

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera**

Simulace inteligentní rozvodné sítě Smart Grid

Bc. Tomáš Koval

**Diplomová práce
2011**

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KOVAL**
Osobní číslo: **D09861**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**
Název tématu: **Simulace inteligentní rozvodné sítě Smart Grid**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Diplomová práce bude zaměřena na analýzu současného stavu rozvoje energetických inteligentních rozvodných sítí Smart Grid. Popsány budou prvky sítě na straně distributora energie a digitální inteligentní elektroměry. Analýza bude zaměřena především na problematiku přenosu dat, které v důsledku umožňují regulovat výrobu a spotřebu elektrické energie.

V praktické části budou provedeny počítačové simulace zaměřené na přenos digitálních signálů po energetických vedeních. Budou zkoumány vlivy prvků energetické sítě na spolehlivost přenosu informací, analyzovány budou možnosti různých přenosových rychlostí. Simulovány budou různé konfigurace přenosového vedení kombinované s různými formáty přenášených dat. Analýzy budou doplněny grafy časových průběhů signálu, spekter signálů a schémata řešených konfigurací vedení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Dobeš, J., Žalud V. Moderní Radioelektrotechnika. Technická literatura, Ben Praha, 2006

MIKULEC, M., HAVLVÍČEK, V.: Základy teorie elektrických obvodů 2: ČVUT, Praha, 1997, ISBN 80-01-01778-8.

MYSLÍK, J.: Elektrické obvody, BEN, Praha, 1998, ISBN 80-86056-19-8.
Ibler Zbyněk a kol. Energetika ? technický průvodce 1 díl., nakladatelství BEN, Praha 2009, ISBN 80-7300-026-1

KAISER, L., K.: Electromagnetic compatibility Handbook, CRC Press, New York, USA, 2005, ISBN 0-8493-2087-9.

Alternativní zdroje energie, Fakulta strojní, vydavatelství ČVUT, 2003, ISBN 80-01-02802-X

Renewable Energy: Power for Sustainable Future-Second Edition, ed. by Godfrey Boyle, Oxford University Press, ISBN 0-19-926178-4, 451 pages, 2004

Wind Power, Revised Edition: Renewable Energy for Home, Farm, and Business by Paul Gipe, Chelsea Green Publishing Company; Rev&Expand edition, 504 pages, ISBN: 19314981482004

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **10. března 2011**

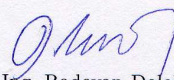
Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 11. března 2011

Prohlašuji, že tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji práci se vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, který na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2011

Tomáš Koval

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat pánům Ing. Ondřeji Černému, Ph.D., a doc. Ing. Radovanu Dolečkovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a za metodickou pomoc při její realizaci.

Slova díků patří i firmě Elaz, spol. s r.o., která mi po dobu studia, jak jen to bylo možné dopřávala prostor ke studiu.

Hlavní dík však patří mé manželce, za projevenou podporu a především pevné nervy při vypracování této práce a vůbec celého mého studia.

Anotace

Práce je zaměřena především na simulaci přenosu dat po energetickém vedení. Teoretická část práce se zabývá popisem parametrů elektrického vedení, vlastností statických elektroměrů a nejčastěji používaných modulací pro přenos dat. V této části jsou rovněž popsány možnosti připojení vysílačů a přijímačů na energetickou síť, frekvenční rozsahy, ve kterých je komunikace povolena, dle normy ČSN EN 50065. V praktické části jsou provedeny simulace přenosu digitálního signálu po energetickém vedení různých délek a zatížení.

Klíčová slova:

elektroměr, vedení, modulace, signál, frekvence, náhradní schéma transformátoru, ztrátové vedení

Annotation

The work is mainly focused on the simulation data for energy lines. The theoretical part deals with the description of the parameters of power lines, properties of static electrical and frequently used modulation for transfer data. This section also describes the connectivity of transmitters and receivers on power network, frequency ranges in which communication is allowed, according to Standard EN 50065. The practical part of the simulated transmission of digital signals over power lines of different lengths and loads.

Keywords:

Electrometer, lines, modulation, signal, frequency, the transformer equivalent diagram, loss lines

ÚVOD.....	8
1. POPIS ELEKTROMĚRŮ	9
1.1. Popis statického elektroměru	9
1.2. Funkce elektroměrů	11
1.3. Rozhraní elektroměrů pro přenos dat	12
2. MODULACE POUŽÍVANÉ V SÍTÍCH SMART GRID	14
2.1. Modulace FSK.....	14
2.2. Modulace BPSK	15
2.3. Modulace OFDM.....	16
2.4. Modulace DCSK	18
3. DISTRIBUČNÍ VEDENÍ.....	20
3.1. Primární parametry vedení	20
3.2. Sekundární parametry vedení	24
4. CHYTRÉ SÍTĚ - SMART GRID	26
5. PLC – SIGNÁLOVÁ VAZBA.....	28
5.1. Signálové vazební členy	28
5.2. Přímá fázová komunikace	28
5.3. Mezfázová komunikace bez spojení fází.....	29
5.4. Mezfázová komunikace se spojením fází.....	29
5.5. Zařízení mezi fázemi	30
6. NEJČATĚJŠÍ ZDROJE RUŠENÍ V ELEKTRICKÉ SÍTI	31
6.1. Klasifikace rušivých signálů a jejich zdrojů.....	31
6.2. Průmyslové zdroje rušení	32
7. METODY VAZBY A ŠÍŘENÍ SIGNÁLU PO VEDENÍ.....	34
7.1. Paralelní vazba.....	34
7.2. Sériová vazba.....	34
8. POPIS KOMUNIKACE PO ELEKTRICKÉM VEDENÍ , KMITOČTOVÁ PÁSMA ...	35
8.3. Kmitočtová pásma a jejich klasifikace	35
9. NÁVRH MODELU VEDENÍ.....	36
9.1. Obecný popis přenosu dat po energetickém vedení	36
9.2. Blokové schéma energetického vedení.....	36
9.3. Náhradní schéma distribučního transformátoru 35 / 0,4 kV	37
9.4. Parametry kabelového vedení AYKY	39
10. SIMULACE CHOVÁNÍ PŘENÁŠENÉHO DIGITÁLNÍHO SIGNÁLU.....	40
10.1. Přenos digitálního signálu 95 kHz.....	40
10.2. Přenos digitálního signálu 50 kHz.....	54
10.3. Přenos digitálního signálu 3 kHz.....	68
ZÁVĚR.....	81
POUŽITÁ LITERATURA	82
SEZNAM ZKRÁTEK	83
SEZNAM OBRÁZKŮ	84

ÚVOD

V důsledku neustálého vývoje informačních technologií je možné realizovat datové přenosy cestami, které pro přenos dat nejsou primárně určeny. V popředí zájmů mnoha společností a uživatelů stojí přenos dat po vedení elektrické energie. Technologie přenosu dat po elektrickém vedení se označuje PLC (Power Line Communications) někdy též BLP (Broad over Power Line).

PLC nachází uplatnění zejména v oblastech, kde není možné z důvodů technických nebo finančních vybudovat novou komunikační síť. Spolehlivý přenos však vyžaduje použití kvalitní modulace, výkonného kódování a zejména znalost chování signálu na vybraném úseku vedení.

Systém PLC je možné rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří širokopásmový přenos dat. Dnes se běžně realizují objektové sítě založené na normě IEEE 802.3 (ethernet) s dosahem několik desítek metrů bez opakovače. Druhou skupinu tvoří úzkopásmový přenos dat určený především pro přenos informací z měřičů energií, zejména elektroměrů.

Cílem práce je na jednoduchém modelovém vedení simulovat chování digitálního signálu komunikace PLC. Výstupem simulace jsou charakteristiky signálu PLC v časové oblasti a jejich frekvenční spektrum při různých parametrech vedení, zátěže a frekvence injektovaného signálu. Výchozími podklady pro simulaci je popis komunikačního signálu mezi elektroměrem a koncentrátorem, štitkové hodnoty distribučního transformátoru 400 kVA, 35 / 0,42 kV, katalogové a vypočtené parametry distribučního kabelu AYKY 3 x 240 mm² + 120 mm².

První část práce je věnována obecnému popisu elektroměrů, parametrům vedení, výpočtu náhradního schématu distribučního transformátoru, přenosu informací mezi elektroměrem a dispečinkem. Dále pak popisu technologie PLC.

V druhé části je popsán návrh modelu elektrického vedení a jeho využití pro simulaci přenosu dat po vedení. Výsledky simulací na modelu energetického vedení jsou vyobrazeny v grafech.

Závěrem jsou v práci zhodnocena simulovaná data.

1. POPIS ELEKTROMĚRŮ

Elektroměry jsou elektrická zařízení určená pro měření elektrické práce. V současné době probíhá v odběratelském sektoru výměna klasických elektromechanických elektroměrů za elektroměry statické – elektronické. Klasické elektromechanické elektroměry založené na principu přeměny elektrické energie na energii pohybovou se již neinstalují.

Výhodou statických elektroměrů oproti elektroměrům elektromechanickým je především jejich spolehlivost a nízká vlastní spotřeba. Se sériovou výrobou statických elektroměrů samozřejmě klesá i jejich výrobní cena, která se u statického elektroměru se základním vybavením pohybuje ve zlomcích cen elektroměrů elektromechanických.

Podstatnou, a pro budoucí rozvoj energetické sítě nezbytnou vlastností statických elektroměrů je především snadná implementace komunikačních rozhraní přímo v elektroměru nebo prostřednictvím rozšiřujících modulů.

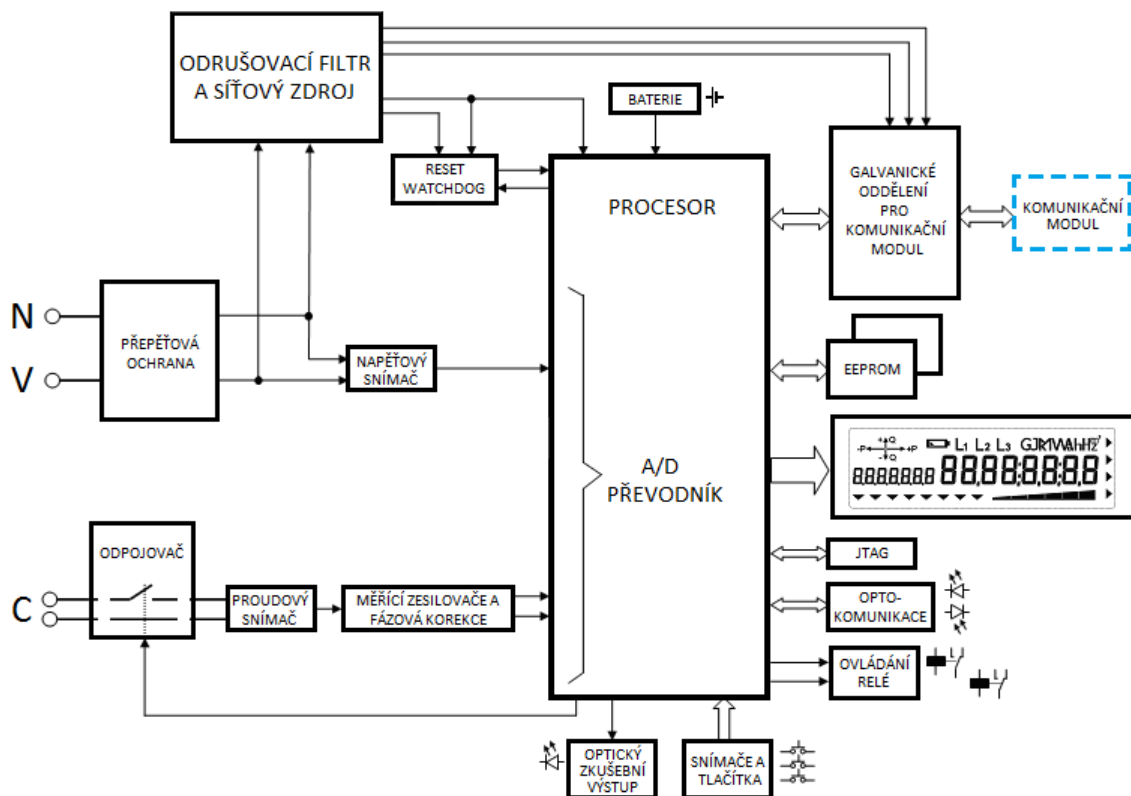
1.1. Popis statického elektroměru

Jádrem statického elektroměru je procesor, který vykonává hlavní výpočty a operace. Zajišťuje převod analogových signálů ze senzorů napětí a proudů na digitální, vypočítává elektrické i jiné veličiny. Vyhodnocuje uživatelské tarify, měřená data ukládá do paměti EEPROM a zobrazuje je na displeji.

Měření proudů a napětí je realizováno prostřednictvím měřících transformátorů nebo senzory založenými na principu Hallovy sondy (patentováno firmou Iskraemeco). Měřicí systém elektroměrů umožňuje měření i za přítomnosti harmonických složek. Stejnoseměrné složky jsou eliminovány v každé měřící periodě.

Komunikace s okolím je realizována prostřednictvím výměnných modulů (PLC, RS 485, RS 232, apod..). Standardním rozhraním elektroměrů je optické rozhraní, které umožňuje lokální odečet informací.

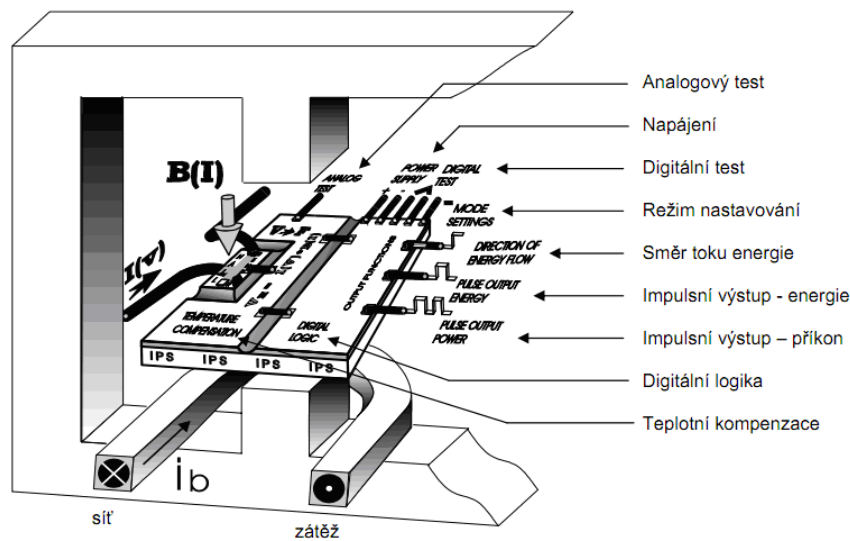
Displej elektroměru umožňuje zobrazit široké spektrum hodnot. Zobrazování dat je možné v několika režimech, například bateriový, který zobrazuje základní data při výpadku napětí. [1]



Obr. 1. 1. 1 – Blokové schéma statického elektroměru firmy ZPA [1]

Měření na principu Hallovy sondy je založeno na výrobní technologii CMOS. Senzor je integrován na křemíkovém čipu spolu s analogovými a digitálními obvody elektroměru. Vhodná konfigurace jednotlivých funkčních částí na jednom čipu zajišťuje spolehlivost a časovou stabilitu.

Analogová a digitální elektronika integrovaná na jednom čipu převádí napětí Hallova senzoru na kvantizační pulsy (kWh), zároveň dochází ke kompenzaci nelinearity a vlivu teploty. [2]



Obr. 1. 1. 2 - Měřící systém elektroměru založeném na principu Hallova jevu [2]

1.2. Funkce elektroměrů

Elektromechanické elektroměry svým provedením umožňují poskytovat informace jen o odebrané práci pomocí mechanického číselníku umístěném přímo na elektroměru. Pro využití v sítích „smart grid“ jsou elektromechanické elektroměry nepoužitelné. Základním požadavkem sítí „smart grid“ je především neustálý přenos dat mezi dispečinkem a elektroměrem.

Statické elektroměry jsou význačné svoji snadnou instalací do rozvětvených systémů měření a regulace. Mimo informací o elektrické práci, dokáží statické elektroměry vyhodnotit a na dispečink odeslat informace o výpadku fází, interní poruchová hlášení, a u tzv. kvadrturních elektroměrů, je-li energie spotřebovávána či dodávána do sítě. Všechny informace přenášené na dispečink jsou vždy opatřeny časovým rámcem, je tedy možné informace z elektroměrů hierarchicky uchovávat.

Standardní informace přenášené z elektroměru na dispečink:

- Celkové množství spotřebované energie
- Okamžitý výkon v jednotlivých fázích
- Okamžitý efektivní proud v jednotlivých fázích
- Okamžité efektivní napětí v jednotlivých fázích
- Chybné zapojení elektroměru (neoprávněná manipulace)
- Aktuální hodnotu $\cos \varphi$ v jednotlivých fázích
- Vícetarifové měření energie (4 tarify)
- Detekci jednotlivých fází

Mimo těchto základních údajů, které statický elektroměr nabízí je možné zobrazit i spoustu dalších informací, např. maximální hodnoty napětí a proudu. Mikroprocesor, který obsahuje každý statický elektroměr, je programovatelný a v běžné praxi jsou na výrobce elektroměrů kladeny i speciální požadavky ohledně zobrazovaných nebo vysílaných (po komunikaci) informací. [1]

Příkladem:

- spotřeba elektrické energie v jednotlivých dnech
- spotřeba elektrické energie při aktivním HDO (Hromadné dálkové ovládání)

Statické elektroměry, které jsou standardně osazeny hodinami reálného času (krystal) tak dokáží zobrazit aktuální měřené a spočtené veličiny v závislosti na čase. Výstupní informace generované elektroměrem, které jsou implementovány na časovou osu, tak dávají energetickým závodům a spotřebiteli větší vypovídající hodnotu. [1]

1.3. Rozhraní elektroměrů pro přenos dat

- Impulsní výstup

Dnes již standardní výstup elektroměru, impulsní výstupy jsou galvanicky oddělené a slouží ke zjištění odebraného množství elektrické energie. V katalogových listech různých výrobců elektroměrů je uvedeno množství pulsů, které odpovídá jedné kilowatthodině. Například 1000 imp. / kWh. [1]

- RS 485

Elektroměry touto komunikací nebývají standardně vybaveny. Sériová komunikace umožňuje adresaci elektroměrů, což je výhodné zejména v průmyslových budovách, kde bývá elektroměrů instalováno více. Po sériové komunikaci je možné přenášet informace o spotřebované energii a další informace dohodnuté s výrobcem elektroměru. Při realizaci sériové komunikace RS 485 je nutné dbát maximální možné délky komunikačního kabelu. [1]

- RS 232

Komunikace obdobná RS 485, využívá se jen v případech, kdy je nutné převést komunikaci na jiný druh. Příkladem Ethernetový převodník RS 232 / Ethernet. Nedostatečná odolnost proti rušení umožňuje komunikaci provozovat jen do vzdálenosti několika metrů. [1]

- GSM

Modul GSM je osazen SIM kartou. Prostřednictvím GSM/GPRS je možné komunikovat v pásmu 900 MHz a 1800 MHz (dle použitého modemu) rychlostí až 171 kbps. [1]

- M-Bus

Progresivně rozvíjející se komunikace, která se dnes již stala standardem pro bezproblémový přenos dat nejen z elektroměrů. Velký význam má komunikace především v průmyslových budovách, kde se instalují měřiče spotřeb a vodoměry vybavené tímto rozhraním. Tvoření komunikačních sítí je možné jakoukoliv topologií, přičemž nejlepší z hlediska přenosových rychlostí je topologie liniová. Na rozdíl od impulsních výstupů, kde z důvodu výpadku napájení dochází ve většině případů i ke vzniku měřicích chyb (ztrátě měřených dat), funguje tato technologie na principu dotaz – odpověď. Data jsou ukládána do paměti a z nadřazeného systému jsou data v libovolných okamžicích odečítána.

- PLC (Power Line Communication)

Jedná se o přenos informací po elektrických rozvodech. Hlavní výhodou této komunikace je především to, že není nutné budovat další komunikační linky, tím klesají náklady na zřízení komunikace. V některých případech, například hustá zástavba, by mohla realizace nových komunikačních linek vyvolat dopravní kolaps (centra velkých měst).

Přenos dat PLC se využívá v posledních částech energetické sítě, tzn. od poslední distribuční trafostanice v síti, z které jsou napojeny odběratelé (rodinné domy, průmyslové stavby).

Přenos dat po nn síti je založen na modulaci binárních dat. Na vysílací straně jsou binární data přivedena na modulátor (většinou modulace OFDM). Modulovaný signál je upraven na patřičnou úroveň a přes vazební transformátor (galvanické oddělení) připojen k výkonovému signálu v síti nn k napětí 230V / 50 Hz. Na přijímací straně je postup opačný, jehož výsledkem je binární signál. Rychlost přenosu dat se pohybuje od stovek kbit/s až po desítky Mbit/s. [1]

2. MODULACE POUŽÍVANÉ V SÍTÍCH SMART GRID

2.1. Modulace FSK

Patří mezi nejbezpečnější modulace. Nevýhodou této modulace je pomalý přenos dat a vyšší pořizovací náklady modulačních a nedomulačních zařízení.

- **Modulace 2FSK**

Frequency Shift Keying neboli modulace s frekvenčním klíčováním. Nosná vlna má konstantní amplitudu A_c . Frekvence nosné vlny se mění v rytmu digitálního modulačního signálu mezi dvěma frekvencemi. Modulátor je nejčastěji tvořen laditelným oscilátorem, který postupně generuje dvě frekvence podle stavu modulačního signálu.

$$f_1 = f_c - \Delta f$$

$$f_2 = f_c + \Delta f$$

$$f_c = (f_1 + f_2)/2$$

kde: f_1, f_2 – signalizační frekvence [Hz]

f_c – nominální frekvence nedomulované nosné vlny [Hz]

Δf – frekvenční zdvih, tj. odchylka signalizační frekvence od frekvence nosné [Hz]

Modulovaný signál $S_{FSK}(t)$ lze vyjádřit vztahy:[3]

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t], \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární } 1)$$

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi(f_c - \Delta f)t], \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární } 0)$$

kde: $\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} = A_c$ – amplituda modulované vlny 2FSK [V]

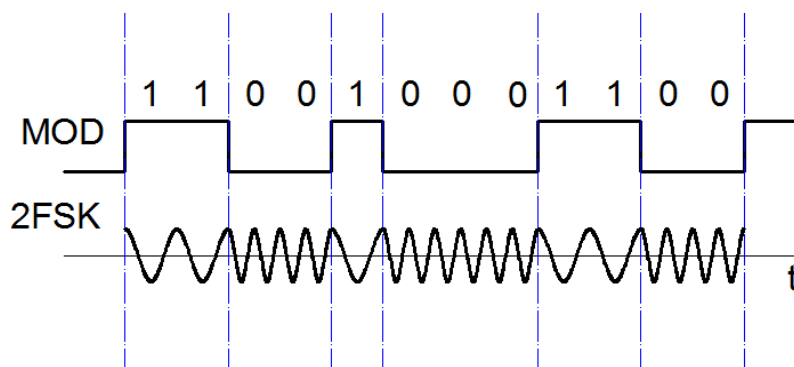
E_b – energie modulovaného signálu na 1 modulační bit [V^2s]

T_b – bitová perioda [s]

Šířku pásma signálu 2FSK informativně určuje Carsonův vzorec, který lze vyjádřit ve tvaru:

$$B_{2FSK} \approx 2(B_m + \Delta f)$$

kde: B_m – šířka modulačního signálu v základním pásmu, obvykle rovna nejvyšší modulační frekvenci $f_{m\max}$ [Hz]



Obr. 2. 1. 1 – Modulace 2FSK

2.2. Modulace BPSK

Binary Phase Shift Keying neboli dvojstavová modulace s fázovým klíčováním. Nosná vlna má konstantní amplitudu. Fáze nosné vlny se mění v rytmu digitálního modulačního signálu mezi dvěma fázemi, nejčastěji 0° a 180° . Modulace BPSK patří mezi nejjednodušší fázové modulační metody.

Modulovaný signál $S_{BPSK}(t)$ lze vyjádřit vztahy: [3]

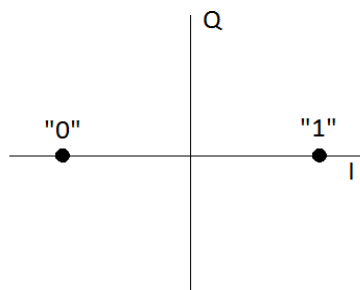
$$S_{BPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární } 1)$$

$$S_{BPSK}(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární } 0)$$

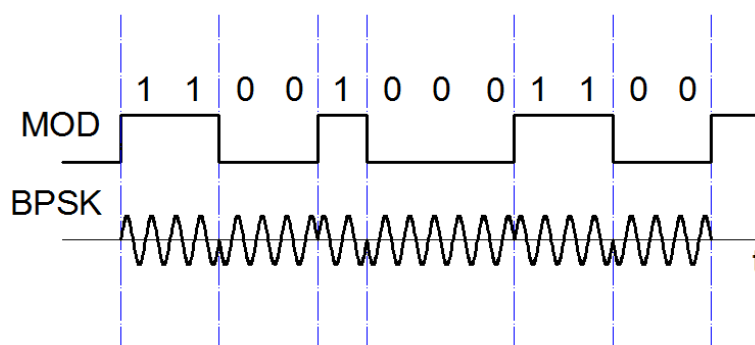
kde: $\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}$ – amplituda modulované vlny BPSK [V]

E_b – energie modulovaného signálu na 1 modulační bit [V^2s]

T_b – bitová perioda [s]



Obr. 2 .2. 1 – Signálový prostor modulace BPSK



Obr. 2. 2. 2 – Modulace BPSK

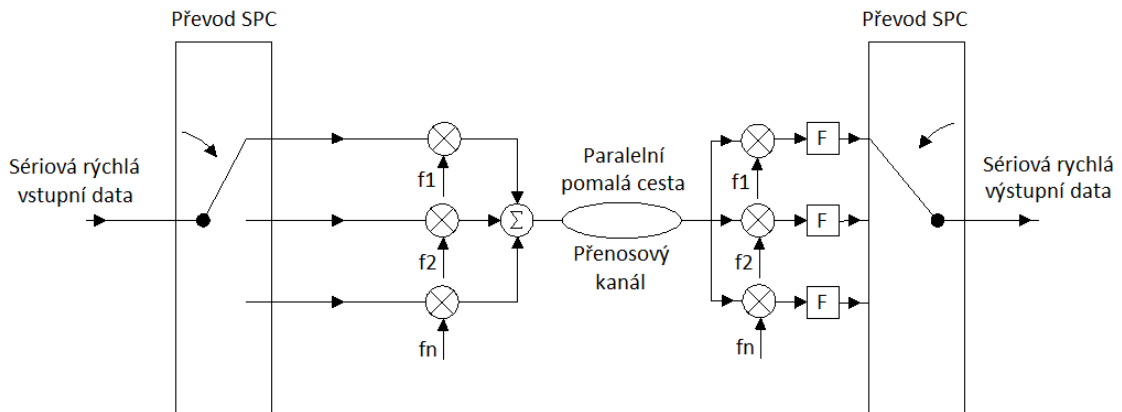
2.3. Modulace OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing neboli ortogonální frekvenční multiplex. Přenos modulačního signálu je většinou realizován prostřednictvím jedné nosné vlny. Od sedmdesátých let se rozvíjejí modulační formáty s více nosnými vlnami (MCM). Na nosných vlnách se opět přenáší jeden modulační signál.

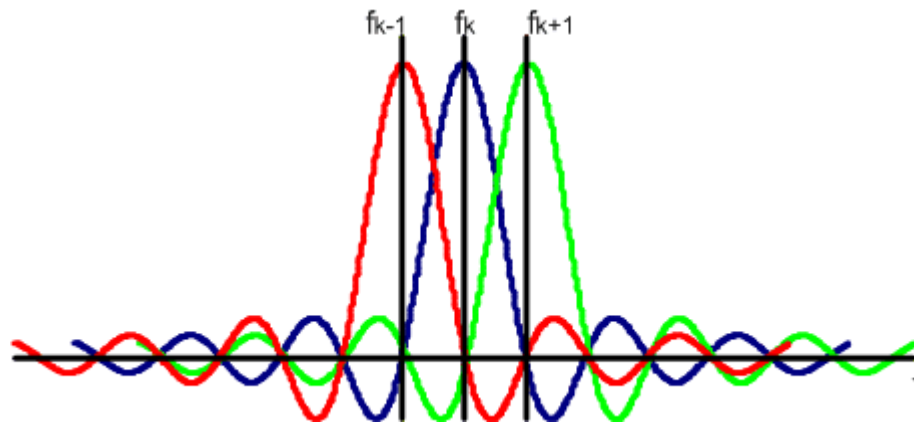
V těchto systémech se ve vysílači vstupní sériový, modulační datový tok s relativně vysokou bitovou rychlostí $f_b = 1/T_b$, převádí v sériově-paralelním převodníku na N pomalejších paralelních složek (stovky, tisíce), s podstatně delší dobou trvání $T_s = NT_b$. Ty se potom modulují na N subnosných vln s frekvencemi f_0, f_1, \dots, f_{N-1} a s vhodnými stejnými rozestupy Δf .

OFDM používá subnosné vlny, které vytvářejí ortogonální soustavu. Tyto vlny mají relativně malé vzájemné rozestupy, takže jejich spektra, určená při modulaci nefiltrovaným pravoúhlým signálem funkcí $\sin x/x$, se velmi výrazně překrývají. Každá z nich se však nachází vždy přesně na frekvenci, kde spektra všech ostatních subnosných procházejí nulou, takže přitom nedochází k vzájemným interferencím mezi nosnými vlnami.

Nosné vlny jsou modulovány robustními modulacemi QPSK, 16QAM, 64 QAM, které jsou vzájemně ortogonální (jejich skalární součin je nulový), takže každé maximum nosné se překrývá s minimem ostatních nosných. Datový tok je tak rozdělen na stovky dílčích datových toků jednotlivých nosných. Tím, že nosné jsou přenášeny nízkou modulační rychlostí je modulace odolná proti vícecestnému rušení. [4]



Obr. 2. 3. 1 - Principiální koncepce vysílače a přijímače OFDM [4]



Obr. 2. 3. 2 – Spektrum OFDM [4]

V modulaci se využívá vkládání ochranného intervalu, času, kdy se nevysílá žádná nová informace. Na přijímací straně je tak možné přijmout signál, který přichází různými cestami a s různým časovým zpožděním.

Všechny nosné systémy však nejsou využity pro přenos dat, některé se využívají pro synchronizaci informací přenášených na datových nosných a ekvalizaci jež umožňuje opravit deformace signálu způsobené přenosovým kanálem.

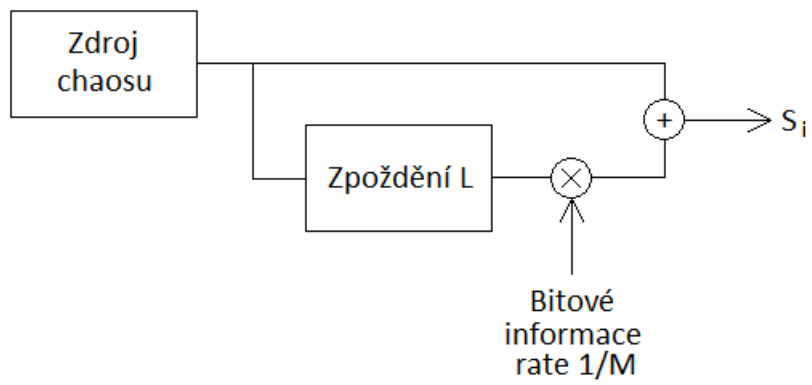
Technika OFDM je význačná svou adaptabilní schopností, prostřednictvím velkého počtu na sobě nezávislých nosných signálů se dokáže přizpůsobit skutečným podmínkám při přenosu. Modulace nevyžaduje frekvenční kanály s pevnou šířkou pásma, vystačí si s šířkou pásem, které jsou k dispozici. Čím jsou kanály širší, tím do nich dokáže vtěsnat více samostatných signálů a dosáhnout tak větší přenosové rychlosti. OFDM je význačná svou odolností vůči interferencím mezi symboly a nosnými. Dokáže opravit nebo alespoň detekovat určité množství chyb vnesených do přenášené informace během přenosu. [4]

2.4. Modulace DCSK

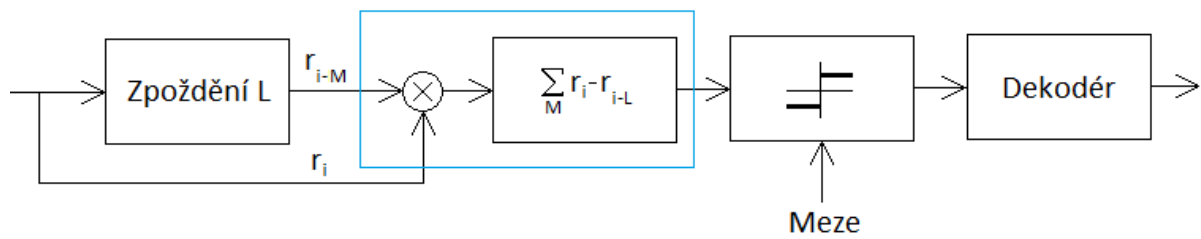
Differential chaos shift keying neboli diferenční chaotické klíčování, tato modulace byla vytvořena z důvodů odstranění synchronizace, vysíláním nemodulovaného signálu společně s modulovaným.

Při odesílání jednoho bitu se chaotickým systémem vygeneruje signál stanovené délky a ten je vyslán do přenosového kanálu. Je-li přenášena hodnota 1 vysílá se za tímto bitem jeho kopie. Je-li přenášena hodnota 0 je za tímto bitem odeslána jeho kopie sečtená s hodnotou -1. Na straně přijímače se pro získání informace obě části porovnávají. Z principu vlastností této modulace mohou být použity jakékoliv signály.

Nevýhodou této metody je nutnost použití zpožďovacích členů, které vedou k potížím při realizaci. Polovina vysílacího času je navíc určena pro vysílání referenční křivky. Jedná se o neúčinnější metodu v komunikaci využívající chaos. Jsou navrženy i modifikace např. CDSK a SCSK. [5]



Obr. 2. 4. 1 – Vysílač DCSK [5]



Obr. 2. 4. 2 – Přijímač DCSK [5]

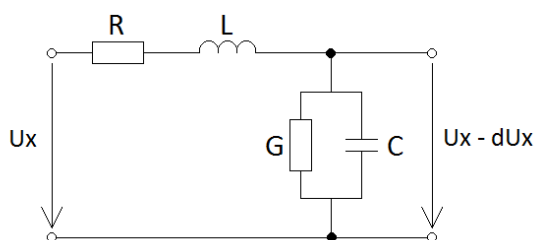
3. DISTRIBUČNÍ VEDENÍ

Přenos dat u technologie PLC je realizován prostřednictvím silového vedení, které je primárně určeno pro přenos výkonových signálů o kmitočtu 50 Hz. Pro přenos signálů o frekvenci 3 – 148,5 kHz, tak není přenosové vedení primárně určeno. Diverzifikovaná zařízení (frekvenční měniče, spínané zdroje, apod.) připojovaná do elektrické sítě jsou navíc zdrojem velmi silného rušení, které značně ovlivňuje parametry všech signálů přenášených po tomto vedení. Z hlediska vlastností se jedná o ztrátové vedení s rozprostřenými parametry.

Elektrické vedení je popsáno základními primárními parametry a vypočtenými sekundárními parametry.

3.1. Primární parametry vedení

Jsou určeny výrobcem nebo je možné je spočítat dle zjednodušených empirických vzorců. Primární parametry jsou vztaženy k délce vedení, např. $R = 0,125 \Omega / \text{km}$.



Obr. 3. 1. 1 – Náhradní schéma homogenního vedení

- **Rezistence R**

Velikost rezistence je stanovena třemi základními parametry, rezistivitou, průřezem vodiče a délkou vedení. Mimo těchto parametrů mají na velikost rezistence vliv teplota, nerovnoměrnost průřezu a spojování vodičů. Ohmický odpor drátů elektrického vedení lze počítat ze vztahu:

$$R = \frac{\rho_0 \cdot l}{S} \quad [\Omega]$$

kde: ρ_0 – měrný odpor [$\Omega \cdot m$]

l – délka vedení [km]

S – plocha průřezu vodiče [mm^2]

Vliv změny teploty je matematicky popsán vzorcem:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad [\Omega]$$

kde: R_0 – hodnota odporu při základní teplotě (např. 20 °C) [Ω]

ϑ – hodnota zvýšené teploty [$^{\circ}\text{C}$]

ϑ_0 – základní teplota [$^{\circ}\text{C}$]

α – teplotní součitel odporu [$^{\circ}\text{C}$]

V praxi se nejčastěji používá odpor na 1 km délky vedení vyhledaným v tabulkách výrobců vedení. Celkový odpor délky vedení je pak:

$$R = r_k \cdot l \quad [\Omega]$$

kde: r_k – odpor jednoho kilometru vedení z charakteristické tabulky vodičů [Ω/km]

l – délka vedení [km]

R – vypočtený odpor úměrný délce vedení [Ω]

• Indukčnost L

Časově proměnný proud, který protéká vodičem vytváří proměnný magnetický tok, který indukuje do vodiče napětí:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad [\text{V}]$$

kde: $\frac{d\phi}{dt}$ – časová změna magnetického toku [V/s]

Toto napětí působí proti změně magnetického toku a tím i proti změně proudu:

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad [\text{V}]$$

kde: L – vlastní indukčnost smyčky [H]

$\frac{di}{dt}$ – časová změna elektrického proudu [A/s]

Indukované napětí má charakter úbytku napětí na jalovém odporu. Pro střídavý proud lze úbytek na induktivní odporu vypočítat dle vztahu:

$$u = X_L \cdot I \quad [V] \quad \text{kde} \quad X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f_L \quad [\Omega]$$

kde: ω – úhlová frekvence napětí [rad/s]

f_L – frekvence napětí [Hz]

U vedení s více vodiči nedochází k indukci napětí jen v tomto vodiči, ale i v blízkosti ostatních vodičů. V případě symetrických vedení napájejících symetrickou zátěž je možné indukční vlivy vyjádřit provozní indukčností a proudem jedné fáze. V ostatních případech (např. nesouměrná zátěž) se musí indukční vlivy uvažovat odděleně, pomocí vlastní vzájemné indukčnosti a proudů všech fází.

Indukčnost vedení je dána vztahem:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d}{r} + \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_1}{8 \cdot \pi} \quad [L]$$

kde: d – osová vzdálenost [mm]

r – poloměr průřezu vodiče [mm]

μ_r – relativní permeabilita [-]

μ_0 – permeabilita vakua [H/m]

l_1 – délka vodiče [m]

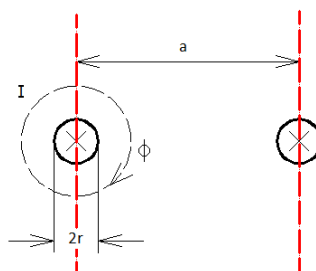
Indukčnost je uváděna stejně jako rezistence v jednotkách vztažených k délce vedení. Úpravou předchozího výrazu dostaneme: [6, 7]

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{a}{r} + 0,05 \cdot \mu_r \quad [mH / km]$$

kde: a – vzdálenost mezi vodiči [mm]

r – poloměr vodiče v [mm]

μ_r – relativní permeabilita [-]



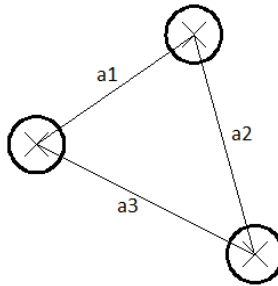
Obr. 3. 1. 2 – Vzájemná indukčnost mezi stejně vzdálenými vodiči [8]

Není-li vzdálenost mezi vodiči stejná, počítá se dle:

$$a = \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad [mm]$$

kde: a – střední vzdálenost vodičů [mm]

a_1, a_2, a_3 – vzdálenosti vodičů [mm]



Obr. 3. 1. 3 – Vzájemná vzdálenost mezi různě vzdálenými vodiči [8]

- **Kapacita C**

Kapacitu vodiče v délce 1 km lze vypočítat podle empirického vztahu: [6, 7]

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{ds}{r}} \cdot 10^{-6} \quad [\mu F]$$

kde: ds – střední vzdálenost mezi vodiči [mm]

r – poloměr vodiče [mm]

Kapacita kabelu je přibližně 50 – 55 x větší než u venkovního vedení.

Úhrnná kapacita trojfázového vedení se vzdálenostmi mezi vodiči a_1, a_2, a_3 vypočítáme, dosadíme-li do rovnice pro výpočet kapacity samostatného vodiče za ds vztah:

$$a = \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad [mm]$$

kde: a_1, a_2, a_3 – vzdálenosti vodičů [mm]

Všechny vodiče v sestavě nemají stejné podmínky. Jiné vlastnosti mají vodiče ve střední poloze, jiné vlastnosti vodiče krajní. Aby se rozdíly vlastností na vodičích minimalizovaly mění se po určitých vzdálenostech jejich poloha tak, aby se vystřídaly ve všech polohách. [8]

- **Svodový odpor G**

Vlivem znečištění izolátorů a koróny teče z vedení do země elektrický proud. Ke koróně (sršení) dochází tehdy, překročí-li elektrická pevnost na povrchu vodiče elektrickou pevnost vzduchu. Pro vedení nn a vn jsou tyto ztráty zanedbatelné.

Svodový proud a ztráty korónou se ve vedení vvn určují podle empirických vzorců. Podstatný vliv na zmenšení svodového odporu mají povětrnostní vlivy.

Např. ztráty způsobené na 1 km vedení 10 kV korónou a svodem se při nepříznivém počasí (hustý déšť a vítr) pohybují mezi 20 až 35 W/km.

Důležitým parametrem kabelu je svod dielektrika, který je závislý na elektrické pevnosti izolace okolo vodičů.

3.2. Sekundární parametry vedení

Sekundární parametry neboli parametry odvozené z parametrů základních. Vedení napájené ze zdroje harmonických signálů je v ustáleném stavu libovolném místě vedení harmonickými funkcemi času, jejichž amplitudy a počáteční fáze závisí na vzdálenosti od počátku. [9]

- **Induktivní reaktance X**

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L \quad [\Omega]$$

kde: f – frekvence [Hz]

ω – uhlová rychlost [rad/s]

L – indukčnost [H]

- **Kapacitní susceptance B**

$$B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C = \omega \cdot C \quad [S]$$

kde: f – frekvence [Hz]

ω – uhlová rychlost [rad/s]

C – kapacita [F]

- **Podélná impedance vedení Z_k**

$$Z = R + jX \quad [\Omega/km]$$

kde: R_k – rezistence vedení na jednotku délky [Ω/km]

X_k – induktivní reaktance vedení na jednotku délky [Ω/km]

- **Příčná admittance vedení Y_k**

$$Y = G + jB \quad [S/km]$$

kde: G_k – konduktance vedení na jednotku délky [S/km]

B_k – kapacitní susceptance vedení na jednotku délky [S/km]

- **Měrná míra přenosu γ**

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} \quad [S]$$

kde: α – reálná část, měrný útlum [dB/km]

β – imaginární část, měrný fázový posuv [rad/km]

- **Vlnová impedance vedení Z**

$$Z = \operatorname{Re} Z + j \operatorname{Im} Z = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad [\Omega]$$

kde: $\operatorname{Re} Z$ – reálná část [Ω]

$\operatorname{Im} Z$ – imaginární část [Ω]

4. CHYTRÉ SÍŤE - SMART GRID

Myšlenka chytrých sítí je poměrně zastaralá, v podstatě se jedná o co možná nejefektivnější a nejekonomičtější využití elektrické energie.

S přibývajícím množstvím soukromých výroben elektrické energie, ať už se jedná o větrné elektrárny, elektrárny na biomasu nebo neustále na jedné straně chválené, na straně druhé zatracované fotovoltaické elektrárny, které vyrábí elektrickou energii nepravidelně, nárazově je nutné přijít s koncepčním řešením pro regulaci takovýchto zdrojů elektrické energie.

Celý systém ovšem není založen jen na regulaci výroben elektrické energie, ale i na regulaci spotřeby elektrické energie domácností a průmyslu.

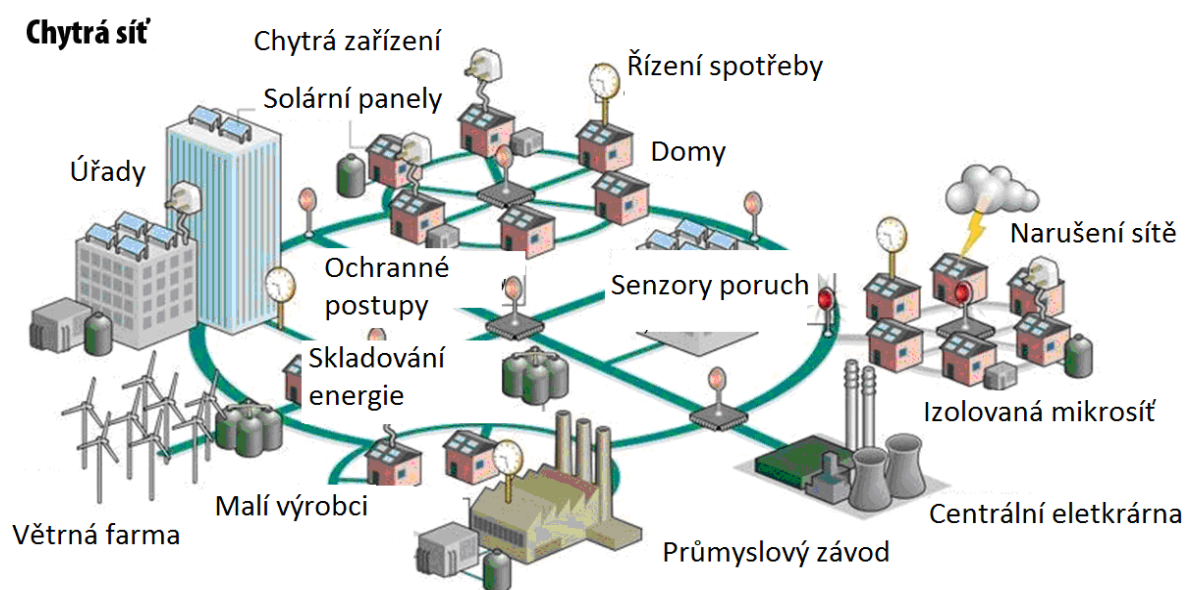
K regulaci spotřeby odběratelů elektrické energie se začínají vyměňovat zastaralé, mechanické elektroměry za elektroměry statické s komunikačním rozhraním. Cílem výměn elektroměrů je umožnit komunikaci mezi distributorem a odběratelem. [10]

V současné době je distributorem elektrické energie řešen přebytek energie v síti spouštěním systému HDO (hromadné dálkové ovládání). Tento systém není zrovna ideální jelikož se zapíná celoplošně pro vytyčenou část prakticky ve stejných časových intervalech. Tyto intervaly je možno vyhledat na webových stránkách distributorů elektrické energie. Tím, jak se však diferencuje a decentralizuje výroba elektrické energie po území České republiky, systém HDO pomalu pozbývá efektivnosti.

Moderní systém by měl pracovat na nepřetržité komunikaci mezi odběratelem elektrické energie a dispečinkem pro danou energetickou oblast. V této oblasti může být libovolné množství různých výroben elektrické energie, které v duchu tržního hospodářství chtějí vyrábět co možná největší množství elektrické energie. Co s takovou energií není - li zrovna adekvátní spotřeba?

Zde nabývá na významu systém chytré sítě. Tento systém by měl v ideálním případě umožňovat odběrateli elektrické energie rozhodnout se, zda chce v tomto časové intervalu od dodavatele odebírat elektrickou energii za nižší cenu. Tento systém je tedy daleko propracovanější než systém HDO. V budoucnu po zdokonalení kapacitorů a podobných úložišť elektrické energie by měl být systém

smart grid schopen řídit i akumulaci elektrické energie. Pro správnou funkci systému je nutné, aby i odběratelé byli vybaveni "chytrými" systémy, které umožní takové toky elektrické energie. Pro správné fungování systémů je nutná dokonalá informovanost systému o technických vlastnostech odběratele a výrobce. Koncept systému "chytré" sítě byl vytvořen i pro ostatní energetické zdroje a předpokládá začlenění měření spotřeb plynu, tepla apod.



Obr. 4. 1. 1 - Chytrá síť [10]

5. PLC – SIGNÁLOVÁ VAZBA

5.1. Signálové vazební členy

Komunikace PLC je realizována na vedení tzv. poslední míle neboli na části vedení, která se nachází za distribučním transformátorem s velikostí sekundárního napětí 400V. V prostoru trafostanice je umístěno zařízení pro příjem a vysílání dat.

Distribuční transformátor tvoří pro vysokofrekvenční komunikaci po silovém vedení nepřekonatelnou překážku, přes kterou nelze datový signál přenést. Teoreticky by bylo možné transformátor přemostit speciálním zařízením – vysokofrekvenčním transformátorem izolovaným od vedení oddělovacími kondenzátory. V praxi se však v trafostanicích instaluje modul GSM, prostřednictvím, kterého jsou získaná data ze zařízení (elektroměrů) odesílána na dispečink energetiky.

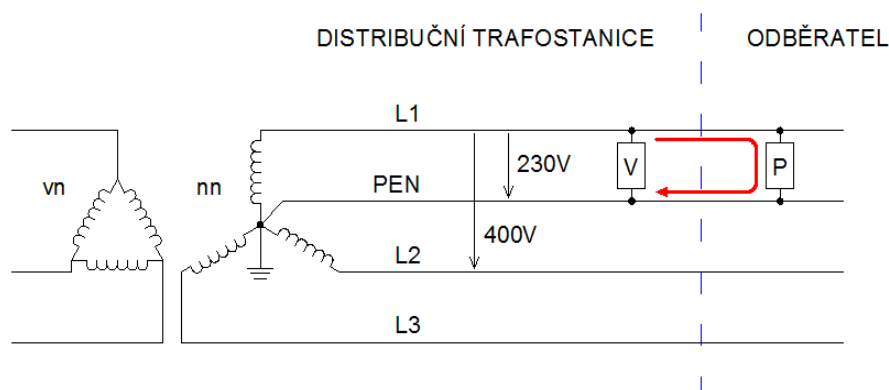
Elektrická energie je přenášena prostřednictvím třífázového rozvodu 400V. Z distribuční trafostanice je elektrický rozvod realizován 4 – vodičovou soustavou TN – C (L1, L2, L3, PEN). PLC datový signál je většinou injektován pouze do jedné napájecí fáze.

V případech, kdy má odběratel zřízenou třífázovou přípojku, nevzniká z hlediska signálového průchodu žádný problém. Přijímač se umístí na fázi, na které je v distribuční stanici připojen vysílač.

Jiná situace je v případech, kdy má odběratel zřízenou pouze jednofázovou přípojku (typické pro panelákové byty). V takovýchto případech se pro přemostění komunikačního signálu musí použít vysokofrekvenční filtry. Transformátor je svou konstrukcí určen k přenosu signálů o frekvenci 50 Hz, z hlediska komunikace PLC se jeho signálový útlum pohybuje v rozmezí 20 - 40 dB/dek v závislosti na provozním stavu. V častých případech dochází ke vzájemné kombinaci signálů PLC a šumem distribuční sítě, které jsou příčinou výpadku komunikace. [11]

5.2. Přímá fázová komunikace

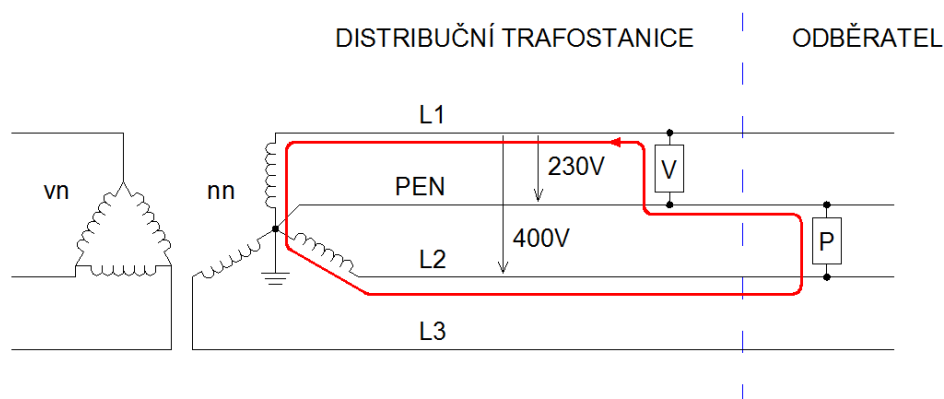
Pokud na vedení nedochází k častým poklesům napětí, způsobených častým spínáním elektrických zařízení (motory, zářivky) a přenosová cesta mezi vysílačem a přijímačem má malý útlum, představuje toto zapojení nejlepší možné řešení.



Obr. 5. 2. 1 – Přímá fázová komunikace [11]

5.3. Mezifázová komunikace bez spojení fází

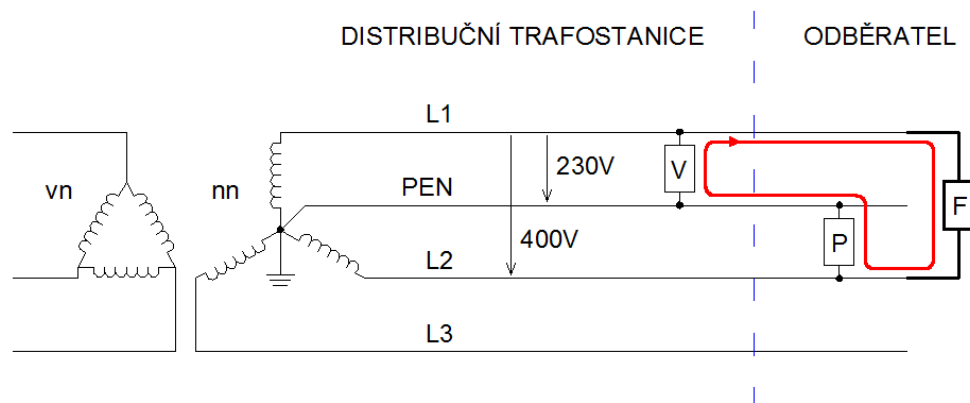
V instalacích, kde je elektrická přípojka řešena jednofázově, nastává problém s přenosem signálu. Na Obr. 5. 3. 1 je znázorněno zapojení, kde je vysílač zapojen mezi fází L1 a PEN a přijímač mezi fází L2 a PEN. Prosté spojení fází v tomto případě je nerealizovatelné, vznikl by mezifázový zkrat. Signál se od vysílače šíří přes sekundární vinutí distribučního transformátoru, kde dochází k značnému útlumu v řádech desítek decibel. Komunikace PLC je v tomto případě nerealizovatelná.



Obr. 5. 3. 1 – Mezifázová komunikace bez spojení fází [11]

5.4. Mezifázová komunikace se spojením fází

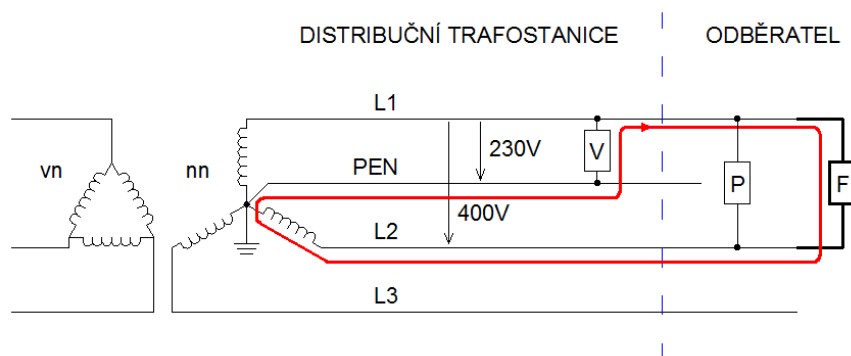
Přenos dat mezi zařízeními zapojenými na jiných fázích je v praxi realizován spojovacím filtrem F. Filtr představuje pásmovou propust pro signály PLC, tím nedochází k přenosu signálu přes distribuční transformátor a tedy značným útlumům.



Obr. 5. 4. 1 – Mezifázová komunikace se spojením fází [11]

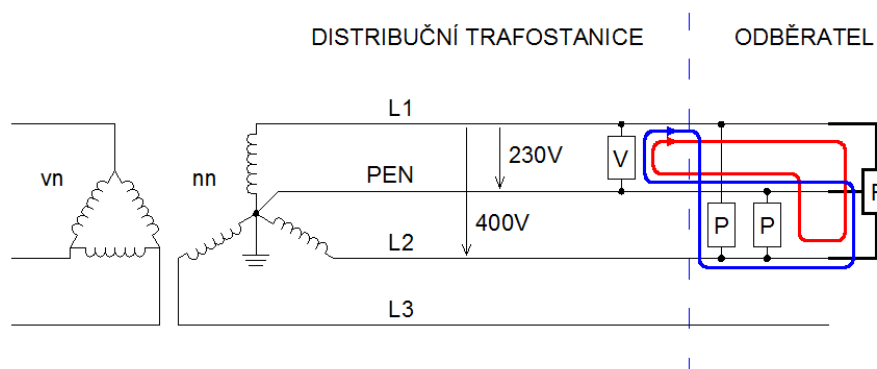
5.5. Zařízení mezi fázemi

Pokud je přijímač instalován mezi fázemi, představuje spojovací filtr pro signál PLC zkrat. Signál se tak do přijímače nedostane.



Obr. 5. 5. 1 – Zařízení mezi fázemi – zkrat pro datový signál [11]

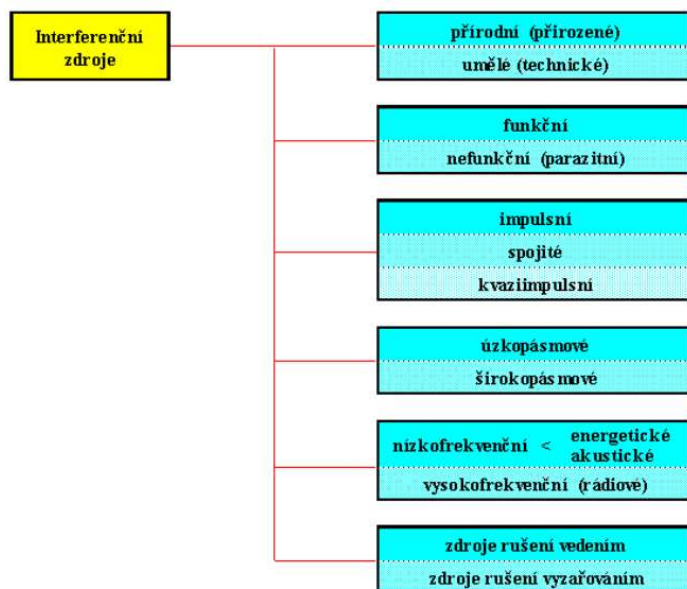
Řešením tohoto problému je instalace třívorkového spojovacího filtru, který fáze signálově propojí. Nejvhodnějším místem pro instalaci spojovacího filtru je uvnitř elektroměrového pilíře.



Obr. 5. 5. 2 – Zařízení mezi fázemi – využití třívorkového filtru [11]

6. NEJČATĚJŠÍ ZDROJE RUŠENÍ V ELEKTRICKÉ SÍTI

6.1. Klasifikace rušivých signálů a jejich zdrojů



Obr. 6. 1. 1 – Rozdělení zdrojů rušení [12]

- Umělé zdroje rušení
Jsou způsobeny technickou činností člověka
- Přírodní zdroje rušení
Těmto typům rušení nemůžeme zabránit, v mnoha případech jim však můžeme předcházet
- Funkční zdroje rušení
Při svém provozu produkují rušivé signály, které ovlivňují správnou funkci zařízení jiných
- Nefunkční zdroje rušení
Při svém provozu produkují rušivé signály, které neovlivňují správnou funkci zařízení jiných
- Impulsní rušení
Je charakterizováno posloupností jednotlivých pulsů nebo přechodovými jevy
- Spojité rušení

Opak impulsního rušení, působí kontinuálně na rušené zařízení

- Kvazi-impulsní rušení

Kombinace impulsního a spojitého rušení

- Úzkopásmové

Produkují je zejména užitečné signály rozhlasových a televizních zařízení

- Širokopásmové

Produkují je zejména průmyslové signály (impulsní, spojité nebo jejich kombinace). Všechna přírodní rušení jsou také širokopásmová

- Nízkofrekvenční

Energetické nízkofrekvenční rušení působí na energetickou napájecí soustavu v pásmu do 2 kHz, ovlivňuje především zařízení, která jsou citlivá na tvar napájecího napětí

Akustické nízkofrekvenční rušení ovlivňuje především funkci přenosových zařízení informačních systémů jako jsou telefony, toto rušení produkují téměř všechny energetické zdroje, radary, apod.

- Vysokofrekvenční

Toto rušení je v pásmu 10 kHz – 40 GHz, patří téměř všechny zdroje rušení, neboť se nacházejí v tomto vytyčeném pásmu

Z obecného hlediska se rušivý signál šíří, jak prostorem, tak po vedení. Podle toho, který způsob šíření převažuje se rozdělují na zdroje rušení vedením nebo vyzařováním.

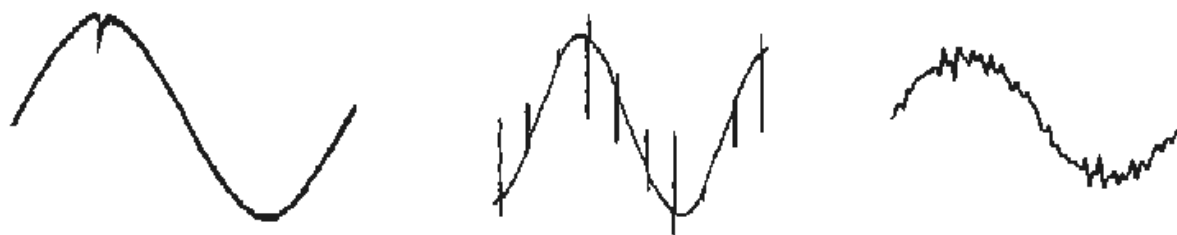
6.2. Průmyslové zdroje rušení

Z periodických rušivých signálů jsou nejdůležitější harmonické složky kmitočtu 50 Hz, které jsou produkovány již samotnými generátory elektrické energie. Na nelineárních impedancích tak vznikají další harmonické složky. V současnosti jsou největšími zdroji rušení polovodičové měniče velkých výkonů, které produkují v napájecí síti harmonické složky až do 30 MHz.

V sítích vysokého a velmi vysokého napětí dochází velmi často k tlumeným vysokofrekvenčním oscilacím s kmitočtem do několika MHz a amplitudou 100 – 1000 V. Způsobeny jsou zapínáním energetických linek. Pro svůj vysoký kmitočet se tyto oscilace šíří až do vedení nn.

Dalším zdrojem rušení v sítích nn jsou především jističe, stykače a relé. Při jejich vypínání vznikají velmi strmé pulsy dosahující až několika kV.

Velmi výraznými zdroji v sítích nn jsou usměrňovače diodového typu a tyristorové řídicí členy. Tato zařízení spínají velké proudy, takže zde vznikají periodicky se opakující impulsy, které značně deformují napájecí napětí. Kmitočtové spektrum toho rušení dosahuje až několika desítek MHz. Jsou-li tato zařízení provozována bez patřičných filtrací mohou způsobit zhroucení energetické sítě. [12]



Obr. 6. 2. 2 – Deformace síťového napětí vlivem diodových usměrňovačů a tyristorových měničů [12]

7. METODY VAZBY A ŠÍŘENÍ SIGNÁLU PO VEDENÍ

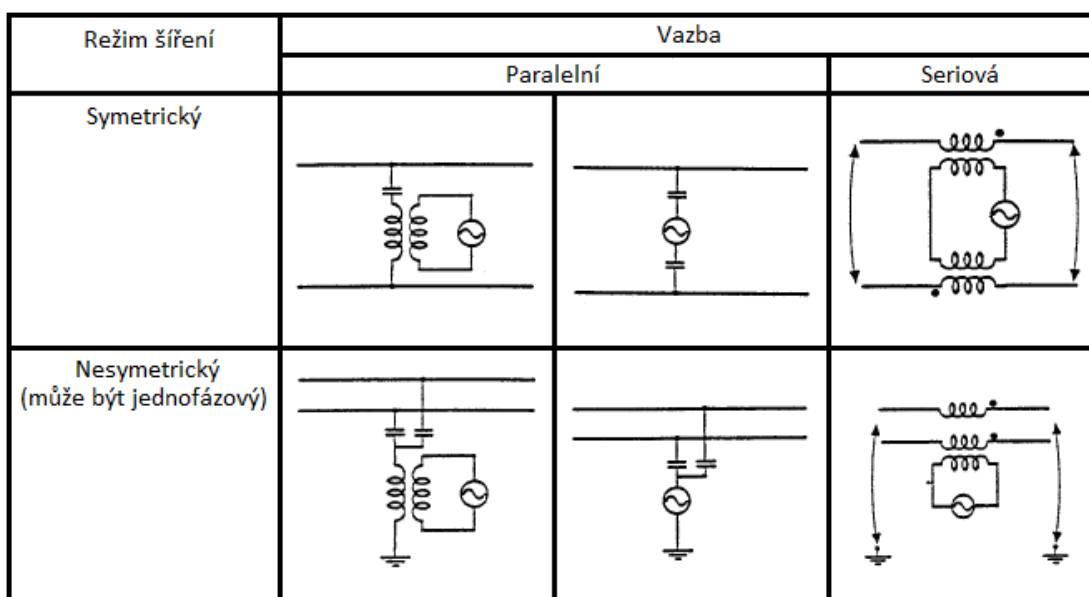
Metody vazby pro injektování signálů do energetického vedení při zohlednění symetrického a nesymetrického režimu šíření jsou zobrazeny na Obr. 7. 1. 1.

7.1. Paralelní vazba

Signál je injektován do silnoprůdného vedení mezi fázový a nulový vodič (symetrický režim) nebo mezi fázový / nulový vodič proti zemi.

7.2. Sériová vazba

Tato vazba je realizována pomocí magnetického vazebního obvodu mezi fází a primárním vinutím, který je vhodný pro přenos maximálního výkonu při provozním kmitočtu. [13]



Obr. 7. 1. 1 – Režimy vazby a šíření [13]

8. POPIS KOMUNIKACE PO ELEKTRICKÉM VEDENÍ , KMITOČTOVÁ PÁSMA

Hlavní část diplomové práce se zabývá simulací přenosu digitálních signálů různých frekvencí po energetickém vedení. Přenášený signál musí splňovat podmínky uvedené v normách ČSN EN 50065. V normách jsou uvedeny kritéria za jakých smí být komunikace provozována.

8.3. Kmitočtová pásma a jejich klasifikace

- **Pásmo od 3 kHz do 95 kHz**

Toto pásmo je určeno pro dodavatele elektrické energie a jejich oprávnění.

- **Pásmo od 95 kHz do 148,5 kHz**

Toto pásmo je určeno pro odběratelské použití. Zařízení pracující v tomto kmitočtovém pásmu vyžadují většinou povolení příslušných orgánů.

- **Dílčí pásmo od 95 do 125 kHz**

Použití tohoto vymezeného pásma nevyžaduje protokol přístupu.

- **Dílčí pásmo od 125 kHz do 140 kHz**

Použití tohoto pásma vyžaduje protokol přístupu. Požaduje se, aby signály vysílané systémy pracujícími v tomto dílčím pásmu měly definované spektrální rozložení a takovou maximální dobu trvání, aby jejich nosná mohla být detekována jinými zařízeními v této síti. Výskyt tohoto charakteristického signálu v síti nad minimální úrovní indikuje, že se kmitočtové dílčí pásmo právě používá. Tento stav se nazývá „používané pásmo“. Zařízení s čekajícím vysíláním nemohou vysílat, je-li pásmo používáno a dokud se pásmo neuvolní na minimální časový úsek. Každé zařízení schopné vysílání musí být vybaveno signálem detektorem, který musí indikovat používání dílčího pásma. Dílčí používané pásmo je stav, kdy jakýkoliv signál s efektivní hodnotou nejméně 86 dB (μV) je přítomen kdekoli v kmitočtovém pásmu 131,5 kHz až 133 kHz alespoň 4ms.

- **Dílčí pásmo od 140 kHz do 148,5 kHz**

Použití tohoto vymezeného pásma nevyžaduje protokol přístupu. [13]

9. NÁVRH MODELU VEDENÍ

9.1. Obecný popis přenosu dat po energetickém vedení

Práce se zabývá simulací přenosu dat na energetickém vedení východních Čech, respektive přenosem dat na vedení 400V, někdy též označovaném termínem „poslední míle“. Jedná se o část energetického vedení, začínající na sekundárním vinutí distribučního transformátoru a končící na svorkách elektroměru odběratele elektrické energie.

V trafostanici 35 kV/ 0,42 kV je umístěn vysílač / přijímač datového signálu pracující v kmitočtovém rozsahu 3 – 95 kHz, dle normy ČSN 500 65. Prostřednictvím tohoto vysílače / přijímače je do energetického vedení 0,4 kV injektován a přijímán datový signál.

Signál o takto vysoké frekvenci není možné přes distribuční transformátor přenést na primární stranu a po vedení 35 kV jej přenášet dále. Proto v trafostanici musí být realizováno rozhraní PLC / GSM, prostřednictvím, kterého jsou data odesílána na dispečink energetických závodů.

Přístup GSM je ve většině případů již v distribučních trafostanicích realizován z důvodu dálkového ovládání, v takovém případě stačí stávající systém doplnit převodníkem PLC / GSM.

9.2. Blokové schéma energetického vedení

Model vedení 35 kV je v simulaci zanedbán z důvodu velké reaktance transformátoru, signál PLC přes transformátor není možné přenést.

Model transformátoru s přepočtenými parametry na sekundární stranu umožnil sjednocení celého vedení do jedné napěťové hladiny 230V / 50 Hz. V modelu není uvažováno s nelineárními vlastnostmi magnetického obvodu.

Model kabelu AYKY 3 x 240 mm² + 120 mm² je vytvořen na základě homogenního vedení s rozprostřenými parametry. Hodnoty parametrů podélné a příčné větve jsou dosazeny na základě výpočtů a katalogových listů. Tento kabel je standardním typem používaným při realizacích nn rozvodů.

Štítkové hodnoty distribučního transformátoru:

Jmenovitý výkon:	400 kVA
Jmenovité napětí U_{JM} VN / NN:	35 / 0,42 kV
Jmenovitý proud I_{JM} VN / NN:	6,598 / 549,86 A
Výkon naprázdno P_0 :	610 W
Výkon nakrátko P_K :	5100 W
U_K :	6 %

Naměřené hodnoty distribučního transformátoru:

(vstupní hodnoty pro výpočet)

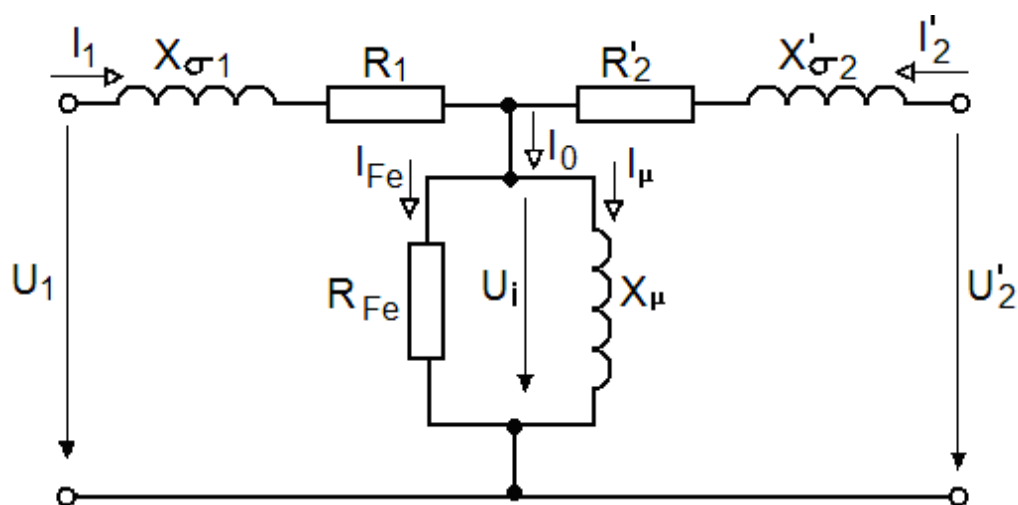
Měření naprázdno:

U_0 : 420 V, I_{0A} : 3,089 A, P_0 : 661,9 W

Měření nakrátko:

U_K : 1982 V, I_K : 6,598 A, P_K : 5413 W

Výpočet náhradního schématu transformátoru byl proveden dle literatury: [14]



Obr. 9. 2. 1 – Náhradní schéma transformátoru

Pro výpočet parametrů R_1 , $X_{\sigma 1}$, ($L_{\sigma 1}$) R'_2 , $X'_{\sigma 2}$, ($L'_{\sigma 2}$) vycházíme z náhradního schématu, kde jsou sekundární svorky spojeny nakrátko.

$$R'_2 \cong 0,003\Omega$$

$$X_{\sigma 1} \Rightarrow L_{\sigma 1} = 0,28H$$

$$X'_{2\sigma} \cong 0,013\Omega$$

$$X_{2\sigma}' \Rightarrow L_{2\sigma} = 0,413mH$$

Pro výpočet prvků R_{Fe} a X_{μ} použijeme upravené náhradní schéma stavu naprázdno. Prvky R_1 , $X_{\sigma 1}$, R_2 , $X_{\sigma 2}$ se zanedbávají.

$$X_{\mu} \cong 51063 \Omega$$

$$X_{\mu} \Rightarrow L_{\mu} = 162,5 H$$

$$R_{FE} \cong 54388 \Omega$$

kde:

R_1 – odpor primárního vinutí transformátoru [Ω]

R_2 – přepočítaný odpor sekundární vinutí transformátoru [Ω]

$X_{1\sigma}$ -induktance primárního vinutí transformátoru [Ω]

$L_{1\sigma}$ -indukčnost primárního vinutí transformátoru [H]

$X_{2\sigma}$ – přepočítaná indukance sekundárního vinutí transformátoru [Ω]

$L_{2\sigma}$ – přepočítaná indukčnost sekundárního vinutí transformátoru [H]

X_{μ} – magnetizační reaktance příčné větve transformátoru [Ω]

L_{μ} – indukčnost příčné větve transformátoru [H]

R_{FE} – odpor příčné větve transformátoru [Ω]

9.4. Parametry kabelového vedení AYKY

AYKY 3 x 240 mm² + 120 mm²

Katalogové hodnoty kabelu (dle nkt cables): L: 0,24 mH / km, R: 0,125 Ω / km

Vypočtené hodnoty: Empirický výpočet kapacity kabelu:

$$C = \frac{0,024}{\log \frac{2 \cdot 18,75}{26,5}} \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 7,95 \mu F / km$$

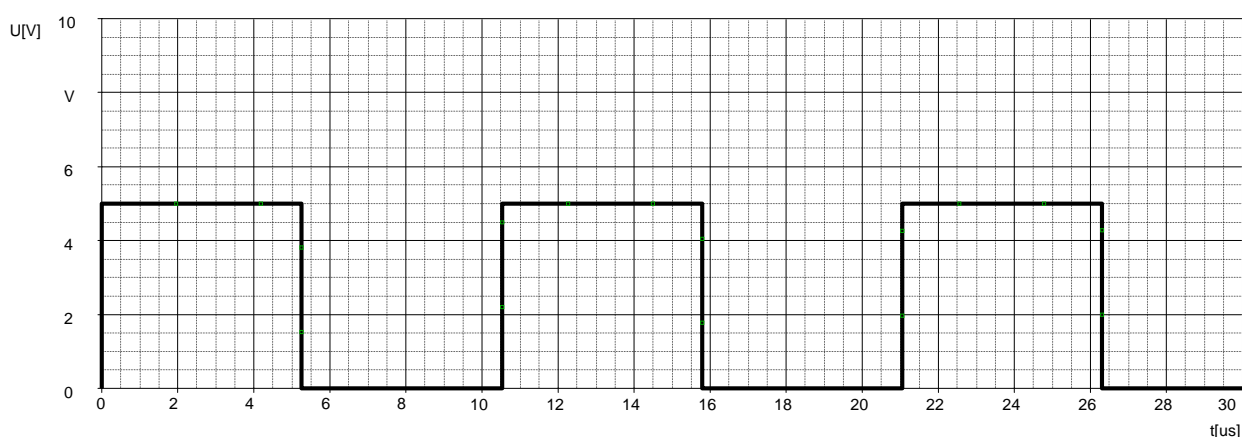
10. SIMULACE CHOVÁNÍ PŘENÁŠENÉHO DIGITÁLNÍHO SIGNÁLU

Přenos periodicky se opakujícího digitálního signálu o frekvencích 95, 50 a 3 kHz byl simulován na modelovém energetickém vedení 230 V / 50 Hz v proměnných délkách 500, 1000, 2000 a 3000 m. Toto vedení reprezentuje úsek mezi distribučním transformátorem a odběratelskou přípojkou bez dalšího rozvětvení. V grafech zobrazujících chování digitálního signálu na energetickém vedení je zobrazen vliv délky a zatížení vedení na přenos signálu. Simulace byla prováděna i na vedení bez připojeného napětí 230 V / 50 Hz.

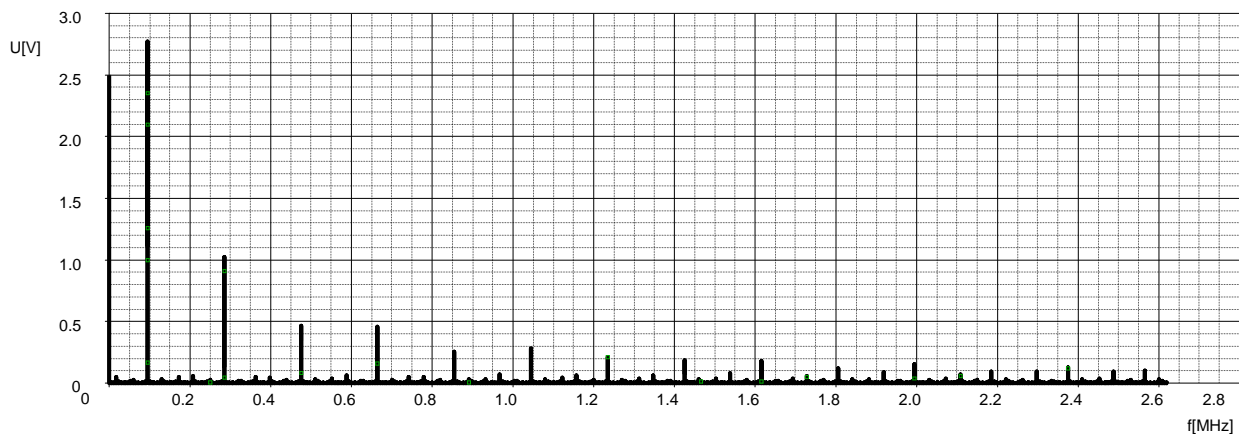
Simulace přenosu signálu při krajních stavech energetického vedení simulovány nebyly, v praxi tento stav nastat nemůže. Jedná se především o zkrat na energetickém vedení, kde včas zapůsobí zkratová ochrana tohoto vedení. Druhý stav - žádný odběr v síti v běžné praxi také nenastane, vliv na to mají kromě odběratelů i ztráty energetického vedení. Proměnná zátěž byla měněna v rozsazích 100 a 10000 Ω , $\cos \varphi = 1$. Simulace byla prováděna s využitím parametrické a transientní analýzy programu PSpice.

10.1. Přenos digitálního signálu 95 kHz

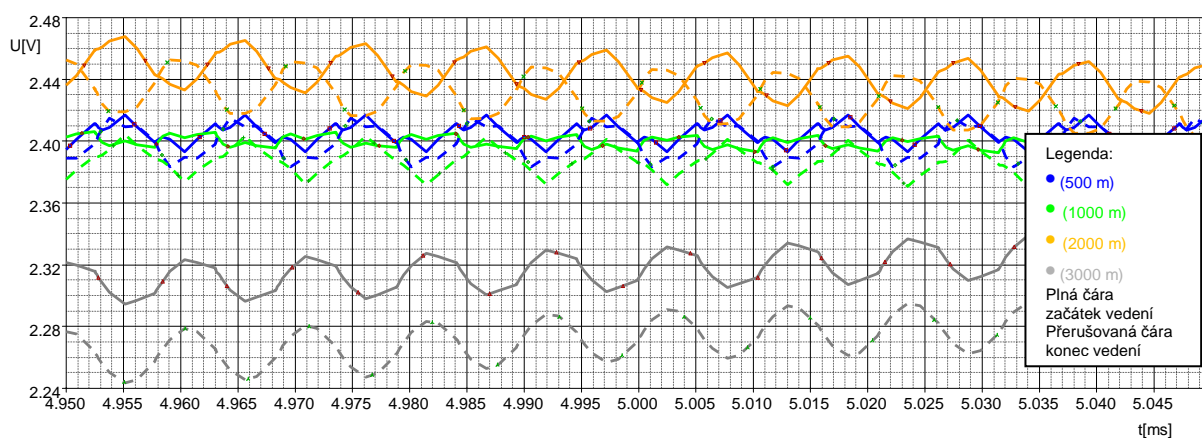
Do energetického vedení byl injektován periodický, digitální signál, který je zobrazen na obr. 10.1.1



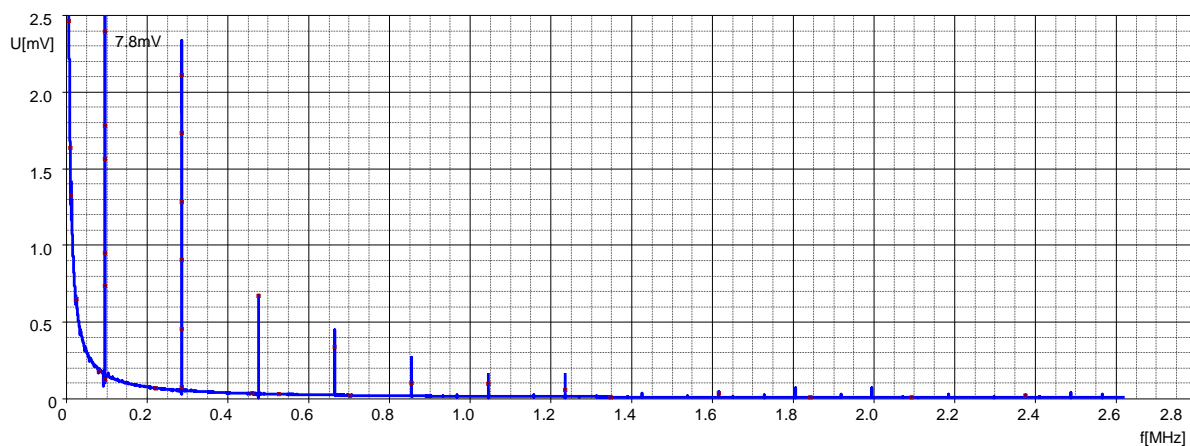
Obr. 10.1.1 - Časový průběh digitálního signálu na výstupu z vysílače



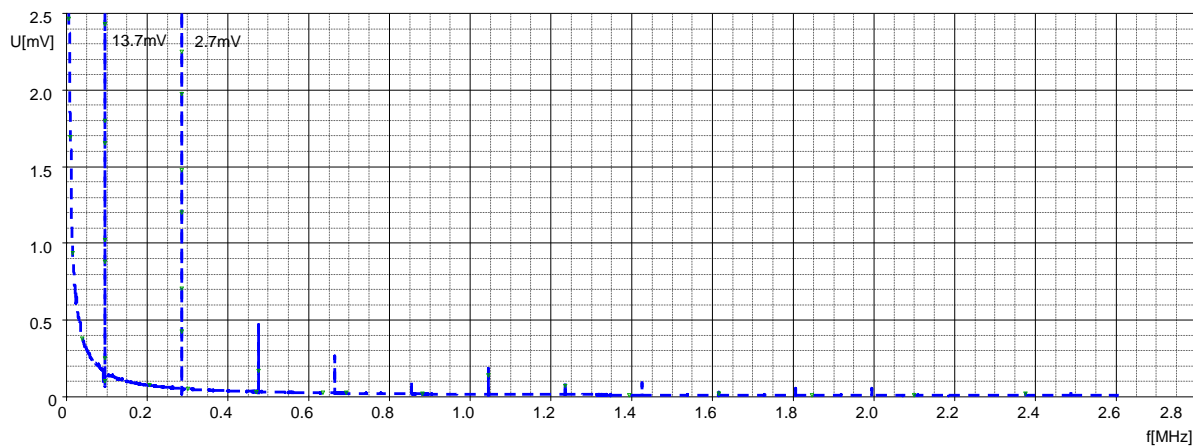
Obr. 10.1.2 - Frekvenční spektrum digitálního signálu na výstupu z vysílače



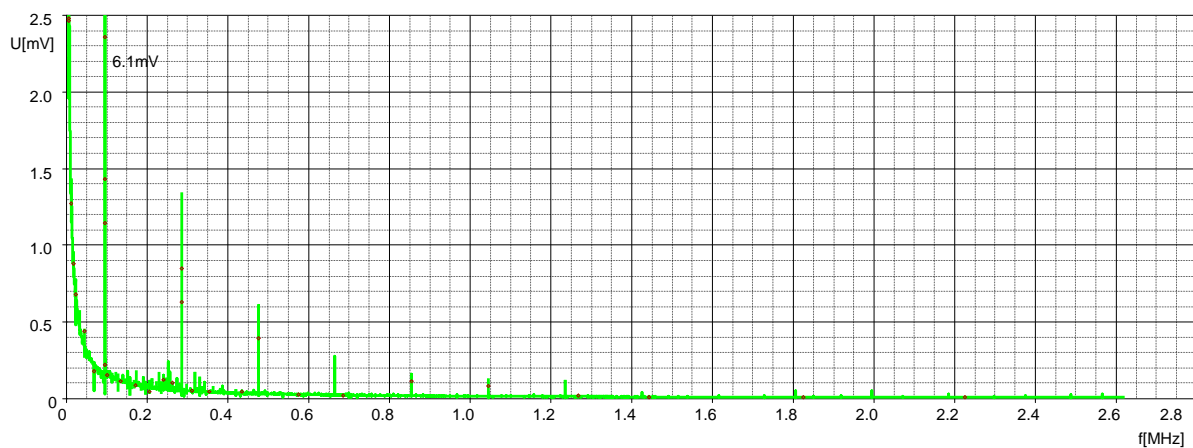
Obr. 10. 1. 3 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω



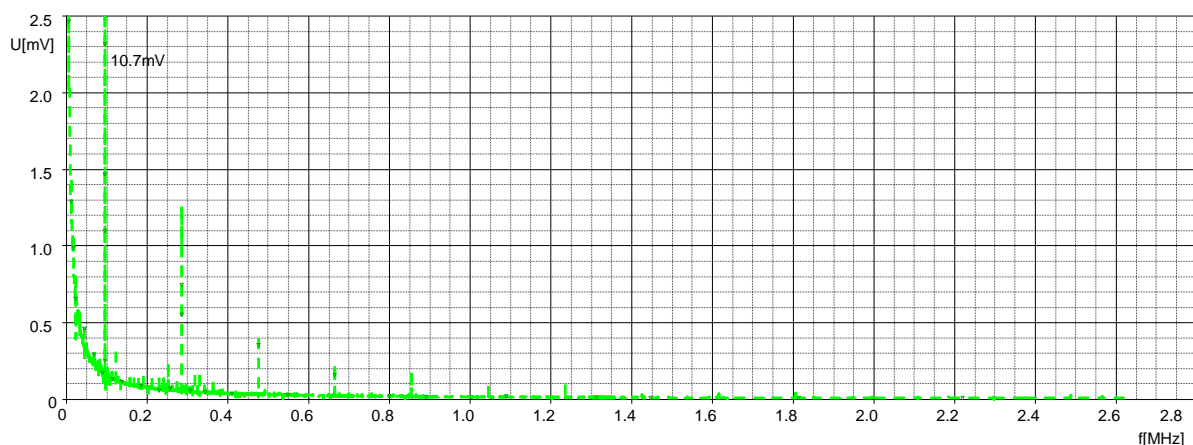
Obr. 10. 1. 4 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



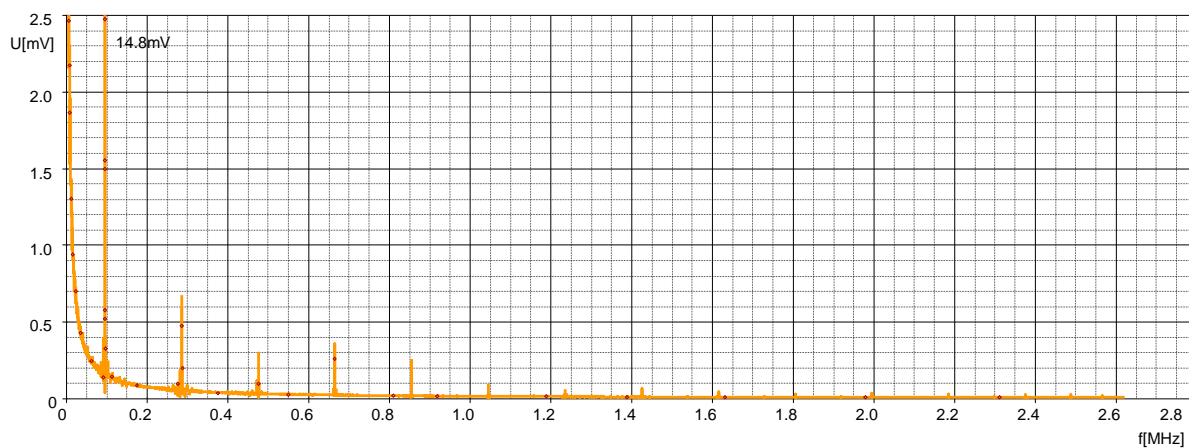
Obr. 10. 1. 5 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



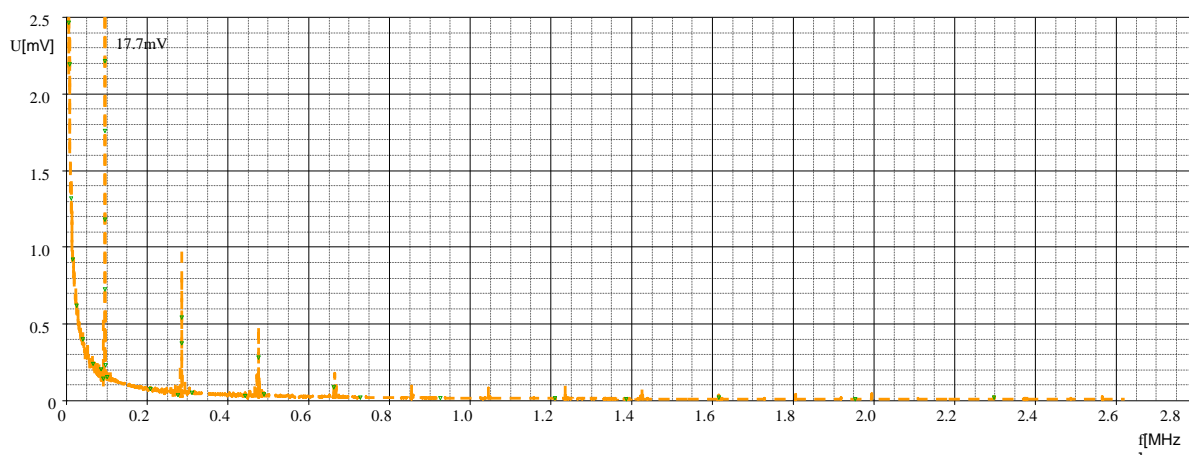
Obr. 10. 1. 6 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



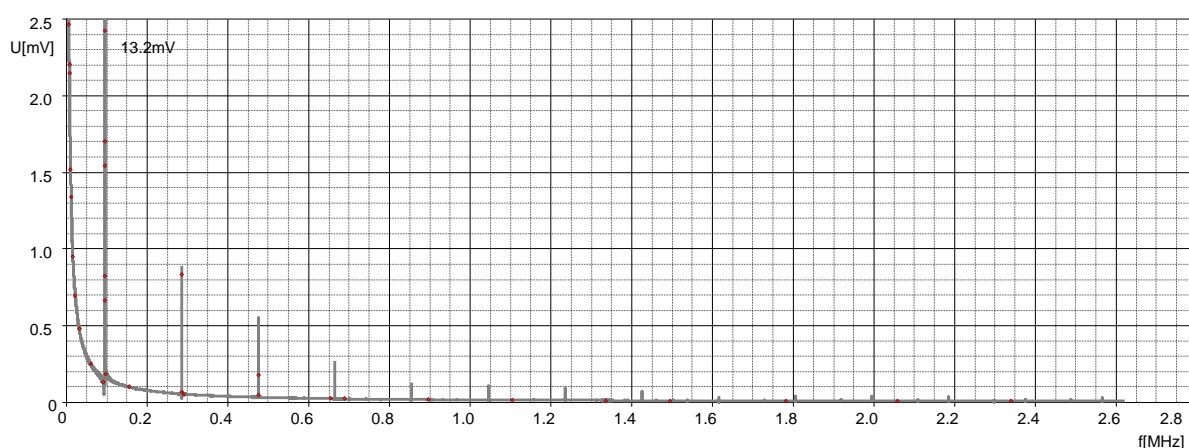
Obr. 10. 1. 7 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



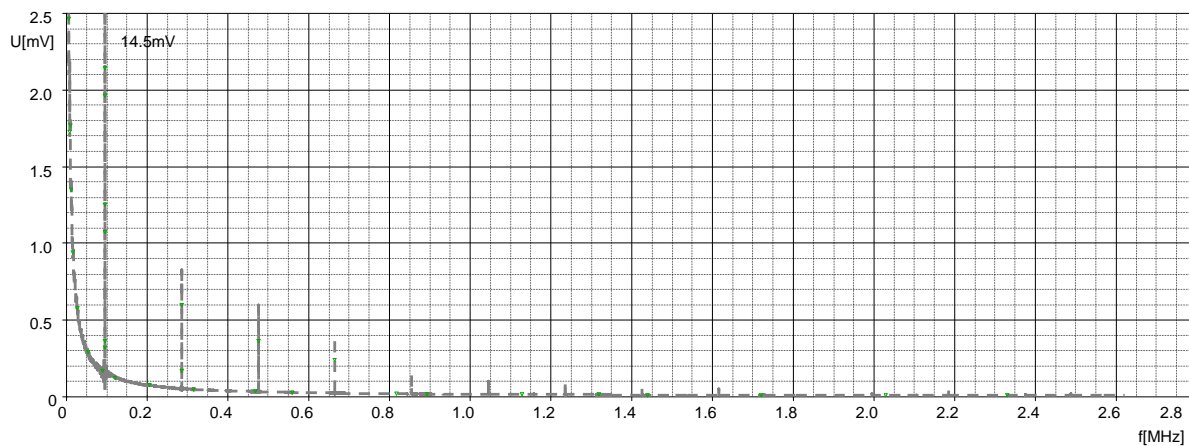
Obr. 10. 1. 8 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



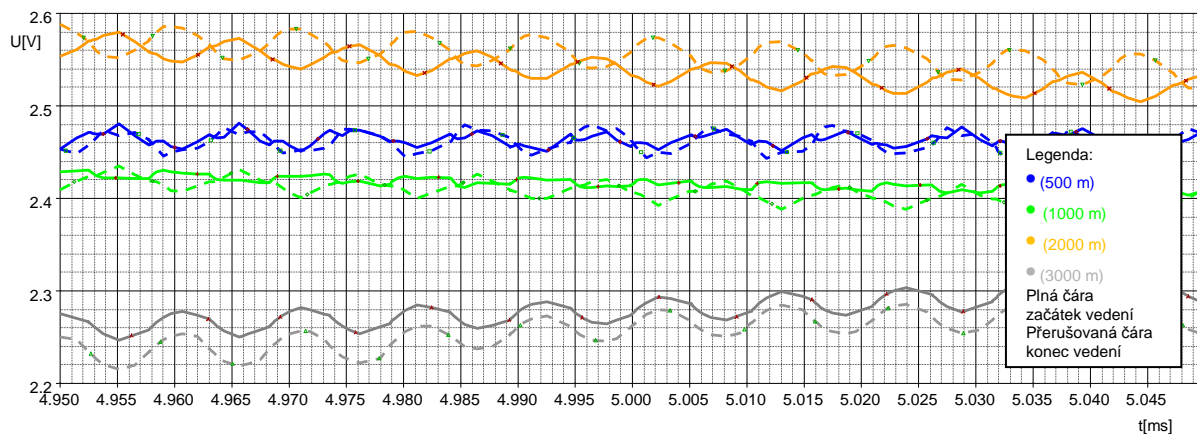
Obr. 10. 1. 9 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



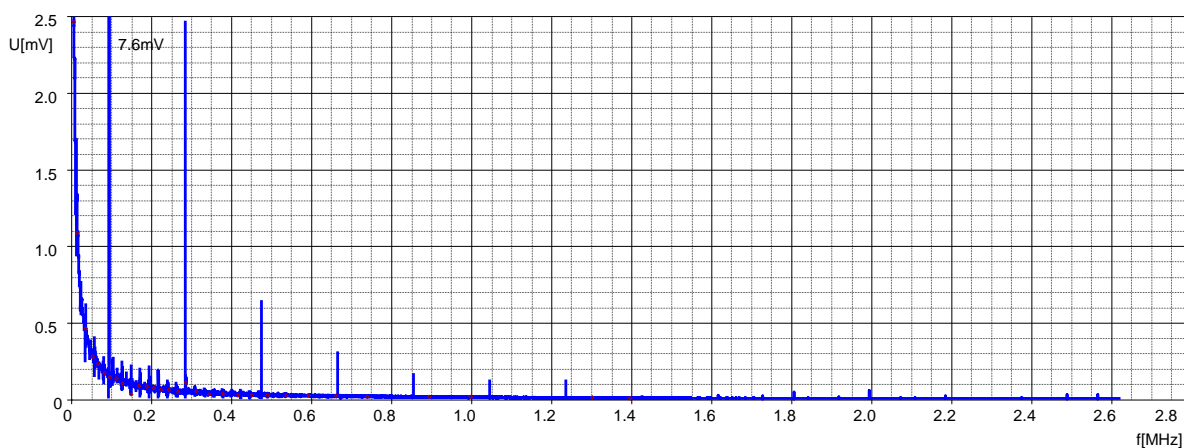
Obr. 10. 1. 10 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



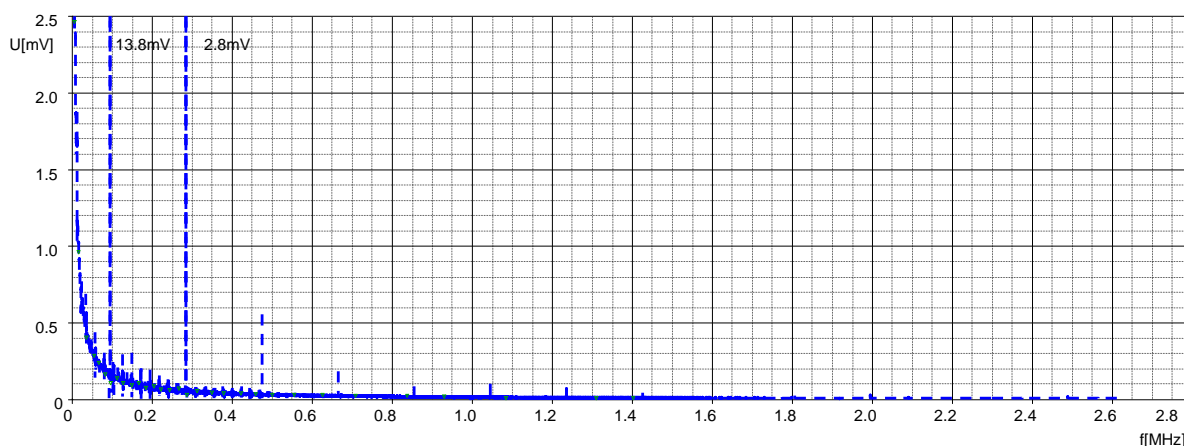
Obr. 10. 1. 11 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



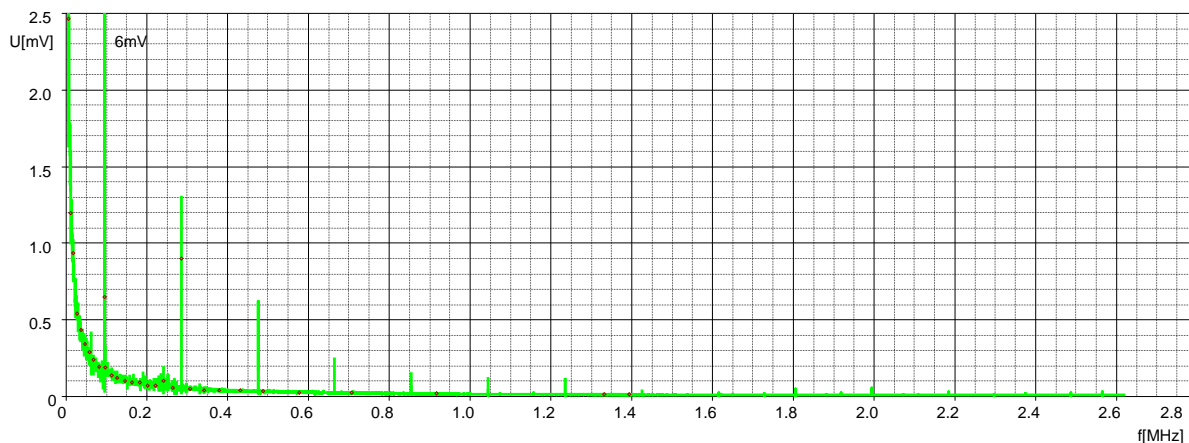
Obr. 10. 1. 12 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω



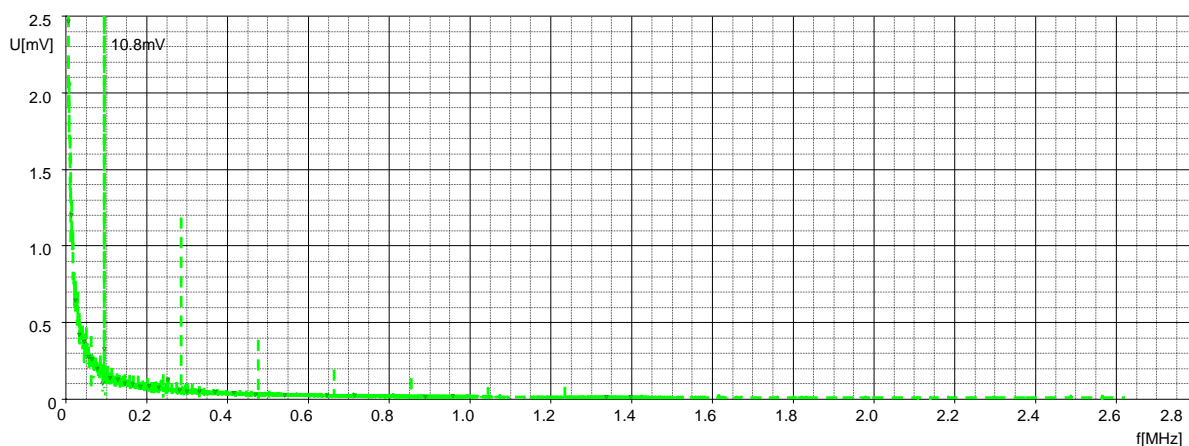
Obr. 10. 1. 13 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



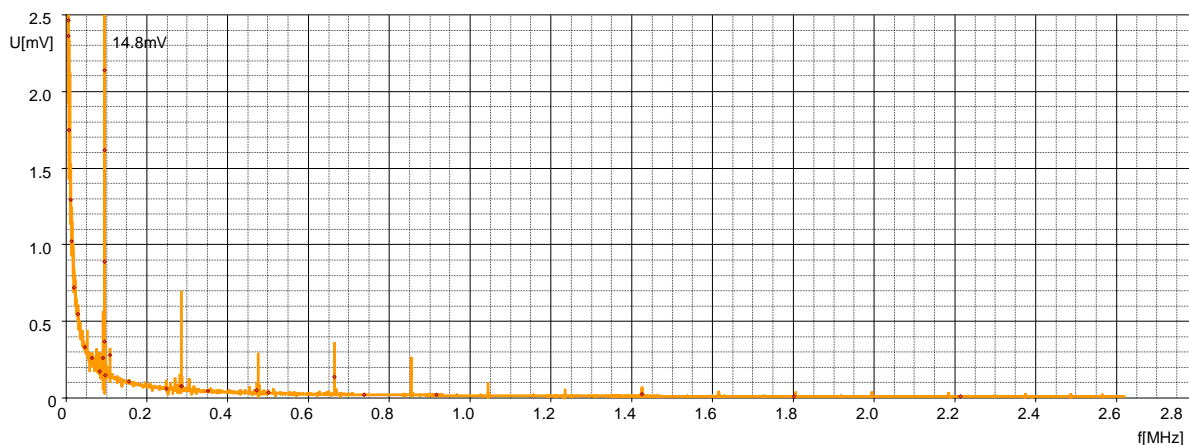
Obr. 10. 1. 14 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



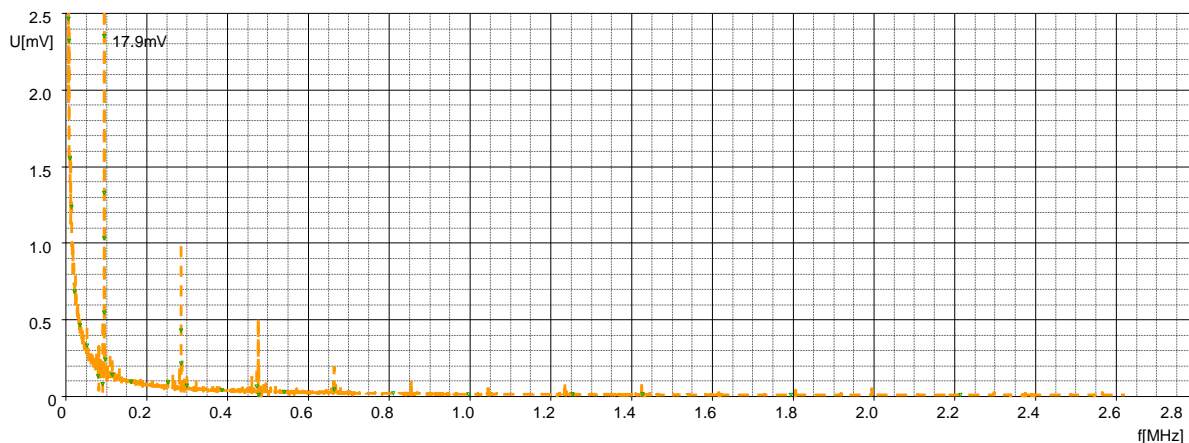
Obr. 10. 1. 15 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



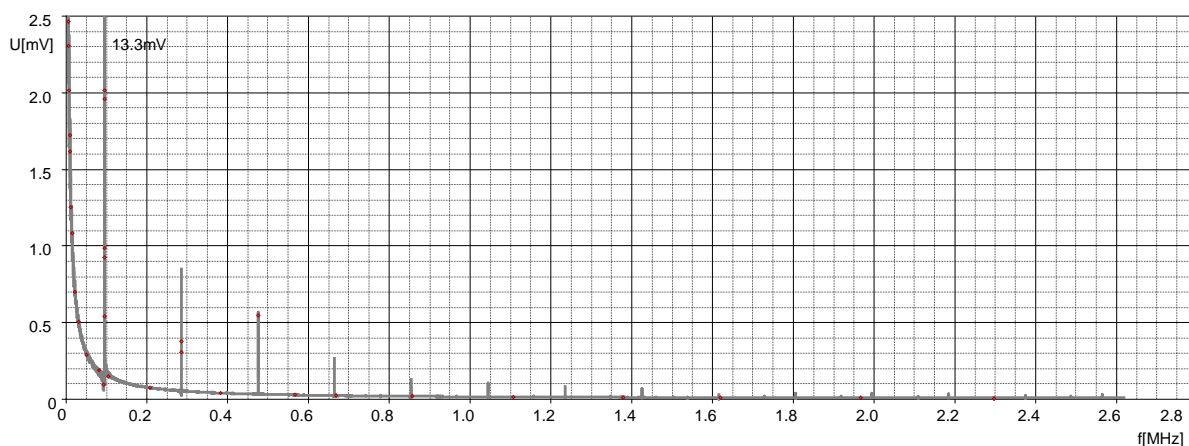
Obr. 10. 1. 16 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



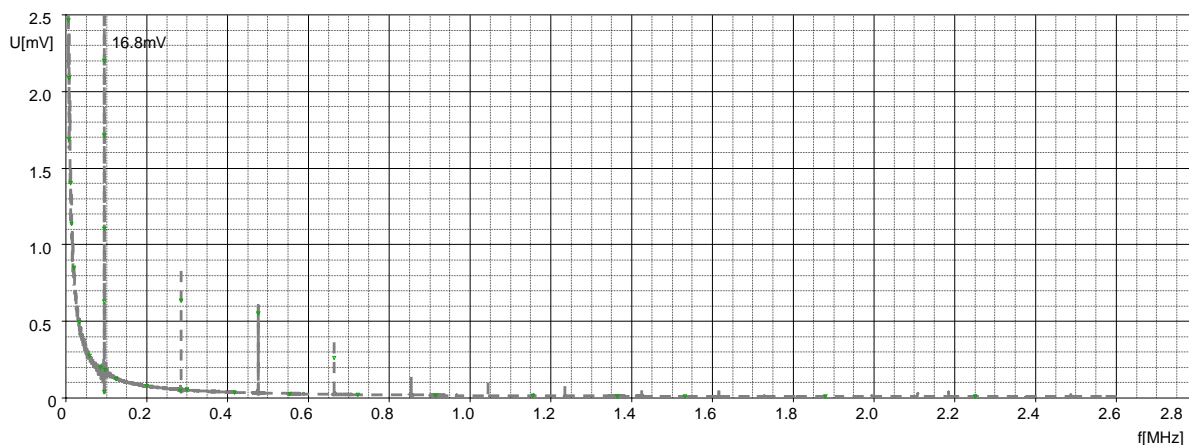
Obr. 10. 1. 17 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



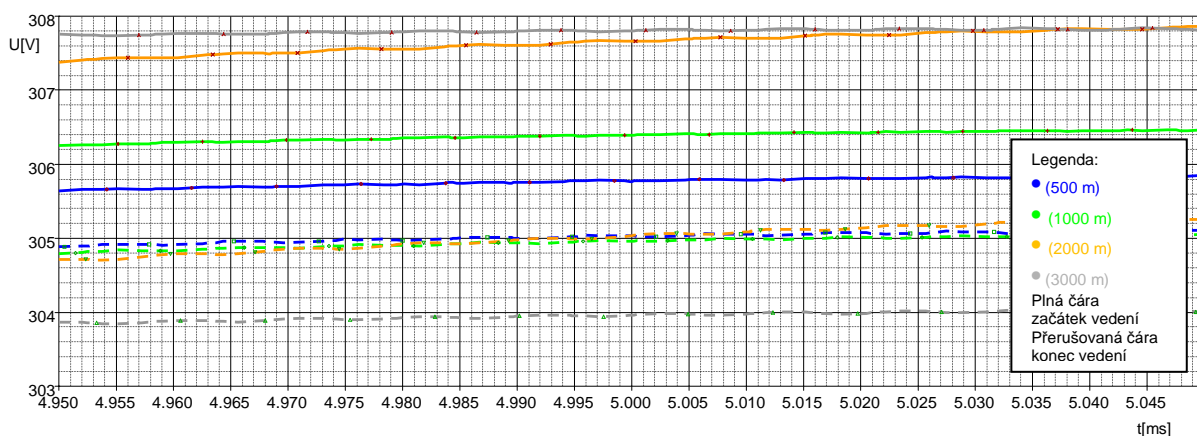
Obr. 10. 1. 18 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, délka vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, 2000 m, zátěž 10000 Ω



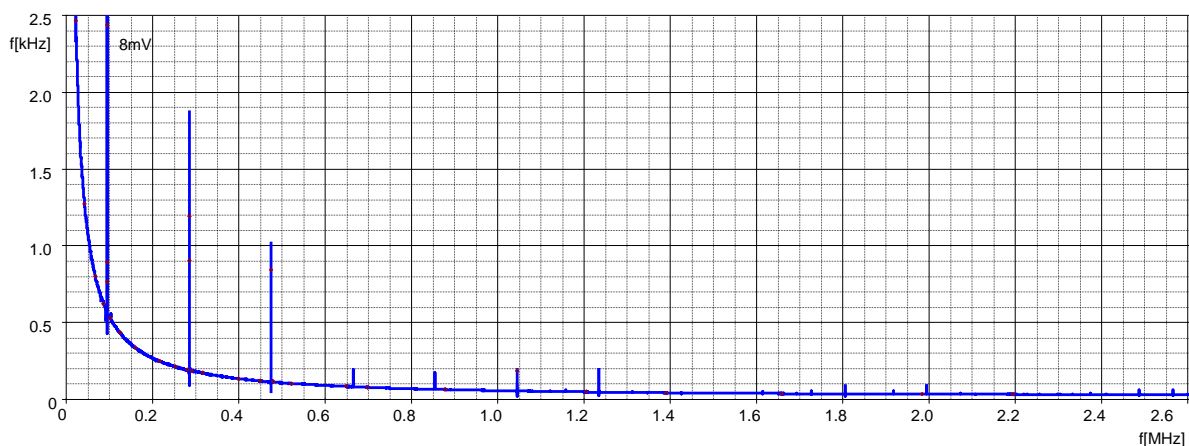
Obr. 10. 1. 19 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



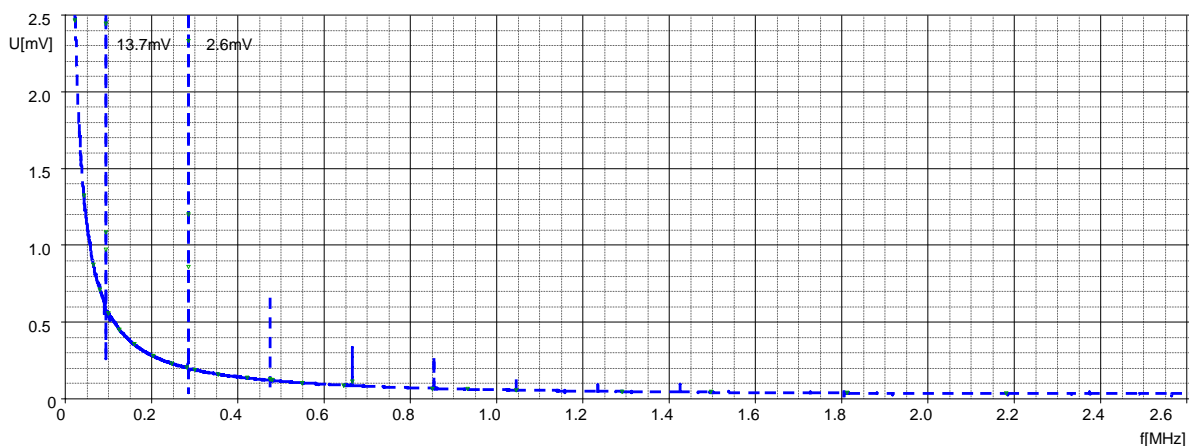
Obr. 10. 1. 20 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



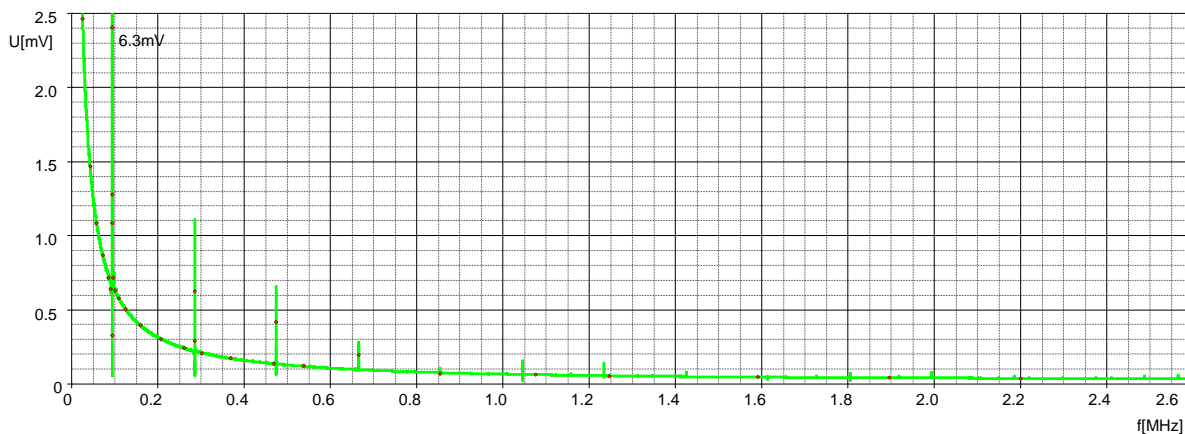
Obr. 10. 1. 21 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω



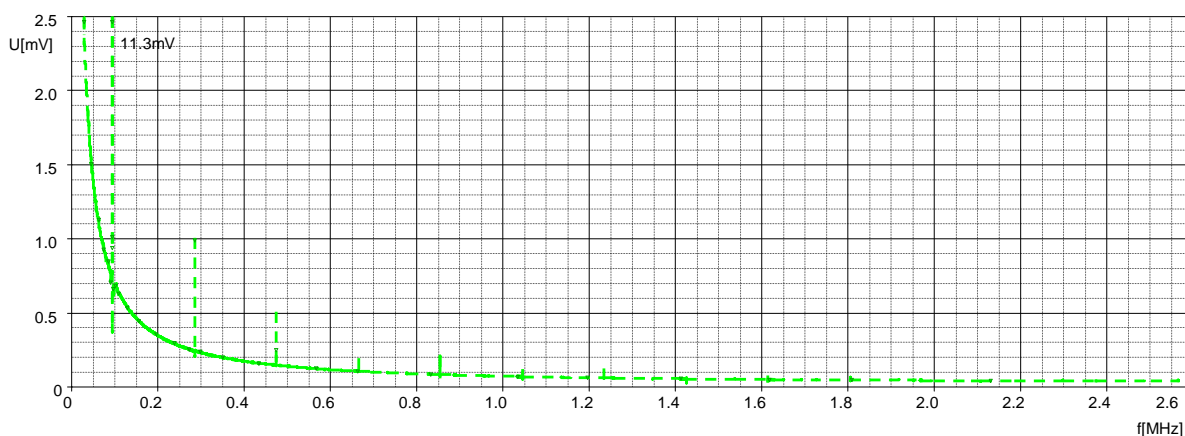
Obr. 10. 1. 22 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



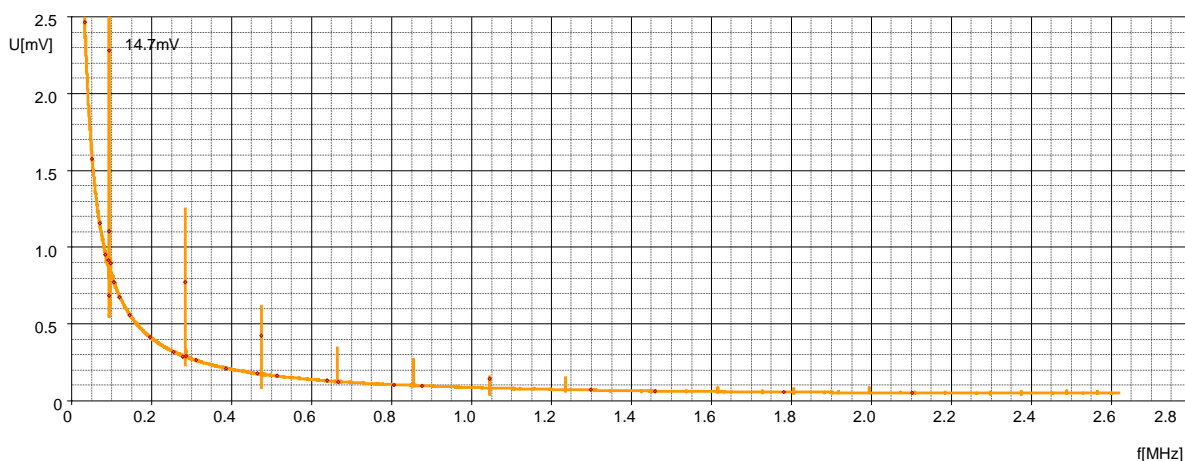
Obr. 10. 1. 23 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



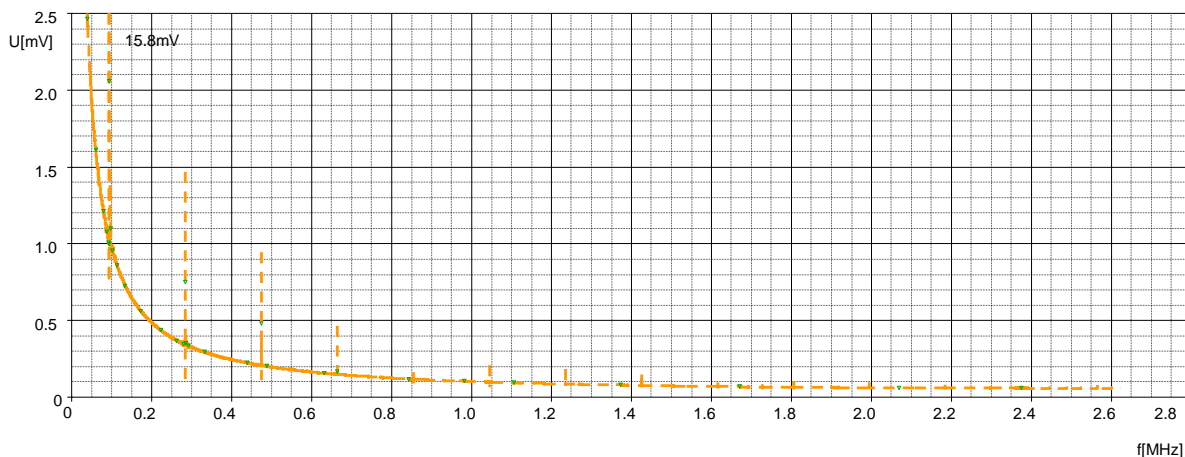
Obr. 10. 1. 24 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



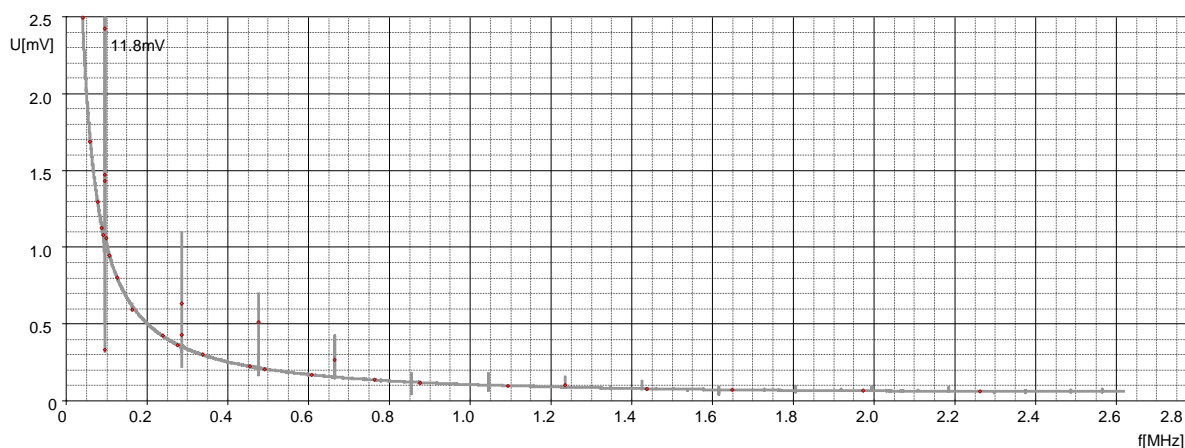
Obr. 10. 1. 25 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



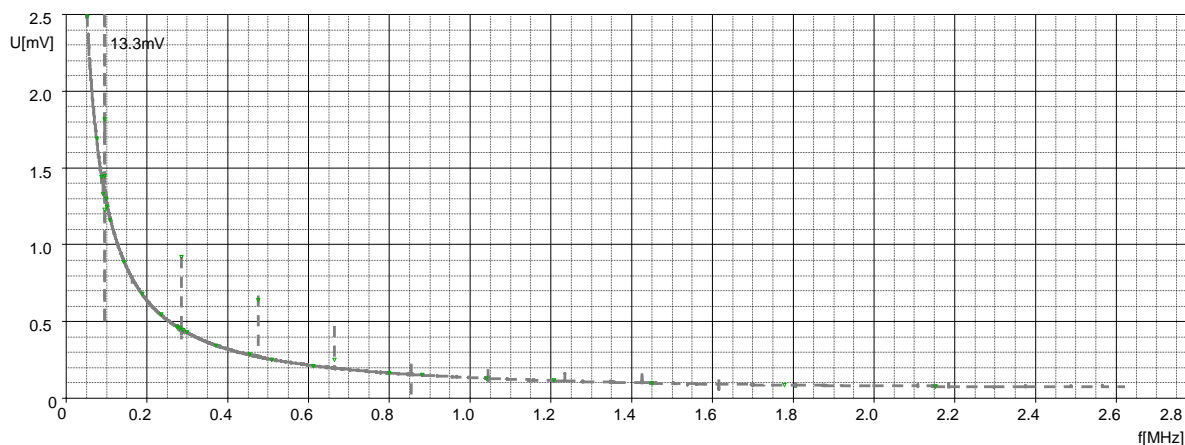
Obr. 10. 1. 26 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



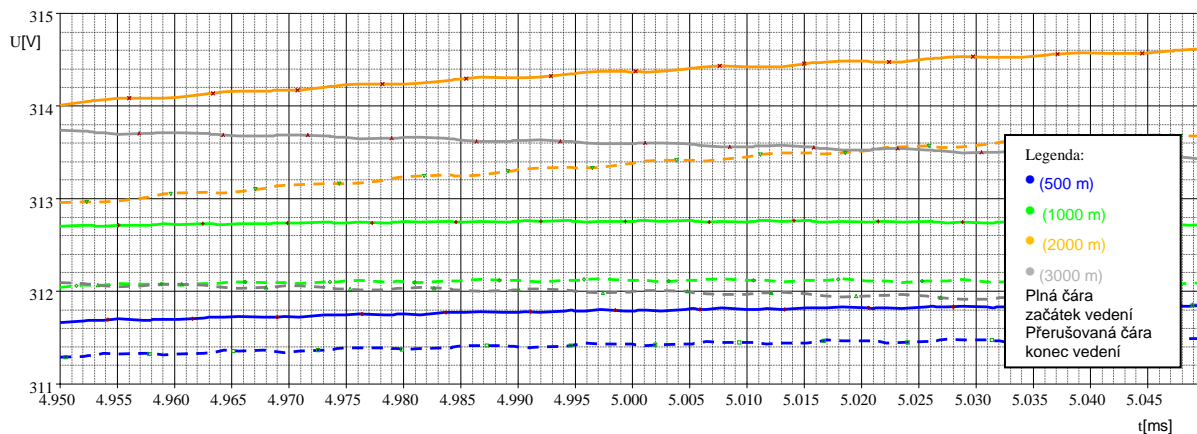
Obr. 10. 1. 27 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



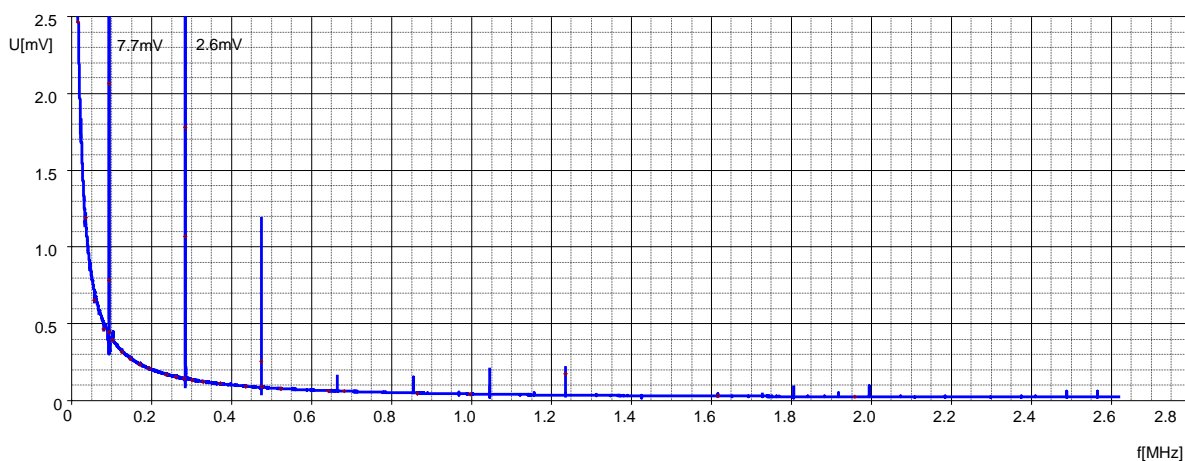
Obr. 10. 1. 28 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



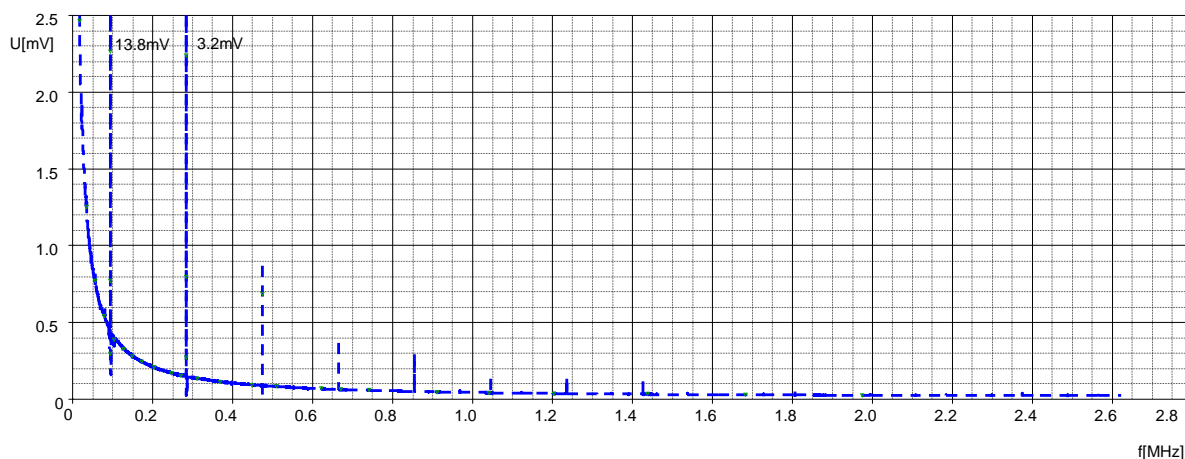
Obr. 10. 1. 29 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



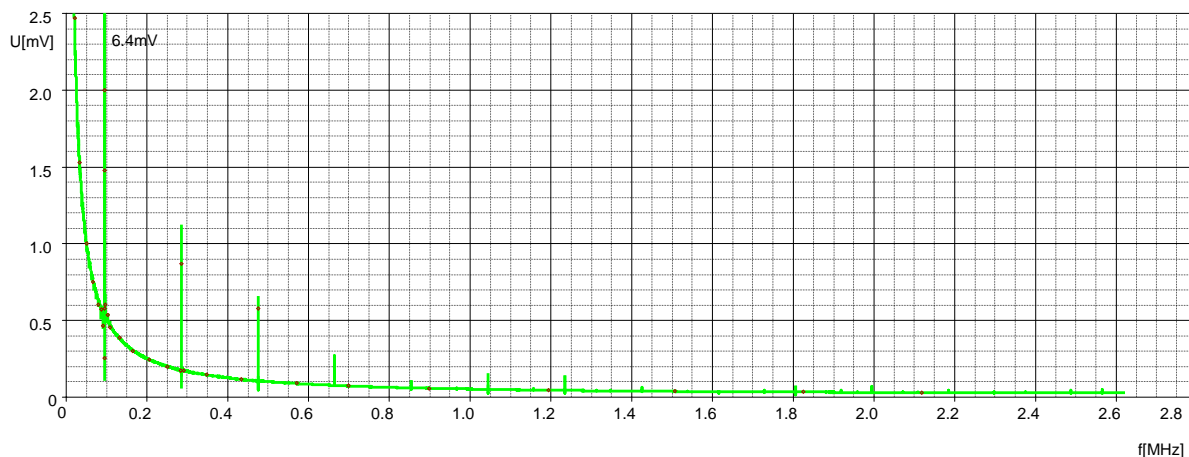
Obr. 10. 1. 30 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω



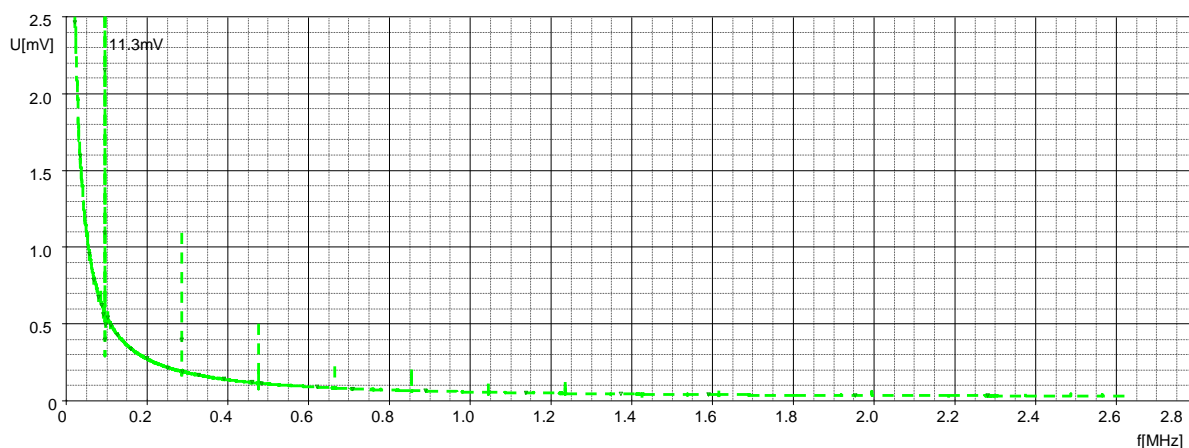
Obr. 10. 1. 31 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



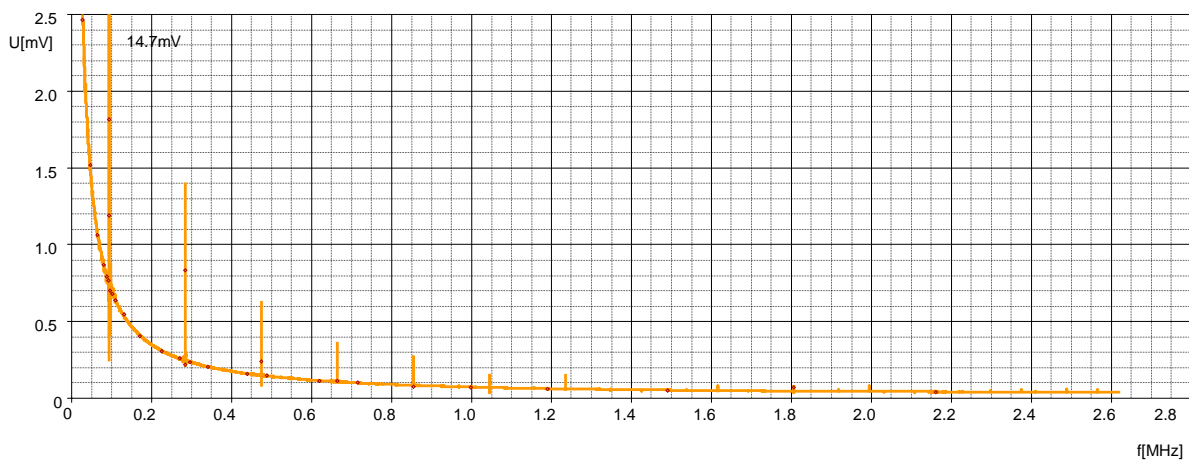
Obr. 10. 1. 32 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



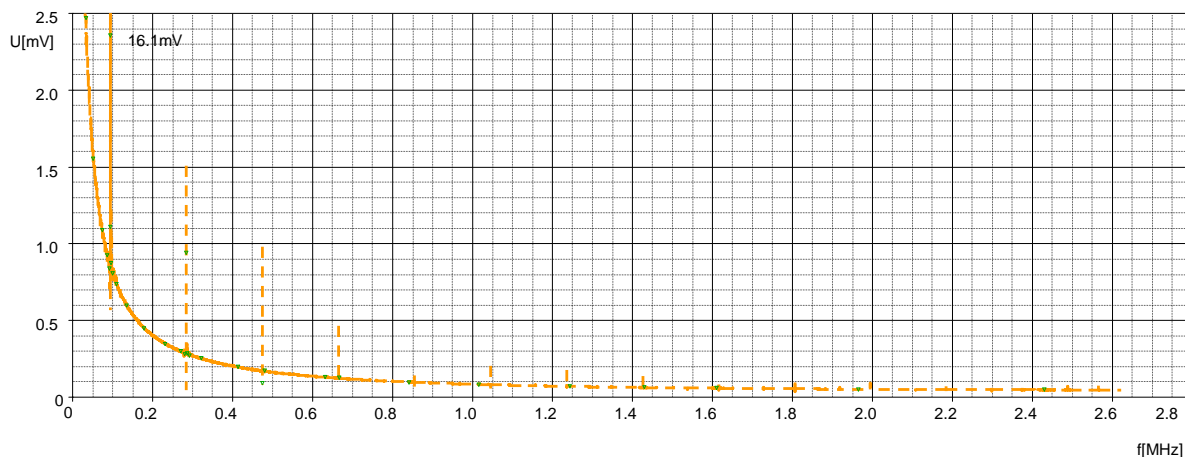
Obr. 10. 1. 33 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



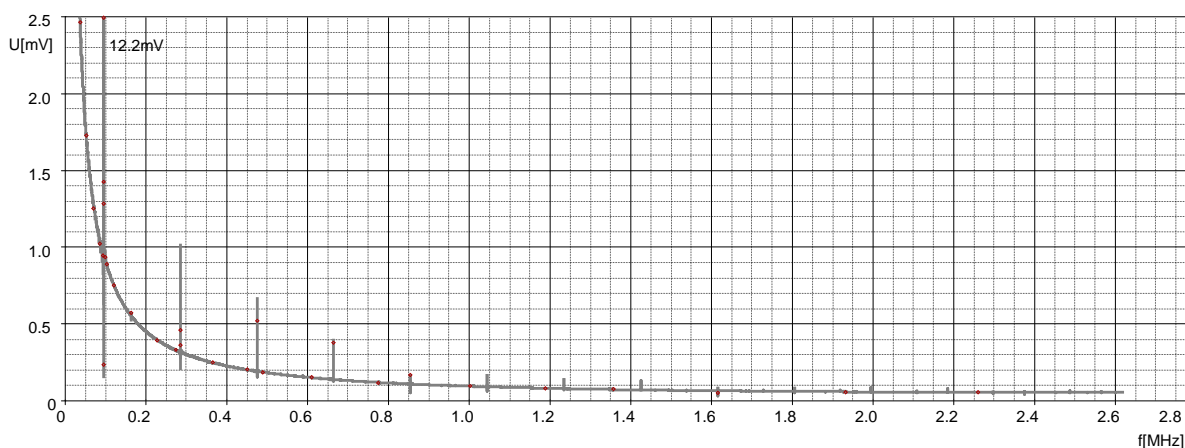
Obr. 10. 1. 34 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



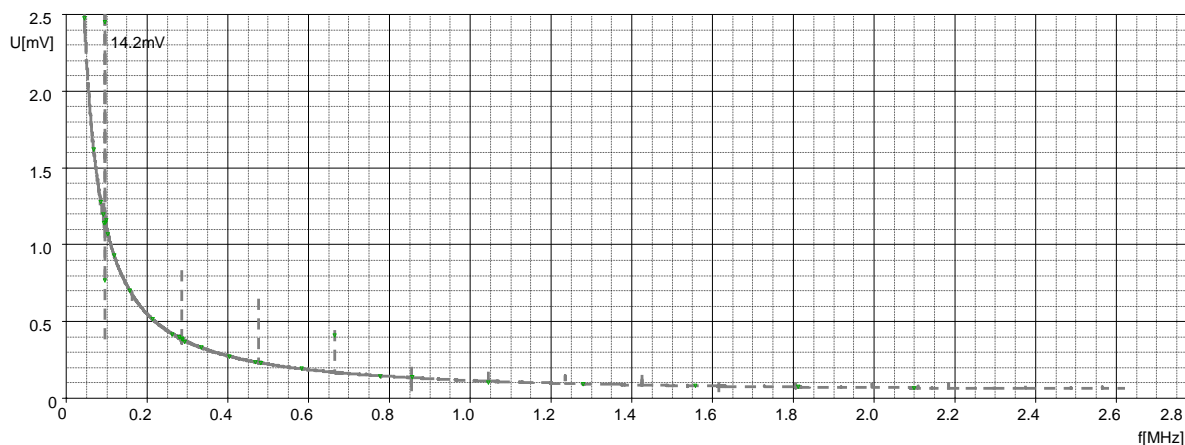
Obr. 10. 1. 35 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 1. 36 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 1. 37 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 1. 38 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω

Rozborem a komparací jednotlivých nasimulovaných grafů pro injektovaný periodicky se opakující digitální signál 95 kHz do vedení bylo zjištěno, že na vedení dochází k odrazům, které mají za následek zvýšení napěťových hladin prvních nebo druhých harmonických na konci kabelového vedení.

Na spektrálních grafech přibližně do 200 kHz je patrný šum na pozadí, toto rušení je v síti přítomné stále. Šum na pozadí je proměnný v čase, simulací bylo prokázáno, že se vzrůstající délkou se zvětšuje úroveň rušení na nižších frekvencích. Dalším rušením, které je ze spektra patrné je úzkopásmový šum, který vznikl při přechodným dějem při spuštění simulace.

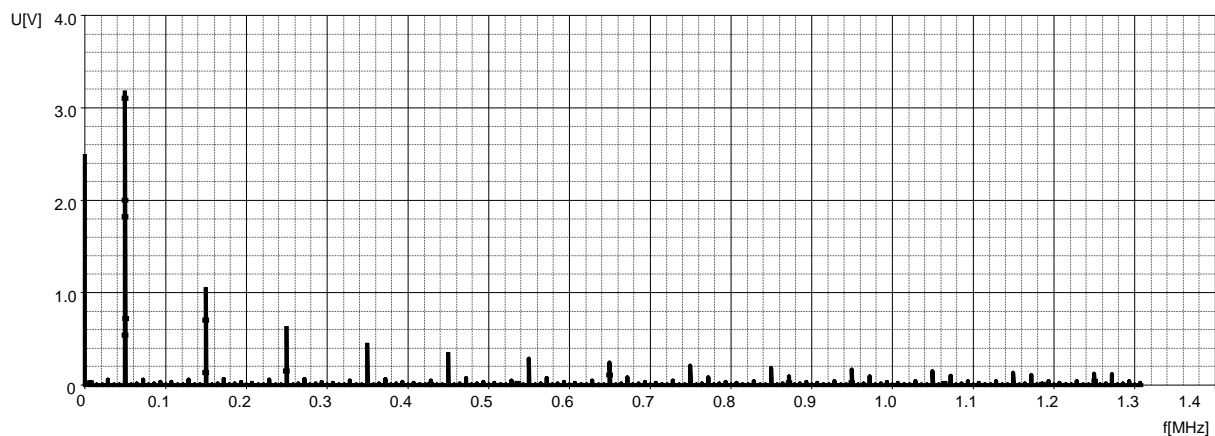
Vliv změny zátěže ani délka vedení se u přenosu signálu 95 kHz po energetickém vedení nijak neprojevil. Simulace byly prováděny s ustálenými parametry. V běžné energetické síti však dochází k náhodnému rušení a kolísání napětí.

K největšímu znehodnocení digitálního signálu dochází již na vstupu signálu do vedení.

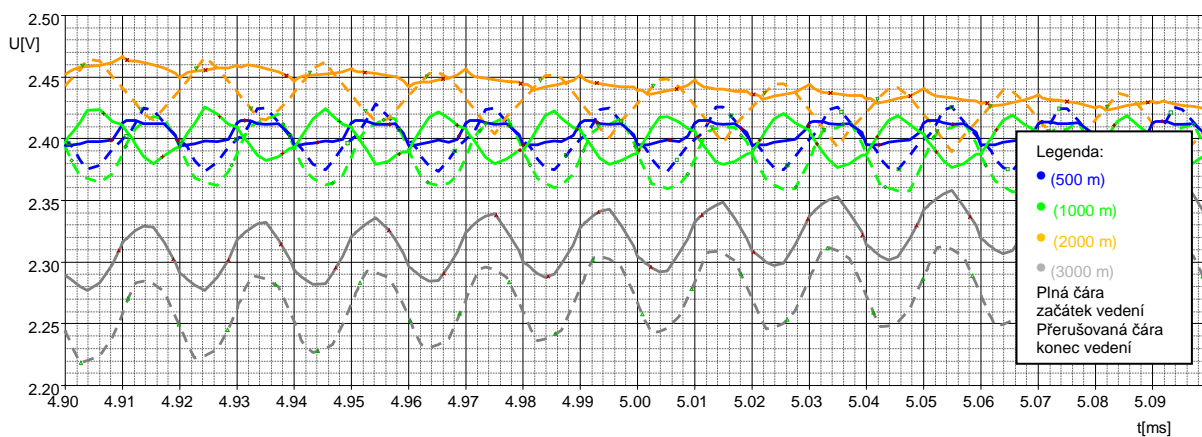
10.2. Přenos digitálního signálu 50 kHz



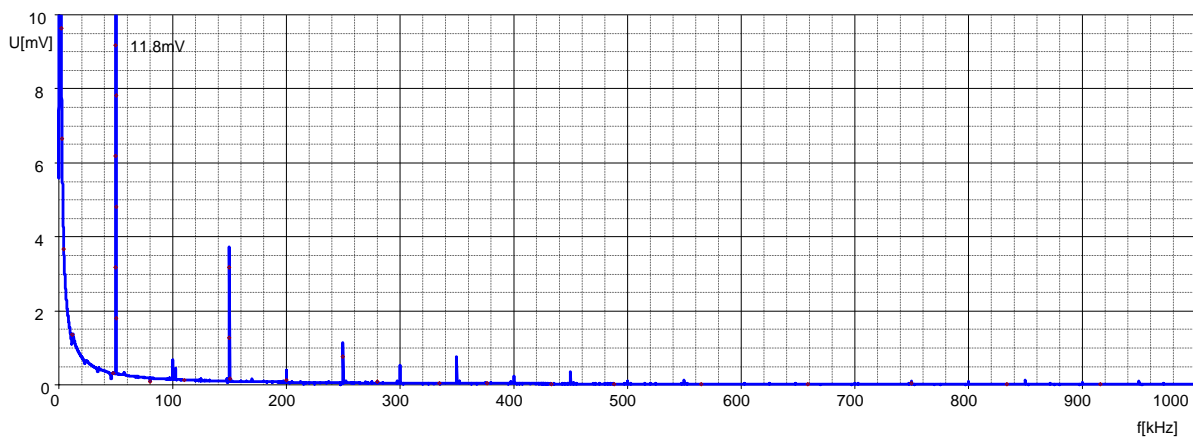
Obr. 10.2.1 - Časový průběh digitálního signálu na výstupu z vysílače



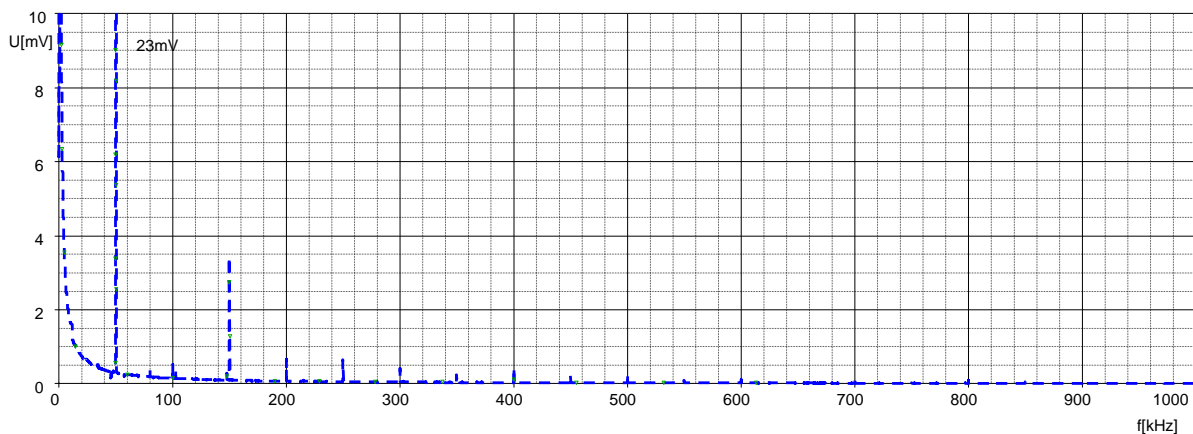
Obr. 10.2.2 - Frekvenční spektrum digitálního signálu na výstupu z vysílače



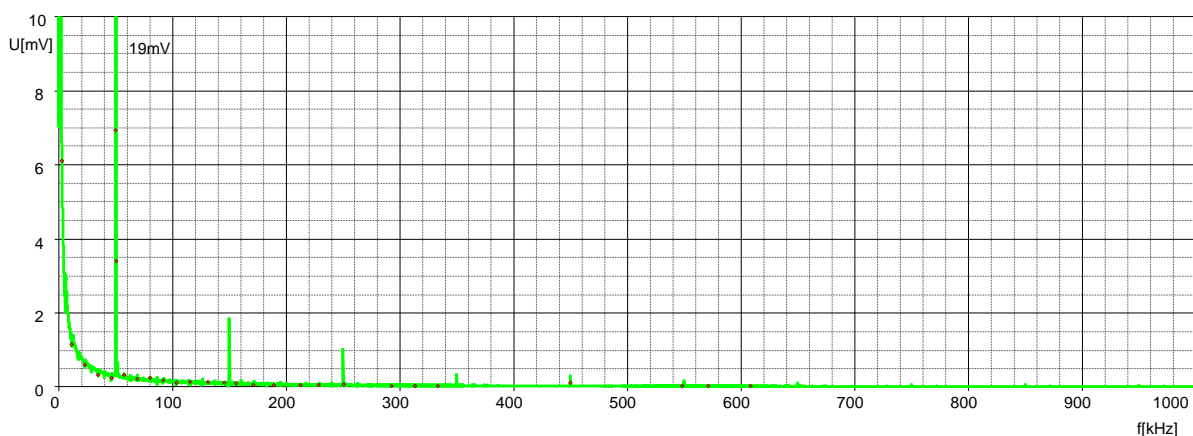
Obr. 10. 2. 3 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω



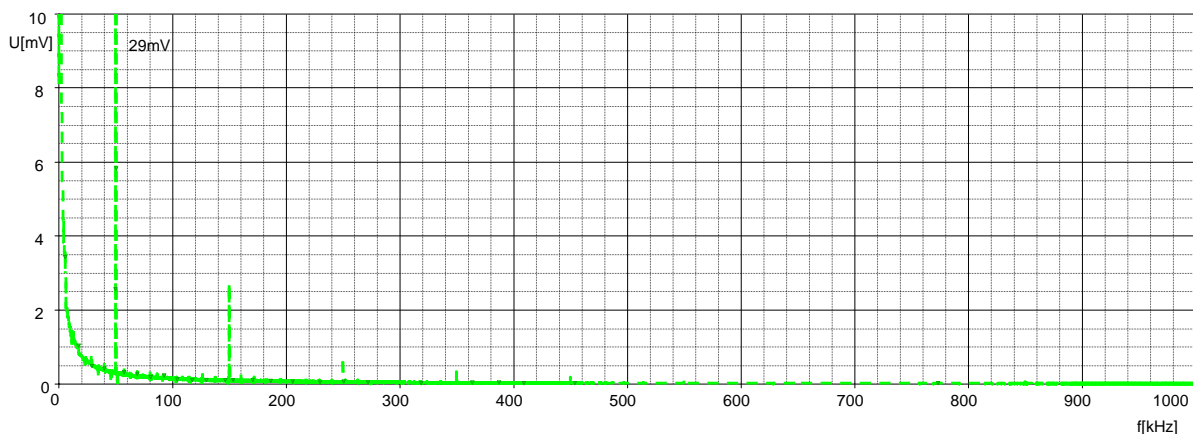
Obr. 10. 2. 4 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



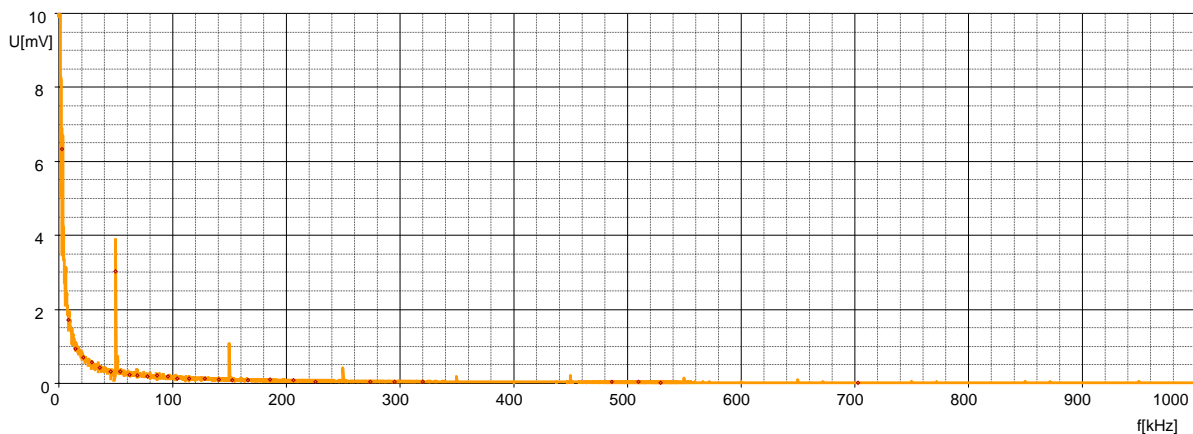
Obr. 10. 2. 5 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



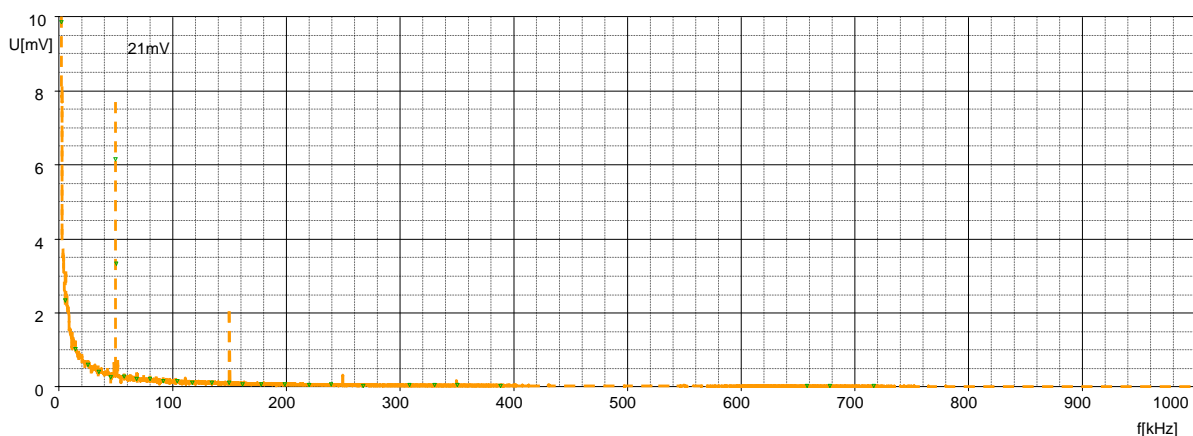
Obr. 10. 2. 6 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



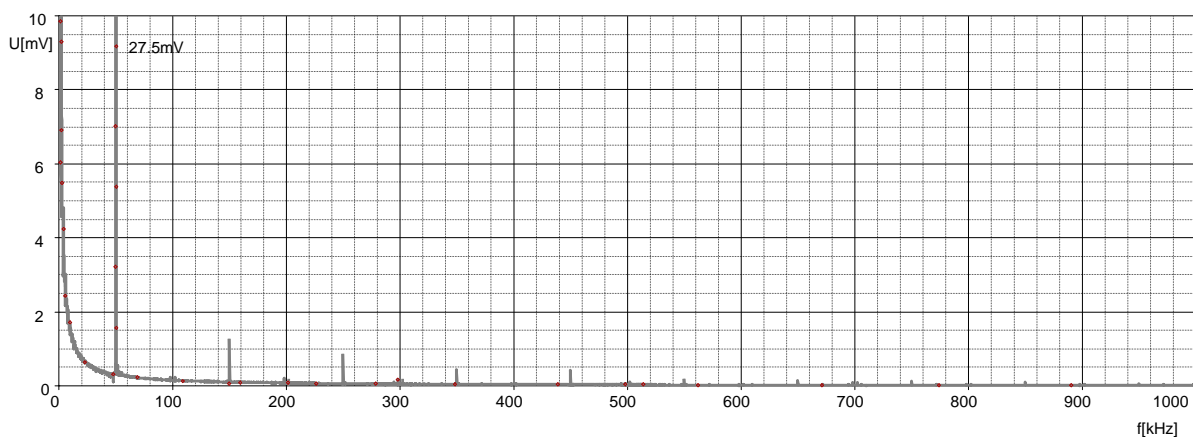
Obr. 10. 2. 7 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



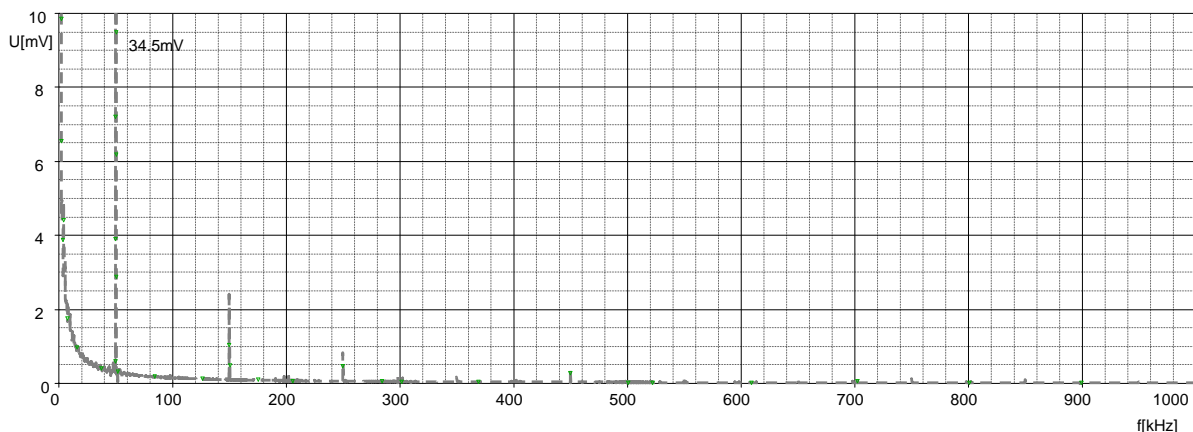
Obr. 10. 2. 8 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



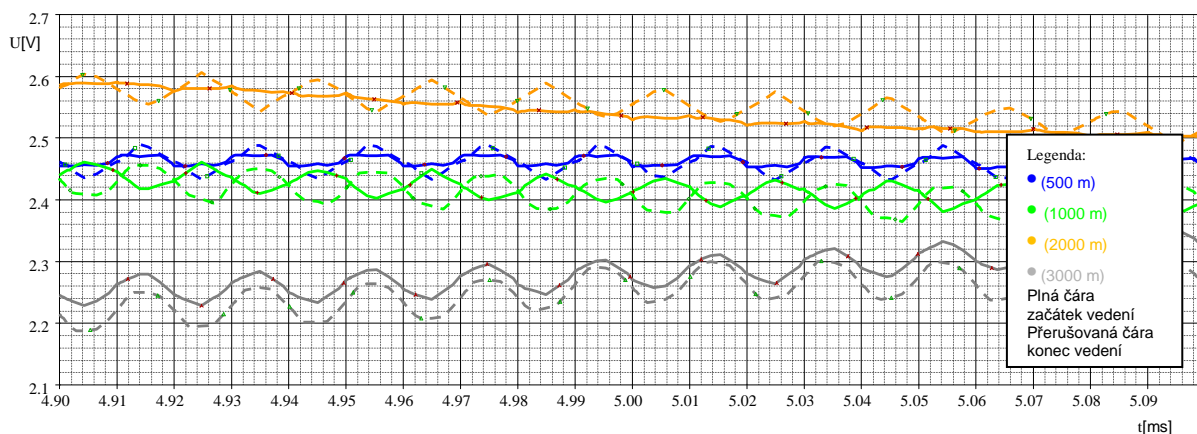
Obr. 10. 2. 9 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



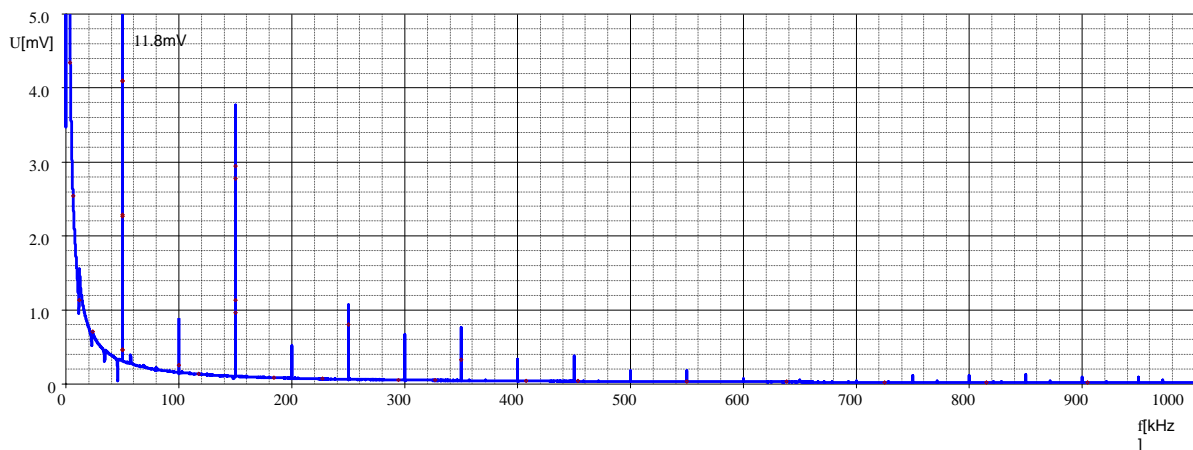
Obr. 10. 2. 10 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



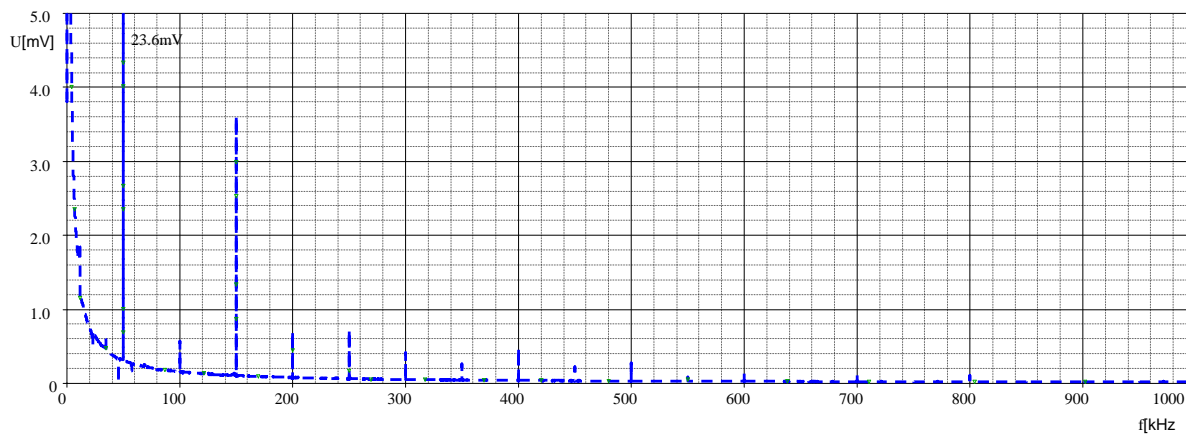
Obr. 10. 2. 11 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



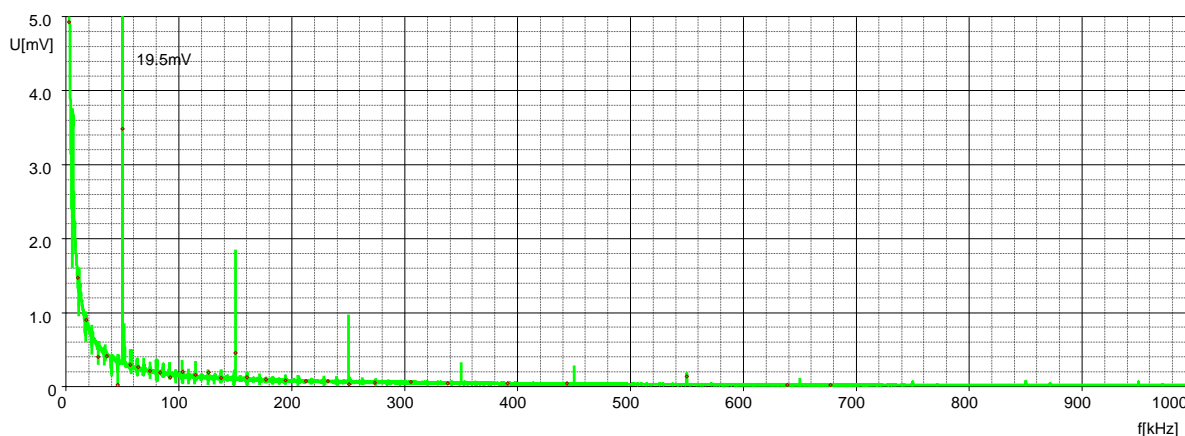
Obr. 10. 2. 12 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω



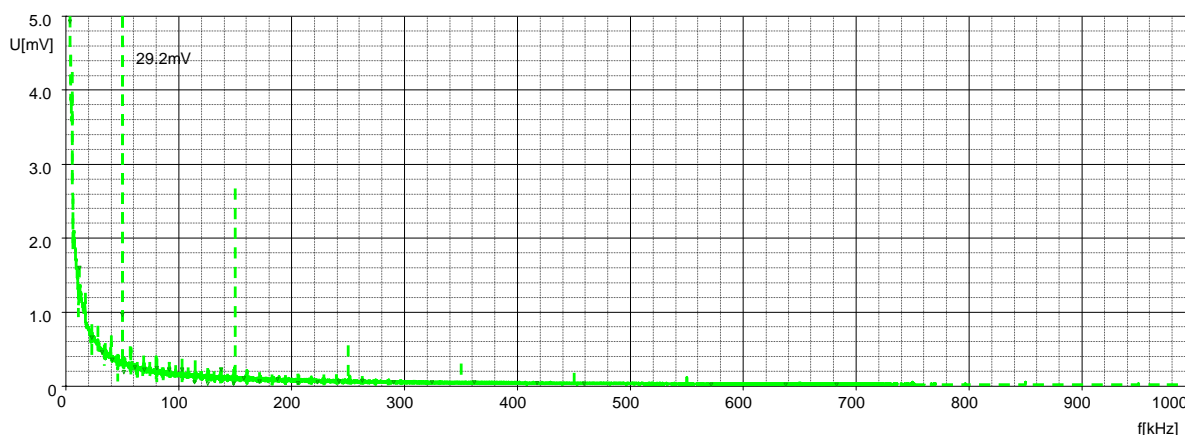
Obr. 10. 2. 13 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



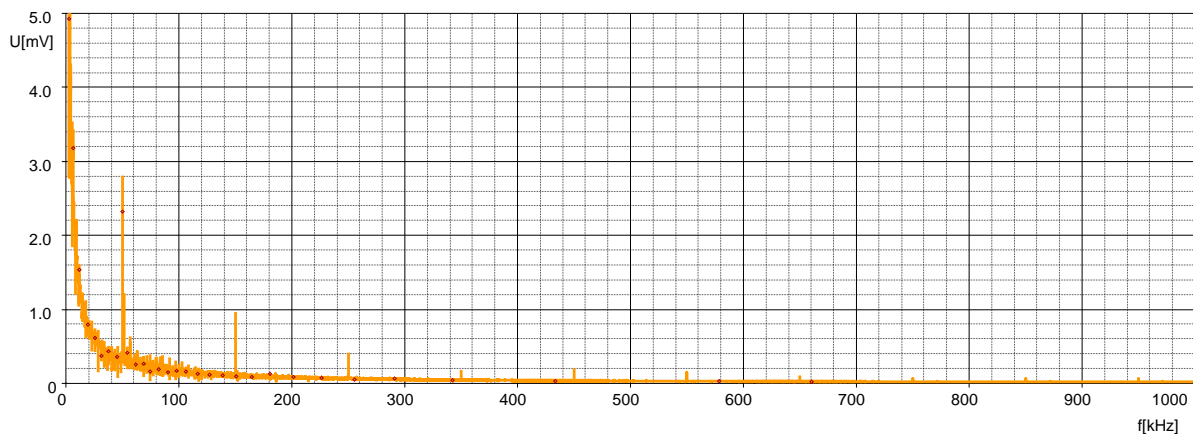
Obr. 10. 2. 14 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



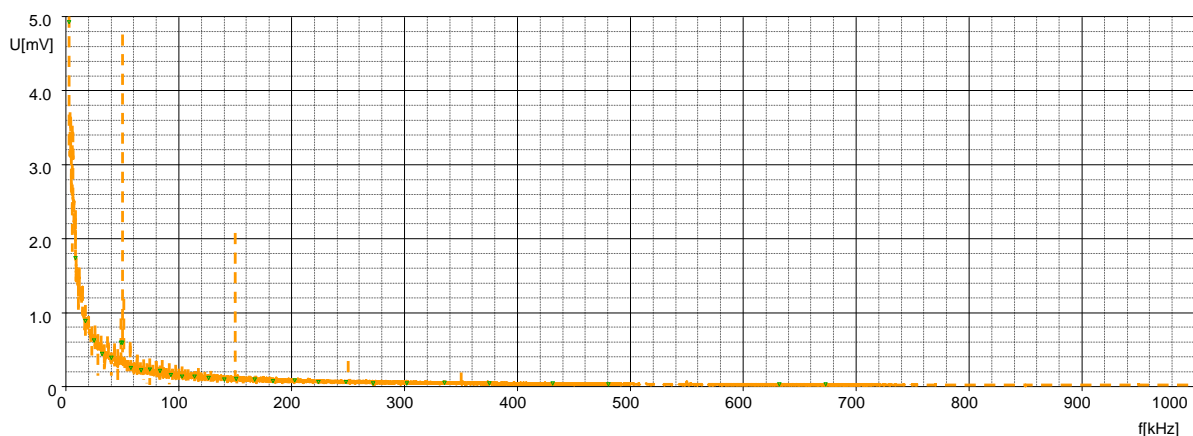
Obr. 10. 2. 15 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



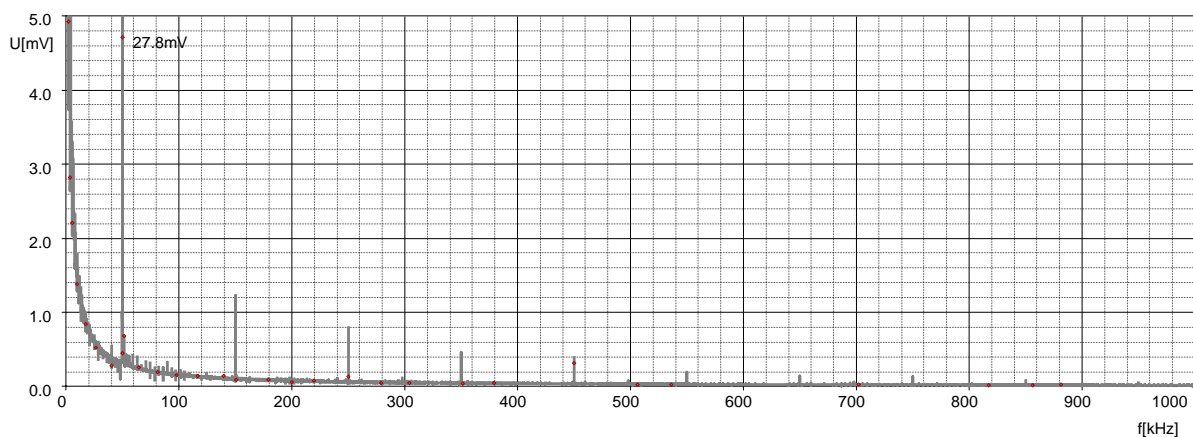
Obr. 10. 2. 16 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



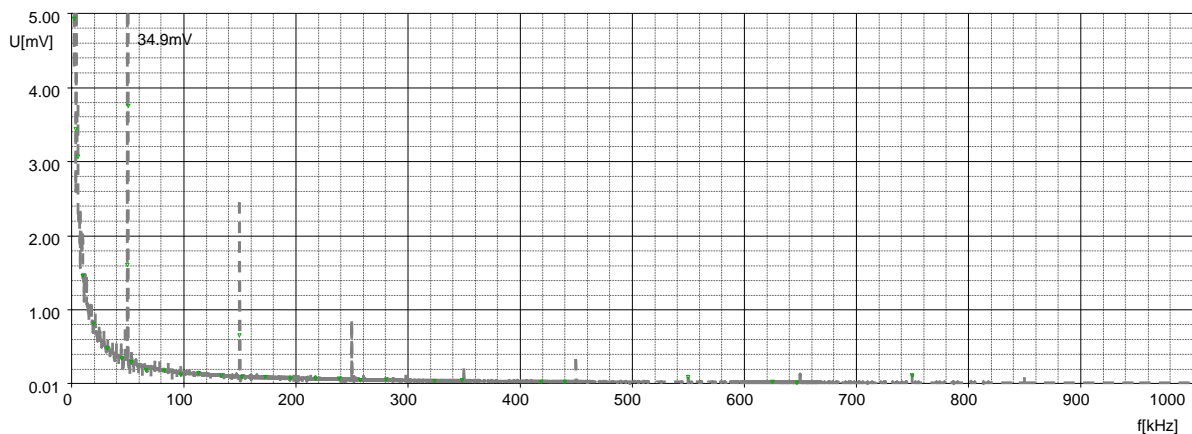
Obr. 10. 2. 17 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



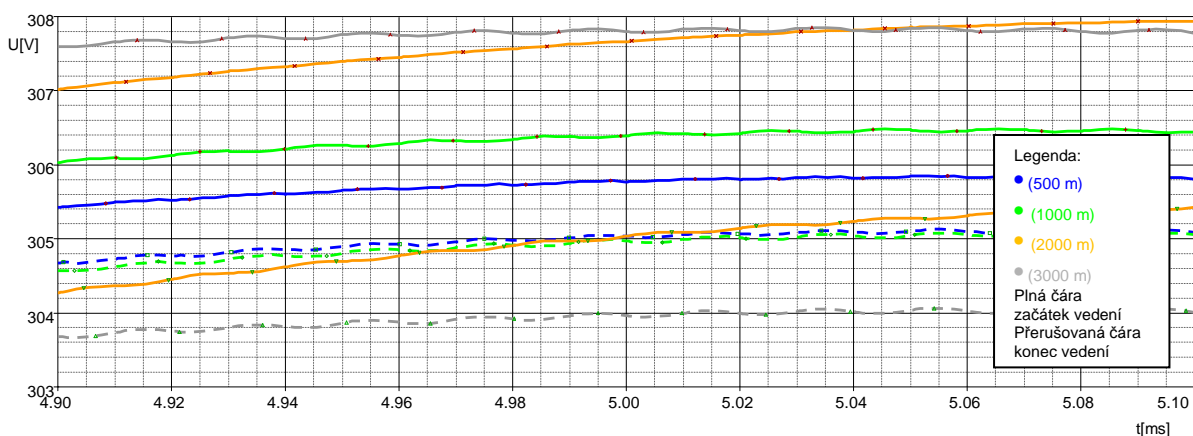
Obr. 10. 2. 18 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



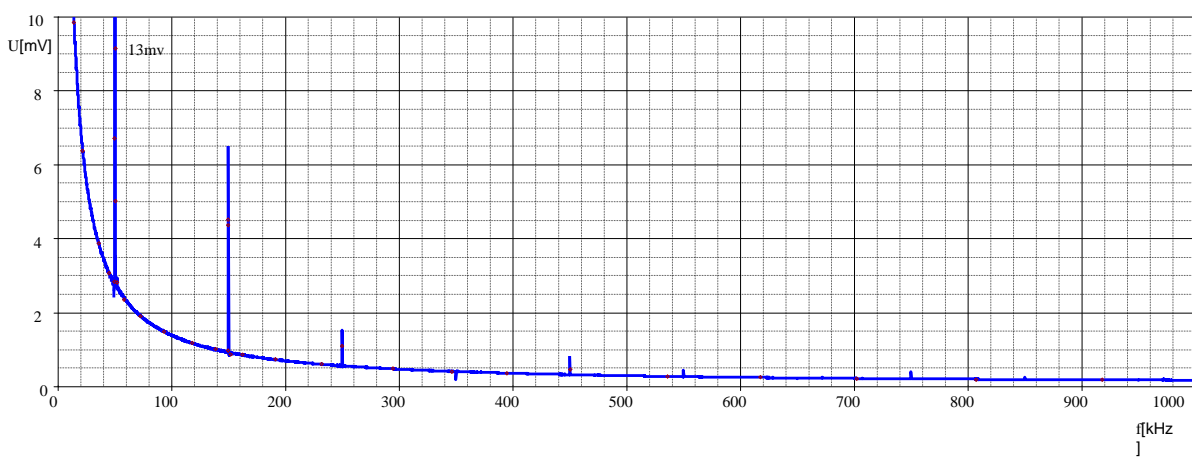
Obr. 10. 2. 19 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



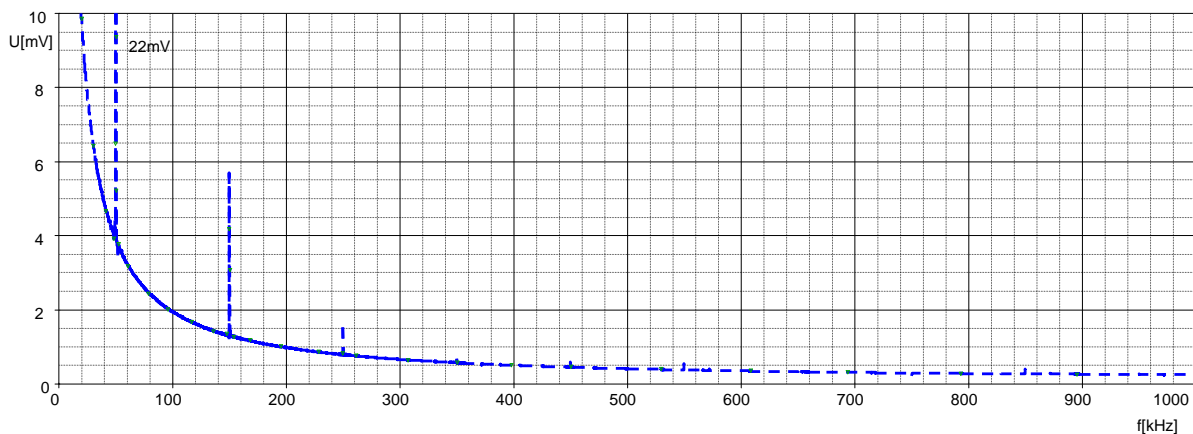
Obr. 10. 2. 20 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



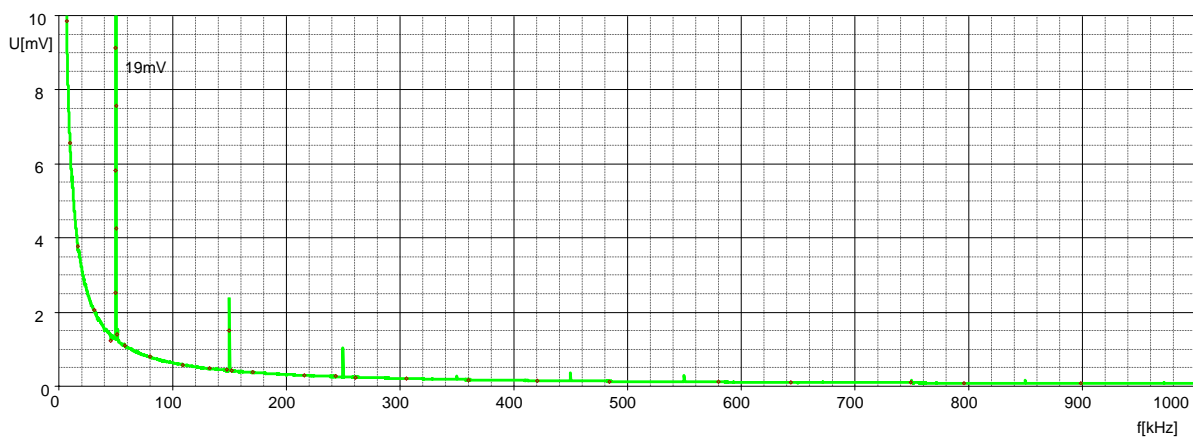
Obr. 10. 2. 21 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω



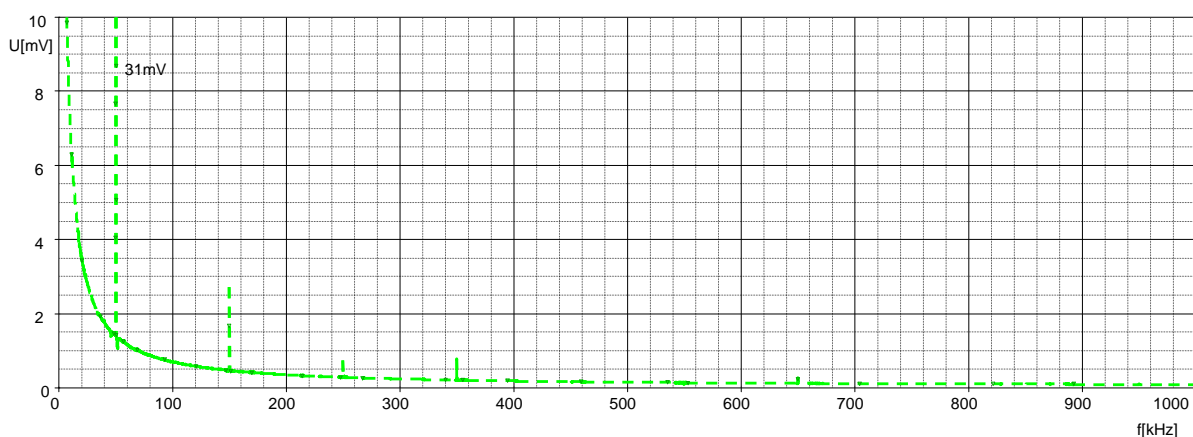
Obr. 10. 2. 22 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



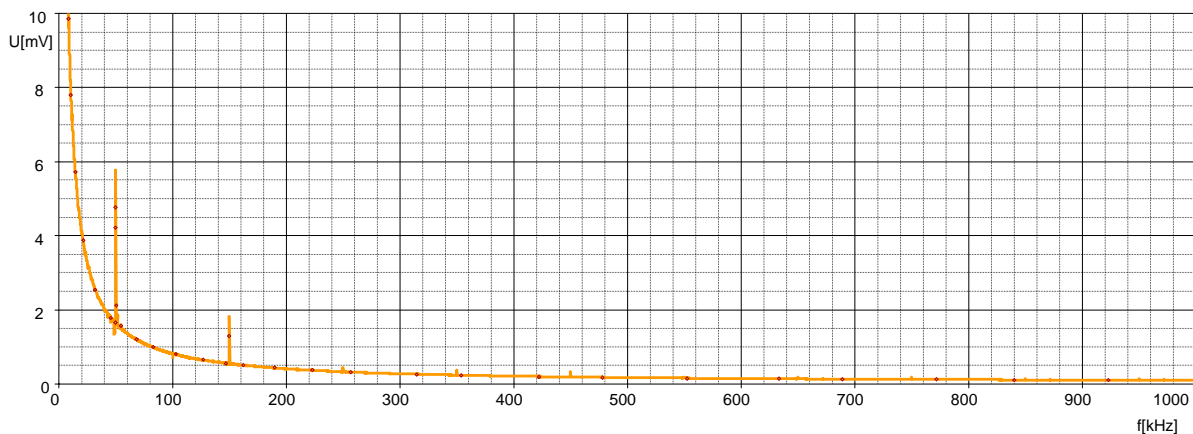
Obr. 10. 2. 23 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



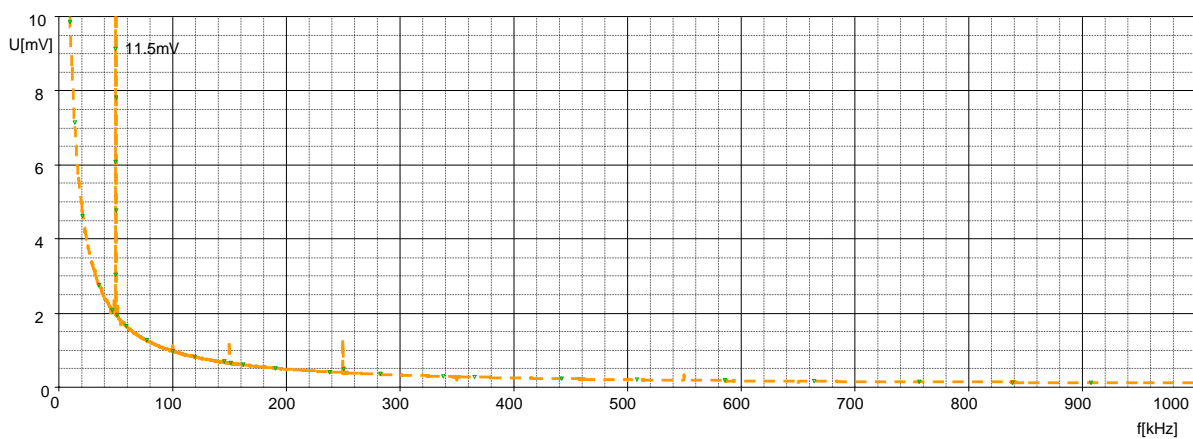
Obr. 10. 2. 24 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



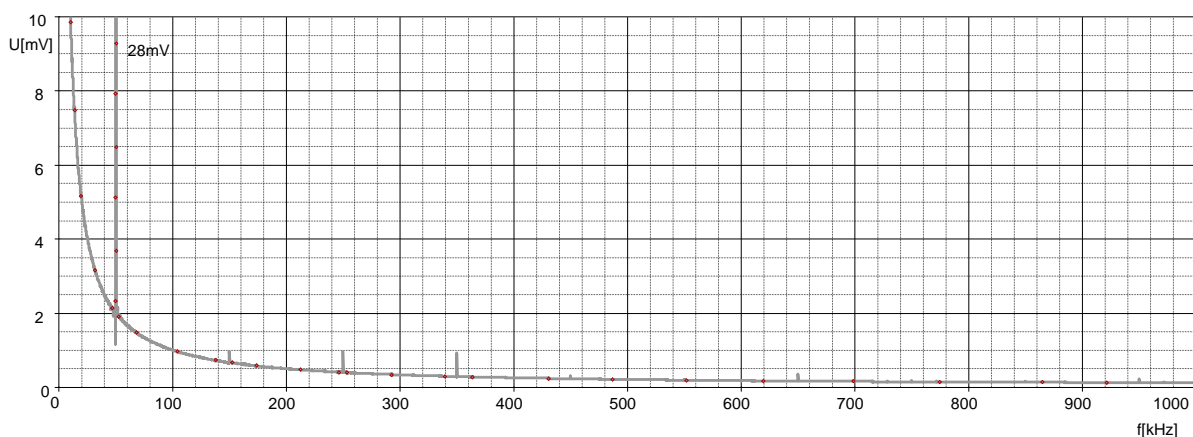
Obr. 10. 2. 25 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



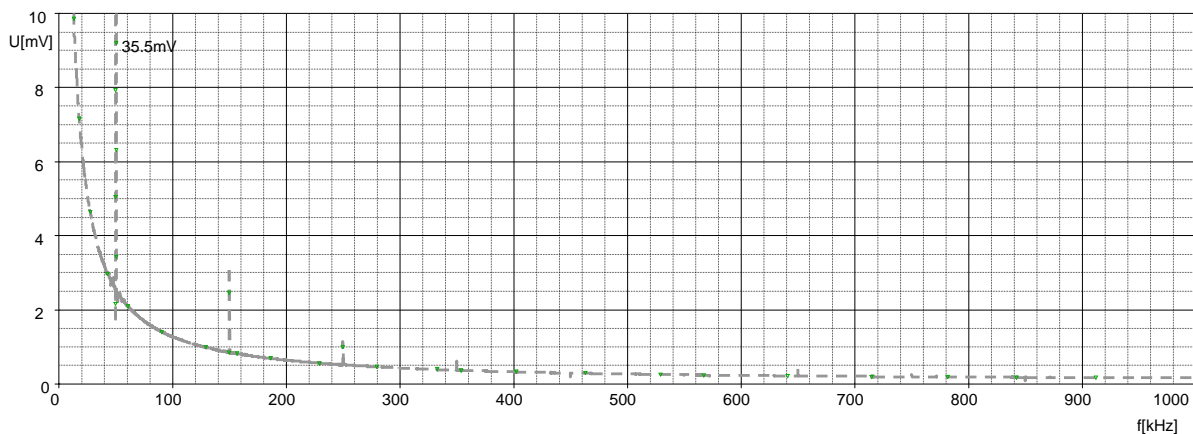
Obr. 10. 2. 26 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



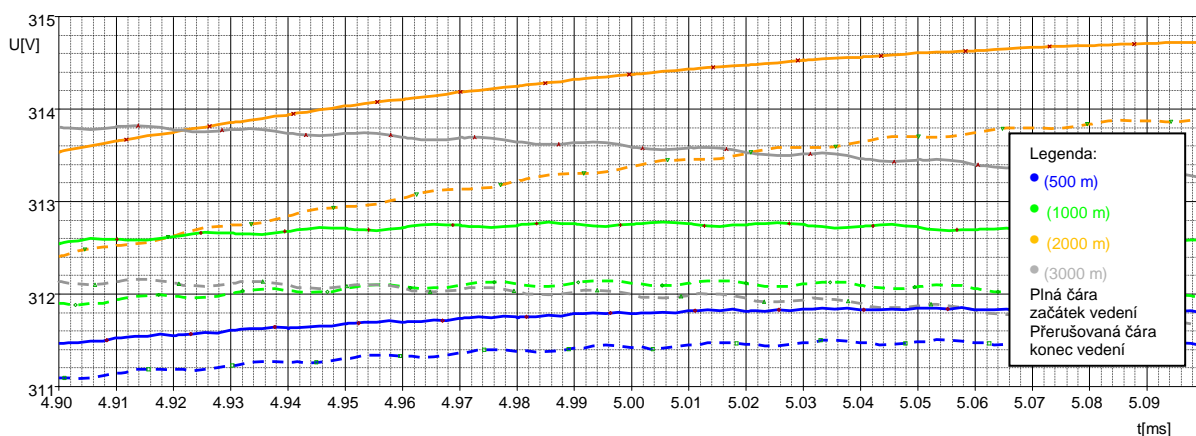
Obr. 10. 2. 27 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



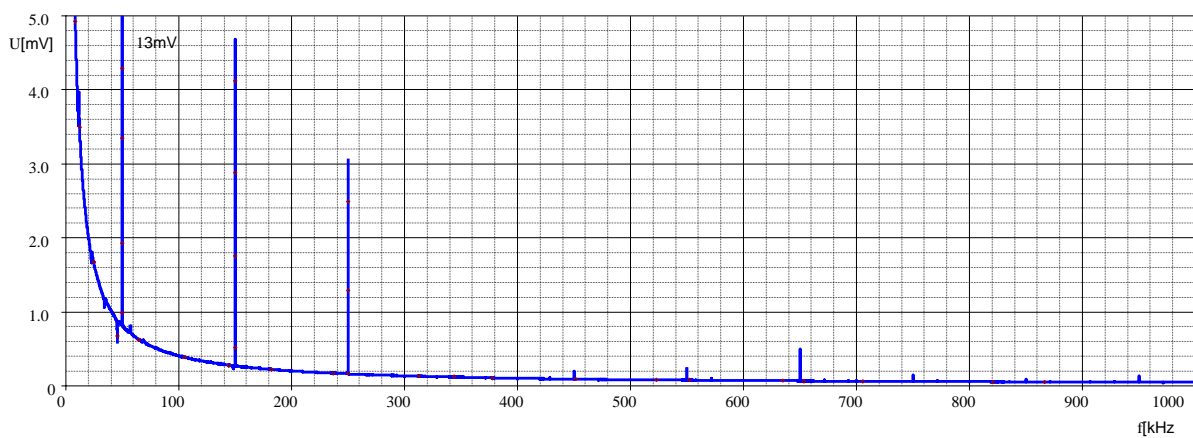
Obr. 10. 2. 28 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



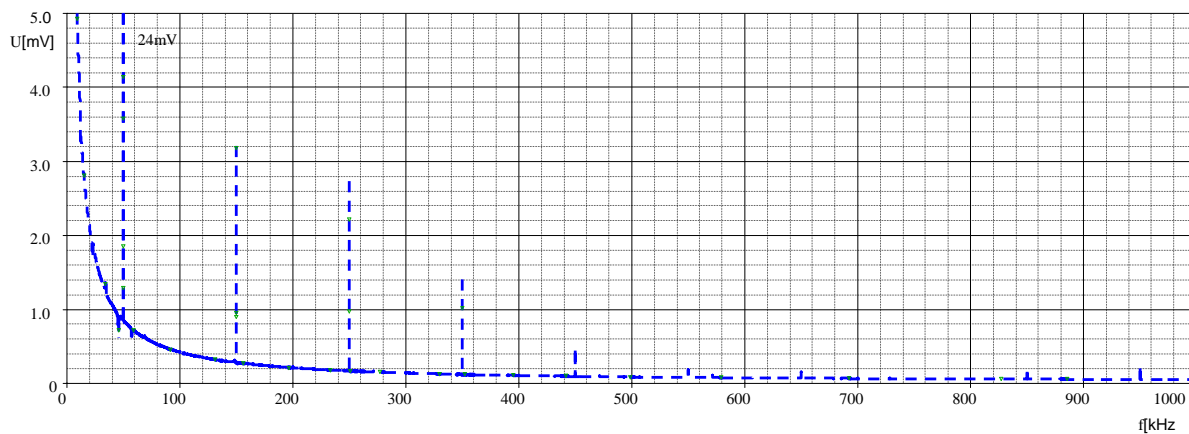
Obr. 10. 2. 29 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



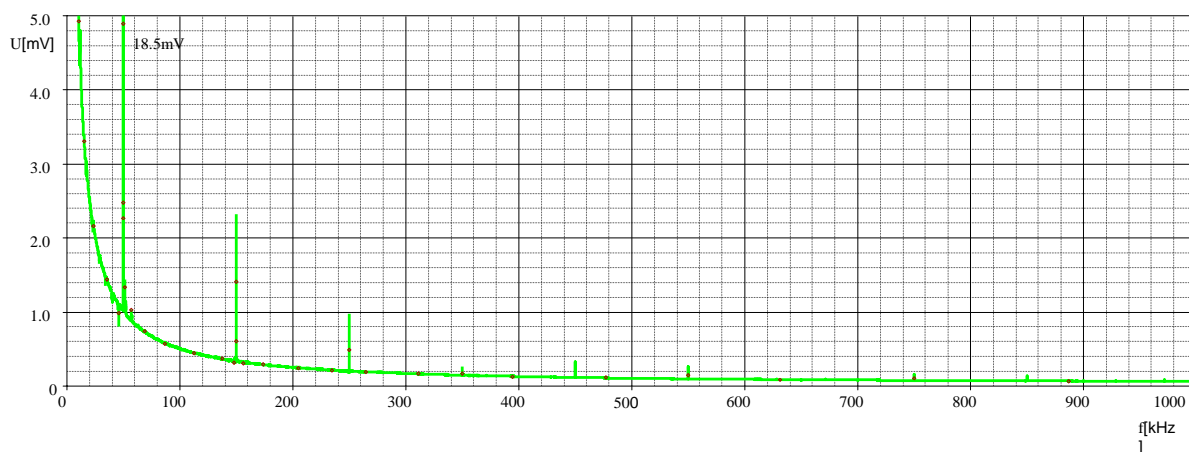
Obr. 10. 2. 30 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω



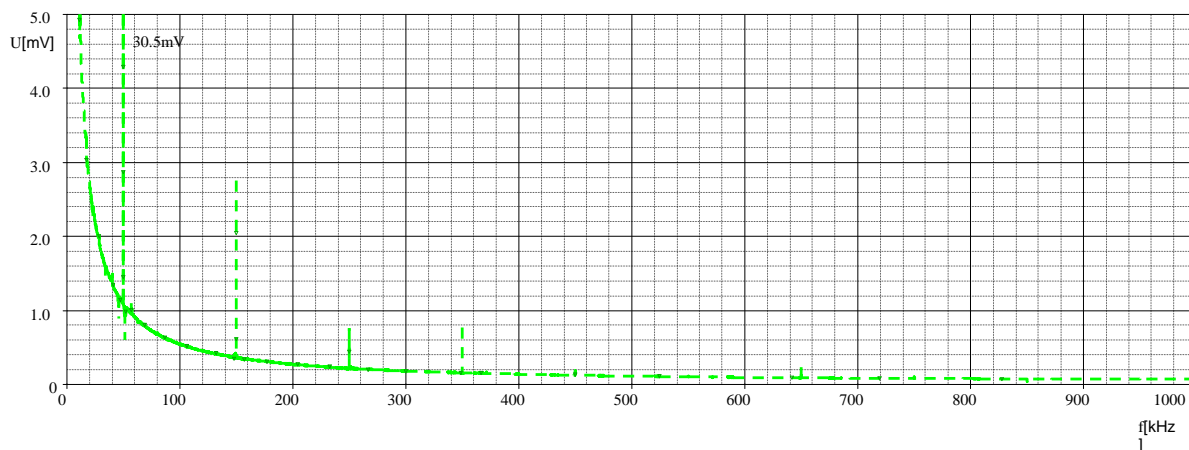
Obr. 10. 2. 31 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



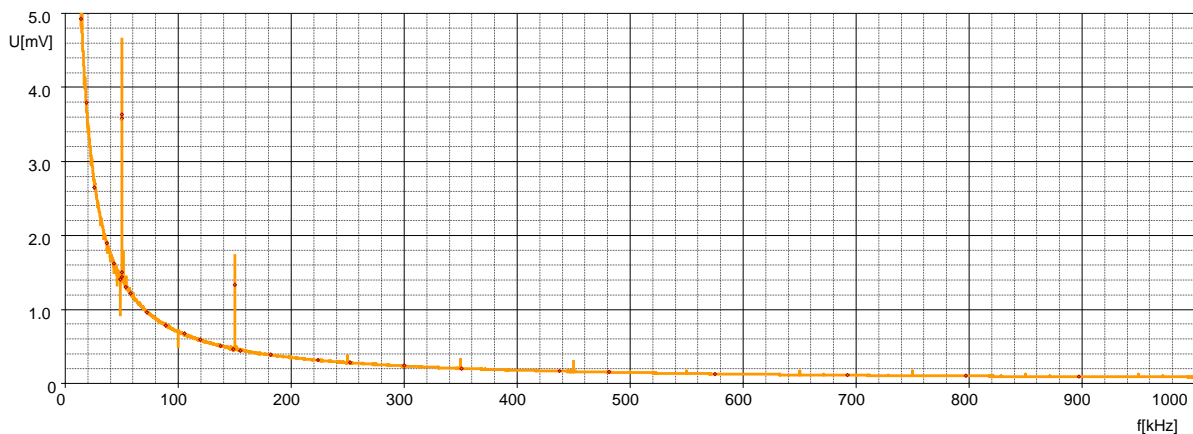
Obr. 10. 2. 32 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



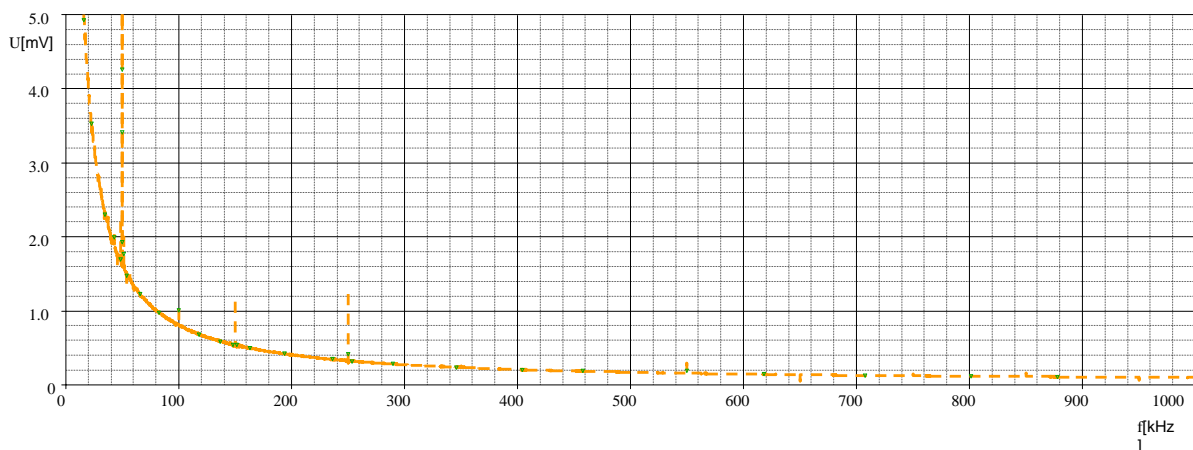
Obr. 10. 2. 33 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



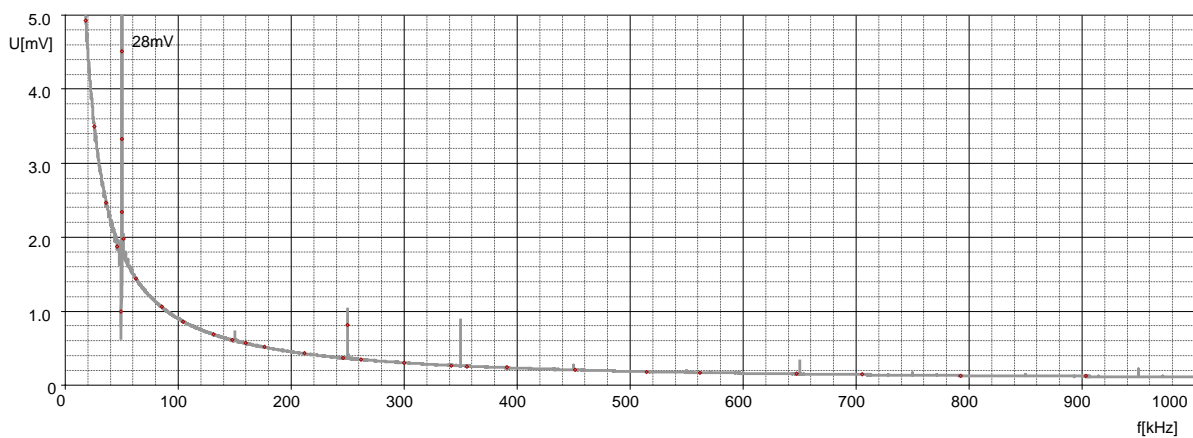
Obr. 10. 2. 34 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



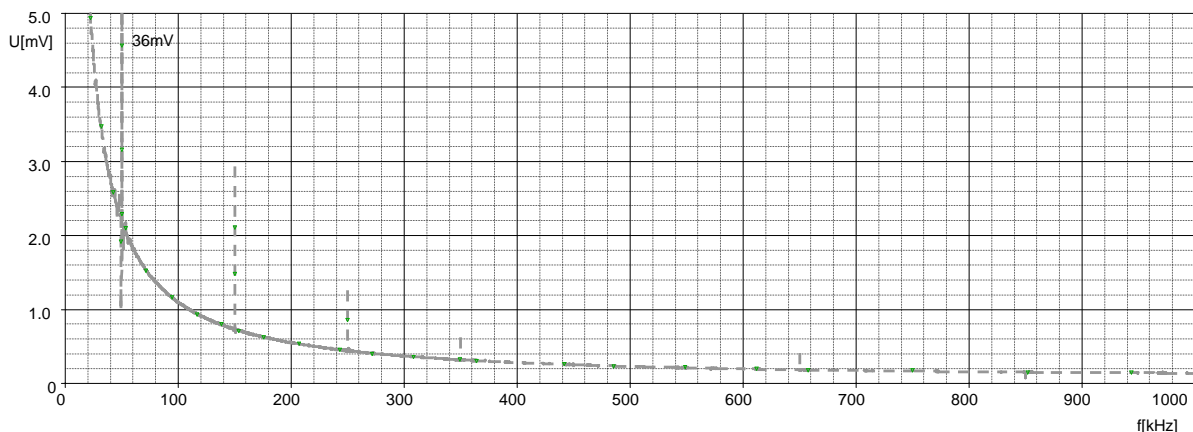
Obr. 10. 2. 35 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 2. 36 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 2. 37 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



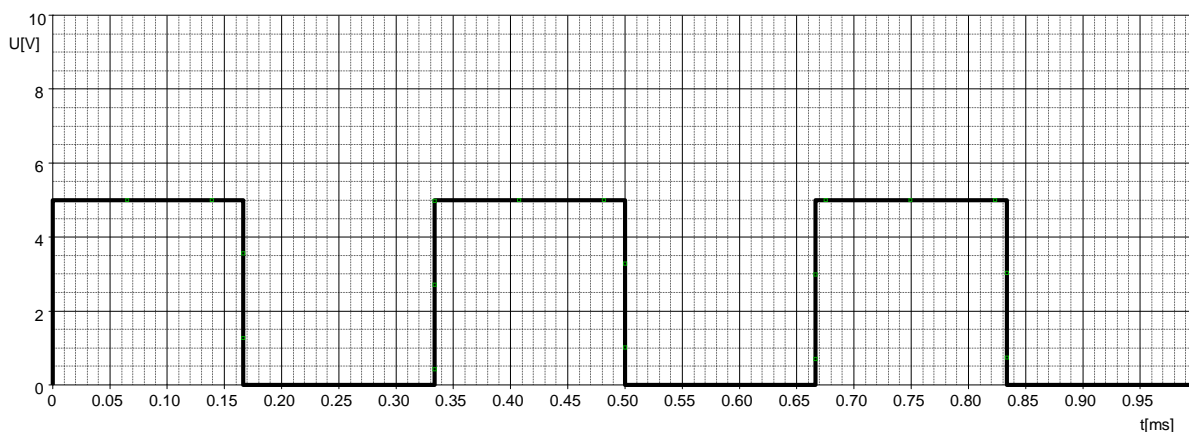
Obr. 10. 2. 38 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω

Na spektrálních grafech přibližně do 300 kHz je patrný šum na pozadí, toto rušení je v síti přítomné stále. Šum na pozadí je proměnný v čase.

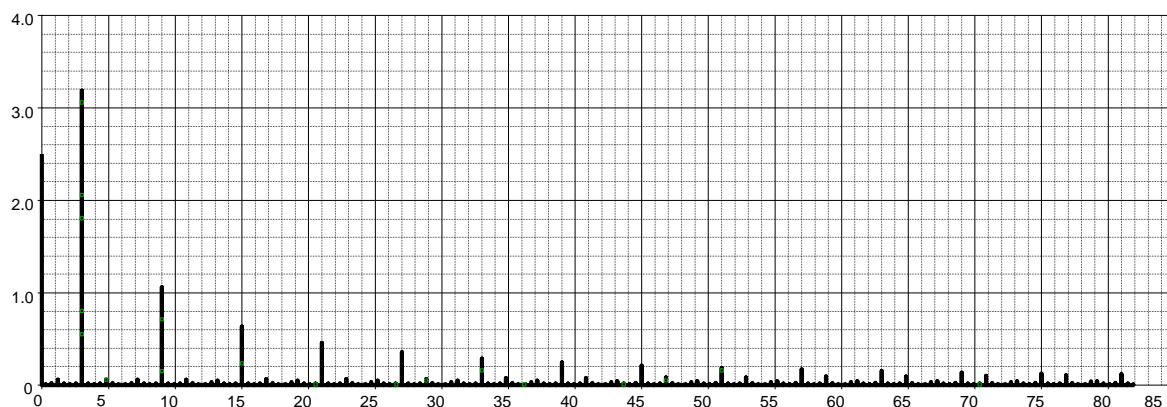
Vliv změny zátěže ani délka vedení se u přenosu signálu 50 kHz po energetickém vedení nijak neprojevil. Simulace byly prováděny s ustálenými parametry. V běžné energetické síti však dochází k náhodnému rušení a kolísání napětí.

Z grafů je patrné, že při frekvenci 50 kHz digitálního signálu je patrné, že dochází k tlumení jeho vyšších harmonických, zejména od čtvrté harmonické výše.

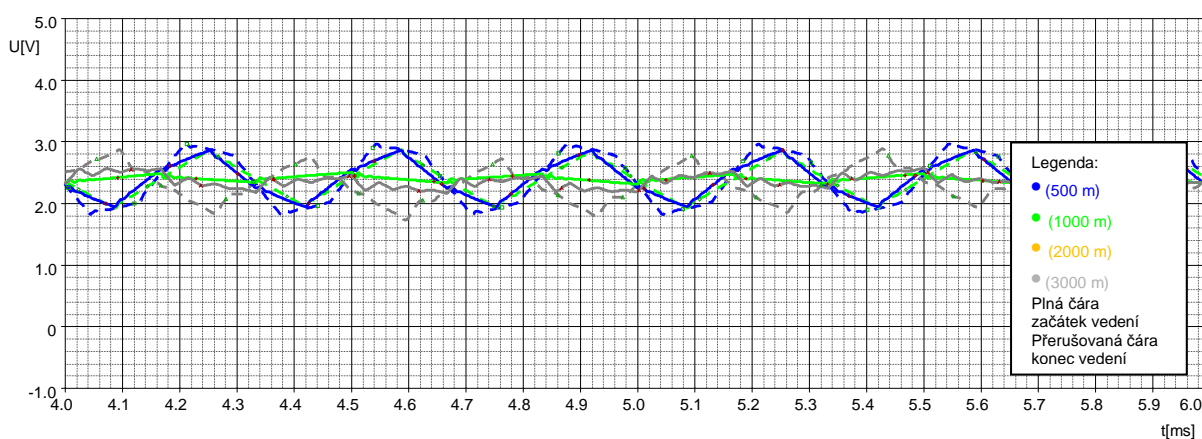
10.3. Přenos digitálního signálu 3 kHz



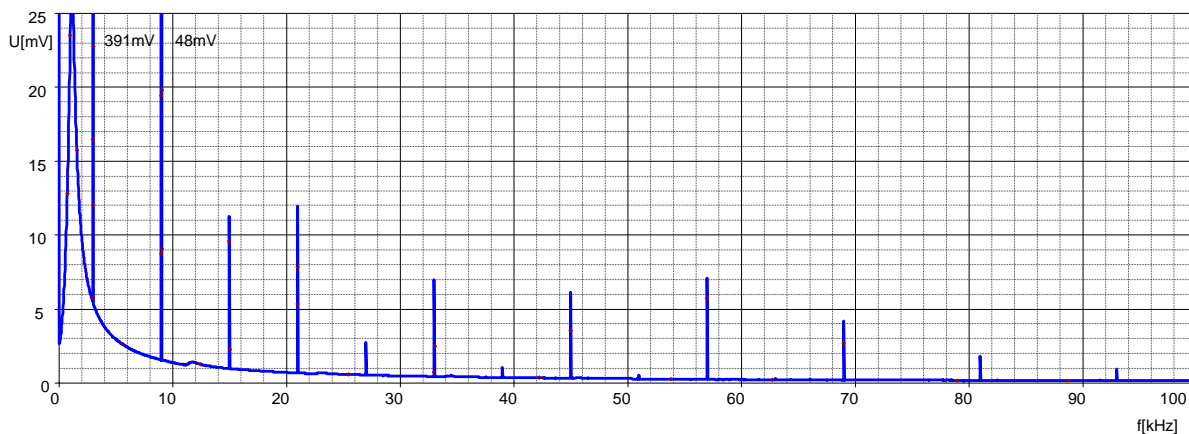
Obr. 10. 3. 1 - Časový průběh digitálního signálu na výstupu z vysílače



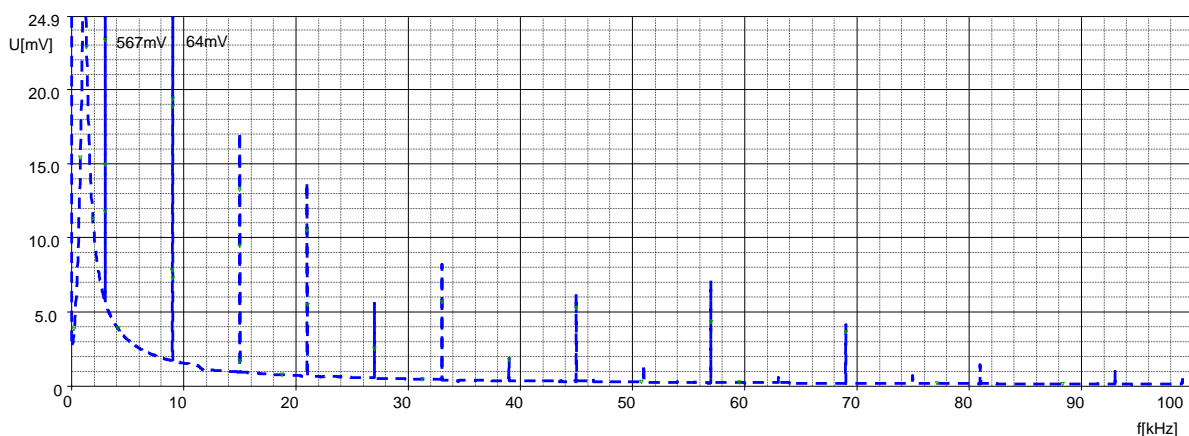
Obr. 10. 3. 2 - Frekvenční spektrum digitálního signálu na výstupu z vysílače



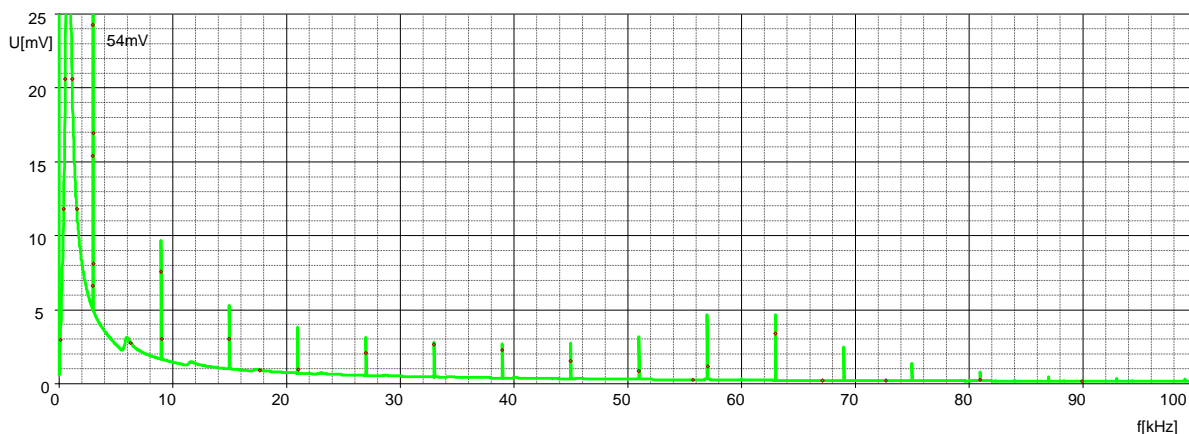
Obr. 10. 3. 3 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω



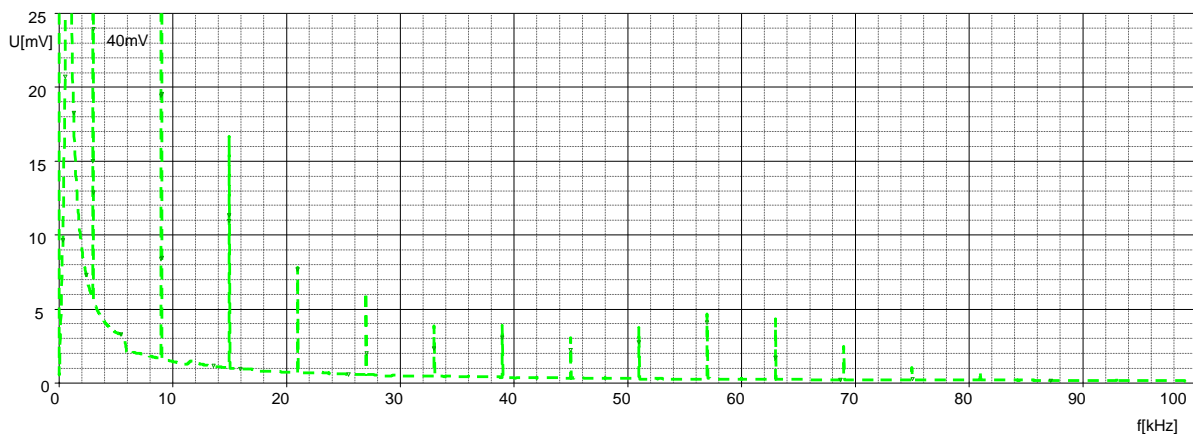
Obr. 10. 3. 4 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



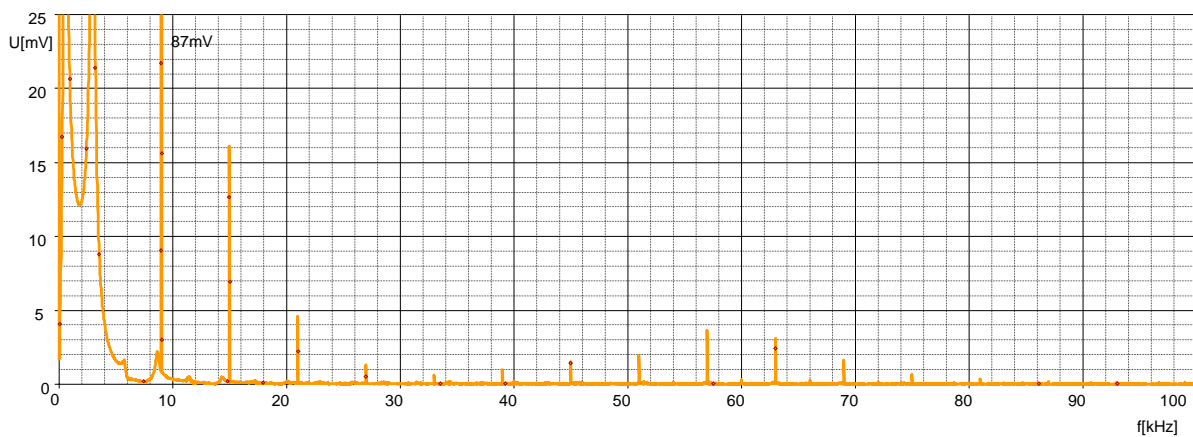
Obr. 10. 3. 5 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



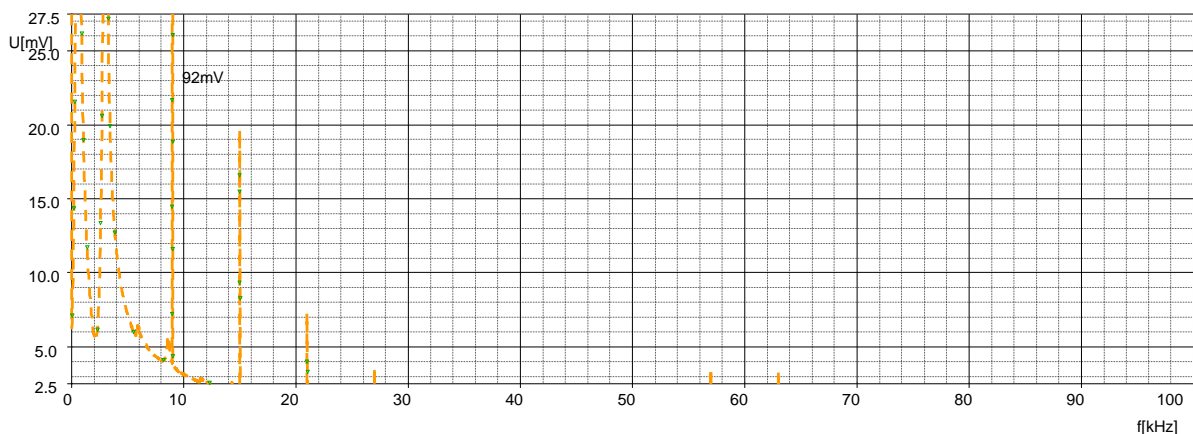
Obr. 10. 3. 6 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



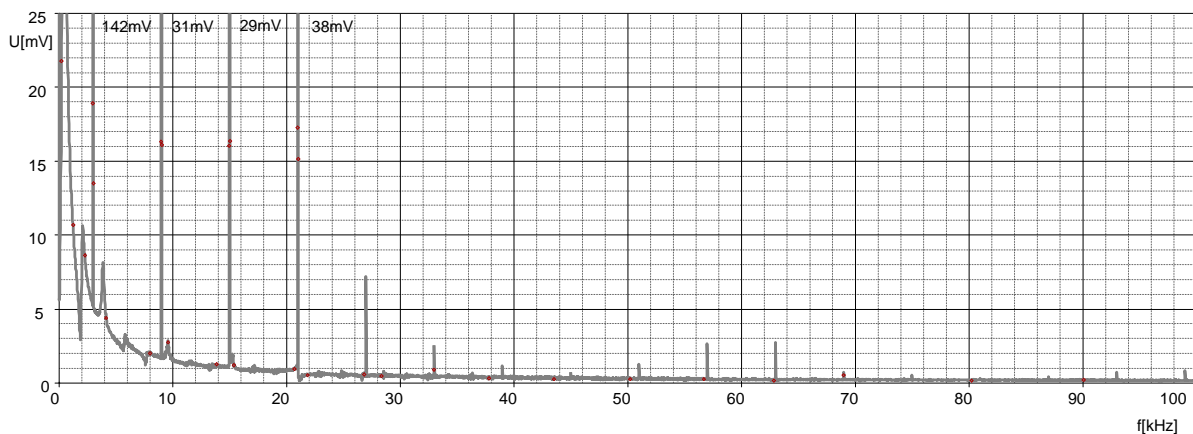
Obr. 10. 3. 7 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



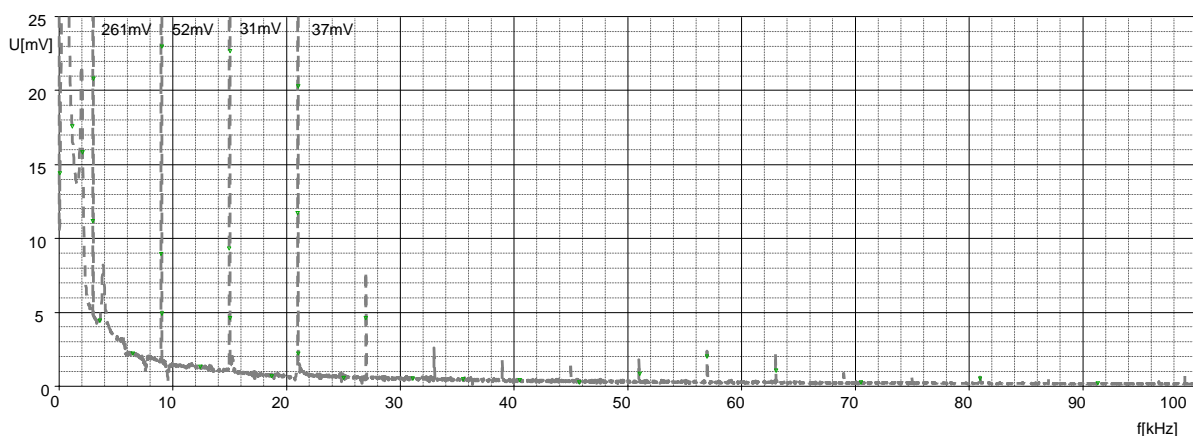
Obr. 10. 3. 8 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



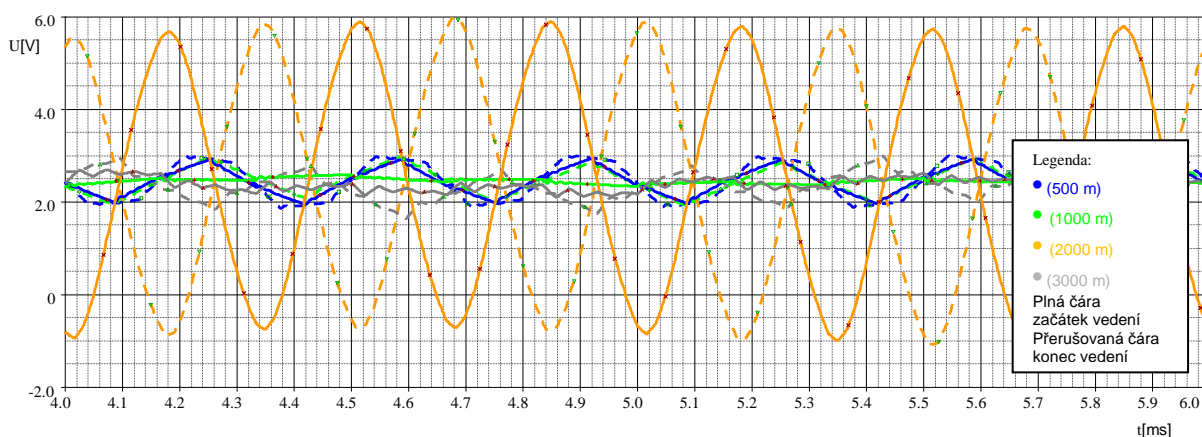
Obr. 10. 3. 9 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



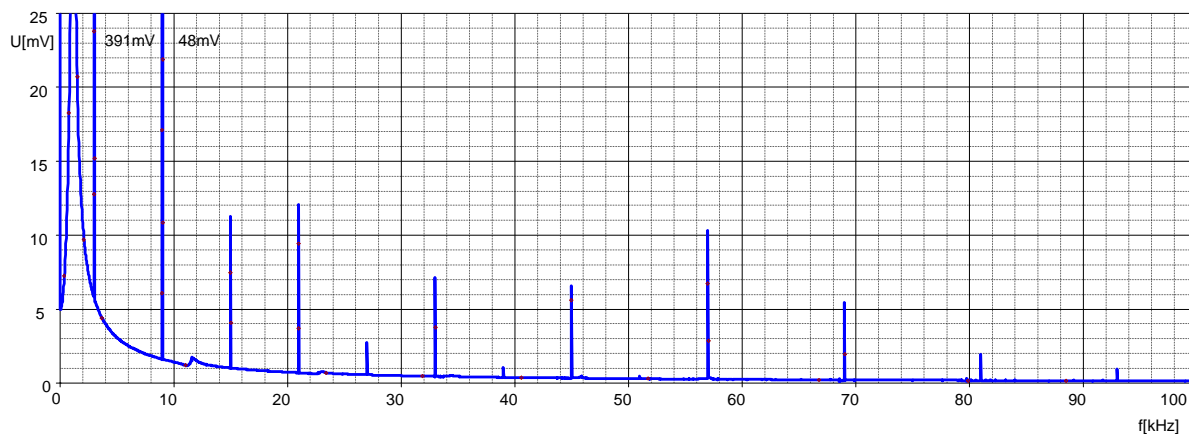
Obr. 10. 3. 10 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



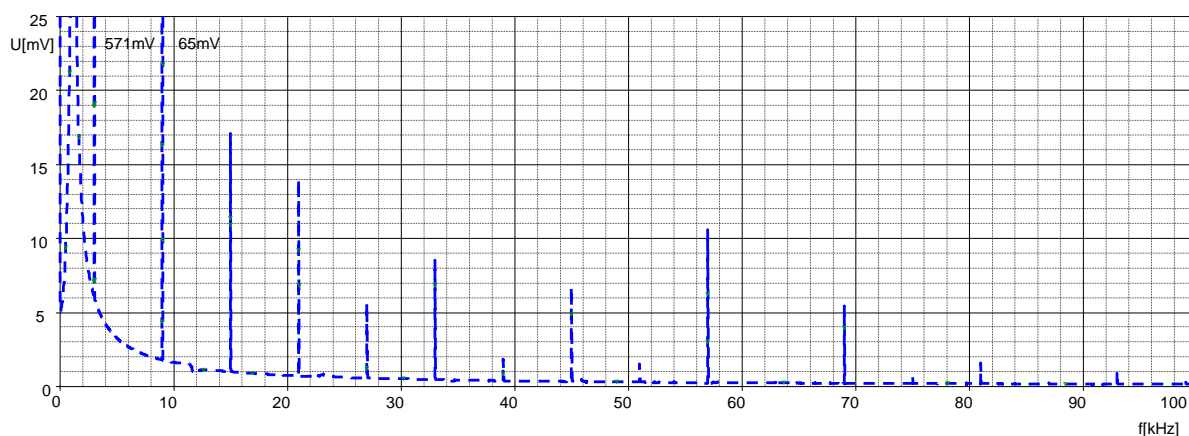
Obr. 10. 3. 11 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



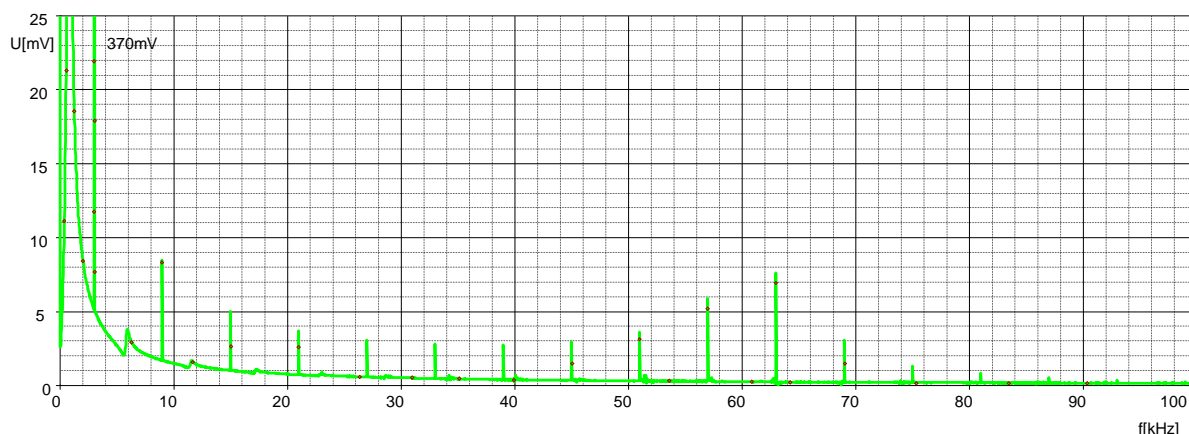
Obr. 10. 3. 12 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω



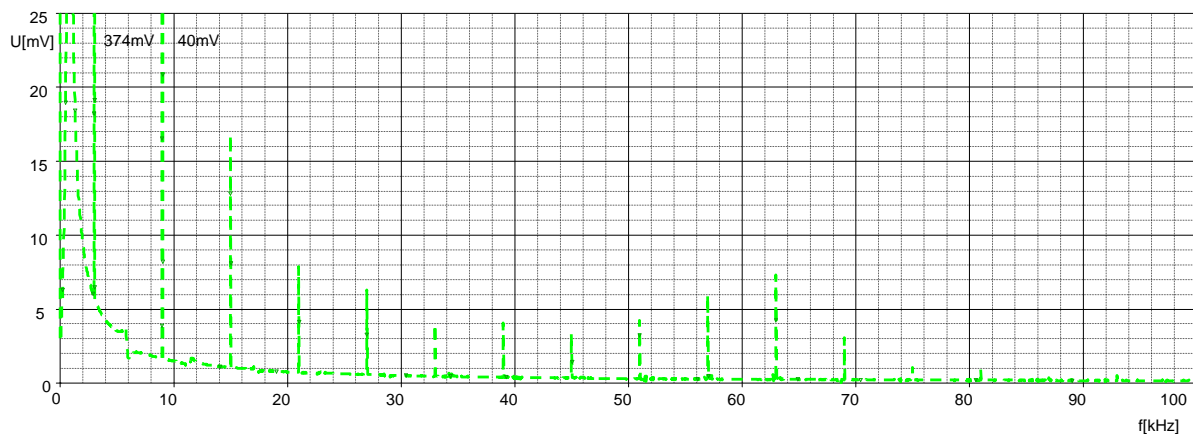
Obr. 10. 3. 13 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



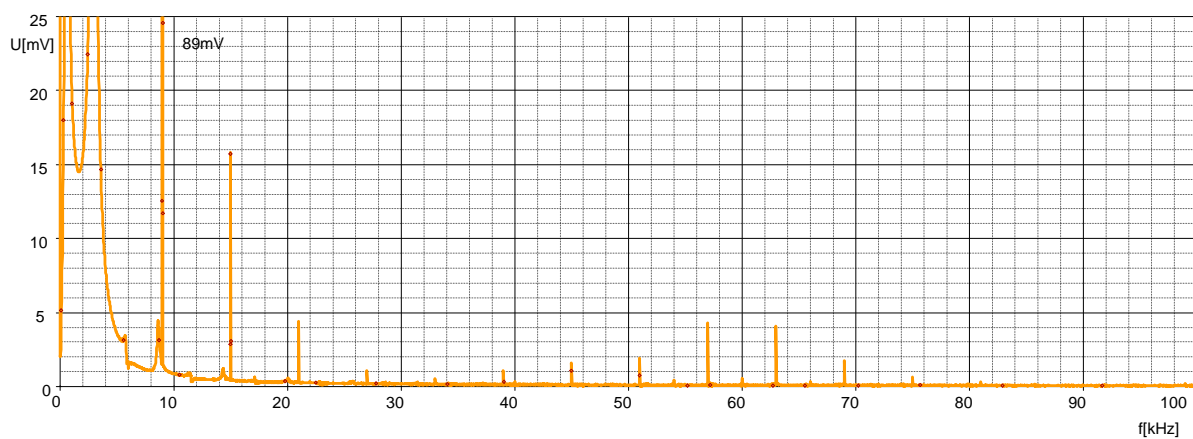
Obr. 10. 3. 14 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



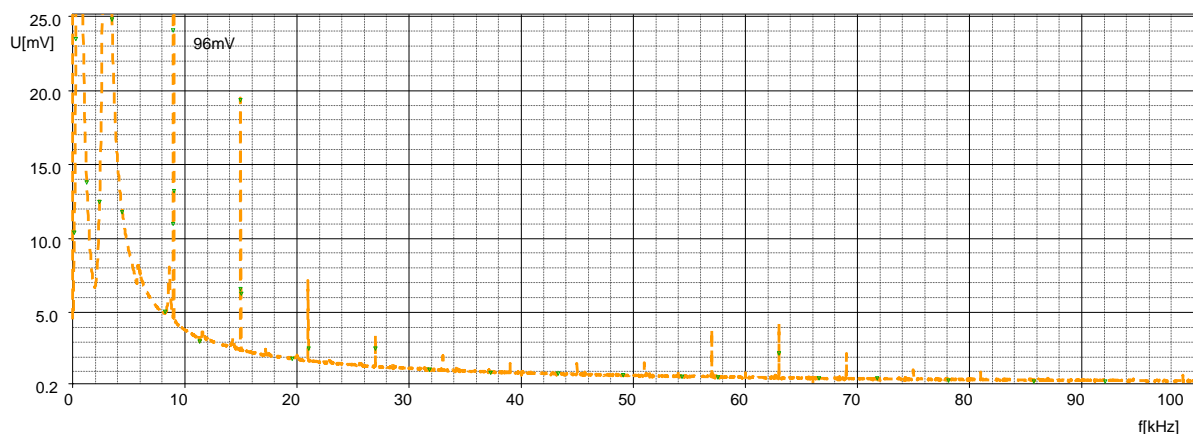
Obr. 10. 3. 15 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



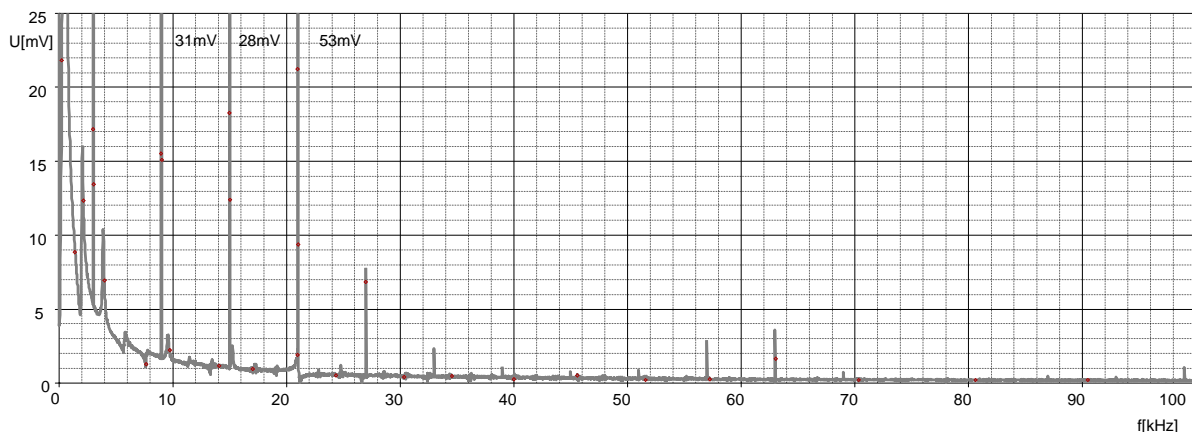
Obr. 10. 3. 16 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



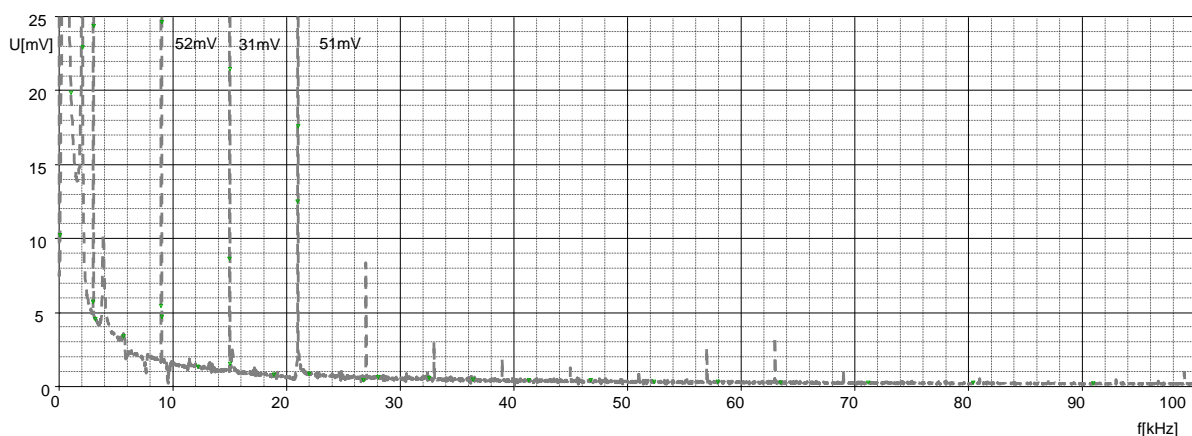
Obr. 10. 3. 17 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



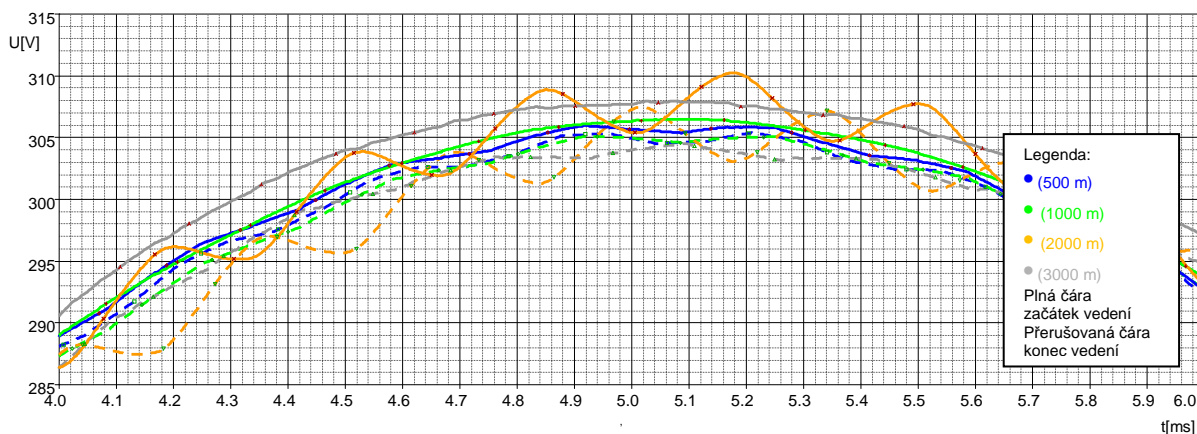
Obr. 10. 3. 18 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



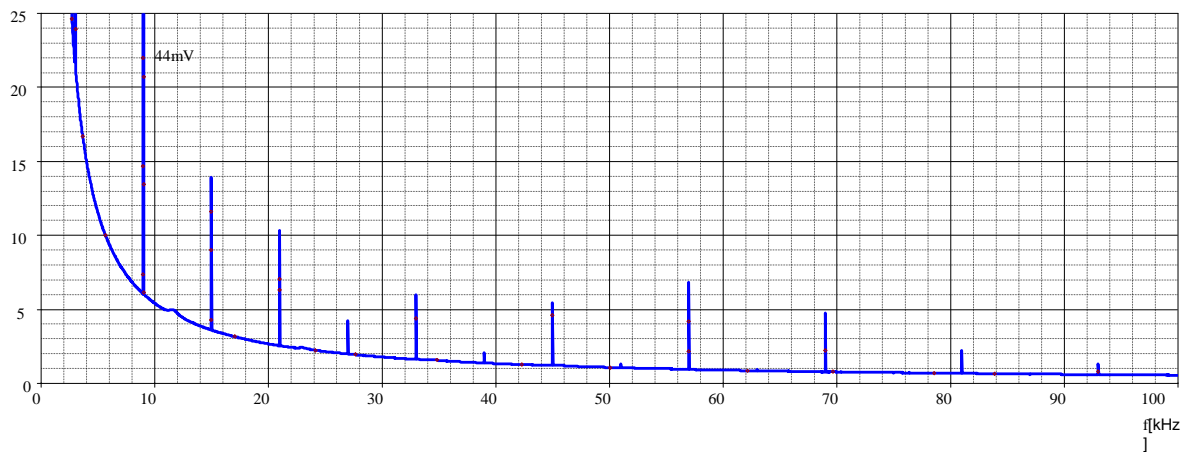
Obr. 10. 3. 19 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



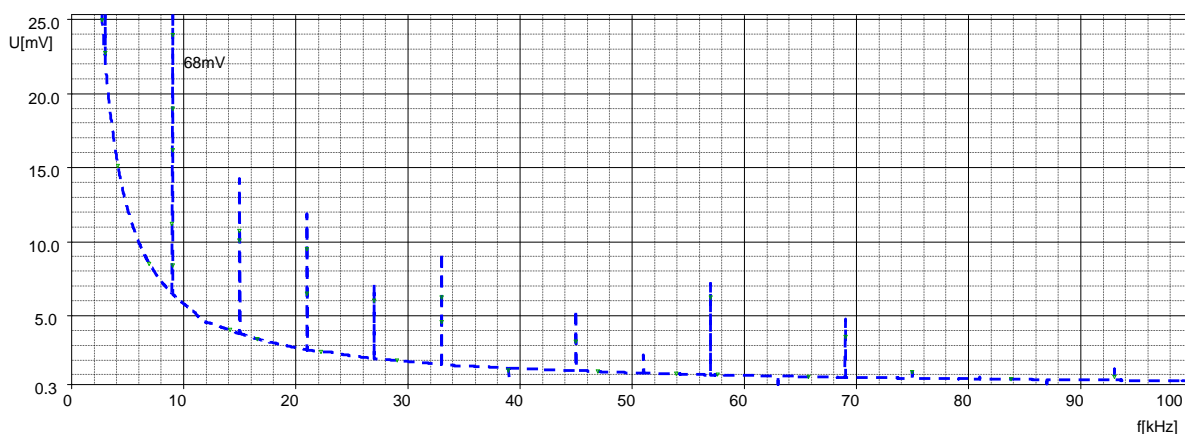
Obr. 10. 3. 20 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



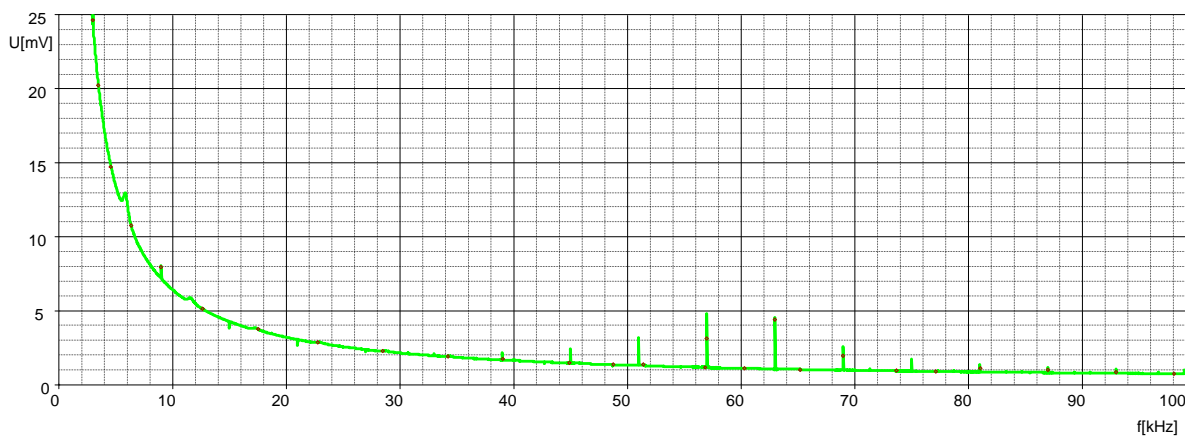
Obr. 10. 3. 21 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω



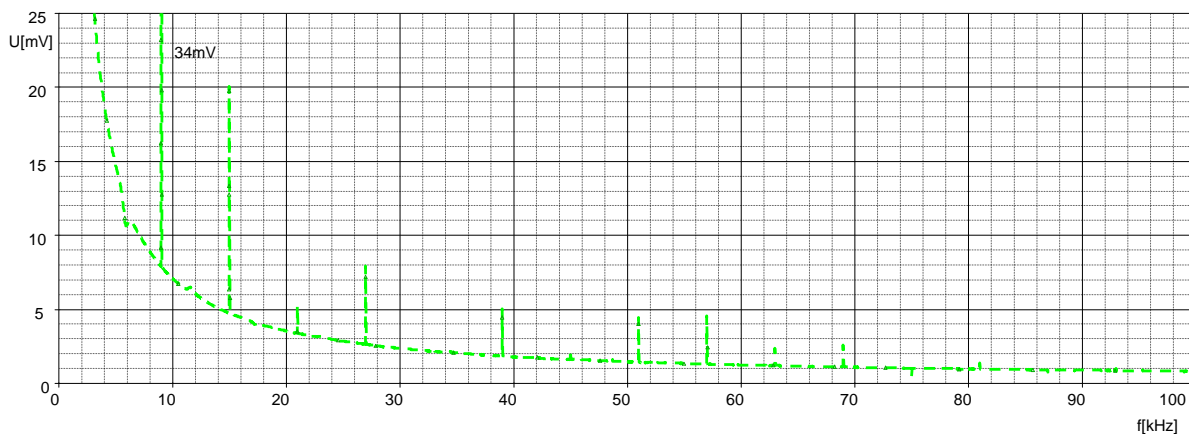
Obr. 10. 3. 22 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



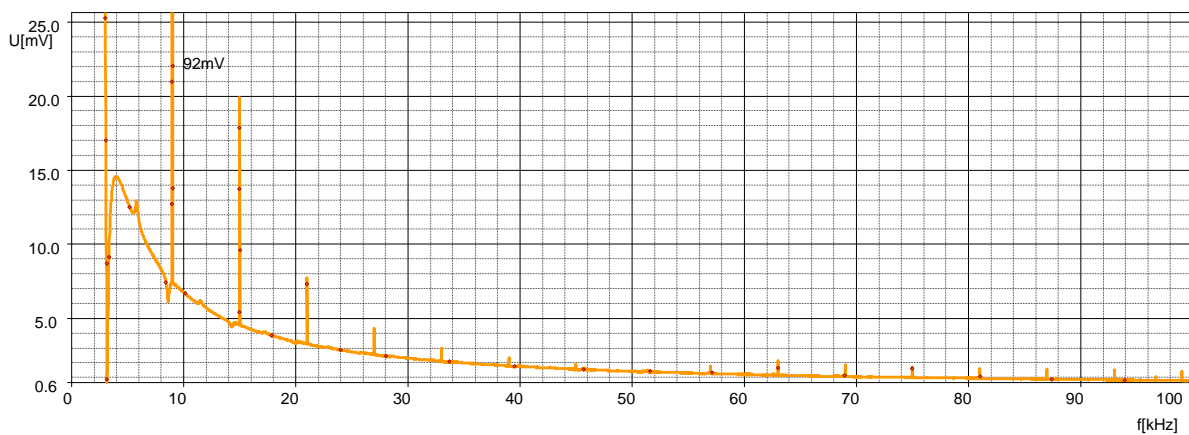
Obr. 10. 3. 23 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω



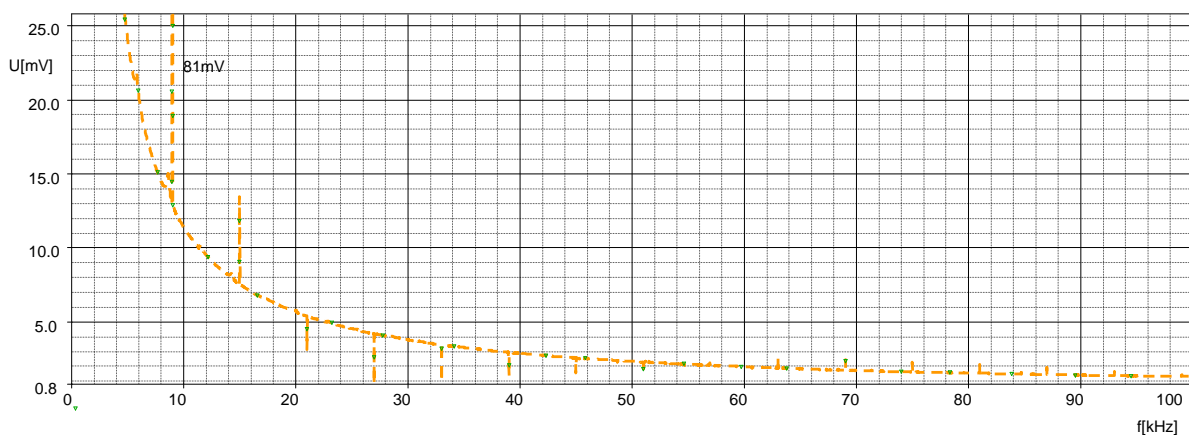
Obr. 10. 3. 24 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



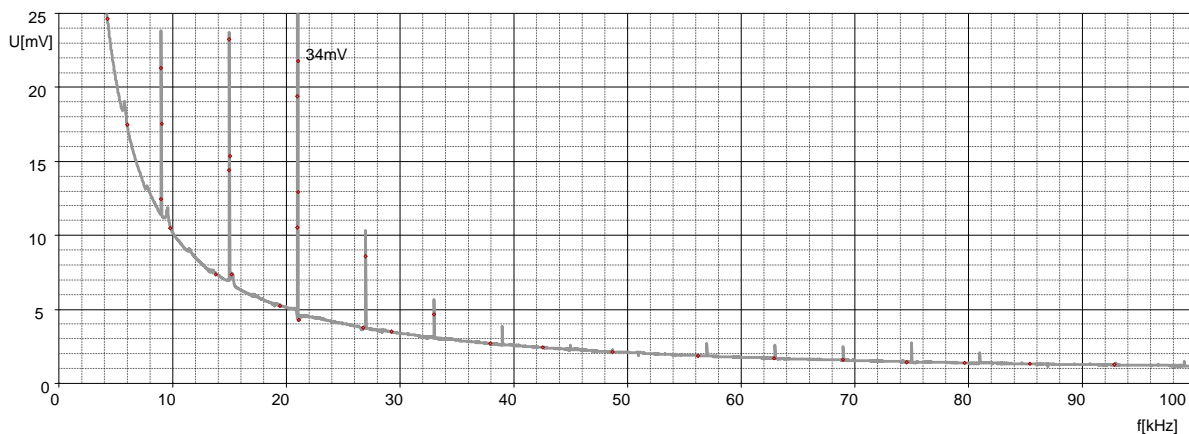
Obr. 10. 3. 25 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω



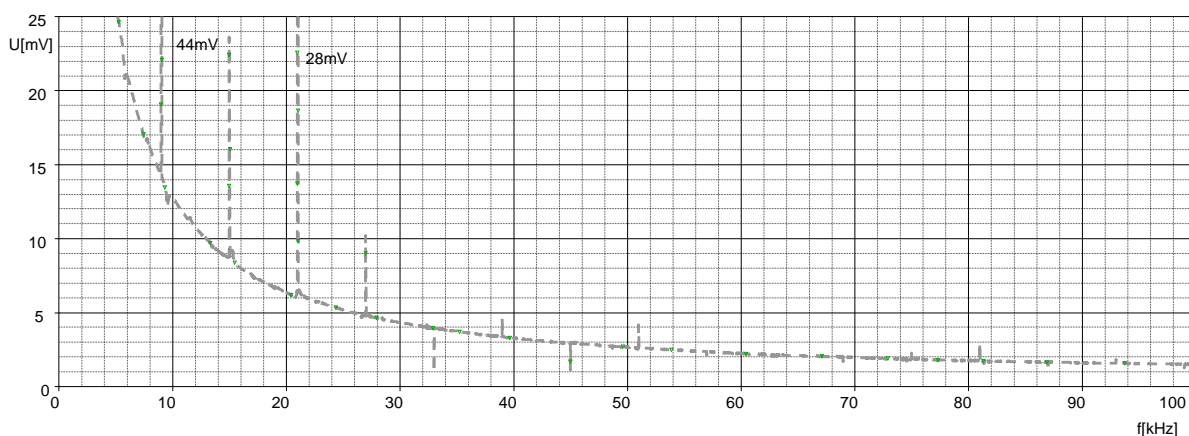
Obr. 10. 3. 26 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



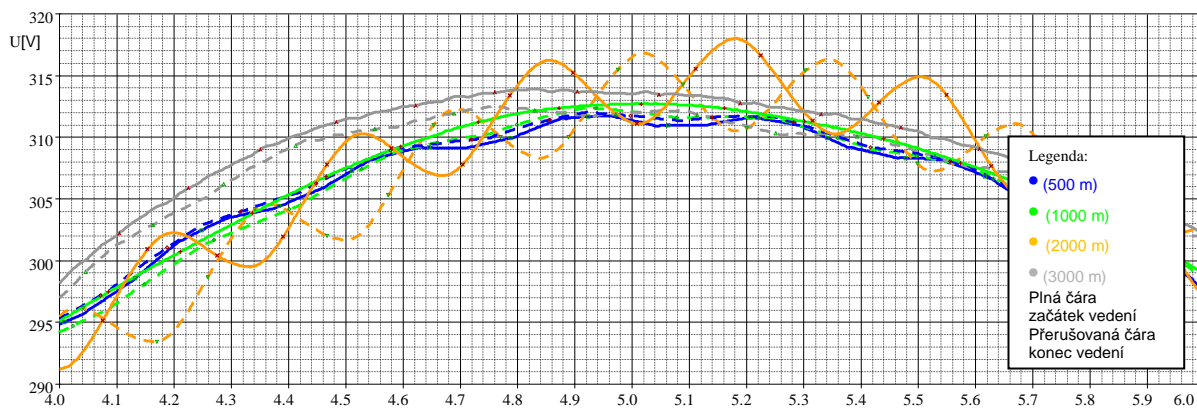
Obr. 10. 3. 27 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω



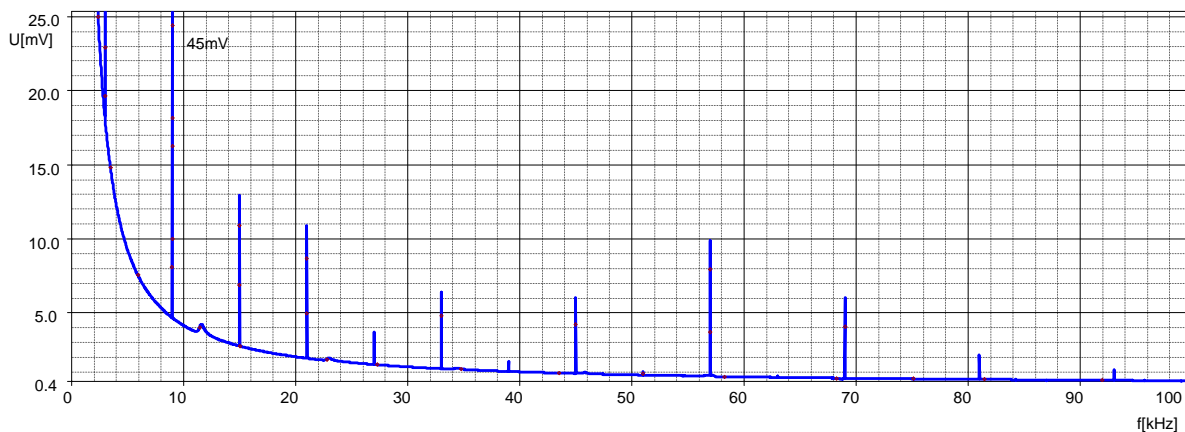
Obr. 10. 3. 28 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



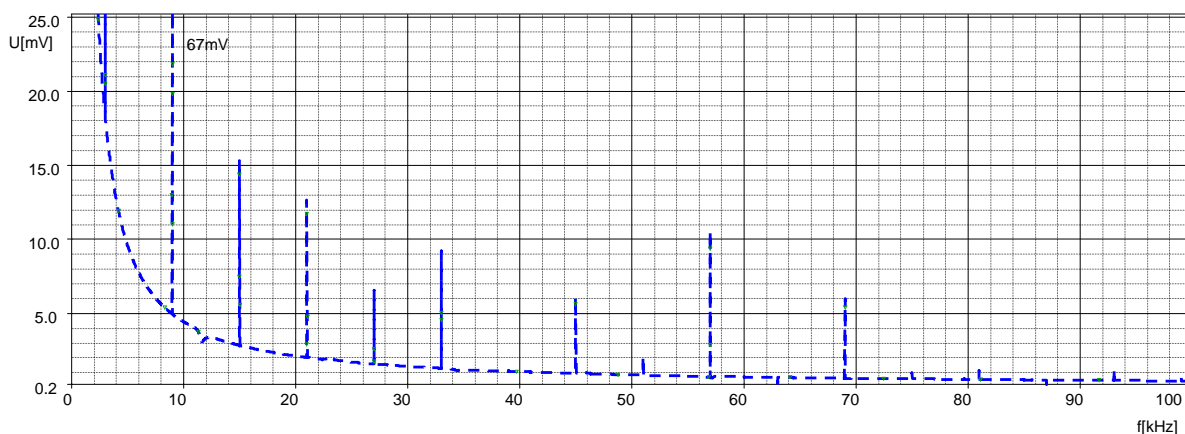
Obr. 10. 3. 29 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω



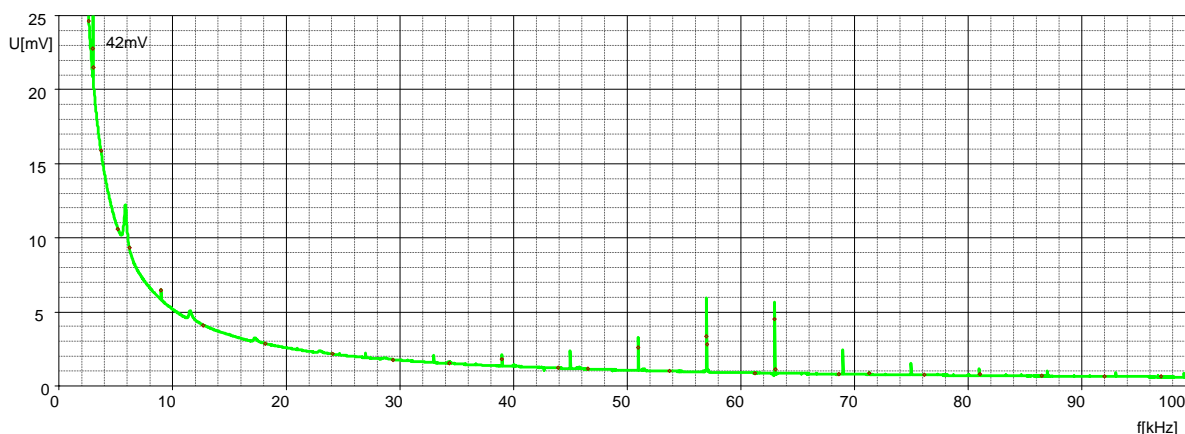
Obr. 10. 1. 30 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω



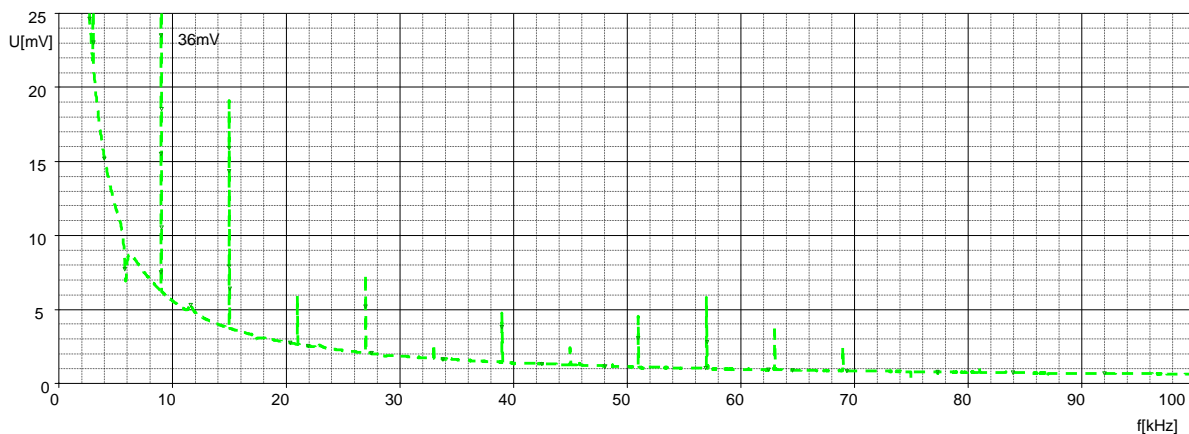
Obr. 10. 3. 31 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



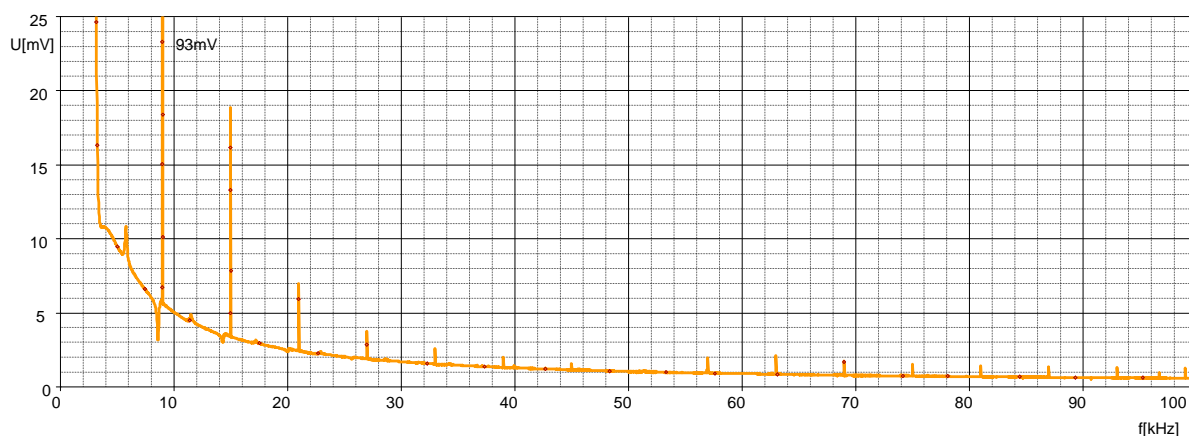
Obr. 10. 3. 32 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω



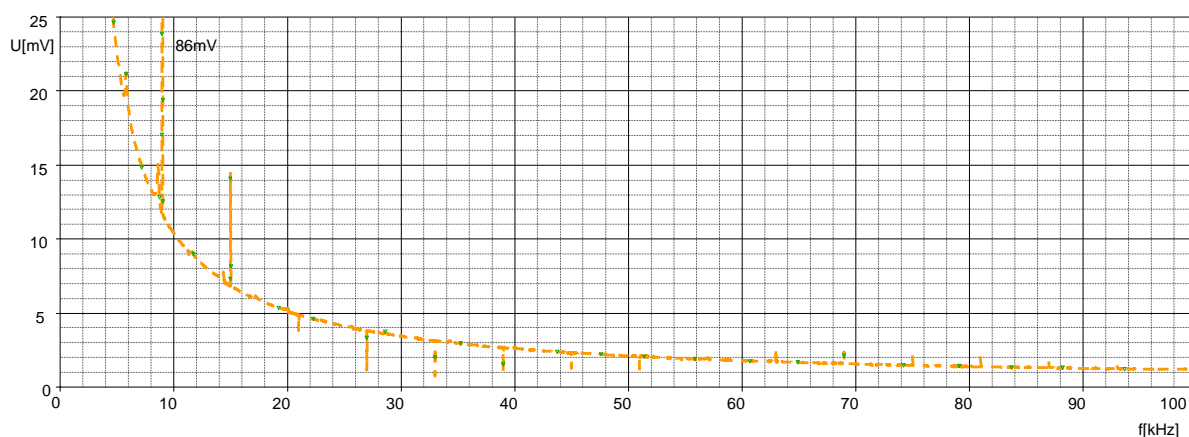
Obr. 10. 3. 33 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



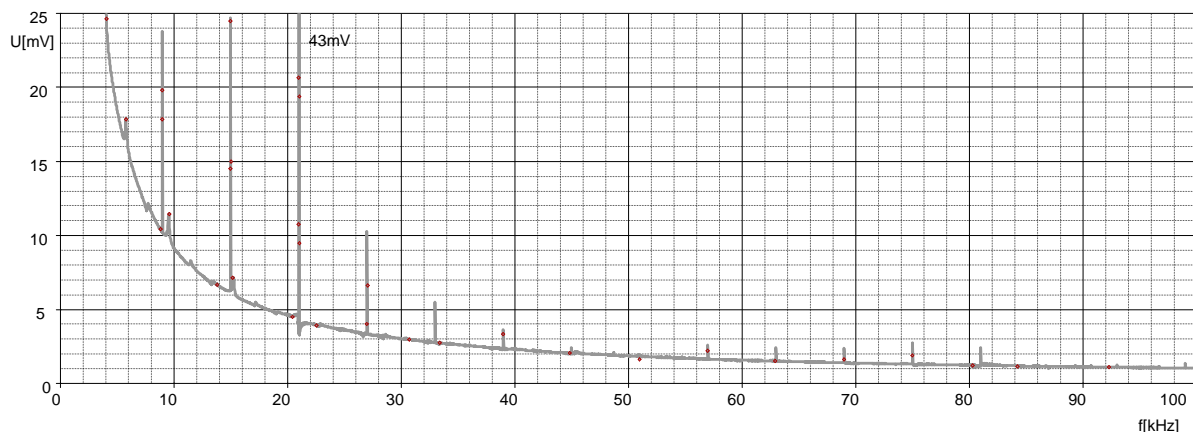
Obr. 10. 3. 34 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω



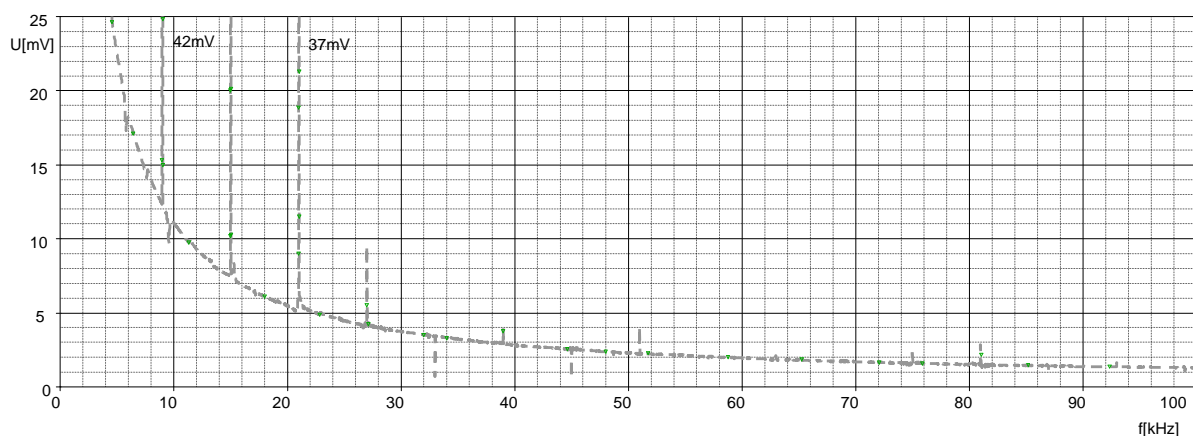
Obr. 10. 3. 35 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 3. 36 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 3. 37 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω



Obr. 10. 3. 38 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω

Na spektrálních grafech přibližně do 100 kHz je patrný šum na pozadí, toto rušení je v síti přítomné stále. Šum na pozadí je proměnný v čase. Dalším rušením, které je ze spekter patrné je úzkopásmový šum, který vznikl při přechodným dějem při spuštění simulace.

Vliv změny zátěže ani délka vedení se u přenosu signálu 3 kHz po energetickém vedení nijak neprojevil. Při frekvenci signálu 3 kHz (nejnižší dovolená frekvence) dochází k největšímu útlumu vyšších harmonických digitálního signálu.

ZÁVĚR

Simulace prováděné na vedeních různých délek dokládají, že nejvýraznější deformace digitálního signálu nastává při samotné injekci digitálního signálu na vedení. Během přenosu k tak razantním deformacím digitálního signálu nedochází. Z nasimulovaných hodnot je patrné, že na vedení dochází k útlumům a odrazům signálu, které jsou způsobeny impedančním nepřizpůsobením vedení. V simulacích prováděných na modelovém vedení docházelo velmi často k jevům, kdy se odražený signál sečetl se signálem vysílaným a došlo tak ke zvýšení amplitudy harmonických složek digitálního signálu.

Vliv zatížení energetické sítě, je-li v mezích ustálený nemá vliv na přenos signálu podobně jako délka kabelového vedení. V simulaci bylo použito kabelové vedení AYKY 240 mm² + 120 mm². Jedná se o standardní kabel pro realizaci domovních přípojek. Hraniční délka vedení byla v simulacích zvolena na 3000 metrů. V běžné praxi se delší vývody z distribuční trafostanice nerealizují.

Praktická část této diplomové práce potvrdila, že energetické vedení vytváří pro přenos periodického digitálního signálu dostatečně kvalitní přenosový kanál. V simulacích nebyly zohledněny možná rušení, která mají zásadní vliv na přenos signálu.

Největší rušení způsobují zařízení využívající polovodičových prvků pro spínání velkých proudů, dále pak spínací technika (stykače), zářivky, motory, apod.

Různé přechodové jevy, napěťové špičky, vznik harmonických složek, které vyvolávají zařízení uvedená výše, ovlivňují komunikaci PLC takovým způsobem, že dochází k jejím častým výpadkům. Z těchto důvodů je nutné stále vytvářet nové modulační postupy.

Největší vliv z parametrů ztrátového vedení na vlastnosti signálu má kapacita kabelu, zvyšující se kapacita má velký vliv na počet přenesených harmonických složek digitálního signálu. Se zvyšující se kapacitou kabelu se tlumí harmonické složky potřebné k opětovnému sestavení signálu. Vlivem změny indukce kabelu se mění fázový posuv napětí 230 V / 50 Hz, který má za následek další deformaci signálu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Podnikové materiály firmy ZPA Smart energy a.s., třífázový statický elektroměr typ AM 350, Poděkování panu Ing. Eduardovi Převlockému (14.3.2011)
- [2] Webová stránka, Závodný elektro s.r.o.
http://www.zavodny.cz/pdf/ets429_man_v7.pdf (25.3.2011)
- [3] Dobeš J., Žalud. V: Moderní radiotechnika. Praha 2006, 1. vydání
EAN 9788073001322, ISBN 978-80-7300-132-2
- [4] Webová stránka, Access server.
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2010020004> (26.3.2011)
- [5] Webová stránka, hungry-lord.wz..
<http://hungry-lord.wz.cz/data/Aplikace.php> (26.3.2011)
- [6] Valenta J.: Bakalářská práce, VÚT Brno (2009), Úzkopásmový přenos dat po energetických sítích.
- [7] Pataj J.: Bakalářská práce, VÚT Brno (2008), Možnosti datové komunikace po silových vedení nízkého napětí
- [8] Doleček R.: Energetika kolejové dopravy, výukový materiál, Pardubice (2010).
- [9] Bezoušek P., Schejbal V., Šedý P.: Elektrotechnika. Univerzita Pardubice 2003, 1. vydání, ISBN 80-7194-620-6
- [10] Webová stránka, 3pol.
<http://3pol.cz/817-smart-grid-hudba-blizke-budoucnosti> (15.1.2011)
- [11] Webová stránka, elektrorevue.
Pavelka O., Ústav telekomunikací, Purkyňova 118, FEI VUT v Brně
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/00034/index.html#CLuvod> (10.4.2011)
- [12] Webová stránka, radio.feec.vutbr.
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node7> (19.5.2011)
- [13] Norma ČSN EN 50065
- [14] Měřička J., Hamata V., Voženílek.: Elektrické stroje. ČVUT 1994, ISBN 80-01-01020-1

SEZNAM ZKRATEK

PLC	Power Line Communications
HDO	Hromadné Dálkové Ovládání
BPL	Broad over Power Line
FSK	Frequency shift keying
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
DCSK	Differential Chaos Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
16QAM	16Quadrature Amplitude Modulation
64QAM	64Quadrature Amplitude Modulation
CDSK	Correlation delay shift keying
SCSK	Symmetric chaos shift keying

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. 1. 1 – Blokové schéma statického elektroměru firmy ZPA [1].....	10
Obr. 2. 1. 1 – Modulace 2FSK.....	15
Obr. 2. 2. 1 – Signálový prostor modulace BPSK.....	16
Obr. 2. 2. 2 – Modulace BPSK.....	16
Obr. 2. 3. 1 - Principiální koncepce vysílače a přijímače OFDM [4].....	17
Obr. 2. 3. 2 – Spektrum OFDM [4]	17
Obr. 2. 4. 1 – Vysílač DCSK [5]	19
Obr. 2. 4. 2 – Přijímač DCSK [5]	19
Obr. 3. 1. 1 – Náhradní schéma homogenního vedení	20
Obr. 3. 1. 2 – Vzájemná indukčnost mezi stejně vzdálenými vodiči [8].....	22
Obr. 3. 1. 3 – Vzájemná vzdálenost mezi různě vzdálenými vodiči [8].....	23
Obr. 4. 1. 1 - Chytrá síť [10].....	27
Obr. 5. 2. 1 – Přímá fázová komunikace [11]	29
Obr. 5. 3. 1 – Mezifázová komunikace bez spojení fází [11].....	29
Obr. 5. 4. 1 – Mezifázová komunikace se spojením fází [11].....	30
Obr. 5. 5. 1 – Zařízení mezi fázemi – zkrat pro datový signál [11].....	30
Obr. 5. 5. 2 – Zařízení mezi fázemi – využití třísvorkového filtru [11].....	30
Obr. 6. 1. 1 – Rozdělení zdrojů rušení [12]	31
Obr. 6. 2. 2 – Deformace síťového napětí vlivem diodových usměrňovačů a tyristorových měničů [12].....	33
Obr. 7. 1. 1 – Režimy vazby a šíření [13].....	34
Obr. 9. 1. 1 – Náhradní schéma energetického vedení.....	37
Obr. 9. 2. 1 – Náhradní schéma transformátoru	38
Obr. 10.1.1 - Časový průběh digitálního signálu na výstupu z vysílače	40
Obr. 10.1.2 - Frekvenční spektrum digitálního signálu na výstupu z vysílače.....	41
Obr. 10. 1. 3 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω	41
Obr. 10. 1. 4 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	41
Obr. 10. 1. 5 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	42
Obr. 10. 1. 6 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	42
Obr. 10. 1. 7 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	42
Obr. 10. 1. 8 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	43
Obr. 10. 1. 9 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	43
Obr. 10. 1. 10 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	43
Obr. 10. 1. 11 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	44
Obr. 10. 1. 12 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω	45
Obr. 10. 1. 13 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	45

Obr. 10. 1. 14 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	45
Obr. 10. 1. 15 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	46
Obr. 10. 1. 16 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	46
Obr. 10. 1. 17 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	46
Obr. 10. 1. 18 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, délka vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, 2000 m, zátěž 10000 Ω	47
Obr. 10. 1. 19 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	47
Obr. 10. 1. 20 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	47
Obr. 10. 1. 21 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω	48
Obr. 10. 1. 22 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	48
Obr. 10. 1. 23 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	48
Obr. 10. 1. 24 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	49
Obr. 10. 1. 25 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	49
Obr. 10. 1. 26 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	49
Obr. 10. 1. 27 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	50
Obr. 10. 1. 28 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	50
Obr. 10. 1. 29 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	50
Obr. 10. 1. 30 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω	51
Obr. 10. 1. 31 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	51
Obr. 10. 1. 32 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	51
Obr. 10. 1. 33 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	52
Obr. 10. 1. 34 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	52
Obr. 10. 1. 35 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	52
Obr. 10. 1. 36 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	53
Obr. 10. 1. 37 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	53
Obr. 10. 1. 38 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	53

Obr. 10.2.1 - Časový průběh digitálního signálu na výstupu z vysílače	54
Obr. 10.2.2 - Frekvenční spektrum digitálního signálu na výstupu z vysílače.....	55
Obr. 10. 2. 3 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω	55
Obr. 10. 2. 4 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	55
Obr. 10. 2. 5 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	56
Obr. 10. 2. 6 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	56
Obr. 10. 2. 7 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	56
Obr. 10. 2. 8 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	57
Obr. 10. 2. 9 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	57
Obr. 10. 2. 10 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	57
Obr. 10. 2. 11 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	58
Obr. 10. 2. 12 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω	58
Obr. 10. 2. 13 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	58
Obr. 10. 2. 14 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	59
Obr. 10. 2. 15 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	59
Obr. 10. 2. 16 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	59
Obr. 10. 2. 17 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	60
Obr. 10. 2. 18 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	60
Obr. 10. 2. 19 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	60
Obr. 10. 2. 20 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	61
Obr. 10. 2. 21 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω.....	61
Obr. 10. 2. 22 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω.....	61
Obr. 10. 2. 23 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω.....	62
Obr. 10. 2. 24 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω.....	62
Obr. 10. 2. 25 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω.....	62
Obr. 10. 2. 26 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω.....	63

Obr. 10. 2. 27 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	63
Obr. 10. 2. 28 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	63
Obr. 10. 2. 29 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	64
Obr. 10. 2. 30 – Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω	64
Obr. 10. 2. 31 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	64
Obr. 10. 2. 32 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	65
Obr. 10. 2. 33 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	65
Obr. 10. 2. 34 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	65
Obr. 10. 2. 35 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	66
Obr. 10. 2. 36 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	66
Obr. 10. 2. 37 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	66
Obr. 10. 2. 38 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	67
Obr. 10. 3. 1 - Časový průběh digitálního signálu na výstupu z vysílače	68
Obr. 10. 3. 2 - Frekvenční spektrum digitálního signálu na výstupu z vysílače	68
Obr. 10. 3. 3 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω	68
Obr. 10. 3. 4 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	69
Obr. 10. 3. 5 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	69
Obr. 10. 3. 6 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	69
Obr. 10. 3. 7 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	70
Obr. 10. 3. 8 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	70
Obr. 10. 3. 9 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	70
Obr. 10. 3. 10 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	71
Obr. 10. 3. 11 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	71
Obr. 10. 3. 12 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω	71
Obr. 10. 3. 13 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	72
Obr. 10. 3. 14 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	72

Obr. 10. 3. 15 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	72
Obr. 10. 3. 16 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	73
Obr. 10. 3. 17 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	73
Obr. 10. 3. 18 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	73
Obr. 10. 3. 19 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	74
Obr. 10. 3. 20 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	74
Obr. 10. 3. 21 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 100 Ω	74
Obr. 10. 3. 22 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, bez napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	75
Obr. 10. 3. 23 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 100 Ω	75
Obr. 10. 3. 24 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	75
Obr. 10. 3. 25 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 100 Ω	76
Obr. 10. 3. 26 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	76
Obr. 10. 3. 27 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 100 Ω	76
Obr. 10. 3. 28 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	77
Obr. 10. 3. 29 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 100 Ω	77
Obr. 10. 1. 30 - Časové průběhy digitálních signálů na začátku a na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, zátěž 10000 Ω	77
Obr. 10. 3. 31 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	78
Obr. 10. 3. 32 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 500 m, zátěž 10000 Ω	78
Obr. 10. 3. 33 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	78
Obr. 10. 3. 34 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 1000 m, zátěž 10000 Ω	79
Obr. 10. 3. 35 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	79
Obr. 10. 3. 36 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 2000 m, zátěž 10000 Ω	79
Obr. 10. 3. 37 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na začátku kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	80
Obr. 10. 3. 38 – Frekvenční pásmo digitálního signálu na konci kabelového vedení, napájení 230 V/ 50 Hz, délka vedení 3000 m, zátěž 10000 Ω	80