 až 90% U_n , přesto se však doporučuje poklesy se zbytkovým napětím v rozsahu 85 až 90% U_n zaznamenávat, a sice vzhledem k pracovnímu rozsahu stykačů, relé apod. Řádek se zbytkovým napětím $< 5\%$ U_n je určen pro napěťové poklesy, při kterých pod 5% U_n kleslo napětí v jedné nebo dvou fázích a není tedy splněna podmínka pro vyhodnocení události jako přerušení napětí.

Tab. 5 Klasifikace přerušení napětí v napájecích sítích nn [2]

Délka trvání t [s]	$t < 1\text{s}$	$3\text{min} > t \geq 1\text{s}$	$t \geq 3\text{min}$
Počet přerušení	N ₁	N ₂	N ₃

Tab. 6 Klasifikace krátkodobých zvýšení napětí v napájecích sítích nn [2]

Délka trvání t [s]	10ms	100ms	200ms	500ms	1s	3s	20s	1m
Přepětí [%]	$\leq t < 100\text{ms}$	$\leq t < 200\text{ms}$	$\leq t < 500\text{ms}$	$\leq t < 1\text{s}$	$\leq t < 3\text{s}$	$\leq t < 20\text{s}$	$\leq t < 1\text{m}$	$\leq t < 3\text{m}$
$110 < d \leq 120$	N ₁₁	N ₂₁	N ₃₁	N ₄₁	N ₅₁	N ₆₁	N ₇₁	N ₈₁
$120 < d \leq 140$	N ₁₂	N ₂₂	N ₃₂	N ₄₂	N ₅₂	N ₆₂	N ₇₂	N ₈₂
$140 < d \leq 160$	N ₁₃	N ₂₃	N ₃₃	N ₄₃	N ₅₃	N ₆₃	N ₇₃	N ₈₃
$160 < d \leq 200$	N ₁₄	N ₂₄	N ₃₄	N ₄₄	N ₅₄	N ₆₄	N ₇₄	N ₈₄

V souladu s doporučeným tříděním událostí do jednotlivých tabulek lze skutečně změněná data z reálné sítě (viz Obr. 11) převést do tabulkové podoby následujícím způsobem – tabulka Tab. 7. (Data pochází z měření v distribuční síti nn společnosti E.ON).

Tab. 7 Tabulka četností výskytu poklesů napětí zaznamenaných v reálné síti za standardní vyhodnocovací období jednoho roku

Délka trvání t [s]	10ms	100ms	200ms	500ms	1s	3s	20s	1m
Zbytkové napětí [%]	$\leq t < 100\text{ms}$	$\leq t < 200\text{ms}$	$\leq t < 500\text{ms}$	$\leq t < 1\text{s}$	$\leq t < 3\text{s}$	$\leq t < 20\text{s}$	$\leq t < 1\text{m}$	$\leq t < 3\text{m}$
$85 \leq d < 90$	13	28	1	4	7	0	0	0
$70 \leq d < 85$	10	24	1	2	1	0	0	0
$40 \leq d < 70$	3	11	4	4	1	0	0	0
$5 \leq d < 40$	1	42	11	0	0	0	0	0
$d < 5$	0	19	4	0	34	6	5	8

Navzdory doporučení separovat tabulky četností na jednotlivé typy událostí je možné všechna data o událostech soustředit do jedné společné tabulky, např. Tab. 8.

Tab. 8 Klasifikace všech událostí na napětí zaznamenaných v napájecích sítích nn

Délka trvání t [s]	10ms	100ms	200ms	500ms	1s	3s	20s	1m
Zbytkové napětí [%]	$\leq t < 100\text{ms}$	$\leq t < 200\text{ms}$	$\leq t < 500\text{ms}$	$\leq t < 1\text{s}$	$\leq t < 3\text{s}$	$\leq t < 20\text{s}$	$\leq t < 1\text{m}$	$\leq t < 3\text{m}$
$160 < d \leq 200$	N_{11}	N_{21}	N_{31}	N_{41}	N_{51}	N_{61}	N_{71}	N_{81}
$140 < d \leq 160$	N_{12}	N_{22}	N_{32}	N_{42}	N_{52}	N_{62}	N_{72}	N_{82}
$120 < d \leq 140$	N_{13}	N_{23}	N_{33}	N_{43}	N_{53}	N_{63}	N_{73}	N_{83}
$110 < d \leq 120$	N_{14}	N_{24}	N_{34}	N_{44}	N_{54}	N_{64}	N_{74}	N_{84}
$85 \leq d < 90$	N_{15}	N_{25}	N_{35}	N_{45}	N_{55}	N_{65}	N_{75}	N_{85}
$70 \leq d < 85$	N_{16}	N_{26}	N_{36}	N_{46}	N_{56}	N_{66}	N_{76}	N_{86}
$40 \leq d < 70$	N_{17}	N_{27}	N_{37}	N_{47}	N_{57}	N_{67}	N_{77}	N_{87}
$5 \leq d < 40$	N_{18}	N_{28}	N_{38}	N_{48}	N_{58}	N_{68}	N_{78}	N_{88}
$d < 5$	N_{19}	N_{29}	N_{39}	N_{49}	N_{59}	N_{69}	N_{79}	N_{89}

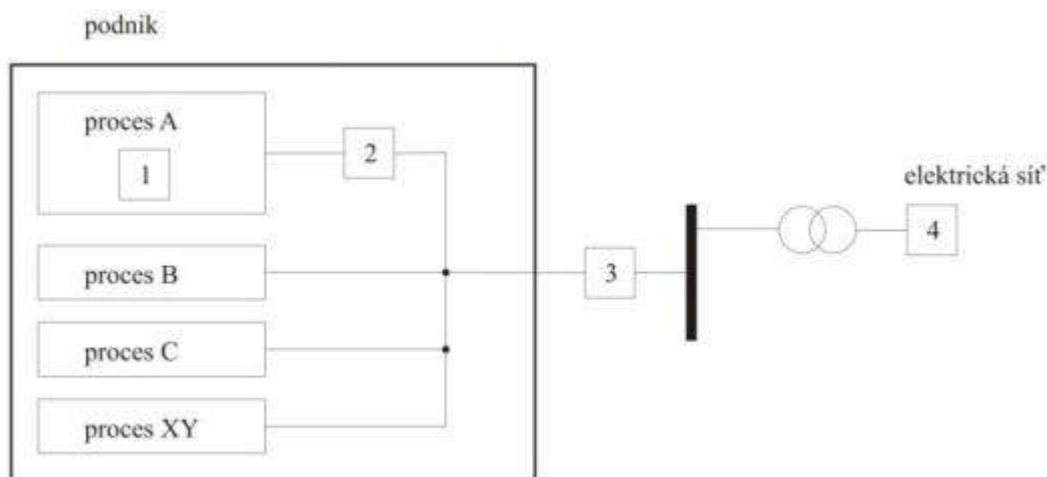
Skutečnost, že poklesy a krátkodobá přerušení napětí jsou dle [6] považována pouze za informativní parametr kvality napětí, se v praxi projevuje tím, že provozovatel sítě zatím nenesou žádnou odpovědnost za množství v síti vyskytnutých poklesů a přerušení napětí, a nemusí tak činit žádná nápravná opatření pro potlačení četnosti vzniklých událostí. Množství v síti vyskytnutých událostí závisí na parametrech těchto událostí, typu sítě, třídě prostředí apod.

2.1.6 Prostředky k potlačení negativních účinků poklesů napětí na el. zařízení

Díky masivnímu rozvoji výpočetní techniky a snaze automatizovat většinu procesů různých výrobních linek nezadržitelně roste počet zákazníků, které lze, z hlediska důrazu kladeného na kvalitu a nepřetržitost elektrického napájení, zařadit do skupiny nejvýznamnějších. Takoví zákazníci vyžadují nepřetržité napájení (a zpravidla si za tuto službu i připlácejí), protože každý neočekávaný pokles či výpadek napětí v síti může způsobit značné škody, a to jak na samotných výrobních linkách, tak na znehodnoceném právě zpracovávaném materiálu. Navíc znovuoobnovení výrobního procesu je spojeno s déletrvající odstávkou daného zařízení, což opět zvyšuje zákazníkovi způsobené ztráty. Jelikož poklesy a přerušení napětí vznikají jako následek zkratových poruch a nevhodných spínacích operací prováděných v el. síti, a je prakticky nereálné dopředu předpovědět jejich výskyt či jejich vzniku úplně zamezit, nabízejí se pouze dvě cesty, které vedou ke snížení negativního dopadu poklesů napětí na kvalitu napětí zvláště citlivých el. zařízení. První cesta spočívá ve zvýšení odolnosti samotných el. spotřebičů a zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí, což ovšem, vzhledem k velkému počtu druhů elektrických zařízení a jejich výrobců se jeví jako nerealizovatelný cíl. Zkonstruovat a vyrobit absolutně odolné zařízení nelze, žádná hranice minimální odolnosti el. zařízení vůči událostem na napětí nebyla dosud stanovena, a, z hlediska ekonomického, veškerá přídatná opatření vedoucí k alespoň částečnému zvýšení odolnosti spotřebičů se promítanou do jejich ceny, což při nevhodně zvolené minimální hranici odolnosti může činit daný el. spotřebič neprodejným.

Druhá cesta spočívá v provedení takových opatření, která povedou ke zlepšení napěťových poměrů v síti napájející citlivá el. zařízení. Z hlediska umístění možných opatření lze tato rozdělit do následujících čtyř skupin, jak dokresluje obrázek Obr. 12 [18][19][20].

- 1) Opatření uvnitř procesu – pro zvýšení odolnosti citlivého spotřebiče
- 2) Opatření pro chránění všech zařízení daného procesu
- 3) Opatření chránící celý podnik – umístěna na přívodním kabelu k danému podniku
- 4) Opatření provedená v napájecí síti



Obr. 12 Rozmístění možných opatření ke zmírnění účinků poklesů napětí na el. spotřebiče

To, jaký typ opatření z výše uvedeného dělení bude nejvhodnější variantou pro daný podnik, závisí na počtu a rozmístění na poklesy napětí citlivých zařízení. Pakliže daný podnik neobsahuje velké množství citlivých zařízení, případně jsou citlivá zařízení soustředěna do jednoho výrobního procesu (viz Obr. 12), lze zvolit buďto individuální opatření chránící pouze konkrétní zařízení (označena jako „1“), případně se nabízí volba společného chránění všech zařízení v daném procesu („2“). Bylo by velmi neekonomickým řešením chránění všech zařízení v podniku (volba „3“) nebo učinění opatření v celé elektrické síti (volba „4“). Naopak pokud daný podnik obsahuje velký počet citlivých zařízení, která jsou součástí mnoha výrobních procesů, je z ekonomického hlediska výhodnější zahrnout individuální opatření (možnosti „1“ a „2“) a zvolit opatření chránící zařízení celého podniku (volba „3“). Jednotlivé varianty provedených opatření jsou rozepsány níže.

Opatření provedená v napájecí síti

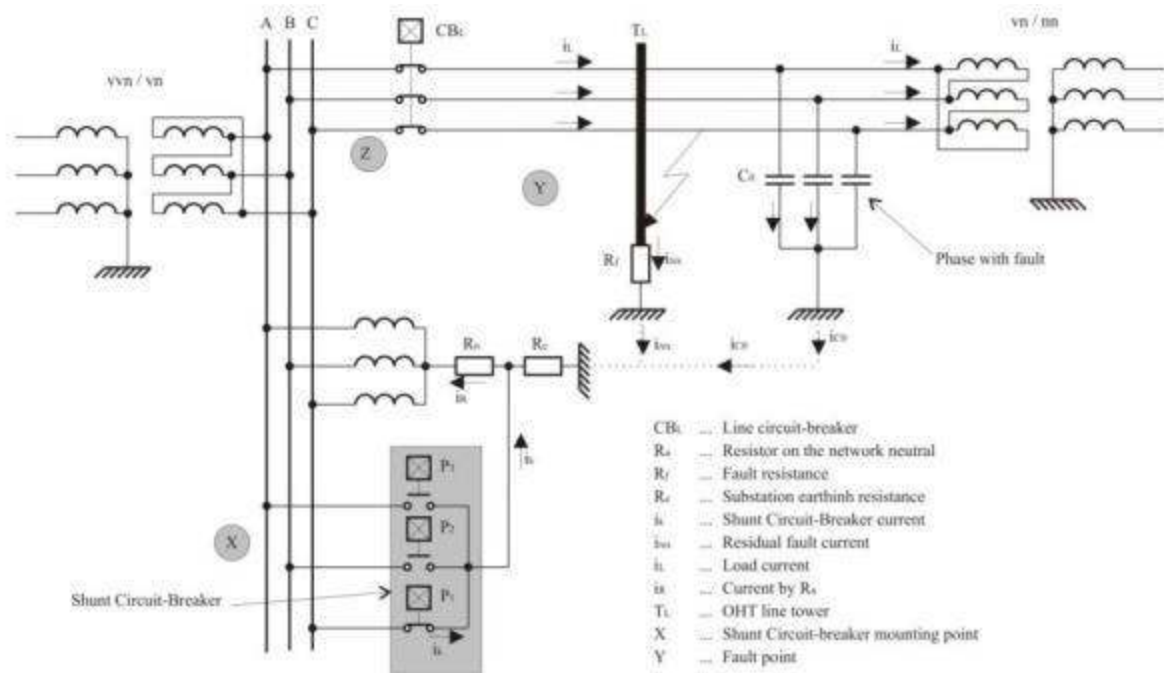
Napájecí síť poskytuje z hlediska provedení opatření vedoucích k chránění citlivých zařízení u koncových odběratelů velmi limitované možnosti. Provedená opatření spočívají v omezení počtu vzniklých poklesů a přerušení napětí, čehož je dosaženo buďto zvýšením preventivních opatření potlačujících vznik zkratových poruch nebo vylepšením operací vedoucích k odstranění již vzniklých zkratových poruch, případně efektivnějším řízením chodu napájecí sítě vedoucím ke zmenšení dopadu zkratových poruch na citlivá zařízení odběratelů. Obecně lze říci [17], že zatímco délku trvání poklesů a krátkodobých přerušení napětí je možné omezit zvýšením kapacity okružních vedení nebo kvalitnějším provedením jednotlivých prvků elektrické sítě a chránících zařízení (spolehlivost, selektivita, řízení), hloubku poklesů napětí lze omezit zvýšením zkratového výkonu napájecí sítě.

Většina poklesů napětí a krátkodobých přerušení napětí, které se projeví negativním ovlivněním funkce připojených zařízení, je způsobena zkratovými poruchami vzniklými v napájecí síti. Tyto poruchy nelze ze sítě úplně eliminovat, ale je možné alespoň omezit jejich počet. Je zřejmé, že omezení počtu zkratových poruch v napájecí síti vede ke snížení vli-

vu poklesů a krátkodobých přerušení napětí na elektrické spotřebiče. Omezení počtu vzniku zkratových poruch, jinými slovy zlepšení prevence proti zkratům, bude dosaženo následujícími řešeními [21]:

- kvalitnější provedení jednotlivých prvků elektrické sítě
- nahrazení nadzemních venkovních vedení kabelovými
- kvalitnější ukotvení stožárů
- použití izolovaných vodičů nadzemních vedení
- častější umístění bleskojistek
- čištění izolátorů
- chránění nadzemních vedení zemnicími lany
- důsledná prořezávka stromů a větví zasahujících do ochranného pásma vedení
- důslednější a častější kontroly jednotlivých prvků napájecí sítě, atd.

Jestliže už zkratová porucha vznikne, v první řadě je úkolem zabránit hoření elektrického oblouku a zamezit tak šíření zkratu a vzniku rozsáhlejších škod. Zabránění hoření elektrického oblouku lze dosáhnout jednak odpojením postiženého místa od přísunu elektrické energie anebo snížením napětí na oblouku pod úroveň minimálního napětí potřebného k udržení oblouku. Aby se zároveň snížil počet poklesů a krátkodobých přerušení napětí, je možné ve venkovních sítích vn s nepřímo uzemněným uzlem (přes rezistor) použít „vypínač automatiky přizemnění postižené fáze“ (z anglického ekvivalentu „shunt circuit-breaker“). V rozvodně 110/22kV v zapojení transformátorů Yn/d je na straně nižšího napětí uměle vytvořen uzel a tento je spojen se zemí přes rezistor, a každá fáze je navíc přes vypínač spojena s uzemněním celé rozvodny. Princip činnosti spočívá v tom, že v případě vzniku zemního spojení v síti vn dochází na nezbytně dlouhou dobu (delší než 0,1s) k aktivaci onoho vypínače a již v rozvodně vvn/vn dojde k řízení poruchy postižené fáze, čímž se sníží napětí postižené fáze pod hranici nutnou k udržení hoření oblouku a el. oblouk je ihned uhašen, aniž by došlo k přerušení napájení spotřebitelů. Po úspěšném uhašení oblouku elektrická síť pracuje normálním způsobem jako před vznikem poruchy. Pakliže nebyl oblouk úspěšně uhašen a porucha dál přetrvává, dochází k aktivaci standardních ochranných prvků. Blokované schéma celého procesu je zobrazeno na obrázku Obr. 13).



Obr. 13 Princip činnosti vypínače automaticky přizemnění postižené fáze v síti vn [22]

Dle autorů [22] dochází tímto způsobem k potlačení přibližně 90% všech dočasných zemních spojení, stejně jako v případě použití automatik opětivního zapínání OZ, avšak oproti sítím s OZ zde nedochází k odpojení zákazníků od napájení.

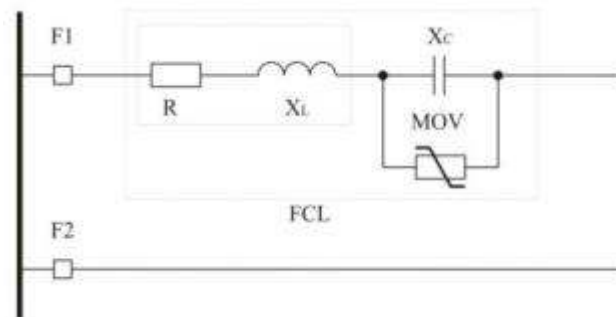
Dalším z možných řešení proveditelných na úrovni napájecí sítě je zkrácení doby potřebné pro vypnutí zkratu. Délka trvání poklesů napětí je primárně závislá na rychlosti vypnutí zkratu, přičemž důraz je kladen na vypnutí pouze postiženého úseku vedení a nikoli vypnutí celé linky. Vypnutí pouze poruchou postiženého úseku vedení je podmíněno správným načasováním funkcí chránících a jisticích prvků el. sítě (musí být dodržena selektivita). Čas potřebný k vypnutí postiženého vedení nebo jeho úseku a s tím související délka trvání poklesu a přerušení napětí jsou pak dány místem vzniku poruchy. Zkrácení času potřebného k lokalizaci a vypnutí poruchy tedy nesnižuje počet vzniklých poklesů napětí, ale pouze zmírňuje jejich výsledný dopad na připojená el. zařízení; taktéž není ovlivněn ani počet a délka trvání vzniklých přerušení napětí, neboť délka trvání přerušení napětí výhradně závisí na rychlosti obnovení napětí, která je zpravidla dána rychlostí provedené opravy. Metodou použitelnou ke zkrácení doby trvání zkratových poruch v sítích nn a vn je použití rychlých jisticích prvků, které jsou schopny rozpojit obvod ve velmi krátkém čase. Snížení velikosti zkratového proudu a vůbec délky trvání zkratu pak vede k tomu, že délka trvání způsobených poklesů napětí zřídka kdy přesáhne dobu jedné periody napětí (20ms v sítích s frekvencí 50Hz). V sítích vvn jsou pak využity automatiky opětivního zapínání OZ, které při detekci jednofázové zkratové poruchy odpojí postiženou fázi, a po uplynutí nastaveného časového intervalu ji opět připojí k napájení.

Ke zmírnění účinků poklesů a krátkodobých přerušení napětí na el. zařízení odběratelů přispívá také změna konfigurace napájecí sítě. Obecně platí, že k lepší ochraně zvláště citlivých zařízení vedou následující kroky:

- instalace generátorů poblíž velmi citlivých zařízení (generátory pomáhají udržet napětí v povolených mezích během vzdálených poklesů napětí, přičemž velikost redukovaného napětí odpovídá procentnímu podílu proudu dodávaného generátorem ku celkovému zkratovému proudu.

- Zvýšení počtu elektrických stanic (rozvoden) a přípojnic, čímž dojde k omezení počtu poruchou ohrožených zákazníků (ke každé přípojnici či rozvodně bude připojen menší počet zákazníků).
- Napájení odběratelů s citlivými zařízeními pomocí několika vedení z různých rozvoden. Efektivita tohoto opatření závisí na provozních vlastnostech obou rozvoden (vzdálenost, napájení ze stejné či různých linek, apod.). Největšího efektu bude dosaženo v případě, kdy obě rozvodny budou napájeny z různých přenosových soustav.

Další možností redukce účinků poklesů a přerušení napětí na citlivá zařízení je použití speciálního reaktoru (FCL - fault current limiter reactor) omezujícího velikost zkratového proudu. Reaktor musí být umístěn do strategicky vhodné části napájecí sítě (ihned za jistící prvek daného vývodu), a jeho úkolem je zvětšení elektrické vzdálenosti místa zkratu. Schéma zapojení omezujícího reaktoru je zobrazeno na obrázku Obr. 14 [23].



Obr. 14 Schéma zapojení omezujícího reaktoru [23]

Princip činnosti reaktoru je následující. Vznikne-li zkrat v libovolném místě připojeném přes napáječ F1, začne obvodem téct zkratový proud, a tento protéká přes sériový LC obvod, což je doprovázeno vznikem přepětí na svorkách kondenzátoru. Paralelně ke kondenzátoru je připojen „varistor“, jehož úkolem je regulovat velikost přepětí. Velikost zkratového proudu je tedy omezoována prostřednictvím impedance sériového LC obvodu.

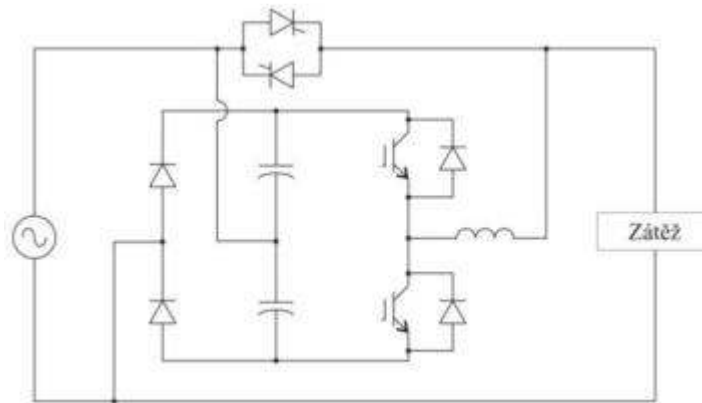
Opatření chránící zařízení podniku

Pro případ, že konkrétní podnik obsahuje velký počet citlivých zařízení, která nejsou soustředěna do jednoho výrobního procesu, se nabízí provést opatření vedoucí k potlačení účinků poklesů napětí na všechna zařízení podniku. Výhodou tohoto řešení oproti individuálně prováděným opatřením je, že zde není nutné znát detailní informace o vlastnostech a odolnostech všech zařízení podniku. Samozřejmě, náklady na realizaci jsou vysoké, ale tento způsob řešení je ekonomicky mnohem výhodnější než individuální opatření provedená u všech citlivých zařízení (stále platí předpoklad, že daný podnik obsahuje velký počet těchto citlivých zařízení).

Prvním z možných řešení je připojení podniku k napájecí síti pomocí dvou navzájem nezávislých vedení vyvedených nejlépe ze dvou různých rozvoden. Daný podnik je trvale připojen z jedné rozvodny, a pouze v případě potřeby (výskyt poruchy a s ní souvisejících poklesů či přerušení napětí) je napájení přepojeno na záložní druhou rozvodnu. Dvojitý napájení podniku má smysl pouze tehdy, když obě napájecí vedení jsou navzájem elektricky nezávislá, a pravděpodobnost, že porucha jednoho přívodu se ve stejný okamžik projeví i v přívodu druhém, je velmi nízká. Je však důležité poznamenat, že dvojitý napájecí vedení podniku řeší problém s chráněním na poklesy napětí citlivých spotřebičů pouze částečně, neboť pouze poskytuje záložní napájení v případě poruchy jednoho z napáječů. Protože zkratové poruchy a související poklesy napětí jsou nedílnou součástí elektrického rozvodného systému a jejich vý-

skyt nelze dopředu predikovat, je vhodné chránit citlivá zařízení daného podniku ještě některým z níže uvedených variant.

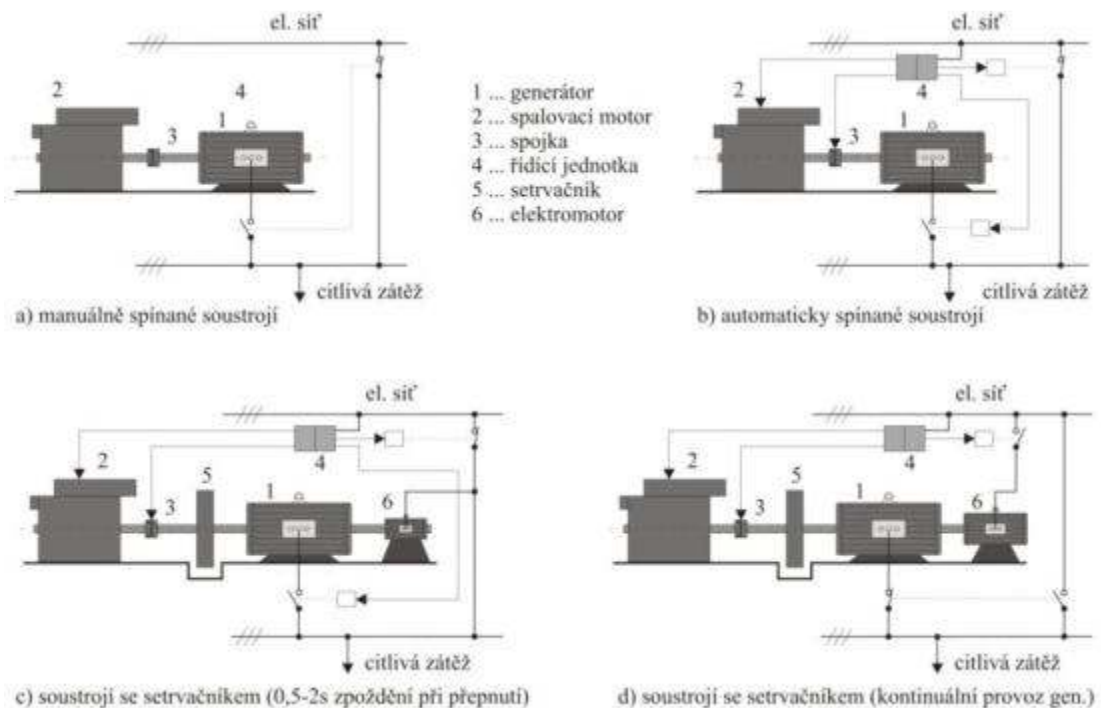
Další opatření jsou založena na zálohovém napájení citlivých zařízení, a to prostřednictvím setrvačnicků či zdrojů nepřerušovaného napájení (UPS). Oba typy existují ve statickém i rotačním provedení, a hlavní rozdíl mezi setrvačnickem a UPS spočívá v tom, že setrvačnický jsou dimenzovány pouze na krátkodobé doplnění energie scházející v systému, zatímco UPS jsou výkonově dimenzovány na plný výkon napájených zařízení a dle provedení UPS slouží jako plnohodnotný nebo dočasný zások za el. síť. Příkladem opatření pracujícího na bázi statického setrvačnicku je použití jednotky SSC (Low voltage static series compensator). Princip činnosti spočívá v porovnávání skutečného napětí na zátěži s referenčním stavem (sinusový průběh křivky napětí s efektivní hodnotou napětí 230V a frekvencí 50Hz). Jestliže je na zátěži napětí odlišné od referenčního, SSC detekuje velikost odchylky a pomocí energie uchovávané v kondenzátorech se snaží napětí na zátěži doregulovat. Parametry poklesů napětí, které lze pomocí SSC eliminovat, závisí na návrhu konkrétní jednotky SSC, obecně se uvádí, že SSC je určeno k eliminaci poklesů napětí o zbytkových napětích až do 50% jmenovitého napětí a délkách trvání v rozmezí 3 až 12 period [23]. SSC není schopno eliminovat vzniklá přerušení napětí. Jednopolové schéma zapojení jednotky SSC je zobrazeno na obrázku Obr. 15.



Obr. 15 Jednopolové schéma zapojení jednotky SSC [23]

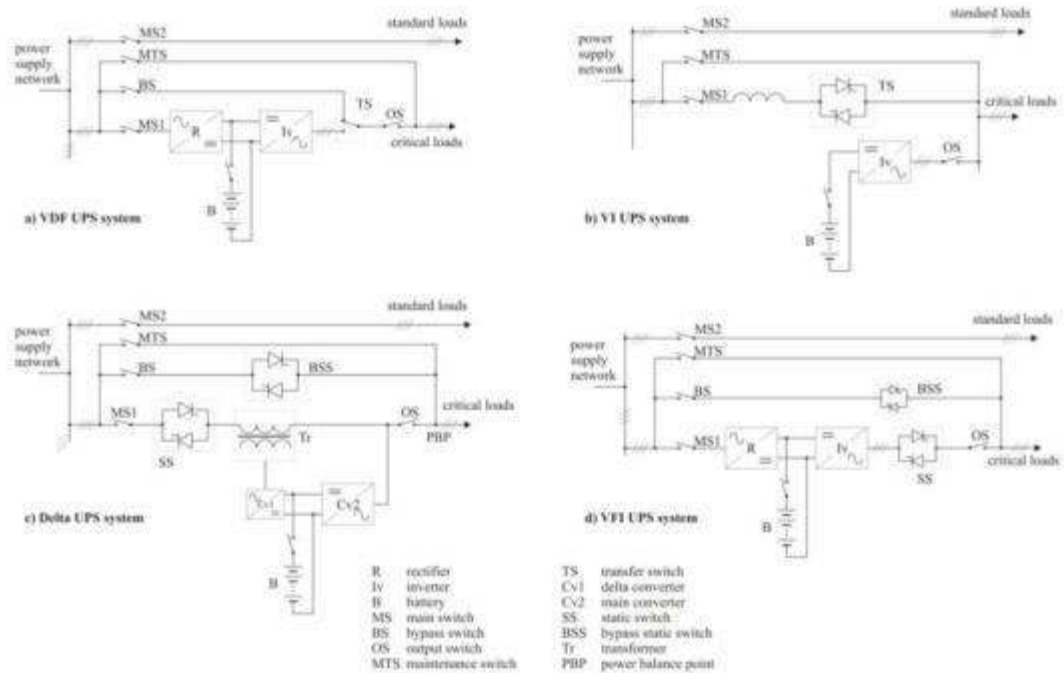
Provedení UPS jednotek může být, jak již bylo výše uvedeno, statické nebo rotační. Statické UPS uchovávají energii v bateriích, rotační (dynamické) UPS uchovávají energii v točivých prvcích, většinou setrvačnicích. Za dynamické UPS se považují také soustrojí spalovací motor – generátor, kdy je výstup generátoru připojen na přípojnicí, z níž jsou napájeny citlivá zařízení. Provoz celého soustrojí je kontrolován a řízen řídicí jednotkou. Tento způsob řešení problémů s kvalitou dodávky elektrické energie se jeví jako velice výhodný, neboť může být navržen jak pro déletrvající chod (v řádech hodin až dnů), tak pro trvalý provoz a z hlediska výkonových požadavků se běžně vyrábějí soustrojí o výkonu desítek kW až po jednotky MW [21]. Podle konstrukčního provedení soustrojí motor-generátor a jeho připojení k el. síti se rozlišuje mezi dvěma provozními stavy (viz obrázek Obr. 16). Charakteristickým rysem první skupiny je, že v normálním provozním stavu napájecí síť jsou odstaveny a povel ke startu soustrojí je dán až v okamžiku ztráty napájení v síti, což s sebou přináší poměrně velkou časovou prodlevu mezi výpadkem napájení a okamžikem uvedení generátoru do jmenovitého provozního stavu (někdy označeno jako provozní prodleva). Velikost časové prodlevy se liší podle toho, zda povel k rozběhu diesel motoru je dán manuálně (ruční startér) nebo automaticky. I přesto, že je povel k rozběhu obvykle dáván automaticky, pohybuje se vzniklá časová prodleva v rozmezí 6-15s u jednotek nižších výkonů až po 180s u megawattových jednotek. Pro snížení časové prodlevy při rozběhu generátorů bývají diesel motory trvale udržovány

v teplém stavu na teplotě blízké jejich provozní teplotě. Druhá skupina je charakteristická velmi krátkou provozní prodlevou, která dosahuje hodnoty nižší než 2s. Na společné hřídeli je elektromotor s generátorem a setrvačником, které jsou přes elektromagnetickou spojku spojeny s diesel motorem. V bezporuchovém chodu elektrické sítě (energie dodávána ze sítě) elektromotor udržuje otáčky generátoru a setrvačniku na jmenovité hodnotě. Pokud nastane přerušování dodávky energie ze sítě, elektromagnetická spojka připojí ke generátoru se setrvačником ještě diesel motor, který tak přebírá funkci zdroje mechanické energie v celém soustrojí. Provozní prodleva se uvádí v rozmezí 0,5-2s. Ještě výhodnější variantou (z hlediska zabezpečení dodávek energie citlivým spotřebičům), pro kterou je typická nulová provozní prodleva, je trvalé napájení spotřebičů z generátoru. Zatímco je v bezporuchovém chodu el. sítě generátor spojený se setrvačником poháněn elektromotorem, při poklesech a přerušování napětí v síti je po přechodnou dobu, než nastartuje diesel motor a je přes elektromagnetickou spojku připojen ke generátoru, energie brána z roztočeného setrvačniku.



Obr. 16 Různá konstrukční uspořádání soustrojí motor-generátor (EGS)

Co se týče statických UPS, tyto jsou vyráběny ve výkonovém rozsahu 200VA až 50kVA u jednofázových jednotek a v rozsahu 10kVA až 20MVA u třífázových jednotek. Dle topologie a závislosti výstupního napětí a frekvence na vstupních parametrech napětí lze rozlišovat mezi třemi typy provedení statických UPS jednotek: a) provedení VFD, kde výstupní napětí a frekvence je závislá na vstupních parametrech napětí (voltage and frequency dependent from main supply), b) provedení VI, kde výstupní napětí je nezávislé na vstupních parametrech napětí (voltage independent), a c) provedení VFI, kde výstupní napětí i frekvence je nezávislá na vstupních parametrech napětí (voltage and frequency independent). Rozdíly v provedeních statických UPS vyplývají z obrázku Obr. 17.

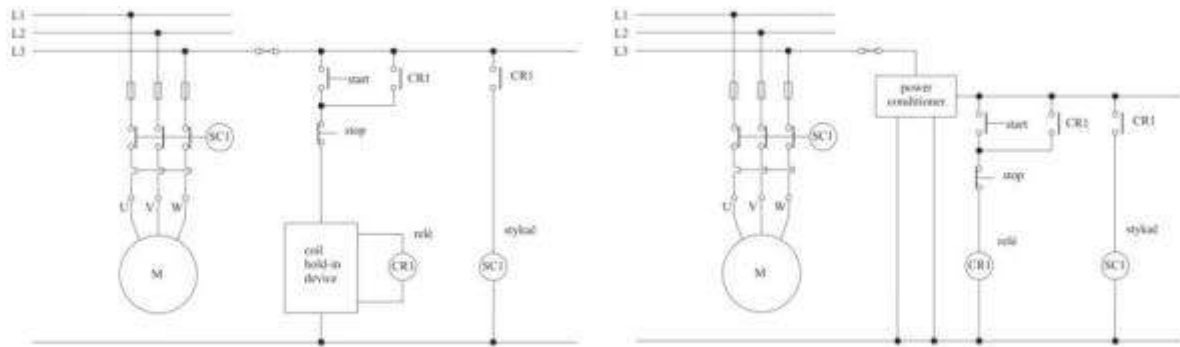


Obr. 17 Rozdíly v provedení statických UPS

Je-li zapotřebí chránit citlivá zařízení, která jsou soustředěna na určitém místě v rámci jednoho výrobního procesu (napájeno většinou společným přívodním kabelem), není nutné „zbytečně“ investovat do opatření zlepšujících kvalitu dodávky energie celému podniku, a je možné provést opatření chránící zařízení pouze konkrétního výrobního procesu.

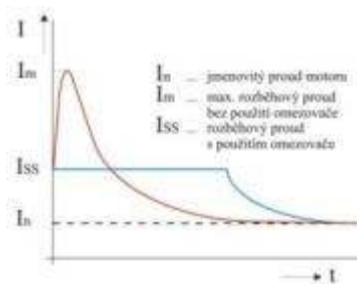
Velmi citlivé na poklesy a krátkodobá přerušení napětí jsou relé a stykače. Využití nacházejí při potřebě bezpečného spínání zařízení velkých výkonů, kdy pomocí cívky napájené bezpečným malým napětím nebo jednofázovým napětím 230V jsou ovládány hlavní kontakty, jež jsou součástí silového obvodu napájejícího např. výrobní linku. Pokles napětí či ztráta napájení v ovládacím obvodu relé/stykače se tak projeví rozpojením hlavních kontaktů a neplánovaným odstavením celé výrobní linky. Potlačení nežádoucích vypínání relé/stykačů spočívá v instalaci zařízení, které napájí ovládací cívky relé/stykačů i během poklesů napětí v el. síti, a udržují je tak v činném stavu [24]. Jednou z možností je použití tzv. „Coil hold-in device“, které stejnosměrným napětím napájí ovládací cívku velmi citlivého relé, jež přes stykač spíná elektromotor (ovládací cívka méně citlivého stykače je v tomto případě připojena na nechráněné napájení, avšak může být také připojena přes další „Coil hold-in device“ zařízení). Další možností je použití zařízení (power conditioner), které poskytuje chráněné napájení všem spínacím prvkům (relé/stykače) umístěným v ovládacím obvodu daného motoru. Bloková schémata obou variant zařízení jsou na obrázku Obr. 18.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



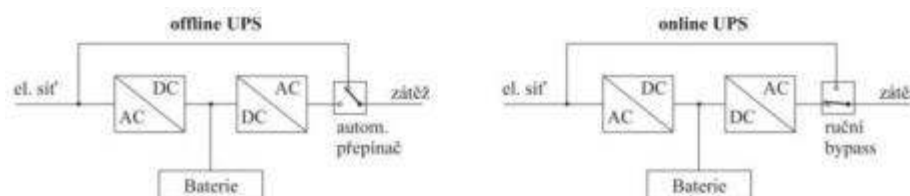
Obr. 18 Blokové schéma obvodu se zařízením zabraňujícím nežádoucímu vypínání relé a stykačů [24]

Jednou z příčin vzniku poklesů napětí v el. síti je rozběh indukčních motorů velkých výkonů. V okamžiku spuštění motoru dochází v síti k velkému proudovému rázu (několikanásobek jmenovitého proudu), který na impedanci sítě vyvolá velký úbytek napětí. Postupně, jak motor nabíhá na jmenovité otáčky, se velikost odběrového proudu zmenšuje a po ustálení na jmenovitých otáčkách stroje je ze sítě odebírán proud jmenovité hodnoty. K omezení vzniku poklesů napětí v síti tedy vede použití omezovače rozběhového proudu (soft-starter) připojeného k asynchronním motorům velkých výkonů. Funkce omezovače je rovněž zobrazena na obrázku Obr. 19.



Obr. 19 Princip funkce omezovače rozběhového proudu asynchronních motorů [23]

Pro ochranu velmi citlivých zařízení lze s výhodou opět použít statické UPS, jejichž výhodou je kompaktní provedení (velikost jednotky závisí na kapacitě baterií) a poměrně nízká cena. Za jedinou nevýhodu UPS se dá považovat nutnost řízení nabíjecího proudu do baterií. U statických UPS lze ještě rozlišovat, zda pracují v offline režimu nebo v online režimu. Oba typy provedení jsou zobrazeny na obrázku Obr. 20. Zatímco offline jednotky v bezporuchovém stavu sítě pouze nabíjejí baterii a v případě vzniku události na napětí je zátěž automatickým přepínačem přepojena na výstup střídače napájeného z baterie (přepojení probíhá velmi rychle - max. 4ms), u online jednotek je zátěž trvale připojena přes usměrňovač a střídač, a baterie jsou nabíjeny kontinuálně. Dojde-li v el. síti k poklesu či krátkodobému přerušení napětí, zátěž je automaticky napájena z baterie, aniž by se pokles napětí v síti jakkoliv projevil na svorkách zátěže.



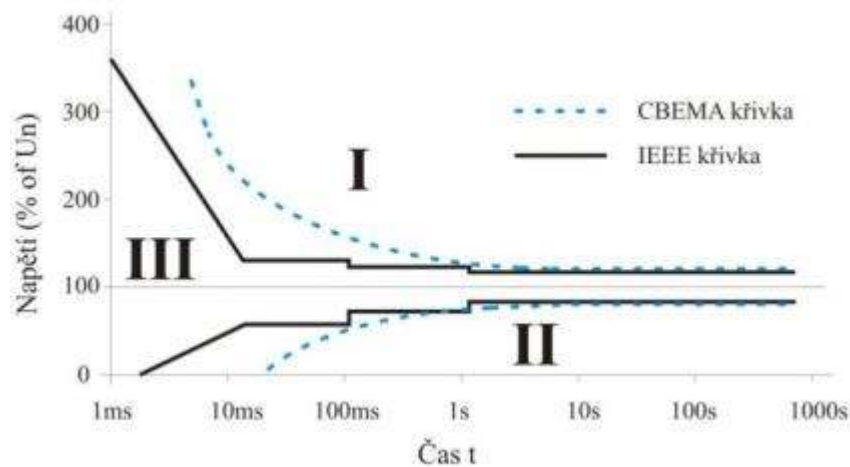
Obr. 20 Zdroj nepřerušovaného napájení (UPS) v offline a online provedení [23]

Jedním z řešení, jak ochránit citlivé zařízení proti účinkům poklesů a přerušení napětí, je zvýšení odolnosti konkrétního zařízení na tento typ událostí na napětí. Tato problematika bude detailně probrána v následující kapitole 2.2 Odolnost zařízení vůči událostem na napětí.

2.2 Odolnost zařízení vůči událostem na napětí

Všechna elektrická zařízení lze jednotně hodnotit podle míry jejich odolnosti vůči událostem na napětí. Odolnost zařízení je všeobecně charakterizována jako schopnost daného zařízení plnohodnotně vykonávat určenou funkci za přítomnosti působení elektromagnetického rušení, tzn. v tomto případě poklesů a přerušení napětí. Vzhledem k rozsáhlému spektru používaných elektrických spotřebičů a zařízení je zřejmé, že různá elektrická zařízení budou dosahovat různé úrovně odolnosti. Jedná se především o skutečnost, že k elektrické napájecí síti jsou připojeny různé typy elektrických zařízení a spotřebičů, které na v síti se šířící poklesy a krátkodobá přerušení napětí reagují různými způsoby. Míra odolnosti konkrétního zařízení závisí především na konstrukci daného zařízení a jeho vykonávané funkci.

Odolnost elektrických zařízení vůči událostem na napětí je předmětem zájmu mnoha výzkumných organizací a vědeckých pracovníků zabývajících se problematikou elektromagnetické kompatibility (EMC) [6][13][30][31][32]. Problematikou odolnosti spotřebičů vůči událostem na napětí se odborníci začali výrazněji zabývat až s rozvojem prvních počítačů, kdy započaly problémy s nečekanými výpadky jejich funkce. Na základě dlouhodobých studií a nespočtu provedených testů organizace s názvem Computer and Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA) vyvinula tzv. CBEMA křivku, která popisovala odolnost sálového počítače. CBEMA organizace byla následně nahrazena organizací označovanou zkratkou ITIC (Information Technology Industry Council), která vyvinula tzv. ITIC křivku. Ta byla následně organizací ANSI (American National Standards Institute) standardizována a publikována jako křivka IEEE. Rozdíly mezi původně vyvinutou křivkou CBEMA a finální verzí křivky IEEE jsou zobrazeny na obrázku Obr. 21.



Obr. 21 CBEMA křivka vs. křivka IEEE

Z obrázku Obr. 21 je již na první pohled patrné, že obě křivky (CBEMA a IEEE) jsou složeny ze dvou částí – sub-křivek. Sub-křivky ležící v oblasti nad přímkou označující jmenovité napětí elektrického zařízení ($100\% U_n$) vyjadřují odolnost zařízení vůči přepětím, kdežto sub-křivky ležící pod přímkou jmenovitého napětí vyjadřují odolnost zařízení vůči poklesům a krátkodobým výpadkům napětí. Křivka odolnosti složená ze dvou sub-křivek rozděluje plochu na celkem tři oblasti. Horní oblast (na Obr. 21 označena znakem „I“) vyjadřuje nežádoucí ovlivnění funkce elektrického zařízení vlivem zvýšeného napájecího napětí, což ve většině případů vede k nevratnému poškození daného zařízení. Oblast pod spodní sub-křivkou (na Obr. 21 označena znakem „II“) pro změnu vyjadřuje nežádoucí ovlivnění funkce elektrického zařízení vlivem poklesů a přerušení napětí. Prostor ohraničený oběma sub-křivkami (označený znakem „III“) tvoří oblast, ve které je dané elektrické zařízení vůči událostem na

napětí imunní, tzn., že vzniklá událost se žádným způsobem neprojeví na chodu elektrického zařízení, nebo se na chodu zařízení projeví v tolerovatelné míře.

2.2.1 Funkční kritéria odolnosti

V předchozích kapitolách již bylo zmíněno, že k elektrické napájecí síti je připojen nespočet druhů elektrických spotřebičů. Jejich správná činnost je podmíněna nepřetržitou dodávkou elektrické energie z napájecí sítě, a přímo tak závisí na kvalitě napájecího napětí. Za normálního stavu, kdy napětí v síti odpovídá jmenovitým parametrům (jsou splněny všechny požadavky na kvalitu napětí), spotřebič pracuje ve svém optimálním pracovním režimu (blízko výrobcem určeného pracovního bodu). Při zhoršení kteréhokoliv z parametrů určujících kvalitu napětí [1][2] může dojít k destabilizaci pracovního režimu spotřebiče, což se, v závislosti na typu spotřebiče, projeví jeho nestandardním chováním a zvýšeným rizikem jeho poškození. Nestandardní chování spotřebiče je možné ohodnotit pomocí tzv. funkčních kritérií odolnosti, zavedených pro hodnocení odolnosti zařízení z hlediska EMC, která ohodnocují velikost změny chování konkrétního spotřebiče obecně během výskytu jakéhokoliv rušivého jevu (v tomto případě během výskytů poklesů či přerušení napětí). Kritéria odolnosti jsou využívána v souvislosti s testováním odolnosti el. spotřebičů, kdy se pomocí funkčních kritérií hodnotí výsledky jednotlivých zkoušek. Obecně jsou dle standardu [7] pro elektrická zařízení podrobená testování odolnosti na poklesy a krátkodobá přerušení napětí stanoveny následující funkční kritéria:

- A) Normální funkce testovaného zařízení během zkoušky i po ní.
- B) Dočasná ztráta funkce nebo zhoršení provozu, které přestane po zastavení rušení. Normální funkce testovaného zařízení se sama obnovuje bez zásahu operátora.
- C) Dočasná ztráta funkce nebo zhoršení provozu, které již vyžaduje zásah operátora.
- D) Ztráta funkce nebo zhoršení provozu, které není obnovitelné, což je způsobeno poškozením technického vybavení nebo programového vybavení nebo ztrátou dat.

Kritérium odolnosti se odvíjí od funkce a typu testovaného zařízení a nelze jej odvodit jednotně pro všechny typy elektrických zařízení. Obecné dělení funkčních kritérií má tedy spíše informativní charakter a v případě provádění zkoušek odolnosti el. zařízení musí být zvolená funkční kritéria pro daný konkrétní typ zařízení přesně definována, a to včetně limitních hodnot konkrétní měřené (posuzované) veličiny⁵. Jestliže pak během prováděných zkoušek odolnosti změna měřené veličiny dosahuje hodnoty nižší než je limitní mez zvoleného funkčního kritéria, testované zařízení danému kritériu vyhoví; a naopak, je-li změna měřené veličiny vyšší než limitní mez zvoleného funkčního kritéria, testované zařízení podmínky daného kritéria nesplňuje. Např. pro světelné zdroje je ve standardu [25] uváděno ještě následující dělení funkčních kritérií:

- A) Změny svítivosti testovaného světelného zdroje nejsou během zkoušky viditelné a všechny části světelného zdroje (řídící obvod, regulační obvod apod.) pracují normálně, a to jak během zkoušky, tak po jejím skončení. Změna svítivosti může být kontrolována pozorovatelem (subjektivní metoda), nebo může být měřena pomocí luxmetru umístěného v hlavní ose světelného zdroje případně svítidla. Pak povolená změna měřené intenzity osvětlení činí 15% hodnoty předcházející testům.

⁵ Je tak nutno učinit nejen proto, aby bylo při měření dosaženo korektních výsledků a byl eliminován vliv lidského faktoru, ale také aby bylo možné danou zkoušku kdykoli zopakovat a výsledky dvou stejných zkoušek se nikterak výrazně nelišily (samozřejmě za předpokladu, že zařízení je v neměnném provozním stavu a mezi prováděnými zkouškami nedošlo k poškození zařízení).

- B) Svítivost světelného zdroje poklesne během zkoušky na libovolnou hodnotu, ale po skončení zkoušky musí v časovém intervalu do 1 minuty znovu dosáhnout své původní hodnoty. Řídící a regulační obvody světelného zdroje mohou během zkoušky přestat pracovat, ale po skončení zkoušky musí pracovat jako před jejím zahájením.
- C) Možný výpadek činnosti světelného zdroje, avšak v časovém intervalu do 30 minut musí nastat znovuobnovení činnosti světelného zdroje a dosažení parametrů jako před zkouškou.

Přestože jsou pro světelné zdroje stanoveny výše uvedené funkční kritéria (viz [25]), lze i toto dělení kritérií považovat za nedostatečné a velmi strohé, neboť kritéria mohou být nesprávně pochopena, a navíc neobsahují přesná zadání velikostí povolených změn vyzařovaného světelného toku případně svítivosti. Tak například, na základě fyzikálního principu vzniku světla lze konstatovat, že funkční kritérium A prakticky nikdy nemůže být splněno, protože vnímání lidského pozorovatele negarantuje opakovatelnost zkoušky (subjektivní metoda) a velikost vyzařovaného světelného toku přímo závisí na velikosti napájecího napětí, a každá změna napětí vyvolá změnu světelného toku. Časová závislost intenzity osvětlení také závisí na parametrech měřicího přístroje (luxmetru), která nejsou funkčními kritérii nijak stanovena. Rozdělení funkčních kritérií by také mohlo být pro přehlednost provedeno do více kategorií, neboť, v závislosti na typu světelného zdroje, může nastat velmi mnoho změn vyzařovaného světelného toku.

2.2.2 Testování odolnosti spotřebičů v souladu s EN 61000-4-11

Standard EN 61000-4-11 [7] definuje metody zkoušky odolnosti a rozsah doporučených zkušebních úrovní krátkodobých poklesů napětí, krátkých přerušení a pomalých změn napětí, pro elektrická a elektronická zařízení připojovaná do rozvodných sítí nízkého napětí, kdy vstupní fázový proud el. zařízení není větší než 16A. (Zkoušky odolnosti spotřebičů s vstupním fázovým proudem větším než 16A definuje standard [8]). Jsou zde stanoveny nejen přesné zásady a pravidla, podle kterých má testování odolnosti el. spotřebičů vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí probíhat, ale rovněž také požadavky, jež musí splňovat samotné testovací zařízení, aby výsledky zkoušek dosahovaly požadovaných úrovní co se týče jejich přesnosti a mohly být považovány za směrodatné.

Testovací úrovně pro zkoušky odolnosti se odvíjejí od jmenovitého napětí testovaného zařízení U_n . Jsou preferovány následující úrovně zkušebních napětí 0% U_n , 40% U_n , 70% U_n a 80% U_n , což odpovídá zbytkovým napětím krátkodobých poklesů a krátkých přerušení napětí 0%, 40%, 70% a 80%. Preferované zkušební úrovně napětí včetně délek trvání jednotlivých zkoušek pro poklesy napětí jsou přehledně uvedeny v tabulce Tab. 9 a pro krátkodobá přerušení napětí v tabulce Tab. 10. Dle [7] jsou definované zkušební úrovně v Tab. 9 přiměřeně přísné a reprezentativní pro mnoho reálných ve světě se vyskytujících krátkodobých poklesů napětí, nemohou však být brány jako absolutní záruka odolnosti proti všem krátkodobým poklesům napětí.

Tab. 9 Přednostní zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy napětí [7]

Třída ^a	Zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy napětí (t_s) (50 Hz/60 Hz)				
Třída 1	Případ od případu podle požadavků zařízení				
Třída 2	0 % během ½ periody	0 % během 1 periody	70 % během 25/30° period		
Třída 3	0 % během	0 % během	40 % během	70 % během	80 % během

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

	½ periody	1 periody	10/12 ^c period	25/30 ^c period	250/300 ^c period
Třída X ^b	X	X	X	X	X

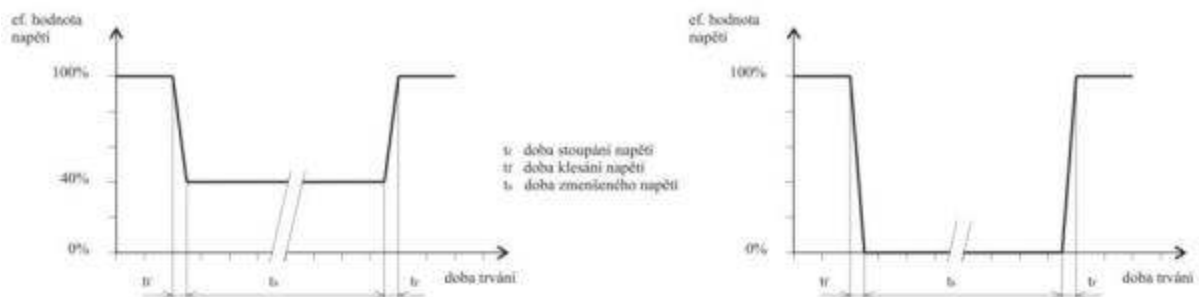
^a Třídy elektromagnetického prostředí podle IEC 61000-2-4 [27]
^b Určeno k definování výrobkovou komisí. U zařízení připojeného přímo nebo nepřímo k veřejné síti úroveň nesmí být méně přísné než pro třídu 2.
^c „25/30 period“ znamená 25 period pro zkoušku 50Hz a 30 period pro zkoušku 60Hz.

Tab. 10 Přednostní zkušební úrovně a doby trvání pro krátká přerušování napětí [7]

Třída ^a	Zkušební úrovně a doby trvání pro krátká přerušování napětí (t _s) (50 Hz/60 Hz)
Třída 1	Případ od případu podle požadavků zařízení
Třída 2	0 % během 250/300 ^c period
Třída 3	0 % během 250/300 ^c period
Třída X ^b	X

^a Třídy elektromagnetického prostředí podle IEC 61000-2-4 [27]
^b Určeno k definování výrobkovou komisí. U zařízení připojeného přímo nebo nepřímo k veřejné síti úroveň nesmí být méně přísné než pro třídu 2.
^c „250/300 period“ znamená 250 period pro zkoušku 50Hz a 300 period pro zkoušku 60Hz.

Z uvedených zkušebních úrovní je patrné, že daná zkouška odolnosti začíná ze jmenovitého napětí testovaného zařízení a po provedení zkoušky (spuštění poklesu či přerušování napětí) napájecí napětí nabývá své původní, tzn. jmenovité hodnoty. Změna napětí mezi jmenovitým napětím nastaveným před započítáním zkoušky a změněnou hodnotou napětí je náhlá (doba stoupání napětí t_r a doba klesání napětí t_f bývá v rozmezí 1 μ s až 5 μ s), navíc může nastat při jakémkoliv fázovém úhlu síťového napětí. Vzhledem k tomu, že doba trvání celé zkoušky je uváděna v jednotkách milisekund a doba trvání přechodných částí napětí je v řádech mikrosekund, nastavovaný zkušební pokles či přerušování napětí se svým průběhem velmi blíží obdélníkovému tvaru (viz obrázek Obr. 22).



Obr. 22 Průběh efektivní hodnoty zkušebního poklesu napětí (vlevo) a zkušebního přerušování napětí (vpravo)

Testování odolnosti elektrických zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušování napětí musí být prováděno pomocí generátoru, který svými charakteristickými vlastnostmi odpovídá požadavkům kladeným na zařízení tohoto typu. Požadavky definované v normě [7] jsou přehledně popsány v tabulce Tab. 11.

Tab. 11 Specifické vlastnosti testovacího generátoru [7]

Parametr	Požadavek
Výstupní napětí naprázdno	Hodnoty z tabulky Tab. 9, $\pm 5\%$ hodnoty zbytkového napětí
Změna napětí způsobená zatížením na výstupu generátoru 100% při výstupu 0A až 16A 80% při výstupu 0A až 20A 70% při výstupu 0A až 23A 40% při výstupu 0A až 40A	menší než 5% jmenovitého napětí U_n menší než 5% jmenovitého napětí U_n menší než 5% jmenovitého napětí U_n menší než 5% jmenovitého napětí U_n
Schopnost generování proudu	16A (efektivní hodnota) v každé fázi při jmenovitém napětí. Generátor musí být schopen dodávat 20A při 80% jmenovitého napětí po dobu 5 sekund. Musí být schopen dodávat 23A při 70% jmenovitého napětí a 40A při 40% jmenovitého napětí po dobu 3 sekund. (Tento požadavek může být redukován podle ustáleného jmenovitého napájecího proudu testovaného
Schopnost generování vrcholového zapínacího proudu	Nesmí být omezoáno generátorem. Maximální schopnost generování proudu však nemusí být větší než 1000A pro síť 250V až 600V, 500A pro síť 200V až 240V nebo 250A pro síť 100V až 120V.
Vrcholová hodnota překmitnutí/podkmitnutí skutečného napětí, generátor zatížen rezistivní zátěží 100 Ω	Menší než 5% jmenovitého napětí U_n
Doba stoupání (a klesání) napětí t_r (a t_f) během náhlé změny, generátor zatížen rezistivní zátěží 100 Ω	Mezi 1 μ s a 5 μ s
Fázový posuv (je-li požadován)	0° až 360°
Fázový vztah krátkodobých poklesů napětí a krátkých přerušení napětí se sít'ovým kmitočtem	Menší než $\pm 10^\circ$
Rízení průchodu napětí generátoru nulou	$\pm 10^\circ$

Obecně se k testování odolností el. zařízení může použít jakýkoliv generátor, který umožňuje vytváření krátkodobých poklesů napětí o stejných nebo přísnějších charakteristikách (amplitudy a doby trvání) než jsou charakteristiky předepsané v [7]. Generátor však musí mít opatření zabráňující emisi velkých rušení, která mohou v případě jejich injektáže do rozvodné sítě ovlivnit výsledky zkoušky.

Co se týká referenčních podmínek pro laboratorní testování, klimatické podmínky v laboratoři musí být v mezích specifikovaných pro provoz testovaného zařízení a zkušebního zařízení jejich výrobcí; elektromagnetické podmínky laboratoře musí být takové, aby zaručily správnou činnost testovaného zařízení a nebyly ovlivněny výsledky zkoušek.

Pro samotné provádění zkoušek jsou pak v [7] stanoveny podrobné pokyny. Výsledky zkoušek musí být klasifikovány na základě ztráty funkce nebo zhoršení provozu zkoušeného zařízení, a sice podle obecně stanovených funkčních kritérií (viz kapitola 2.2.1 Funkční kritéria odolnosti).

2.2.3 Měření křivek odolnosti el. zařízení

Ačkoli jsou v současné době standardizovány testovací úrovně napětí podle [7] (zkušební poklesy a přerušení napětí mají obdélníkový tvar a jejich popisnými parametry jsou zbytkové napětí a délka trvání), mnoho zahraničních autorů se ve svých studiích [11][12][13][28][29][30] zabývá problematikou vlivu dalších aspektů na celkovou odolnost elektrických zařízení. Například dle [11] lze všechny parametry ovlivňující citlivost daného zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí rozdělit do tří základních skupin:

- a) Charakteristiky napájecího napětí
- b) Charakteristiky testovaného elektrického zařízení
- c) Neelektrické parametry

Co se týče charakteristik napájecího napětí, dominantní vliv na chování el. zařízení a jejich citlivost mají především charakteristiky napětí během poklesu/přerušení napětí. Nezanedbatelný vliv však mohou mít také parametry napětí před započítáním a po skončení poklesu/přerušení napětí. Charakteristiky napětí tak lze rozdělit na tři podkategorie (dělení je totožné s již dříve uvedenou segmentací parametrů poklesů napětí do třech částí – viz kapitola 2.1.2 Parametry událostí na napětí a další třídění:

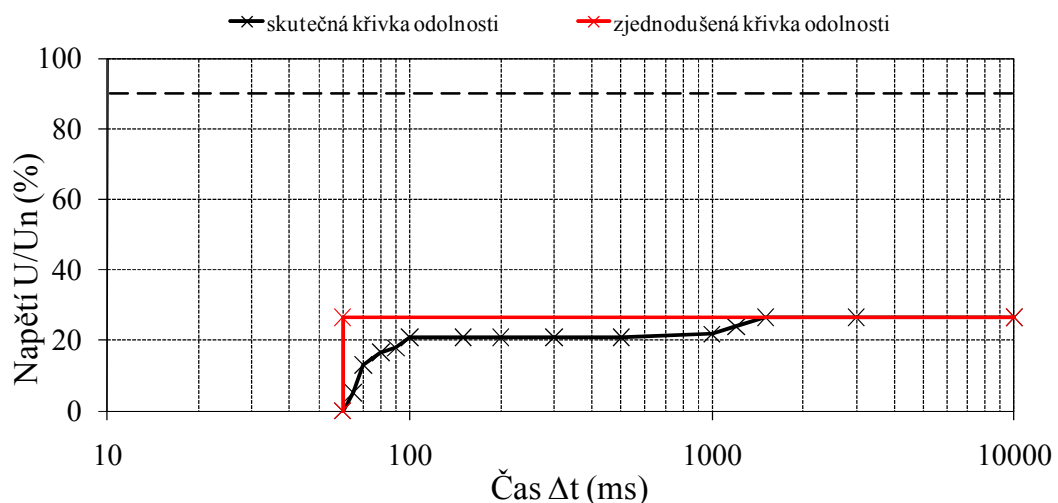
- Parametry napětí před započítáním rušení - efektivní hodnota napětí, frekvence, harmonické složky napětí a celkové harmonické zkreslení THD_U , nesymetrie napětí
- Parametry napětí během rušení – typ napěťové události (pokles, přerušení napětí), průběh události (obdélníkový, pilový, jiný), zbytkové napětí, délka trvání, fázový úhel vzniku a ukončení události, fázový posuv napětí během poklesu
- Parametry napětí po skončení rušení – efektivní hodnota napětí, fázový posuv mezi fázovými úhly před a po skončení poklesu

Zatímco je testované zařízení vystaveno vlivům proměnných charakteristik napájecího napětí, odezva a citlivost zařízení může být ovlivněna také některými faktory souvisejícími s aktuálním technickým a provozním stavem testovaného zařízení. Hlavní roli zde hrají parametry jako způsob připojení zařízení k el. síti, konstrukční prvky a topologie zařízení, vnitřní nastavení zařízení z hlediska chránění, zatížení zařízení, atd. Vedle těchto parametrů zde náleží také parametry zahrnující aktuální provozní podmínky všech externích součástí a zařízení ovládaných nebo napájených testovaným zařízením.

Poslední skupinou ovlivňujících parametrů jsou neelektrické parametry. Zde se nacházejí především ty parametry neelektrického původu, které mají významný vliv na elektrické parametry testovaného zařízení (napětí, proud, odpor, magnetický tok apod.). Do této skupiny tedy náleží parametry jako vliv teploty, vlhkosti, tlaku, nadmořské výšky, přítomnost vibrací, atd. V průvodním listu každého zařízení by měly být výrobcem stanoveny referenční podmínky případně rozsah povolených tolerancí jednotlivých parametrů zaručujících optimální provoz daného el. zařízení.

Zahraniční autoři se rovněž zabývají myšlenkou systematického testování odolnosti el. zařízení vůči poklesům a kr. přerušením napětí, která by měla vést jednak k většímu přiblížení testovacích úrovní napětí parametrům v reálné síti se vyskytujícími poklesy a přerušení napětí, a jednak by výsledky testování měly mít lepší vypovídací schopnost o odolnosti testovaného zařízení na poklesy a kr. přerušení napětí o různých kombinacích jejich popisných parametrů. Bylo zjištěno, že odolnost el. zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí může

být vyjádřena pomocí tzv. křivek odolnosti (viz Obr. 23), které přesně popisují míru citlivosti daného zařízení na napěťové poklesy o systematicky se měnících parametrech poklesu. Křivky odolnosti vycházejí ze známých křivek CBEMA, IEEE (viz Obr. 21), přičemž poklesů a kr. přerušení napětí se týká spodní křivka. Křivka odolnosti (někdy označovaná jako imunitní křivka) je považována za hraniční křivku mezi dvěma kritérii, neboť odděluje prostor, ve kterém je dané zařízení na nastalý pokles napětí odolné (pokles/přerušení napětí o parametrech spadajících do uvedeného prostoru nezpůsobí neakceptovatelnou změnu funkce zařízení), od prostoru, ve kterém je činnost zařízení vlivem nastalého poklesu napětí neakceptovatelným způsobem ovlivněna nebo již zcela selhává. Křivku odolnosti lze získat testováním zařízení na poklesy napětí o systematicky nastavovaných parametrech⁶, kdy se pro zvolené délky trvání poklesů hledají odpovídající zbytková napětí tak, aby byl nalezen právě hraniční bod mezi akceptovatelnou a neakceptovatelnou změnou funkce testovaného zařízení danou zvoleným funkčním kritériem. Pakliže je tímto způsobem nalezen dostatečný počet hraničních bodů, jejich spojením vzniká hledaná křivka odolnosti. Jejím levým krajním bodem je bod charakterizující odolnost zařízení na úplné přerušení napětí (pro tento bod je charakteristickým znakem nulová hodnota zbytkového napětí a poloha bodu se mění pouze na základě proměnné délky trvání přerušení napětí), pravým nebo též koncovým krajním bodem je bod charakterizující odolnost zařízení vůči poklesům napětí, jež se svými délkami trvání dají přirovnat k trvalému provozu zařízení při sníženém napětí. Za dostatečně dlouhou délku trvání se považuje hodnota 10s. Proložení obou krajních bodů přímkami rovnoběžnými s časovou resp. napěťovou osou získáme tzv. zjednodušenou křivku odolnosti (Obr. 23), která sice má díky uplatněnému zjednodušení nižší vypovídací schopnost o odolnosti daného zařízení, nicméně ve většině případů zaručuje, že skutečná úroveň odolnosti zařízení bude minimálně stejná, ve většině případů však lepší než úroveň signalizovaná zjednodušenou křivkou, neboť skutečná křivka odolnosti celým svým průběhem leží buďto pod zjednodušenou křivkou nebo ji v některých úsecích maximálně kopíruje.



Obr. 23 Skutečná křivka odolnosti vybraného el. zařízení a její zjednodušená podoba

⁶ Za systematicky měnící se parametry poklesů napětí jsou považovány jejich dva základní parametry, a sice zbytkové napětí a délka trvání. Ostatní parametry ovlivňující citlivost el. zařízení vůči poklesům a kr. přerušením napětí (další charakteristiky napětí, charakteristiky zařízení i neelektrické parametry) musí být pro korektní změření křivky odolnosti udržovány na neměnných hodnotách. Odolnost zařízení se tak proměřuje s ohledem na vliv jednoho konkrétního parametru (např. tvar poklesu) a pro tento parametr se změří celá křivka odolnosti (hovoříme o parametrickém testování odolností el. zařízení).

Nalezení zjednodušené křivky odolnosti značně urychluje celý proces hledání skutečné křivky odolnosti daného zařízení, neboť zjednodušená křivka dává představu o přibližné poloze skutečné křivky a při nastavování parametrů jednotlivých poklesů napětí je možné se soustředit pouze na určité kombinace parametrů zbytkové napětí - délka trvání.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je propojení systému hodnocení napět'ových událostí vyskytujících se v elektrické napájecí síti se systémem hodnocení odolnosti jednofázových elektrických spotřebičů na poklesy a krátkodobá přerušeni napětí. Pozornost je tedy věnována problematice odolnosti el. spotřebičů, která spočívá v nalezení dalších parametrů poklesů napětí a ověření jejich vlivu na úroveň odolnosti spotřebičů, ověření správnosti standardizovaného postupu testování odolnosti el. spotřebičů případně návrhu nové metodiky testování. Další část práce se zaměřuje na správnou detekci událostí na napětí v el. síti, jsou zkoumány vlastnosti standardizovaného detekčního algoritmu RMS (1/2), jehož výsledky jsou následně porovnány s dalšími méně známými detekčními algoritmy. Snahou je také zaimplementování monitoringu dalších parametrů poklesů napětí do detekčního algoritmu. Samotné propojení systémů hodnocení poklesů/přerušeni napětí a odolnosti el. zařízení spočívá v návrhu kompatibilních úrovní pro poklesy a kr. přerušeni napětí, které vycházejí ze změřených křivek odolnosti a parametrů v el. síti zaznamenaných poklesů/přerušeni napětí a představují limitující faktory jak pro výrobce el. zařízení, tak pro provozovatele el. sítí.

Za hlavní cíle práce bylo stanoveno:

1. Prověření vlivu měnicích se parametrů poklesů napětí na úroveň odolnosti vybraných skupin jednofázových el. zařízení.

V rámci této části práce je zapotřebí nalézt další parametry poklesů napětí, které mimo dva hlavní parametry poklesu (zbytkové napětí, délka trvání) mají významný vliv na úroveň odolnosti el. zařízení. Výstupem jsou změřené parametrické křivky odolnosti, jež vyjadřují odolnost zařízení zvlášť pro každý nalezený parametr poklesu napětí.

2. Návrh automatizovaného testovacího systému pro testování parametrických křivek odolnosti různých typů el. zařízení.

Pomocí programového prostředí LabVIEW navrhnout aplikaci, která bude obstarávat testování křivek odolnosti el. zařízení. Aplikace bude řídit programovatelný zdroj napětí, kde budou nastavovány parametry poklesů napětí a tyto poklesy budou v určitých časových intervalech spouštěny, a také shromažďovat data z měřicích přístrojů, na jejichž základě bude rozhodováno o výsledku dané zkoušky.

3. Navrhnout změny v hodnocení napět'ových událostí a tyto změny se pokusit zaimplementovat do monitorů událostí na napětí.

Na základě nalezených dalších parametrů poklesů napětí (bod 1) je snahou nalézt takový detekční algoritmus, který by byl schopen přesně zaznamenat pokud možno co nejvíce parametrů poklesů napětí. Pomocí LabVIEW a měřicích karet poté naprogramovat monitor poklesů/přerušeni napětí, který bude k popisu zaznamenaných událostí používat také dalších parametrů poklesů.

4. Navrhnout kompatibilní úrovně pro poklesy a kr. přerušeni napětí.

Pro každou třídu elektromagnetického prostředí stanovit minimální úrovně odolnosti, které budou muset el. zařízení splňovat pro použití v dané třídě prostředí, a rovněž pro každou třídu prostředí stanovit maximální přípustnou úroveň rušení.

4 PARAMETRIZACE KŘIVEK ODOLNOSTI EL. SPOTŘEBIČŮ

Křivky odolnosti, jak již bylo nastíněno v dřívějších kapitolách, vyjadřují úroveň odolnosti elektrického zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí, jež se běžně vyskytují v elektrickém napájecím systému. Polohu a tvar samotné křivky ovlivňuje řada faktorů (napětové charakteristiky, charakteristiky el. zařízení, vnější vlivy – viz kapitola 2.2.3), které při běžném provozu působí na celkovou odolnost daného zařízení společně. Velmi snadno tak může dojít k situaci, že vliv jednoho činitele je vykompenzován činitelem jiným, a odolnost zařízení se vzhledem k nominálním podmínkám prakticky nezmění. Při testování odolnosti zařízení v laboratorních podmínkách je však velmi složité napodobit reálný stav el. zařízení v běžném provozu, zejména co se týče nastavení úrovně jednotlivých ovlivňujících činitelů a simulace jejich současného působení. Z tohoto důvodu se jako nejlepší možná varianta jeví postupné testování odolnosti spotřebičů vždy pouze s uvažováním jediného ovlivňujícího činitele a změřená křivka odolnosti daného zařízení bude odpovídat pouze jednomu zvolenému parametru (odtud plyne název „parametrické křivky odolnosti“). Na základě znalosti odolnosti el. zařízení na jednotlivé ovlivňující činitele bude následně možné s poměrně velkou přesností dedukovat změny odolnosti zařízení vlivem společného působení více činitelů.

4.1 Zařízení podrobená zkouškám odolnosti

K elektrické napájecí síti je připojen nespočet typů elektrických zařízení, která jsou vůči poklesům a kr. přerušením napětí více či méně odolná. Přestane-li zařízení v důsledku vzniklého poklesu/přerušení napětí správně pracovat, v závislosti na umístění daného zařízení a důležitosti vykonávané činnosti dochází ke značným finančním ztrátám, ztrátě dat, ohrožení bezpečnosti apod. Z teoretického pohledu je možné testovat odolnosti různých el. zařízení a spotřebičů (všech, která přijdou na mysl), avšak z praktického hlediska, zejména co se týče přínosu získaných výsledků z testování pro praxi, je důležité testovat odolnost hlavně těch spotřebičů, které jsou významnou měrou zastoupeny v procesech, jejichž výpadek je spojen s enormními finančními ztrátami, nucenou odstavkou výroby případně ohrožením bezpečnosti. Mezi nejcitlivější zařízení patří výpočetní technika. S jejím rozvojem a snahou automatizovat co možná nejvíce procesů výrobní sféry tak počítače pronikají do všech průmyslových odvětví a jsou hlavním prvkem řídicích, ovládacích a kontrolních systémů daného procesu. Nároky kladené na odolnost počítačů jsou neustále zvyšovány, neboť právě na nich většinou stojí a padá celý řízený proces. Na počítače, resp. počítačové zdroje a jejich odolnost je soustředěna pozornost i v rámci této disertační práce a tvoří tak první skupinu testovaných zařízení.

Další skupinu citlivých zařízení, která je v rámci disertační práce důkladně otestována, tvoří el. světelné zdroje. Světelné zdroje jsou v dnešní době samozřejmou součástí života a život bez nich si prakticky nikdo nedokáže představit. Nalezly využití jak v domácnostech, tak v průmyslu pro umělé osvětlení výrobních hal, pouliční osvětlení apod. Opět, dle specifikace osvětlovaného prostoru, jsou kladeny požadavky na důležitost správně fungujícího osvětlení. Je zřejmé, že nároky na odolnost světelných zdrojů se budou lišit v závislosti na tom, jestli je osvětlovaným prostorem např. operační sál, výrobní hala nebo obyčejná domácnost. Prostory zvláště citlivé na kvalitu osvětlení (např. nemocnice) jsou vybaveny záložními zdroji napájení, které v případě déletrvajících výpadků síťového napájení přecházejí do provozního režimu a dodávají energii světelným zdrojům a dalším funkčně důležitým zařízením.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

Co se však týká krátkodobých událostí na napětí, je kvalita osvětlení odkázána na vlastnosti použitých světelných zdrojů a míře jejich odolnosti vůči těmto jevům.

Seznam všech testovaných světelných zdrojů resp. počítačových zdrojů je uveden v tabulkách Tab. 12 resp. Tab. 13.

Tab. 12 Seznam testovaných světelných zdrojů

Označení	Použitá topologie (Obr. 24)	Specifikace světelného zdroje
L1	a)	Žárovka TUNGSRAM 60W, 230V, bez předřadníku
L2	a)	Halogenová žárovka OSRAM 42W, 230V, bez předřadníku
L3	e)	Kompaktní zářivka PHILIPS SL 13W, 230V, vestavěný indukční předřadník
L4	g)	Kompaktní zářivka OSRAM EL 23W/830, 230V, vestavěný elektronický předřadník
L5	j)	Kompaktní indukční zářivka LVD Saturn 40W, 230V, vestavěný elektronický předřadník
L6	e)	Lineární zářivka PHILIPS TL-D 18W, 230V, indukční předřadník LAYRTON ARC 20W
L7	e)	Lineární zářivka PHILIPS TL-D 18W, 230V, indukční předřadník LAYRTON ARC 20W, PFC kondenzátor 4,7 μ F
L8	e)	Lineární zářivka OSRAM L58W/20, 230V, indukční předřadník LAYRTON ARC 65/23
L9	g)	Lineární zářivka OSRAM L36W/20, 230V, elektronický předřadník ZUMTOBEL LM-PCA 2/32
L10	h)	Lineární zářivka OSRAM L58W/20, 230V, elektronický předřadník HELVAR 1x58W HFC
L11	k)	Lineární LED zářivka, 230V, vestavěný elektronický snižovací měnič (step-down converter)
L12	d)	Vysokotlaká sodíková výbojka TESLA SHL 50W, 230V, indukční předřadník VOSSLOCH SCHVABE 50W, 8 μ F
L13	d)	Vysokotlaká sodíková výbojka OSRAM VIALox 70W, 230V, indukční předřadník ERC 70W, 12,5 μ F
L14	d)	Vysokotlaká rtuťová výbojka TESLA RVL-X 80W, 230V, indukční předřadník ERC 80W, 8 μ F
L15	d)	Halogenidová výbojka OSRAM 150W (POWERSTAR), 230V, indukční předřadník TRIDO-NIC.ATCO 150W, 20 μ F
L16	d)	Vysokotlaká halogenidová výbojka PHILIPS HPI-T 400W, 230V, indukční předřadník TRM 400W, 30 μ F

Z tabulky Tab. 12 je zřejmé, že výběr světelných zdrojů určených k testování nebyl proveden náhodně, ale tak, aby každá skupina světelných zdrojů dělená podle principu vzniku světla (tepelné, výbojové, nízkotlaké, vysokotlaké, sodíkové, rtuťové, halogenidové, LED, atd.) byla obsažena minimálně jedním zástupcem. V závislosti na typu světelného zdroje a použitého předřadníku (u výbojových sv. zdrojů) se rovněž liší i způsob připojení a topologie sv. zdrojů. Rozdíly mezi topologiemi vybraných světelných zdrojů jsou nastíněny na obrázku Obr. 24. [26]

Tab. 13 Seznam testovaných počítačových zdrojů

Označení	Specifikace počítačového zdroje
PC1	FORTRON FR 200 AT
PC2	MOREX 200W AT, pasivní L-C PFC obvod
PC3	MACASE 250WAT, pasivní L-C PFC obvod
PC4	ANS 250W ATX, pasivní L-C PFC obvod
PC5	CWT 235W ATX, pasivní L-C PFC obvod, SMPS s výstupní zpětnou vazbou
PC6	ANS 300W ATX, pasivní L-C PFC obvod
PC7	FORTRON 300W ATX (ver.0), aktivní PFC obvod
PC8	FORTRON 300W ATX, aktivní PFC obvod s omezením proudové smyčky

Výběr počítačových zdrojů byl opět poznamenán snahou postihnout co možná nejvíce možných variant lišících se nejen výrobcem, ale také použitým opatřením pro zlepšení účinnosti zdrojem odebíraného elektrického proudu (typ obvodu PFC – Power Factor Corrector). Příklady topologií počítačových zdrojů jsou uvedeny na obrázku Obr. 25.

4.2 Rozbor vybraných parametrů ovlivňujících odolnost el. zařízení

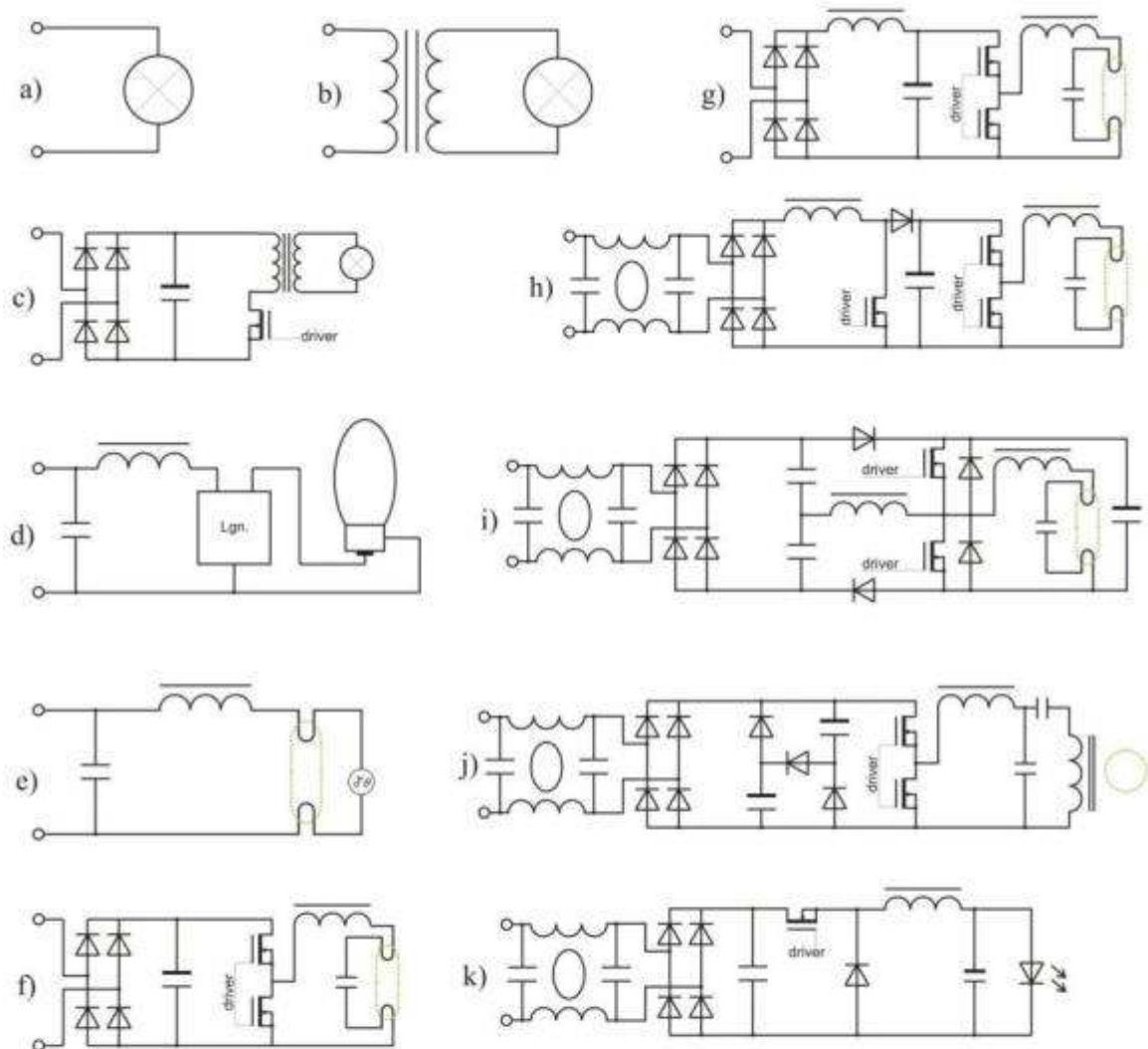
Úroveň odolnosti elektrických zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí je závislá na mnoha faktorech, jež byly stručně zmíněny v kapitole 2.2.3 s názvem Měření křivek odolnosti. Zde bylo uvedeno třídění ovlivňujících činitelů na skupiny obsahující parametry napětí, parametry samotného zařízení a další neelektrické parametry. V dalším textu nebude brán zřetel na skupinu neelektrických parametrů, rozebrány budou pouze významné parametry týkající se napájecího napětí a testovaného elektrického zařízení.

4.2.1 Topologie a konstrukční provedení el. zařízení

Významný vliv na odolnost el. zařízení mají konstrukční vlastnosti daného zařízení, a zejména způsob připojení zařízení k napájecí síti. Způsobem připojení je přitom myšleno rozdílné vnitřní uspořádání elektronických součástek tvořících kompletní elektrický obvod (tzv. schéma zapojení neboli topologie) daného zařízení. Jsou-li uvažovány pouze k testování vybrané dva typy elektrických zařízení (počítačové zdroje, světelné zdroje), rozdílnost použitých topologií vyplývá z provozních vlastností počítačového resp. světelného zdroje. Co se týká počítačových zdrojů, základním prvkem je spínaný zdroj napájení (SMPS - switch mode power supply), jehož rozdílná provedení právě udávají zmiňovanou topologii. Pro SMPS napájené z nn sítě je typickým znakem nízká hodnota účinnosti odběru ($0,5 \leq \lambda \leq 0,6$), neboť z el. sítě odebírají neharmonický impulsní proud. Pro zlepšení účinnosti odběru λ bývá SMPS doplněn o PFC obvod, který může být v pasivním nebo aktivním provedení. Použitím PFC obvodu se omezí odběr proudu na harmonických kmitočtech vyšších řádů – průběh odebíraného proudu se přiblíží sinusovému a účinnost se dostává blíže požadované hodnotě $\lambda = 0,95$. Příklady topologií počítačových zdrojů jsou zobrazeny na obrázku Obr. 25.

U světelných zdrojů je situace obdobná. Když nebereme v úvahu klasické žárovky, které neobsahují žádné elektronické prvky, vyznačují se odporovým charakterem zátěže (wolframové vlákno) a jejich vyzařovaný světelný tok je úměrný velikosti přivedeného napětí, tak všechny zbylé druhy sv. zdrojů potřebují pro svou činnost napětí jiných než síťových parametrů, čehož je u výbojových sv. zdrojů dosaženo použitím tzv. předřadníku, u žárovek na

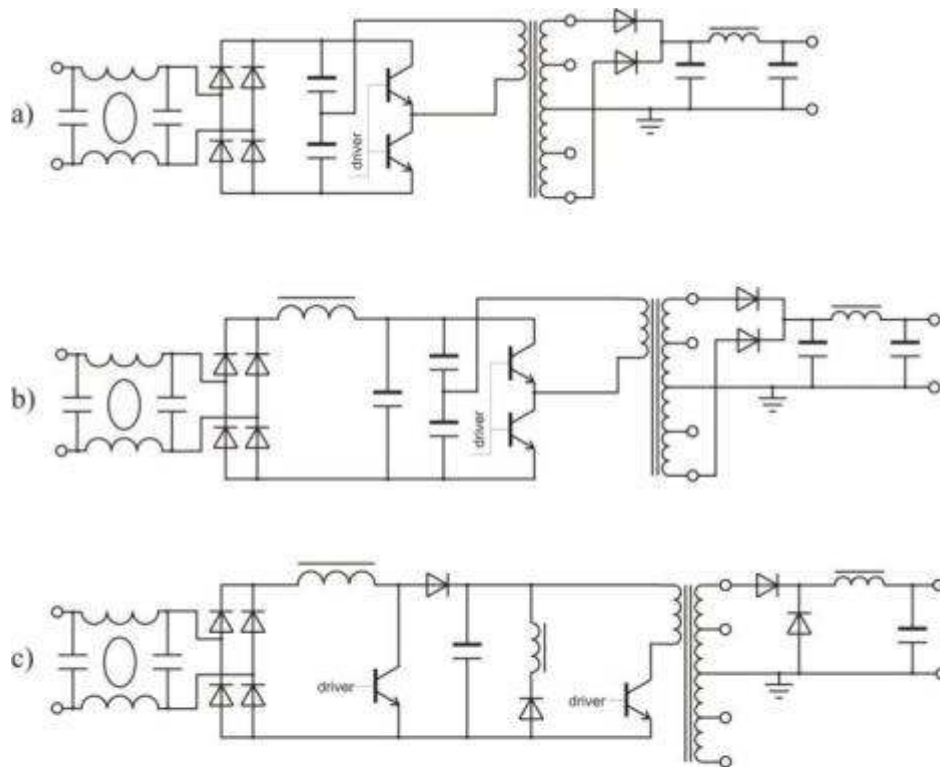
malé napětí použitím snižovacího transformátoru, apod. Předřadník může být buď v indukčním nebo elektronickém provedení, a jeho úkolem je upravit vstupní napětí na takové parametry, které jsou potřebné pro zapálení výboje a jeho následné udržení (týká se výbojových sv. zdrojů), případně upravit velikost napětí na hodnoty potřebné pro provoz LED světelných zdrojů nebo např. halogenových žárovek na malé napětí. Použití elektronických obvodů opět přináší horší hodnotu účinnosti odebíraného proudu, neboť jsou opět odebírány neharmonické proudy, a proto i zde nalézají uplatnění PFC obvody, případně další řídicí a regulační smyčky zajišťující správné parametry napětí na vlastním světelném zdroji. Schémata zapojení různých světelných zdrojů jsou k vidění na obrázku Obr. 24. [26]



Legenda

- a) žárovky připojené přímo na síťové napětí; b) žárovky připojené přes snižující transformátor; c) žárovky připojené na oddělené napájení přes snižující měnič; d) vysokotlaké výbojky s indukčním předřadníkem; e) zářivky s indukčním předřadníkem; f) zářivky s elektronickým předřadníkem; g) zářivky s elektronickým předřadníkem a pasivním PFC obvodem; h) dvojstupňový elektronický předřadník s aktivním zvyšujícím PFC obvodem; i) jedноступňový elektronický předřadník s aktivním zvyšujícím PFC obvodem; j) bezelektrodová indukční zářivka v zapojení se standardním AC/DC měničem a vysokofrekvenčním DC/AC měničem a napájená přes vazební indukčnost; k) jedноступňový snižující neizolovaný měnič pro LED s aktivním PFC obvodem

Obr. 24 Rozdíly mezi topologiemi světelných zdrojů [26]

**Legenda**

a) spínaný zdroj napájení s propustnou topologií

b) spínaný zdroj napájení s propustnou topologií a pasivním PFC obvodem

c) spínaný zdroj napájení s blokující topologií a aktivním zvyšujícím PFC obvodem

Obr. 25 Rozdíly mezi topologiemi různých počítačových zdrojů

4.2.2 Zvolené funkční kritérium

Funkční kritérium a jeho výběr je nejdůležitějším krokem pro dosažení relevantních výsledků během měření a zásadně ovlivňuje reprodukovatelnost výsledků případně opakovatelnost testu. Funkční kritéria bývají stanovena na základě principu činnosti testovaného zařízení, a proto je nelze stanovit hromadně pro všechna el. zařízení. Rovněž je vhodné stanovit funkční kritéria tak, aby sledovaná veličina mohla být vyhodnocována automaticky příslušnými měřicími přístroji, a vliv lidského faktoru při vyhodnocování byl co možná nejvíce potlačen. U zvolených dvou typů el. zařízení připadají v úvahu níže popsaná funkční kritéria.

Světelné zdroje

Vzhledem k tomu, že obecně stanovená funkční kritéria pro testování el. zařízení [7], a speciálně pro světelné zdroje stanovená kritéria [25] se jeví jako nedostatečná pro uskutečnění měření odolnosti světelných zdrojů (nejsou definovány jednoznačné limitní úrovně pro splnění jednotlivých kritérií), v souladu s [25] byly provedeny následující upřesnění. Kritérium A může být chápáno jako tolerovatelná změna výstupního parametru světelného zdroje, kritérium B jako netolerovatelná změna výstupního parametru sv. zdroje a kritérium C jako výpadek činnosti sv. zdroje následovaný jeho restartováním. Stanovení odpovídajícího kritéria pak může být soustředěno pouze na zodpovězení otázky, zda je pozorovatelem zaznamenaná změna sv. toku či svítivosti tolerovatelná či nikoli (ANO značí kritérium A, NE značí kritérium B), a dále otázky, zda došlo k výpadku sv. zdroje (ANO značí kritérium C, NE značí kritérium B). Na základě tohoto rozhodovacího procesu byla pro měření stanovena následující funkční kritéria:

- AB1) pokles napětí vyvolá změnu světelného toku, která, měřená objektivním flickrem [33], odpovídá hodnotě okamžité míry vjemu flickru $P_f = 1$ s uvažovanou tolerancí 1%. Tato hodnota odpovídá stavu, kdy 50 procent lidské populace zaznamená změnu sv. toku a zbylých 50 procent změnu nezaznamená. Pokud okamžitá hodnota míry vjemu flickru P_f během zkoušky a po jejím skončení dosahuje hodnoty nižší nebo maximálně rovné 1, výsledek zkoušky odpovídá kritériu A; je-li $P_f > 1$, výsledek zkoušky odpovídá kritériu B.
- AB2) pokles napětí způsobí blikání (problíknutí) světelného zdroje, které vede na rušení zrakového vjemu průměrného pozorovatele. Velikost rušivého vjemu blikání odpovídá krátkodobé míře vjemu flickru $P_{st} = 1$ s uvažovanou tolerancí 1%. Světelný tok je opět měřen pomocí objektivního flickrometru a P_{st} je vyhodnocována v desetiminutových intervalech, přičemž každý interval začíná okamžikem spuštění testu. Vyhodnocení zkoušky je obdobné jako u kritéria AB1).
- AB3) střední hodnota pomocí Butter-Worth filtru 6th řádu (dolní propust) vyhlazeného světelného toku poklesne o 15% (s tolerancí 0,5%) z původní hodnoty před počátkem zkoušky. Dosahuje-li změna vyhlazeného světelného toku hodnoty nižší nebo maximálně rovné 15%, je výsledek zkoušky hodnocen kritériem A; v opačném případě kritériem B. Mezní frekvence Butter-Worth filtru je nastavena na 35Hz, což přibližně odpovídá dynamické odezvě lidského oka.
- AB4) střední hodnota pomocí Butter-Worth filtru 6th řádu (dolní propust) vyhlazeného světelného toku poklesne na hodnotu, která odpovídá střední hodnotě vyzařovaného sv. toku při snížené velikosti napájecího napětí $U_n - 10\%$. Poklesne-li střední hodnota sv. toku pod limitní úroveň, výsledek zkoušky je hodnocen kritériem B; v opačném případě kritériem A.
- BC) okamžitá hodnota světelného toku vlivem poklesu/přerušování napětí klesá na hodnotu 3% (s tolerancí 0,5%) jmenovité hodnoty, a dochází k restartování světelného zdroje. Klesne-li okamžitá hodnota sv. toku na 3% a níž, je výsledek zkoušky ohodnocen kritériem C; v opačném případě kritériem B.

Funkčních kritérií může být samozřejmě stanoveno mnohem více než uvedených 5, ale pro účely této práce byla vybrána pouze ta kritéria, která přímo souvisejí s normami předepsanými změnami svítivosti či vyzařovaného světelného toku během zkoušek odolnosti (AB3, BC) [25], nebo změna sv. toku souvisí s definovanými charakteristikami napětí ve veřejné napájecí síti nn [1] (kritéria AB4, AB2 potažmo AB1).

Počítačové zdroje

Počítačový zdroj obsahuje spínaný zdroj napájení, který bez nutnosti transformace mění vstupní síťové napětí hodnoty 230V na stejnosměrné malé napětí několika úrovní. Nejznámějšími jsou napětí +3,3V, +5V, +12V. Těmito napětími je napájena nejen základní deska, ale rovněž všechny ostatní hardwarové části celého počítače. Počítačový zdroj v sobě obsahuje také kontrolní obvody, které hlídají velikost napětí v každé z napětíových úrovní. Pro případ, že některá úroveň napětí nedosahuje požadované velikosti (vždy je počítáno s určitou tolerancí napětí), je ze zdroje do základní desky vyveden speciální vodič, kterým je základní desce vydán povel k vypnutí procesoru a periférií, čímž jsou tyto prvky chráněny před možným poškozením v důsledku neodpovídající velikosti napětí. Tento vodič (v dalším textu bude označován jako „power good“) je typický šedým zbarvením a během normálního chodu počítače je v něm napětí 5V. Jakmile dojde vlivem poklesu napětí v napájecí síti

k situaci, že zdroj již není schopen dodávat do periférií napětí v požadovaných úrovních, napětí „power good“ vodiče klesá na nulovou hodnotu a dochází k vypnutí počítače. Po skončení poklesu napětí v síti, kdy napětí všech úrovní opět dosahuje předepsaných hodnot, se napětí „power good“ vodiče opět vrací na hodnotu 5V, čímž je vydán pokyn k znovu-zapnutí počítače. Proces je znám jako restart počítače. Jako funkční kritérium se tedy nabízí zvolit pokles napětí v „power good“ vodiči.

Pokles či přerušení napětí v napájecí síti nemusí vždy způsobit jen restart počítače, v některých případech dochází i k zamrznutí systému. Pro uživatele však mají jak restart počítače, tak zamrznutí systému stejné následky – dochází ke ztrátě dat. Navíc, zamrznutí systému je jev, který automaticky nevymizí po skončení působení poklesu napětí a vyžaduje zásah uživatele, neboť je nutné manuálně celý počítač restartovat. Zamrznutí je tedy možné považovat za další možné funkční kritérium, přičemž jeho automatické vyhodnocování je možné postavit na posílání přesně definovaného digitálního signálu do testovaného počítače (přes rozhraní USB, RS 232 apod.) a monitoringu odezvy operačního systému. Toto funkční kritérium však nebylo testováno. Pro testování počítačových zdrojů bylo zvoleno pouze funkční kritérium:

- AD) pokles napětí vodiče „power good“ na hodnotu 4,5V (z původní hodnoty 5V) a s tím související restart operačního systému a ztráta dat. Dojde-li během zkoušky k poklesu napětí vodiče „power good“ na 4,5V nebo méně, výsledek zkoušky je hodnocen kritériem D; v opačném případě kritériem A (neboť počítač je schopen dál pracovat).

4.2.3 Aktuální zatížení elektrického zařízení

Míra odolnosti zařízení závisí kromě jiného také na aktuálním stavu daného zařízení. Je zřejmé, že odolnost zařízení bude jiná, pracuje-li ono zařízení ve svém nominálním režimu, než v případě, že se stejné zařízení nachází v pohotovostním stavu. Bez potřeby jakéhokoliv předchozího měření lze konstatovat, že odolnost zařízení bude klesat s rostoucím zatížením daného zařízení. Aplikováním výše uvedeného na příkladu počítačového zdroje napájecího celou sestavu lze říci, že odolnost celé sestavy bude záviset na konfiguraci počítače a jeho aktuálním vytížení před vznikem, během trvání a po skončení napětí události (vytížením je myšlena náročnost na počítači běžících aplikací). Čím vyšší nároky na procesor a paměť má spuštěná aplikace, tím vyšší proud je odebírán z pc zdroje, a tím má celá sestava nižší odolnost. Závislost mezi odolností sestavy (zdroje) a jejím zatížením však není lineární (nelze říct, že kolikrát se zvedne zatížení, tolikrát klesne odolnost), neboť významnou roli zde hraje provedení vlastního počítačového zdroje a jeho topologie. Změření vlivu zatížení el. zařízení na jeho odolnost spočívá ve změření imunitní křivky zvláště pro každou nastavenou úroveň zatížení a jejich následným vzájemným srovnáním.

U sv. zdrojů, které trvale pracují ve jmenovitém provozním stavu, tedy při jmenovitém zatížení, se dá za změnu zatížení považovat regulace vyzařovaného sv. toku. Světelné zdroje jsou vyráběny s externí nebo interní regulací, což je zajišťováno buďto přímo použitým předradníkem (měničem), nebo přídatným regulátorem (fázový regulátor, autotransformátor, transformátor s odbočkami apod.)

4.2.4 Velikost napětí před a po skončení poklesu napětí

Jmenovitá hodnota napětí elektrických sítí nn je stanovena na 230V, proto jsou jednofázové elektrické spotřebiče a zařízení navrhovány a konstruovány právě na tuto hodnotu napětí. Na většině elektrických zařízení výrobce udává povolený rozsah napětí, který se pohybuje v řádu jednotek procent kolem hodnoty jmenovitého napětí sítě, např. 220-240V. K oběma

krajním hodnotám uvedeného rozsahu je nutné ještě přičíst v el. síti povolenou trvalou odchylku napětí, která je v sítích nn rovna $\pm 10\%$ a v získaném rozsahu výrobce garantuje správný chod svého zařízení. Je tedy důležité, aby jmenovitá hodnota napětí el. sítě, v níž má být používán daný el. spotřebič, spadala do rozsahu napětí uvedeného na spotřebiči. Elektrická zařízení obsahující prvky výkonové elektroniky, např. zmiňované spínané zdroje (SMPS), na proměnnou hodnotu vstupního napětí reagují proměnným nabitím kondenzátorů, které mimo jiné slouží jako zásobníky energie, s čímž souvisí proměnlivá schopnost zařízení přestat vzniklý pokles napětí bez nežádoucího ovlivnění funkce. Je tedy zřejmé, že nastane-li pokles napětí z hodnoty 253V (krajní hodnota intervalu $U_n + 10\%$), odolnost bude u většiny zařízení větší nežli u poklesu vzniklého ze jmenovité hodnoty napětí nebo dokonce z hodnoty 207V (krajní hodnota intervalu $U_n - 10\%$).

4.2.5 Harmonické zkreslení napájecího napětí před vznikem, po skončení a během poklesu napětí

Ačkoli je v elektrárnách vyráběná elektrická energie charakterizována harmonickým průběhem napětí, vlivem spotřebičů odebírajících neharmonické proudy (frekvenční měniče, spínané zdroje, kompaktní zářivky, svářečky a mnoho dalších) se tyto proudy šíří elektrickou sítí a na impedanci sítě vytvářejí neharmonické úbytky napětí, které deformují původně vyráběnou sinusovou křivku napětí. U deformované křivky napětí pak nelze uplatňovat vztah (6) mezi efektivní hodnotou napětí a maximální hodnotou napětí, neboť tento vztah platí pouze u veličin harmonických průběhů.

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \quad (6)$$

Deformovaný průběh napětí o nezměněné efektivní hodnotě (230V) může dosahovat maximální hodnoty mnohem vyšší než standardních $\sqrt{2} \cdot 230 = 325,27V$ typických pro nezkreslenou křivku napětí. Maximální hodnota deformovaného průběhu napětí může být i nižší než standardních 325,27V, a její velikost je závislá na tvaru deformovaného průběhu. Pro zkoušky odolnosti el. zařízení nízkého napětí se jmenovitým proudem do 16A se vychází z testovacích průběhů definovaných v [34]. Za typické deformace se považují dva typy deformovaných průběhů, a sice křivka s tzv. useknutým vrcholem („Flat top“) a křivka s tzv. vyvýšeným vrcholem („Overswing“). Z názvu obou typů deformovaných průběhů vyplývá, že „Flat top“ průběh má nižší maximální hodnotu napětí a „Overswing“ průběh má vyšší maximální hodnotu napětí než nezkreslený sinusový průběh napětí.

Opět na základě konstrukčního uspořádání a topologie konkrétního zařízení lze rozlišovat dvě základní skupiny el. zařízení, a sice „zařízení reagující na změnu efektivní hodnoty vstupního napětí“ a „zařízení reagující na změnu maximální hodnoty vstupního napětí“. Spadá-li zařízení do skupiny první, tzn. že reaguje na změnu ef. hodnoty, deformovaný průběh napětí o nezměněné efektivní hodnotě (stále 230V) by se neměl projevit na úrovni odolnosti daného zařízení, a naopak, spadá-li zařízení do skupiny reagující na změnu max. hodnoty napětí, deformovaný průběh napětí by se na odolnosti zařízení již měl projevit.

4.2.6 Fázový úhel vzniku a zániku poklesu napětí

Fázový úhel vzniku poklesu napětí vyjadřuje hodnotu fázového posunu mezi okamžikem, kdy křivka napětí prochází nulovou hodnotou a okamžikem, kdy dochází ke vzniku poklesu napětí. Hodnota proměnného fázového úhlu vzniku poklesu/přerušeni napětí může souviset (dle typu el. zařízení) s velikostí naakumulované vnitřní energie el. spotřebičů. Dojde-li ke vzniku poklesu napětí v okamžiku, kdy sinusová křivka napětí prochází právě maximem (φ

$= 90^\circ$), pak je velikost naakumulované energie největší; naopak při vzniku poklesu napětí v úhlu $\varphi = 0^\circ$ (procházení křivky napětí nulou) je velikost naakumulované energie minimální. S velikostí naakumulované vnitřní energie pak souvisí i schopnost zařízení „přestát bez újmy“ v síti nastalý pokles napětí.

S měnící se hodnotou fázového úhlu vzniku poklesu napětí a s měnící se délkou trvání samotného poklesu napětí dochází také ke změnám fázového úhlu zániku poklesu napětí – viz rovnice (7).

$$\varphi_{konec} = \varphi_{zacatek} \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (7)$$

V rovnici (7) figurují následující veličiny:

φ_{konec}	fázový úhel zániku poklesu napětí ($^\circ$)
$\varphi_{zacatek}$	fázový úhel vzniku poklesu napětí ($^\circ$)
Δt	délka trvání poklesu napětí (ms)
T	perioda signálu napětí (ms)

Fázový úhel zániku poklesu napětí je specifická veličina, která udává okamžik obnovení napětí. S okamžikem obnovení napětí souvisí impulsní nárůst odebíraného proudu (proudový ráz), který může dosahovat až několikanásobně vyšších hodnot než proud jmenovitý. Proudovým nárazem vytvořené teplo se nemusí podařit bezpečně odvést a může v krajním případě způsobit až poškození daného zařízení. Velikost proudového rázu je ovlivněna okamžikem obnovení napětí. Dojde-li k obnovení napětí v okamžiku průchodu křivky napětí maximem, proudový ráz dosahuje největších hodnot a v některých případech vede k destrukci testovaného zařízení nebo jeho části. V opačném případě – dojde-li k obnovení napětí v okamžiku jeho průchodu nulou, dosahuje proudový ráz mnohem nižších hodnot a testované zařízení obvykle zůstane nepoškozeno. Lze tedy soudit, že fázový úhel vzniku potažmo zániku poklesu napětí bude mít nemalý vliv na výsledky zkoušek odolnosti.

4.2.7 Tvar poklesu napětí

Tvar poklesu napětí je dán příčinou jeho vzniku. Pokles napětí způsobený zkratovou poruchou, případně chybnými manipulacemi v el. síti má průběh blížící se ideálnímu obdélníku s dobami sestupné a náběžné hrany zanedbatelnými vůči době trvání celého poklesu. V elektrické napájecí síti se však vyskytují také poklesy napětí vyvolané spouštěním velkých zátěží indukčního charakteru, pro které je typickým pilový průběh poklesu. Napětí pilového poklesu v okamžiku jeho vzniku prudce padá na novou hodnotu (tato hodnota představuje minimální hodnotu napětí během celého poklesu), načež následuje pozvolný nárůst napětí zpět na hodnotu blízkou hodnotě před vznikem poklesu. Rozdíl mezi oběma průběhy je zobrazen na Obr. 6.

Pro elektrická zařízení mají obdélníkové události (poklesy a přerušení napětí) mnohem horší následky než události pilových průběhů, neboť např. u obdélníkových přerušení napětí není energie po celou dobu trvání přerušení napětí dodávána ze sítě a zařízení se snaží využít naakumulovanou vnitřní energii (vyčerpá-li se naakumulovaná energie dříve než skončí přerušení napětí, el. zařízení přestává vykonávat svoji funkci), kdežto u pilového přerušení napětí je el. zařízení alespoň částečně zásobováno energií po celou dobu trvání přerušení.

4.2.8 Sekvenční poklesy napětí

Zatímco až dosud byl uvažován vliv jednotlivých poklesů a přerušení napětí na konkrétní el. zařízení, kdy při testování odolnosti byly mezi sebou jdoucími zkouškami dodržo-

vány dostatečně dlouhé časové intervaly, během nichž se testované zařízení dokázalo vrátit do svého původního, většinou nominálního stavu, nyní bude uvažován vliv tzv. sekvenčních poklesů napětí, kdy v rychlém sledu za sebou nastávají dva a více poklesů napětí. Sekvenční poklesy napětí vznikají v el. síti např. vlivem působení automatik opětného zapínání OZ, kdy jedna porucha způsobující pokles napětí je ochranami vypnuta, a hned vzápětí je aktivována automatika OZ, která původní poruchou postiženou část vedení znovu připojí k napájení, čímž dochází k ověření trvání poruchy. Pakliže porucha stále trvá, znovu zareagují příslušné ochrany a postižená část vedení je opět odpojena (již trvale), což má za následek vznik dalšího poklesu/přerušeni napětí. Připojená el. zařízení jsou tedy v okamžiku, kdy se ještě nestihla plně zotavit z předchozího poklesu napětí, vystavena dalšímu poklesu, což se zákonitě projeví v nižší odolnosti na tyto následné poklesy.

Vzhledem k současnému trendu minimalizace rozměrů el. zařízení se stále zmenšují rozměry součástek (SMD součástky) a roste jejich hustota osazení na plošných spojích (SMT technologie), což přispívá k většímu zahřívání součástek a k stále rostoucím požadavkům na chlazení el. zařízení. Nemá-li zařízení dostatečně vyřešeno chlazení, zásadně klesá jeho schopnost „ustát“ proudový náraz spojený s obnovením napětí po proběhnuvším poklesu napětí. Velikost proudového rázu závisí na okamžiku obnovení napětí – viz kapitola 4.2.6. Je zřejmé, že sekvenční poklesy napětí způsobí několik proudových rázů v rychlém sledu po sobě, čímž výrazně vzroste tepelné namáhání elektronických součástek a může vést až k destrukci méně odolných součástek.

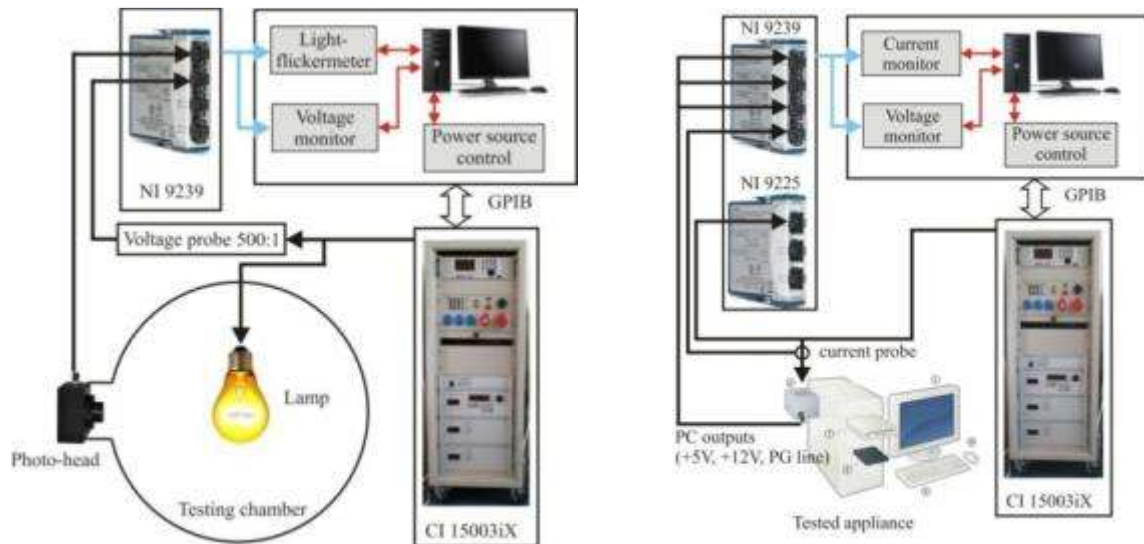
4.3 Testovací systém a popis samotného procesu testování

Objektivní testování odolnosti el. zařízení je podmíněno jednak použitím schválených a k tomuto účelu určených el. zařízení (myšleno především testovací zdroj napětí a měřící aparatura), a jednak dodržením definovaných postupů během samotného testování odolnosti el. spotřebičů. Pouze správně zvolený postup testování a jeho striktní dodržování zaručuje dosažení objektivních výsledků a možnost opakovatelnosti testů při očekávaném dosažení stejných výsledků.

4.3.1 Testovací a měřicí systém

Základní částí testovacího systému je zdroj napětí od firmy California Instruments s označením CI 15003iX. Jedná se o plně programovatelný, softwarově řízený trojfázový zdroj napětí o výkonu 3x5kVA, který vytváří plnohodnotnou elektrickou síť zcela oddělenou od vstupní napájecí sítě, čímž je zamezeno proniknutí elektromagnetického rušení z el. sítě na výstup zdroje. Na výstupu zdroje je primárně generována sinusová křivka napětí s v čase konstantní frekvencí 50Hz a efektivní hodnotou 230V a fázovým natočením po sobě jdoucích fází o 120°. Pomocí ovládacího softwaru je možné provádět úpravy libovolného napěťového parametru, je možné spouštět události na napětí, harmonickými složkami deformovat křivku napětí, apod. Z programovatelného zdroje napětí je napájeno testované zařízení. Je-li testovaným zařízením světelný zdroj, je tento umístěn do speciální testovací komory (kulový integrátor), a pomocí fotočlátku je vyzařovaný světelný tok transformován na snadno zpracovatelnou elektrickou veličinu, a sice elektrické napětí. Hodnota napětí na výstupních svorkách fotočlátku je přímo úměrná dopadajícímu světelnému toku, a tedy každá změna sv. toku se projeví změnou velikosti výstupního napětí. Jako fotočlánek je použit $V(\lambda)$ světelný senzor s vestavěným lineárním transimpedančním zesilovačem s volitelným zesílením a šířkou pásma až do 300kHz [33]. Signál z fotočlátku je dále přiveden na měřicí kartu NI 9239 firmy

National Instrument, která signál digitalizuje a předává k dalšímu zpracování softwaru LabVIEW. Na měřicí kartu je rovněž přiveden signál odpovídající napětí na testovaném el. zařízení. V LabVIEW jsou následně podle zvoleného funkčního kritéria vypočítány patřičné veličiny a výsledky porovnány s limitními úrovněmi zvoleného kritéria. Programovatelný zdroj napájení CI 15003iX, stejně jako nastavení parametrů měřicí karty NI 9239 a v LabVIEW vyvinutého vyhodnocovacího programu jsou ovládány pomocí počítače. Blokové schéma celého systému je na obrázku Obr. 26.



Obr. 26 Blokové schéma testovacího systému určeného k testování odolnosti světelných zdrojů (vlevo) a k testování počítačových zdrojů (vpravo)

Je-li testovaným zařízením počítačová sestava resp. počítačový zdroj napájení, testovací systém vypadá obdobně jako u testování světelných zdrojů, jen není potřeba používat kulový integrátor, na stejnou měřicí kartu budou přivedeny jiné signály a ve vyhodnocovacím programu je potřeba přepnout na testování počítačových zdrojů. Jako vstupy měřicí karty budou v tomto případě figurovat programovatelným zdrojem generované napájecí napětí 230V přiváděné na vstup testovaného zdroje, napětí 5V a 12V výstupu testovaného zdroje a napětí vodiče „power good“. Čelní panely vytvořených vyhodnocovacích aplikací pro světelné i počítačové zdroje jsou uvedeny v příloze na obrázku Obr. 63 resp. Obr. 64.

4.3.2 Testovací procedura

Průběh samotného testování se liší podle typu testovaného zařízení. Ne tak ani co se týče nastavování parametrů poklesů napětí a samotného testování, ale spíše v časové náročnosti prováděných zkoušek. Mezi jednotlivými zkouškami musí být dodrženy určité časové rozestupy, aby se zařízení po provedené zkoušce stihlo uvést do původního nominálního provozního stavu a stabilizovalo se v něm. Časové rozestupy mezi zkouškami se liší nejen podle testovaného zařízení, ale také podle výsledku předchozí provedené zkoušky. Je-li např. zkouška vyhodnocena jako úspěšná (zařízení vyhovělo zvolenému kritériu), není potřeba tak dlouhé časové prodlevy mezi zkouškami jako v případě, že je zkouška vyhodnocena jako neúspěšná (zařízení nevyhovělo zvolenému kritériu). Na základě principu funkce zvolených dvou typů el. zařízení (počítačové zdroje, světelné zdroje) je rovněž zřejmé, že časové rozestupy mezi zkouškami sv. zdrojů budou větší než rozestupy mezi zkouškami počítačových zdrojů. Zatímco počítač se po neúspěšné zkoušce restartuje a znovu naběhnutí operačního systému včetně stabilizace trvá v závislosti na výkonu počítače max. dvě tři minuty, u světelných zdrojů (vyjma tepelných sv. zdrojů) nastává po neúspěšné zkoušce dlouhodobý proces ustalování sv. toku na jmenovitých parametrech, což může např. u funkčního kritéria BC (dochází

k restartu sv. zdroje) trvat až 20 minut. Navíc, některé výbojové sv. zdroje nejsou schopny po vzniklém výpadku okamžitého restartu, neboť proces jejich najíždění do jmenovitého stavu je podmíněn startem ze studeného stavu.

Světelné zdroje

Každý testovaný světelný zdroj je nejdříve minimálně na dobu 20-ti minut připojen na jmenovité napětí a po uplynutí stanovené doby, kdy je zaručeno ustálení parametrů sv. zdroje na jmenovitých parametrech, je změřena hodnota vyzařovaného světelného toku, která odpovídá jeho jmenovité hodnotě. Poté je ef. hodnota napětí nastavena na hodnotu, ze které bude spuštěn první pokles napětí. Po ustálení světelného toku je spuštěn první pokles napětí o přesně definovaných parametrech. Současně je zaznamenávána odezva světelného zdroje na nastalý pokles napětí. Porovnáním změny sledované veličiny s limitní hodnotou zvoleného funkčního kritéria je získán výsledek zkoušky, na jehož základě jsou parametry poklesu napětí upraveny tak, aby další pokles napětí způsobil právě takovou změnu sledované veličiny, která je rovna limitní hodnotě zvoleného funkčního kritéria. Mezi spouštěnými poklesy napětí jsou dodržovány časové rozestupy (tzv. stabilizační intervaly), a sice 5 minut v případech vyhodnocení zkoušky kritériem A nebo B, a 20 minut při vyhodnocení zkoušky kritériem C. Tímto způsobem je proměřena celá imunitní křivka.

Počítačové zdroje

Počítačový zdroj napájející zvolenou počítačovou sestavu je připojen ke jmenovitému napětí a je vyčkáno, než proběhnou všechny automaticky spouštěné procesy a počítač je uveden do jmenovitého provozního stavu. Tento stav je charakterizován konstantními velikostmi napětí a odebíraných proudů na výstupu počítačového zdroje a k jeho docílení s přehledem stačí 5-ti minutový časový interval. Je zaznamenán aktuální příkon pc sestavy. Poté je ef. hodnota napětí nastavena na hodnotu, ze které bude spuštěn první pokles napětí. Po opětovném ustálení monitorovaných napětí a proudů na výstupu počítačového zdroje je spuštěn první pokles napětí o přesně definovaných parametrech. Současně je zaznamenávána odezva počítačového zdroje resp. operačního systému na nastalý pokles napětí. Nedojde-li vlivem poklesu napětí k poklesu napětí „power good“ vodiče na nulovou hodnotu (zvoleným kritériem je restart počítače) nebo ke ztrátě odezvy operačního systému na injektovaný signál (zvoleným kritériem je zamrznutí operačního systému), je výsledek zkoušky vyhodnocen jako akceptovatelná změna činnosti a parametry poklesu napětí jsou pozměněny směrem k závažnějším (při zadané délce trvání je sníženo zbytkové napětí; případně při stejném zbytkovém napětí je prodloužena délka trvání poklesu). Změny parametrů poklesů musí být provedeny velmi citlivě tak, aby byly nalezeny právě hraniční parametry poklesů napětí způsobujících již neakceptovatelnou změnu sledovaného parametru (již dochází k restartu počítače či zamrznutí operačního systému). Mezi spouštěnými poklesy napětí jsou opět dodržovány časové rozestupy, a sice 1 minuta v případech vyhodnocení zkoušky jako akceptovatelná změna funkce a 5 minut při vyhodnocení zkoušky jako neakceptovatelná změna funkce. Tímto způsobem je proměřena celá imunitní křivka.

Celý proces testování odolností el. zařízení lze poměrně jednoduše zautomatizovat. S využitím programovatelných zdrojů napájení (např. firmy California Instruments), moderních měřicích karet firmy National Instruments a na základě detailních znalostí ohledně zkoušek odolnosti a testování různých el. zařízení lze např. v grafickém prostředí LabVIEW vytvořit aplikaci, která bude řídit jak nastavování parametrů poklesů napětí, tak záznam a vyhodnocování výsledků jednotlivých zkoušek a samozřejmě také ukládání důležitých dat z průběhu celého testování. Celý proces testování by tak byl plně řízen počítačem, a vliv lidského faktoru na výsledky zkoušek by byl zcela minimalizován. Vývojový diagram kompletního automatizovaného testovacího systému by mohl vypadat např. jako na obrázku Obr. 27.

Po spuštění aplikace uživatel nastaví všechny potřebné údaje o měření, zejména vybere typ testovaného zařízení, z přednastavených možností zvolí požadované funkční kritérium, nastaví časové rozestupy mezi prováděnými zkouškami pro oba možné výsledky zkoušky (akceptovatelná nebo neakceptovatelná změna sledované veličiny), a vybere ty parametry poklesů napětí, jejichž vliv na odolnost el. zařízení bude testován. Odolnost el. zařízení může být testována buďto na poklesy napětí tzv. základních parametrů (sinusová křivka napětí bez uvažování harmonického zkreslení, jmenovité napětí před vznikem i po skončení poklesu, obdélníkový tvar poklesu, nulový fázový úhel vzniku poklesu, jmenovité zatížení testovaného zařízení), nebo na poklesy napětí o modifikovaných parametrech (harmonické zkreslení různých úrovní, proměnná velikost napětí před a po skončení poklesu, pilový případně jiný průběh poklesu, proměnná hodnota fázového úhlu vzniku poklesu). Najednou mohou být vybrány všechny z uvedených parametrů, ale při samotném testování je vždy zkoumán vliv pouze jednoho měnicího se parametru a pro tento měnicí se parametr je proměřena celá imunitní křivka. Ostatní parametry jsou přitom udržovány na konstantních hodnotách. Po provedení nezbytného úvodního nastavení aplikace přechází do režimu testování.

Na svorky testovaného el. zařízení je nejprve přivedeno napětí o jmenovitých parametrech, tzn. harmonickými nedeformovaná sinusová křivka napětí s frekvencí 50Hz a efektivní hodnotou 230V. Po uplynutí uživatelem nastavené časové prodlevy potřebné k ustálení parametrů testovaného zařízení na jmenovitých hodnotách je změřena velikost sledované veličiny a hodnota je uložena do paměti. Poté je vypočtena případně změřena hodnota sledované veličiny odpovídající limitní úrovni zvoleného funkčního kritéria, a tato je opět uložena do paměti. Této části celého testovacího procesu je nutno věnovat zvýšenou pozornost, neboť jsou zde získány hodnoty pro pozdější vyhodnocování výsledků jednotlivých zkoušek.

Následně program zjišťuje, zda uživatel zadal požadavek na změření imunitní křivky pouze pro základní parametry poklesů napětí, nebo žádá změření křivek také pro některé z dalších ovlivňujících parametrů (viz výše). Každý ovlivňující parametr může nabývat mnoha úrovní, v závislosti na tom, s jakým krokem se daný parametr bude měnit, a proto je každé úrovni přiřazeno určité pořadí podle toho, v jakém sledu se budou jednotlivé úrovně nastavovat. Základní úroveň každého parametru je označena číslem „1“, dalším variacím jsou přiřazena čísla postupně se zvyšující. Například parametr harmonické zkreslení – nedeformovaná sinusová křivka má číslo 1, „Flatop“ deformace s osmiprocentním zkreslením napětí má číslo 2, „Overswing“ deformace se stejnou úrovní zkreslení napětí je označena číslem 3, atd. Každý ovlivňující parametr je automaticky přednastaven na základní úroveň („1“) a pouze, je-li uživatelem vybrán k testování, jsou postupně tyto úrovně zvyšovány. Nedochozí tak k nežádoucímu zkreslení výsledků testování parametrem, jež vůbec nebyl vybrán. Za všech okolností je nejdříve hledána imunitní křivka základních parametrů poklesů napětí, kdy jsou všechny ovlivňující parametry označeny číslem „1“.

Nyní již program přistupuje k hledání prvního bodu imunitní křivky, kterým je pravý krajní bod imunitní křivky (případně její zjednodušené podoby). Nastaven je tedy pokles napětí o délce trvání 10s a zbytkovém napětí 90%. Způsobí-li pokles napětí právě limitní změnu sledované veličiny (danou vybraným funkčním kritériem), jsou parametry poklesu pod názvy Uk_n , Δt_n uloženy do paměti a program čeká po dobu t_1 než je nastaven další pokles napětí. Naopak, není-li poklesem napětí vyvolána limitní změna sledované veličiny, po uplynutí intervalu t_0 je spuštěn další pokles napětí, který má stejnou délku trvání, tzn. 10s, ale nižší hodnotu zbytkového napětí, přičemž stupňování je přednastaveno po 1V. Celý proces se opakuje až do té doby, než jsou nalezeny parametry poklesu napětí, který způsobí limitní změnu sledované veličiny. Obdobným způsobem je hledán i druhý krajní bod imunitní křivky, tentokrát levý. Je nastaven pokles napětí o zbytkovém napětí 0V a délce trvání 1ms. Způsobí-li tento pokles limitní změnu sledované veličiny, jsou parametry poklesu pod označením Uk_1 , Δt_1 ulo-

ženy do paměti a program čeká po dobu t_1 , v opačném případě program čeká pouze po dobu t_0 a nastaví další pokles napětí, který má stejné zbytkové napětí (0V), avšak délka trvání je prodloužena o 1ms. Proces se opět opakuje tak dlouho, než nastavený pokles způsobí funkčním kritériem definovanou limitní změnu sledované veličiny. Při znalosti obou krajních bodů lze vykreslit zjednodušenou imunitní křivku.

Proměření celé imunitní křivky spočívá v nalezení dalších na křivce ležících bodů. Pro vykreslení celé imunitní křivky je vhodné, aby byl nalezen dostatečný počet těchto bodů, a vzdálenosti mezi jednotlivými body křivky byly takové, aby byly postihnuty všechny přechodové části a kolena imunitní křivky. Pro zjištění délek trvání dalších bodů křivky lze uplatnit vztah (8), který zaručuje stejnou vzdálenost jednotlivých bodů křivky při logaritmickém zobrazení x-ové osy grafu. Vztah je založen na znalosti délek trvání poklesů napětí obou krajních bodů imunitní křivky.

$$\Delta t_i = 10^{\log \Delta t_1 + \frac{(i-1)(4-\log \Delta t_1)}{n-1}}, i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (8)$$

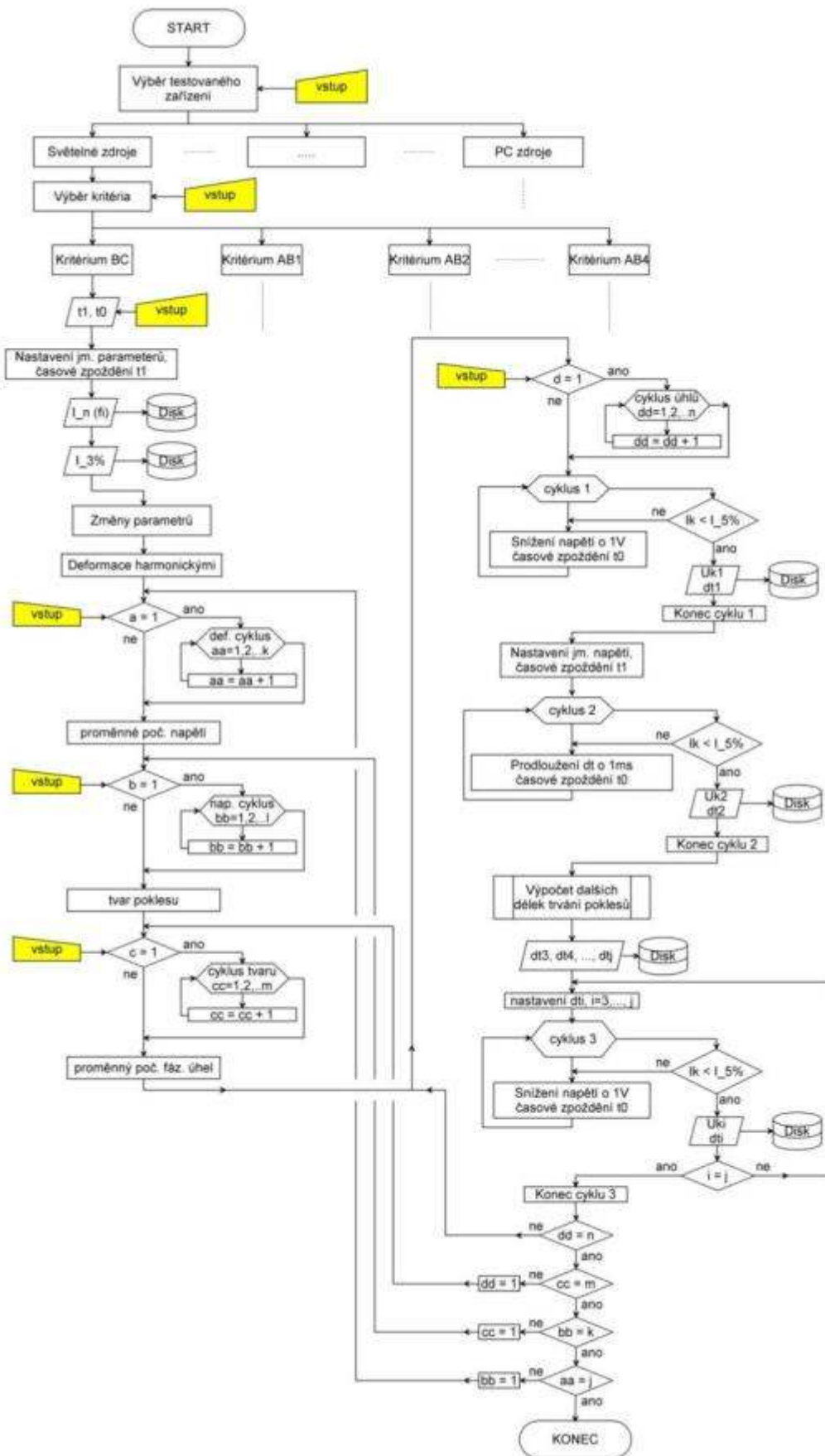
V rovnici (8) figurují následující veličiny:

Δt_i	délka trvání poklesu napětí označeného symbolem i (ms)
Δt_1	délka trvání poklesu napětí, který odpovídá levému krajnímu bodu imunitní křivky (pokles napětí na nulovou hodnotu), kdy tento pokles způsobí právě limitní změnu sledované veličiny dle zvoleného funkčního kritéria (ms)
n	počet požadovaných měřících bodů (-)

Délky trvání všech vypočtených dalších bodů křivky jsou uloženy do paměti pod označením $\Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_{n-1}$. V dalším kroku je tedy nastaven pokles napětí o délce trvání Δt_{n-2} a zbytkovém napětí Uk_n a opět se opakuje stejný vyhodnocovací postup jak při hledání pravého krajního bodu imunitní křivky. Postupně jsou pak nastavovány další vypočtené délky trvání $\Delta t_{n-3}, \Delta t_{n-4}, \dots$ a k nim jsou hledány odpovídající zbytková napětí $Uk_{n-3}, Uk_{n-4}, \dots$. Celý cyklus končí nalezením bodu o parametrech $Uk_2, \Delta t_2$. Nalezení všech bodů křivky umožňuje vykreslit její skutečnou podobu, která odpovídá vlivu základních parametrů poklesu napětí.

Byl-li uživatelem zadán i požadavek na změření křivek vyjadřujících vliv dalších proměnných parametrů (tvar poklesu, proměnné napětí, harmonické zkreslení křivky napětí, jiné zatížení, apod.), je v řetězci vývojového diagramu (viz Obr. 27) poslední uvedený parametr změněn na jinou než základní úroveň (úroveň dle výše uvedeného je označena „2“) a stejným postupem jako při hledání základní imunitní křivky je hledána imunitní křivka odpovídající změněnému vybranému parametru. Celý proces testování končí, jakmile jsou pro vybrané funkční kritérium proměřeny všechny vlivy uživatelem zvolených měřících se parametrů poklesů a jsou nalezeny všechny požadované imunitní křivky.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



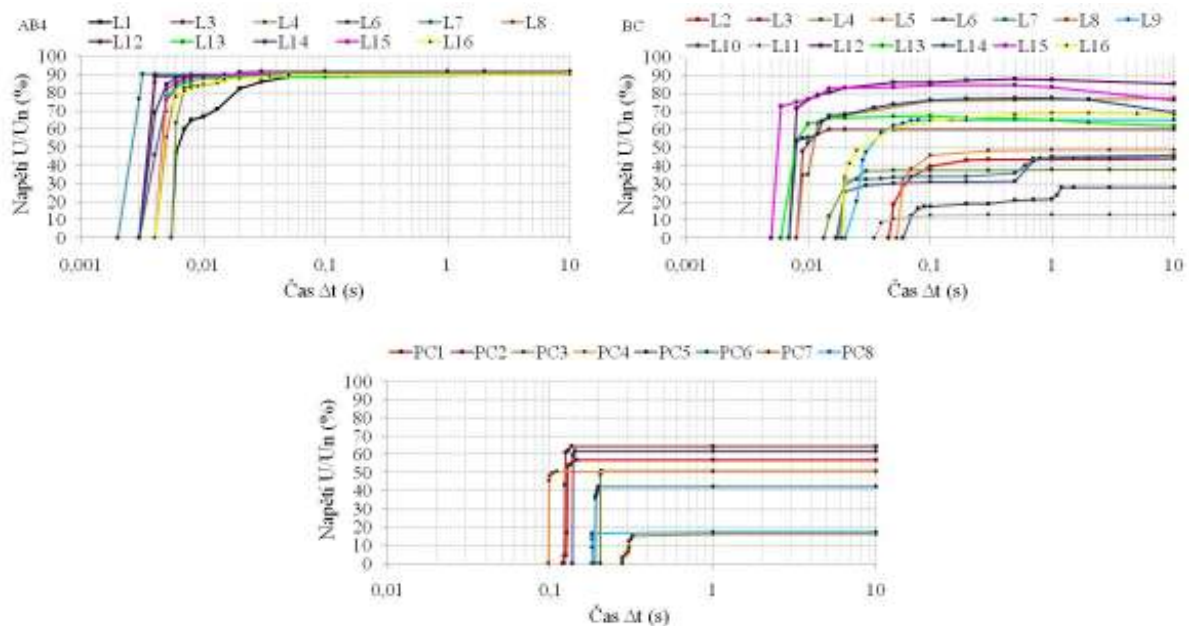
Obr. 27 Vývojový diagram automatizovaného testovacího systému

4.4 Změřené křivky odolnosti

Na základě výše popsaných parametrů ovlivňujících odolnost el. zařízení byly u zvolených el. zařízení proměřeny imunitní křivky pro každý z uvedených parametrů. Znovu je třeba připomenout, že pro všechny testované zařízení je změřena imunitní křivka vyjadřující odolnost zařízení vůči poklesům napětí základních parametrů (harmonickými nedeformovaná sinusová křivka napětí, jmenovitá hodnota napětí před vznikem a po skončení poklesu, obdélníkový tvar poklesu, nulová hodnota fázového úhlu okamžiku vzniku poklesu, jmenovité zatížení testovaného zařízení), a není tak uvažován vliv dalších ovlivňujících činitelů. Dále jsou pro vybrané typy zařízení změřeny imunitní křivky při některém proměnném dalším parametru poklesu a tyto jsou následně porovnány se základními imunitními křivkami.

4.4.1 Křivky odolnosti vyjadřující vliv topologie

Vybrané pc. zdroje a sv. zdroje byly podrobeny zkouškám odolnosti vůči základním parametrům poklesů napětí, ostatní parametry poklesu byly nastaveny na jmenovité parametry. Napájecí napětí tedy vykazovalo sinusový průběh s ef. hodnotou 230V, tvar nastavovaných poklesů napětí byl obdélníkový a poklesy napětí byly spouštěny v okamžiku průchodu křivky napětí nulovou hodnotou (nulový fázový úhel vzniku poklesu). Světelné zdroje se před testováním nacházely ve svém jmenovitém provozním stavu (jmenovité zatížení), zatímco pc zdroje byly zatíženy pouze výkonem, jež zaručuje stabilní chod operačního systému. Křivky odolnosti byly hledány pro kritéria AB4 resp. BC u sv. zdrojů, a pro kritérium AD u pc. zdrojů.



Obr. 28 Křivky odolnosti vyjadřující vliv topologie sv. zdrojů (nahore) a pc zdrojů (dole)

Z obrázku Obr. 28 je patrné, že konstrukční provedení testovaných sv. zdrojů a pc. zdrojů má výrazný vliv na míře jeho odolnosti vůči poklesům a kr. přerušením napětí. Obecně platí, že čím níže a čím více napravo se křivka nachází, tím odolnější je dané zařízení. Testováním bylo prokázáno, že, co se týče kritéria restartu sv. zdroje (kritérium BC) resp. restartu pc. zdroje, míra odolnosti obou typů zařízení roste s použitím dodatečných zpětnovazebních kontrolních obvodů a pasivních či aktivních PFC obvodů, neboť tyto jsou schopny regulovat parametry napětí dle aktuálních požadavků zátěže a v kondenzátorech uchovávat energii pro případy poklesů či výpadků napětí v el. síti. Mezi nejodolnější sv. zdroje pro kritérium BC patří L11, který je schopen bez restartu překlenout úplné přerušování napájení o délkách trvání

až do 35ms. Sv. zdroj L11 je schopen trvale pracovat při sníženém napětí, přičemž k jeho restartu a poklesu sv. toku na hodnotu 3% Φ_n dochází až při napětí 14% U_n . Ještě odolnější vůči přerušením napětí je zdroj L10, jehož restart způsobí přerušení napětí déle 60ms a větších; L10 však není schopen trvale pracovat při tak nízké hodnotě napětí jako L11, neboť limitní hodnota kritéria BC je naplněna při poklesech o zbytkovém napětí 28% U_n . Rovněž se potvrzuje, že použití elektronického předřadníku má na odolnost sv. zdroje lepší vliv nežli použití indukčního předřadníku. Kritérium BC nebylo testováno u klasické žárovky L1, neboť u tepelných sv. zdrojů již z principu jejich funkce nelze hovořit o jejich restartování – vyzařovaný sv. tok se úměrně mění s velikostí napájecího napětí. U tepelných sv. zdrojů by přicházela v úvahu pouze část definice kritéria BC, a sice pokles vyzařovaného sv. toku na hodnotu 3% jmenovité hodnoty. Na druhý z tepelných sv. zdrojů (L2) již byla tato modifikace aplikována a křivka odolnosti pro kritérium BC byla proměřena. Vzhledem k tomu, že přítomnost halových prvků u zdroje L2 má vliv především na dobu životnosti žárovky, lze předpokládat, že křivka odolnosti zdroje L1 by kopírovala křivku odolnosti zdroje L2.

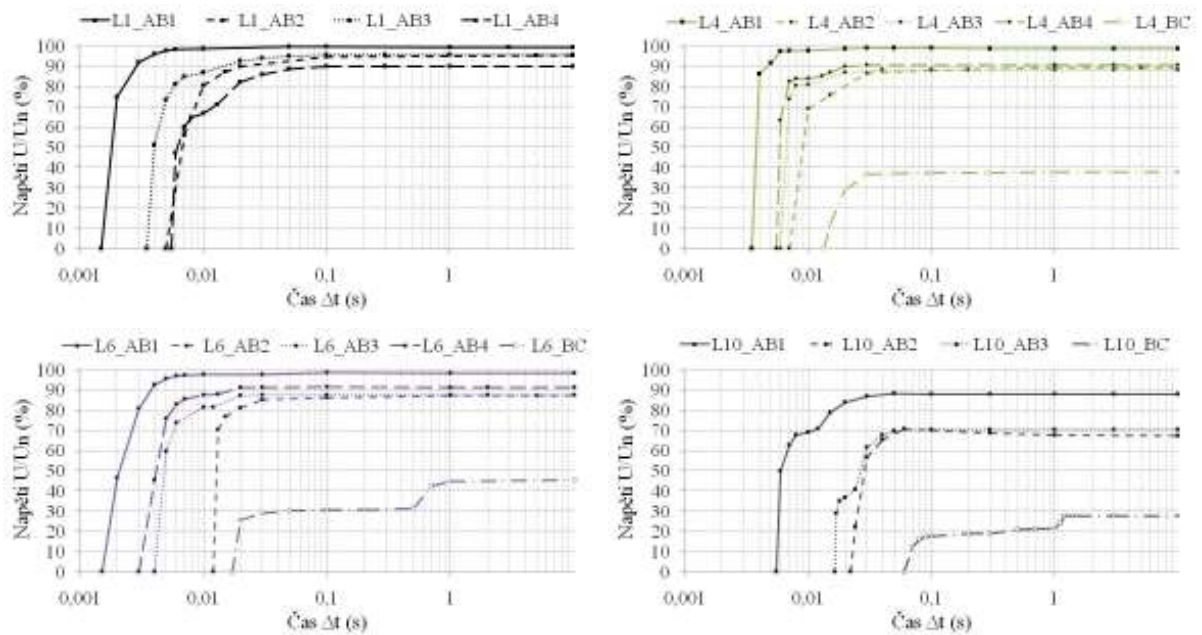
Co se týká vlivu topologie sv. zdrojů pro kritérium AB4, zde nemohly být proměřeny křivky odolnosti všech sv. zdrojů z tabulky Tab. 12, neboť zdroje obsahující elektronický předřadník s úpravou napětí ss části jsou schopny přizpůsobit parametry napětí podle aktuálních požadavků zátěže, a pomalé změny napětí se na velikosti vyzařovaného sv. toku neprojeví. Z obrázku Obr. 28 vyplývá, že pro kritérium AB4 je nejodolnějším sv. zdrojem zdroj L1 (byl-li by měřen také sv. zdroj L2, pravděpodobně by se křivka odolnosti opět překrývala s křivkou pro L1), což vyplývá z principu funkce tepelných sv. zdrojů. Světlo u tepelných sv. zdrojů vzniká rozžhavením wolframového vlákna, a velikost vyzařovaného sv. toku odpovídá hodnotě napětí přivedeného na vlákno. Díky setrvačnosti vlákna se tak každá změna napětí projeví až s časovým zpožděním. Nejméně odolným sv. zdrojem je pro kritérium AB4 sv. zdroj L7. Za povšimnutí rovněž stojí, že křivky všech sv. zdrojů se sbíhají víceméně do jednoho společného bodu, kterým je limitní hodnota trvalého dovoleného napětí 90% U_n v čase 10s.

Imunitní křivky pc zdrojů vykazují podobnou rozmanitost umístění v časové i napět'ové ose jako křivky sv. zdrojů kritéria BC, pouze s tím rozdílem, že odolnost vůči krátkodobým přerušením napětí je asi o řád vyšší (nejméně odolný pc zdroj „ustojí“ přerušení o délce trvání 97ms, zatímco žádná z křivek sv. zdrojů nezačínala výše než u 60ms. Nejodolnějším z testovaných pc zdrojů Tab. 13 je PC7, těsně následovaný zdrojem PC8. Ve skutečnosti se jedná o totožné pc. zdroje, z nichž jeden byl během testování poškozen, a během provedené opravy byl doplněn o omezovač proudové smyčky (proto označení PC8).

4.4.2 Křivky odolnosti vyjadřující vliv funkčního kritéria

Účelem tohoto typu zkoušky je zjistit vliv různých funkčních kritérií na odolnost konkrétního sv. zdroje (pc. zdroje zde nebyly testovány). Vybrané sv. zdroje tak byly opět podrobeny zkouškám odolnosti vůči základním parametrům poklesů napětí, ostatní parametry poklesu byly nastaveny na jmenovité parametry. Napájecí napětí tedy opět vykazovalo sinusový průběh s ef. hodnotou 230V, tvar nastavovaných poklesů napětí byl obdélníkový a poklesy napětí byly spouštěny v okamžiku průchodu křivky napětí nulovou hodnotou (nulový fázový úhel vzniku poklesu). Světelné zdroje se před testováním nacházely ve svém jmenovitém provozním stavu (jmenovité zatížení). Křivky odolnosti byly hledány pro všechna stanovená funkční kritéria, tzn. pro kritéria AB1, AB2, AB3, AB4 resp. BC. Změřené imunitní křivky jsou na obrázku Obr. 29.

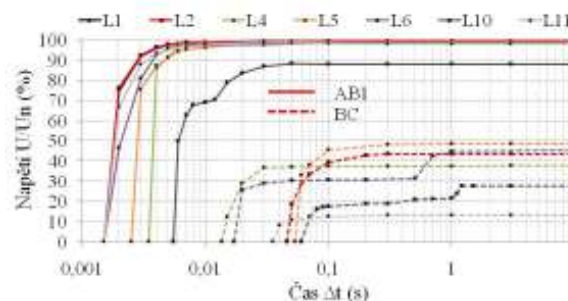
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 29 Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů vyjadřující vliv zvoleného funkčního kritéria

Jak vyplývá z Obr. 29, srovnání vlivu funkčního kritéria na odolnost sv. zdrojů bylo provedeno pro 4 typy sv. zdrojů. U klasické žárovky jsou srovnány pouze 4 kritéria (AB1, AB2, AB3, AB4), protože kritérium BC není pro tepelné sv. zdroje dostatečně přesně definováno. Pouze 4 kritéria jsou srovnána také u sv. zdroje L10, který svou topologií neumožňuje proměřit imunitní křivku kritéria AB4. Z jednotlivých křivek vyplývá, že zdaleka nejpřísnějším kritériem je kritérium s označením AB1, pro něhož imunitní křivky sv. zdrojů L1, L4 a L6 sahají dokonce i do oblasti zbytkových napětí vyšších než $U_n - 10\%$, což odpovídá limitní hodnotě pro definici vzniku poklesu napětí. Výsledek zkoušky je tedy často hodnocen jako nevyhovující (B), i když nastavená změna napětí nepřesáhne hranice dovoleného napětového pásma a dle definice se tak nejedná o pokles napětí. Za povšimnutí dále stojí rozdíly mezi křivkami pro kritéria AB1 a AB3, které by měly být ekvivalentní definici funkčního kritéria A v [25]. Přesto je evidentní, že křivky a limitní kritéria AB1 a AB3 nejsou kompatibilní. Rozdíly v tolerovatelných zbytkových napětích u velmi často vyskytujících se poklesů s délkou trvání nad 100ms se pro kritéria AB1 a AB3 pohybuje v rozmezí 10% až 20% jmenovitého napětí, což může vést k chybnému stanovení odolnosti sv. zdroje.

Obrázek Obr. 30 ukazuje porovnání imunitních křivek několika sv. zdrojů pro nejpřísnější funkční kritérium AB1 a pro nejméně přísné kritérium BC.

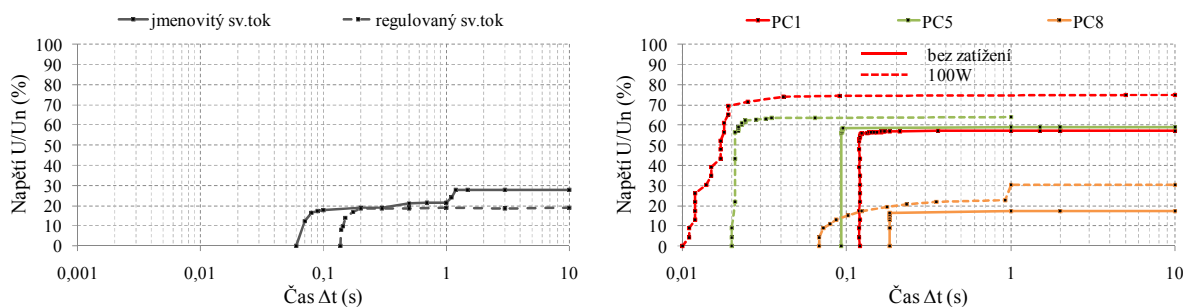


Obr. 30 Srovnání křivek odolnosti vybraných sv. zdrojů pro funkční kritéria AB1 a BC

4.4.3 Křivky odolnosti vyjadřující vliv zatížení el. zařízení

Vliv zatížení (resp. vliv regulace vyzařovaného sv. toku) sv. zdroje je možné měřit pouze u těch sv. zdrojů, které obsahují regulátor výstupního sv. toku. Z testovaných sv. zdrojů toto umožňuje pouze sv. zdroj s označením L10. Během testování byla u tohoto sv. zdroje zjišťována imunitní křivka odpovídající regulovanému sv. toku na 10% jmenovité hodnoty, a tato byla následně porovnána s křivkou odpovídající jmenovité hodnotě vyzařovaného sv. toku. Křivky byly hledány pro kritérium BC.

Na vliv zatížení byly testovány celkem tři počítačové zdroje (PC1, PC5 a PC8). Zátěž byla tvořena jednak požadavky operačního systému a všech napájených hardwarových prvků celé sestavy, a navíc byl na 5V výstup zdroje připojen reostat, jenž sloužil k nastavení různých úrovní zatížení pc. zdrojů. Všechna zkoušená zařízení byla opět testována na základní parametry poklesů napětí, kdy ostatní ovlivňující parametry byly nastaveny na jmenovité hodnoty (sinusová křivka napětí bez uvažování deformace, jmenovité napětí před vznikem a po skončení poklesu, obdélníkový tvar poklesu a nulový fázový úhel vzniku poklesu). Nalezené imunitní křivky jsou ukázány na obrázku Obr. 31.



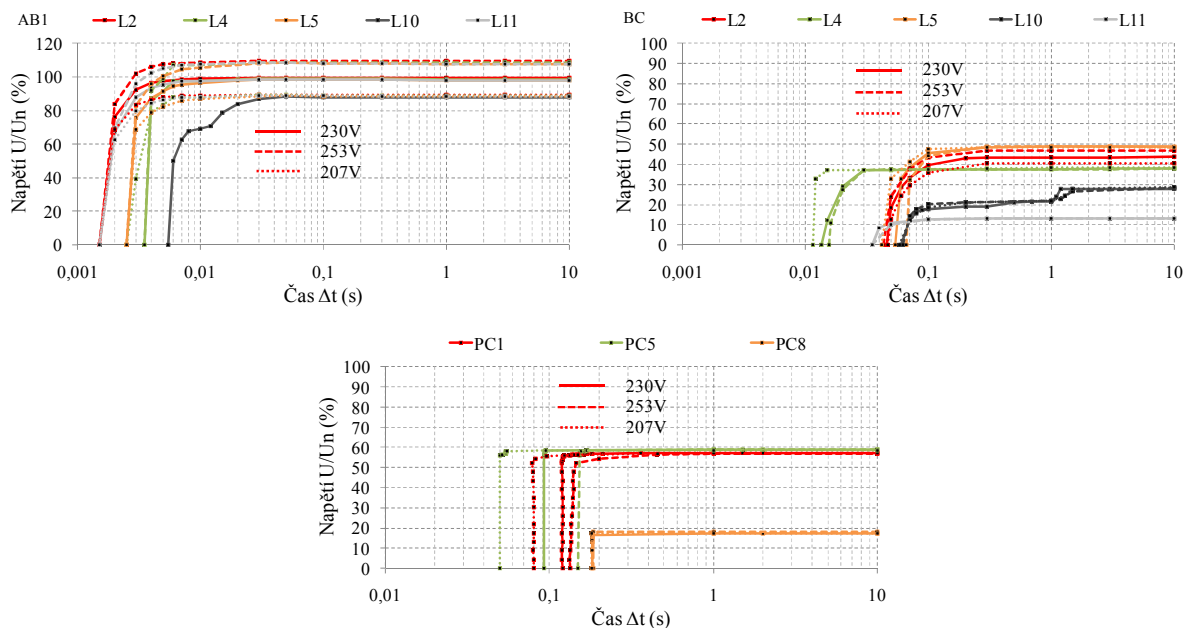
Obr. 31 Křivky odolnosti sv. zdroje L10 vyjadřující vliv regulace výstupního sv. toku na 10% φ_n (vlevo) a vliv zatížení u vybraných pc. zdrojů (vpravo)

Na základě obrázku Obr. 31 lze říci, že regulace vyzařovaného sv. toku má příznivý dopad na odolnost sv. zdroje. Regulací sv. toku dochází ke snížení odebrané el. energie a naakumulovaná vnitřní energie tak vystačí na překlenutí déletrvajících výpadků napětí (až 137ms) a hlubších poklesů napětí. U pc zdrojů se potvrdil předpoklad, že rostoucí zatížení vede ke snížení odolnosti každého pc zdroje. O kolik se při zatížení sníží odolnost, však závisí také na provedení a topologii pc zdroje. Je patrné, že s větším počtem zpětnovazebních smyček a regulačních obvodů v topologii počítačového zdroje roste jeho schopnost udržet svá výstupní napětí na jmenovitých hodnotách a zaznamenaná změna odolnosti vlivem zatížení bude nižší (viz Obr. 31).

4.4.4 Křivky odolnosti vyjadřující vliv velikosti napětí

Účelem tohoto druhu zkoušky je zjistit, jak se mění úroveň odolnosti sv. a pc. zdrojů v závislosti na proměnné hodnotě napájecího napětí. Napětí el. sítě se může trvale pohybovat v rozmezí 90% až 110% jmenovité hodnoty [1], proto byly kromě jmenovitého napětí při zkouškách nastaveny také obě krajní hodnoty dovoleného napěťového pásma, tedy 207V resp. 253V. Napětí uvedených ef. hodnot bylo na testovaný sv. zdroj resp. pc. zdroj přivedeno před započítáním vlastní zkoušky, a po provedení poklesu příslušných parametrů bylo napětí nastaveno na výchozí hodnotu (např. pokles napětí začínal z hodnoty 253V a po jeho skončení se napětí vrátilo zpět na hodnotu 253V). Ostatní parametry napětí byly nastaveny na jmenovité hodnoty, tzn., křivka napětí byla sinusová a harmonickými nedeformovaná, tvar poklesu ob-

délníkový, nulový fázový úhel vzniku poklesu, a jmenovité zatížení sv. zdrojů resp. minimální zatížení pc. zdrojů. Zkoušky byly prováděny pro funkční kritéria AB1 a BC (světelné zdroje) a pro kritérium AD u pc zdrojů. Nalezené imunitní křivky jsou ukázány na obrázku Obr. 32.



Obr. 32 Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů (nahore) a vybraných pc zdrojů (dole) vyjadřující vliv velikosti napětí před vznikem a po skončení poklesu napětí

Z obrázku Obr. 32 je patrné, že u sv. zdrojů se pro kritérium BC odolnost skutečně mění v závislosti na velikosti napětí před a po skončení poklesu napětí. Zatímco u výbojových sv. zdrojů (L4, L5, L10) a LED sv. zdrojů (L11) odolnost klesá se snižující se hodnotou napájecího napětí a naopak odolnost stoupá se zvyšujícím se napětím, tepelný sv. zdroj (L2) se chová naprosto odlišně. Jestliže poklesy napětí nastávaly z hodnoty 253V, odolnost žárovky vykazovala nižší úroveň nežli v případě, že poklesy nastávaly ze jmenovité hodnoty napětí 230V. Nejlepší odolnost žárovka vykazovala při napájení napětím 207V.

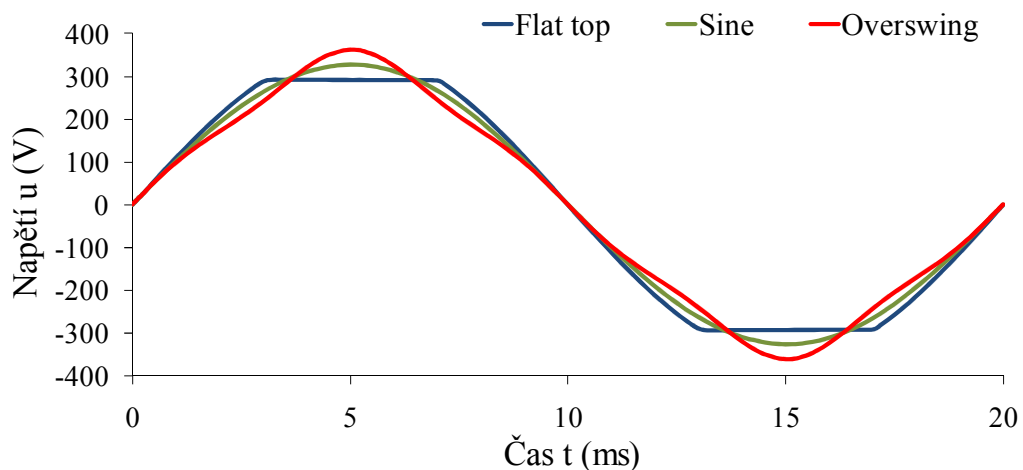
Zajímavými jsou imunitní křivky sv. zdrojů pro kritérium AB1. Již v kapitole 4.4.2 bylo zjištěno, že limitní změna sledovaného parametru sv. zdroje pro kritérium AB1 je dosažena „poklesem napětí“, jehož zbytkové napětí se pohybuje v povolené napěťové toleranci 100% až 90% U_n . O žádný pokles napětí se tedy dle definic [1][2][6][7][9] nejednalo. U tohoto kritéria hraje významnou roli změna napětí, která vyvolá okamžitou hodnotu flickru rovnu právě $P_f = 1$. Je zřejmé, že při jiném než jmenovitém napětí bude opět důležitá velikost změny napětí, avšak vzhledem k hodnotě napětí před vznikem a po skončení poklesu. Při vyšším počátečním napětí je tak odolnost sv. zdrojů pro toto kritérium nižší vzhledem k odolnosti při jmenovitém napětí, a při nižším počátečním napětí je odolnost naopak vyšší. Sv. zdroj L10 je proti změnám napětí imunní, neboť aktivní zvyšující PFC obvod udržuje ve stejnosměrném obvodu konstantní velikost napětí v širokém rozsahu velikostí vstupního napětí. U zdroje L10 tedy nebyla zjištěna žádná změna jeho odolnosti v důsledku změny napájecího napětí. Vliv velikosti napětí se u všech ostatních testovaných sv. zdrojů projevil především změnou pozice imunitní křivky ve svislém směru, tzn. v parametru zbytkového napětí poklesů. Vliv napětí na odolnost vůči krátkodobým přerušením napětí byla mimo sv. zdroj L4 nepatrná.

Počítačové zdroje dopadly v testech podobně jako výbojové sv. zdroje, kdy míra odolnosti roste se zvyšujícím se napájecím napětím. Nej kvalitnějším pc zdrojem se jeví zdroj

s označením PC8, u něhož nebyl zaznamenán žádný vliv napětí na jeho odolnost. Tato vlastnost je opět způsobena použitím aktivního PFC obvodu, stejně jako u sv. zdroje L10.

4.4.5 Křivky odolnosti vyjadřující vliv harmonického zkreslení

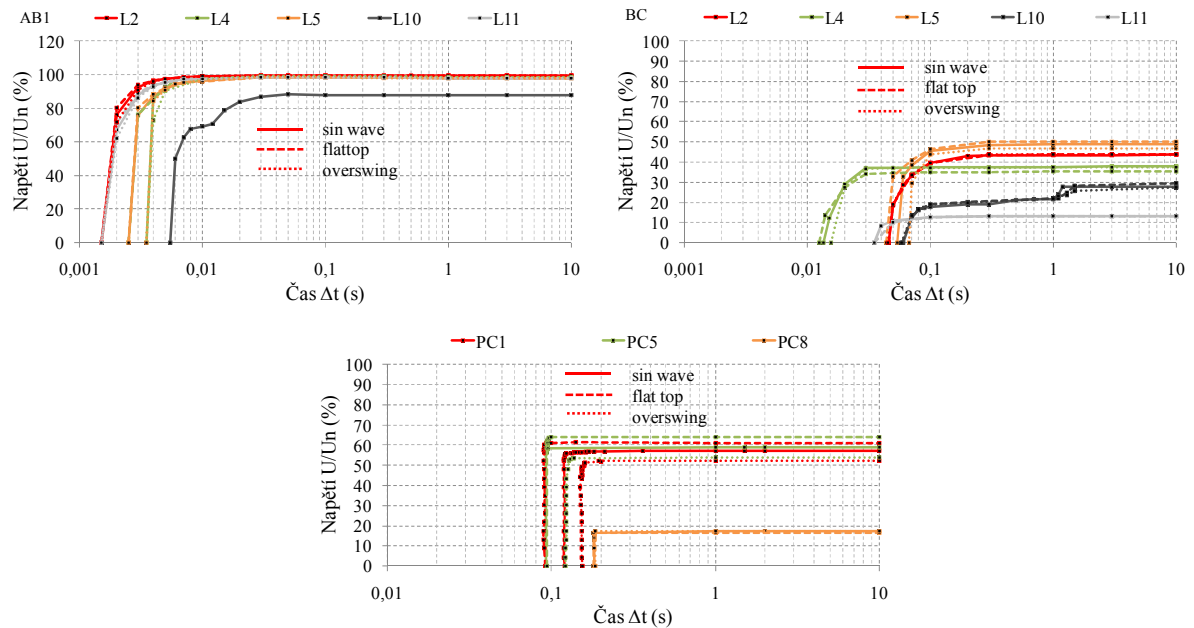
Během tohoto testu byl zkoumán vliv harmonického zkreslení sinusové křivky napětí na odolnost vybraných typů sv. zdrojů a pc. zdrojů. Vzhledem tomu, že pro úroveň celkového harmonického zkreslení napětí v el. síti je stanovena max. limitní hodnota $THD_U = 8\%$ [1], a pro zkoušky odolnosti jsou definovány dva typizované deformační průběhy napěťové křivky (Flat top, Overswing) [34], byly hledány imunitní křivky pro oba typy deformací právě při limitní hodnotě činitele celkového harmonického zkreslení $THD_U = 8\%$. Rozdíl mezi oběma deformovanými křivkami napětí je ukázán na obrázku Obr. 33.



Obr. 33 Rozdíly v křivkách napětí pro sinusový průběh a harmonickými deformované průběhy Overswing a Flat top při $THD_U = 8\%$

Ostatní parametry napětí byly opět nastaveny na jmenovité hodnoty – obdélníkový pokles napětí, jmenovitá hodnota napětí před a vznikem a po skončení poklesu, nulový fázový úhel vzniku poklesu a jmenovité resp. minimální zatížení u sv. zdrojů resp. pc. zdrojů. Testovány byly světelné zdroje pro funkční kritéria AB1 a BC počítačové zdroje pro kritérium AD. Nalezené imunitní křivky jsou k vidění na obrázku Obr. 34.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 34 Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů (nahore) a vybraných pc. zdrojů (dole) vyjadřující vliv harmonického zkreslení křivky napětí před vznikem, během působení a po skončení poklesu napětí; $THD_U = 8\%$

Z imunitních křivek na obrázku Obr. 34 byl zjištěn vliv harmonického zkreslení na míru odolnosti pc zdrojů PC1 a PC5, kdy u křivky s vystouplým vrcholem (overswing) vzrostla míra odolnosti jak proti úplným přerušením napětí (imunitní křivka se posunula doprava), tak proti hlubším poklesům napětí (křivka se rovněž posunula dolů). Naopak u průběhu v useknutém vrcholem (flat top) došlo u pc zdroje PC1 ke snížení míry odolnosti jak proti přerušením napětí, tak proti déletrvajícím poklesům napětí (posun imunitní křivky nahoru a doleva). U pc zdroje PC5 došlo pouze k posunu imunitní křivky nahoru, tedy snížení odolnosti na déletrvajícím poklesům napětí. Zdroje PC1 resp. PC5 tedy fungují jako detektory max. hodnoty napětí. Na odolnost zdroje PC8 nemá harmonické zkreslení žádný vliv, neboť u něj opět hraje důležitou roli aktivní PFC obvod.

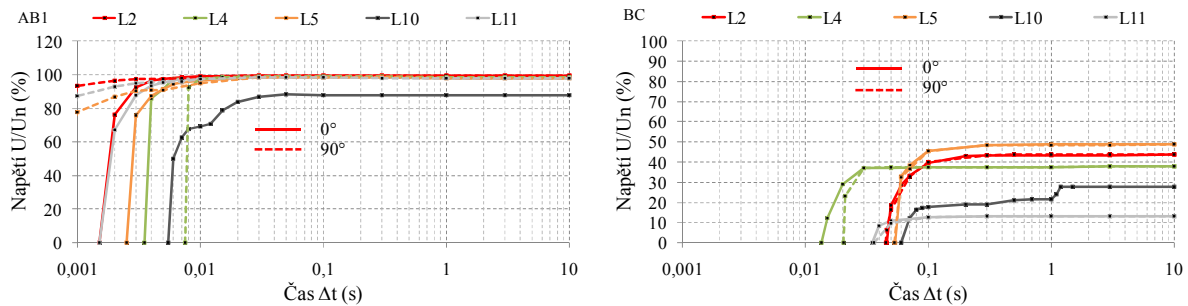
Co se týká světelných zdrojů, pro kritérium AB1 se vliv harmonického zkreslení křivky napětí na odolnost zdroje zřetelně projevil pouze u kompaktních sv. zdrojů L4 a L5. Zdroj L4 je odolnější vůči přerušením a poklesům napětí s délkou trvání do 4ms u sinusového a overswing průběhu nežli u průběhu flat top, přičemž křivky sinusového a overswing průběhu se víceméně překrývají, zatímco u zdroje L5 se překrývají křivky sinusového a flat top průběhu a křivka overswing průběhu je posunuta napravo, což značí větší odolnost zdroje L5. Sv. zdroj L2 (žárovka), stejně jako zdroj L10 jsou proti harmonickému zkreslení křivky napětí imunní, neboť žárovka pracuje jako detektor ef. hodnoty napětí (která je stále 230V) a u zdroje L10 opět zafungoval aktivní PFC obvod.

Z imunitních křivek kritéria BC u světelných zdrojů vyplývá, že harmonické zkreslení křivky napětí má na odolnost testovaných sv. zdrojů pouze nepatrný vliv.

4.4.6 Křivky odolnosti vyjadřující vliv fázového úhlu vzniku poklesu

Účelem testu bylo prokázat vliv proměnného fázového úhlu vzniku poklesu na odolnost světelných a počítačových zdrojů. Byly otestovány dva krajní případy fázového úhlu, a sice úhel $\varphi = 0^\circ$ (odpovídá vzniku poklesu v okamžiku průchodu křivky napětí nulovou hodno-

tu), a úhel $\varphi = 90^\circ$ (odpovídá vzniku poklesu v okamžiku průchodu křivky napětí maximem). Ostatní napěťové parametry byly nastaveny na jmenovité hodnoty, čili napětí mělo sinusový průběh o ef. hodnotě 230V, poklesy napětí byly obdélníkového tvaru, zátěž jmenovitá u sv. zdrojů a minimální u pc zdrojů. Imunitní křivky byly opět změřeny pro kritéria AB1 a BC (sv. zdroje) a restart počítače. Křivky jsou zobrazeny na obrázku Obr. 35.



Obr. 35 Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů vyjadřující vliv proměnného fázového úhlu vzniku poklesu napětí

Na základě změřených imunitních křivek (Obr. 35) vyplývá, že pro kritérium AB1 se odolnost sv. zdrojů L2, L5 a L11 výrazně zhoršila, pokud pokles napětí započal v maximu křivky napětí, naopak u sv. zdroje L4 se odolnost zlepšila. Jedná se výhradně o změny odolnosti na přerušení napětí – vlivem proměnného úhlu vzniku poklesů napětí se imunitní křivky posouvají ve vodorovném směru. Imunitní křivka sv. zdroje L10 zůstala nezměněna.

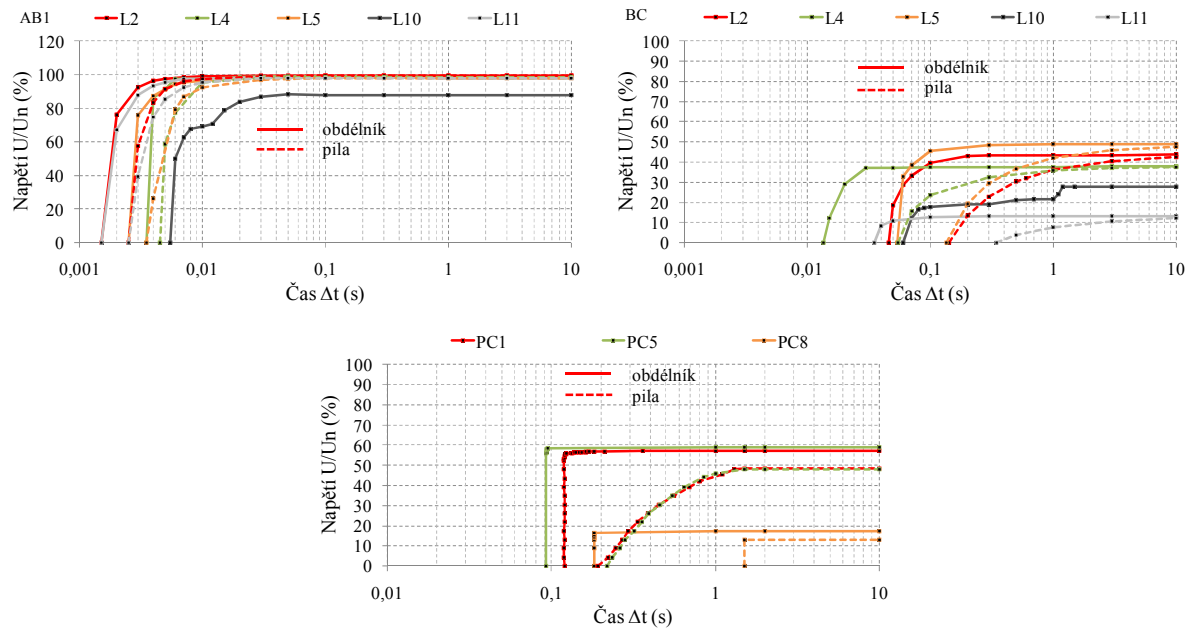
Co se týká imunitních křivek odpovídajících kritériu BC, vliv proměnného fázového úhlu vzniku poklesu napětí je mnohem méně průkazný nežli tomu bylo u kritéria AB1. Křivky se víceméně kopírují se základní imunitní křivkou daného sv. zdroje, pouze zdroj L4 vykazuje při fázovém úhlu $\varphi = 90^\circ$ mírné zlepšení odolnosti vůči přerušením napětí. Zlepšení se pohybuje v řádu jednotek milisekund.

Odolnost počítačových zdrojů byla rovněž testována, ale vliv proměnného fázového úhlu na odolnost vybraných pc zdrojů nebyla zjištěna. Z tohoto důvodu nejsou grafické průběhy imunitních křivek ani zobrazeny.

4.4.7 Křivky odolnosti vyjadřující vliv tvaru poklesu/přerušení napětí

Během tohoto testu bylo účelem prozkoumat vliv tvaru poklesu napětí na odolnost světelných a počítačových zdrojů. Jako vhodné tvary poklesů napětí byly zvoleny obdélníkový tvar, a pilový tvar, které se v hojné míře vyskytují v reálných el. sítích. Průběhy obou zvolených tvarů poklesů napětí jsou vyjádřeny na obrázku Obr. 4. Ostatní parametry napětí byly opět nastaveny na jmenovité hodnoty, tzn. harmonickými nezkreslená sinusová křivka napětí, jmenovité napětí před vznikem a po skončení poklesu, nulový fázový úhel vzniku poklesu a jmenovité resp. výchozí zatížení světelných resp. počítačových zdrojů. Nalezené imunitní křivky jsou zobrazeny na obrázku Obr. 36.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 36 Křivky odolnosti vybraných sv. zdrojů (nahore) a vybraných pc. zdrojů (dole) vyjadřující vliv tvaru poklesu napětí

Ze změřených imunitních křivek (Obr. 36) bylo zjištěno, že tvar poklesu má výrazný vliv na změnu odolnosti světelných i počítačových zdrojů. Zatímco u sv. zdrojů a kritéria AB1 se zlepšila odolnost vůči přerušením napětí pilových tvarů jen velmi nepatrně (posun imunitní křivky doprava o cca 2ms) a u zdroje L10 se vliv tvaru poklesu na odolnost neprojevil, u kritéria BC již nastalo výrazné zlepšení odolnosti u všech testovaných sv. zdrojů. Jednotlivé sv. zdroje jsou schopny splnit kritérium BC při mnohem závažnějších parametrech poklesů napětí, jsou-li tyto poklesy pilových a nikoli obdélníkových tvarů. Ono zlepšení odolnosti spočívá především ve větší schopnosti sv. zdroje přestát přerušení napětí. Ve srovnání křivek odolnosti není zobrazena křivka zdroje L10 pro kritérium BC a pilový průběh poklesu, neboť tento sv. zdroj je proti poklesům napětí pilových průběhů o parametrech zobrazených v příslušném grafu absolutně odolný.

U imunitních křivek počítačových zdrojů byl zaznamenán podobný vliv tvaru poklesu jako u světelných zdrojů při kritériu BC, tzn. že dochází ke zlepšení odolnosti všech testovaných pc zdrojů na poklesy pilových tvarů. Nejdolnějším pc zdrojem je opět zdroj s označením PC8, který je schopen bez restartování operačního systému přestát přerušení napětí pilového průběhu o délce trvání až 1,5s. Oproti odolnosti vůči obdélníkovému tvaru přerušení napětí tak nastalo zlepšení o 1,3s.

4.5 Zhodnocení

Na základě provedeného souboru měření parametrických křivek odolnosti u vybraných typů sv. zdrojů a počítačových zdrojů je zřejmé, že míra jejich odolnosti závisí nejen na základních parametrech poklesů napětí, kterými jsou zbytkové napětí poklesu a délka jeho trvání, ale je také ovlivněna dalšími parametry napětí, kterými lze vzniklé poklesy detailněji popsat. Testováním byl potvrzen předpoklad, že odolnost el. zařízení závisí na tvaru poklesu, na ef. hodnotě napětí před vznikem a po skončení poklesu, na úrovni harmonického zkruslení křivky napětí před vznikem, během trvání a po skončení poklesu napětí, na fázovém úhlu vzniku poklesu. Odolnost zařízení rovněž závisí na aktuální velikosti jeho zatížení v době před vznikem, během trvání a po skončení poklesu napětí. Velikost změny odolnosti zařízení

vlivem působení dalších parametrů poklesů oproti odolnosti na základní parametry napětí výrazně závisí také na použité topologii el. spotřebiče a na zvoleném funkčním kritériu.

Vzhledem k standardizovaným zkouškám odolnosti el. zařízení, které jsou založeny na přesně definovaných parametrech zkušebních poklesů/přerušení napětí, má imunitní křivka větší vypovídací schopnost o skutečné odolnosti daného zařízení, neboť na jejím základě lze určit, zda je zařízení na pokles o určitých parametrech (zbytkové napětí, délka trvání), který nebyl testován, odolné či nikoliv. Standardizované zkoušky odolnosti toto neumožňují.

Je třeba si uvědomit, že úroveň odolnosti zařízení při jeho umístění v reálné el. síti může být výrazně odlišná od změřené úrovně odolnosti v laboratorních podmínkách. V laboratorních podmínkách totiž nelze plnohodnotně simulovat podmínky provozu v reálné síti, ve které dochází k neustálým kolísáním všech charakteristik napětí. Navíc, v el. síti působí na el. zařízení všechny rušivé jevy společně, (je tam uvažován společný vliv všech elektrických i neelektrických parametrů na odolnost el. spotřebičů), kdežto během laboratorních testů byl uvažován separátní vliv dalších parametrů poklesů napětí.

5 ALGORITMY PRO MĚŘENÍ A DETEKCI UDÁ- LOSTÍ NA NAPĚTÍ

Události na napětí jsou chápány jako rušivé jevy, které díky jejich předem nepředvídatelnému výskytu značně komplikují spolehlivou funkci všech zařízení připojených do elektrické sítě. Již bylo uvedeno, že události na napětí jsou jedním z mnoha kvalitativních parametrů napětí [1], který však nezastává roli závazného parametru, nýbrž vystupuje, v současné době, pouze jako parametr informativní [2]. Ačkoli tedy není výskyt událostí na napětí v elektrické síti nijak omezen a provozovatel sítě tak nenese žádnou odpovědnost za případné škody zapříčiněné právě napěťovými událostmi, pro získání povědomí o výskytu událostí na napětí v dané elektrické síti je tedy zapotřebí tyto události alespoň monitorovat. Pro detekci událostí na napětí se používají buďto monitory událostí, které slouží pro dlouhodobý záznam událostí většinou prováděný v elektrických stanicích, nebo komplexní analyzátory kvality napětí, které kromě událostí na napětí zaznamenávají také další kvalitativní parametry napětí [1]. Analyzátory kvality napětí jsou často používány pro komplexní kontrolu kvality napětí v určitých bodech napájecí sítě (většinou jde o tzv. předávací místa).

Nezávisle na druhu použitého monitorovacího zařízení detekce událostí na napětí se řídí normami přesně stanovenými pravidly (viz kapitola 2.1.5 a také [6]). Přesnost parametrů detekovaných událostí na napětí pak závisí na typu detekčního algoritmu implementovaného do monitorovacího zařízení. Ačkoli bylo vyvinuto a je známo mnoho detekčních algoritmů, v současné době standardizovaným detekčním algoritmem je algoritmus založený na výpočtu efektivní hodnoty napětí prováděném v přesně stanovených časových intervalech, kdy efektivní hodnota je počítána za celou uplynulou periodu napěťového signálu s posuvem po půlperiodě. Tento algoritmus je označován jako RMS (1/2). Další známé detekční algoritmy budou v krátkosti specifikovány v další části práce. Globálně lze algoritmy určené k detekci událostí na napětí rozdělit podle principu jejich funkce do dvou hlavních skupin: 1) Algoritmy závislé na délce vyhodnocovacího okna; 2) trackovací algoritmy.

Cílem kapitoly je nalézt algoritmus, který bude s akceptovatelnou přesností schopen zaznamenávat tvar detekovaných poklesů a přerušení napětí, na základě čehož bude následně schopen přesně detekovat nejen dva základní parametry poklesů napětí (zbytkové napětí, délka trvání poklesu), ale rovněž také další, v dřívějších kapitolách popisované, parametry poklesů. Porovnávacími hledisky při hodnocení jednotlivých algoritmů budou přesnost detekovaných parametrů poklesů napětí a velikost zpoždění při detekci.

5.1 Algoritmy závislé na délce okna vs. trackovací algoritmy

Algoritmy závislé na délce okna jsou typické zejména tím, že vlastní výpočet hledané veličiny (v tomto případě efektivní hodnoty napětí) je prováděn v přesně určených časových sekvencích a zahrnuje v sobě data náležící do vyhodnocovacího okna přesně definované délky. Délka vyhodnocovacího okna bývá standardně volena jako délka jedné periody analyzovaného vstupního signálu napětí, což v sítích s frekvencí 50Hz činí právě 20ms. Efektivní hodnota napětí je tak vypočítávána zpětně za již uplynulou periodu napětí, což, v kontextu s detekcí událostí na napětí, způsobuje poměrně velkou časovou prodlevu při detekci událostí (velikost zpoždění při detekci závisí také na velikosti překrytí jednotlivých vyhodnocovacích oken, které zásadně ovlivňuje výše zmíněné časové sekvence pro provádění výpočtu). Nejznámějším algoritmem náležícím do této skupiny je standardizovaný algoritmus „RMS (1/2)“,

případně jeho možné modifikované podoby (popsány níže), ale patří zde i algoritmy založené na Fouriřově transformaci vstupního napěťového signálu.

Na základě známých a praxí léta zjišťovaných nedostatků metody RMS (1/2), kdy nebylo možné přesně zaznamenávat všechny potřebné údaje o vzniklých událostech (především nízká přesnost detekovaných parametrů událostí s dobou trvání kratší než jedna perioda měřeného signálu, dlouhá časová prodleva detekce událostí znemožňující identifikaci příčiny vzniku poklesu atd.) [36], bylo snahou vyvinout algoritmus, na jehož základě by bylo možné měřit a vyhodnocovat události na napětí v reálném čase, a který, samozřejmě, bude dosahovat přesnějších výsledků nežli metoda RMS (1/2), a to i s ohledem na porovnání výsledků monitorování událostí na napětí s odolností (křivkami odolnosti) elektrických spotřebičů. Algoritmy schopné vyhodnocovat události na napětí v reálném čase se označují pojmem „*trackovací algoritmy*“, a jejich základem je navzorkování měřeného napěťového signálu dostatečně vysokou vzorkovací frekvencí (např. 10kS/s) a postupné zpracování jednotlivých vzorků výpočetním algoritmem, přičemž velká váha je kladena na odhad hodnoty následujícího vzorku na základě hodnoty vzorku předešlého. Výsledkem trackovacích algoritmů je potom průběh velikosti napětí se stejnou vzorkovací frekvencí jako je vzorkovací frekvence vstupního diskrétního průběhu okamžité hodnoty napětí. Některé z vyvinutých trackovacích algoritmů jsou v dalším textu blíže popsány.

5.1.1 RMS (1/2)

Nejznámější zástupce detekčního algoritmu náležícího do skupiny algoritmů závislých na délce vyhodnocovacího okna a zároveň jediná v současné době standardizovaná metoda pro detekci událostí na napětí (viz [6][7][9]). Nastavení výpočetního algoritmu vyplývá z označení metody, kde délka okna je právě jedna perioda základní frekvence měřeného signálu (tj. 20ms při 50Hz) a velikost překrytí dvou po sobě jdoucích vyhodnocovacích intervalů je polovina periody, tedy 10ms. Z nastavení algoritmu je tedy patrné, že první vypočtená rms hodnota napětí bude k dispozici až po uplynutí jedné periody měřeného napětí, tedy s časovou prodlevou 20ms resp. 1 periody systémové frekvence, a každá další rms hodnota bude vypočtena vždy po 10ms. Bez potřeby detailnějšího zkoumání této metody lze říci, že metoda RMS (1/2) je vhodnější pro záznam událostí obdélníkových průběhů o délkách trvání větších než 20ms (1 perioda), kdy algoritmus správně detekuje zbytkové napětí vzniklé události, avšak délka trvání bude zaznamenávána s chybou max. 20ms (1 perioda). Události s kratší délkou trvání, případně jiných než obdélníkových průběhů jsou zaznamenávány s větší chybou v uváděných parametrech – jak ve zbytkovém napětí, tak i v délce trvání. Zpoždění detekce události bude bez ohledu na parametry dané události vždy 10ms (1/2 periody) nebo 20ms (1 perioda).

5.1.2 RMS 10ms

Metoda RMS 10ms je založena na stejném výpočetním algoritmu jako metoda RMS (1/2), pouze nastavení algoritmu je odlišné (opět se tedy jedná o algoritmus závislý na délce vyhodnocovacího okna). Nyní je délka vyhodnocovacího intervalu (délka okna) rovna právě polovině periody základní harmonické měřeného napětí ($1/2 \cdot 20\text{ms} = 10\text{ms}$) a velikost překrytí po sobě jdoucích vyhodnocovacích intervalů je nulová, tzn., že jednotlivá okna na sebe kontinuálně navazují. Již z prvotního pohledu na nastavení algoritmu je patrné, že touto metodou bude možné dosahovat přesnějších výsledků nežli metodou RMS (1/2), a to minimálně co se týče zpoždění při detekci jednotlivých událostí. Časová prodleva detekce událostí bude u této metody vždy rovna hodnotě 10ms (1/2 periody). Taktéž lze s jistotou usuzovat, že zaznamenaná zbytková napětí u událostí obdélníkových průběhů s délkami trvání většími než 10ms budou vždy přesná a chyby zaznamenaných délek trvání budou maximálně 10ms.

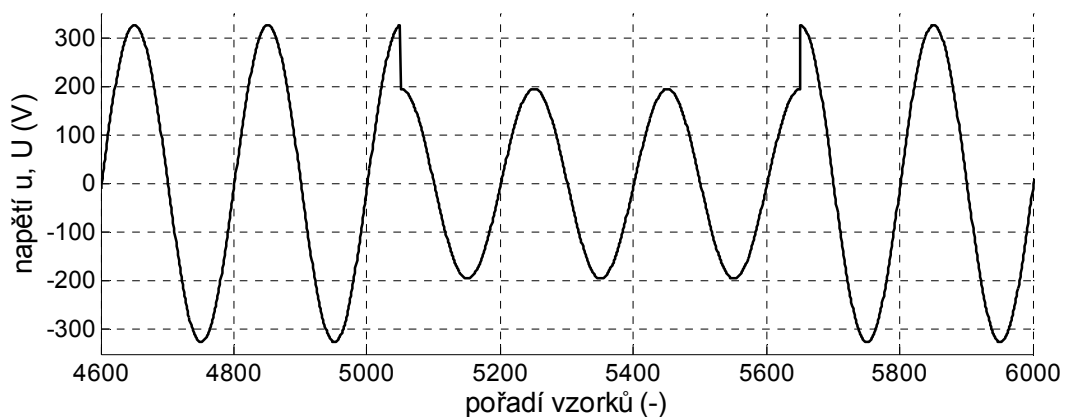
5.1.3 Klouzající RMS (1/2)

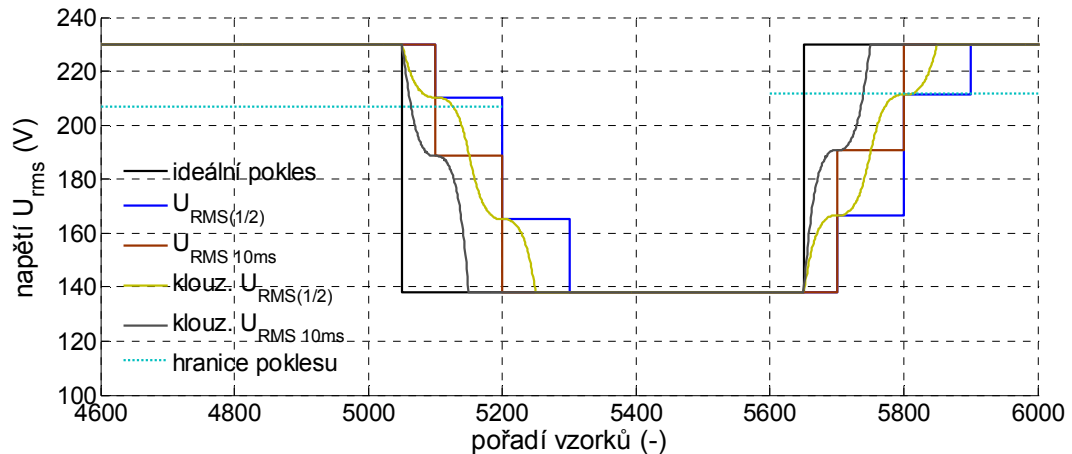
Dle názvu se opět jedná o algoritmus závislý na délce vyhodnocovacího okna, který je svým nastavením velmi podobný klasickému algoritmu RMS (1/2). Délka vyhodnocovacího okna je opět jedna perioda měřeného napětí (20ms), avšak velmi významným rozdílem je velikost překrytí dvou po sobě následujících oken. Zatímco u klasické metody RMS (1/2) činila velikost překrytí polovinu periody měřeného napětí (10ms), v tomto případě je následující okno posunuto pouze o jeden vzorek diskrétního průběhu okamžité hodnoty napětí za okno předchozí, čímž velikost překrytí dvou po sobě jdoucích oken je $n-1$ vzorků (kde n značí počet vzorků připadajících na jednu periodu vstupního napětí). Z nastavení algoritmu lze usuzovat, že metoda bude podstatně rychlejší při detekci všech typů událostí, a znamenáný tvar události bude mnohem více odpovídat skutečnému tvaru události.

5.1.4 Klouzající RMS 10ms

Metoda vychází z klasické metody RMS 10ms, takže opět jde o metodu závislou na délce vyhodnocovacího okna. Délka okna je nastavena na polovinu periody měřeného vstupního napětí (10ms), a překrytí dvou po sobě následujících oken dosahuje $(n/2-1)$ vzorků (kde n opět značí počet vzorků připadajících na jednu periodu vstupního napětí), takže následující okno je právě o jeden vzorek posunuto za oknem předchozím. Výhoda metody oproti klasické metodě RMS 10ms spočívá v rychlejší detekci událostí na napětí a ve schopnosti přesnějšího záznamu tvaru události vzhledem k jejímu skutečnému tvaru.

Rozdíly ve výše uvedených čtyřech různých nastaveních RMS algoritmu jsou názorně k vidění na obrázku Obr. 37, který zobrazuje odezvu všech zmíněných algoritmů na obdélníkový pokles napětí o zbytkovém napětí 60% U_n a délce trvání 60ms, přičemž pokles vznikl právě v okamžiku průchodu křivky napětí amplitudou.





Obr. 37 Odlišnosti v detekovaných průbězích poklesu napětí testovaných RMS metod

Z obrázku Obr. 37 je patrné, že zaznamenané průběhy poklesů od všech čtyř typů RMS algoritmů se liší od skutečného průběhu poklesu, přičemž zdaleka nejbližší ideálnímu obdélníkovému průběhu se podobá průběh zaznamenaný klouzavou RMS 10ms metodou. V okamžiku vzniku poklesu, kdy napětí simulovaného poklesu skokově mění hodnotu ze $100\% U_n$ (230V) na $60\% U_n$ (138V), také klouzavou RMS 10ms metodou detekované napětí začne prudce klesat, a protíná hranici definující vznik poklesu napětí ($90\% U_n = 207V$) již po uplynutí 1,4ms. Ostatní RMS metody jsou při detekci stejného poklesu několikanásobně pomalejší: Klasická RMS 10ms metoda vykazuje prodlevu 5ms, klouzavá RMS (1/2) prodlevu 7,7ms a klasická RMS (1/2) prodlevu 15ms. Ze zaznamenaných průběhů následně všechny RMS metody přesně vyhodnotí zbytkové napětí poklesu, a sice 138V, avšak vyhodnocená délka trvání se v závislosti na nastavení metody liší – viz obrázek Obr. 37.

5.1.5 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) je metoda primárně určená k získání amplitudového a fázového spektra libovolného diskrétního signálu obsahujícího neznámý podíl vyšších harmonických složek. Podmínkou užití DFT a tím dosažení výsledků očekávané přesnosti je, že vstupní signál musí být stacionární, tzn., že podíl jednotlivých harmonických složek (velikost amplitudy a fáze) bude neměnný v čase. Použitím DFT pro účely detekce a záznamu parametrů událostí vyskytujících se v elektrické napájecí síti však budou dosažené výsledky charakteristické velkou chybovostí, neboť křivka napětí v průběhu trvání události vykazuje nestacionární charakter, čímž je porušena základní podmínka pro užití DFT.

Problém nestacionarity vstupního signálu odstraňuje užití metody „Krátkodobé Fourierovy transformace“ – STFT (Short Time Fourier Transform), jejímž základem je rozčlenění vstupního nestacionárního signálu na menší části, v nichž se vstupní signál již dá považovat za stacionární, a následně užití DFT na každou dílčí část. Přesnost výsledků STFT je opět (stejně jako u metod RMS) závislá na velikosti zvolené délky časového okna (vyhodnocovacího intervalu), což se dá považovat za zásadní nevýhodu metody. Výhodou je naopak možnost získání informací o amplitudách a fázích základní složky a vyšších harmonických složek napětí během trvání události.

5.1.6 „Ziarani“ algoritmus

„Ziarani“ algoritmus patří do skupiny trackovacích algoritmů. Jeho předností (dle autorů [37][38]) je schopnost v reálném čase sledovat nejen amplitudu měřeného napěťového signálu, ale také fázi a jeho frekvenci. Chod algoritmu je možné vyjádřit dvěma způsoby, a sice

buďto matematickým zápisem v podobě níže uvedeného souboru rovnic (9), anebo pomocí blokového schématu zobrazeného na obrázku Obr. 38. Oba zápisy „Ziarani“ algoritmu jsou plnohodnotně srovnatelné.

$$\begin{aligned}
 \dot{A} &= \mu_1 e \sin \phi \\
 \dot{\omega} &= \mu_2 e A \cos \phi \\
 \dot{\phi} &= \mu_3 e A \cos \phi + \omega \\
 y(t) &= A \sin \phi \\
 e(t) &= u(t) - y(t)
 \end{aligned} \tag{9}$$

V rovnici (9) vystupující veličiny mají následující význam [38]:

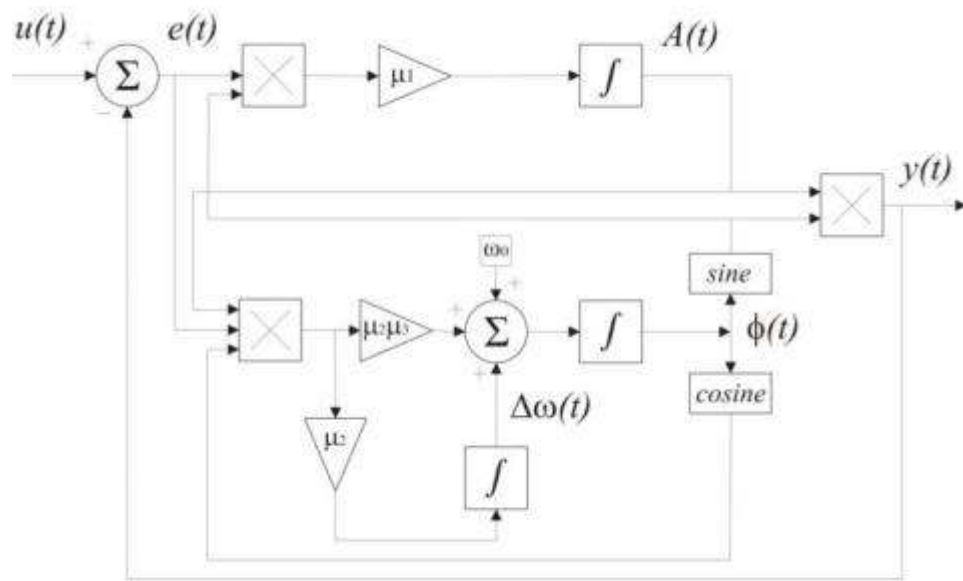
$u(t)$	vstupní signál napětí
$y(t)$	výstupní signál algoritmu
$e(t)$	vstupní signál $u(t)$ ponížený o výstupní signál $e(t)$
A	stavová veličina vyjadřující amplitudu výstupního signálu
Φ	stavová veličina vyjadřující fázi výstupního signálu
ω	stavová veličina vyjadřující úhlovou frekvenci výstupního signálu
μ_1	koeficient ovlivňující rychlost odezvy algoritmu s ohledem na měnící se hodnotu amplitudy vstupního signálu
μ_2, μ_3	koeficienty ovlivňující rychlost odezvy algoritmu s ohledem na proměnlivou hodnotu frekvence vstupního signálu

Rovnice (9) popisuje chod algoritmu v časové oblasti – algoritmus tedy pracuje s analogovým vstupním signálem napětí. Pro simulaci chodu algoritmu v reálném měřicím přístroji je však zapotřebí pracovat s diskrétními signály – je tedy nezbytné analogový signál napětí nejprve navzorkovat a vytvořený diskrétní signál pak přivést na vstup algoritmu. Velikost zvolené vzorkovací frekvence pak udává výpočtovou rychlost algoritmu a s tím související požadavky algoritmu na paměť měřicího přístroje. Chod algoritmu v diskrétním režimu je popsán souborem rovnic (10). [37]

$$\begin{aligned}
 A[n+1] &= A[n] + 2T_s \cdot \mu_1 \cdot e[n] \cdot \sin \phi[n] \\
 \omega[n+1] &= \omega[n] + 2T_s \cdot \mu_2 \cdot e[n] \cdot A[n] \cdot \cos \phi[n] \\
 \phi[n+1] &= \phi[n] + T_s \cdot \omega[n] + 2T_s \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot e[n] \cdot A[n] \cdot \cos \phi[n] \\
 y[n] &= A[n] \cdot \sin \phi[n] \\
 e[n] &= u[n] - y[n]
 \end{aligned} \tag{10}$$

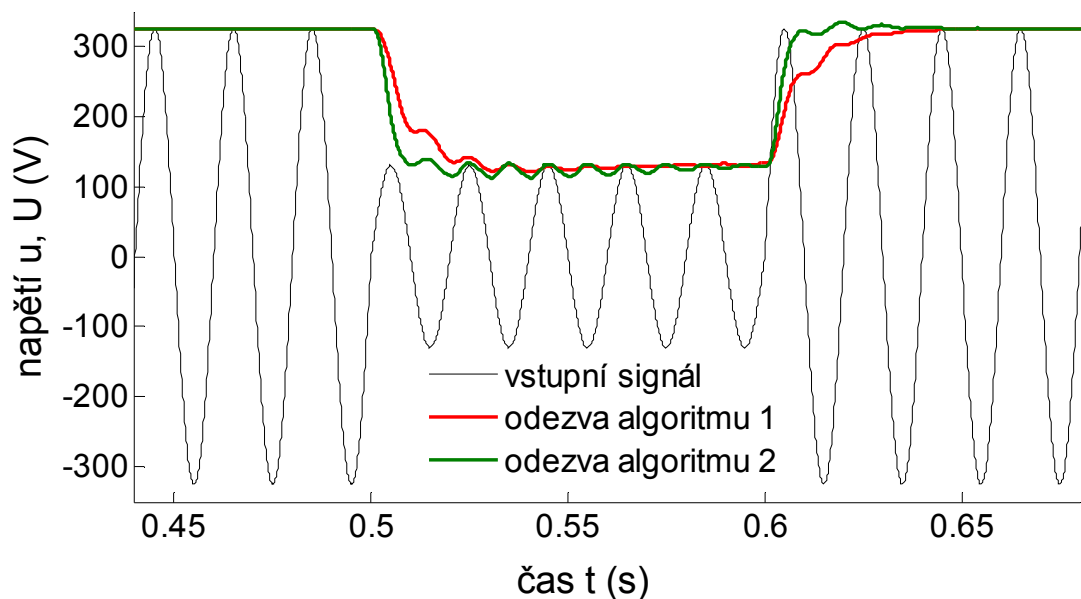
Rovnice (10) obsahuje veličiny stejného významu jako veličiny obsažené v rovnici (9), navíc zde však vystupují následující veličiny a symboly:

T_s	údaj charakterizující časovou vzdálenost dvou po sobě následujících vzorků (anglicky „ <i>sampling time</i> “). Vypočítá se jako převrácená hodnota vzorkovací frekvence f_{vz} , a jednotkou je sekunda.
n	index vyjadřující aktuální pozici algoritmu ve výpočtovém procesu



Obr. 38 Blokové schéma „Ziarani“ trackovacího algoritmu [37]

Na základě [37] autoři doporučují nastavit koeficienty μ_1 , μ_2 , μ_3 na hodnoty $\mu_1 = 200$, $\mu_2 = 20\,000$ a $\mu_3 = 0,02$, při kterých by měl algoritmus dosahovat nejpřesnějších výsledků. Samozřejmě, vyšší přesnosti dosažených výsledků nejspíše lze dosáhnout, ale pouze na úkor nižší či vyšší rychlosti konvergence v závislosti na tom, jestli jde o přesnost detekce úrovně napětí resp. času. Je tedy potřeba nalézt optimální hranici mezi těmito dvěma parametry výpočtu a především stanovit priority vlastního výpočtu – buďto co možná nejpřesněji popsat zaznamenané události (pomocí zbytkového napětí, délky trvání, tvaru události případně fáze okamžiku vzniku události) navzdory pomalejší detekci událostí nebo upřednostnit rychlost detekce událostí před přesností zaznamenaných parametrů události. Logickou úvahou lze usuzovat, že přesnost popisných parametrů zaznamenaných událostí na napětí by měla mít vyšší prioritu nežli snaha o dosažení minimální časové prodlevy při detekci událostí. Vliv nastavení koeficientů μ_1 , μ_2 , μ_3 na chod algoritmu je zobrazen na obrázku Obr. 39.



Obr. 39 Vliv koeficientů μ_1 , μ_2 , μ_3 na chod „Ziarani“ algoritmu. Červená linie: $\mu_1 = 200$, $\mu_2 = 20000$, $\mu_3 = 0,02$; zelená linie: $\mu_1 = 500$, $\mu_2 = 10000$, $\mu_3 = 0,02$

Na obrázku Obr. 39 je zřetelně vidět vliv nastavení „Ziarani“ algoritmu na rychlost detekce a na přesnost parametrů detekovaného poklesu napětí. Zatímco u autory doporučeného nastavení řídicích koeficientů (červená linie) algoritmem detekovaná amplituda napětí v okamžiku vzniku poklesu začne pozvolna klesat až do jejího ustálení na nové hodnotě, což zde trvá přibližně tři periody vstupního signálu (rychlost ustálení je dána rychlostí konvergence algoritmu, kdy pomalá konvergence je charakterizována kolísajícím průběhem amplitudy výstupního signálu), a po skončení poklesu opět pozvolna roste zpátky na jmenovitou hodnotu napětí; zelený průběh amplitudy s jiným nastavením řídicích koeficientů vykazuje mnohem rychlejší odezvu na změnu velikosti napětí vstupního signálu (klesání amplitudy v okamžiku vzniku poklesu a její růst po skončení poklesu má strmější průběh, čímž dochází k rychlejší detekci poklesu), avšak rychlost konvergence algoritmu je pomalejší a kolísání výstupní amplitudy během jejího ustalování je tak větší. Na parametrech detekovaného poklesu napětí se různé nastavení řídicích koeficientů projeví tak, že nastavení typické pro červenou linii bude vykazovat pomalejší detekci událostí, menší přesnost v detekované délce trvání událostí ale větší přesnost v detekovaném zbytkovém napětí události; kdežto nastavení typické pro zelenou linii bude vykazovat rychlejší detekci událostí, větší přesnost detekované délky událostí, ale nižší přesnost v detekovaném zbytkovém napětí události.

5.1.7 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr (KF) je algoritmus, pro který je charakteristické jeho všestranné použití. KF je vhodný pro užití v lineárních i nelineárních systémech, v systémech, kde je zapotřebí v reálném čase přesně měřit různé elektrické i neelektrické veličiny, tedy v systémech, kde jiné metody selhávají. V dnešní době je KF používán např. k experimentálním výpočtům a předvídání polohy a rychlosti pohybujících se letadel a vlaků, v radiotechnice k odstranění šumu v přenášených rádio-signálech, v robotice, k detekci a odstranění šumu ve videesignálech, k vyčíslení a zlepšení míry nejistoty při numerických simulacích toku podzemních vod, apod. V případě aplikace správně navrženého a nastaveného KF v oblasti elektroenergetiky lze velmi přesně identifikovat harmonické vyšších řádů superponované na sinusovou křivku napětí, detekovat a měřit míru vjemu flikru a v neposlední řadě také detekovat a analyzovat v elektrické síti náhodně se vyskytující události na napětí.

Pro správnou funkci KF je nejdůležitější přesný matematický popis systému, v němž má být KF použit. Pro použití KF k detekci a analýze událostí na napětí je zapotřebí co možná nejpřesněji matematicky popsat křivku napětí figurující jako vstupní signál. Při ideálním, harmonickými složkami vyšších řádů nezkrusleném sinusovém průběhu křivky napětí je matematický popis takového signálu velmi jednoduchý, avšak v reálné napájecí síti, kde se na sinusovou křivku napětí superponuje nespočet rušivých signálů, jejichž zdroji jsou především spotřebiče jiného než odporového charakteru, se „nezarušený“ sinusový průběh křivky napětí prakticky nevyskytuje. Matematický popis signálu, jehož amplitudové a fázové spektrum se náhodně mění v čase, je prakticky nemožné realizovat, neboť vlivem složitosti elektrizační soustavy lze jen těžko dopředu odhadovat míru zkreslení původně sinusové křivky napětí. KF, který má přednastaveny jiné parametry vstupního signálu, než jaké ve skutečnosti jsou, pak vykazuje výsledky nižší přesnosti, přičemž míra nepřesnosti výsledků závisí na tom, jak moc se liší nastavení KF od skutečného vstupního signálu.

Ačkoli již bylo publikováno více případů použití Kalmanova filtru pro detekci událostí na napětí s poměrně různorodou přesností v detekovaných parametrech událostí [40][41][42][43][44], pro detailnější prozkoumání funkce KF byl vybrán algoritmus uváděný ve [40]. Zde je popisován 13-ti stavový KF, který autoři navrhli a testovali nejen prostřednictvím počítačových simulací, ale také měřeními v reálné elektrické síti. Počet stavů byl zvolen na základě zkušeností autorů podložených dlouhodobými měřeními podílu vyšších harmonic-

kých složek napětí obsažených v elektrické napájecí síti, přičemž bylo zjištěno, že vliv harmonických složek řádu 13 a vyšších již není tak výrazný jako u složek nižších řádů a jejich zanedbáním při programování KF vzniká pouze zanedbatelná odchylka ve výsledcích (vzhledem k výsledkům dosaženým při korektním nastavení KF). Problémem u reálných měření však zůstávají v čase proměnné hodnoty amplitud a fází jednotlivých harmonických, neboť nastavení KF podle parametrů v určitém okamžiku v síti zjištěných vyšších harmonických a následné déletrvající měření s původním nastavením KF se míjí účinkem. Řešením je upravit algoritmus KF tak, aby byl auto-adaptivní, tzn., aby zadávání parametrů uvažovaných vyšších harmonických probíhalo automaticky (např. ve 200ms intervalech) na základě např. Fourierovou transformací zjištěného amplitudového a fázového spektra měřeného vstupního signálu [35]. Složitější výpočetní algoritmus však jistě přinese mnohem větší hardwarové požadavky a je otázkou, zdali toto vylepšení vůbec přinese takový užitek, aby se vyplatilo investovat do výkonnějšího hardwaru měřících přístrojů.

Kalmanův filtr je primárně určen k použití v lineárních systémech. V případě potřeby nasadit tento účinný výpočetní nástroj i v nelineárních systémech (v čase neustále se měnící napěťový signál) je nutné učinit drobné úpravy algoritmu – zde již hovoříme o „Rozšířeném Kalmanově filtru“ (Extended Kalman Filter – EKF). Základem funkce EKF aplikovaného na nelineární proces je linearizace nelineárních rovnic popisujících daný systém užitím Taylorova polynomu prvního řádu a následná aplikace modelu lineárního KF. Nelineární diskretní systém je v algoritmu EKF definovaný rovnicemi:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= f[x(k), k] + w(k) \\ z(k) &= h[x(k), k] + v(k),\end{aligned}\tag{11}$$

kde $x(k)$ a $z(k)$ představují stavový vektor resp. vektor měřených vstupních hodnot; funkce $f[x(k), k]$ a $h[x(k), k]$ jsou nelineární vektorové funkce. Pro náhodné proměnné $w(k)$ a $v(k)$ představující velikost procesního resp. měřicího šumu je charakteristické Normální rozdělení, přičemž se předpokládá, že obě proměnné jsou na sobě nezávislé.

$$\begin{aligned}v_k &\Rightarrow p(v) = N(0; R) \\ w_k &\Rightarrow p(w) = N(0; Q)\end{aligned}\tag{12}$$

Vektory $x(k)$, $w(k)$ a $v(k)$ obsažené v rovnicích (11) jsou základem pro vytvoření kovariančních matic $P(k)$, $Q(k)$ respektive $R(k)$, přičemž kovarianční matice $Q(k)$ a $R(k)$ slouží k nastavení dynamické odezvy Kalmanova filtru.

V rozšířeném Kalmanově filtru (EKF) je proces linearizace vstupního nelineárního systému proveden pomocí Taylorova polynomu prvního stupně, jehož matematický zápis vypadá následovně - viz rovnice (13).

$$\begin{aligned}\Phi_{ij}(k) &= \frac{\partial f_i[x(k), k]}{\partial x_j} \\ H_{ij}(k) &= \frac{\partial h_i[x(k), k]}{\partial x_j}\end{aligned}\tag{13}$$

kde f_i a h_i jsou i -té elementy funkcí f a h ; $\Phi(k)$ je přechodová matice stavů a $H(k)$ je stavová matice prvků popisujících měřený systém.

13-ti stavový EKF, který byl z mnoha možných (a publikovaných) variant použití Kalmanova filtru k detekci událostí na napětí (například [40][41][42][43][44]) vybrán pro detailnější prozkoumání, zahrnuje do výpočtu včetně základní harmonické vstupního napětí také velikosti všech lichých harmonických v rozmezí 3. až 11. řádu. Vyšší řády harmonických

nejdou v modelu systému uvažovány, neboť jejich velikost vzhledem k velikosti základní harmonické je v normálním provozu zanedbatelná. Stavový vektor spolu s vyjádřením dílčích složek pak vypadá následovně:

$$x = [x_{1a} \quad x_{1b} \quad x_{3a} \quad x_{3b} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad x_{9b} \quad x_{11a} \quad x_{11b} \quad x_{13}] \quad (14)$$

Jednotlivé členy stavového vektoru (14) lze pak vyjádřit jako

$$\begin{aligned} x_{1a} &= A_1 \cos \theta_1 & x_{1b} &= A_1 \cos \theta_1 \\ x_{3a} &= A_3 \cos \theta_3 & x_{3b} &= A_3 \cos \theta_3 \\ x_{5a} &= A_5 \cos \theta_5 & x_{5b} &= A_5 \cos \theta_5 \\ x_{7a} &= A_7 \cos \theta_7 & x_{7b} &= A_7 \cos \theta_7 \\ x_{9a} &= A_9 \cos \theta_9 & x_{9b} &= A_9 \cos \theta_9 \\ x_{11a} &= A_{11} \cos \theta_{11} & x_{11b} &= A_{11} \cos \theta_{11} \\ x_{13} &= \omega \cdot k \cdot T_s \end{aligned} \quad (15)$$

Koeficienty označené symbolem „ a “ v rovnicích (14)(15) vyjadřují reálné složky napětí, zatímco koeficienty označené symbolem „ b “ vyjadřují imaginární složky napětí jednotlivých harmonických, T_s je vzorkovací interval.

Vzhledem k nepředpokládané extrémní změně amplitud a fázových úhlů jednotlivých harmonických napětí mezi po sobě následujícími vzorky „ k “ resp. „ $k+1$ “ (vzorkovací frekvence se běžně pohybuje v řádech kS/s, tzn. časový rozestup dvou po sobě následujících vzorků je řádově v desetinách milisekund) je možné pro dílčí složky stavového vektoru předpokládat následující zjednodušení:

$$\begin{aligned} x_{1a}(k+1) &= x_{1a}(k) & x_{1b}(k+1) &= x_{1b}(k) \\ x_{3a}(k+1) &= x_{3a}(k) & x_{3b}(k+1) &= x_{3b}(k) \\ x_{5a}(k+1) &= x_{5a}(k) & x_{5b}(k+1) &= x_{5b}(k) \\ x_{7a}(k+1) &= x_{7a}(k) & x_{7b}(k+1) &= x_{7b}(k) \\ x_{9a}(k+1) &= x_{9a}(k) & x_{9b}(k+1) &= x_{9b}(k) \\ x_{11a}(k+1) &= x_{11a}(k) & x_{11b}(k+1) &= x_{11b}(k) \\ x_{13}(k+1) &= \omega(k+1) \cdot T_s = \omega k T_s + \omega T_s = x_{13}(k) + \frac{x_{13}(k)}{k} = \frac{(k+1)}{k} x_{13}(k) \end{aligned} \quad (16)$$

Na základě uplatněného zjednodušení stavového vektoru uváděného v rovnici (16) lze definovat přechodovou matici stavů $\Phi(k)$:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{k+1}{k} \end{bmatrix} \quad (17)$$

a stavovou matici prvků popisujících měřený systém $H(k)$

$$H^T = \begin{bmatrix} \sin x_{13} \\ \cos x_{13} \\ \sin 3x_{13} \\ \cos 3x_{13} \\ \vdots \\ \sin 11x_{13} \\ \cos 11x_{13} \\ x_{1a} \cos x_{13} - x_{1b} \sin x_{13} + \dots + 11x_{11a} \cos 11x_{13} - 11x_{11b} \sin 11x_{13} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Vlastní chod Kalmanova filtru v jednotlivých krocích pak popisují níže uvedené rovnice.

1. Počáteční nastavení EKF

x'_k prvotní odhad stavového vektoru $x(k)$ – nutno zadat manuálně

P'_k prvotní odhad kovarianční matice $P(k)$ – nutno zadat manuálně

2. Výpočet koeficientu filtru K v okamžiku k

$$K_k = P'_k \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P'_k \cdot H_k^T + R_k)^{-1} \quad (19)$$

3. Aktualizace odhadnutého stavového vektoru $x'(k)$ pomocí vektoru měřených hodnot $z(k)$ v okamžiku k

$$x_k = x'_k + K_k \cdot (z_k - h[x'_k, k]) \quad (20)$$

4. Výpočet odchylky kovarianční matice $P(k)$

$$P_k = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P'_k \quad (21)$$

kde symbol „ I “ značí jednotkovou matici.

5. Odhad stavového x'_{k+1} vektoru v následujícím kroku „ $k+1$ “

$$x'_{k+1} = f[x(k), k] \quad (22)$$

6. Odhad kovarianční matice v následujícím kroku „ $k+1$ “

$$P'_{k+1} = \phi_k \cdot P_k \cdot \phi_k^T + Q_k \quad (23)$$

7. Pokračování výpočtem nového koeficientu filtru K_{k+1} (krok 2).

5.1.8 Vlnková analýza (Wavelet analysis)

Metoda je považována za velmi silný nástroj speciálně užívaný k analýze nestacionárních signálů. Základem je nerovnoměrné rozdělení časového a frekvenčního pásma, dávající krátké intervaly pro vysokofrekvenční složky a dlouhé intervaly pro nízkofrekvenční složky. Vlnková analýza nachází hojného využití při monitoringu rušivých signálů implementovaných na v ideálním případě nezkreslenou sinusovou křivku napětí vlivem působení různých druhů elektromagnetického rušení [46][47][48].

Klíčovým pro získání přesných výsledků je zvolení nejvhodnější vlnkové funkce, která závisí na typu rušivého jevu, jež se má pomocí vlnkové analýzy detekovat a následně analyzovat. V případě detekce a analýzy událostí na napětí je autory v [45] doporučováno užití „Daubechiesové“ vlnky s šesti koeficienty jakožto nejvhodnější vlnkovou funkcí. Dle autorů velikost koeficientů nezávisí na signálu neměnném v čase, koeficienty dosahují velkých změn pouze vlivem vysokofrekvenčních složek přítomných v okamžiku vzniku a zániku napěťové události. Jinými slovy, užití vlnové analýzy založené na „Daubechiesové“ vlnkách s šesti koeficienty je vhodné pro velmi rychlou detekci a určení délek trvání událostí na napětí, přičemž velikost napětí během události se určuje nepřímo na základě dalších vložených algoritmů (např. v zahraničí publikovaná kooperace Vlnkové analýzy s Kalmanovým filtrem [40]).

5.1.9 Shrnutí

Metod, které je možné použít k detekci a analýze událostí na napětí, je velké množství, s trochou nadsázky lze říct, že co autor, to nová metoda. Každý autor při tvorbě „svého“ výpočetního algoritmu postupuje na základě jiného toku myšlenek, má jiné představy a nároky na vytvářený algoritmus a tedy i přesnost a rychlost na první pohled stejných algoritmů může být odlišná. Pro detekční algoritmus je důležité, aby jednak správně detekoval a vyhodnocoval parametry zaznamenaných poklesů/přerušení napětí, ale také aby jej bylo možné použít v externích monitorech poklesů napětí používaných pro dlouhodobý monitoring. Algoritmus by tedy neměl mít zbytečně vysoké hardwarové nároky, především na paměť a rychlost procesoru.

5.2 Simulace, průběh testování vybraných detekčních algoritmů a dosažené výsledky

Z výše uvedených a teoreticky popsaných metod určených k detekci událostí na napětí byly pro testování jejich schopností vybrány následující metody: RMS (1/2), RMS 10ms, klouzající RMS (1/2), klouzající RMS 10ms, „Ziarani“ algoritmus s dvojím nastavením koeficientů ovlivňujících chod algoritmu (v dalším textu označováno jako „T.A.1“ respektive „T.A.2“), a Rozšířený Kalmanův filtr (EKF). Algoritmy jednotlivých metod jsou naprogramovány v prostředí MATLAB/SIMULINK. Uvedené metody jsou nastaveny tak, aby detekovaly události na napětí v souladu s aktuálně platnými normami definovanými postupy [1][6][9], tzn., aby detekovaly události na napětí od okamžiku, kdy metodami vypočtená efektivní hodnota napětí překročí hranice dovolené tolerance napětí $U_n \pm 10\%$, až do okamžiku, kdy se efektivní hodnota napětí „vrátí“ zpět do pásma $U_n \pm 8\%$ (uvažována hystereze 2%).

V programovém prostředí MATLAB/SIMULINK je vytvořen jednofázový model napěťového generátoru, který generuje napěťový signál harmonického průběhu o efektivní hodnotě 230V a frekvenci 50Hz, což jsou v podstatě idealizované parametry v reálné elektrické síti vyskytující se křivky napětí. V případě potřeby simulovat vyššími harmonickými deformovaný průběh napěťového signálu (v elektrické síti běžně se vyskytující), lze, pomocí amplitud a fází jednotlivých harmonických složek, již na generátoru nastavit míru „zarušení“ původně sinusové křivky napětí. Na generovaný jednosekundový napěťový signál (50 period) je následně superponována předem zvolená napěťová událost (pokles, přerušení napětí nebo přepětí) začínající po uplynutí 500ms intervalu (platí pouze pro simulace, v nichž není testován vliv fázového úhlu vzniku události na přesnost jednotlivých detekčních metod). Výběr napěťové události spočívá ve zvolení jedné z mnoha kombinací danou událost popisujících parametrů, zejména proměnné délky trvání, hloubky poklesu případně velikosti přepětí, tvaru události, fázového úhlu napětí v okamžiku vzniku události, od jmenovité hodnoty napětí lišící se veli-

kostí napětí před vznikem události (po skončení události je uvažována stejná velikost napětí jako před vznikem události) apod. Vzhledem k tomu, že události na napětí jsou prozatím chápány jako dvouparametrové jevy, budou výsledky prováděných simulací zaměřeny na porovnání přesnosti parametrů detekovaných poklesů napětí vzhledem ke skutečným parametrům simulovaných poklesů (porovnání bude provedeno zvlášť pro každý parametr), v potaz bude brána i velikost časového zpoždění jednotlivých algoritmů při detekci poklesů napětí a rovněž také schopnost detekčního algoritmu zaznamenat skutečný průběh detekovaného poklesu. V grafických zobrazeních výsledků provedených simulací budou jednotlivé testované detekční algoritmy vystupovat pod barvami, jež jsou uvedeny v tabulce Tab. 14.

Tab. 14 Barevné označení testovaných detekčních algoritmů v zobrazených grafech

Označení algoritmu	Barva
RMS (1/2)	tmavě modrá
RMS 10ms	červená
Klouzající RMS (1/2)	žlutá
Klouzající RMS 10ms	šedá
T.A.1	červená
T.A.2	zelená
EKF	ružová

Algoritmus EKF, stejně jako všechny ostatní testované algoritmy, podle očekávání pracují s diskretním vstupním signálem, takže je nejprve nutné simulovaný vstupní signál diskretizovat. Zapotřebí je tedy zvolit vhodnou vzorkovací frekvenci, neboť příliš nízká hodnota vzorkovací frekvence může mít za následek špatnou interpretaci vstupního signálu (nízký počet vzorků nemusí stačit k přesnému popisu různými rušivými jevy deformovaného signálu), naopak příliš vysoká hodnota vzorkovací frekvence zase klade zbytečně velké nároky na paměť a hardware měřicího přístroje – viz obrázek Obr. 9. Aby bylo možné uplatnit výsledky provedených simulací v praxi, tzn. implementovat jednotlivé algoritmy do měřicích přístrojů a analyzátorů, je nutné již při počítačových simulacích nastavovat reálné parametry jak u vstupních měřených signálů, tak i u vnitřních nastavení jednotlivých testovaných algoritmů. Zvolená vzorkovací frekvence by v každém případě měla být v horním rozsahu frekvencí aktuálně užívaných nejpřesnějších měřicích přístrojů. Jako vyhovující byla zvolena vzorkovací frekvence 10kS/s. Generovaný jednosekundový signál popsáný pomocí 10-ti tisíc vzorků se již jeví jako dostatečně přesně definovaný signál pro účely detekce událostí na napětí.

5.2.1 Simulace 1 – Vliv „náhodně“ zvolené kombinace parametrů definujících danou událost na citlivost daného algoritmu

Na základě výše uvedených parametrů přesně definujících danou napěťovou událost (nikoli pouze dvou základních parametrů, kterými jsou zbytkové napětí a délka trvání) bylo systematicky zvoleno 13 událostí, jejichž parametry uvádí tabulka Tab. 15, a pomocí kterých byly prověřeny schopnosti daných algoritmů správně simulované události detekovat.

Tab. 15 Parametry simulovaných událostí na napětí

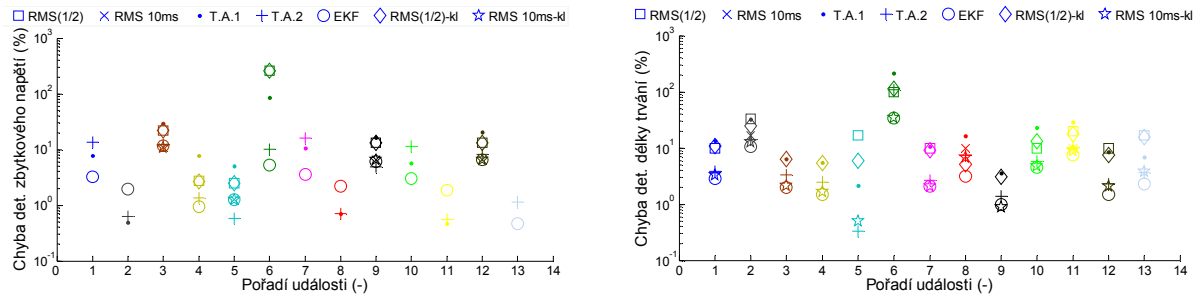
P o ř a d í	Parametry napěťové události					
	Typ	Průběh	Napětí před/po události (V)	Počáteční fázový úhel (°)	Zbytkové napětí U_d (V)	Délka trvání (ms)
1	Pokles	Obdélník	230	0	92	100
2	Pokles	Obdélník	230	90	92	60
3	Pokles	Pila	230	0	92	60
4	Pokles	Pila 2	230	0	138	60
5	Pokles	Pila	230	0	184	60
6	Pokles	Obdélník	230	0	46	10
7	Pokles	Obdélník	241,5	0	92	100
8	Pokles	Obdélník	241,5	90	92	100
9	Pokles	Pila	241,5	0	92	100
10	Pokles	Obdélník	218,5	0	92	100
11	Pokles	Obdélník	218,5	90	92	100
12	Pokles	Pila	218,5	0	92	100
13	Přepětí	Obdélník	230	0	299	60

Parametry jednotlivých událostí byly vybrány tak, aby se prokázal (případně vyvrátil) vliv jednotlivých měnicích se parametrů na citlivost daného detekčního algoritmu. Jak vidno z tabulky Tab. 15, téměř všechny události jsou charakterizované jako poklesy napětí, pouze v jednom případě (událost č. 13) bylo simulováno zvýšení napětí. Bylo tak učiněno zejména proto, aby byla dokázána nezávislost citlivosti všech algoritmů na typu detekované události (za předpokladu shody v ostatních parametrech události⁷). Co se týče průběhů zvolených událostí, vybrány byly dva v reálných elektrických sítích nejčastěji se vyskytující průběhy, a sice obdélníkový, který je charakteristický pro události, jejichž příčinou je zkratová porucha či manipulace, a pilový, který je charakteristický pro události vznikající vlivem spouštění zátěží velkých výkonů zejména indukčního charakteru. Odlišnosti mezi průběhy vybraných událostí, zejména průběhem č. 4 označovaného jako „Pila 2“ a průběhů označovaných „Pila“ vyplývají z obrázku Obr. 4.

V souladu s teoretickým popisem jednotlivých detekčních algoritmů lze již před samotným spuštěním simulace očekávat, že citlivost jednotlivých algoritmů a přesnost parametrů algoritmy detekovaných událostí bude rozdílná a bude se lišit také v závislosti na skutečných parametrech simulované události. Míra nepřesnosti parametrů algoritmy detekovaných událostí (vzhledem ke skutečným parametrům události) je vyobrazena na obrázku Obr. 40.

⁷ Předpoklad shody parametrů událostí je uvažován pro dvojici událostí pokles napětí – zvýšení napětí, kdy obě události budou mít stejnou délku trvání, stejný průběh, stejný fázový úhel okamžiku vzniku události, stejnou odchylku velikosti napětí před vznikem a po skončení události vzhledem ke jmenovité hodnotě napětí a stejnou procentuální hodnotu zbytkového napětí (v případě poklesu) a velikosti přepětí (v případě přepětí) během trvání události.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 40 Procentuální míra nepřesnosti parametrů detekovaných událostí simulace č.1

Přehled všemi algoritmy detekovaných parametrů všech simulovaných událostí uvádí tabulka Tab. 16.

Tab. 16 Srovnání parametrů různými výpočetními algoritmy detekovaných událostí na napětí

P o ř á d í	B a r v a	Para- metr události	Použitá metoda a indikované parametry událostí							
			Nasta- vená událost	RMS (1/2)	RMS 10ms	T.A.1		EKF R=1 Q=100	Klouz. RMS (1/2)	Klouz. RMS 10ms
						$\mu_1=200$ $\mu_2=2E4$ $\mu_3=0,02$	$\mu_1=500$ $\mu_2=1E4$ $\mu_3=0,02$			
1	■	U_d (V)	92	92	92	84,9	79,4	89,0	92	92
		Δt (ms)	100	110	100	113,4	103,8	102,9	110,8	103,2
		t_{det} (ms)	-	10	10	4	2,6	1,6	4,9	3,6
2	■	U_d (V)	92	92	92	91,6	91,4	90,2	92	92
		Δt (ms)	60	80	70	79,3	68,5	66,3	74,8	67,8
		t_{det} (ms)	-	10	10	6	5,4	5,3	8	6,2
3	■	U_d (V)	92	112,4	102	119	103,2	102,9	112,4	102
		Δt (ms)	60	60	60	63,8	62	61,2	63,8	61,3
		t_{det} (ms)	-	10	10	4,1	2,6	1,6	4,9	3,7
4	■	U_d (V)	138	141,7	138	148,6	136,1	136,7	141,7	138
		Δt (ms)	60	60	60	63,3	61,5	60,9	63,2	61
		t_{det} (ms)	-	10	10	4,7	3	1,9	5,6	4
5	■	U_d (V)	184	188,6	186,3	193,1	185,1	186,3	188,6	186,3
		Δt (ms)	60	50	60	61,3	60,2	60	56,4	59,7
		t_{det} (ms)	-	20	10	6,7	4,3	2,7	12,8	5,3
6	■	U_d (V)	46	165,9	46	85,1	50,6	43,6	165,9	46
		Δt (ms)	10	20	10	31,5	20,9	13,4	21,3	13,5
		t_{det} (ms)	-	10	10	3,7	2,3	1,4	4,6	3,4
7	■	U_d (V)	92	92	92	82,3	77,2	88,7	92	92
		Δt (ms)	100	110	100	110,5	102,7	102,1	109,1	102,1
		t_{det} (ms)	-	10	10	4,8	3	1,8	5,7	4,1
8	■	U_d (V)	92	92	92	91,4	91,4	90	92	92
		Δt (ms)	100	100	110	116,3	107,3	103,2	105,1	106,8
		t_{det} (ms)	-	20	10	6,4	5,6	5,4	12,8	6,7
9	■	U_d (V)	92	104,2	98	107	96,5	97,6	104,2	98
		Δt (ms)	100	100	100	103,6	101,4	101	103,1	100,9
		t_{det} (ms)	-	10	10	4,8	3	1,8	5,8	4,1
10	■	U_d (V)	92	92	92	86,8	81,4	89,2	92	92
		Δt (ms)	100	110	100	123,3	105,8	104,5	113,2	104,8
		t_{det} (ms)	-	10	10	3,1	2	1,3	3,8	2,9
11	■	U_d (V)	92	92	92	91,6	91,5	90,3	92	92
		Δt (ms)	100	120	110	128,9	110,4	107,6	117,8	108,9
		t_{det} (ms)	-	10	10	5,5	5,2	5,2	6,4	5,7

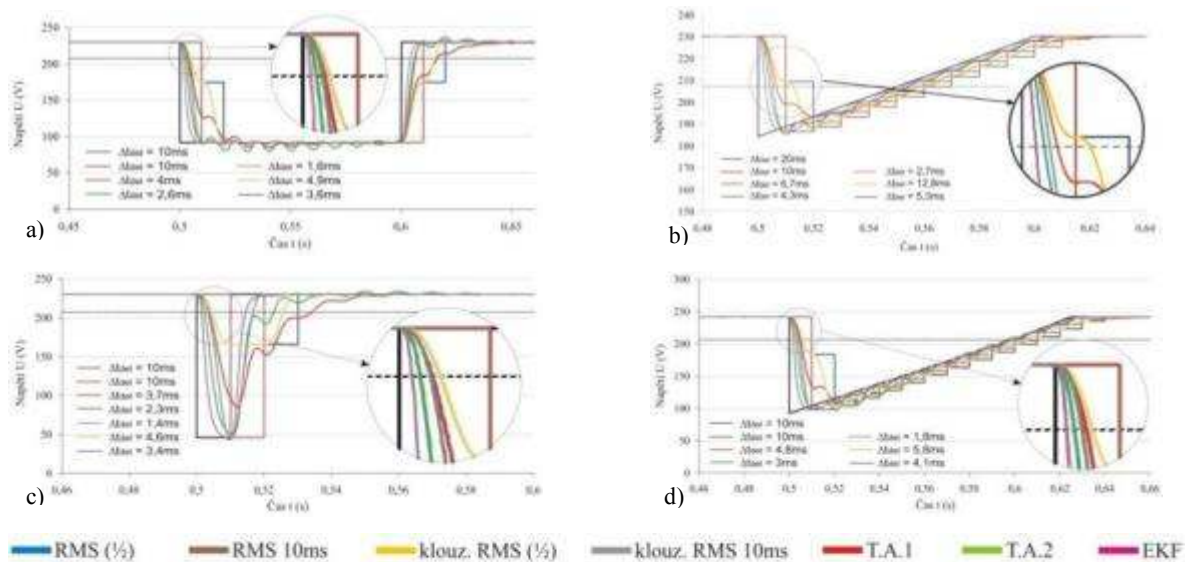
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

12	U_d (V)	92	104,2	98	110,8	99,6	98	104,2	98
	Δt (ms)	100	110	100	108,5	102,3	101,5	107,6	102,1
	t_{det} (ms)	-	10	10	3,1	2,1	1,3	3,8	2,9
13	U_d (V)	299	299	299	298,8	302,4	300,4	299	299
	Δt (ms)	60	70	60	64,1	62,2	61,4	69,5	62,3
	t_{det} (ms)	-	10	10	4,9	3,4	2,1	5,6	4,1

Z obrázku Obr. 40 patřeno tabulky Tab. 16 je patrné, že ne všechny testované algoritmy vykazují stejnou přesnost v detekci obou hlavních popisných parametrů události, kterými jsou (dle [6][7][9]) zbytkové napětí a délka trvání události. U některých událostí je například přesnost daným algoritmem detekovaného zbytkového napětí velmi vysoká, avšak přesnost stejným algoritmem detekované délky trvání už je výrazně nižší. Z výsledků je patrné, že jako velmi přesná se jeví metoda RMS 10ms, která přesně udává alespoň jeden parametr detekovaného poklesu téměř u všech simulovaných poklesů, vyjma poklesů č. 3, 5, 9, 12 (chyba v detekovaném zbytkovém napětí) resp. poklesů č. 2, 8, 11 (chyba v detekované délce trvání). Je to dáno především volbou parametrů poklesů určených k simulaci. Detailnější testy přesnosti vybraných detekčních algoritmů jsou provedeny v dalších simulacích. Co se týče rychlosti detekce simulovaných událostí, jednoznačně nejrychleji je danou událost schopen detekovat EKF následovaný klouzavou RMS 10ms metodou, „Ziaraniho“ algoritmy T.A.2 resp. T.A.1. Algoritmy založené na klasickém výpočtu rms v tomto ohledu výrazně zaostávají, což je ostatně dáno principem jejich činnosti (vypočítávají rms hodnotu napětí z již uplynulé periody signálu, kdežto trackovací algoritmy vyhodnocují efektivní hodnotu testovaného signálu průběžně v každém kroku – při zvolené vzorkovací frekvenci 10kS/s proběhne výpočet efektivní hodnoty testovaného signálu přesně 10^4 -krát). Z výše uvedeného plyne také omezená schopnost rms algoritmů správně zaznamenat průběh detekované události. Rovněž se potvrdil také předpoklad závislosti parametrů detekovaných událostí na všech popisných parametrech definujících skutečný tvar a průběh nastavené události (viz parametry udávané tabulkou Tab. 15).

Kromě dvou základních popisných parametrů události na napětí (zbytkové napětí, délka trvání) je dalším významným parametrem, jež charakterizuje citlivost detekčního algoritmu, časová prodleva při detekci dané události. Vliv na velikost časové prodlevy při detekci události na napětí mají všechny popisné parametry dané události, tedy nejen zbytkové napětí a délka trvání události. Jak ostatně vyplývá i z tabulky Tab. 16, výrazný vliv na detekční prodlevu má fázový úhel okamžiku vzniku poklesu, ale též samotný průběh daného poklesu napětí. Odlišná časová prodleva testovaných algoritmů při detekci simulovaných událostí je v detailu k vidění na obrázku Obr. 41.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 41 Detail rychlosti algoritmů při detekci události a) č. 1, b) č. 5, c) č. 6, d) č. 9

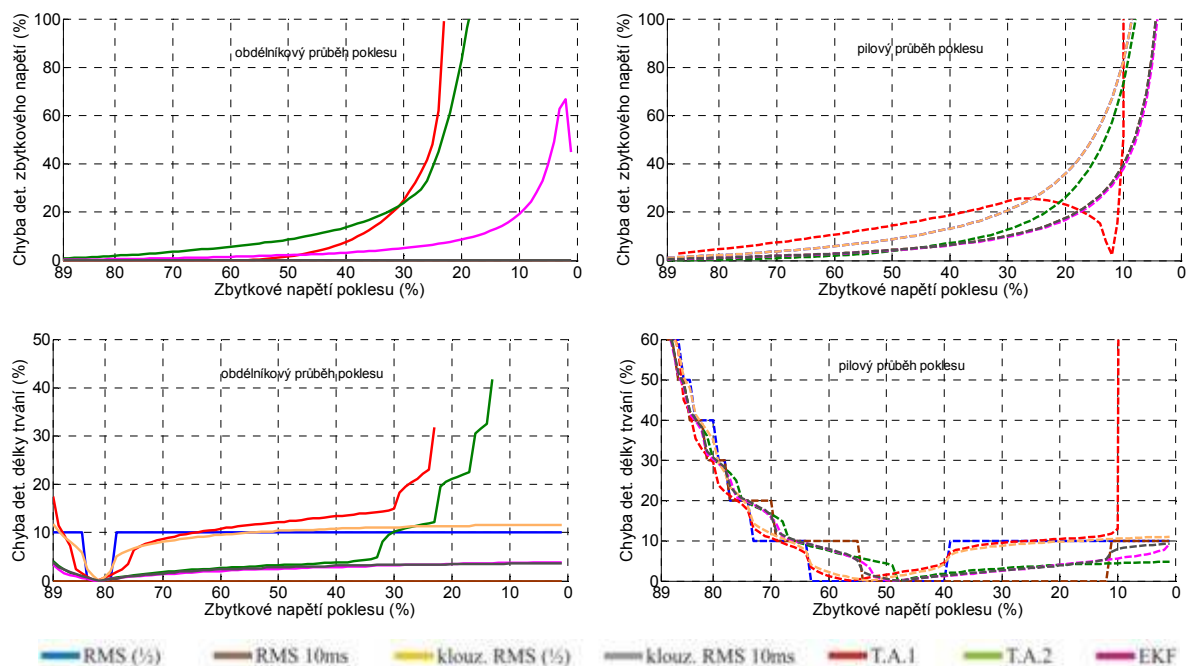
Na obrázku Obr. 41 je názorně vidět, jak jsou jednotlivé testované algoritmy schopny zaznamenat tvar detekované události u vybraných typů simulovaných poklesů napětí. Rozdíl je vidět zejména v porovnání zaznamenaných průběhů poklesů z trackovacích algoritmů a klasických RMS metod, kdy průběhy z trackovacích algoritmů mají typický kolísavý charakter, což je způsobeno v každém kroku prováděným odhadem efektivní hodnoty následujícího vzorku (u déletrvajících obdélníkových událostí nebo po skončení události postupně dochází k utlumení kolísání a ustálení výstupu algoritmu na nové hodnotě napětí), zatímco průběhy z klasických rms algoritmů jsou typické skokovými změnami napětí vždy v okamžiku skončení vyhodnocovacího intervalu, z něhož se efektivní hodnota počítá. Za zmínku také stojí, že všechny rms algoritmy (klasické i klouzavé) nikdy nevyhodnotí zbytkové napětí poklesu hodnotou nižší, než jaká byla ve skutečnosti, čímž vlastně všechny poklesy napětí jsou v tomto parametru buďto detekovány správně (obdélníkové poklesy s délkou trvání větší než délka vyhodnocovacího okna), nebo jsou podhodnoceny. V parametru detekované délky trvání je však situace diametrálně odlišná, neboť téměř všechny události jsou pomocí rms algoritmů vyhodnoceny jako závažnější, než ve skutečnosti jsou, neboť pouze u události č. 5 je indikována délka trvání kratší, než jakou ve skutečnosti měla simulovaná událost. Naproti tomu trackovací algoritmy většinou vyhodnotí délku trvání detekované události jako delší, než je ve skutečnosti, a je to dáno zejména procesem ustalování výstupní hodnoty (postupné zpřesňování odhadu hodnoty pro další vzorek) při neměnicím se vstupu. Co se týká parametru zbytkového napětí, tak pro trackovací algoritmy jsou typické dva případy: a) buďto je délka skutečné události velmi krátká (viz např. událost č. 6) případně se jedná o pilový průběh události, pro které je typické, že detekovaná extrémní hodnota napětí dosahuje vyšších hodnot (pokles) případně nižších hodnot (přepětí) než jsou ve skutečnosti a tedy detekovaná událost je podhodnocena a indikována jako méně závažná, nebo b) délka trvání skutečné události je dostatečně dlouhá na to, aby se v algoritmu započal proces ustalování výstupní hodnoty, a tyto události jsou na druhou stranu zase vždy nadhodnoceny, tedy jsou indikovány jako závažnější (indikované zbytkové napětí u poklesů je vždy nižší než bylo u skutečné události).

Na Obr. 41 jsou rovněž pro vybrané typy událostí zobrazeny detekční prodlevy jednotlivých algoritmů společně s vyobrazením detailu zaměřujícího se na okamžik, kdy napěťový výstup každého algoritmu právě kříží hranici určující vznik poklesu napětí ($90\% U_n$). U všech čtyřech vyobrazených událostí vykazoval nejrychlejší detekci poklesu algoritmus EKF, následovaný T.A.2, klouzavým RMS 10ms, T.A.1. Odezvy klasických RMS algoritmů jsou u událostí č. 1, č. 6 a č. 9 totožné a křivky se překrývají, avšak u události č. 5 je již patrný rozdíl

mezi prodlevou algoritmu RMS(1/2) a RMS 10ms, kdy prvně jmenovaný detekuje pokles napětí s prodlevou 20ms, zatímco druhý jmenovaný s prodlevou 10ms.

5.2.2 Simulace 2 – Vliv proměnné hloubky poklesu napětí na citlivost daného algoritmu

Simulace byla vytvořena za účelem zjištění vlivu měnícího se zbytkového napětí poklesů na citlivost testovaných detekčních algoritmů. Na generovaný harmonický signál o efektivní hodnotě 230V a frekvenci 50Hz bylo postupně superponováno celkem 89 poklesů napětí, přičemž zbytková napětí jednotlivých poklesů byla vždy po každém poklesu napětí snižována z původních 89% jmenovitého napětí s krokem 1% U_n až na hodnotu 1% U_n , která svou velikostí už prakticky odpovídá přerušení napětí. Délka trvání všech poklesů byla totožná, a sice rovných 100ms. Fázový úhel okamžiku vzniku poklesu byl pro všechny poklesy nastaven na 0°, tzn., že každý pokles napětí započal přesně v čase 500ms generovaného jednosekundového signálu. Pro zjištění vlivu průběhu signálu na algoritmy detekované parametry poklesů byly nastaveny jak obdélníkové poklesy, tak poklesy pilových průběhů. Srovnání výsledků jednotlivých algoritmů je zobrazeno na obrázku Obr. 42.



Obr. 42 Závislost chyby algoritmy detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí na velikosti skutečného zbytkového napětí poklesu (krok 1% U_n)

Z obrázku Obr. 42 je patrné, že co se týče přesnosti detekovaného zbytkového napětí, nejlepších výsledků dosahují metody založené na algoritmu RMS (metody RMS (1/2), RMS 10ms, klouzající RMS (1/2), klouzající RMS 10ms). Je to dáno především principem funkce těchto metod, kdy při obdélníkových poklesech délky trvání větší než je délka vyhodnocovacího okna metody (≥ 20 ms resp. ≥ 10 ms) již metody detekují správnou hodnotu zbytkového napětí poklesu, neboť v téhle simulaci byla délka trvání nastavených poklesů rovna 100ms). Ostatní metody vykazují přesnost nižší, avšak v případě EKF zdá se dostačující (prakticky až do zbytkového napětí 20% U_n se chybovost detekovaného zbytkového napětí pohybuje výrazně pod hranicí 10%, což konkrétně u této hodnoty značí chybu 8,63% - přepočteno na jednotky napětí činí chyba méně než 4V. Algoritmy T.A.1 resp. T.A.2 vykazují ve srovnání s EKF

ještě nižší přesnost, a poklesy s úrovní zbytkového napětí nižší než 23% U_n resp. 19% U_n ani nejsou schopny zaznamenat, neboť u nich nastala chyba v konvergenci.

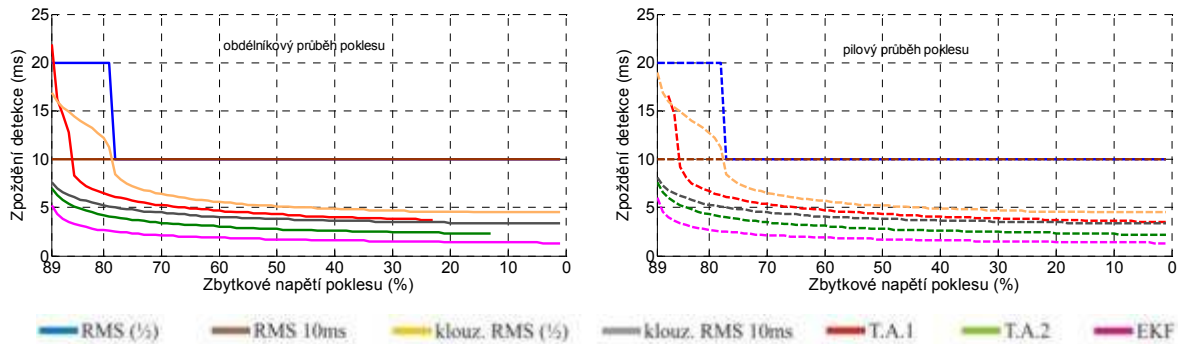
Co se týče přesnosti detekované délky trvání poklesů napětí, nejlepších výsledků dosahuje metoda RMS 10ms, která simulované obdélníkové poklesy detekuje bezchybně. Velmi přesné výsledky opět vykazuje EKF, jehož chybovost nepřesahuje 4% (což při nastaveném poklesu délky trvání 100ms dává toleranci maximálně 4ms). V měřících přístrojích aktuálně užívaná metoda dosahuje, dle očekávání, při detekci většiny poklesů 10% chybovosti. Klouzající metody RMS zde dosahují podobných výsledků jako jejich standardní pevné ekvivalenty, kdy rozdíl v přesnosti nepřesahuje hodnotu 4%.

Chybovost jednotlivými algoritmy detekovaných poklesů napětí pilových průběhů je popsána křivkami, které vykazují podobnou tendenci jako křivky vyjadřující chybovost detekovaných parametrů poklesů obdélníkových průběhů, pouze míra chybovosti detekovaného zbytkového napětí s klesající hodnotou skutečného zbytkového napětí poklesu mnohem rychleji narůstá. (viz Obr. 42). Již se také začíná projevovat nevýhoda klasického RMS algoritmu, kdy algoritmy RMS (1/2) stejně jako jeho klouzající ekvivalent (obě křivky se překrývají) vykazují u poklesů nižších zbytkových napětí než 30% U_n chybovost detekovaného zbytkového napětí vyšší než 20%, zatímco algoritmy RMS 10ms a jeho klouzající ekvivalent dosahují jen nepatrně horších výsledků než algoritmus EKF. Přesnost algoritmu T.A.1 se mírně zlepšila u poklesů se zbytkovým napětím nižším než 30% U_n , avšak poklesy s větším zbytkovým napětím než 30% U_n jsou detekovány méně přesněji v porovnání s poklesy obdélníkových průběhů. K chybě konvergence metody T.A.1 dochází u poklesu o zbytkovém napětí 12% U_n . Algoritmus T.A.2 při detekci zbytkového napětí pilových poklesů dosahuje vyšší přesnosti než u obdélníkových poklesů, a sice přes celé spektrum simulovaných zbytkových napětí. Prakticky až do hodnoty zbytkového napětí 36% U_n vykazuje srovnatelné výsledky jako algoritmy EKF, RMS 10ms a klouzající RMS 10ms.

Křivky vyjadřující chybovost detekované délky trvání u pilových průběhů poklesů napětí vykazují podobné průběhy, jako mají křivky chybovosti obdélníkových průběhů, jen jsou, „jakoby“ posunuty směrem k nižším hodnotám zbytkového napětí. Pro méně závažné poklesy napětí se zbytkovým napětím vyšším než 60% U_n je charakteristickým rysem všech testovaných detekčních algoritmů značně vyšší chybovost detekované délky trvání poklesů než u poklesů obdélníkových průběhů.

Vliv velikosti zbytkového napětí poklesu na časovou prodlevu při detekci poklesu je zobrazen na obrázku Obr. 43. Je patrné, že oba testované průběhy poklesů (obdélníkový, pilový) jsou nejrychleji detekovány algoritmem EKF, následovaný algoritmy TA2, klouzající RMS 10ms, TA1, klouzající RMS (1/2), RMS 10ms a nakonec aktuálně preferovanou klasickou metodou RMS (1/2). Za povšimnutí rovněž stojí, že průběh nastaveného poklesu napětí má minimální vliv na časovou prodlevu při detekci, což platí pro všechny testované detekční algoritmy. Patrně je to způsobeno tím, že jak obdélníkové poklesy, tak pilové poklesy mají víceméně stejný průběh sestupné hrany napětí (viz Obr. 4), neboť efektivní napětí v okamžiku vzniku poklesu téměř skokově klesá na hodnotu zbytkového napětí poklesu.

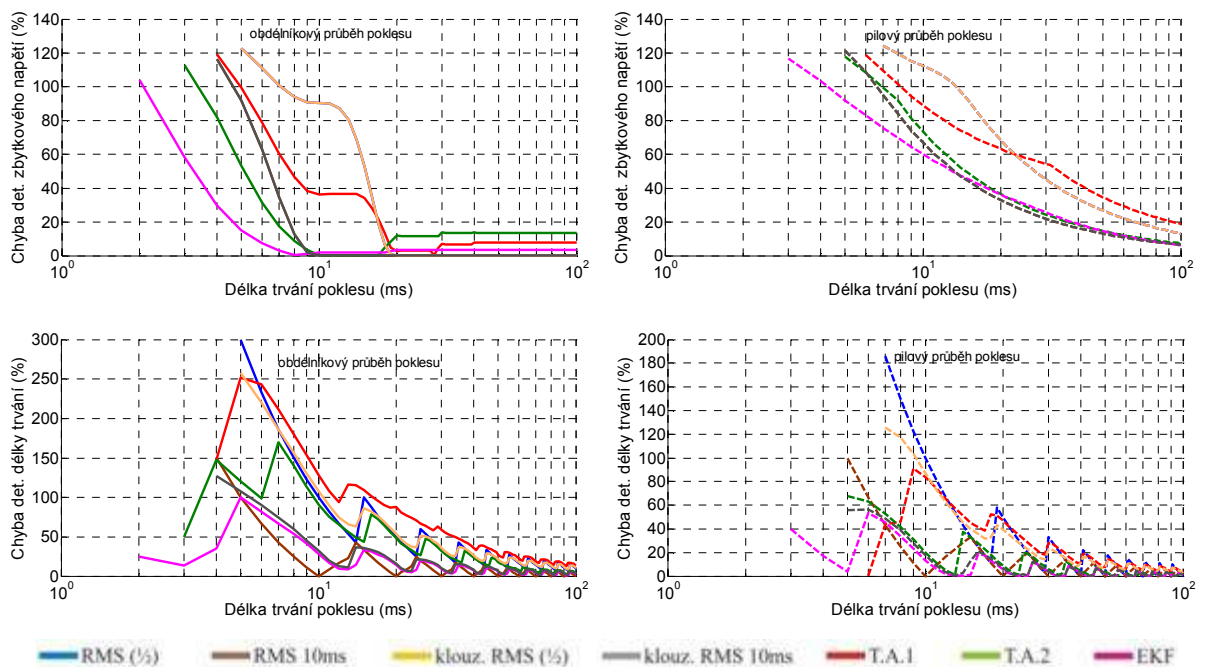
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 43 Závislost prodlevy při detekci poklesu na velikosti zbytkového napětí poklesu (krok 1% U_n)

5.2.3 Simulace 3 – Vliv proměnné délky trvání poklesu napětí na citlivost daného algoritmu

Simulace byla vytvořena za účelem získání informací i schopnosti jednotlivých algoritmů detekovat události s velmi krátkými délkami trvání. Simulace se skládá ze 100 jednotlivě spouštěných poklesů napětí, opět superponovaných na harmonický sinusový signál napětí o efektivní hodnotě 230V a frekvenci 50Hz. Délka trvání prvně nastaveného poklesu napětí je 1ms, přičemž každý další nastavený pokles má délku trvání právě o 1ms větší než byla délka poklesu předchozího. Zbytkové napětí všech poklesů napětí bylo nastaveno na hodnotu 40% jmenovité hodnoty napětí, tzn. 92V. Průběh nastavených poklesů napětí byl uvažován jednak obdélníkový, a pro lepší porovnání vlivu průběhu události na citlivost detekčního algoritmu také pilový. Pro všechny poklesy napětí této simulace je charakteristickým znakem nulový fázový úhel napětí v okamžiku vzniku poklesu – poklesy jsou tedy generovány přesně v čase 500ms. Porovnání výsledků dosažených jednotlivými algoritmy je zobrazeno na obrázku Obr. 44.



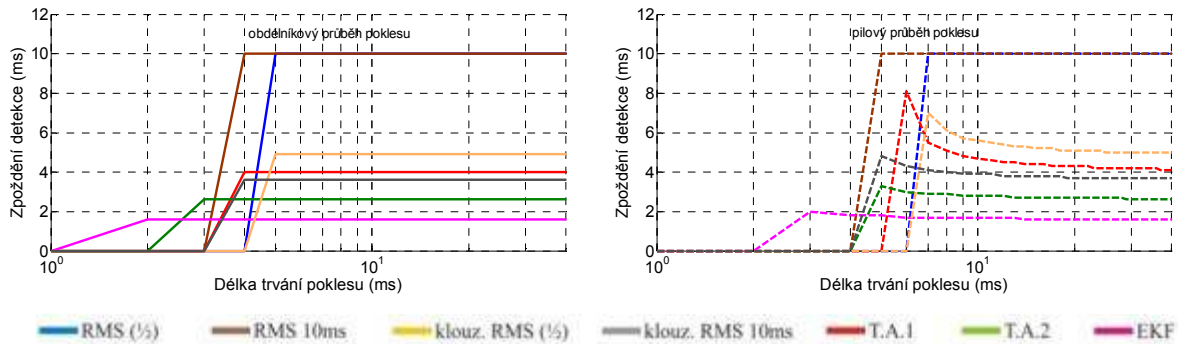
Obr. 44 Vliv délky trvání poklesu na velikost chyby detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí

Na základě obrázku Obr. 44 lze tvrdit, že k detekci velmi krátkých událostí na napětí je z testovaných algoritmů nejvhodnější EKF, který je schopen zaznamenat obdélníkové poklesy s délkou trvání již od 2ms, zatímco například aktuálně upřednostňovaná metoda RMS (1/2) je schopna zaznamenat události s délkami trvání většími nebo rovnými hodnotě 5ms. Při takto krátkých poklesech napětí je ovšem přesnost detekovaných parametrů poklesů velmi nízká, a chyba v parametru se nezděrně pohybuje i nad hodnotou 100%. S prodlužující se délkou trvání poklesu se přesnost detekovaných parametrů rapidně zvyšuje, a v případě metody EKF se počínaje poklesem délky trvání 7ms dostává chyba detekovaného zbytkového napětí poklesu na úroveň menší než 3,5%. Chybovost detekce zbytkového napětí u Ziaraniho trackovacích algoritmů T.A.1 resp. T.A.2 je při celkovém pohledu také vyšší než u metody EKF, pouze u poklesů s délkami trvání (20-28)ms resp. (10-17)ms vykazují T.A.1 a T.A.2 přesnější výsledky. Metody RMS (1/2) a RMS 10ms detekují bezchybně zbytkové napětí obdélníkových poklesů až od délek trvání poklesů 20ms resp. 10ms, což opět vyplývá již ze samotného principu funkce daných metod. Algoritmy klouzavý RMS (1/2) resp. klouzavý RMS 10ms vykazují naprosto stejnou přesnost detekovaného zbytkového napětí jako klasické algoritmy RMS (1/2) resp. RMS 10ms. Poklesy napětí pilových průběhů jsou v parametru zbytkového napětí detekovány s nižší přesností nežli poklesy obdélníkové, s prodlužující se dobou trvání poklesů se přesnost opět zvyšuje. Oproti obdélníkovým průběhům též pro všechny testované algoritmy platí, že jsou schopny detekovat pilové poklesy o délce trvání o 1ms až 2ms delší než byla délka nejkratších detekovatelných obdélníkových poklesů (EKF je schopen detekovat pilový pokles napětí o délce trvání již 3ms). Zbytkové napětí krátkých pilových poklesů je schopen nejpřesněji zaznamenat EKF (platí pro poklesy o délkách do 14ms), delší poklesy jsou nepatrně přesněji zaznamenány metodou Klouzající RMS 10ms. U pilových poklesů napětí již samozřejmě neplatí, že RMS algoritmy zaznamenají bezchybně zbytkové napětí poklesů delších než je délka vyhodnocovacího intervalu dané metody.

Chybovost detekované délky trvání u všech testovaných algoritmů má s prodlužující se délkou trvání poklesů značně kolísavý charakter, což je možné u RMS algoritmů označit za předpokládané, kdežto u trackovacích algoritmů T.A.1, T.A.2, EKF je tento úkaz neočekávaný a velmi zajímavý. I v tomto ohledu však dosahují algoritmy EKF a klouzající RMS 10ms výrazně přesnějších výsledků nežli ostatní testované metody. V porovnání s obdélníkovými poklesy je přesnost detekované délky trvání u pilových poklesů lepší pro všechny testované algoritmy.

Vliv měnící se délky trvání poklesu na velikost zpoždění při detekci poklesu je zobrazen na obrázku Obr. 45. Opět se zde potvrzuje výjimečnost algoritmu EKF, jež je schopen zaznamenat různě dlouhé poklesy napětí s časovou prodlevou menší než 2ms, a to jak v případě poklesů obdélníkových, tak v případě poklesů pilových. Přesto však v porovnání s ostatními pomalejšími metodami neztrácí na přesnosti detekovaných parametrů poklesů. S ohledem na přesnost detekovaných parametrů poklesu (viz Obr. 44) velmi výkonný algoritmus Klouzající RMS 10ms vykazuje časovou prodlevu při detekci kolem 4ms. Klasické RMS algoritmy (RMS (1/2) a RMS 10ms) se vyznačují časovou prodlevou detekce rovných 10ms.

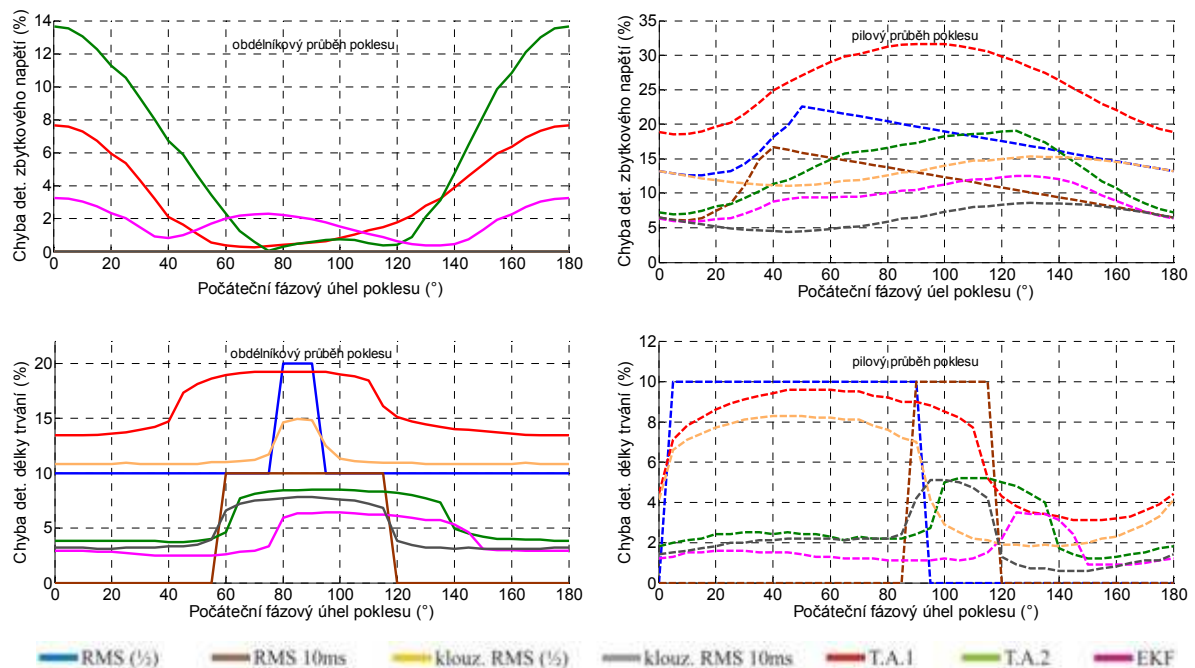
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 45 Závislost prodlevy při detekci poklesů napětí na délce trvání poklesů (krok 1ms)

5.2.4 Simulace 4 – Vliv proměnného okamžiku vzniku poklesu napětí na citlivost daného algoritmu

Další simulace měla prokázat vliv proměnného fázového úhlu okamžiku vzniku poklesu napětí na citlivost a přesnost parametrů testovanými algoritmy detekovaných poklesů. Základní nosný signál byl opět tvořen harmonickým signálem s efektivní hodnotou napětí 230V a frekvencí 50Hz, na který byly superponovány vytvořené poklesy napětí. Pokles napětí charakterizovaný nulovou hodnotou fázového úhlu okamžiku vzniku poklesu začínal v čase 500ms, a další poklesy napětí s postupně se zvyšujícím fázovým úhlem okamžiku vzniku poklesu (krok 5°) byly spouštěny s adekvátními časovými rozestupy od okamžiku 500ms. Zbytková napětí všech poklesů napětí byla nastavena na hodnotu 40% U_n , tzn. 92V, délka trvání všech poklesů byla opět rovna hodnotě 100ms. Průběh testovaných poklesů napětí byl opět dvojitý – obdélkový a pilový. Výsledky simulace jsou zobrazeny na obrázku Obr. 46.



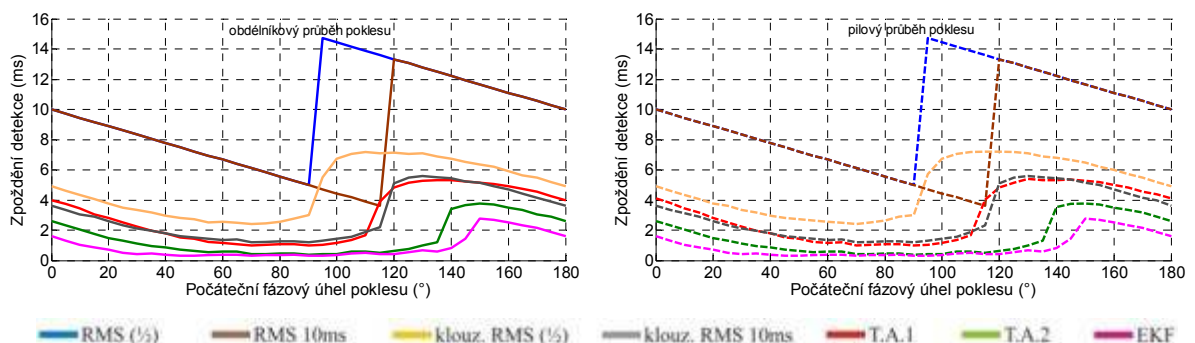
Obr. 46 Závislost chyby algoritmy detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí na skutečném počátečním fázovém úhlu vzniku poklesu (krok 5°).

Z obrázku Obr. 46 je opět patrné, že stejně jako u Simulace 2 (viz kapitola 5.2.2 Simulace 2 – Vliv proměnné hloubky poklesu napětí na citlivost daného algoritmu) nezávisí chyba detekovaného zbytkového napětí RMS metod na počátečním fázovém úhlu obdélkového

poklesu – je dáno principem funkce RMS metod a zvolenou délkou nastaveného poklesu (celočíselný násobek periody generovaného nosného signálu). Stojí za povšimnutí, tvar křivek charakterizujících závislost velikosti chyby detekovaného zbytkového napětí na fázovém úhlu poklesu je pro všechny tři trackovací algoritmy (T.A.1, T.A.2, EKF) víceméně podobný, liší se pouze v pozici dané křivky (dána velikostí chyby). Algoritmy T.A.1 resp. T.A.2 vykazují chybovost pod hranicí 2% v rozmezí počátečních úhlů ($45^\circ \div 120^\circ$) resp. ($65^\circ \div 125^\circ$), zatímco vně uvedeného intervalu se chybovost zvyšuje až k hodnotám 7,7% resp. 13,7%. Naproti tomu EKF si drží chybovost pod hodnotou 3,3%. Chybovost v detekované délce trvání obdélníkového poklesu je vyjma intervalů ($60^\circ \div 115^\circ$) nulová u metody RMS 10ms, v uvedeném intervalu se chyba metody zvyšuje na 10%. Metoda RMS (1/2) si trvale drží chybovost 10% vyjma intervalu ($80^\circ \div 90^\circ$), kdy velikost chyby naroste na 20%. EKF svojí chybovostí nepřesáhne hranici 6,4%. Zatímco u klouzavého RMS 10ms algoritmu se chyba délky trvání v intervalu úhlů ($60^\circ \div 115^\circ$) pohybuje těsně pod hranicí 8% a mimo tento interval pod hranicí 3,5%, u klouzavého RMS (1/2) algoritmu se chybovost délky trvání v celém rozsahu testovaných počátečních úhlů pohybuje nad hranicí 10% (v rozsahu $80^\circ \div 90^\circ$ dokonce vzroste k 15-ti procentům).

V případě simulace pilových průběhů poklesů žádný z algoritmů není schopen detekovat zbytkové napětí lépe než s 94% spolehlivostí (přesností), např. metoda RMS (1/2) vykazuje chybovost v rozpětí (12,6% ÷ 22,6%). Pro srovnání, chybovost EKF nepřesahuje hodnotu 12,5%, a chybovost metody klouzající RMS 10ms nepřesáhne 9% chybovost. Délka trvání pilových poklesů napětí je nejpřesněji detekována metodou EKF, která nepřesahuje chybu 4%. Ostatní metody vykazují horších výsledků, metoda klouzající RMS 10ms podobně jako T.A.2 dosahuje chyby max. 5%, T.A.1 a klasické RMS metody maximálně 10%.

Co se týče rychlosti detekce poklesů (viz Obr. 47), zde se prakticky neprojevuje rozdíl mezi detekcí poklesů napětí obdélníkových a poklesů napětí pilových průběhů. Zpoždění detekce u metody RMS (1/2) se zvětšujícím se fázovým úhlem v rozmezí ($0^\circ \div 90^\circ$) postupně klesá z hodnoty 10ms až k hodnotě 5ms, přičemž zpoždění 5ms odpovídá právě fázovému úhlu 90° , při fázovém úhlu 95° skokově naroste téměř na 15ms a pak s dále se zvětšující hodnotou fázového úhlu postupně klesá až k hodnotě 10ms. Metoda RMS 10ms má podobný průběh křivky zpoždění, jako byl u metody RMS (1/2), avšak křivka má přechodový okamžik v bodě 120° , kdy se velikost zpoždění skokově mění z hodnoty 3,5ms na hodnotu 13ms. Jinak se obě křivky překrývají. Opět nejrychlejší detekci poklesů vykazuje EKF, který nepřesáhne prodlevu 2,7ms. Klouzavý RMS 10ms algoritmus vykazuje prodlevu nižší než 4ms, pouze v intervalu úhlů $120^\circ \div 160^\circ$ se prodleva dostává nad hodnotu 5ms.



Obr. 47 Závislost prodlevy při detekci poklesu na skutečném počátečním fázovém úhlu vzniku poklesu (krok 5°).

5.2.5 Simulace 5 – Vliv míry harmonického zkreslení sinusové křivky napětí na citlivost daného algoritmu

V této simulaci byly testovány schopnosti vybraných detekčních algoritmů zaznamenat korektní parametry simulovaných napěťových událostí implementovaných na vyšších harmonickými deformovaný napěťový signál. Zároveň byla testována také modifikovaná verze algoritmu EKF⁸, která nepředpokládá znalost velikostí amplitud a fázových úhlů jednotlivých vyšších harmonických složek, jež deformují původně sinusový průběh měřeného napětí.

Míra deformace harmonického napěťového signálu je dána činitelem celkového harmonického zkreslení THD_U (Total Harmonic Distortion), jež je dán vztahem

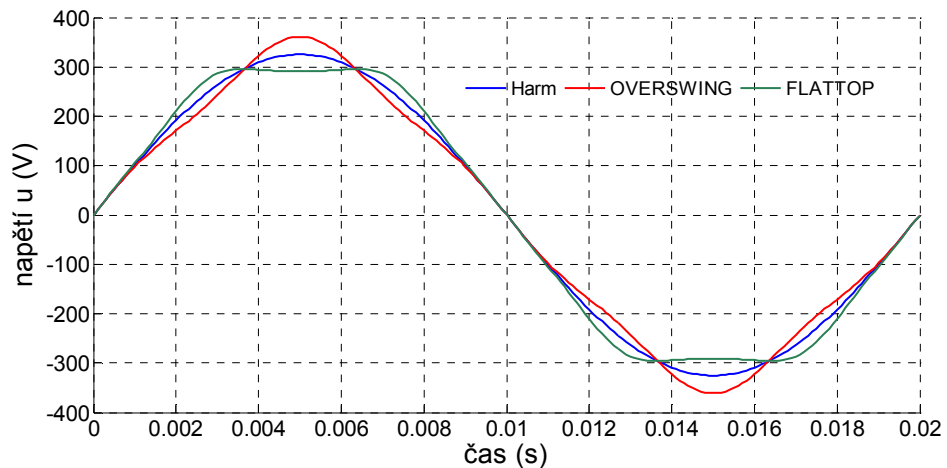
$$THD_{U, \text{ČSN}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (24)$$

V rovnici (24) vystupují následující veličiny:

U_1	efektivní hodnota základní harmonické složky napětí
U_h	efektivní hodnota h-té harmonické složky napětí
h	řád harmonické složky
n	řád nejvyšší uvažované harmonické složky

Pro simulaci byly zvoleny dva deformované průběhy napětí: FLATTOP (charakteristickým je pro něj useknutý vrchol křivky napětí) a OVERSWING (charakteristickým znakem je vystouplý vrchol křivky napětí), jež jsou zobrazeny na obrázku Obr. 48. Pro oba průběhy je charakteristickým rysem efektivní hodnota napětí $U_{ef} = 230\text{V}$ a velikost činitele celkového harmonického zkreslení $THD_U = 8\%$. Osmiprocentní hodnota THD_U byla zvolena z toho důvodu, že dle [1] musí být za normálních provozních podmínek celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) menší nebo roven hodnotě 8%.

⁸ Původně vytvořený algoritmus EKF (a v simulacích č. 1, 2, 3, 4 testovaný) je označován jako 13-ti stavový, který již od počátku výpočetních operací vyžaduje nastavení velikostí amplitud a fázových úhlů vyšších harmonických složek napětí, jež spolu se základní harmonickou určují tvar vstupního napěťového signálu, do něhož jsou následně implementovány přednastavené napěťové události. Hodnoty jednotlivých stavů jsou tedy funkčně závislé na amplitudovém a fázovém spektru vstupního signálu. Modifikovaný EKF má vnitřní stavy nastaveny tak, aby odpovídaly harmonickému napěťovému signálu bez zkreslení vyššími harmonickými složkami napětí.



Obr. 48 Ukázka zvolených deformovaných průběhů napětí

Vliv deformovaného průběhu měřeného napěťového signálu na přesnost detekčních algoritmů byl otestován pomocí simulovaných událostí na napětí, jež jsou součástí výše popsaných simulací (simulace č.1, č.2, č.3, č.4), pouze s tím rozdílem, že nyní je nosným signálem harmonickými deformovaný signál napětí (*Flattop* a *Overswing*). Úroveň harmonického zkreslení během testování byla pro oba typy deformovaných signálů napětí postupně zvyšována z hodnoty $THD_U = 0\%$ ⁹ s krokem 2% až na hodnotu $THD_U = 8\%$ (takto deformované napětí se může trvale vyskytovat v elektrické síti [1]), a pak byl simulován extrémně deformovaný signál napětí s $THD_U = 12\%$.

Ze všech simulací prováděných na harmonickými deformovaném signálu napětí je pro názornost uvedeno porovnání výsledků jednotlivých algoritmů u simulace č.1, kde bylo simulováno 13 napěťových událostí s na první pohled náhodně zvolenými parametry. Porovnání dosažených výsledků pro úroveň celkového harmonického zkreslení napětí $THDU = 8\%$ vzhledem k výsledkům dosaženým u harmonickými nedeformovaného napěťového signálu jsou uvedeny v tabulkách Tab. 17 a Tab. 18.

⁹ Činitel celkového harmonického zkreslení napětí $THD_U = 0\%$ odpovídá harmonickými nezarušenému signálu, který obsahuje pouze základní harmonickou složku napětí. Při simulování událostí stejných parametrů jako v simulaci č. 1, kde nebyl uvažován vliv vyšších harmonických složek, budou výsledky z obou simulací totožné.

Tab. 17 Přehled RMS metodami detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí pro úroveň zkreslení $THD_U = 8\%$

P o ř a d í	Parametr události	Použitá metoda a indikované parametry událostí (harm/Overswing/Flattop)				
		Nasta- vená událost	RMS (1/2)	RMS 10ms	Klouzající RMS (1/2)	Klouzající RMS 10ms
1	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	110,8/110,7/111	103,2/102,7/103,6
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	4,9/4,9/4,8	3,6/3,8/3,4
2	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	60	80/80/80	70/70/70	74,8/75,2/74,5	67,8/68,2/67,3
	t_{det} (ms)	-	5/5/5	5/5/5	3/2,8/3,1	1,2/1/1,5
3	U_d (V)	92	112,4/112,4/112,4	102/102/102	112,4/112,4/112,4	102/102/102
	Δt (ms)	60	60/60/60	60/60/60	63,8/63,7/63,9	61,3/61,1/61,6
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	4,9/5/4,9	3,7/3,9/3,4
4	U_d (V)	138	141,7/141,7/141,7	138/138/138	141,7/141,7/141,7	138/138/138
	Δt (ms)	60	60/60/60	60/60/60	63,2/63,3/63,2	61/60,8/61,2
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,6/5,5/5,7	4/4,2/3,8
5	U_d (V)	184	188,6/188,6/188,6	186,3/186,3/186,3	188,6/188,6/188,6	186,3/186,3/186,3
	Δt (ms)	60	50/50/50	60/60/60	56,4/56,2/56,8	59,7/59,7/59,6
	t_{det} (ms)	-	20/20/20	10/10/10	12,8/13/12,6	5,3/5,3/5,4
6	U_d (V)	46	165,9/165,9/165,8	46/46/46	165,9/165,9/165,8	46/46/46
	Δt (ms)	10	20/20/20	10/10/10	21,3/21,1/21,6	13,5/13/13,9
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	4,6/4,7/4,5	3,4/3,7/3,2
7	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	109,1/109,2/108,9	102,1/101,7/102,5
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,7/5,6/5,8	4,1/4,3/3,9
8	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	100/100/100	110/110/110	105,1/104,8/105,5	106,8/107,2/106,3
	t_{det} (ms)	-	15/15/15	5/5/5	7,8/8/7,6	1,7/1,5/2
9	U_d (V)	92	104,2/104,2/104,2	98/98/98	104,2/104,2/104,2	98/98/98
	Δt (ms)	100	100/100/100	100/100/100	103,1/103,2/103,1	100,9/100,7/101,1
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,8/5,7/5,9	4,1/4,3/3,9
10	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	113,2/112,8/113,7	104,8/104,4/105,1
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	3,8/4/3,5	2,9/3,1/2,7
11	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	120/120/120	110/110/110	117,8/118,2/117,4	108,9/109/108,7
	t_{det} (ms)	-	5/5/5	5/5/5	1,4/1,1/1,6	0,7/0,6/0,8
12	U_d (V)	92	104,2/104,2/104,2	98/98/98	104,2/104,2/104,2	98/98/98
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	107,6/107,3/107,9	102,1/101,9/102,3
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	3,8/4/3,6	2,9/3,1/2,7
13	U_d (V)	299	299/299/299	299/299/299	299/299/299	299/299/299
	Δt (ms)	60	70/70/70	60/60/60	69,5/69,6/69,3	62,3/61,9/62,7
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,6/5,5/5,8	4,1/4,3/3,9

Tab. 18 Přehled trackovací algoritmy detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí s úrovní deformace $THD_U = 8\%$

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

P o ř a d í	Parametr události	Použitá metoda a indikované parametry událostí (harm/Overswing/Flatlop)				
		Nasta- vená událost	T.A.1	T.A.2	EKF	EKF modif.
1	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	84,9/84,5/84,9 113,4/112,5/113,8 4/3,9/4,1	79,4/78,6/80 103,8/103,3/104,3 2,6/2,4/2,8	89/86,9/84,9 102,9/102,9/102,9 1,6/1,6/1,6	89/86,9/85 102,9/102,9/103 1,6/1,6/1,6
2	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 60 -	91,6/90,3/90,6 79,3/79/80,8 1/1,1/0,8	91,4/87,4/87,8 68,5/68,9/67,6 0,4/0,5/0,3	90,2/86/82,6 66,3/66,5/66,1 0,3/0,3/0,4	90,2/86,2/82 66,3/66,4/66,1 0,3/0,3/0,4
3	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 60 -	119/118,5/119 63,8/69,8/64,1 4,1/3,9/4,2	103,2/102/104,2 62/62,3/63,9 2,6/2,4/2,8	102,9/101,7/100,9 61,2/61,1/61,2 1,6/1,6/1,6	102,9/101,8/100,5 61,2/61,1/61,2 1,6/1,6/1,6
4	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	138 60 -	148,6/147,9/148,5 63,3/69,3/64 4,7/4,5/4,6	136,1/134,5/137,2 61,5/62/63,5 3/2,7/3,4	136,7/137,6/135 60,9/60,7/61,2 1,9/1,9/1,8	136,7/137,8/134,7 60,9/60,7/61,1 1,9/1,9/1,8
5	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	184 60 -	193,1/190,1/190,1 61,3/67,4/71 6,7/7,1/5,9	185,1/181,1/181,9 60,2/80,4/72,4 4,3/3,4/4,5	186,3/186,1/185,5 60/59,2/61,1 2,7/2,9/2,5	186,3/186,1/185,3 60/59,2/61 2,7/2,9/2,5
6	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	46 10 -	85,1/85,7/84 31,5/31,5/32,8 3,7/3,5/3,7	50,6/50,4/50,6 20,9/21,8/20,2 2,3/2,2/2,5	43,6/47,2/42,4 13,4/13,2/13,4 1,4/1,5/1,4	43,6/47,4/41,9 13,4/13,2/13,4 1,4/1,5/1,4
7	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	82,3/81,9/82,2 110,5/110,4/111,5 4,8/4,7/4,7	77,2/76,3/77,7 102,7/102,5/103,2 3/2,8/3,2	88,7/86,5/84,3 102,1/102/102,1 1,8/1,9/1,8	88,7/86,5/84,4 102,1/102/102,1 1,8/1,9/1,8
8	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	91,4/89,9/90 116,3/117,4/115,9 1,4/1,5/1,3	91,4/87,4/87,8 107,3/108,2/106,8 0,6/0,6/0,5	90/85,6/81,9 103,2/104,9/102,7 0,4/0,4/0,5	90/85,8/81,2 103,2/104,8/102,8 0,4/0,4/0,5
9	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	107/106,7/106,9 103,6/109,1/105,8 4,8/4,8/4,8	96,5/95,4/97,3 101,4/101,9/103,8 3/2,8/3,2	97,6/97,8/95,4 101/100,7/101,3 1,8/1,9/1,8	97,6/97,9/95 101/100,6/101,3 1,8/1,9/1,8
10	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	86,8/86,3/86,8 123,3/131,3/133,4 3,1/2,8/3,2	81,4/80,5/82 105,8/106,1/105,8 2/1,8/2,2	89,2/87,2/85,4 104,5/104,2/104,8 1,3/1,3/1,3	89,2/87,3/85,5 104,5/104,2/104,8 1,3/1,3/1,3
11	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	91,6/90/90 128,9/129,2/131,7 0,5/0,6/0,4	91,5/87,5/87,8 110,4/109,7/111,2 0,2/0,3/0,2	90,3/86,5/83,3 107,6/108/107,4 0,2/0,2/0,2	90,3/86,7/82,7 107,6/108/107,4 0,2/0,2/0,2
12	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	92 100 -	110,8/110,3/110,8 108,5/111,6/113,7 3,1/2,9/3,2	99,6/98,4/100,4 102,3/102,9/104,8 2,1/1,8/2,3	98/97,7/96 101,5/101,8/101,3 1,3/1,3/1,3	98/97,8/95,7 101,5/101,8/101,3 1,3/1,3/1,3
13	U _d (V) Δt (ms) t _{det} (ms)	299 60 -	298,8/304,9/301,3 64,1/63,9/68,1 4,9/4,9/5,3	302,4/311,5/310,4 62,2/62,4/62,4 3,4/4/2,7	300,4/302/302,9 61,4/61,3/61,4 2,1/2,2/2,1	300,4/302/302,9 61,4/61,3/61,4 2,1/2,2/2,1

V tabulce Tab. 18 červeně označená hodnota označuje událost, pro níž byl metodou T.A.2 detekován pokles napětí o uvedené délce trvání, avšak po skončení poklesu byl vlivem rozkmitu algoritmem vypočtené efektivní hodnoty napětí detekován následný velmi krátký pokles napětí. Detekovány tak byly dva poklesy napětí, i když simulován byl pouze jeden pokles.

Z tabulek Tab. 17, Tab. 18 (potažmo tabulek Tab. 20, Tab. 21) je zřejmé, že přítomnost harmonického zkreslení v normami povolených mezích ($THD_U = 8\%$) nemá prakticky žádný vliv na přesnost parametrů událostí detekovaných klasickými RMS metodami – ve všech třech porovnávaných parametrech (detekované zbytkové napětí, délka trvání a zpoždění při detekci) jsou dosažené výsledky totožné bez ohledu na to, zda je vstupní napětí deformováno či nikoli. U klouzajících RMS metod se již vliv deformovaného napětí projeví, avšak pouze v parametrech detekované délky události a zpoždění při detekci, ale změny v parametrech jsou velmi malé. Zatímco největší změna detekované délky události vzhledem k detekované délce nezkrusleného sinusového napětí ($THD_U = 0\%$) byla 0,5ms (což při skutečné délce události 100ms činí zanedbatelnou chybu půl procenta), největší zaznamenaná změna zpoždění byla 0,3ms (což oproti zpoždění 3,7ms u sinusového průběhu činí změnu o 8,1%). Vzhledem k detekčním prodlevám aktuálně používané RMS 1/2 metody, která činí ve většině simulovaných událostí 10ms, se změna o 0,3ms dá také zanedbat.

Trackovací algoritmy jsou harmonickým zkreslením vstupního napětí ovlivněny ve všech třech porovnávaných parametrech. U „Zairaniho“ algoritmu T.A.2 byl např. zaznamenán rozdíl až 9,1V (událost č.13) proti hodnotě detekované u nezkrusleného průběhu, což činí změnu o 3%, kdežto EKF algoritmy vykazovaly největší změnu 8,2V (událost č.2), což činí změnu o 9,1%. V detekované délce trvání a časové prodlevě při detekci se však u EKF algoritmů změny harmonického zkreslení křivky napětí nijak významně neprojeví a pro všechny tři testované průběhy křivky napětí (sinusová, overswing, flattop) jsou tyto dva detekované parametry takřka totožné. Zanedbatelné rozdíly jsou však u detekované délky trvání a zpoždění při detekci u „Ziaraniho“ algoritmů, kdy se běžně vyskytují rozdíly 7÷8ms v délce trvání (největší rozdíl byl zaznamenán 20ms u T.A.2 a události č.5), zpoždění při detekci se mění max. o 0,4ms. Algoritmu T.A.2 navíc činí problémy správně zaznamenat události, pro které je typické jiné než jmenovité napětí před počátkem a po skončení poklesu (události č.7, č.8, č.9, č.10, č.11, č.12), kdy (díky svému nastavení a harmonickému zkreslení) dochází k velkému rozkmitu algoritmem vypočítané efektivní hodnoty napětí, a kromě simulovaných poklesů napětí T.A.2 detekuje také velmi krátká následná přepětí případně velmi krátké poklesy napětí – viz Tab. 18 resp. Tab. 21.

Při vyhodnocení dosažených výsledků je třeba mít na paměti, že přítomnost vyšších harmonických složek napětí je pouze jeden z mnoha faktorů, které více či méně ovlivňují přesnost detekčních algoritmů, přičemž všechny ovlivňující faktory působí na funkci a přesnost algoritmů společně. V mnoha případech se tedy může stát, že vliv harmonického zkreslení měřeného signálu napětí je potlačen nebo naopak zvýrazněn ostatními faktory, především parametry nastavených událostí.

Z tabulky Tab. 18 (Tab. 21) a zejména dalších provedených simulací bylo zjištěno, že modifikovaný EKF, který při vyhodnocování parametrů událostí nemá předem nastavenou úroveň harmonického zkreslení, v přesnosti detekovaných parametrů událostí nijak nezaostává za algoritmem EKF, který má úroveň harmonického rušení v napěťovém signálu předem nastavenou. Detekované parametry se neliší buďto vůbec, nebo jen velmi nepatrně.

5.2.6 Shrnutí

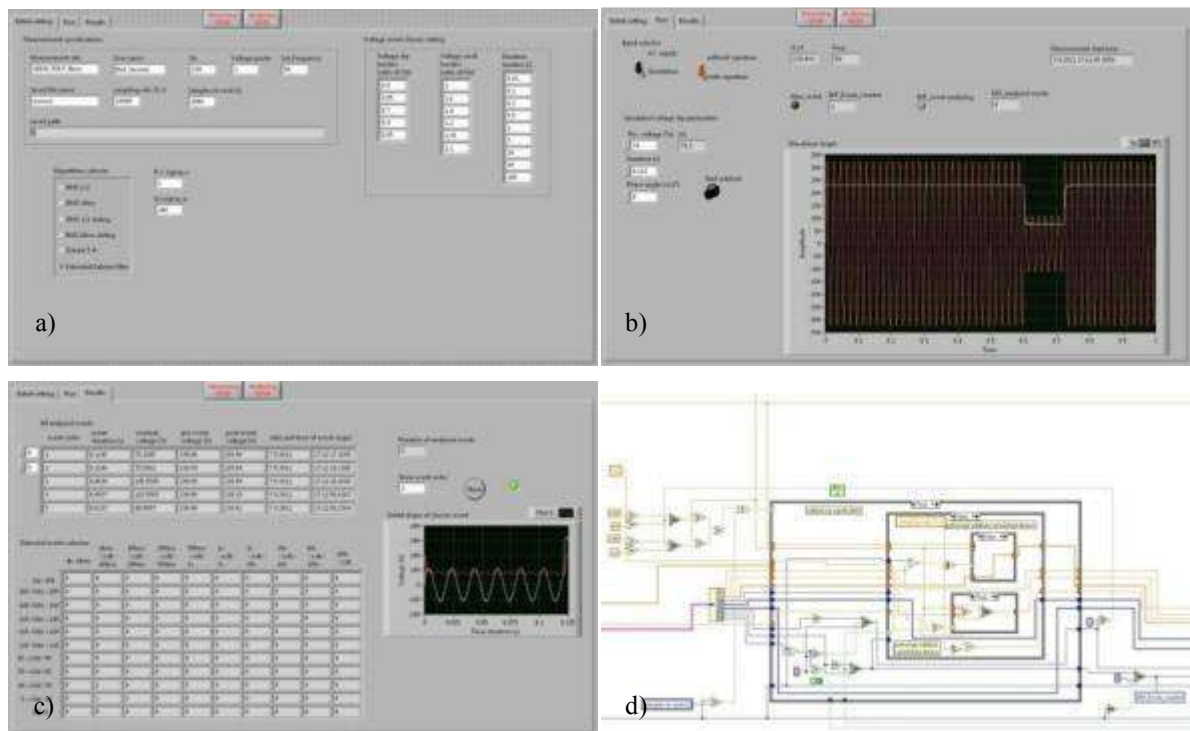
Na základě výsledků provedených simulací lze říci, že největší nevýhodou standardizované detekční metody RMS (1/2) je její dlouhá časová prodleva při detekci napěťových událostí, neboť tato se pohybuje, v závislosti na dalších parametrech poklesů, v rozmezí 10ms až 20ms. V porovnání se všemi ostatními testovanými detekčními algoritmy je RMS (1/2) při detekci událostí zdaleka nejpomalejší. Naopak nejrychlejší metodou je EKF, jehož prodleva při detekci se ve většině simulací pohybovala kolem hodnoty 2ms. V tomto ohledu si velmi

dobře počínal také klouzavý algoritmus RMS 10ms, který byl ve většině simulací schopen detekovat poklesy napětí s menším zpožděním než 4 ms. Velmi rychlé detekce v porovnání s RMS (1/2) metodou jsou schopny také „Ziarani“ trackovací algoritmy T.A.2 resp. T.A.1, které však již zaostávají v přesnosti detekovaných zbytkových napětí a délek trvání poklesů napětí. Právě, co se týče přesnosti detekovaných parametrů poklesů napětí, nelze stoprocentně říct, která metoda je nejlepší současně ve všech sledovaných parametrech, neboť tyto parametry byly hodnoceny separátně, a často nastává situace, že v jednom detekovaném parametru je metoda přesná, ale v druhém již méně. To je případ metody RMS (1/2), která je schopna zcela přesně detekovat obdélníkové poklesy napětí o délkách trvání větších než 20ms, avšak délka trvání těchto poklesů je již detekována s chybou až 20ms. U jiných než obdélníkových poklesů napětí jsou již s určitou chybou zaznamenávány oba parametry poklesů, přičemž velikost chyby závisí na skutečných parametrech nastalé události. Souhrnně však lze říci, že nejuniverzálnějším detekčním algoritmem z pohledu prodlevy při detekci a přesnosti detekovaných parametrů poklesů napětí je metoda EKF, následovaná klouzavou RMS 10ms metodou, klouzavou RMS (1/2) metodou a trackovacím algoritmem T.A.1.

5.3 Použití vybraných algoritmů pro záznam událostí na napětí v reálné el. síti

Použití testovaných detekčních algoritmů k detekci skutečných napěťových událostí vyskytujících se v reálných el. sítích spočívá ve vytvoření vlastního monitoru událostí, který v součinnosti s měřicími kartami monitoruje velikost napětí v el. síti a zaznamenává detekované události na napětí. Je zřejmé, že chování jednotlivých detekčních algoritmů může být při jejich použití k detekci skutečných událostí na napětí v reálných el. sítích odlišné od chování během prováděných simulací, neboť během simulací není možné plnohodnotně postihnout všechny rušivé jevy promítající se na napěťovou křivku (je uvažováno mnoho zjednodušujících předpokladů, např. konstantní frekvence, jmenovité napětí před vznikem a po skončení události, přesně definovaný tvar události, apod.). Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že do vytvářeného monitoru událostí budou implementovány všechny ze simulací otestovaných detekčních algoritmů. Za nejoptimálnější vývojový program pro tvorbu monitoru událostí na napětí bylo zvoleno LabVIEW, které díky uživatelsky příjemnému grafickému prostředí minimalizuje požadavky na detailní znalosti programovacího jazyka, zatímco u jiných vývojových programů založených především na textovém kódu je výborná znalost příslušného programovacího jazyka nezbytná. Neméně podstatnou výhodou LabVIEW je také ověřená schopnost spolupráce LabVIEW s poměrně rozšířenými měřicími kartami firmy National Instruments.

Důležitou vlastností moderních měřících přístrojů je variabilita použitelnosti v různých typech el. sítí, ať se jedná o různé napěťové hladiny el. sítí či různé sítě z pohledu použité frekvence napětí. Při tvorbě monitoru napěťových událostí byl tedy zahrnut požadavek variabilnosti použití a nejenže uživatel může zvolit jmenovité hodnoty napětí, frekvenci, parametry vyčítání dat z měřicí karty, ale rovněž může změnit přednastavené třídění parametrů zaznamenaných napěťových událostí. Vzhled vytvořeného monitoru událostí ukazuje Obr. 49.



Obr. 49 Pohled na čelní panely vytvořeného analyzátoru vč. výřezu blokového diagramu zobrazujícího vyhodnocovací logiku pro detekci událostí

Před samotným spuštěním monitoru musí uživatel nejprve vyplnit potřebné údaje charakterizující dané měření, zejména jmenovité napětí el. sítě, jmenovitou hodnotu frekvence, převod použité napěťové sondy, vzorkovací frekvenci a periodu vyčítání dat z měřicí karty. Dále je nutné zadat místo měření a cestu pro ukládání dat z měření na pevný disk počítače. Před spuštěním měření je rovněž možné změnit nastavení úrovní pro selekci detekovaných událostí, kdy přednastavené doporučené třídění událostí v sítích nn [2] nemusí být totožné jako třídění v sítích jiných napěťových úrovní. Nezbytným krokem je výběr detekčního algoritmu, pomocí něhož se mají události na napětí detekovat. Z uvedených detekčních algoritmů lze vždy vybrat pouze jeden algoritmus, současný výběr více detekčních metod není z důvodu velkých nároků trackovacích algoritmů na paměť a výpočetní čas povolen. Pakliže je vybrán některý z trackovacích algoritmů („Ziarani“ nebo EKF), uživatel musí nastavit požadované konstanty řídicí dynamickou odezvu vybraného algoritmu. Úvodní nastavení monitoru se nachází na záložce „Initial setting“ čelního panelu a je zobrazeno na obrázku Obr. 49 a).

Jakmile je úvodní nastavení monitoru provedeno, může uživatel přejít na záložku „Run“, která je zobrazena na obrázku Obr. 49 b). Zde musí uživatel zvolit, zda bude monitor pracovat v měřicím módu, kde monitor zpracovává data z měřicích karet, nebo v simulačním módu, kde je křivka napětí generována v LabVIEW a události o nastavených parametrech jsou uživatelem manuálně spouštěny. Dále může uživatel zvolit, zda se mají vyhodnocovat a dále statisticky zpracovávat všechny zaznamenané události, nebo pouze události neobsahující zvláštní značku, která je automaticky přiřazována k událostem o délkách trvání kratších než 10ms. Poté může dojít k spuštění monitoru. V okamžiku spuštění monitoru jsou všechny údaje týkající se nastavení vybraného algoritmu, a nastavení celého měření uloženy do textového souboru. Během provozu monitoru jsou stále v záložce „Run“ čelního panelu indikovány údaje charakterizující měřené vstupní napětí, a sice vybraným algoritmem změřená efektivní hodnota napětí a změřená hodnota frekvence. Dále je zobrazován údaj ohledně data a času, kdy došlo ke spuštění monitoru událostí. Samozřejmostí je rovněž údaj o stavu počítačidla detekovaných událostí doplněného o LED indikátor signalizující právě detekovanou událost, stejně jako údaj vyjadřující počet již kompletně analyzovaných událostí (opět doplněného LED indikátorem). V dolní části čelního panelu jsou pak současně zobrazovány časové průběhy vstupního měřeného napětí a zvoleným algoritmem vypočtené efektivní hodnoty napětí.

Výsledky detekovaných a již analyzovaných událostí jsou k dispozici v záložce „Results“ čelního panelu monitoru, která je zobrazena na obrázku Obr. 49 c). Zde je tabulka s parametry všech zaznamenaných událostí. Události jsou seřazeny vzestupně podle okamžiku jejich vzniku, tedy v pořadí, v jakém byly postupně detekovány. Každá událost je analyzována nejen z pohledu základních parametrů (délka trvání, extrémní hodnota napětí), ale rovněž jsou vypočítány efektivní hodnoty napětí před vznikem a po skončení napěťové události. Ef. hodnoty napětí před resp. po skončení události jsou počítány jako průměrné ef. hodnoty napětí za celou událostí nepostiženou periodu před vznikem resp. po skončení události. Zároveň je každé události přiřazen čas a datum jejího detekování. Ve spodní části čelního panelu se nachází tabulka se členěním detekovaných událostí do uživatelem nastavených tříd (viz záložka „Initial setting“), přičemž zde je uvedena souhrnná tabulka zahrnující jak poklesy a přerušení napětí, tak také přepětí. V pravé části čelního panelu je pak umístěn grafický indikátor zaznamenaného průběhu vybrané události.

Vlastní jádro programu je možné zobrazit v blokovém diagramu vytvořeného monitoru. Jádro je tvořeno dvěma kontinuálně běžícími navzájem nezávislými smyčkami, z nichž první smyčka obstarává pravidelné vyčítání dat z měřicích karet, je v ní umístěn kód vybraného detekčního algoritmu, který v nastavených intervalech vypočítává efektivní hodnoty napětí a tyto ihned porovnává s nastavenými hranicemi určujícími vznik napěťové události (přednastavenou hodnotou je rozsah $U_n \pm 10\%$). Pakliže se vyhodnocovacím procesem detekuje udá-

lost, je zaznamenán aktuální časový údaj a aktivuje se počítadlo délky trvání události. Zároveň dochází k uložení časových průběhů vstupního napětí a vypočtené ef. hodnoty napětí do textového souboru, přičemž z těchto dat bude následně vypočítána ef. hodnota napětí před vznikem události (data jsou průběžně umísťována do prepisovatelné mezipaměti-bufferu, a pouze v okamžiku detekce události jsou využita pro další výpočty, v ostatních stavech jsou data postupně prepisována). Trvá-li napěťová událost, jsou do bufferu ukládány aktuální hodnoty vstupního napětí (okamžitá hodnota) a vypočtené ef. hodnoty napětí. Jakmile je detekován konec události (vypočtená ef. hodnota napětí překročí prahovou hodnotu konce události), jsou hodnoty z bufferu uloženy do textového souboru, v jehož označení figuruje pořadí detekované události a buffer je následně vyprázdněn. Okamžikem zániku události je však aktivován další buffer, do něhož se ukládají hodnoty napětí (vstup, výstup) pro pozdější výpočet ef. hodnoty napětí po skončení události. Výřez blokového diagramu zahrnující logiku detekování událostí je uveden na obrázku Obr. 49 d). Naproti tomu druhá smyčka slouží pouze k analýze první smyčkou detekovaných a zaznamenaných událostí a její chod je oproti měřicí smyčce zpožděn z důvodu zabránění dvou současných požadavků na přístup k jednomu souboru na disku (např. současný zápis a vyčtení dat). Jakmile analyzační smyčka dostane z měřicí smyčky informaci o ukončení detekované události, načte si z patřičných souborů na disku příslušná data, a vyhodnotí délku události, extrémní hodnotu napětí během trvání události (hledá max. ef. hodnotu během přepětí resp. min. ef. hodnotu během poklesu), vypočítá efektivní hodnoty napětí před vznikem a po skončení poklesu napětí a každé události přiřadí datum a čas její detekce. Parametry analyzovaných událostí jsou po přechodnou dobu uchovávány v bufferu a v přesně stanovených časových intervalech je buffer vyprázdněn a data z něj jsou uložena do souboru s označením „results“ na disku. Podobu dat v ukládaných textových souborech dokládají obrázky Obr. 50 resp. Obr. 51, kde jsou zobrazeny informace ohledně nastavení a výběru detekčního algoritmu resp. dat z analyzovaných napěťových událostí. Oba soubory konkrétně obsahují informace a výsledky „Ziaraniho“ T.A. o nastavených konstantách $\mu_1 = 200$, $\mu_2 = 2 \cdot 10^4$, $\mu_3 = 0,02$ (v Matlabu prováděných simulacích je tento algoritmus označen symbolem „T.A.1“) během testu, kdy byl zjišťován vliv měnícího se zbytkového napětí poklesů napětí na přesnost detekovaných parametrů poklesů. Délka trvání všech poklesů je přesně 100ms, poklesy napětí začínají při nulovém fázovém úhlu, křivka napětí je sinusová bez harmonického zkreslení a všechny poklesy napětí jsou obdélníkového tvaru. Zbytková napětí jsou z hodnoty 89% U_n postupně snižována s krokem 1% U_n až na hodnotu 0% U_n .



Obr. 50 Výpis ze souboru obsahujícího informace ohledně počátečního nastavení monitoru událostí na napětí

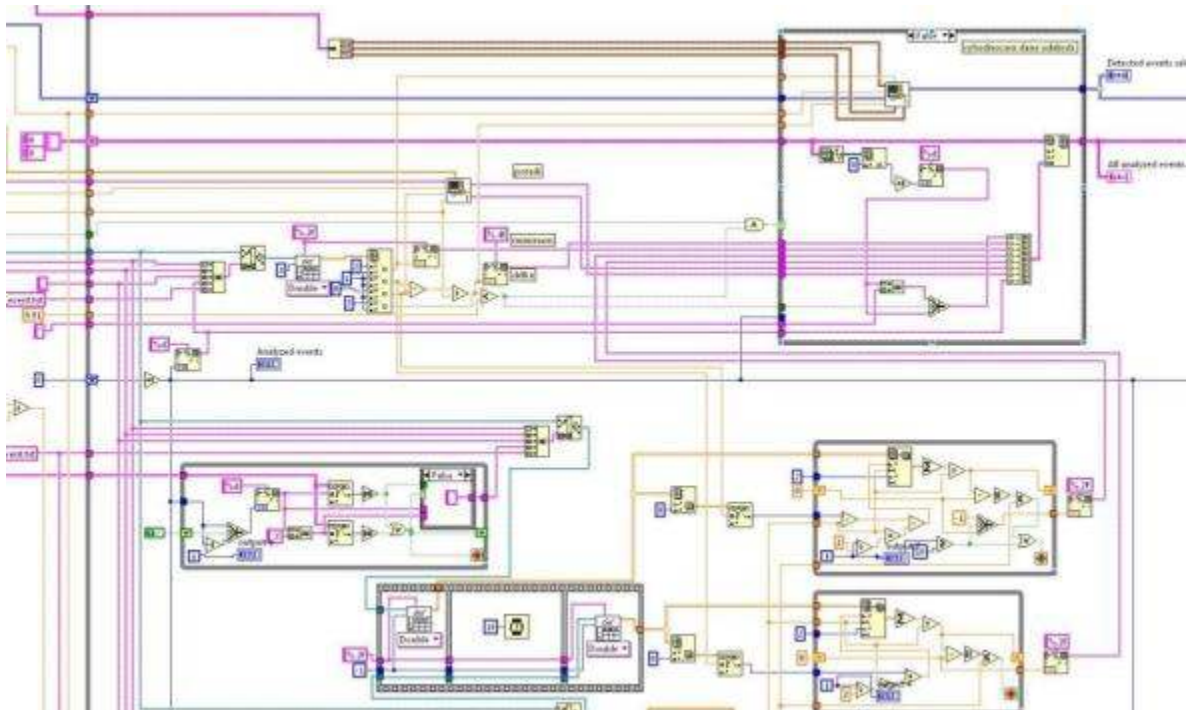
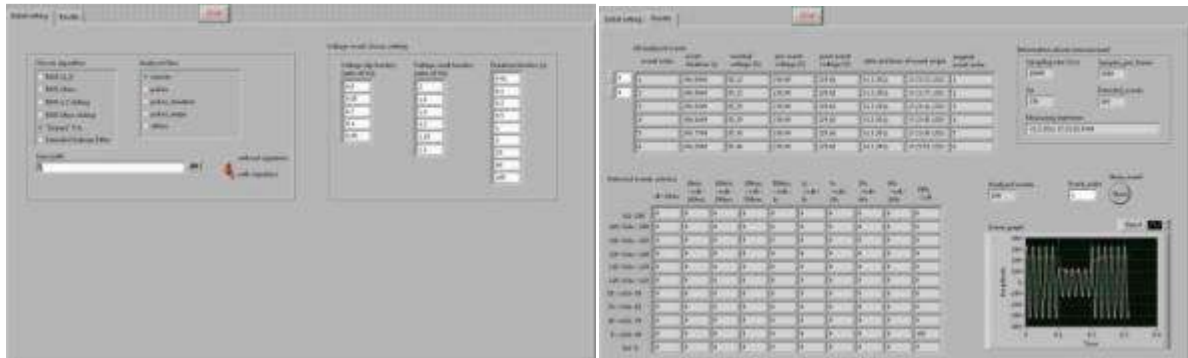
event order	event duration (s)	residual voltage (V)	pre-event voltage (V)	post-event voltage (V)	date of event	time of event origin	
1	0,0856	204,71	230,00	229,74	31.3.2011	16:38:21,6722	1
2	0,0888	202,41	230,00	229,73	31.3.2011	16:38:25,6695	2
3	0,0906	200,11	230,00	229,71	31.3.2011	16:38:29,6680	3
4	0,0930	197,81	229,92	229,70	31.3.2011	16:38:33,6660	4
5	0,0977	195,51	230,00	229,69	31.3.2011	16:38:37,6616	5
6	0,0985	193,21	230,00	229,67	31.3.2011	16:38:41,6610	6
7	0,0992	190,91	230,00	229,66	31.3.2011	16:38:45,6606	7
8	0,0999	188,61	230,00	229,65	31.3.2011	16:38:49,6602	8
9	0,1003	186,31	230,00	229,63	31.3.2011	16:38:53,6600	9
10	0,1008	184,01	230,00	229,62	31.3.2011	16:38:57,6598	10
11	0,1013	181,71	230,00	229,61	31.3.2011	16:39:1,6596	11
12	0,1018	179,42	230,00	229,60	31.3.2011	16:39:5,6594	12
13	0,1023	177,12	230,00	229,59	31.3.2011	16:39:9,6593	13
14	0,1031	174,82	230,00	229,59	31.3.2011	16:39:13,6591	14
15	0,1062	172,52	230,00	229,67	31.3.2011	16:39:17,6590	15
16	0,1070	170,21	230,00	229,67	31.3.2011	16:39:21,6589	16
17	0,1076	167,90	230,00	229,68	31.3.2011	16:39:25,6588	17
18	0,1080	165,58	230,00	229,67	31.3.2011	16:39:29,6587	18
19	0,1084	163,27	230,00	229,67	31.3.2011	16:39:33,6586	19
20	0,1088	160,95	230,00	229,67	31.3.2011	16:39:37,6585	20
21	0,1091	158,63	230,00	229,66	31.3.2011	16:39:41,6584	21
22	0,1093	156,31	230,00	229,65	31.3.2011	16:39:45,6584	22
23	0,1096	153,99	230,00	229,65	31.3.2011	16:39:49,6583	23
24	0,1098	151,67	230,00	229,64	31.3.2011	16:39:53,6582	24
25	0,1100	149,34	230,00	229,63	31.3.2011	16:39:57,6582	25
26	0,1102	147,02	230,00	229,63	31.3.2011	16:40:1,6581	26
27	0,1104	144,70	230,00	229,62	31.3.2011	16:40:5,6581	27
28	0,1106	142,37	230,00	229,61	31.3.2011	16:40:9,6580	28
29	0,1107	140,05	230,00	229,60	31.3.2011	16:40:13,6580	29
30	0,1109	137,68	230,00	229,59	31.3.2011	16:40:17,6579	30
31	0,1110	135,24	230,00	229,58	31.3.2011	16:40:21,6579	31
32	0,1112	132,79	230,00	229,57	31.3.2011	16:40:25,6578	32
33	0,1113	130,32	230,00	229,56	31.3.2011	16:40:29,6578	33
34	0,1115	127,83	230,00	229,55	31.3.2011	16:40:33,6577	34
35	0,1116	125,33	230,00	229,54	31.3.2011	16:40:37,6577	35
36	0,1117	122,81	230,00	229,76	31.3.2011	16:40:41,6577	36
37	0,1119	120,27	230,00	229,76	31.3.2011	16:40:45,6576	37
38	0,1120	117,71	230,00	229,75	31.3.2011	16:40:49,6576	38
39	0,1121	115,14	230,00	229,74	31.3.2011	16:40:53,6576	39
40	0,1123	112,54	230,00	229,74	31.3.2011	16:40:57,6575	40
41	0,1124	109,92	230,00	229,73	31.3.2011	16:41:1,6575	41
42	0,1125	107,28	230,00	229,72	31.3.2011	16:41:5,6575	42
43	0,1126	104,61	230,00	229,71	31.3.2011	16:41:9,6574	43

Obr. 51 Výpis ze souboru obsahujícího parametry analyzovaných událostí na napětí

Jak bylo dříve zmíněno, monitor událostí na napětí může pracovat buďto v simulačním nebo v měřicím módu, z čehož vyplývá, že v obou funkčních módech mohou být jednotlivé detekční algoritmy také testovány. V simulačním režimu jsou parametry událostí nastavovány uživatelem, který jednotlivé události manuálně také spouští. V měřicím režimu lze testovat detekční algoritmy pouze za předpokladu, že na měřicí karty monitoru událostí je přivedeno napětí z programovatelného zdroje napětí, který umožňuje variabilně měnit parametry výstupního napětí (ef. hodnotu, frekvenci, průběh křivky napětí, míru harmonického zkreslení, apod.), a je možné přesně nastavovat a spouštět události na napětí.

Pro potřeby dodatečné analýzy dříve detekovaných událostí na napětí, případně pro snadné roztřídění událostí do pozměněných úrovní jednotlivých klasifikačních tříd událostí, nebo také pro pouhé dodatečné zobrazení průběhů zaznamenaných událostí byla vyvinuta aplikace, jejíž čelní panel a výřezy z blokového diagramu jsou zobrazeny na obrázku Obr. 52. Aplikace dostala příznačný název „Postprocessing“, a pro její chod je důležité uchování všech dříve zaznamenaných souborů z měření na jednom místě pevného disku počítače. Po spuštění aplikace uživatel nejprve potvrdí (případně změní) jednotlivé úrovně délek trvání a zbytkových napětí pro třídění událostí, poté vybere typ použitého detekčního algoritmu a zadá název souboru s uloženými daty. Přepínačem vybere, zda mají být zahrnuty všechny události nebo pouze události s délkami trvání většími nebo rovnými 10ms a spustí chod aplikace. Z uložených souborů se vyčtou všechny informace ohledně nastavení měření a postupně jsou analyzovány všechny detekované události. Získané parametry jednotlivých událostí jsou opět přehledně zobrazovány do tabulky a všechny události jsou na zjištěných délek trvání a zbytkových napětí roztříděny do předem definovaných úrovní. Uživatel opět může graficky zobrazit průběh libovolné události, pakliže je tato již analyzována. Zjistí-li program, že již jsou analy-

zovány všechny události, parametry všech událostí jsou uloženy do textového souboru obsahujícího název „postresults“.



Obr. 52 Čelní panely a výřez blokového diagramu aplikace umožňující dodatečnou analýzu událostí na napětí

5.4 Shrnutí

Z provedených simulací lze konstatovat, že problematika přesného záznamu událostí na napětí je velmi rozsáhlá. Nezávisle na zvolené detekční metodě velký důraz je třeba klást na správný popis zaznamenaných událostí na napětí. Jak již dříve bylo naznačeno, v současnosti se události na napětí označují pouze dvěma parametry, tedy délkou trvání a zbytkovým napětím, čímž je každá událost charakterizována jako událost obdélníkového tvaru (i když velká část událostí vyskytujících se v elektrické síti má tvar od obdélníku odlišný). Je tedy otázkou, zda je popis zaznamenaných událostí na napětí pomocí pouze dvou parametrů dostatečný a zda by nebylo vhodné pro získání přesnějšího povědomí o událostech tyto hodnotit i některým

z dalších možných parametrů události¹⁰. Dodatečné parametry události však musí být s dostatečnou přesností zaznamenatelné detekčním algoritmem, což zvyšuje nároky jednak na výběr detekčního algoritmu, a jednak také hardwarové nároky samotného detekčního algoritmu (především paměť a rychlost měřicího přístroje). Na jednu stranu tak sice dojde k přesnějšimu záznamu a popisu událostí, na druhou stranu však musí být stanovena únosná mez velikosti vložených investičních nákladů do přestavby měřicích přístrojů, aby ono vylepšení nebylo vykoupeno příliš draze. Ať je odpověď na položenou otázku jakákoliv (uznání momentálně zažitého dvou-parametrového popisu všech událostí na napětí nebo inovace popisu na víceparametrový), v každém případě je nutné minimálně zvážit účelnost použití preferovaného algoritmu RMS ($\frac{1}{2}$) pro detekci událostí v el. sítích, neboť přesnost detekovaných parametrů a především rychlost detekce událostí výrazně zaostává za jinými, v této práci testovanými, algoritmy.

¹⁰ Samozřejmě je možné argumentovat faktem, že připojená elektrická zařízení jsou mnohem citlivější než na napěťové události obdélníkových průběhů nežli na události jiných průběhů a deklarace událostí různých průběhů jako obdélníkových je vhodnější, neboť vlastně vytváří nejhorší možnou variantu při statistických vyhodnoceních událostí. Podle parametrů zaznamenaných událostí na napětí by pak měly být prováděny testy odolnosti různých elektrických zařízení vůči těmto nežádoucím a z elektrické sítě neodstranitelným jevům, čímž vznikne jakási rezerva spolehlivosti správné funkce většiny elektrických zařízení. Problémem je, že testy odolnosti elektrických zařízení vůči událostem na napětí se v současné době provádějí nikoli podle parametrů v reálné síti se vyskytujícími událostí (zaznamenaných měřicími přístroji), ale podle testovacích událostí o předem přesně definovaných parametrech (viz kapitola 2.2.2 Testování odolnosti spotřebičů v souladu s EN 61000-4-11). Deklarace všech událostí jako obdélníkových pak ale ztrácí svůj význam.

6 PROPOJENÍ SYSTÉMU HODNOCENÍ UDÁLOSTÍ NA NAPĚTÍ SE SYSTÉMEM HODNOCENÍ ODOLNOSTÍ EL. ZAŘÍZENÍ

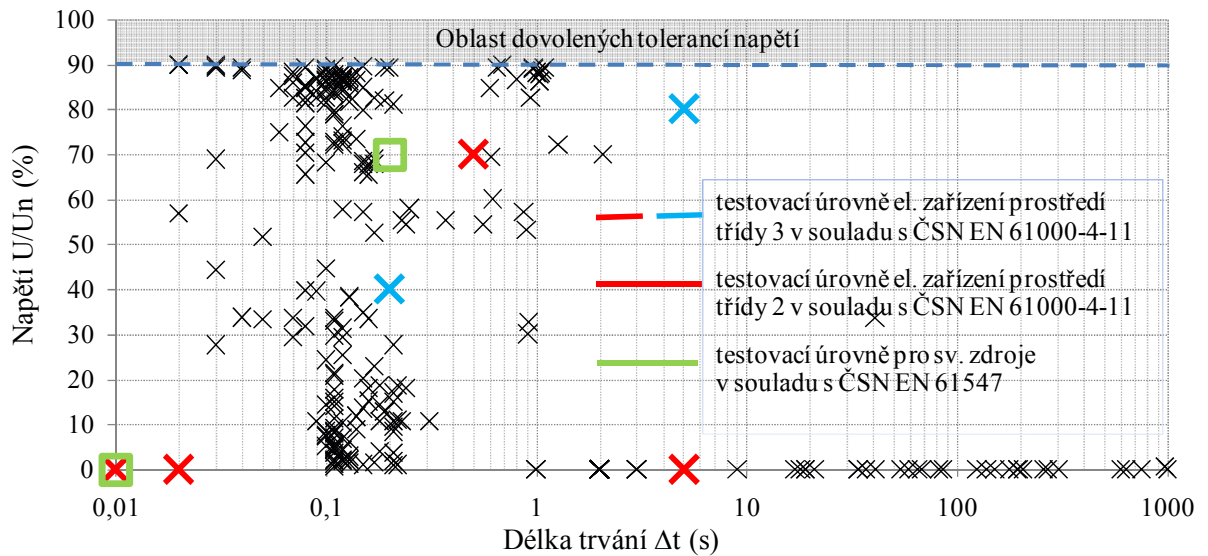
Z detailního rozboru problematiky hodnocení odolnosti el. zařízení vůči poklesům a krátkodobým přerušením napětí a problematiky hodnocení v el. síti vyskytujících se poklesů a kr. přerušení napětí provedeného v předchozích kapitolách vyplývá, že ačkoli oba systémy hodnocení spolu nesporně souvisejí, v současné době nejsou oba systémy hodnocení nikterak propojeny a oba jsou založeny na různých přístupech. Lze předpokládat, že vzájemné propojení obou systémů přinese užitek nejen z pohledu efektivnějšího testování odolnosti el. zařízení a lepšího uplatnění výsledků testování v praktických aplikacích, ale rovněž z pohledu kvalitnějšího záznamu detekovaných událostí na napětí, což umožní přesněji stanovit příčiny jejich vzniku, na jejichž základě pak bude např. možné upravit chronologický sled manipulačních operací v síti a tím snížit počet vzniklých událostí. Možností, jak navzájem propojit hodnocení poklesů napětí s hodnocením odolnosti el. zařízení, je např. stanovení kompatibilních úrovní pro poklesy a kr. přerušení napětí, které by zaručovaly, že v dané třídě elektromagnetického prostředí budou provozovány pouze spotřebiče o stanovené minimální úrovni odolnosti a počet neakceptovatelných změn jejich funkce tak bude minimalizován, a zároveň by mohl být limitován povolený počet výskytu událostí na napětí v el. síti, což by provozovatele soustavy nutilo k jejímu udržování ve vynikajícím stavu. Další možností je např. testování odolnosti el. zařízení na poklesy napětí o reálně se vyskytujících parametrech. Obě možnosti budou v dalším textu detailněji rozebrány.

6.1 Testování odolnosti el. zařízení vůči poklesům napětí reálných změřených parametrů

V současné době je odolnost el. zařízení testována vůči poklesům napětí přesně definovaných parametrů [7], přičemž počet testovacích úrovní a především jejich parametry závisí na třídě elektromagnetického prostředí, do kterého je příslušné el. zařízení určeno k použití. Výsledkem zkoušení je pak zjištění, zda testované zařízení vyhovuje zvolenému funkčnímu kritériu v každé z definovaných testovacích úrovní. Problémem je, že tento způsob testování neakceptuje skutečné parametry v el. síti zaznamenaných poklesů a přerušení napětí, a nelze tak předvídat chování el. zařízení při jiných než předepsaných parametrech zkušebních poklesů napětí.

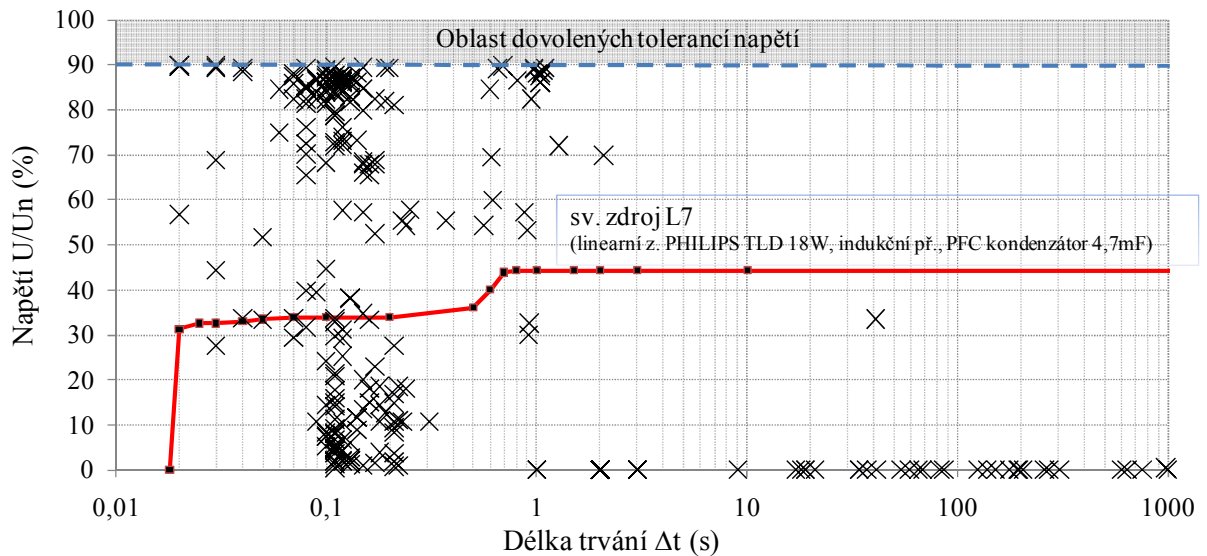
Samozřejmě, problémem je již samotný záznam skutečných parametrů detekovaných poklesů a přerušení napětí, kdy na základě standardizované detekční metody RMS (1/2) jsou všem detekovaným poklesům/přerušením napětí přiřazeny dva popisné parametry (minimální hodnota napětí, délka trvání), čímž jsou všechny události na napětí striktně označeny jako obdélníkové. Krom toho přesnost detekovaných parametrů se výrazně mění v závislosti na skutečných parametrech poklesů napětí. Vycházíme-li tedy z předpokladu, že nedojde k definičním změnám událostí na napětí a tyto budou stále uvažovány jako události dvouparametrové, schválení nového detekčního algoritmu (např. některého z algoritmů uváděných v kapitole 5) namísto algoritmu RMS (1/2) přinese pouze zpřesnění parametrů detekovaných událostí, ale všechny budou stále chápány jako obdélníkové. Potom vyhodnocení dlouhodo-

běžšího záznamu událostí v el. síti bude založeno na stejném principu jako v současné době a bude vypadat např. jako na obrázku Obr. 53.



Obr. 53 Poklesy a přerušení napětí zaznamenané v el. síti s vyobrazenými zkušebními úrovněmi pro testování odolnosti el. zařízení dle [7][25]

Na obrázku Obr. 53 jsou kromě zaznamenaných poklesů a přerušení napětí označeny také poklesy napětí tvořící normami definované zkušební úrovně. Je zřejmé, že z pohledu možnosti předvídání odezvy el. zařízení na poklesy napětí jiných než zkušebních úrovní nenastalo změnou detekčního algoritmu žádné zlepšení, a bude tedy nutné změnit samotný systém testování odolnosti el. zařízení. Vzhledem tomu, že v el. síti zaznamenané poklesy napětí jsou popsány dvěma základními parametry (zbytkové napětí, délka trvání), které vůbec nezohledňují vliv dalších napěťových parametrů (harmonické zkreslení, velikost napětí před vznikem a po skončení poklesu, fázový úhel vzniku poklesu, tvar poklesu), možností k alespoň částečnému propojení systému hodnocení odolnosti el. zařízení se systémem hodnocení detekovaných poklesů/přerušení napětí je testovat odolnost el. zařízení proměřením skutečné imunitní křivky daného zařízení při základních parametrech poklesu napětí (viz Obr. 54 a též kap. 2.2.3).

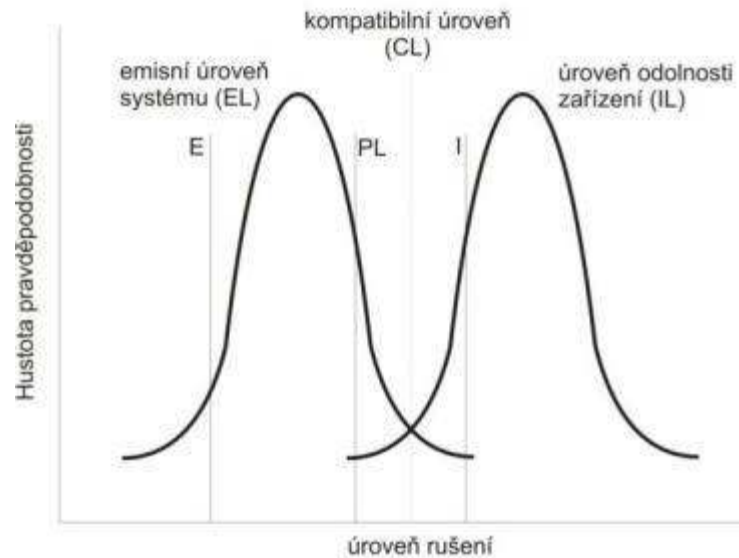


Obr. 54 Poklesy a přerušení napětí zaznamenané v el. síti v kontextu se základní imunitní křivkou sv. zdroje L7 odpovídající kritériu BC

Na základě Obr. 54, kde jsou současně zobrazeny v el. síti zaznamenané poklesy/přerušení napětí a základní imunitní křivka konkrétního el. zařízení (zde světelného zdroje), lze již poměrně jednoduše určit, které poklesy napětí způsobují akceptovatelnou změnu funkce sv. zdroje a které naopak způsobují neakceptovatelnou změnu jeho funkce. Prováděním dlouhodobého monitoringu událostí na napětí v různých částech el. sítě lze zjistit trend vývoje četností a parametrů událostí v dané síti a při znalosti základní imunitní křivky el. zařízení lze posoudit vhodnost použití konkrétního zařízení v dané el. síti. Stále je však nutno mít na paměti, že tímto způsobem jsou uvažovány pouze základní parametry poklesů napětí, a skutečná odolnost zařízení v reálném provozu může být díky souhrnnému vlivu dalších ovlivňujících činitelů jiná než během laboratorního testování. Nicméně výsledky testování přinesou mnohem lepšího využití nežli doposud prováděné testování dle [7].

6.2 Koncepce kompatibilní úrovně pro poklesy a krátkodobé výpadky napětí

Mnohem výhodnějším řešením je vytvoření komplexního systému zajištění kompatibilního prostředí pro poklesy a krátkodobá přerušení napětí, což spočívá ve stanovení kompatibilních úrovní pro poklesy a kr. přerušení napětí, v odvození tříd odolnosti pro různé skupiny výrobků a limitů daných napěťových událostí pro různé typy distribučních sítí. Princip hledání kompatibilní úrovně je názorně zobrazen na obrázku Obr. 55.



Obr. 55 Optimální úroveň odolnosti spotřebiče v závislosti na míře výskytu elmag. rušení [50]

Úroveň rušivých jevů (poklesů a kr. přerušování napětí) v dané síti je na Obr. 55 vyjádřena levou křivkou, míra odolnosti elektrického zařízení je vyjádřena pravou křivkou. Představíme-li si obě křivky jako křivky vynaložených nákladů, pak levá křivka vyjadřuje velikost nákladů spojených s potlačením v el. síti šířících se poklesů napětí, zatímco pravá křivka vyjadřuje velikost nákladů spojených se zlepšováním odolnosti el. zařízení na poklesy/přerušování napětí. Průnik obou křivek znamená minimální pravděpodobnost, že poklesy a přerušování napětí v dané síti způsobí nežádoucí chování připojených el. zařízení. Z pohledu el. zařízení a jeho spolehlivého chodu je samozřejmě žádoucí, aby míra jeho odolnosti byla co možná největší (v Obr. 55 se větší odolnost zařízení projeví posunem pravé křivky směrem více doprava), avšak nepřiměřeně vysoká odolnost zařízení s sebou přináší nepřiměřeně vysoké výrobní náklady a činí dané zařízení neprodejným. Průsečík tedy vyjadřuje hledaný optimální stav, tzv. kompatibilní úroveň, kdy jsou vynaložené náklady na zlepšení odolnosti zařízení a náklady na potlačení vzniku poklesů napětí na přijatelné úrovni. Kompatibilní úroveň vyjadřuje úroveň rušení, která by byla překročena jen ve velmi malém počtu případů – záměrem kompatibilní úrovně je pokryt alespoň 95% případů. Úroveň odolnosti zařízení by pak měla být minimálně rovna, v ideálním případě větší než kompatibilní úroveň [52].

Kompatibilní úroveň souvisí s konkrétním typem elektromagnetického rušení a je charakteristická vždy pouze pro určitý typ elektrické sítě, stejně jako pro třídu elektromagnetického prostředí, v němž je dané el. zařízení používáno. Typem el. sítě je myšlena napěťová hladina, na které je el. síť provozována. Výčet napěťových hladin v ČR používaných el. sítí byl již uveden v tabulce Tab. 1. Vezmeme-li v úvahu pouze distribuční sítě, do kterých jsou připojovány odběratelé podle velikosti odebíraného výkonu, rozeznáváme distribuční sítě nízkého napětí (nn), distribuční sítě vysokého napětí (vn) a distribuční sítě velmi vysokého napětí (vvn). Drtivá většina elektrických spotřebičů a běžných zařízení bývá připojována do sítě hladiny nn (případně vn), hlavní pozornost tedy bude věnována stanovení kompatibilních úrovní pro sítě hladiny nn.

Třídy elektromagnetického prostředí popisují charakter prostředí, v němž má být el. zařízení provozováno, a to především z hlediska předpokládané úrovně rušivého vyzařování. Standard [27] rozeznává následující třídy elektromagnetického prostředí:

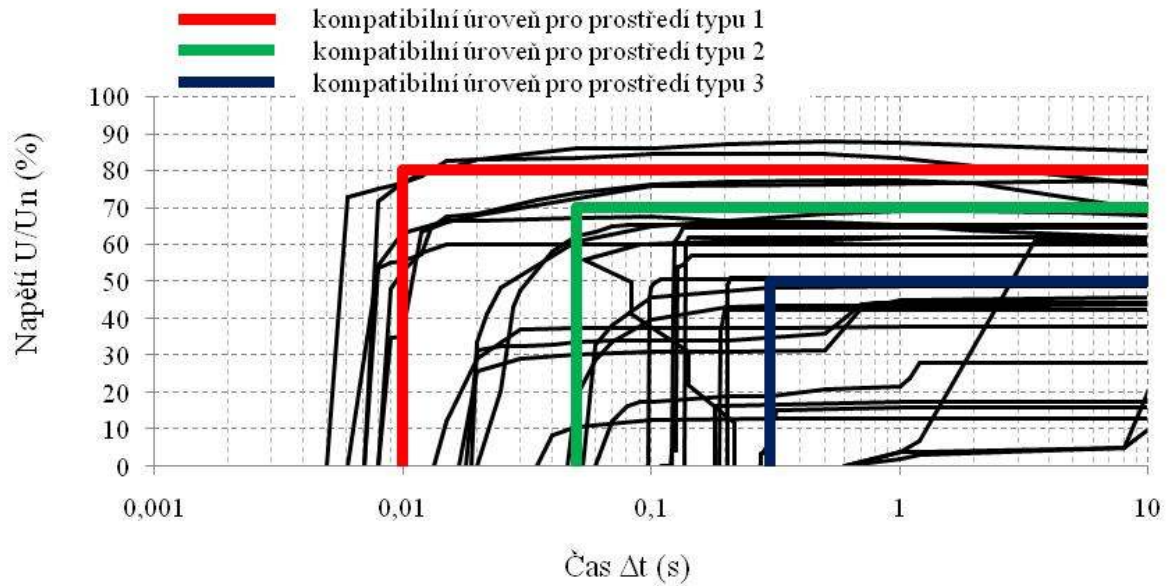
Třída 1 – typická pro chráněná napájení. Patří zde velmi citlivá zařízení, vybavení laboratoří, ochranných zařízení, počítačů apod. Tato zařízení bývají zálohována

napájením z nepřerušitelných zdrojů napájení (UPS), případně baterií. Vzhledem k vysoké míře zabezpečení napájení jsou odolnosti připojitelných zařízení třídy 1 na nižší úrovni, než jsou odolnosti běžně používaných el. zařízení. Kompatibilní úroveň by měla být nižší než úroveň pro běžné veřejné rozvodné sítě.

Třída 2 – společné napájecí body (PCC) a napájecí body uvnitř závodu (IPC). Do této kategorie náleží většina el. zařízení domácností, jako např. televizory, ledničky, pračky, osvětlení, apod. Pro prostředí třídy 2 nejsou kladeny žádné speciální požadavky, co se týká kvality napájení, kompatibilní úrovně jsou shodné s úrovněmi pro veřejné rozvodné sítě.

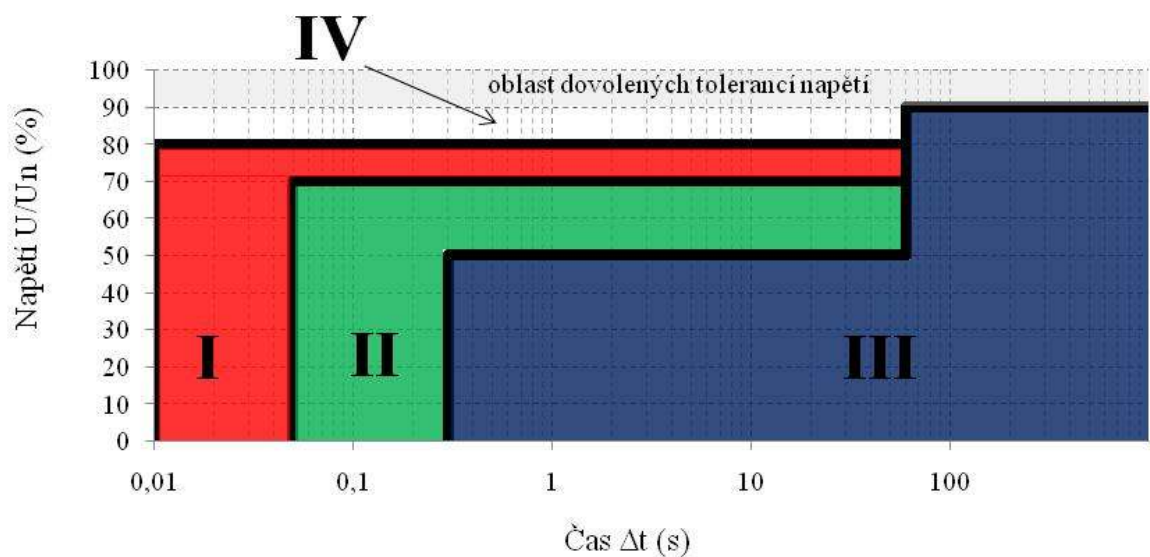
Třída 3 – pouze body IPC v průmyslových prostředích. Jde především o těžké provozy, ve kterých je dosahováno mnohem vyšších úrovní rušení než v běžných veřejných rozvodných sítích. Do této kategorie patří zejména asynchronní motory velkých výkonů, řídicí jednotky výrobních linek, osvětlení továren a výrobních hal, atd. Zařízení připojovaná do této kategorie prostředí by měla mít vyšší úroveň odolnosti na poklesy a přerušení napětí, proto kompatibilní úrovně budou dosahovat nižších hodnot v porovnání s kompatibilními úrovněmi třídy 2. K prostředí třídy 3 se řadí především provozy, pro které jsou typické zejména následující stavy: Převážná část zatížení je napájena přes frekvenční měniče, jedná se o provoz svářeček, jsou zde časté rozběhy motorů velkých výkonů a dochází k rychlým změnám zatížení.

Při stanovení kompatibilních úrovní je tedy nutné vycházet jak z předpokládaných četností a parametrů poklesů a kr. přerušení napětí v různých prostředích sítí nn (lze použít data získaná z monitorů poklesů/přerušení napětí v posledních letech), tak ze změřených imunitních křivek různých el. zařízení. Dodržením výše uvedeného lze říci, že kompatibilní úroveň je v podstatě vyjádřena křivkou minimální odolnosti pro dané elektromagnetické prostředí, která, pokud je dodržena ze strany projektantů a výrobců el. zařízení, zaručuje, že dané zařízení bude při provozu ve svém určeném prostředí pracovat správně či s akceptovatelnou změnou funkce. Na druhou stranu, pro provozovatele sítě představuje daná část kompatibilní úrovně informaci, že pokud budou parametry poklesů a výpadků napětí v dané síti mimo tuto úroveň (nad křivkou), dochází na straně spotřebitelů k minimálním ztrátám či škodám způsobeným nesprávnou činností připojených el. zařízení (samozřejmě za předpokladu, že připojená zařízení mají kompatibilní úrovní doporučenou úroveň odolnosti). S ohledem na definici odolnosti spotřebičů byly navrženy následující kompatibilní úrovně, které vychází z křivek odolnosti vybraných skupin spotřebičů, korespondují s poklesy a kr. přerušeními nejčastěji se vyskytujícími v distribučních sítích nn a rovněž respektují současnou metodiku členění událostí na napětí – viz obrázek Obr. 56.



Obr. 56 Imunitní křivky různých spotřebičů v kontextu s navrženými kompatibilními úrovněmi

Navržené kompatibilní úrovně odpovídají hranici mezi akceptovatelnou a neakceptovatelnou změnou funkce definovanou většinou kritériem C, přičemž hranice značí, že zařízení ještě pracuje s akceptovatelnou změnou funkce. Celkový pohled na navržené kompatibilní úrovně je k dispozici na obrázku Obr. 57.



Obr. 57 Navržené kompatibilní úrovně pro různé třídy elektromagnetického prostředí

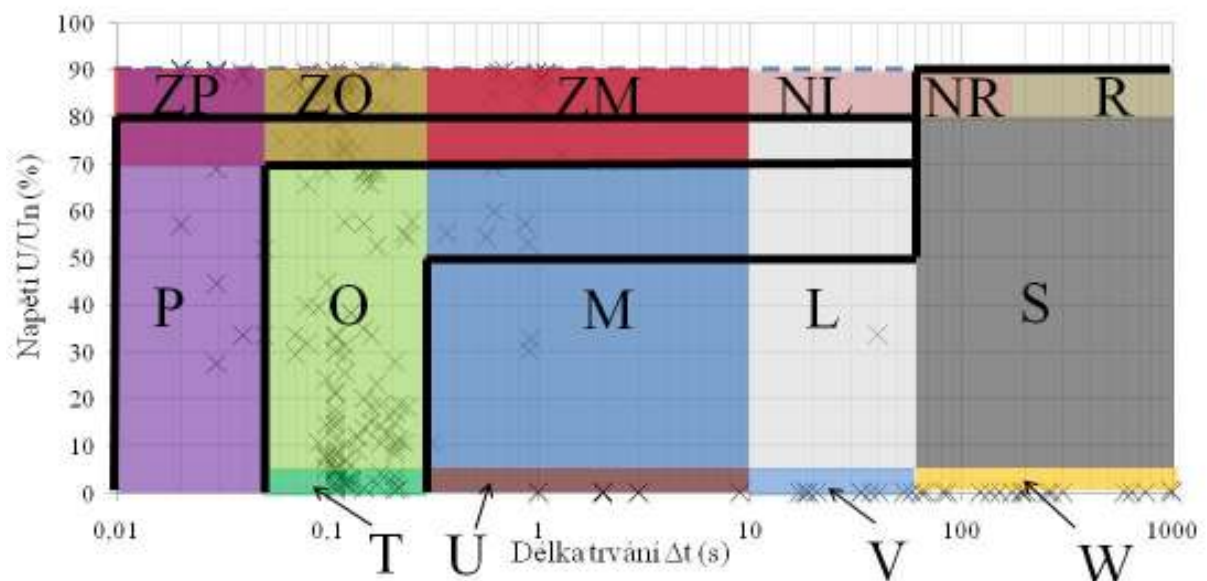
Z obrázku Obr. 57 vyplývá, že potřebné úrovně compatibility ze strany odolnosti zařízení je dosaženo pouze tehdy, když v dané třídě elmag. prostředí jsou provozovány pouze ty spotřebiče a zařízení, jejichž imunitní křivky spadají do prostoru ohraničeného navrženou křivkou kompatibilní úrovně daného prostředí. Compatibility v prostředí třídy 3 je dosaženo použitím zařízení, jehož imunitní křivky náležejí ploše III (modře označená); zatímco pro dosažení compatibility v prostředí třídy 2 je možno užívat zařízení s imunitními křivkami náležejícími

cími plochám II i III. V prostředí třídy 1 je kompatibilita dosažena užíváním zařízení s odolnostmi popsány křivkami ležícími v oblastech I, II, III.

Zároveň je patrné, že navržené kompatibilní úrovně všech tří tříd elektromagnetického prostředí v čase 1 minuta skokově přechází na hodnotu napětí 90% U_n , která představuje minimální dovolenou trvalou hodnotu napětí v síti a zároveň prahovou úroveň vzniku poklesu napětí. Zlom kompatibilních úrovní byl takto navržen především z toho důvodu, že pokles napětí o délce trvání 1 minuta je již dostatečně dlouhý na to, aby se dal z pohledu el. zařízení považovat za nekonečně dlouhý, a při kterém je zaručeno, že všechna připojená zařízení budou schopna pracovat bez nežádoucích disfunkcí pouze s napětím v rozmezí (110-90)% U_n . V opačném případě by nemělo význam definovat povolenou hranici napětí $U_n \pm 10\%$.

S ohledem na tepelné namáhání zařízení a jiné účinky déle trvajících poklesů napětí na různé procesy je možné představit si doplňující stupňovitou změnu v navržených kompatibilních úrovních v čase doby trvání poklesu 10 sekund (případně 1 sekunda). S tím, že by bylo zvýšeno minimální zbytkové napětí v rozmezí 10(1) sekund až 1 minuta na 85 (90)% pro prostředí třídy 1, 80% pro prostředí třídy 2 a 70% pro prostředí třídy 3. Takto upravené kompatibilní úrovně jsou k vidění v příloze na obrázku Obr. 174.

Navržené kompatibilní úrovně samozřejmě korespondují také s parametry poklesů a kr. přerušení napětí vyskytujících se v el. sítích. Již v dřívějších kapitolách byly uvedeny zóny příčin vzniku poklesů a přerušení napětí, a tyto zóny společně s navrženými kompatibilními úrovněmi zobrazuje Obr. 58.



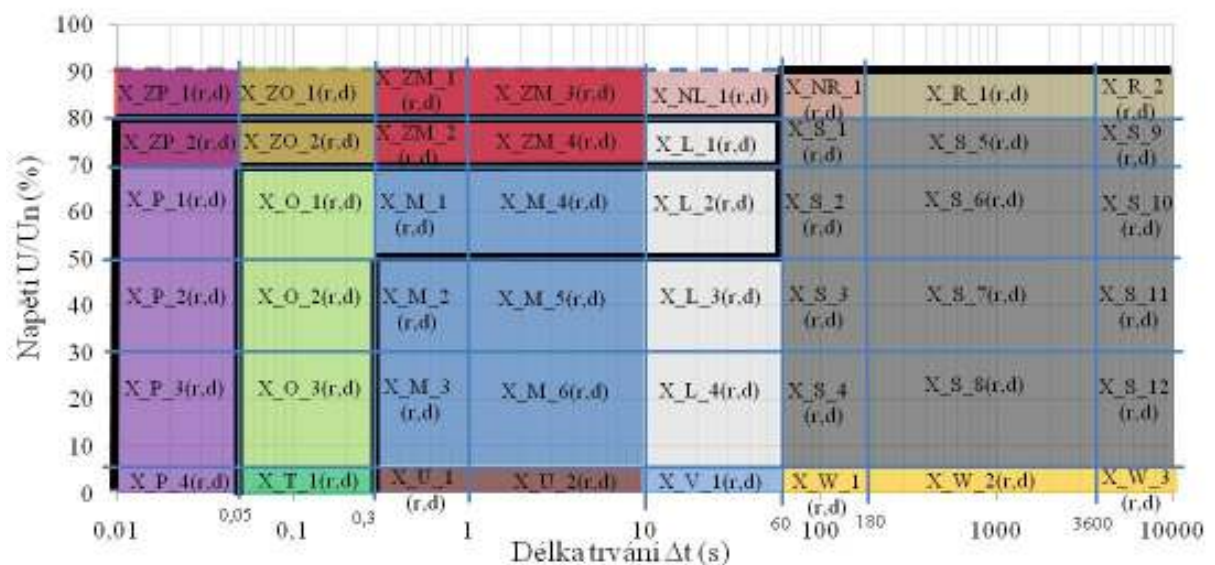
Obr. 58 Zóny příčin vzniku poklesů napětí a jejich vazba na navržené kompatibilní úrovně

Z obecného hlediska představuje kompatibilní úroveň, pro daný typ rušení a dané elektromagnetické prostředí, minimální úroveň odolnosti zařízení a maximální úroveň rušení v tomto prostředí, s tím, že je přípustná interference v maximálně 5% případů. Dle tohoto obecného pravidla pro zajištění kompatibility, s ohledem na ekonomickou optimalizaci, je tedy přípustné, aby pro dané elektromagnetické prostředí bylo maximálně 5% poklesů a krátkodobých výpadků napětí z celkového počtu všech zaznamenaných pod definovanou křivkou kompatibilní úrovně (viz Obr. 58). Pokles a kr. výpadky napětí jsou však zvláštním typem rušení, na jehož vzniku se podílí jednak odběratelé a provozovatelé sítí, či výrobci elektrické

energie, ale i tzv. „vyšší moc“. Napěťové události tohoto typu nelze bez značných investic výrazně omezit a rozhodně je nelze zcela odstranit. Navíc četnost jejich výskytu včetně parametrů jednotlivých událostí se výrazně mění s místem. Uvedený přístup hodnocení EMC by za těchto okolností znamenal, že by se počet neakceptovatelných změn funkce nebo ztrát funkce připojených spotřebičů v jednotlivých místech, při stejném elektromagnetickém prostředí, výrazně lišil, což však není z hlediska základní koncepce EMC přípustné. Jako odpovídající se proto jeví pro každé elektromagnetické prostředí definovat maximální přípustnou četnost poklesů a kr. výpadků napětí s parametry pod křivkou, které budou spotřebitelům garantovat maximální počet neakceptovatelných změn funkce nebo ztrát funkce připojených spotřebičů.

Stanovení maximálních limitů četností je tedy založeno na již dříve provedeném rozdělení příčin vzniku poklesů a kr. přerušení napětí do jednotlivých zón, kdy jednotlivé zóny jsou pro větší vypovídací schopnost dále rozděleny na další segmenty, a každému segmentu je přidělen maximální počet povolených výskytů poklesů/přerušení napětí (o parametrech poklesů/přerušení napětí spadajících do daného segmentu) za určité období. Vyhodnocovacím obdobím je standardní doba jednoho roku. Podle současně platné legislativy jsou poklesy a krátkodobé výpadky napětí chápány jako parametr informativní nikoli závazný, což v překladu znamená, že provozovateli distribuční sítě nevzniká žádná povinnost udržovat četnosti v síti se vyskytujícími poklesy a přerušení napětí na pro spotřebitele přijatelných úrovních. Zavedení maximálních limitů četností výskytů poklesů/přerušení napětí má tedy své opodstatnění a je to zároveň místem, kdy do systému jištění EMC vstupuje provozovatel sítě, a to v souvislosti s kompatibilní úrovní pro prostředí třídy 2. Maximální limity četností by tedy měly být následně také součástí závazných charakteristik napětí pro daný typ sítě.

Vzhledem k tomu, že při některých typech poruch v síti může dojít ke vzniku poklesů a přerušení napětí v rychlém sledu za sebou, je vhodné nejen stanovit maximální limity četností za standardní vyhodnocovací interval jednoho roku, ale taky za období kratší, např. 1 den, přičemž obě omezení musí platit zároveň. Pro lepší představu, např. v dané síti bude počet ročních výskytů poklesů napětí s parametry v rozmezích (50-300)ms a (50-70)% omezen na 60 a zároveň denní maximum výskytů těchto poklesů je omezeno na 3. Návrh dělení maximálních limitů četností výskytů poklesů a krátkodobých přerušení napětí v jednotlivých zónách v kontextu s celkovou koncepcí kompatibilních úrovní je na obrázku Obr. 59.



Obr. 59 Celkový návrh koncepce kompatibilních úrovní pro všechna tři prostředí sítí nn

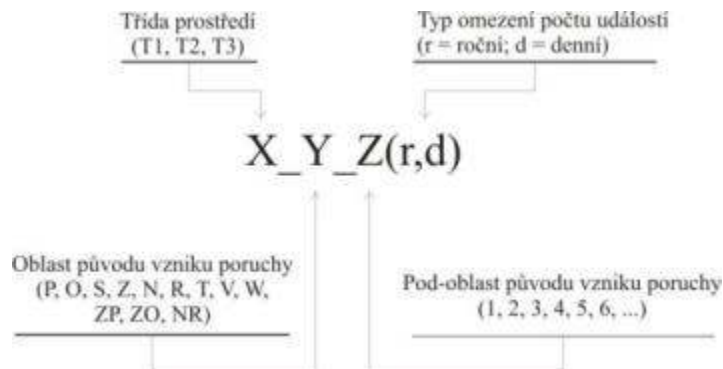
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

Nově vytvořené segmenty v zónách příčin vzniku poklesů/přerušení napětí lze také aplikovat do klasifikace zaznamenaných poklesů/přerušení napětí během dlouhodobě prováděných měření v el. síti. Původní členění parametrů poklesů a přerušení napětí z Tab. 4 tak může přejít v nové členění korespondující s vytvořenou koncepcí kompatibilních úrovní. Novou klasifikaci poklesů/přerušení napětí včetně zobrazených kompatibilních úrovní jednotlivých tříd elektromagnetického prostředí a návrhem limitujících omezení četností výskytů poklesů a přerušení napětí zobrazuje tabulka Tab. 19.

Tab. 19 Zavedené nové členění poklesů a kr. přerušení napětí s omezením max. četností výskytů v jednotlivých zónách

Délka trvání t [s]	10ms	50ms	300ms	1s	10s	60s	180s	1h
Zbytkové napětí [%]	$< \Delta t \leq 50\text{ms}$	$< \Delta t \leq 300\text{ms}$	$< \Delta t \leq 1000\text{ms}$	$< \Delta t \leq 10\text{s}$	$< \Delta t \leq 60\text{s}$	$< \Delta t \leq 180\text{s}$	$< \Delta t \leq 1\text{h}$	$< \Delta t$
$80 \leq d < 90$	X_ZP_1(r,d)	X_ZO_1(r,d)	X_Z_1(r,d)	X_N_1(r,d)	X_N_2(r,d)	X_NR_1(r,d)	X_R_1(r,d)	X_R_2(r,d)
$70 \leq d < 80$	X_ZP_2(r,d)	X_ZO_2(r,d)	X_Z_2(r,d)	X_S_4(r,d)	X_S_8(r,d)	X_S_12(r,d)	X_S_16(r,d)	X_S_20(r,d)
$50 \leq d < 70$	X_P_1(r,d)	X_O_1(r,d)	X_S_1(r,d)	X_S_5(r,d)	X_S_9(r,d)	X_S_13(r,d)	X_S_17(r,d)	X_S_21(r,d)
$30 \leq d < 50$	X_P_2(r,d)	X_O_2(r,d)	X_S_2(r,d)	X_S_6(r,d)	X_S_10(r,d)	X_S_14(r,d)	X_S_18(r,d)	X_S_22(r,d)
$5 \leq d < 30$	X_P_3(r,d)	X_O_3(r,d)	X_S_3(r,d)	X_S_7(r,d)	X_S_11(r,d)	X_S_15(r,d)	X_S_19(r,d)	X_S_23(r,d)
$d < 5$	X_P_4(r,d)	X_T_1(r,d)	X_V_1(r,d)	X_V_2(r,d)	X_V_3(r,d)	X_W_1(r,d)	X_W_2(r,d)	X_W_3(r,d)

Vysvětlení alfanumerického kódu použitého k omezení četnosti výskytů poklesů a kr. přerušení napětí v jednotlivých zónách a segmentech definujících příčiny vzniku událostí udává obrázek Obr. 60.



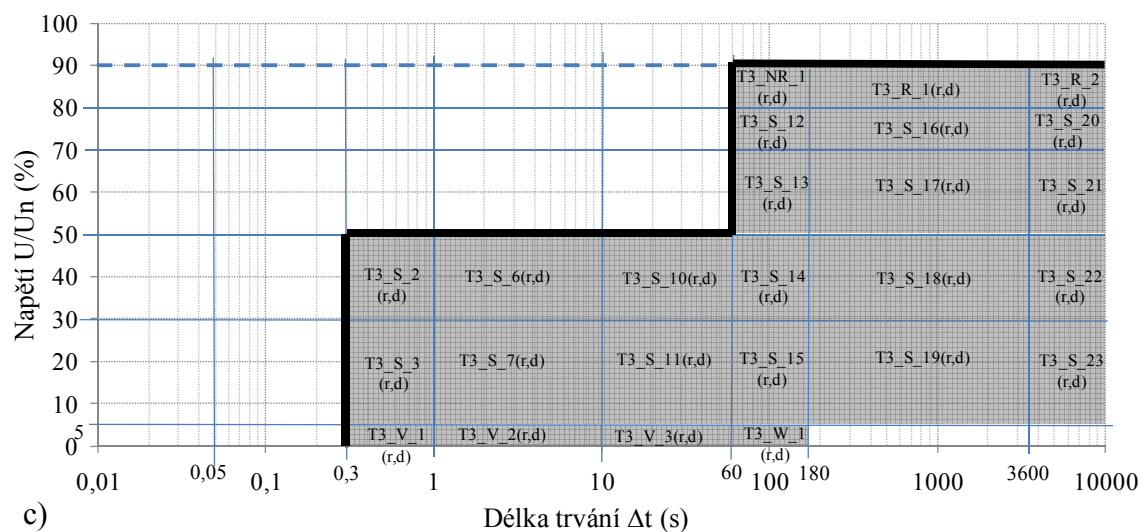
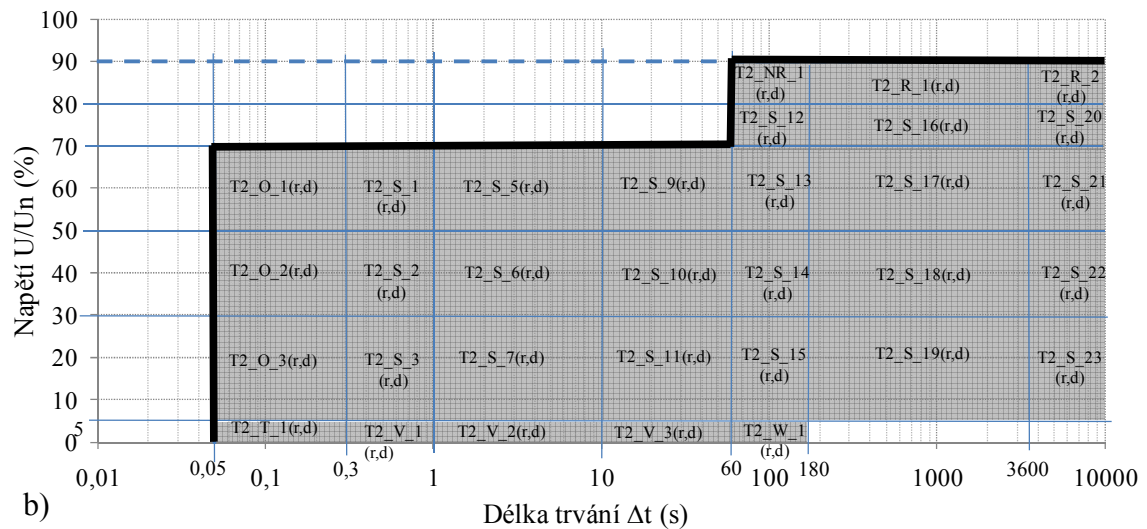
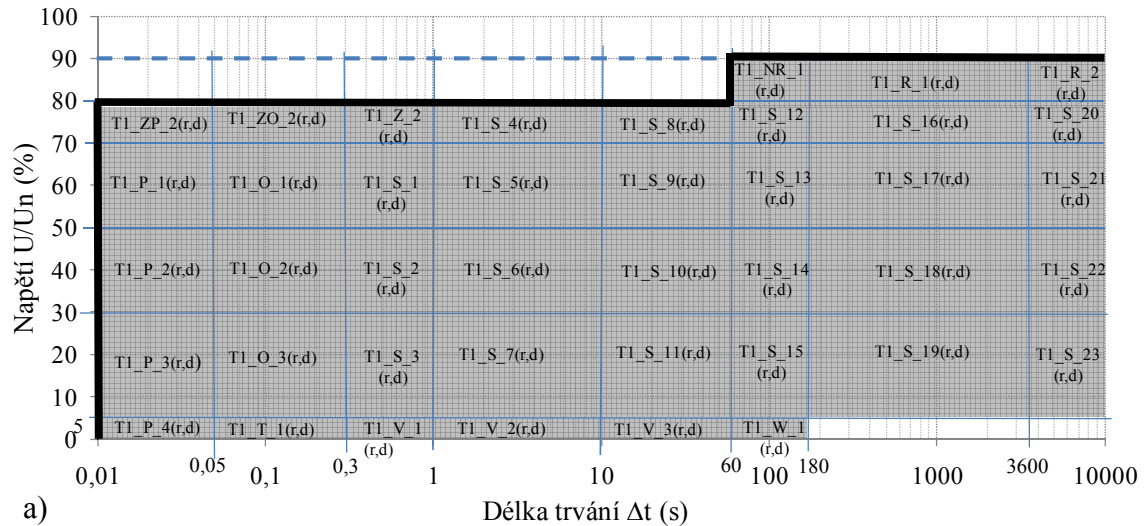
Obr. 60 Význam vytvořeného kódu pro omezení četností výskytů poklesů/přerušení napětí

Z navrhované koncepce kompatibilních úrovní vyplývá, že pro danou třídu elmag. prostředí jsou relevantní pouze některé limity četností, a sice pouze ty, které se nacházejí z hlediska navržené odpovídající kompatibilní úrovní pod křivkou. Je zřejmé, že četnosti napěťových událostí o parametrech ležících nad křivkou není třeba limitovat, jelikož tyto napěťové události jsou pokryty minimální odolností spotřebičů¹¹. Dále je nutné z tabulky Tab. 19 vy-

¹¹ V tomto případě nesmí být opomíjen vliv v rychlém sledu se opakujících napěťových událostí, zejména hlubších poklesů a přerušení, které svými parametry jednotlivě spadají do oblasti nad kompatibilní úrovní, ale v důsledku opakování mohou způsobit trvalou poruchu připojených spotřebičů. Potom je nezbytné přijmout taková technická opatření, aby k tomu nedocházelo.

jmout, a to pro všechny třídy prostředí, limity četností pro dlouhodobá přerušení napětí s dobou trvání větší než 3 minuty, která jsou již řešena odděleně v rámci garantovaných standardů přenosu nebo distribuce elektřiny v [53]. Zároveň je nezbytné zamezit kolizi s ostatními charakteristikami napětí, primárně s dovolenými odchylkami velikosti napájecího napětí. Možná omezení pro dobu trvání (případně i velikost) poklesu napětí vyplývají z definice měření a vyhodnocování velikosti a dovolených odchylek velikosti napětí. V tomto ohledu může být tabulka limitů četnosti poklesů napětí omezena dobou trvání poklesu do 16 hodin 40 minut, 3 hodiny 20 minut, 20 minut nebo 2 minuty. Uvedené hodnoty jsou teoreticky maximálně možné, v závislosti na procentu průměrných efektivních hodnot napětí, které mohou být během každého týdne mimo povolenou toleranci, a délce agregačního intervalu. Delší poklesy napětí by znamenaly nevyhovění z hlediska velikosti napětí. Pro jednotlivé třídy elektromagnetického prostředí by omezení četností výskytů poklesů/přerušení napětí vypadalo jako na obrázku Obr. 61. Prozatím je uvažována maximální doba trvání poklesu napětí, tj. 16 hodin 40 minut, a není zahrnuto žádné omezení velikosti poklesů/přerušení napětí.

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



Obr. 61 Vymezení působnosti stanovených povolených limitů max. četnosti výskytů poklesů a přerušeni napětí pro jednotlivé třídy prostředí: a) prostředí třídy 1; b) prostředí třídy 2; prostředí třídy 3. Oblasti působnosti jsou vyznačeny šedými plochami.

Jak vyplývá z obrázku Obr. 61, limity maximálních četností výskytů poklesů a přerušení napětí platí pouze v oblasti vymezené křivkou kompatibilní úrovně pro danou třídu elektromagnetického prostředí. Oblast je vyznačena šedou plochou a dodržení povolených četností je závazné. V oblasti nad křivkou kompatibilní úrovně pro danou třídu elmag. prostředí (označena bílou plochou) a pro dlouhodobé výpadky napětí není četnost výskytů poklesů a přerušení napětí nikterak omezena, nicméně je vhodné četnost poklesů a přerušení napětí spadajících do těchto oblastí zaznamenávat.

Zásadním problémem je stanovení mezní četnosti poklesů a krátkodobých přerušení napětí pro jednotlivé vymezené oblasti. Je zřejmé, že pro jednotlivé třídy prostředí by se měly limity měnit a pro jejich určení je potřeba vycházet ze souboru všech změřených událostí na napětí na hladině nn, které budou věrohodně reprezentovat prostorové i časové rozložení těchto událostí. Před následným statistickým zpracováním je nezbytné vyloučit všechny soubory sítí, které jsou nevyhovující s ohledem na jinou charakteristiku napětí, popřípadě provést další nezbytnou a opodstatněnou selekci vstupních dat. Limitní hodnota každé podoblasti by v principu mohla být stanovena jako percentil definované velikosti (v závislosti na třídě prostředí) ze všech vyfiltrovaných sítí s napěťovými událostmi spadajícími svými parametry do dané podoblasti. Percentil menší než 100% pro třídu prostředí 2 by znamenal, že určité procento sítí (míst), kromě vyfiltrovaných, bude a priori zařazeno do nevyhovujících. Možných variant stanovení limitů četností je několik, avšak bez ohledu na konkrétní postup vždy musí být rozhodujícím kritériem technicko-ekonomické zhodnocení důsledků.

6.3 Hodnocení poklesů a kr. přerušení napětí s ohledem na odolnost el. zařízení

Dalším z možných způsobů vedoucích k propojení systému hodnocení poklesů a kr. přerušení napětí v el. sítích se systémem hodnocení odolnosti el. spotřebičů vůči těmto typům napěťových událostí je patřičným způsobem ohodnotit detekovaný pokles napětí s ohledem právě na odolnost vybraných el. zařízení. Jinak řečeno, je zapotřebí stanovit hodnocení poklesů a přerušení napětí pomocí odpovídajícího indexu, díky kterému by za předpokladu znalosti imunitních křivek konkrétního el. zařízení bylo možné určit, zda dané zařízení tomuto poklesu/přerušení napětí odolá či bude funkce zařízení neakceptovatelným způsobem narušena. K tomuto účelu se nabízí zavedení tzv. indexu závažnosti poklesu napětí SI (voltage dip severity index), pro jehož výpočet je v [54] uveden následující vztah.

$$SI = \frac{1 - U_d(d)}{1 - U_{d_ref}(d)} \quad (25)$$

V rovnici (25) vystupující veličiny mají následující význam:

$U_d(\Delta t)$ zbytkové napětí (relativní hodnota) klasifikovaného poklesu napětí o délce trvání Δt

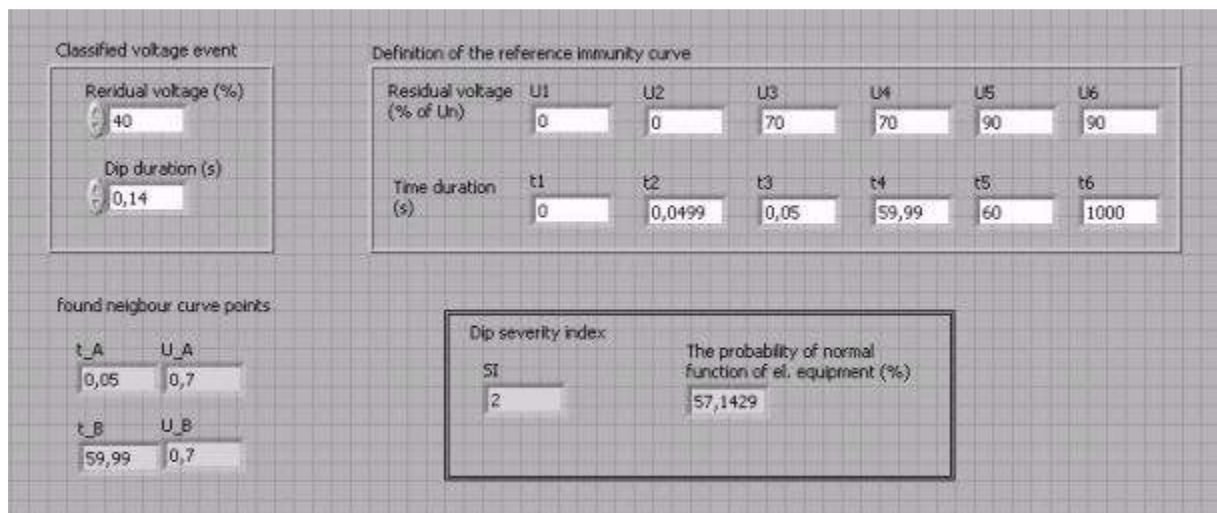
$U_{d_ref}(\Delta t)$ zbytkové napětí poklesu (relativní hodnota) odpovídajícího délce trvání Δt a ležícího na známé referenční křivce odolnosti

Pro výpočet indexu závažnosti poklesu napětí SI dle rovnice (25) je nutná znalost křivky odolnosti konkrétního zařízení (tzv. referenční křivka odolnosti), vůči níž je index závažnosti SI vztahován. Vypočtené hodnoty SI jsou tak vždy platné pouze pro uvažovanou referenční křivku odolnosti, neboť při změně parametrů referenční křivky odolnosti je nutné znovu vypočítat nové indexy SI. Z rovnice (25) je zřejmé, že index závažnosti poklesu SI může nabývat hodnot z intervalu $\langle 0; 10 \rangle$, kdy nulové hodnoty je dosaženo tehdy, nevznikne-li žád-

ný pokles napětí a napětí je stále udržováno na jmenovité hodnotě, zatímco maximální hodnoty indexu $SI = 10$ je dosaženo tehdy, je-li klasifikovanou událostí přerušení napětí ($U_d = 0$) a délce trvání daného přerušení napětí odpovídá hodnota zbytkového napětí referenční křivky odolnosti $U_{d,ref} = 0,9$, Hodnota $U_{d,ref} = 0,9$ značí, že referenční křivka odolnosti již dosahuje úrovně totožné s prahovým napětím definujícím vznik poklesu/přerušení napětí.

Podstatnou, ale odstranitelnou nevýhodou uvedeného algoritmu je jeho provázanost s křivkou odolnosti konkrétního zařízení, která je při výpočtech považována za křivku referenční. Vypočtené indexy SI jsou tedy platné pouze pro konkrétní el. zařízení a jeho křivku odolnosti. Byla-li by za referenční křivku odolnosti považována v kapitole 6.2 navrhovaná křivka definující kompatibilní úroveň mezi poklesy/přerušeními napětí a odolnostmi el. zařízení pro určitou třídu elektromagnetického prostředí, pak budou vypočtené indexy závažnosti poklesů SI vztaheny k oné kompatibilní úrovni a výsledky budou relevantní pro všechna el. zařízení používaná v dané třídě elektromagnetického prostředí. Za předpokladu, že v dané třídě elektromagnetického prostředí jsou používána pouze zařízení, jejichž míra odolnosti vůči poklesům/přerušením napětí odpovídá dané kompatibilní úrovni, je pak možné stanovit procentuální pravděpodobnost správného chodu všech el. zařízení používaných v dané třídě elektromagnetického prostředí.

V grafickém prostředí LabVIEW byla vytvořena jednoduchá aplikace, jejímž úkolem je právě výpočet indexu závažnosti poklesu/přerušení napětí a pravděpodobnosti správného chodu připojených el. zařízení vzhledem k uživatelem zadané referenční křivce odolnosti. Čelní panel aplikace je zobrazen na Obr. 62.



Obr. 62 Čelní panel vytvořené aplikace pro výpočet indexu závažnosti poklesu napětí SI a pravděpodobnosti spolehlivé funkce el. zařízení

V levé horní části čelního panelu jsou nastaveny parametry detekovaného poklesu napětí, pro něhož má být index závažnosti SI a pravděpodobnost normálního chodu el. zařízení vypočítána, a v pravé horní části čelního panelu jsou zlomové body uživatelem zadané referenční křivky odolnosti. Konkrétně na Obr. 62 jsou zadány body definující kompatibilní úroveň pro elektromagnetické prostředí třídy 2 navržené v kapitole 6.2. Výpočet indexu závažnosti poklesu/přerušení napětí se řídí vztahem (25), z čehož vyplývá, že má-li detekovaný pokles napětí takové parametry, že při jeho grafickém vyjádření leží na referenční křivce odolnosti (zde křivka kompatibilní úrovně), index závažnosti poklesu SI je právě roven 1, a zároveň pravděpodobnost správného chodu el. zařízení v třídě prostředí 2 je rovna 100% (platí samozřejmě pouze v případě, že výrobci el. zařízení dodrží kompatibilní úroveň stanovenou minimální úrovní odolnosti daných zařízení). Má-li detekovaný pokles napětí takové parametry,

try, že při jeho grafickém vyjádření leží nad referenční křivkou odolnosti, dosahuje index SI hodnot v rozmezí $<0;1$) a pravděpodobnost správného chodu el. zařízení je stále rovna hodnotě 100%. Naopak leží-li detekovaný pokles napětí pod úrovní referenční křivky odolnosti, index SI již nabývá hodnot větších než 1 a pravděpodobnost správného chodu všech el. zařízení v dané třídě prostředí již klesá pod hodnotu 100%.

Hodnocení poklesů a krátkodobých přerušení napětí pomocí indexu závažnosti SI resp. výpočet pravděpodobnosti správného chodu připojených el. zařízení připadá v úvahu pouze tehdy, bude-li schválena jednotná referenční křivka odolnosti pro všechny el. zařízení používaná v určité třídě imag. prostředí, případně budou-li zavedeny navrhované (případně jiné) kompatibilní úrovně pro poklesy a kr. přerušení napětí. Pouze tak bude možné globálně aplikovat vypočtené parametry na všechna zařízení dané třídy prostředí a nebude nutné je přepočítávat zvlášť na jednotlivé typy el. spotřebičů. Potom mohou být parametry referenční křivky odolnosti zaimplementovány do monitorů a analyzátorů poklesů/přerušení napětí a již při detekci poklesu napětí by tomuto poklesu byl přiřazen další hodnotící parametr, a sice index závažnosti poklesu SI případně procentuální hodnota správného chodu el. zařízení.

7 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá problematikou odolnosti elektrických spotřebičů a zařízení vůči krátkodobým poklesům a přerušením napětí vyskytujícími se v el. napájecích sítích. Velmi úzce tak zasahuje do oblasti elektromagnetické kompatibility, neboť poklesy a krátkodobá přerušení napětí se považují za jeden z mnoha typů elektromagnetického rušení, jež může zásadním způsobem ovlivňovat bezporuchový chod el. zařízení. Události na napětí vznikají v různých částech elektrizační soustavy, a skrze vodiče napájecího vedení se šíří elektrickou sítí až k el. zařízením a spotřebičům koncového odběratele. Přenosovou cestu mezi zdroji rušení a přijímači rušení tedy tvoří el. napájecí síť. Vzhledem k tomu, že elektrizační soustava jako celek má velmi složitou strukturu, neboť obsahuje všechna zařízení potřebná od výroby el. energie přes její transformaci, přenos a rozvod až po její konečnou spotřebu, a selhání kteréhokoliv prvku v řetězci může způsobit vznik poklesu či přerušení napětí, je prakticky nemožné poklesy a přerušení napětí z elektrické sítě zcela odstranit. Proto je důležité věnovat pozornost zejména problematice odolnosti el. spotřebičů právě na v el. síti vyskytující se poklesy a kr. přerušení napětí a zároveň odpovídající hodnocení výskytu těchto událostí v el. sítích. V současné době není systém hodnocení odolnosti el. spotřebičů vůči poklesům a přerušením napětí propojen se systémem hodnocení výskytu těchto událostí na napětí v el. sítích, což zásadním způsobem snižuje vzájemnou interpretaci výsledků mezi oběma systémy hodnocení. Cílem disertační práce tedy byla studie možných opatření vedoucích k propojení obou hodnotících systémů.

Co se týče hodnocení odolnosti spotřebičů vůči poklesům/přerušením napětí, v disertační práci je popisován nový způsob testování odolnosti el. spotřebičů, který zpřesňuje a doplňuje dosud platnou metodiku testování definovanou standardy [7][8][25]. Na rozdíl od aktuálně uznávané metodiky, která přesně definuje parametry zkušebních poklesů a přerušení napětí, čímž vlastně hodnotí odolnost spotřebičů pouze vůči těmto předepsaným poklesům/přerušením napětí, navrhovaná metoda testování je založena na změření kompletní imunitní křivky daného spotřebiče. Změření imunitní křivky spočívá v systematicky nastavovaných základních parametrech poklesů/přerušení napětí, kdy za základní parametry poklesů se nadále považuje zbytkové napětí a délka trvání. Na základě znalosti kompletní křivky odolnosti daného spotřebiče je možné dopředu stanovit, zda pokles napětí určitých parametrů způsobí neakceptovatelnou změnu funkce testovaného spotřebiče či provoz spotřebiče nebude nijak narušen.

Nová metodika testování byla následně aplikována na vybraných typech počítačových a světelných zdrojů, které jsou na přítomnost poklesů/přerušení napětí v el. síti zvláště citlivé a jejichž případná porucha funkce může vyvolat značné materiální ztráty případně zvýšené riziko ohrožení bezpečnosti. Během laboratorního testování tak bylo otestováno celkem 8 různých typů počítačových zdrojů a celkem 16 různých typů světelných zdrojů. Rozdíly mezi jednotlivými počítačovými resp. světelnými zdroji spočívaly především v různých topologiích zdrojů, definovaných výkonech, a v případě sv. zdrojů též v rozdílných principech vzniku světelného záření. Při nespočtu provedených zkoušek bylo zjištěno, že kromě dvou základních parametrů poklesů/přerušení napětí, kterými jsou zbytkové napětí poklesu a délka jeho trvání, odolnost el. zařízení závisí také na dalších parametrech napětí, aktuálním provozním stavu testovaného zařízení a rovněž na klimatických podmínkách. Zásadními ovlivňujícími faktory jsou velikost napětí před vznikem a po skončení poklesu/přerušení napětí, druh a velikost harmonického zkreslení křivky napětí před vznikem, během trvání a po skončení poklesu, fázový úhel okamžiku vzniku a zániku poklesu, tvar poklesu napětí, aktuální zatížení testovaného spotřebiče v době trvání události, teplota prostředí, vlhkost apod. Vliv těchto a dalších parametrů působí na odolnost spotřebiče v reálném prostředí dohromady, a proto může být

jeden ovlivňující parametr, který odolnost spotřebiče například mírně zvyšuje, vykompenzován jiným parametrem, který naopak odolnost spotřebiče mírně snižuje. Všechny odolnost ovlivňující parametry se navíc v čase neustále mění, proto je v laboratorních podmínkách takřka nemožné věrohodně simulovat podmínky reálného provozu spotřebiče. Během laboratorního testování byl proto vždy uvažován vliv pouze jednoho ovlivňujícího parametru, kdy ostatní parametry byly udržovány na konstantních jmenovitých hodnotách. Takto byly proměřeny parametrické křivky odolnosti uvedených počítačových a světelných zdrojů.

Samotné testování odolnosti spotřebičů dle nové metodiky, kdy je proměřována celá imunitní křivka, je časově velmi náročné, neboť je potřeba dodržovat minimální časové rozestupy mezi postupně prováděnými zkouškami. Tyto rozestupy zaručují, že se testované zařízení v okamžiku spuštění zkoušky nachází ve svém jmenovitém provozním stavu a že výsledek zkoušky již není ovlivněn předchozí zkouškou. Navíc dodržování rozestupů mezi zkouškami zvyšuje reprodukovatelnost výsledků jednotlivých zkoušek a zvyšuje pravděpodobnost dosažení stejných výsledků při opakování zkoušky. Velikost časových rozestupů se liší v závislosti na typu testovaného zařízení a v závislosti na výsledku předchozí provedené zkoušky, u některých světelných zdrojů například trvá naběhnutí zdroje do jmenovitého stavu až 20 minut. Navíc proces testování vyžaduje neustálou kontrolu sledovaných veličin testovaného zařízení a vyžaduje přesnou interpretaci funkčních kritérií, na jejichž základě je pak výsledek zkoušky vyhodnocován. Pro testování byla vyvinuta metodika objektivního vyhodnocování funkčních kritérií, která spočívá v nalezení a během testování prováděném monitoringu charakteristického parametru testovaného zařízení, přičemž změna tohoto parametru přímo vypovídá o výsledku prováděné zkoušky. Z procesu vyhodnocování je tak zcela odstraněn subjektivní názor lidského pozorovatele. Z důvodu eliminace vlivu lidského faktoru na výsledky měření a především z důvodu úspory času potřebného k měření byl vytvořen návrh automatizovaného systému pro testování křivek odolnosti el. spotřebičů. Tento systém se skládá jednak z řídicího modulu, kterým je ovládán programovatelný zdroj napětí, jež napájí testované el. zařízení a pomocí něhož jsou spouštěny poklesy a přerušení napětí systematicky nastavovaných parametrů, a jednak z vyhodnocovacího modulu, který během testování zaznamenává sledované výstupní veličiny testovaného zařízení a v souladu s uživatelem zadáním funkčním kritériem zaznamenaná data vyhodnocuje. Vyhodnocovací moduly pro testování světelných zdrojů a počítačových zdrojů jsou již vytvořeny v grafickém vývojovém prostředí programu LabVIEW, přičemž pro samotný sběr dat jsou využity měřicí karty firmy National Instruments. Uživatel do procesu testování vstupuje pouze před jeho započítím, kdy zvolí typ zkoušeného zařízení, z přednastavených možností vybere testované funkční kritérium, zadá časové intervaly mezi zkouškami pro případ úspěšně či neúspěšně vykonané zkoušky (závisí typu testovaného zařízení) a nadefinuje typ parametrické křivky odolnosti, která má být proměřena (jinými slovy určí, pro který odolnost ovlivňující parametr bude hledána křivka odolnosti). Pak odstartuje celou aplikaci a po jejím skončení si pouze stáhne data (dvojice parametrů zbytkové napětí-délka trvání, případně velikost třetího měnicího se parametru) určující hledanou imunitní křivku. Není-li možné, např. z časových důvodů, proměřit celou imunitní křivku daného zařízení, může být proměřena pouze zjednodušená imunitní křivka, pro jejíž zjištění je nutné nalézt pouze její dva krajní body. Levý krajní bod křivky odpovídá odolnosti zařízení na úplné přerušení napětí a pravý krajní bod křivky odpovídá odolnosti zařízení na dlouhotrvající poklesy napětí (v podstatě vypovídá o schopnosti zařízení pracovat trvale při snížené hodnotě napětí). Proložení obou krajních bodů přímkami rovnoběžnými s časovou resp. napětíovou osou je získána zjednodušená křivka odolnosti, která má díky uplatněnému zjednodušení nižší vypovídací schopnost o odolnosti daného zařízení než celá imunitní křivka, nicméně ve většině případů zaručuje, že skutečná úroveň odolnosti zařízení bude minimálně stejná, ve většině případů však lepší než úroveň signalizovaná zjednodušenou imunitní křivkou.

Vzhledem k tomu, že při testování odolností spotřebičů bylo zjištěno, že na míru odolnosti zařízení mají kromě základních parametrů poklesů/přerušení napětí, kterými jsou zbytkové napětí a délka trvání, významný vliv také další parametry napětí vztahující se ke konkrétní události (ef. hodnota napětí před vznikem a po skončení události, harmonické zkreslení napětí před vznikem, během trvání a po skončení události, fázový úhel okamžiku vzniku události, tvar události), byly v programu MATLAB vytvořeny simulace, pomocí kterých byla ověřována schopnost aktuálně standardizovaného měřicího a detekčního algoritmu RMS (1/2) [9] správně a přesně detekovat jak základní parametry poklesů napětí, tak i některé z výše uvedených ostatních parametrů poklesů napětí. Za tímto účelem byly v programu MATLAB naprogramovány také další známé i méně známé detekční algoritmy, a jejich výsledky byly vzájemně porovnány. Kromě standardizované metody RMS (1/2), která je založena na výpočtu efektivních hodnot napětí za přesně stanovený vyhodnocovací interval (perioda vstupního signálu napětí, tedy 20ms), kdy dva sousedící intervaly se překrývají právě o polovinu periody signálu napětí, tedy o 10ms, byly vytvořeny algoritmy RMS 10ms (délka vyhodnocovacího okna je 10ms a nulové překrytí sousedních oken), jejich klouzavé ekvivalenty (délka vyhodnocovacího okna 20ms resp. 10ms, a posunutí dvou sousedních vyhodnocovacích oken je vždy o jeden vzorek), a dále „Ziarani“ algoritmus a Rozšířený Kalmanův filtr (EKF). Poslední dva algoritmy („Ziarani“, EKF) se řadí do skupiny trackovacích algoritmů, které na základě znalosti hodnoty napětí v jednom kroku odhadují velikost napětí kroku následujícího s krokem odpovídajícím vzorkovací frekvenci vstupního signálu. Správný chod trackovacích algoritmů je řízen nastavenými konstantami příslušného algoritmu a závisí též na použité vzorkovací frekvenci.

Simulacemi bylo zjištěno, že zásadní nevýhodou klasických metod založených na RMS výpočtu je dlouhá časová prodleva mezi okamžikem skutečného vzniku poklesu a okamžikem jeho detekování. Velikost této odezvy je dána vlastním nastavením algoritmu, což v případě standardizované metody RMS (1/2) činí buďto 10ms nebo 20ms, a v případě metody RMS 10ms činí právě 10ms. Dále bylo zjištěno, že RMS (1/2) algoritmus není schopen detekovat obdélníkové poklesy napětí s délkami trvání kratšími než 5ms, a poklesy s délkami trvání v rozmezí 5ms až 10ms jsou sice detekovány, ale s výraznou chybou v detekovaných parametrech daného poklesu. Velikost chyby detekovaného zbytkového napětí se pohybuje nad hodnotou 90%, chyba detekované délky trvání je dokonce vyšší než 100%. To klouzavé ekvivalenty klasických RMS metod vykazují mnohem lepších výsledků. Časová prodleva při detekci poklesů napětí je výrazně nižší, u klouzavé metody RMS 10ms se pohybuje pod hodnotou 4ms, čímž tato metoda zdatně sekunduje nejrychlejšímu algoritmu EKF. Také přesnost detekovaných parametrů se oproti klasickým RMS algoritmům výrazně zlepšila. Simulace také prokázaly, že z testovaných algoritmů nejlepších výsledků dosahuje EKF. Jeho zpoždění detekce se v některých simulacích pohybovalo i pod hodnotou 2ms, přičemž parametry detekovaných poklesů napětí byly v porovnání s ostatními algoritmy stále detekovány nejpřesněji.

Na základě všech provedených simulací lze souhrnně říci, že přesná detekce poklesů/přerušení napětí závisí na tom, jak přesně je daný algoritmus schopen zaznamenat průběh dané události, neboť všechny parametry poklesů napětí se určují ze zaznamenaného průběhu události. Z provedených simulací vyplývá, že nejvhodnějším algoritmem pro detekci poklesů/přerušení napětí v el. síti je EKF, následovaný klouzavou RMS 10ms metodou, neboť tyto dokážou výrazně rychleji a přesněji detekovat základní parametry zaznamenaných událostí (zbytková napětí, délky trvání) než ostatní testované algoritmy, tedy i než aktuálně standardizovaná metoda RMS (1/2).

Protože je všeobecně známo, že výsledky jakékoliv simulace ještě neznamenají skutečný přínos daného řešení v praktickém použití, byly všechny testované algoritmy naprogramovány v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW a v součinnosti s měřicími kartami firmy

National Instruments byl chod jednotlivých algoritmů odzkoušen při reálném měření. Na měřící karty NI byl nejprve přiveden výstup programovatelného zdroje napětí, díky kterému bylo možné opět generovat poklesy napětí a jejich správnou detekci zvoleným detekčním algoritmem ihned kontrolovat, a poté bylo přivedeno také napětí skutečné el. sítě nn. Reálným měřením bylo zjištěno, že konvergence algoritmu EKF výrazně závisí na frekvenci měřeného napětí a každá změna frekvence větší než cca $\pm 0,01\text{Hz}$ vyvolá nestabilitu chodu EKF. Navíc složitost algoritmu EKF klade extrémní nároky na paměť a taktovací frekvenci použitého procesoru, čímž se značně snižuje aplikovatelnost algoritmu do externích monitorů událostí na napětí umístěvaných v rozvaděčích a trafostanicích. Simulacemi získané výsledky se potvrdily u algoritmu „klouzávy RMS 10ms“, který se během reálného měření choval obdobně jako během simulací, čímž v pomyslném žebříčku nejlepších měřících a detekčních algoritmů zaujal nejlepší pozici. Vzhledem ke svému nastavení, které je pouze nepatrně odlišné od standardizované metody RMS (1/2), neboť je nastavena poloviční délka okna a výpočet ef. hodnot napětí neprobíhá v půl-periodových intervalech nýbrž v intervalech definovaných obrácenou hodnotou vzorkovací frekvence, se aplikovatelnost algoritmu do monitorů událostí jeví jako ideální a bezproblémová.

V návaznosti na navrhovaný systém testování odolnosti el. spotřebičů skrze proměření kompletních imunitních křivek a v závislosti na dlouhodobě prováděném monitoringu výskytu poklesů a přerušení napětí v el. sítích byly navrženy kompatibilní úrovně pro poklesy a přerušení napětí ve všech třídách elektromagnetického prostředí. Z obecného hlediska představuje kompatibilní úroveň minimální úroveň odolnosti zařízení a maximální úroveň rušení v konkrétní třídě imag. prostředí, přičemž je přípustná interference maximálně v 5% případů. V podstatě tedy kompatibilní úrovně vyjadřují hranice minimálních odolností el. spotřebičů, které, budou-li dodrženy a daný spotřebič bude provozován v jím příslušné třídě imag. prostředí, po 95% doby bude zajištěn spolehlivý chod připojeného spotřebiče. Navržené kompatibilní úrovně tak propojují systém hodnocení poklesů/přerušení napětí v el. sítích se systémem hodnocení odolnosti el. zařízení a představují závazky jak pro výrobce el. zařízení, tak pro provozovatele el. sítí. Jejich schválení a zavedení, ať už v navrhované či jiné podobě, každopádně přinese výrazné zvýšení spolehlivosti chodu el. zařízení. Vyžádá si však kompletní reformu velkého počtu norem a vyhlášek týkajících se problematiky elektromagnetické kompatibility (EMC), kdy bude potřeba změn v normách všeobecných, základních, normách skupin výrobků i výrobkových normách a to s ohledem na odolnost zařízení, měřící techniku apod.

V případných navazujících pracích by bylo vhodné se dále věnovat testování dalších, dosud netestovaných, detekčních algoritmů, které by mohly být potenciálními nástupci v současné době standardizované metody RMS (1/2). Kromě jiných algoritmů doporučuji věnovat patřičnou pozornost algoritmům založeným na Kalmanově filtru (např. frekvenčně nezávislý KF označovaný jako UKF – Unscented Kalman Filter [55][56][57] a další typy), které se vyznačují velkou přesností detekovaných parametrů a minimálním zpožděním při detekci poklesů napětí. Dále je třeba realizovat navržený automatizovaný systém testování odolností různých el. zařízení, který výrazně zefektivní časově velmi náročný proces testování a omezí vliv lidského faktoru na výsledky testování, čímž zaručí vysokou vypovídací schopnost změřených imunitních křivek. Co se týče navrhovaných kompatibilních úrovní pro poklesy a kr. přerušení napětí, je zapotřebí provést techniko-ekonomické zhodnocení všech důsledků, které by zavedení kompatibilních úrovní (navržených případně jiných) přineslo. Náležitá pozornost by měla být věnována také možnosti označování poklesů napětí tzv. indexy závažnosti (voltage dip severity index), kterými by bylo možné hodnotit detekované poklesy napětí v kontextu s odolnostmi el. zařízení, případně v kontextu se zavedenými kompatibilními úrovněmi. Této problematice se dizertační práce věnuje pouze okrajově.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 50160:2008 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.
- [2] Pravidla provozu distribučních soustav 2010, příloha 3: Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení.
- [3] Vaculíková, P., Vaculík, E., a kolektiv: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů. Praha: Grada Publishing, spol. s r.o., 1998. 487 stran. ISBN: 80-7169-568-8.
- [4] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. VŠB-TU Ostrava, 2008. 363 stran. ISBN: 987-80-7225-291-6
- [5] ČSN 330120: Normalizovaná napětí IEC.
- [6] IEC 61000-2-8:2000 Electromagnetic compatibility (EMC). Section 8: Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement result.
- [7] ČSN EN 61000-4-11 ed. 2005. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-11: Zkušební a měřicí technika – Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí – Zkoušky odolnosti.
- [8] ČSN EN 61000-4-34: 2007 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-34: Zkušební a měřicí technika – Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí – Zdolnosti pro zařízení se vstupním fázovým proudem větším než 16A.
- [9] EN 61000-4-30: 2009 Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
- [10] Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations. CIGRE/CIREU/UIE Joint Working Group C4.110. April 2010. ISBN: 978-2-85873-099-5.
- [11] Djokič, S. Ž., Milanovič, J.V.: Sensitivity of electrical equipment to voltage sags and short interruptions: Recommendations for testing. Electrical Power Quality and Utilisation, Journal. 2005, vol. XI, no. 1.
- [12] Yebra, T., Fuster, V., Quijano, A., García, M.: Most representative parameters of voltage dips. In Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ 07, Sevilla, Spain, 2007. p.1-8. ISBN: 978-84-611-4707-6
- [13] Bollen, Math H. J.: Understanding power quality problems – Voltage sags and interruptions. New York: Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2000. 543 pages. ISBN: 0-7803-4713-7.
- [14] CIGRE/CIREU/UIE JOINT Working Group C4.110: Voltage Dip Immunity of Equipment and Industrial Processes. In Proceedings Round Table Session 2, CIREU, Prague, 2009.
- [15] Stephens, M., McGranaghan, M., Bollen, M: Evaluating voltage dip immunity of industrial equipment. SEMI F47 – Voltage Sag Immunity Testing, EPRI PEAC, Power Quality Solutions.
- [16] Bollen, M.H.J., GU, I.Y.H.: Signal Processing of Power Quality Disturbances. John Wiley & Sons, Inc. United States of America, 2006. p.454-460. ISBN-13: 978-0-471-73168-9; ISBN-10: 0-471-73168-4.
- [17] Vaträ, F., Postolache, P., Poida, A.: Introduction into power quality. Voltage dips and short interruptions. In Power Quality E-learning Training Course – 1st Level. Zdroj: www.lpqi.org
- [18] Hulshorst, W.T.J, Smeets, E.L.M., Wolse, J.A.: Benchmarking on PQ desk survey: What PQ levels do different types of customer need? KEMA document commissioned by the European Copper Institute. 30620162-Consulting 07-0682, June 2007.

- [19] Hanzelka, Z.: Voltage Dips and Short Supply Interruptions. In Handbook of Power Quality, edited by Angelo Baghini, John Wiley & Sons, Ltd. 2008. ISBN: 978-0-470-06561-7.
- [20] Didden, M.: Techno-economic analysis of methods to reduce damage due to voltage dips. 2003. ISBN: 90-5682-463-5.
- [21] Markiewicz, H., Klajn, A.: Improving Reliability with Standby Power Supplies - Section 4.3.1 (June 2003). Power Quality Application Guide, Leonardo ENERGY (www.lpqi.org).
- [22] Vaträ, F., Stein, M.: “Shunt Circuit-Breaker” – Automation System, Solution for Reducing of the Number of Interruptions at the Consumers. In IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Romania, 2006. P 248-251. ISBN: 1-4244-0360-X.
- [23] Thasananutariya, T., Chatratana, S., McGranaghan, M.: Economic evaluation of solution alternatives for voltage sags and momentary interruptions. In EPQU Magazine, Vol. 1, No.2, 2005.
- [24] Stephens, M.: PQ in continuous manufacturing – section 1.5. In Power Quality Application Guide, Leonardo ENERGY (www.lpqi.org).
- [25] EN 61547:2009 Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements.
- [26] Drápela, J.: Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 233 stran.
- [27] IEC 61000-2-4: Electromagnetic compatibility (EMC). Environment. Compatibility levels in industrial plants for low frequency conducted disturbance.
- [28] Djokič, S.Ž., Bollen, M.H.J.: Dip Segmentation Method. In Proceedings of 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Wolongong, Australia 2008. ISBN: 978_1-4244-1770-41-6.
- [29] Bollen, M.H.J., McMichael, I., Stephens, M., Stockman, K., Djokič, S.Ž., Zavoda, F., Brumsickle, B., McEachern, A., Gordon, J.R., Ethier, G., Neumann, R.: CIGRE/CIREN/UIE JWG C4.110 – Voltage Dip Immunity of Equipment in Installations – Status April 2008. In Proceedings of 13th International Conference on Harmonic and Quality of Power, University of Wolongong, Australia 2008. ISBN: 978-1-4244-1770-41-6.
- [30] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W.: Electrical Power Systems Quality – second edition. United States of America, 2003. 528 pages. ISBN: 0-07-138622-X.
- [31] Barona, A., Ferrandis, F., Olarte, J., Iribarren, J.L.: New Power Quality Solutions Especially Designed for Industrial Applications. In Proceedings of 9th International Conference of Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, 2007. ISBN: 978-84-690-9441-9.
- [32] McEachern, A.: Power Corruption Immunity Testing Using the IEEE 1100-1992 (CBEMA) Standard.
- [33] Drápela, J., Šlezinger, J.: A Light-flickermeter – Part II: Realization and Verification. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering EPE 2010, Brno University of Technology, Brno. pp. 459-464. ISBN: 978-80-214-4094-4.
- [34] ČSN EN 61000-4-13:2003 Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Zkušební a měřicí technika – Harmonické a meziharmonické včetně signálů v rozvodných sítích na střídavém vstupu/výstupu napájení – Nízkofrekvenční zkoušky odolnosti.

- [35] ČSN EN 61000-4-7: 2002 Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Zkušební a měřicí technika – Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich.
- [36] Barros, J., Pérez, E.: Limitations in the Use of R.M.S. Value in Power Quality Analysis. In Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 2006, Sorrento, Italy. ISBN: 0-7803-9359-7.
- [37] Ziarani, A.K., Konrad, A.: A method of Extracting of Nonstationary Sinusoids. In Signal processing 84 (2004), p.1323-1346.
- [38] Naidoo, R.M., Pillay, P.: A new algorithm for Voltage Sag Analysis and Mitigation.
- [39] Welch, G., Bishop, G.: An Introduction to the Kalman Filter. 2006. Electronic text from:
<http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=3&sqi=2&ved=0CDIQFjAC&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.79.6578%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&rct=j&q=an%20introduction%20to%20the%20kalman%20filter&ei=q8gaTp32DozTsgaJpJ2hDw&usg=AFQjCNGAd51Re2xzuzSTB-ae9NNQa-O0uA&cad=rja>
- [40] Pérez, E., Barros, J.: A Proposal for On-line Detection and Classification of Voltage Events in Power Systems. In IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, No. 4, October 2008. p.2132-2138. ISSN: 0885-8977.
- [41] Barros, J., Pérez, E.: Automatic Detection and Analysis of Voltage Events in Power Systems. In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, No. 5, October 2006. Pages 1487-1493. ISSN: 0018-9456.
- [42] Amarís, H., Álvarez, C., Alonso, M., Florez, D., Lobos, T., Janik, P., Rezmer, J., Wacławek, Z.: Application of advanced signal processing methods for accurate detection of voltage dips. In proceedings of 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power. University of Wollongong: IEEE PES Australia, 2008. Pages 1-6. ISBN: 978-1-4244-1771-1.
- [43] Yu-Hua GU, I., Styvaktakis, E.: Bridge the gap: signal processing for power quality applications. In Electric Power Systems Research 2003, Vol. 66. Pages 83-96. Doi: 10.1016/S0378-7796(03)00074-9
- [44] Dash, P.K., Chilukuri, M.V.: Hybrid S-Transform and Kalman Filtering Approach for Detection and Measurement of Short Duration Disturbances in Power Networks. In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 2, April 2004. ISSN: 0018-9456, doi: 10.1109/TIM.2003.820486.
- [45] Parsons, A.C., Grady, W.M., Powers, E.J.: A wavelet-based procedure for automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags. In IEEE PES Winter Meeting, Vol. 2, January – February 1999. p. 1310-1315.
- [46] Saleh, S.A., Rahman, M.A.: Innovative Power System Transient Disturbances Detection and Classification Using Wavelet Analysis. In Proceedings of 3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE 2004 in Dhaka, Bangladesh, 2004. p. 442-445. ISBN: 984-32-1804-4.
- [47] Minnaar, U.J., Gaunt, C.T., Nicolls, F.: Signal Processing Tools for Voltage Dip Analysis. In Proceedings of Conference SAUPEC 2010 in Johannesburg, South Africa, 2010.
- [48] Chen, S., Zhu, H.Y.: Wavelet Transform for Processing Power Quality Disturbances. In EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Volume 2007, 20 pages. doi:10.1155/2007/47695
- [49] Pérez, E., Barros, J.: Voltage Event Detection and Characterization Methods: A comparative Study. In Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, 2006, Venezuela. 6 pages. ISBN: 1-4244-0287-5.

-
- [50] ČSN EN 61000-2-2 ed.2:2003 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 2-2: Pro-
středí-Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve ve-
řejných rozvodných sítích nízkého napětí.
- [51] ČSN EN 61000-2-4 ed.2:2003 Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 2: Pro-
středí. Oddíl 4: Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v prů-
myslových závodech.
- [52] ČSN IEC 61000-2-1:1993 Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 2: Prostředí.
Díl 1: Popis prostředí – elektromagnetické prostředí pro nízkofrekvenční rušení šířené
vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích.
- [53] Vyhláška č. 540/2005 Sb. o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elek-
troenergetice.
- [54] Voltage Sag Indices – Draft 2. Working document for IEEE P1564, November 2001.
- [55] Zhang, J., Swain, A., Nair, N.K., Liu, J.J.: Estimation of Power Quality using an Un-
scented Kalman Filter. In Proceedings of TENCON 2007 IEEE Region 10 Conference,
Taipei, Tchaj-wan, 2007. p.1-4. ISBN: 978-1-4244-1272-3.
- [56] Hasan, S., Dash, P.K., Panigrahi, B.K., Biswal, B.: Adaptive Unscented Filtering Tech-
nique and Particle Swarm Optimization for Estimation of Non-stationary Signal Para-
meters. In Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Appli-
cations ICIEA 2009, Xi'an, Čína, 2009. p. 3853-3858. ISBN: 978-1-4244-2799-4.
- [57] Novanda, H., Regulski, P., González-Longatt, F.M., Terzija, V.: Unscented Kalman
Filter for Frequency and Amplitude Estimation. In Proceedings of the IEEE PES
Trondheim PowerTech 2011, Trondheim, Norway, 2011. p. 1-7. ISBN: 978-82-519-
2808-3
- [58] <http://www.pragoplyn.cz/cs/elektricka-energie/klasifikace-zakazniku/>

VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- [A] BOK, J. Classification of Immunity of consumers to short voltage drops and interruptions. In Proceedings of the 14th Conference Student EEICT 2008 Volume 3. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., Ondráčkova 105, Brno, 2008. p. 153-157. ISBN: 978-80-214-3616-9
- [B] BOK, J.; DRÁPELA, J. The immunity of single-phase electric equipments to short voltage events in public supply networks. In Proceedings of the 9th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2008. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2008. p. 135-138. ISBN: 978-80-214-3650-3.
- [C] DRÁPELA, J.; BOK, J. An improved Valley-Fill passive Power-Factor-Correction circuit for electronic ballast. In Proceedings of the 9th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2008. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, FEEC, Department of Electrical Power Engineering, 2008. s. 149-155. ISBN: 978-80-214-3650-3.
- [D] BOK, J.; DRÁPELA, J.; TOMAN, P. Personal Computer Immunity to Short Voltage Dips and Interruptions. In Proceedings of 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 1. IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE PES, 2008. p. 680-685. ISBN: 978-1-4244-1771-1.
- [E] DRÁPELA, J.; BOK, J.; ŠLEZINGR, J.; PITHART, J. Light Sources Immunity to Short Voltage Dips and Interruptions. In Proceedings of the 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague: IET, 2009. p. 1-4. ISBN: 978-1-84919-126-5.
- [F] BOK, J. Appliances Immunity to Real-World Voltage Dips and Interruptions in Public Supply Networks. In Proceedings of the 15th Conference Student EEICT 2009 Volume 1. Brno: FEKT VUT Brno, 2009. p. 1-5. ISBN: 978-80-214-3869-9.
- [G] BOK, J.; DRÁPELA, J.; TOPOLÁNEK, D. Analysis of Suitable Using of Light Sources at Concrete Supply Network with Regard to Recorded Voltage Events. In Proceedings of Tomsk Technical and Scientific Conference. Tomsk Polytechnic University: TPU Press, Tomsk, 2009. p. 1-2. ISBN: 978-5-98298-517-0.
- [H] TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; BOK, J. The Ground Fault Indicators for Fault Location According to the Analysis of Electromagnetic Fields of MV Lines. In Proceedings of Tomsk Technical and Scientific Conference. Tomsk Polytechnic University: TPU Press, Tomsk, 2009. s. 18-20. ISBN: 978-5-98298-517-0.
- [I] BOK, J.; DRÁPELA, J. Design of Automatic Testing System of Appliances Immunity to Voltage Dips and Short Interruptions. In Proceedings of the 10th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2009. Ostrava: VSB- TU Ostrava, 2009. p. 1-5. ISBN: 978-80-248-1947-1.
- [J] BOK, J. Short voltage events at the low voltage supply networks. In Sborník příspěvků konference KRÁLÍKY 2009. MJ servis, spol. s r.o., Brno: VUT v Brně, FEKT, 2009. p. 37-40. ISBN: 978-80-214-3938-2.
- [K] BOK, J.; DRÁPELA, J.; PITHART, J. Koncepce kompatibilní úrovně pro poklesy a krátkodobé výpadky napětí. In Sborník konference ČK CIRED 2009. 1. Tábor: CIRED, 2009. s. 1-20. ISBN: 978-80-254-5635-4.
- [L] BOK, J. Electric Appliances Immunity Labeling. In Proceedings of the 16th conference STUDENT EEICT 2010, Volume 4. 1. NOVAPRESS s.r.o., nám. Republiky 15, 614 00 Brno: NOVAPRESS s.r.o., 2010. p. 97-101. ISBN: 978-80-214-4079-1.
- [M] BOK, J.; DRÁPELA, J. Comparison of Voltage Events Detection Methods. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. 1.

- Brno: Brno University of Technology, FEEC, Department of Electrical Power Engineering, 2010. p. 473-478. ISBN: 978-80-214-4094-4.
- [N] BOK, J.; DRÁPELA, J. Testing of Appliances Immunity to Voltage Dips and Short Interruptions under Laboratory Conditions and Practical Usage of Results. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. 1. Brno: Brno University of Technology, FEEC, Department of Electrical Power Engineering, 2010. p. 539-543. ISBN: 978-80-214-4094-4.
- [O] BOK, J.; DRÁPELA, J. A Concept of Compatibility Level for Voltage Dips and Short Interruptions in LV Power Supply Systems. In Proceedings of the Congreso Internacional de Distribución Eléctrica. CIDEL 2010. 1. Buenos Aires, Argentina: CIDEL Argentina, 2010. p. 1-6. ISBN: 978-987-97399-3-8.
- [P] BOK, J.; DRÁPELA, J. Porovnání metod detekce parametrů napěťových událostí. In Referáty konference ČK CIRED 2010. Tábor: CIRED, 2010. s. 1-23. ISBN: 978-80-254-8519-4.
- [Q] BOK, J. LabVIEW Application for Monitoring of Voltage Events in Supply System. In Proceedings of the 17th conference Student EEICT 2011, Volume 3. 3. VUT v Brně, FEKT a FIT: NOVAPRESS s.r.o., nám. Republiky 15, 614 00 Brno, 2011. p. 1-5. ISBN: 978-80-214-4273-3.
- [R] BOK, J.; DRÁPELA, J. The influence of light sources technology on their immunity to voltage dips and short interruptions. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. 1. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2011. p. 1-5. ISBN: 978-80-248-2393-5.
- [S] BOK, J.; DRÁPELA, J.; ŠLEZINGR, J. Function criteria definition for testing of light sources immunity to voltage dips and short interruptions. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. 1. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2011. p. 1-5. ISBN: 978-80-248-2393-5.
- [T] BOK, J.; DRÁPELA, J. A Voltage Event Recorder for More Accurate Analysis of Voltage Events in Power Supply Systems. In Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011. 1. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE PES, 2011. p. 1-7. ISBN: 978-82-519-2808-3.

ŽIVOTOPIS – CURRICULLUM VITAE

Ing. Jaromír Bok

Tichá 424

742 74 Tichá

E-mail: xbokja00@stud.feec.vutbr.cz, Jaromir.Bok@ticha.cz



Datum a místo narození: 10.8.1983, Čeladná (okres FM)

Vzdělání

- 1998-2002 Střední průmyslová škola elektrotechnická, Frenštát pod Radhoštěm, zakončeno maturitní zkouškou z předmětů matematika, český jazyk, měření v elektrotechnice, energetika
- 2002-2005 FEKT, VUT v Brně, bakalářské studium, studijní obor Silnoproudá elektrotechnika (B-SEE)
- 2005-2007 FEKT, VUT v Brně, magisterské studium, studijní obor Elektroenergetika (M-EEN)
- 2007-2011 FEKT, VUT v Brně, doktorské studium, studijní obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Praxe

- 2008-2011 technický pracovník na Ústavu elektroenergetiky, FEKT, VUT v Brně

Výuka

Laboratorní cvičení kurzů Kvalita elektrické energie (MPQ1) a Užití el. energie (BUEE)

Aktivní účast na zahraničních konferencích + získaná ocenění

- 2007 získání Ceny děkana FEKT VUT za diplomovou práci „Návrh teplárenského zdroje na biomasu v Precheza, a.s.“
- 2008 získání mimořádné ceny v soutěži diplomových a doktorandských prací CENA ČEZ 2007 za diplomovou práci „Návrh teplárenského zdroje na biomasu v Precheza, a.s.“
- 2011 Konference IEEE PES Trondheim PowerTech 2011, Norsko

Jazykové znalosti

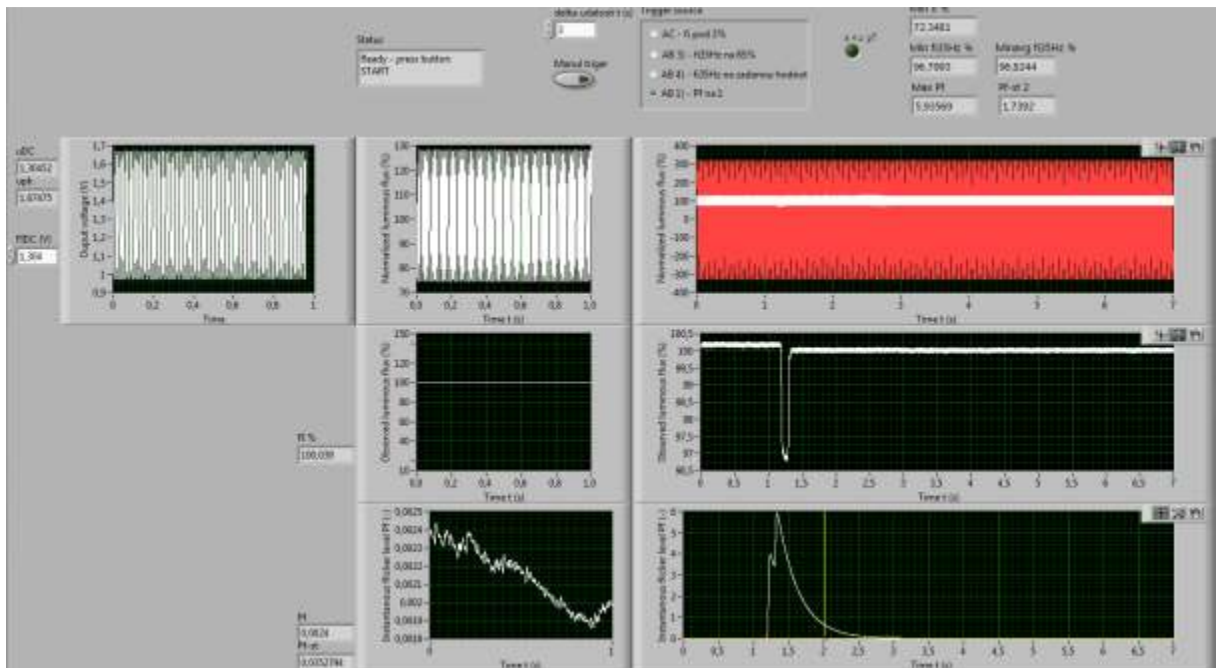
Angličtina – středně pokročilá úroveň

Práce s počítačem

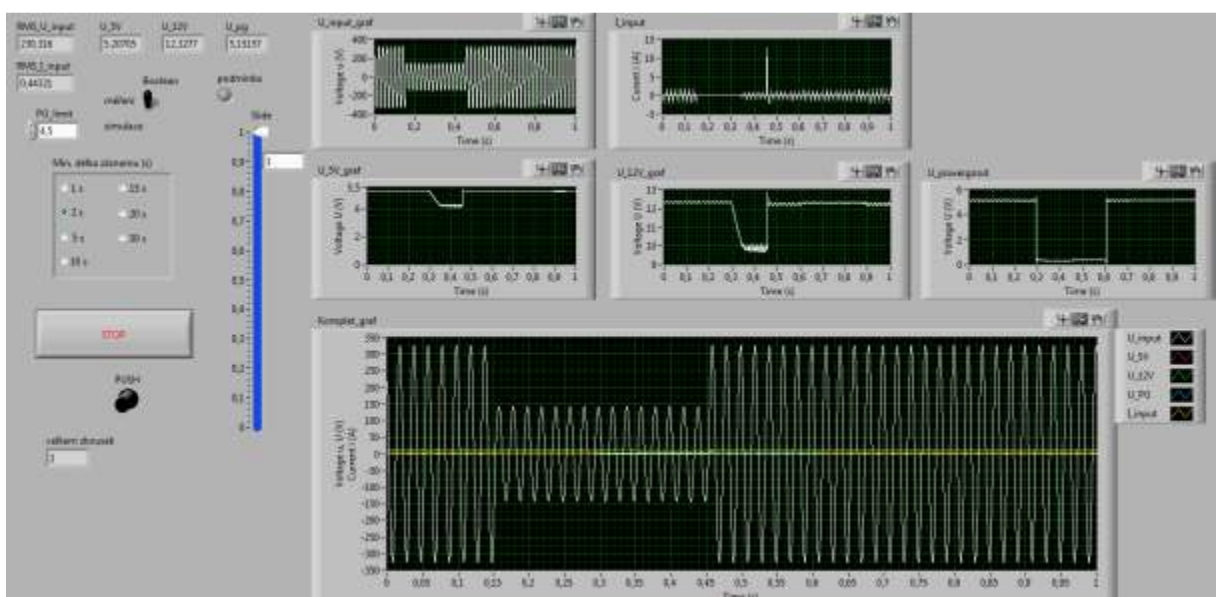
Microsoft Office, PSpice Student, Autocad, MATLAB, LabVIEW

8 PŘÍLOHY

8.1 Vyhodnocovací aplikace pro testování odolnosti světelných resp. počítačových zdrojů



Obr. 63 Aplikace v LabVIEW pro záznam a vyhodnocování testování odolnosti světelných zdrojů



Obr. 64 Aplikace v LabVIEW pro záznam a vyhodnocování testování odolnosti pc zdrojů

8.2 Zaznamenané průběhy důležitých veličin během testování odolnosti

Níže jsou zobrazeny průběhy měřených veličin při testování odolnosti světelných a počítačových zdrojů, přičemž každý obrázek odpovídá jednomu konkrétnímu testu. Označení obrázku je provedeno pomocí speciálního kódu **X_Y_Z_t_r**, jehož význam je následující:

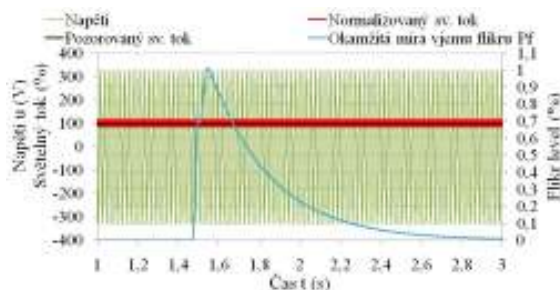
- X...označení testovaného zařízení. Světelné zdroje v rozmezí L1 až L16; počítačové zdroje v rozmezí PC1 až PC8.
- Y...označení zvoleného testovaného funkčního kritéria. Pro světelné zdroje jsou na výběr kritéria AB1, AB2, AB3, AB4, BC; u počítačových zdrojů se jedná pouze o kritérium restartu pc zdroje, což v souladu s označením kritérii světelných zdrojů může být označeno jako kritérium AC.
- Z... označení konkrétního typu testu s ohledem na parametry spouštěného poklesu napětí. Odpovídají-li zaznamenané průběhy testování odolnosti zařízení na tzv. jmenovité parametry poklesu napětí (jmenovitá ef. hodnota napětí před vznikem a po skončení poklesu/přerušení napětí, harmonickými nedeformovaná sinusová křivka napětí před vznikem, během trvání i po skončení poklesu/přerušení napětí, nulová hodnota fázového úhlu vzniku poklesu/přerušení napětí, obdélníkový průběh poklesu/přerušení napětí), pak za symbol *Z* je dosazeno „*nom*“ (nominal). Je-li během testování hledán vliv dalšího parametru poklesu napětí, pak je za symbol *Z* dosazena některá z níže vypsanych možností.
 - úhel90*... fázový úhel vzniku poklesu/přerušení napětí nastaven na hodnotu 90°
 - flattop*... harmonické zkreslení křivky napětí s $THD_U = 8\%$, useknutý vrchol
 - overswing*... harmonické zkreslení křivky napětí $THD_U = 8\%$, vyvýšený vrchol
 - predip207*...efektivní hodnota napětí před vznikem a po skončení poklesu/přerušení napětí rovna hodnotě 207V
 - pila*... pilový průběh poklesu/přerušení napětí
 - 100W*... nastaveno zatížení na hodnotu $P = 100W$
- t... délka trvání poklesu/přerušení napětí.
- r... zbytkové napětí poklesu/přerušení napětí. V souladu s měřením poklesů napětí [6] se jedná o minimální ef. hodnotu napětí během poklesu/přerušení napětí.

V souladu se zavedeným kódováním lze např. označení prvního z uvedených průběhů (Obr. 65) **L1_AB1_nom_2ms_172V** pochopit tak, že testovaným zařízením je klasická wolframová žárovka, zvoleným funkčním kritériem je kritérium AB1 (pokles napětí způsobil změnu sv. toku odpovídající okamžité hodnotě míry vjemu flikru $P_f = 1$), průběhy odpovídají jmenovitým parametrům poklesů napětí, kdy není testován vliv žádného z dalších parametrů, délka trvání poklesu je 2ms a zbytkové napětí poklesu 172V.

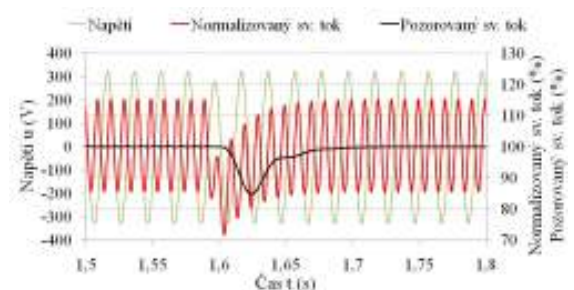
Během testování odolnosti počítačových zdrojů došlo k vylepšení metodiky, které vedlo k výraznému urychlení samotného testovacího procesu. Vlastní vylepšení spočívalo v tom, že na základě monitorování velikosti napětí v „power good“ vodiči nebylo nutné po jednotlivých krocích hledat parametry poklesů napětí, které způsobí právě limitní změnu funkce počítače (pokles napětí v „power good“ vodiči na hodnotu 0V a restart systému), ale bylo možné na-

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

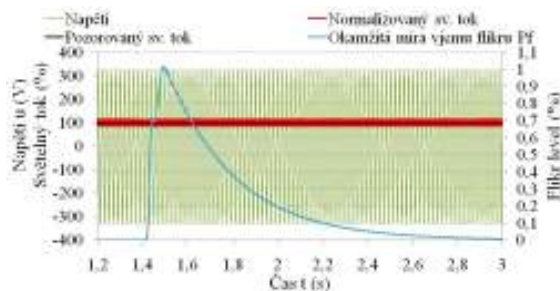
stavit délku trvání konkrétního obdélníkového poklesu na dostatečně dlouhou dobu, která způsobí restartování operačního systému, a pouze ze zaznamenaných průběhů sledovaných veličin pak odečíst limitní délku trvání, která odpovídá vzdálenosti mezi okamžikem vzniku poklesu a okamžikem poklesu napětí ve vodiči „power good“. Vylepšení lze uplatnit pouze během nastavování poklesů napětí obdélníkových průběhů, odolnost pc zdrojů na pilové poklesy napětí je nutné testovat klasickým, v kapitole 4.3.2 popsáním postupem. Jedinou „nevýhodou“ vylepšeného způsobu testování je, že zaznamenané průběhy monitorovaných veličin během testování neodpovídají parametrům poklesů způsobujících právě limitní změnu funkce testovaného pc zdroje (dáno funkčním kritériem), neboť průběhy odpovídají nastaveným parametrům poklesů napětí, a z grafických průběhů lze pouze dodatečně odečíst limitní parametry poklesů napětí. Označení (popisek) takovýchto průběhů je provedeno podobně jako u ostatních průběhů (**X_Y_Z_t_r**), pouze parametr „t“ obsahuje dvě hodnoty – první udává skutečnou délku trvání nastaveného poklesu, hodnota druhá, která je uvedena v závorce, vyjadřuje dobu, po které došlo k poklesu napětí ve vodiči „power good“ a následnému restartu operačního systému.



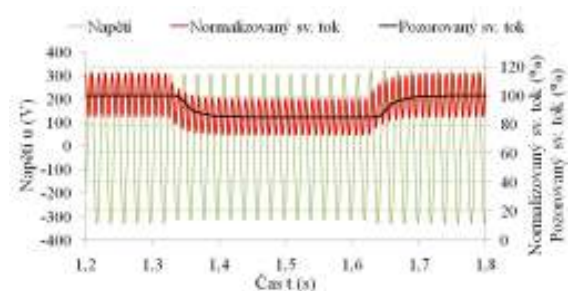
Obr. 65 L1_AB1_nom_2ms_172V



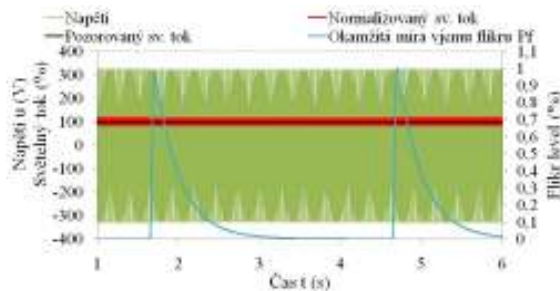
Obr. 68 L1_AB3_nom_10ms_200V



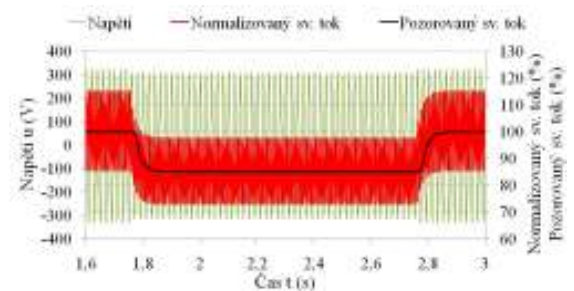
Obr. 66 L1_AB1_nom_10ms_227,1V



Obr. 69 L1_AB3_nom_300ms_220,2V

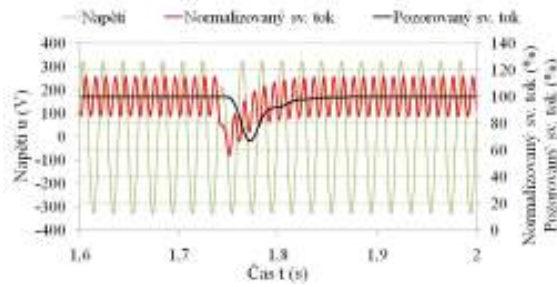


Obr. 67 L1_AB1_nom_3s_228,8V

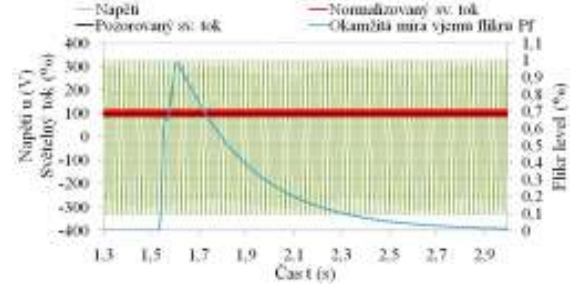


Obr. 70 L1_AB3_nom_1s_220,2V

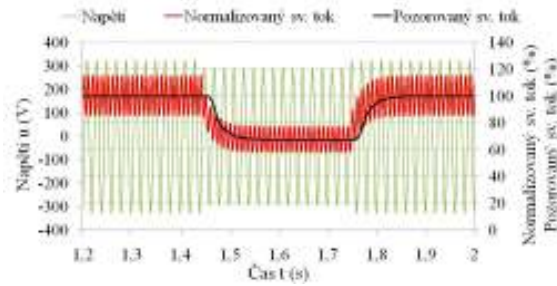
Odolnosť spotrebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



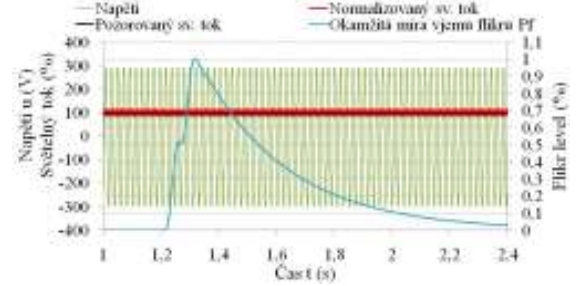
Obr. 71 L1_AB4_nom_10ms_153,4V



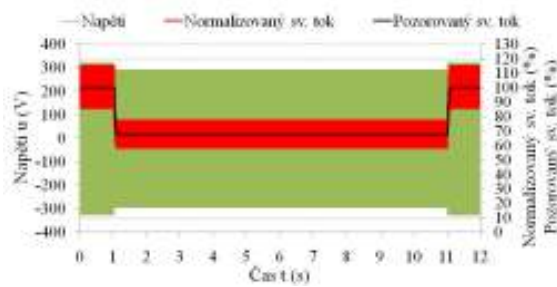
Obr. 75 L2_AB1_úhel90_10ms_227,2V



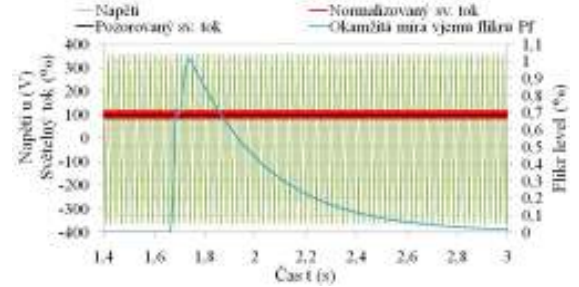
Obr. 72 L1_AB4_nom_300ms_207,1V



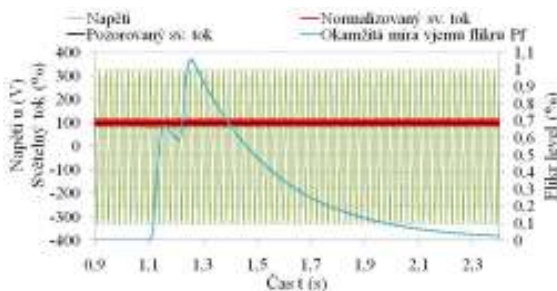
Obr. 76 L2_AB1_flattop_50ms_229,1V



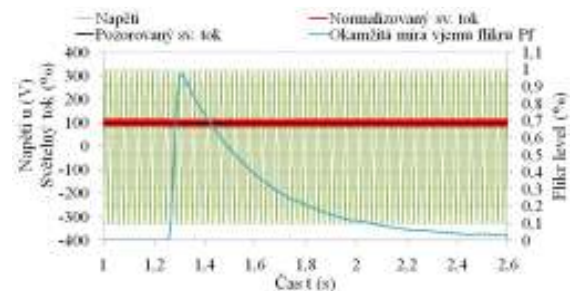
Obr. 73 L1_AB4_nom_10s_207,1V



Obr. 77 L2_AB1_overswing_5ms_224,8V

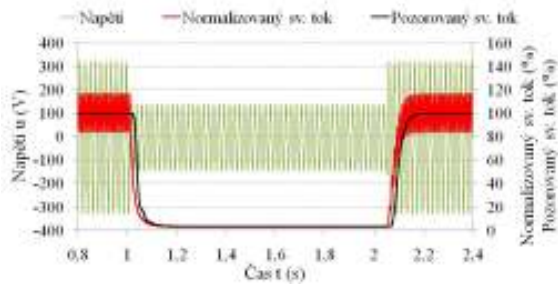


Obr. 74 L2_AB1_nom_100ms_229V

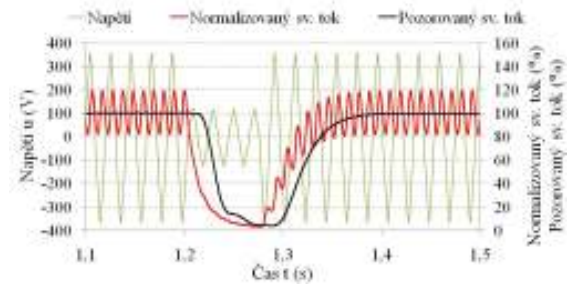


Obr. 78 L2_AB1_pila_3s_228,7V

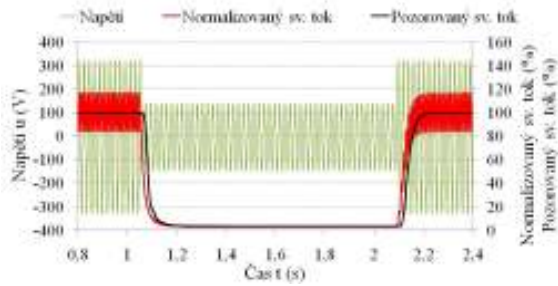
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



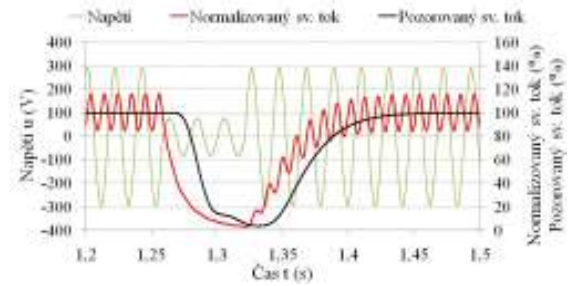
Obr. 79 L2_BC_nom_1s_100V



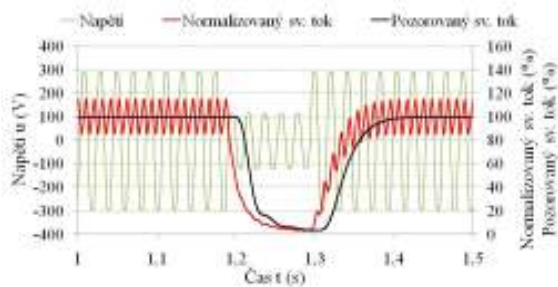
Obr. 83 L2_BC_overswing_70ms_77,3V



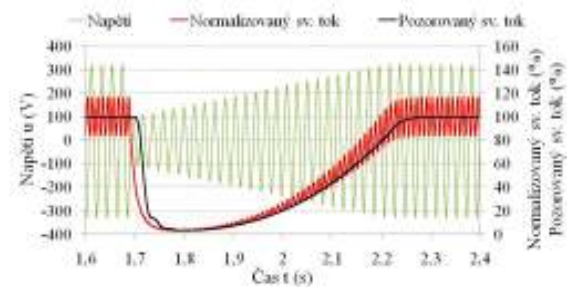
Obr. 80 L2_BC_úhel90_1s_100,7V



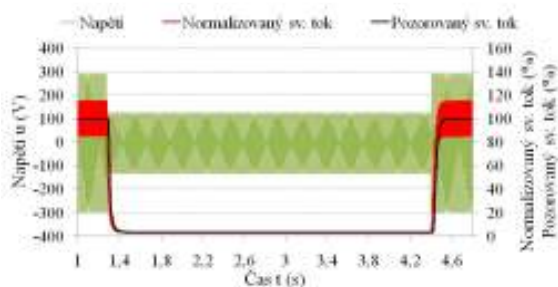
Obr. 84 L2_BC_predip207_60ms_56V



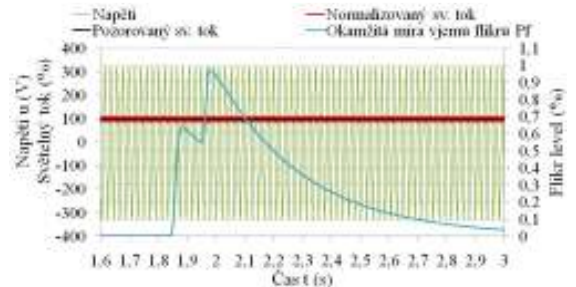
Obr. 81 L2_BC_flattop_100ms_91,1V



Obr. 85 L2_BC_pila_500ms_69,6V

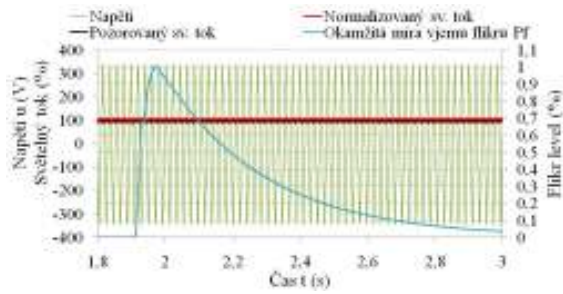


Obr. 82 L2_BC_flattop_3s_100,4V

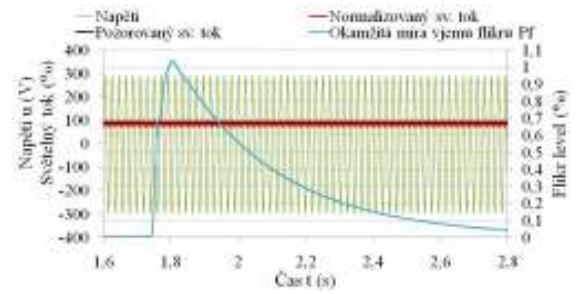


Obr. 86 L4_AB1_úhel90_100ms_227,6V

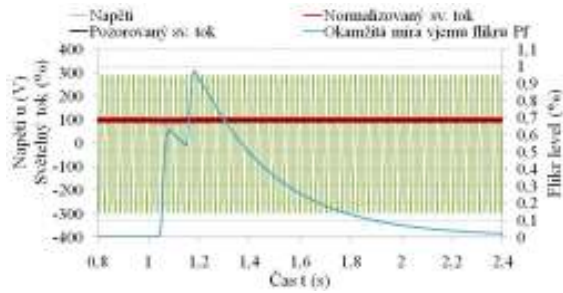
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



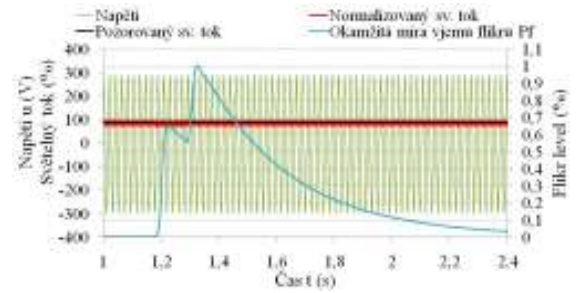
Obr. 87 L4_AB1_Flattop_4ms_191V



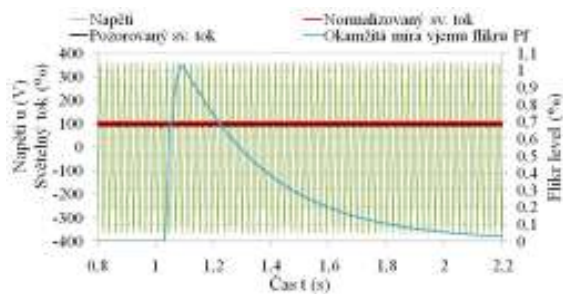
Obr. 91 L4_AB1_predip207_5ms_191,8V



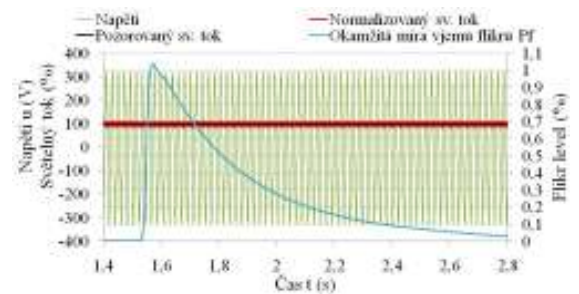
Obr. 88 L4_AB1_Flattop_100ms_227,6V



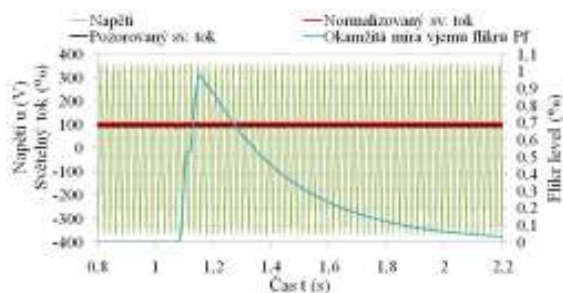
Obr. 92 L4_AB1_predip207_100ms_205V



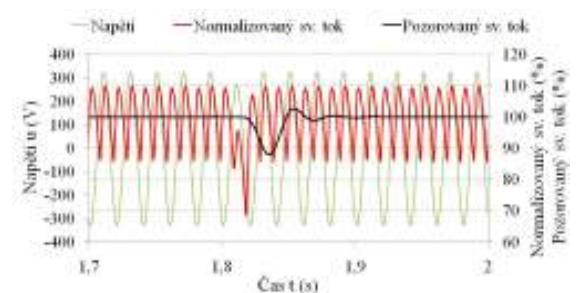
Obr. 89 L4_AB1_Overswing_4ms_167V



Obr. 93 L4_AB1_pila_1s_226,8V

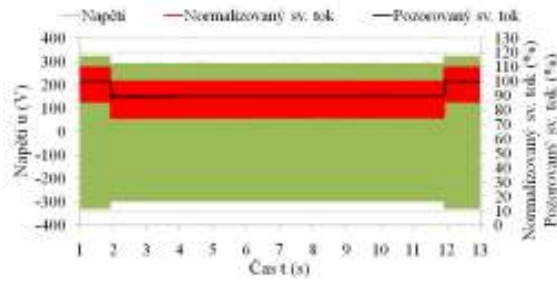


Obr. 90 L4_AB1_Overswin_30ms_227,6V

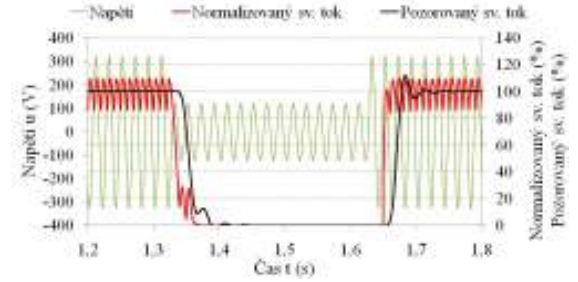


Obr. 94 L4_AB4_nom_10ms_193,2V

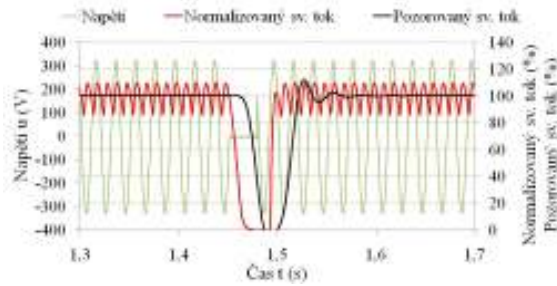
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



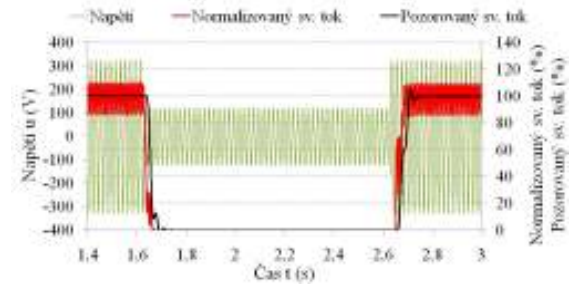
Obr. 95 L4_AB4_nom_10s_208,8V



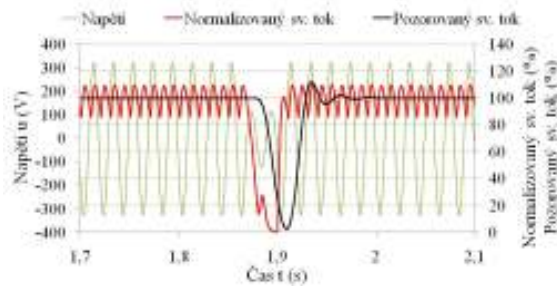
Obr. 99 L4_BC_nom_300ms_86V



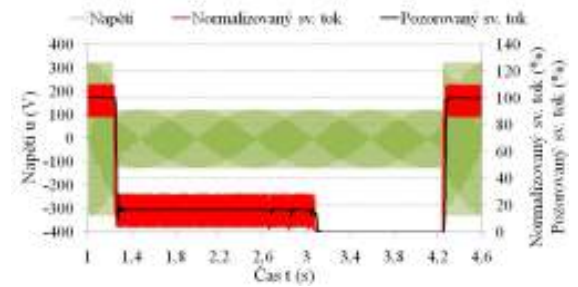
Obr. 96 L4_BC_nom_28ms_0V



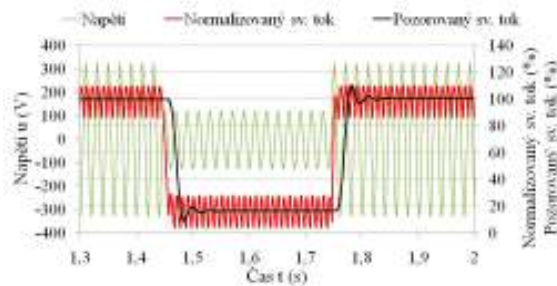
Obr. 100 L4_BC_nom_1s_86V



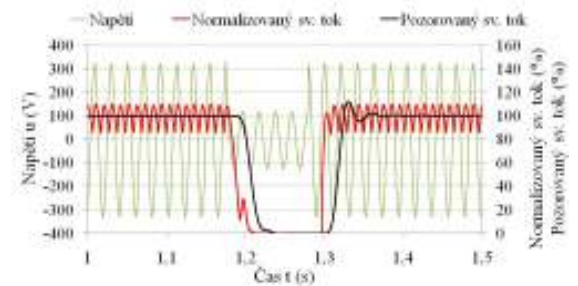
Obr. 97 L4_BC_nom_30ms_84V



Obr. 101 L4_BC_nom_3s_87V

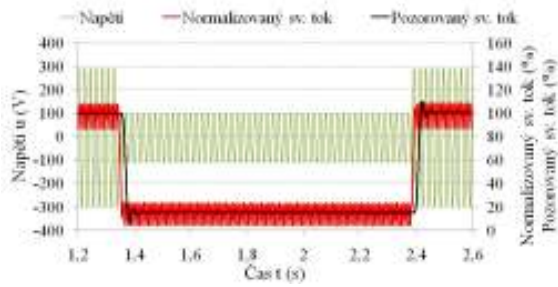


Obr. 98 L4_BC_nom_300ms_87V (+)

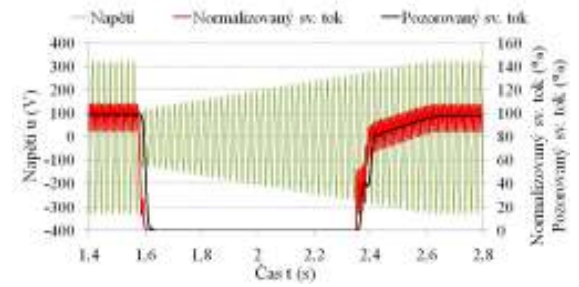


Obr. 102 L4_BC_úhel90_100ms_86V

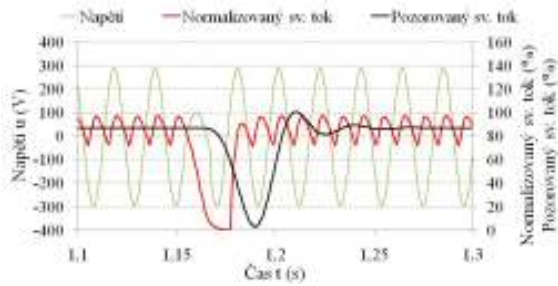
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



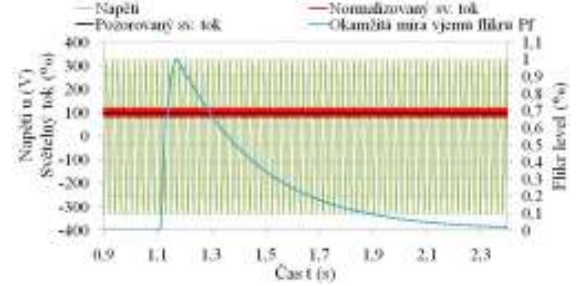
Obr. 103 L4_BC_Flattop_Is_82V (+)



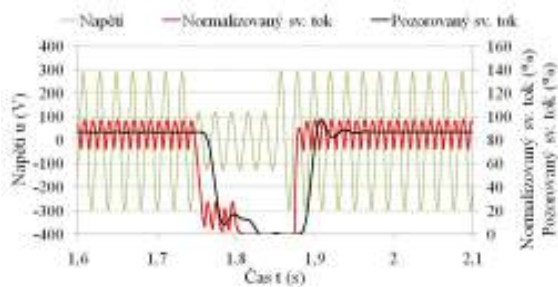
Obr. 107 L4_BC_pila_Is_82V



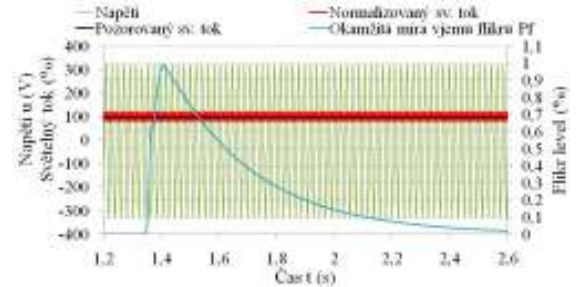
Obr. 104 L4_BC_predip207_12ms_76V



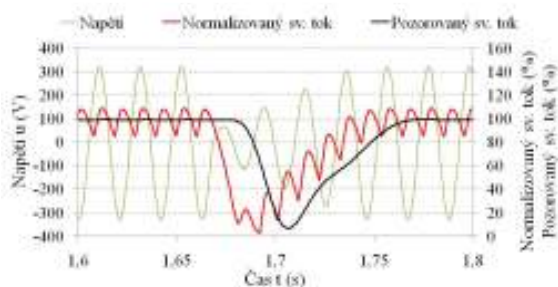
Obr. 108 L5_ABI_nom_3ms_174V



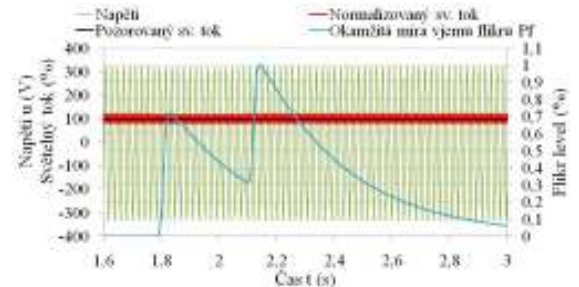
Obr. 105 L4_BC_predip207_100ms_86,5V



Obr. 109 L5_ABI_nom_10ms_221,5V

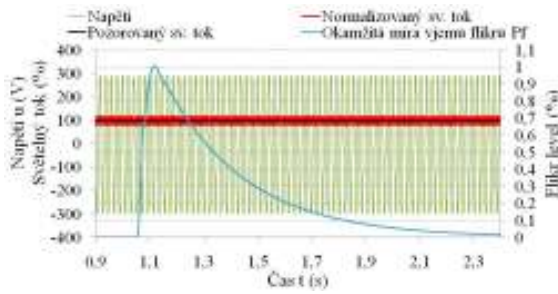


Obr. 106 L4_BC_pila_70ms_36V

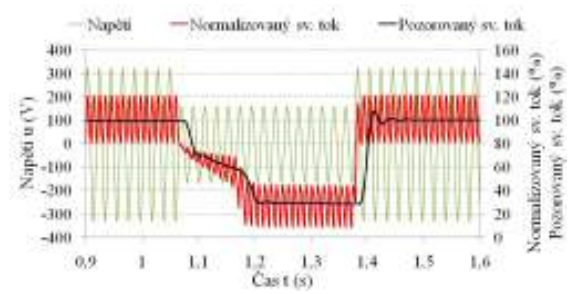


Obr. 110 L5_ABI_nom_300ms_226V

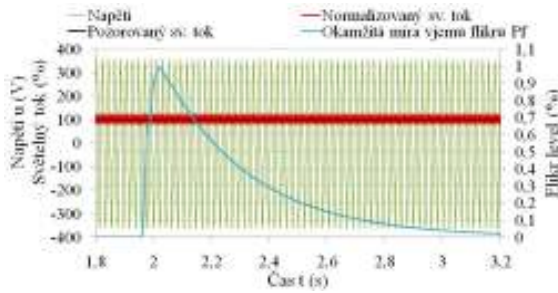
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



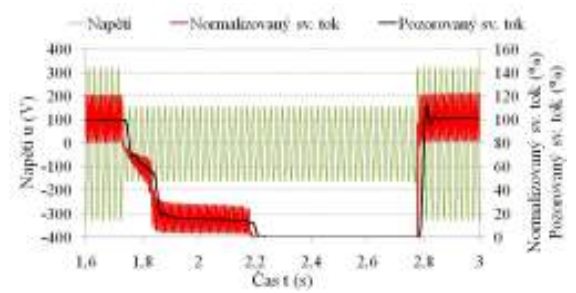
Obr. 111 L5_AB1_flattop_10ms_221,2V



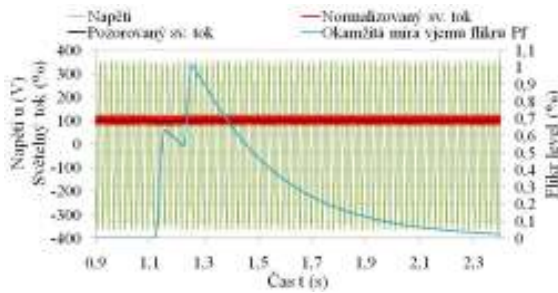
Obr. 115 L5_BC_nom_300ms_115V



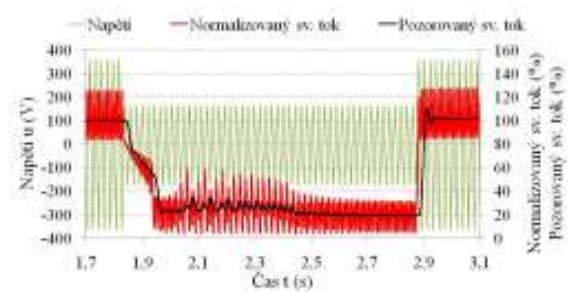
Obr. 112 L5_AB1_predip253_4ms_221V



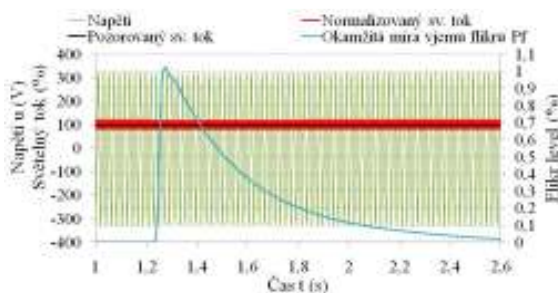
Obr. 116 L5_BC_nom_1s_112V



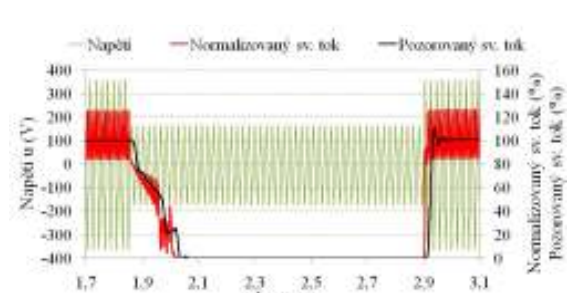
Obr. 113 L5_AB1_predip253_100ms_248,8V



Obr. 117 L5_BC_overswing_1s_108V(+)

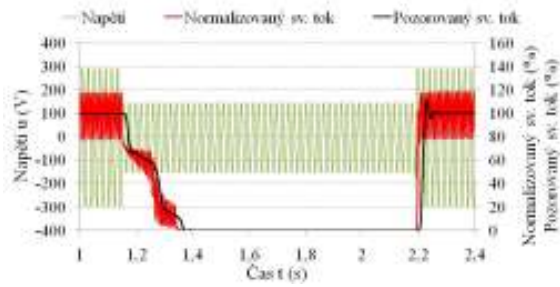


Obr. 114 L5_AB1_pila_1s_225,1V

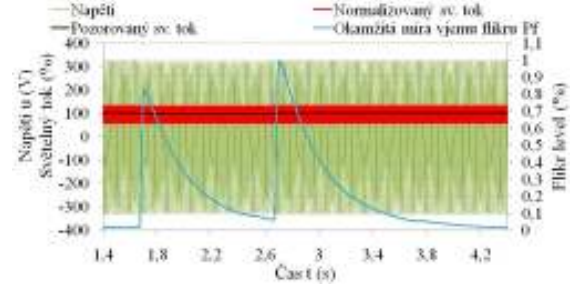


Obr. 118 L5_BC_overswing_1s_107,5V

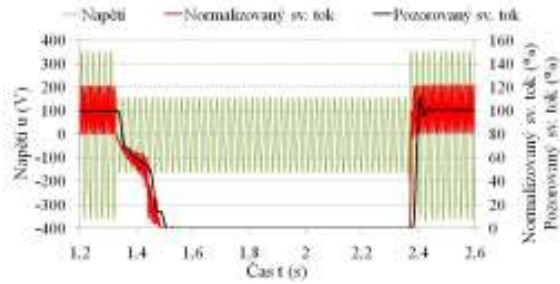
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



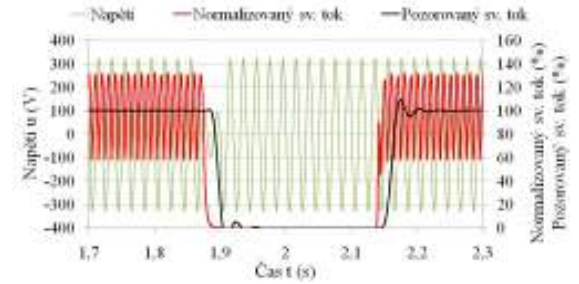
Obr. 119 L5_BC_predip253_1s_115V



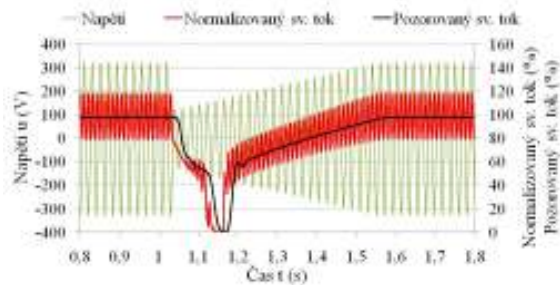
Obr. 123 L6_AB1_nom_1s_226,6V



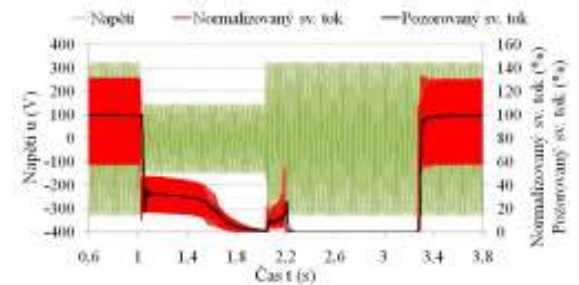
Obr. 120 L5_BC_predip253_1s_112,5V



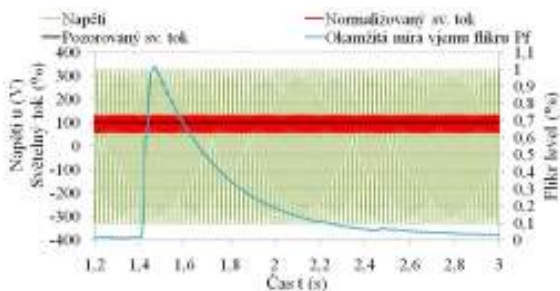
Obr. 124 L6_BC_nom_30ms_67V



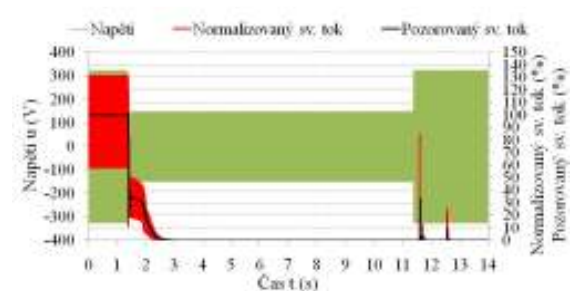
Obr. 121 L5_BC_pila_500ms_84V



Obr. 125 L6_BC_nom_1s_103V

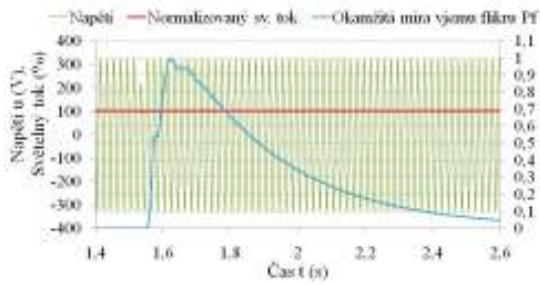


Obr. 122 L6_AB1_nom_6ms_222,8V

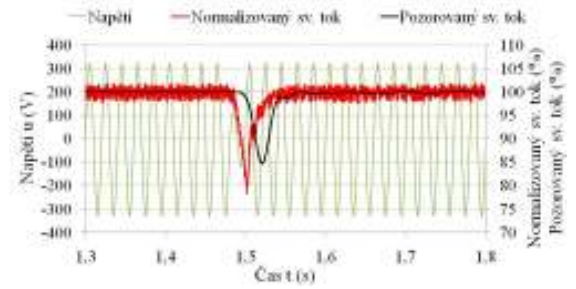


Obr. 126 L6_BC_nom_10s_105V

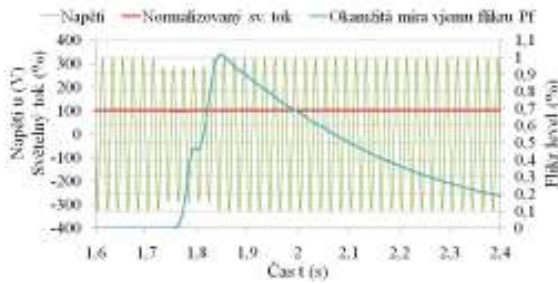
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



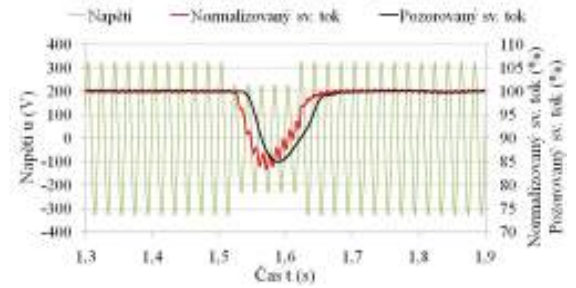
Obr. 127 L10_AB1_nom_10ms_159V



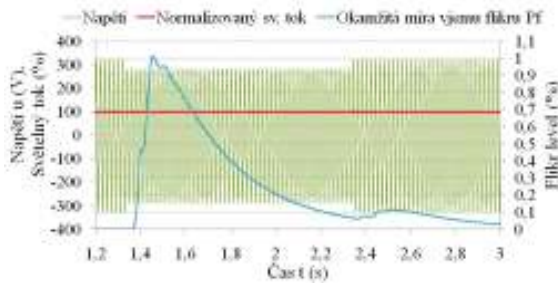
Obr. 131 L10_AB3_nom_20ms_84,2V



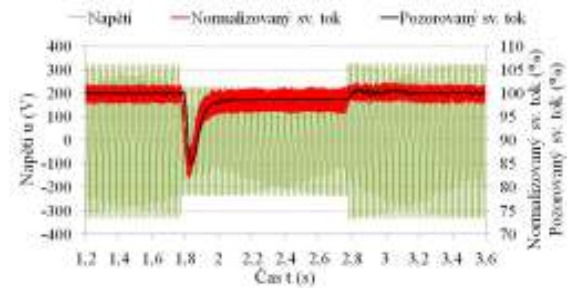
Obr. 128 L10_AB1_nom_100ms_202,4V



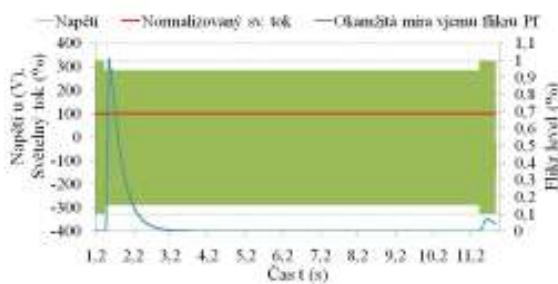
Obr. 132 L10_AB3_nom_100ms_162,3V



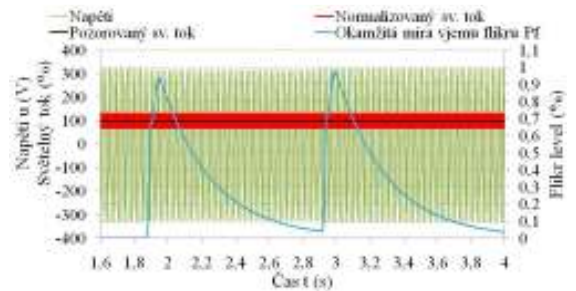
Obr. 129 L10_AB1_nom_1s_202,3V



Obr. 133 L10_AB3_nom_1s_162,3V

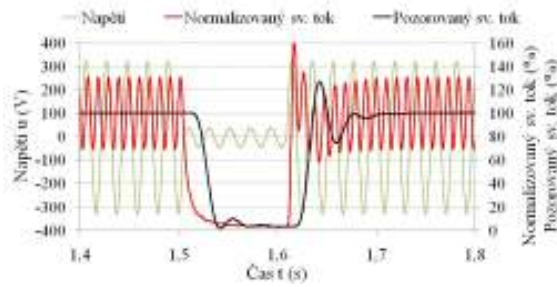


Obr. 130 L10_AB1_nom_10s_202,3V

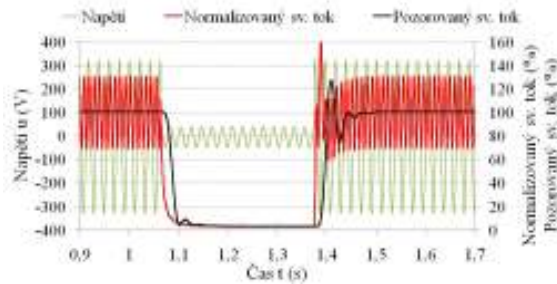


Obr. 134 L11_AB1_nom_1s_225,5V

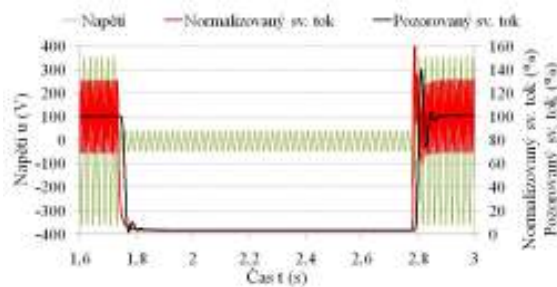
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



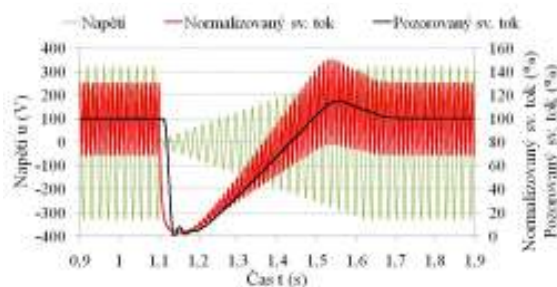
Obr. 135 L11_BC_nom_100ms_29V



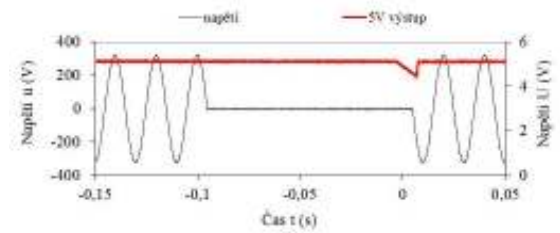
Obr. 136 L11_BC_úhel90_300ms_30,2V



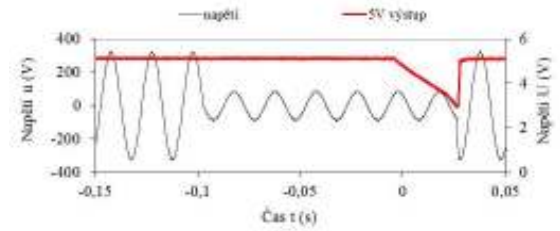
Obr. 137 L11_BC_predip253_1s_30,3V



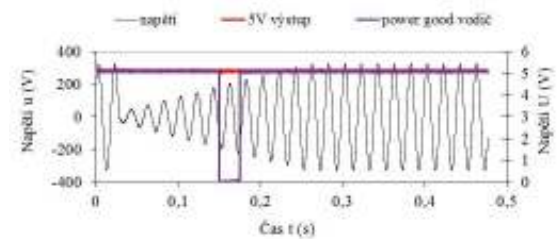
Obr. 138 L11_BC_pila_500ms_8,3V



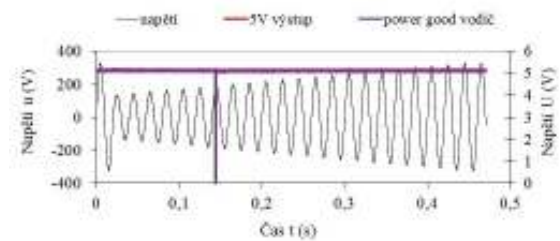
Obr. 139 PCI_AC_nom_91ms_0V



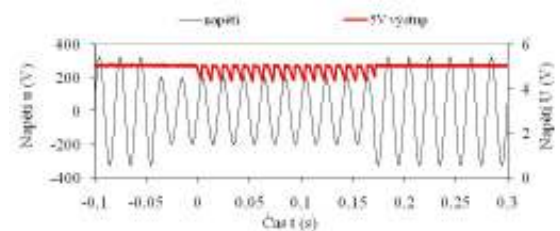
Obr. 140 PCI_AC_nom_120ms_10V



Obr. 141 PCI_AC_pila_250(122)ms_20V

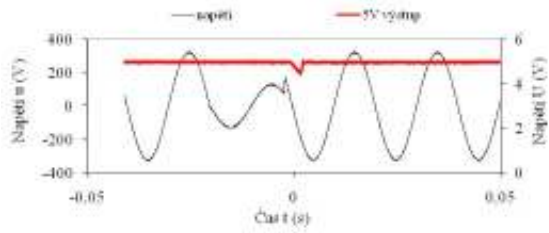


Obr. 142 PCI_AC_pila_440(130)ms_90V

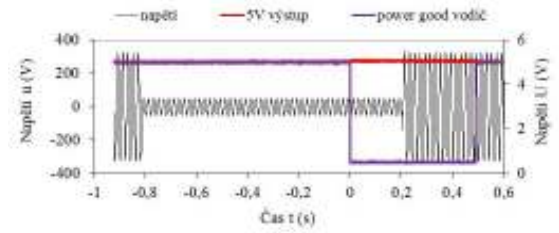


Obr. 143 PCI_AC_70W_210(45)ms_140V

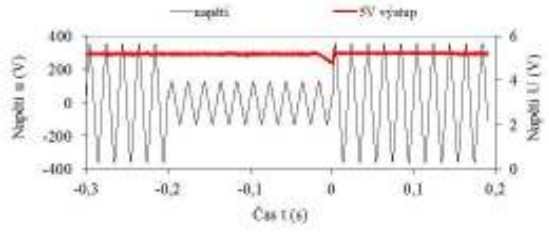
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



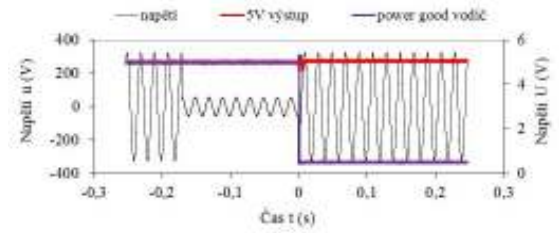
Obr. 144 PC1_AC_100W_18ms_90V



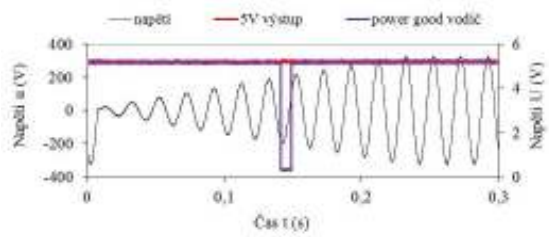
Obr. 149 PC8_AC_nom_1000(810)ms_40V



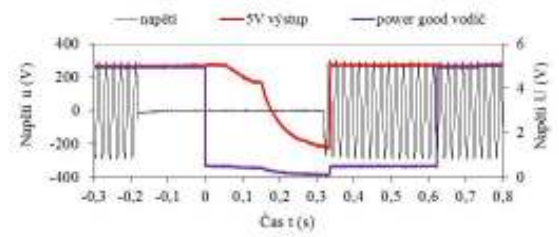
Obr. 145 PC5_AC_overswing_200(121)ms_80V



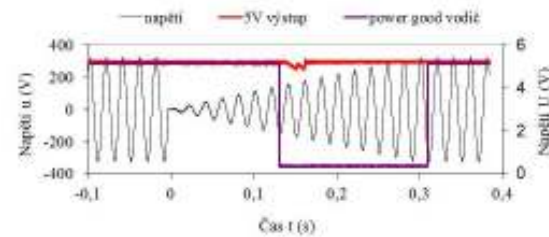
Obr. 150 PC8_AC_úhel90_170ms_38V



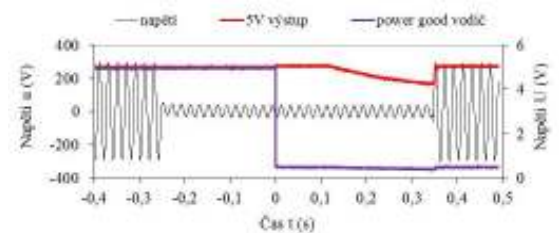
Obr. 146 PC5_AC_pila_236(134)ms_10V



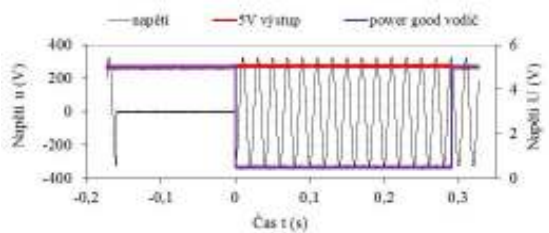
Obr. 151 PC8_AC_predip207_500(180)ms_0V



Obr. 147 PC5_AC_pila_305(132)ms_0V

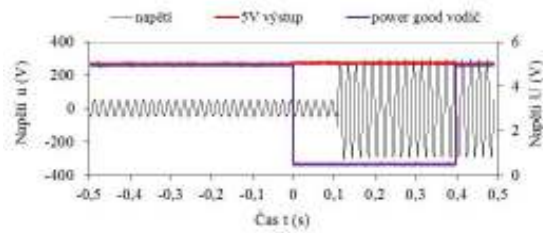


Obr. 152 PC8_AC_predip207_600(252)ms_25V

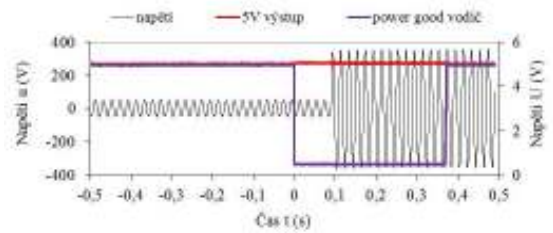


Obr. 148 PC8_AC_nom_150ms_0V

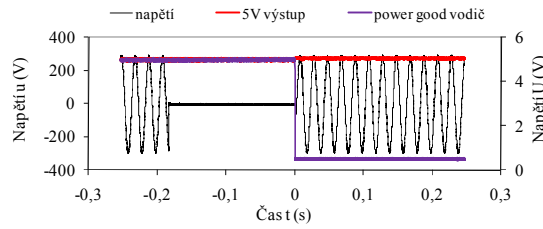
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



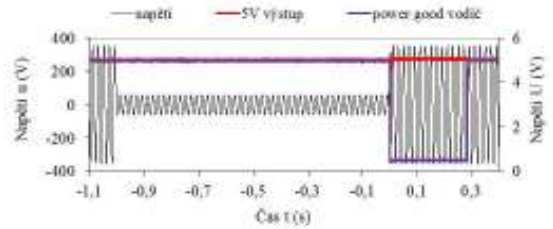
Obr. 153
PC8_AC_predip207_900(792)ms_35V



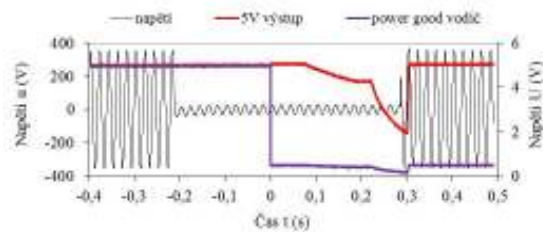
Obr. 157
PC8_AC_predip253_900(810)ms_35V



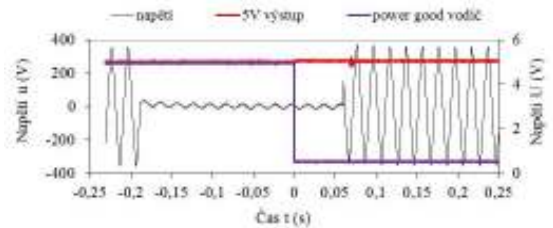
Obr. 154
PC8_AC_predip207_angle90_185ms_0V



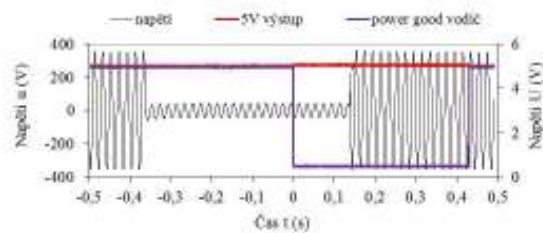
Obr. 158 PC8_AC_predip253_1s_41V



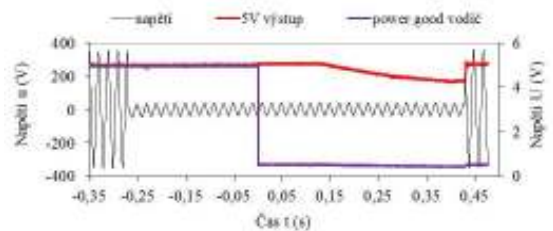
Obr. 155
PC8_AC_predip253_500(212)ms_20V



Obr. 159
PC8_AC_overswing_250(189)ms_10V

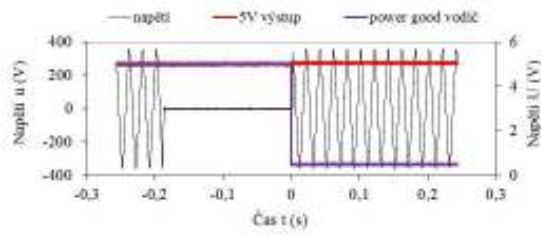


Obr. 156
PC8_AC_predip253_500(362)ms_30V

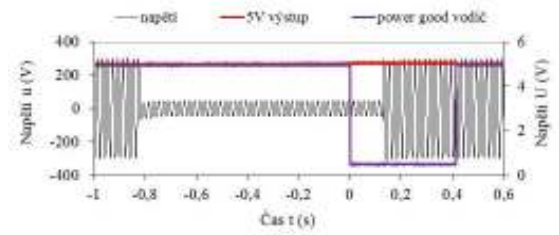


Obr. 160
PC8_AC_overswing_700(270)ms_25V

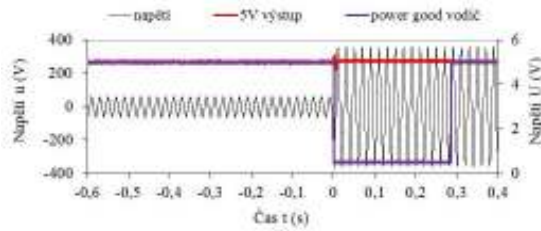
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



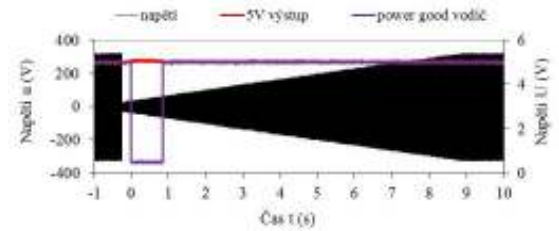
Obr. 161
PC8_AC_overswing_úhel270_190ms_0V



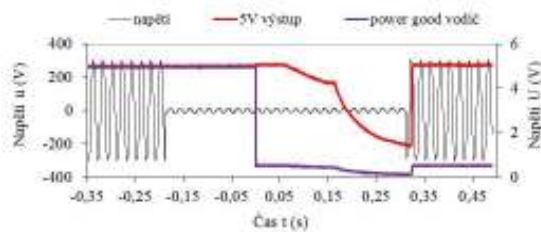
Obr. 165
PC8_AC_flattop_950(824)ms_35V



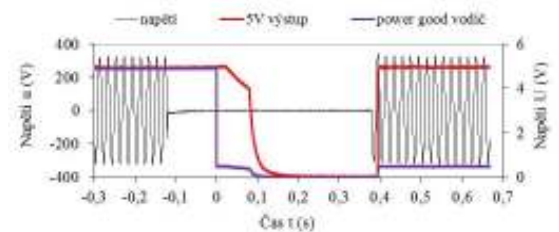
Obr. 162 PC8_AC_overswing_1s_39V



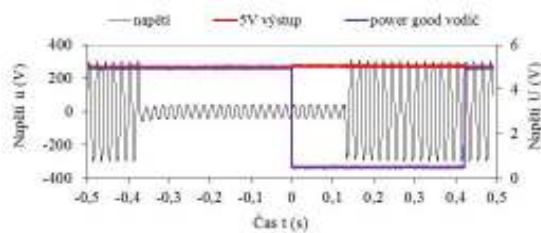
Obr. 166 PC8_AC_pila_10s(219ms)_30V



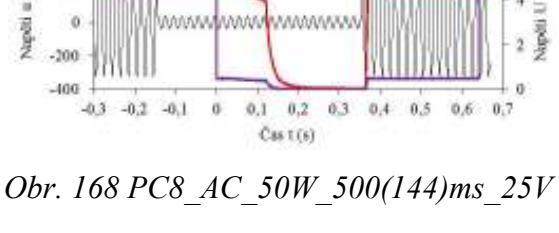
Obr. 163
PC8_AC_flattop_500(188)ms_10V



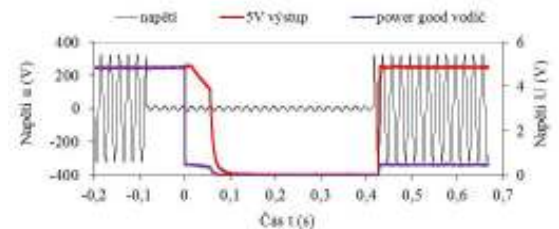
Obr. 167 PC8_AC_50W_500(120)ms_0V



Obr. 164
PC8_AC_flattop_500(370)ms_30V

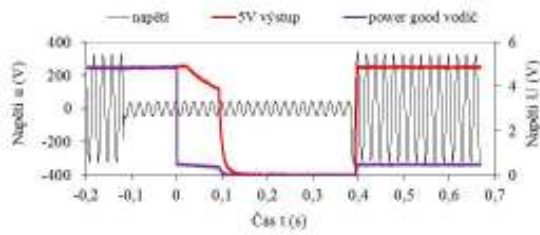


Obr. 168 PC8_AC_50W_500(144)ms_25V

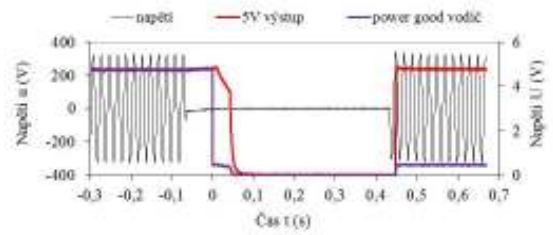


Obr. 169 PC8_AC_70W_500(84)ms_10V

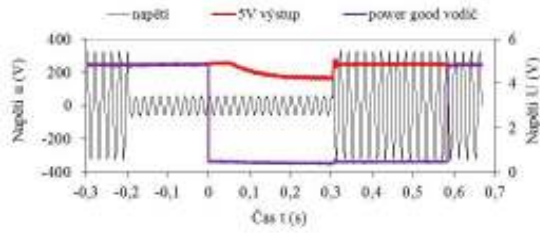
Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí



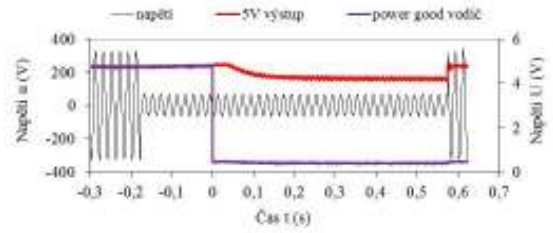
Obr. 170 PC8_AC_70W_500(118)ms_30V



Obr. 172 PC8_AC_100W_500(68)ms_0V



Obr. 171 PC8_AC_70W_500(194)ms_40V



Obr. PC8_AC_100W_750(176)ms_45V

8.3 Detekované parametry harmonicky zkresleného napětí

Tab. 20 Přehled RMS metodami detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí pro úroveň zkreslení $THD_U = 12\%$

Pořadí	Parametr události	Použitá metoda a indikované parametry událostí (harm/Overswing/Flattop)				
		Nastavená událost	RMS (1/2)	RMS 10ms	Klouzající RMS (1/2)	Klouzající RMS 10ms
1	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	110,8/110,6/111,1	103,2/102,5/103,8
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	4,9/4,9/4,8	3,6/3,9/3,3
2	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	60	80/80/80	70/70/70	74,8/75,4/74,5	67,8/68,3/67,1
	t_{det} (ms)	-	5/5/5	5/5/5	3/2,7/3,1	1,2/0,9/1,6
3	U_d (V)	92	112,4/112,4/112,4	102/102/102	112,4/112,4/112,4	102/102/102
	Δt (ms)	60	60/60/60	60/60/60	63,8/63,7/64	61,3/61/61,7
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	4,9/5/4,9	3,7/4/3,3
4	U_d (V)	138	141,7/141,7/141,7	138/138/138	141,7/141,7/141,7	138/138/138
	Δt (ms)	60	60/60/60	60/60/60	63,2/63,3/63,3	61/60,7/61,3
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,6/5,5/5,7	4/4,3/3,7
5	U_d (V)	184	188,6/188,6/188,6	186,3/186,3/186,3	188,6/188,6/188,6	186,3/186,3/186,3
	Δt (ms)	60	50/50/50	60/60/60	56,4/56/56,8	59,7/59,7/59,6
	t_{det} (ms)	-	20/20/20	10/10/10	12,8/13,1/12,6	5,3/5,3/5,4
6	U_d (V)	46	165,9/165,9/165,9	46/46/46	165,9/165,9/165,9	46/46/46
	Δt (ms)	10	20/20/20	10/10/10	21,3/21/21,8	13,5/12,8/14,1
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	4,6/4,7/4,4	3,4/3,8/3,1
7	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	109,1/109,2/108,8	102,1/101,5/102,7
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,7/5,6/5,9	4,1/4,4/3,8
8	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	100/100/100	110/110/110	105,1/104,6/105,5	106,8/107,4/106,1
	t_{det} (ms)	-	15/15/15	5/5/5	7,8/8,1/7,6	1,7/1,4/2,1
9	U_d (V)	92	104,2/104,2/104,2	98/98/98	104,2/104,2/104,2	98/98/98
	Δt (ms)	100	100/100/100	100/100/100	103,1/103,3/103,1	100,9/100,6/101,2
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,8/5,6/6	4,1/4,4/3,8
10	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	113,2/112,5/113,9	104,8/104,1/105,1
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	3,8/4,1/3,4	2,9/3,3/2,7
11	U_d (V)	92	92/92/92	92/92/92	92/92/92	92/92/92
	Δt (ms)	100	120/120/120	110/110/110	117,8/118,3/117,2	108,9/109,2/108,6
	t_{det} (ms)	-	5/5/5	5/5/5	1,4/1,1/1,7	0,7/0,5/0,9
12	U_d (V)	92	104,2/104,2/104,2	98/98/98	104,2/104,2/104,2	98/98/98
	Δt (ms)	100	110/110/110	100/100/100	107,6/107,2/108	102,1/101,7/102,3
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	3,8/4,1/3,5	2,9/3,3/2,7
13	U_d (V)	299	299/299/299	299/299/299	299/299/299	299/299/299
	Δt (ms)	60	70/70/70	60/60/60	69,5/69,6/69,3	62,3/61,8/62,9
	t_{det} (ms)	-	10/10/10	10/10/10	5,6/5,5/5,8	4,1/4,3/3,8

Odolnost spotřebičů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí

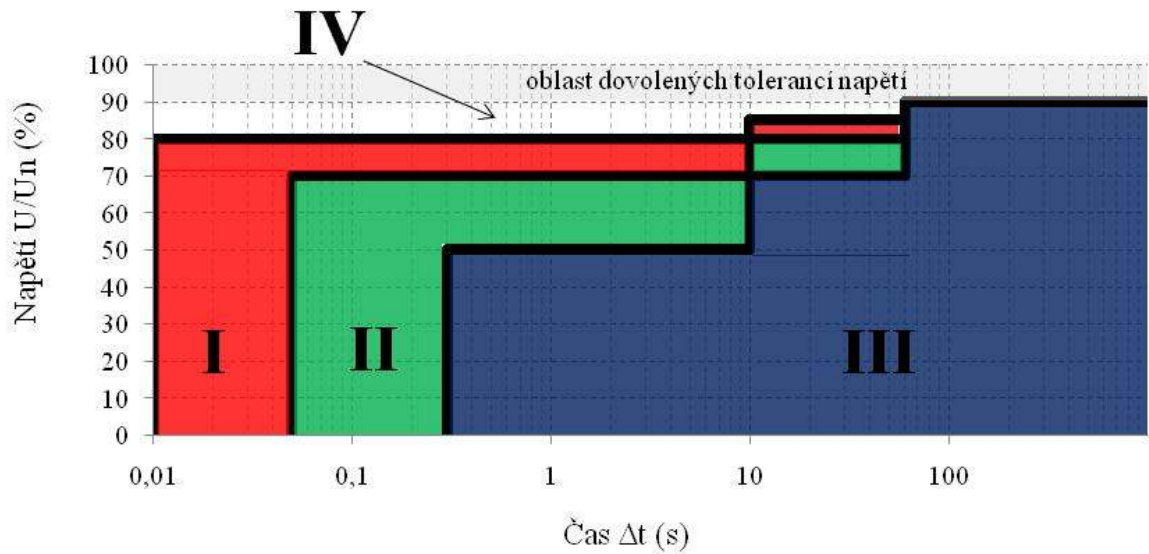
Tab. 21 Přehled trackovacími algoritmy detekovaných parametrů událostí v harmonickými deformovaném napájecím napětí pro úroveň zkreslení $THD_U = 12\%$

Pořadí	Parametr události	Použitá metoda a indikované parametry událostí (harm/Overswing/Flattop)				
		Nastavená událost	T.A.1	T.A.2	EKF	EKF modif.
1	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	84,9/84,1/84,6 113,4/120,2/114 4/3,7/4,1	79,4/78/80,1 103,8/111,8/104,3 2,6/2,2/2,9	89/85,4/82,2 102,9/102,8/103,1 1,6/1,7/1,5	89/85,5/82,3 102,9/102,8/103,1 1,6/1,7/1,5
2	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 60 -	91,6/89,1/89,5 79,3/79/81,2 1/1,1/0,8	91,4/85,1/85,8 68,5/69/71,4 0,4/0,5/0,3	90,2/84,6/79,4 66,3/66,5/66,1 0,3/0,3/0,4	90,2/84,9/79,1 66,3/66,5/66,1 0,3/0,3/0,4
3	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 60 -	119/118/118,6 63,8/70,4/64,9 4,1/3,8/4,1	103,2/101,2/104,3 62/71,5/64,1 2,6/2,3/2,9	102,9/100,1/101,2 61,2/61/61,3 1,6/1,7/1,6	102,9/100,2/100,7 61,2/60,9/61,2 1,6/1,7/1,6
4	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	138 60 -	148,6/147,1/148,1 63,3/69,9/66,1 4,7/4,3/4,6	136,1/133,4/135 61,5/71,4/63,7 3/2,5/3,5	136,7/136,4/134,1 60,9/60,5/61,2 1,9/2/1,8	136,7/136,5/134,2 60,9/60,5/61,2 1,9/2/1,8
5	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	184 60 -	193,1/187,8/187,6 61,3/76,8/71,6 6,7/7,1/5,7	185,1/176,5/177,4 60,2/90,9/91,9 4,3/2,9/4,5	186,3/185,4/185,4 60/58,9/61,2 2,7/3/2,5	186,3/185,4/185,2 60/58,8/61,2 2,7/3/2,5
6	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	46 10 -	85,1/86,1/83,3 31,5/31,6/33,3 3,7/3,4/3,7	50,6/50,2/50,2 20,9/31,5/24,2 2,3/2,1/2,5	43,6/47,5/45,1 13,4/13,2/13,4 1,4/1,5/1,4	43,6/47,6/44,5 13,4/13,2/13,4 1,4/1,5/1,4
7	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	82,3/81,5/82 110,5/110,5/112 4,8/4,6/4,7	77,2/75,8/77,7 102,7/102,6/103,6 33/2,6/3,2	88,7/85/81,5 102,1/102/102,1 1,8/1,9/1,8	88,7/85,1/81,7 102,1/102/102,1 1,8/1,9/1,8
8	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	91,4/88,7/88,8 116,3/117,7/116,1 1,4/1,5/1,2	91,4/85/85,8 107,3/108,4/106,8 0,6/0,7/0,4	90/84,2/78,6 103,2/105,1/102,7 0,4/0,4/0,5	90/84,5/78,3 103,2/105,1/102,7 0,4/0,4/0,5
9	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	107/106,3/106,6 103,6/109,6/106,5 4,8/4,7/4,8	96,5/94,7/97,4 101,4/111,3/103,9 3/2,7/3,3	97,6/96,3/95,8 101/100,5/101,4 1,8/1,9/1,8	97,6/96,4/95,4 101/100,5/101,4 1,8/1,9/1,8
10	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	86,8/85,9/86,5 123,3/151,1/124,9 3,1/2,7/3,2	81,4/79,9/82,1 105,8/E/E 2/E/E	89,2/85,8/82,9 104,5/104,2/105,1 1,3/1,3/1,2	89,2/85,9/83 1104,5/104,1/105,1 1,3/1,3/1,2
11	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	91,6/88,8/88,8 128,9/148,2/127,2 0,5/0,6/0,4	91,5/85,1/85,8 110,4/E/E 0,2/E/E	90,3/85,1/80,3 107,6/108,2/107,3 0,2/0,2/0,2	90,3/85,3/80 107,6/108,2/107,3 0,2/0,2/0,2
12	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	92 100 -	110,8/109,8/110,5 108,5/131,1/108,7 3,1/2,7/3,2	99,6/97,7/100,6 102,3/E/E 2,1/E/E	98/96,3/96,2 101,5/101,9/101,4 1,3/1,3/1,2	98/96,4/95,8 101,5/101,9/101,4 1,3/1,3/1,2
13	U_d (V) Δt (ms) t_{det} (ms)	299 60 -	298,8/307,4/302,4 64,1/63,6/67,8 4,9/5/5,8	302,4/317/315,3 62,2/62,4/62,4 3,4/4,2/2,6	300,4/303,3/304,8 61,4/61,2/61,4 2,1/2,3/2,1	300,4/303,3/304,8 61,4/61,2/61,4 2,1/2,3/2,1

V tabulce Tab. 21 zeleně označené údaje označují poklesy napětí, které při použití algoritmu T.A.2 jsou detekovány s uváděnými hodnotami, ale po skončení simulovaného poklesu napětí algoritmus T.A.2 detekuje rovněž velmi krátké přepětí, které simulováno nebylo. Algoritmus tedy nesprávně detekuje dvě události, i když simulována byla pouze událost jedna.

Modře uváděné parametry naopak označují ty poklesy napětí, u nichž rozkmit algoritmem vypočítané efektivní hodnoty napětí překračuje povolené meze $U_n - 10\%$ a zaznamenává tak velmi mnoho krátkých poklesů napětí namísto jednoho poklesu svými parametry odpovídajícího simulovanému poklesu.

8.4 Kompatibilní úrovně s ohledem na tepelné namáhání el. zařízení



Obr. 174 Navržené kompatibilní úrovně se zohledněním tepelného namáhání el. zařízení