



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



EMC

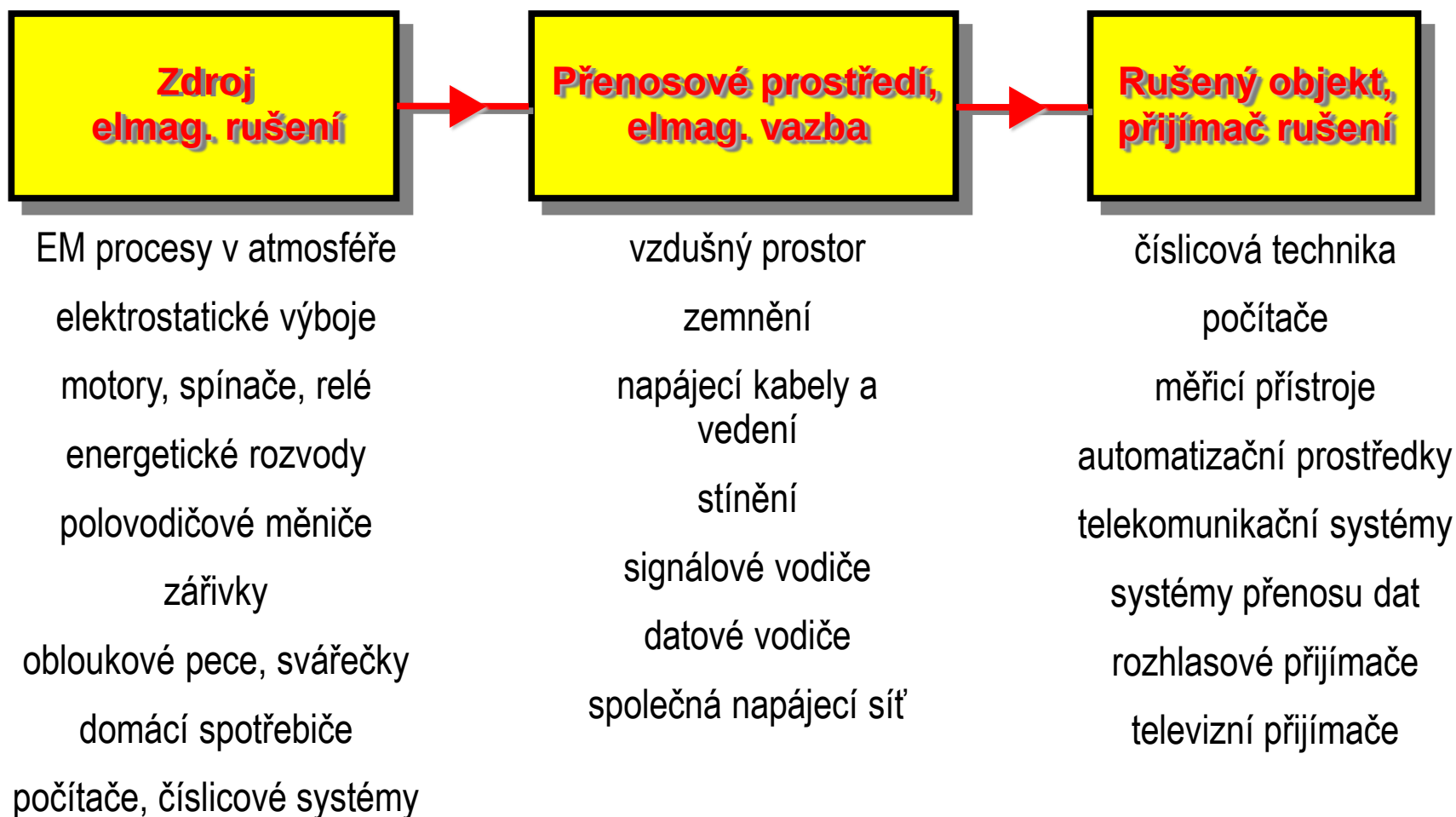
Testování elektromagnetické odolnosti

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

EMC technických systémů

Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí



Základní členění problematiky EMC



Elektromagnetická odolnost

Interní elektromagnetická odolnost přístroje závisí na:

- obvodovém řešení a rozložení elektronických prvků
- návrhu desek plošných spojů, uspořádání spojů a kabeláží
- typu napájení, rozložení napájecích a signálových bloků přístroje
- návrhu a provedení vnitřního stínění a zemnění
- volbě a konstrukci stykových prvků k vnějším systémům

Externí elektromagnetická odolnost (imunita):

- velké množství potenciálně možných zdrojů rušení
- uvažují se jen nejpravděpodobnější a potenciálně nejnebezpečnější zdroje rušení
- mez externí odolnosti se stanovuje pro každý vybraný typ rušení zvlášť

Elektromagnetická odolnost

Celková elektromagnetická odolnost

- Interní elektromagnetická odolnost **systemu** je závislá na interní odolnosti jeho dílčích **subsystémů**.
- Výsledná interní elektromagnetická odolnost systému je určena elektromagnetickou odolností jeho „**nejslabšího článku**“, tj. subsystému s nejnižší vlastní elektromagnetickou odolností.
- Výsledná **externí** elektromagnetická odolnost systému může záviset na jeho **interní** elektromagnetické odolnosti, neboť zde může docházet k negativnímu skládání různých rušivých vlivů, a tím ke snižování celkové odolnosti systému.

Kritéria elektromagnetické odolnosti

Kvantitativní mez odolnosti – dosažení určité hodnoty (určitých hodnot) vybrané měřené veličiny (veličin).

Kvalitativní (funkční) kritérium EM odolnosti – posouzení změny provozního stavu či ovlivnění funkčnosti zařízení.

Tři základní funkční kritéria:

Funkční kritérium A – není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce **během** zkoušky ani po ukončení zkoušky.

Funkční kritérium B – je dovoleno zhoršení činnosti zařízení **během** zkoušky, ne však změna provozního stavu zařízení ani změna dat v paměti. **Po skončení** zkoušky není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce.

Funkční kritérium C – je dovolena **dočasná** ztráta funkce zařízení, pokud se po skončení zkoušky odolnosti obnoví sama nebo může být obnovena řídicím systémem či zásahem operátora dle návodu k použití zařízení.

V normativních předpisech je často uváděno ještě další **funkční kritérium D**, které je charakterizováno **nevratnou ztrátou funkce** zkoušeného zařízení, jeho poškozením či zničením.

Metodika zkoušek elektromagnetické odolnosti

- Stanovení rušivých elektromagnetických vlivů, které mohou vyšetřované zařízení v daných pracovních podmínkách ovlivňovat.
- Určení možných bran vstupu rušivých signálů do zařízení.
- Stanovení kategorie požadované odolnosti zkoušeného zařízení.
- Definice přípustných rušivých účinků pro zkoušené zařízení.



- Simulace rušivých signálů, vazba do zkoušeného objektu.
- Provedení vlastních zkoušek a testů dle specifikace.
- Dílčí vyhodnocení po každé zkoušce.
- Vypracování dokumentace o provedených zkouškách.

Vstupy rušivých signálů do zkoušeného zařízení



- zkoušky jsou předepsány pro **každý** zjištěný **vstup** zařízení;
- zkoušky se provádějí na těch vstupech, které jsou během normální činnosti zařízení **přístupné**;
- zkoušky na jednotlivých vstupech se provádějí v libovolném pořadí a vždy jako **samostatné**.

Kategorie požadované odolnosti

jsou mezinárodně standardizovány normami řady IEC 1000-4, příp. ČSN EN 61000-4 pro typická elektrotechnická prostředí:

Úroveň odolnosti 1: běžné prostředí s nízkou úrovní rušení, příp. dobře chráněné prostředí, v němž lze užívat citlivé přístroje;

Úroveň odolnosti 2: prostředí s mírnou úrovní rušení, příp. částečně chráněné prostředí (domácnosti, obchody, kanceláře);

Úroveň odolnosti 3: náročné prostředí s vysokou úrovní rušení, tj. typické průmyslové prostředí;

Úroveň odolnosti 4: speciální prostředí s velmi vysokou úrovní rušení, příp. nechráněné průmyslové prostředí (těžký průmysl, elektrárny, rozvody).

Elektrostatický výboj – zkouška odolnosti

ČSN EN 61000-4-2

Elektrostatický výboj ESD

Přenos elektrostatického náboje mezi tělesy o různém elektrostatickém potenciálu, který nastává při přiblížení nebo přímém dotyku těles.

Vzniká tam, kde se vyskytuje třecí pohyb mechanických částí (kovových nebo dielektrických – pevných, kapalných či plyných).

Charakteristika výboje:

Vysoké průrazné napětí – až 15 kV, někdy i stovky kV

Vysokofrekvenční obsah impulsního rušení – až 1 GHz

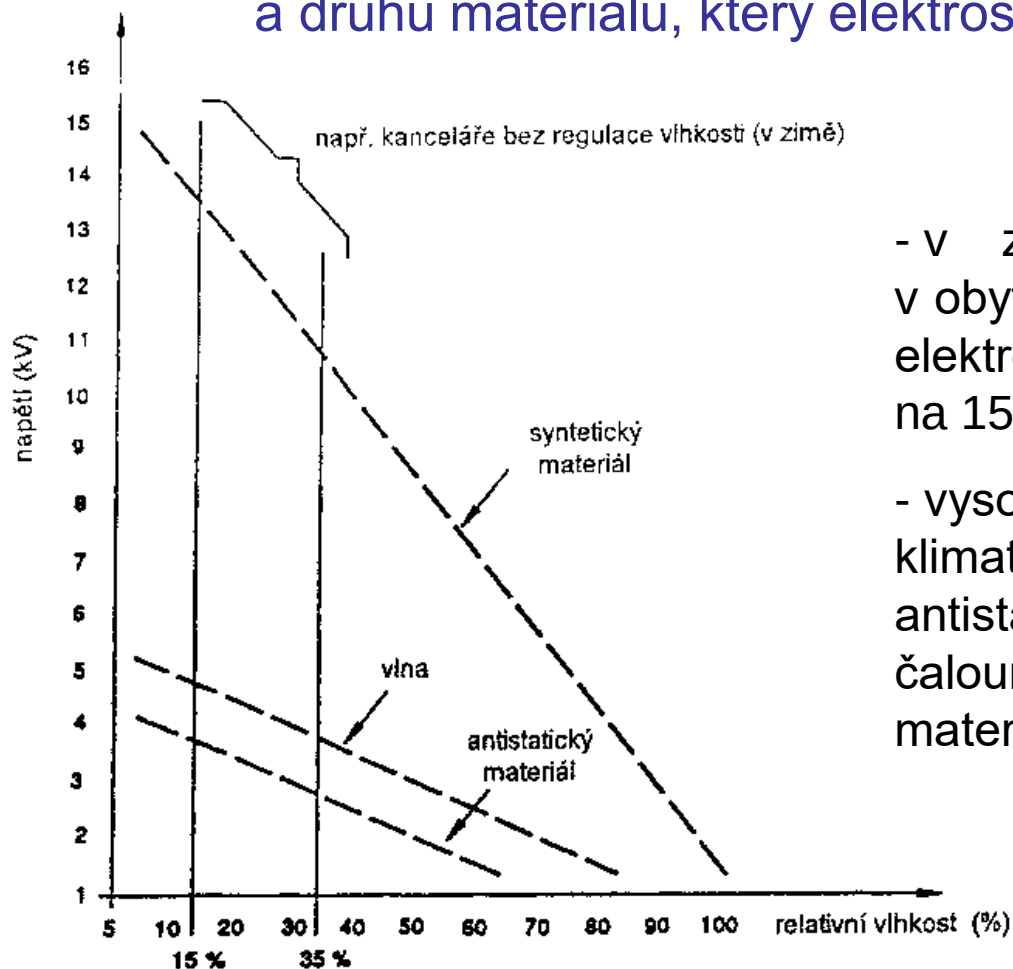
- vf účinky výboje pronikají prostřednictvím parazitních impedancí a zářivou složkou elektromagnetického pole

Energie výboje – do 10 mJ

Příčiny vzniku elektrostatického výboje

Příčinou je prostředí a podmínky instalace – nízká relativní vlhkost, použití podlahových krytin s nízkou vodivostí (umělá vlákna), obleky z vinylu, atd..

Závislost napětí elektrostatického výboje na vlhkosti vzduchu a druhu materiálu, který elektrostatický náboj vytváří



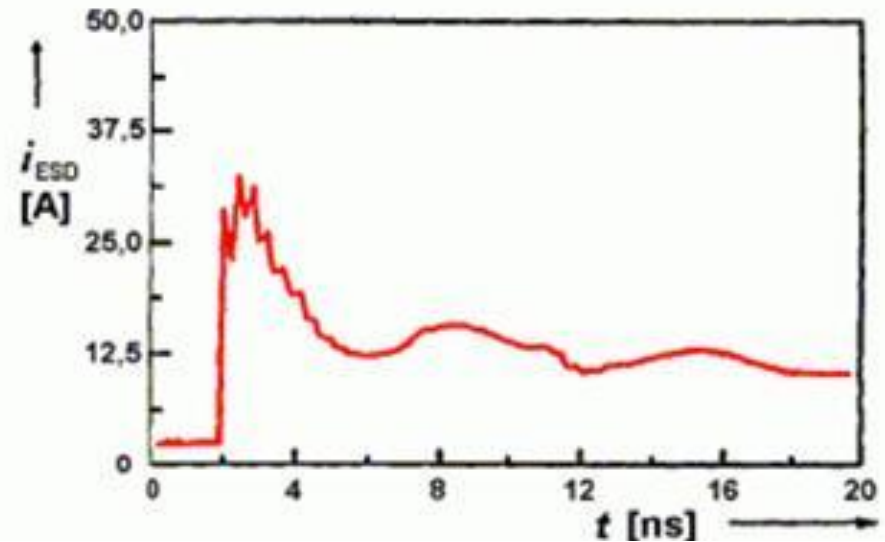
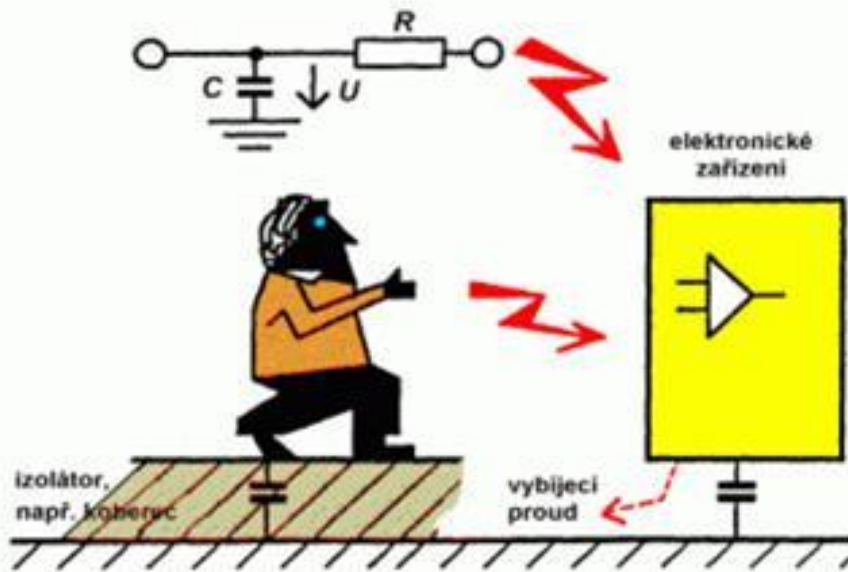
- v zimních měsících klesá vlhkost v obytných prostorech pod 40 % a napětí elektrostatického výboje může narůst až na 15 kV

- vysokým hodnotám napětí lze zabránit klimatizací s řízenou vlhkostí, použitím antistatických materiálů podlah a čalounění; nošením oděvů z přírodních materiálů (např. bavlna)

Vznik lokálního elektrostatického výboje

Tření šatů a bot o izolační povrch vyvolává vznik náboje o vysokém elektrickém napětí, které dále narůstá s každým krokem pracovníka na izolačním povrchu.

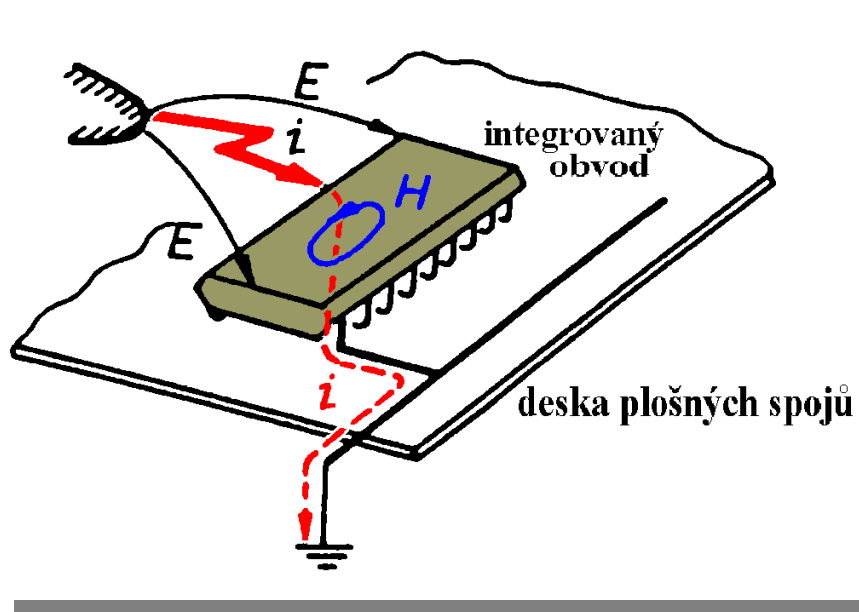
Při dotyku pracovníka s povrchem elektrického zařízení o vztažném potenciálu okolí se náboj kapacity těla člověka vybije.



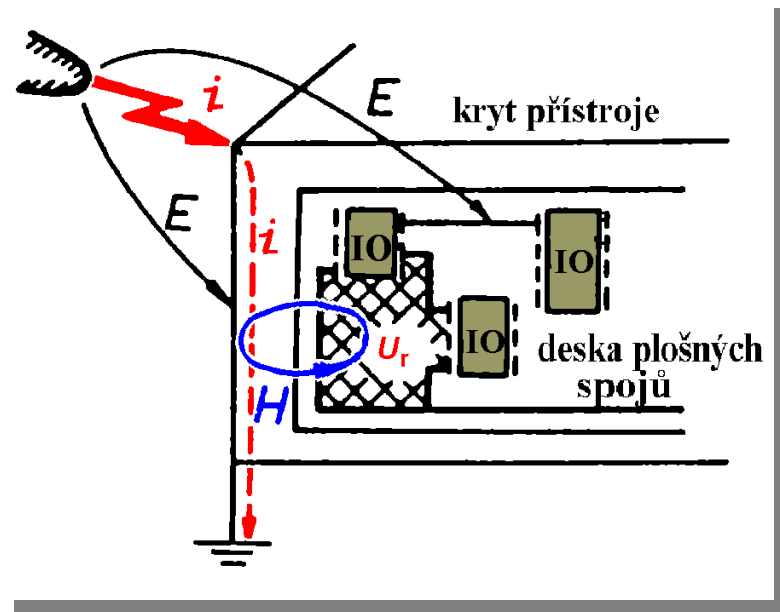
- ekvivalentní kapacita těla je cca $100 \div 200$ pF
- odpor "vybíjecí" paže člověka je 100Ω až $2 \text{ k}\Omega$
- proudový vybíjecí impuls je velký a velmi rychlý - během jediné ns dosáhne velikosti několika jednotek až desítek A

Působení elektrostatického výboje na součástky a obvody

Elektrostatický výboj může ovlivnit funkci i životnost elektronického zařízení či jeho součástek buď přímo (přímý výboj), nebo indukcí magnetickým či elektrickým polem do jiných signálových obvodů.



Přímé působení (vybití) při přiblížení paže nebo nabitého nástroje



Působení indukci rušivého napětí U_r do galvanicky oddělených obvodů

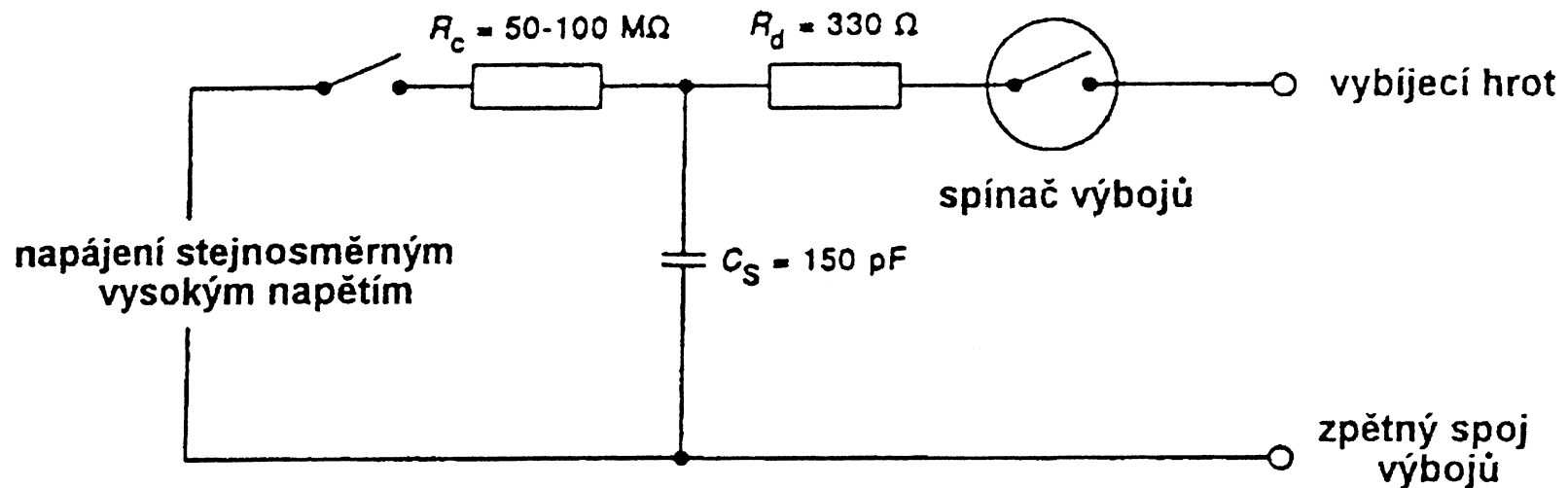
ESD generátor (simulátor)

ESD 30



- regulovatelný zdroj vysokého napětí 0 až 18 kV
- nabíjecí kondenzátor 150 pF
- vybíjecí odpor 330 ohmů
- přepínač polarity a vysokonapěťové relé

Schéma zkušebního generátoru

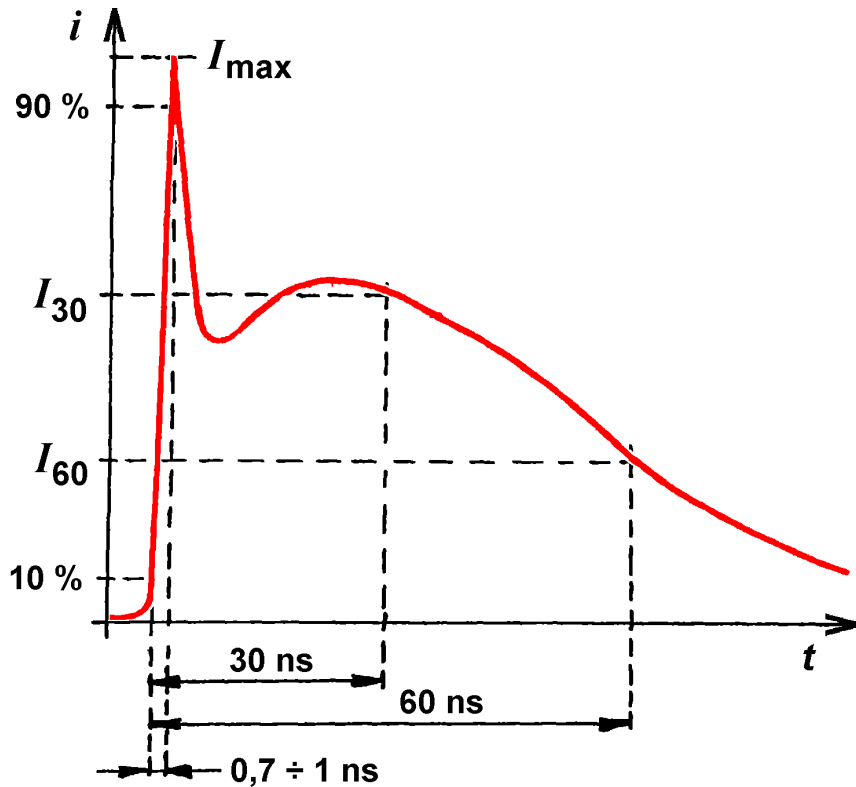


R_c – nabíjecí rezistor

R_d – vybíjecí rezistor – představuje vnitřní odpor lidského těla, které drží kovový předmět

C_s – kondenzátor akumulující energii – představuje kapacitu lidského těla

Impulz výstupního proudu generátoru při kontaktním výboji



Parametry proudového impulsu ESD

Výstupní napětí [kV]	$I_{\max}$ [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
2	7,5	4	2
4	15	8	4
6	22,5	12	6
8	30	16	8

Tři druhy zkušebních výbojů

Výboj vzduchovou mezerou

- tvar vybíjecího proudu je velmi proměnný a závislý na mnoha faktorech (rychlost přibližování hrotu, vlhkost, teplota, tlak, konstrukce zkoušence) – malá reprodukovatelnost výsledků zkoušek

Kontaktní výboj

- velmi dobrá reprodukovatelnost průběhu vybíjecího proudového impulzu (vznikajícího ve zkoušeném objektu při sepnutí kontaktu generátoru) - preferovaná metoda zkoušek

Nepřímý výboj prostřednictvím vazební desky

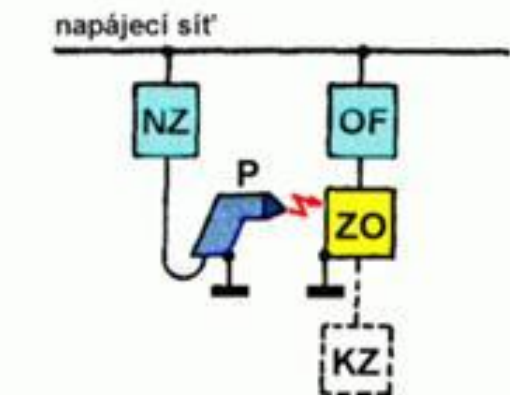
- postihuje rušivé účinky vznikající při nepřímém elektrostatickém výboji do kovových předmětů nacházejících se v blízkosti zkoušeného zařízení v důsledku elektromagnetické indukce

Základní konfigurace a uspořádání zkušebního pracoviště

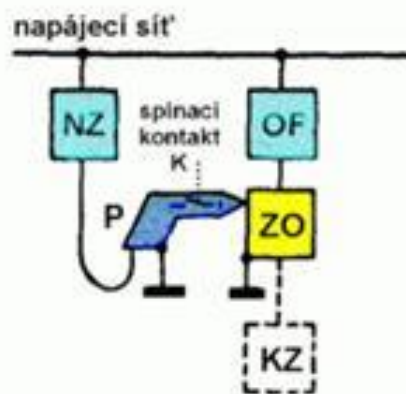
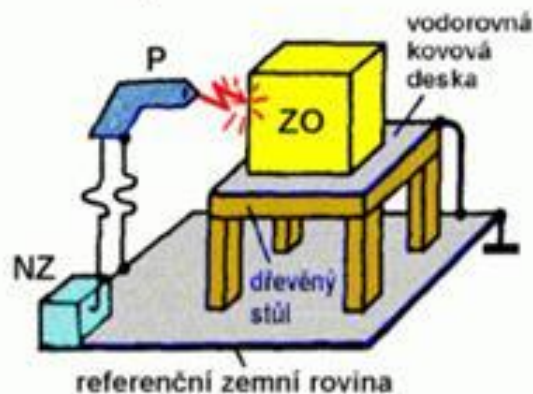
Výboj vzduchovou mezerou

Kontaktní výboj

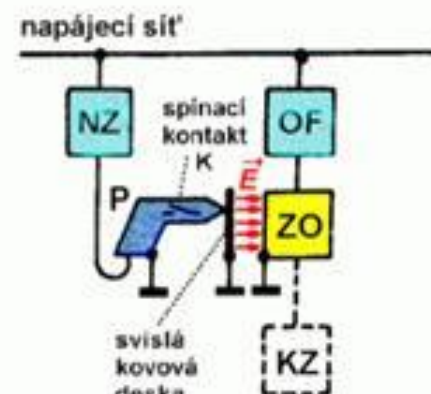
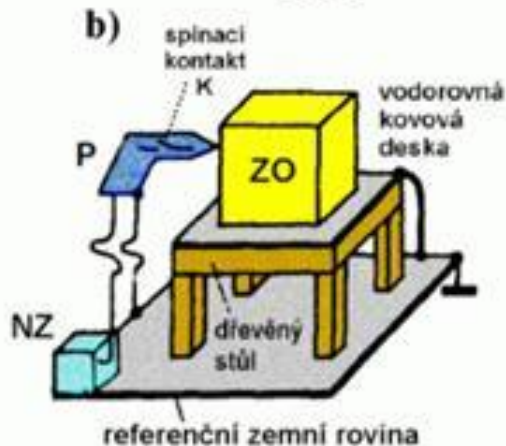
Nepřímý výboj



a)



b)



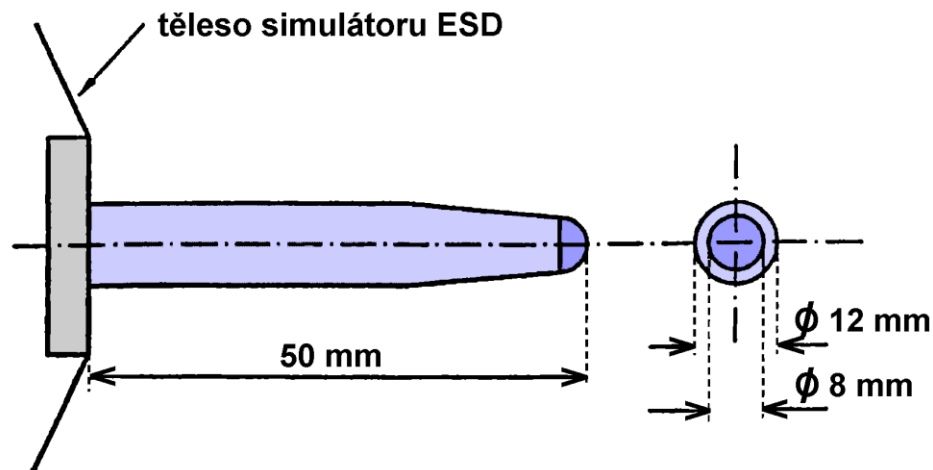
c)



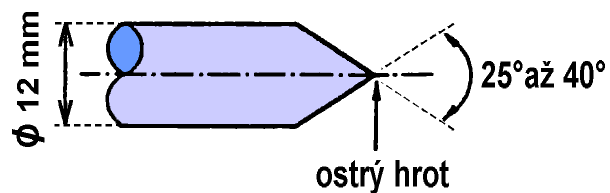
NZ – napájecí zdroj vn, OF – oddělovací filtr, ZO – zkoušený objekt,

KZ – kontrolní zařízení

Zkušební hroty simulátoru ESD

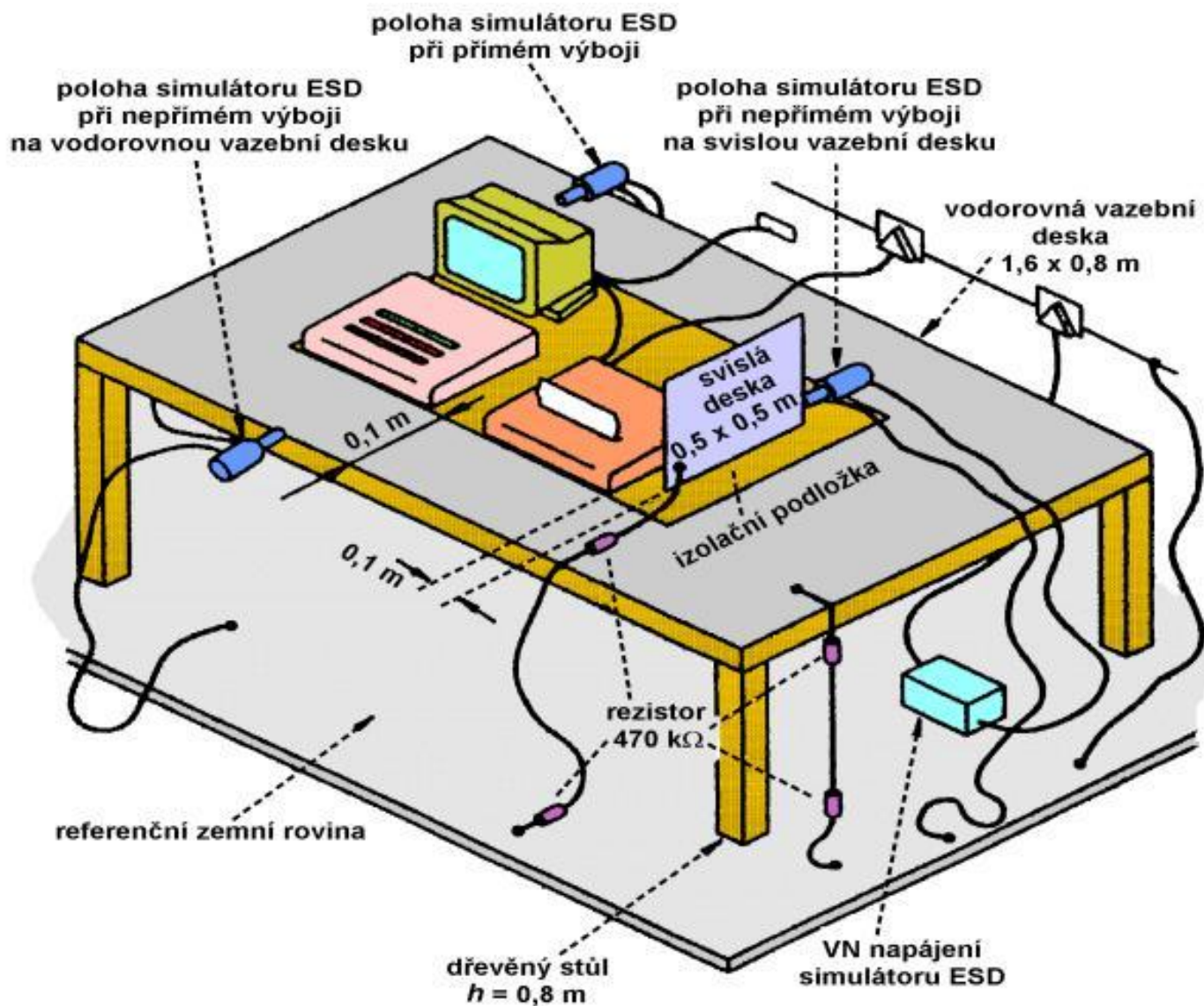


pro vzduchový výboj ESD

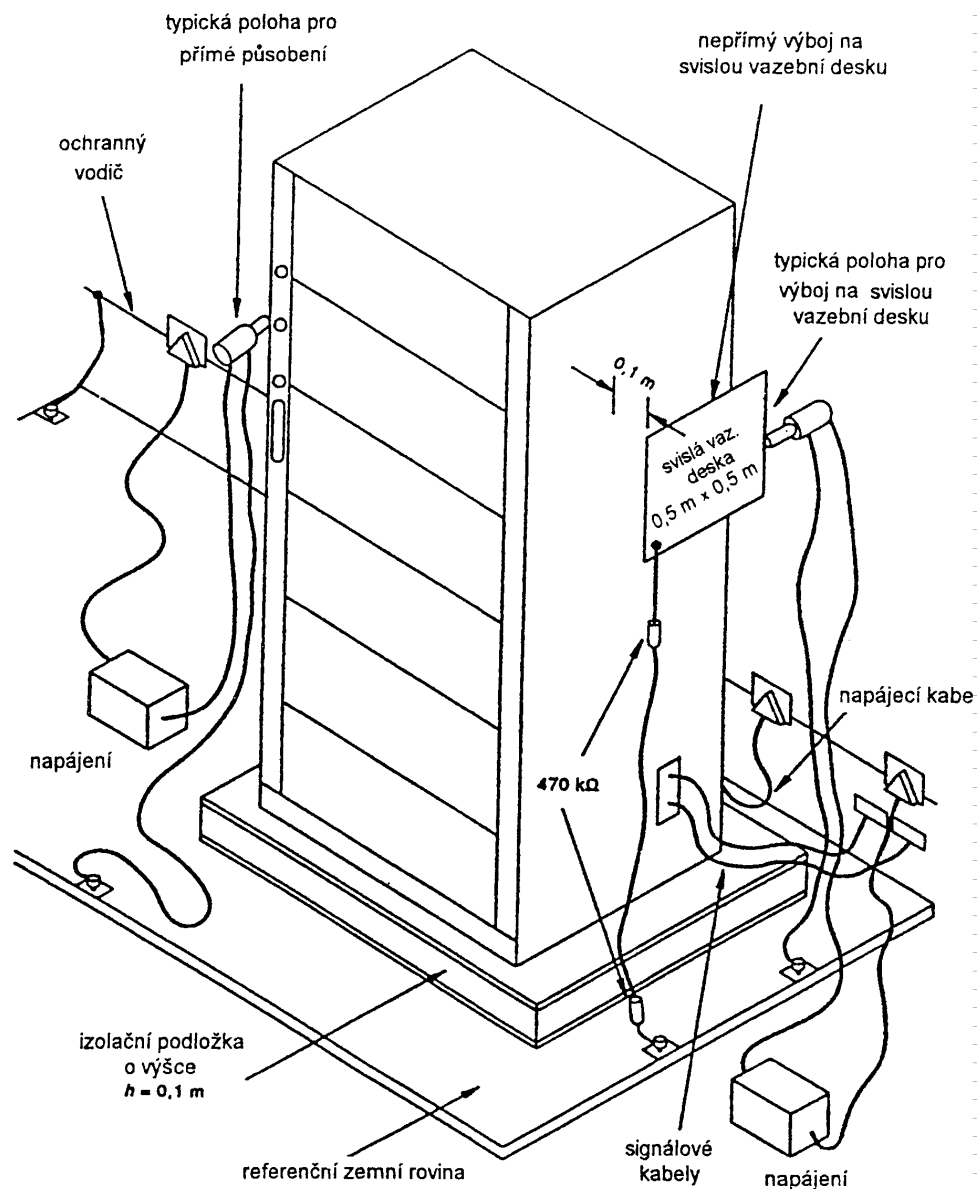


pro kontaktní výboj ESD

Laboratorní zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči elektrostatickým výbojům ESD



Laboratorní zkušební sestava zařízení stojícího na podlaze



Rozsah zkušebních úrovní pro elektrostatický výboj

Kontaktní výboj		Vzduchový výboj	
Úroveň	Zkušební napětí kV	Úroveň	Zkušební napětí kV
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
x	zvláštní	x	zvláštní

Provedení zkoušky elektrostatickým výbojem

Zkušební výboje statické elektřiny se provádějí do těch míst a povrchů zkoušeného zařízení, která jsou přístupná obsluze při užívání zařízení.

- všechna místa na ovládacím panelu či klávesnici, příp. jiná místa styku člověka se zařízením (vypínače, knoflíky, tlačítka, ovládací elementy), která jsou přístupná operátorovi zařízení;
- všechny kovové části skříně zařízení elektricky izolované od země;
- všechny indikační a jiné z vnějšku přístupné elementy (ukazatele, světelné diody, mřížky, kryty konektorů apod.).

Do každého místa se provede **nejméně deset jednotlivých výbojů**, a to v polaritě, na kterou je zařízení citlivější.

Zkušební napětí výboje se zvyšuje od nejmenší předepsané hodnoty, až po úroveň specifikovanou výrobcem zkoušeného zařízení pro požadovaný stupeň odolnosti.

Rychlé elektrické přechodové jevy/skupiny impulzů – zkouška odolnosti

ČSN EN 61000-4-4

Skupiny rychlých impulzů

Podmínky pro vznik:

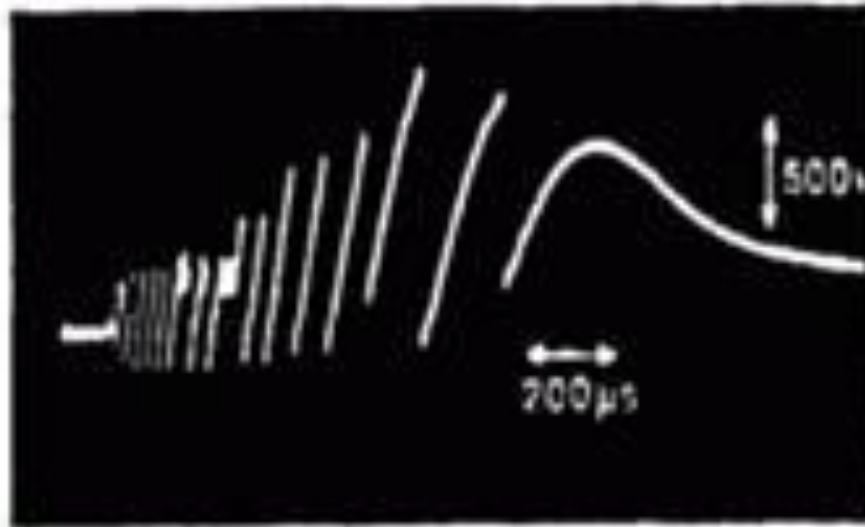
Rušivé impulzy s malou energií ve formě skupin krátkých přechodných jevů vznikají obvykle vlivem indukčností při spínacích pochodech v napájecích, signálových či datových sítích, vlivem odskakování kontaktů elektromechanických relé, příp. při spínání vysokonapěťových vypínačů.

Charakteristika rušivých impulzů:

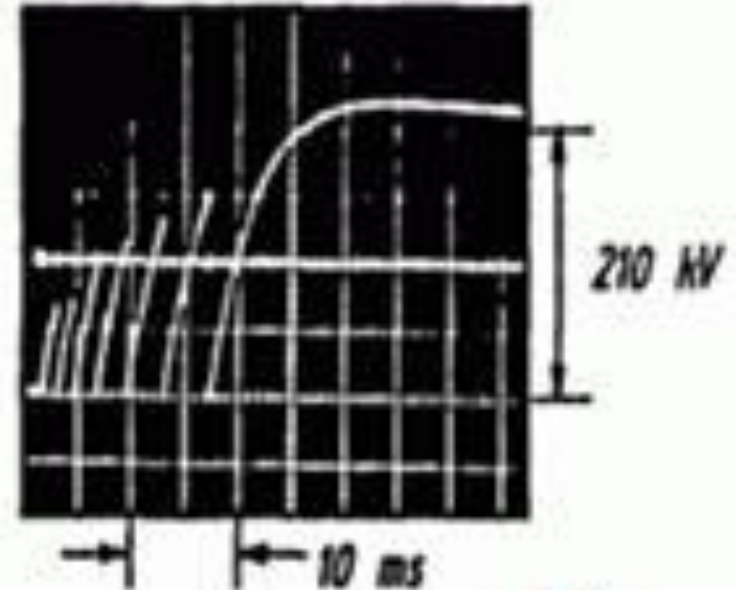
- vysoká maximální amplituda napětí (až 4 kV)
- časové parametry impulzů 5/50 ns
- energie jednotlivých impulzů (cca 10^{-3} J)
- vf obsah (2 až 200 MHz)
- vysoká frekvence opakování impulzů v řadě (2,5-5 kHz) – tzv. „burst“ signál – nebezpečný růst energie (až 100x)

Oscilogramy napětí na rozpojovaných kontaktech

Kontakt relé nn



Spínač vn



Sítě vn, vvn - vznik **vysokofrekvenčních oscilací** vlivem kapacity a indukčnosti spínaných vedení - oscilace se kapacitními vazbami snadno šíří až do sítí nn.

Sítě nn - činnost **stykačů, jističů, mechanických relé** -rozpojování obvodu obsahujícího indukčnost – vznik strmých impulzů na rozpojovaných kontaktech.

Podobné procesy vznikají rovněž při **spínání** obvodů obsahujících indukčnost.

„Burst“ signál:

- rychle po sobě jdoucí ostré impulzní poruchy generované ve skupinách po větších časových intervalech (např. každé rozpojení a spojení stykače)

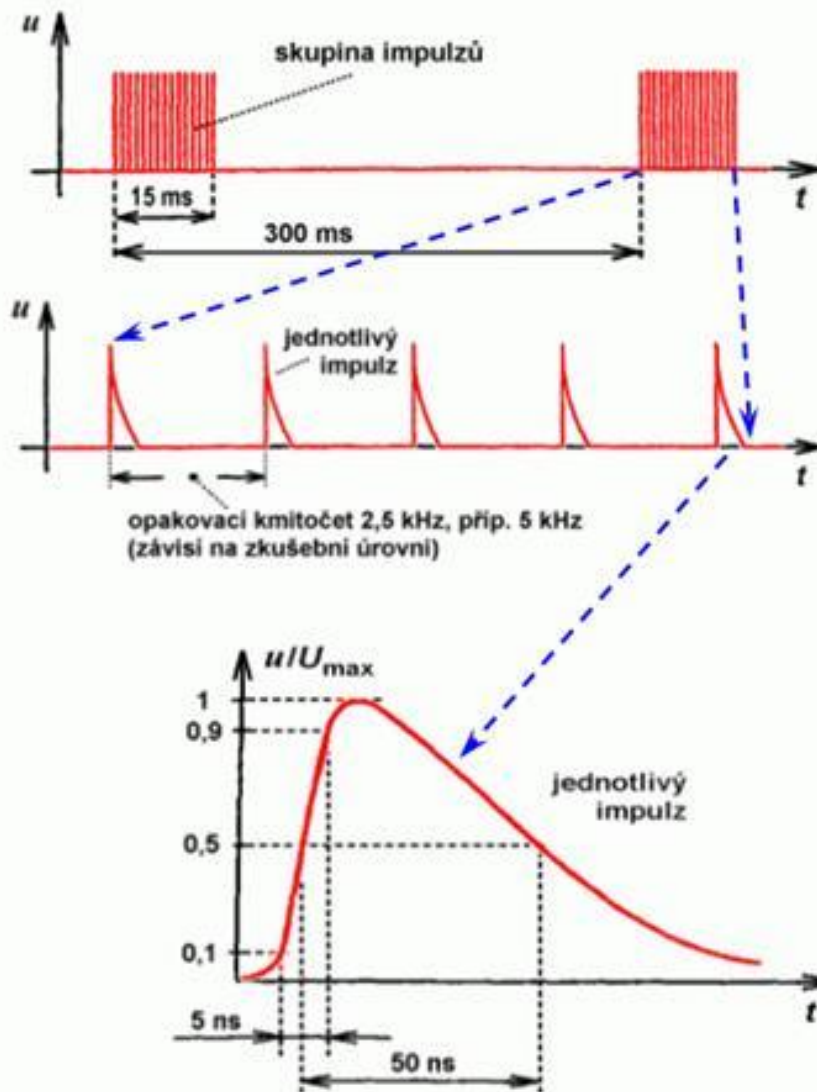
Možnosti odstranění přepětových impulzů:

- zajistit pomalejší nárůst napětí mezi kontakty spínače např. překlenutím kontaktů sériovým obvodem RC
- použitím přepětových ochran - diod a varistorů
- užitím bezkontaktních elektronických spínačů, např. tyristorů či triaků (vznik jiných rušivých jevů)

Vazby rušení:

- galvanická vazba na vodiče napájení
- kapacitní vazba na datové nebo signálové vodiče (při souběhu se silovým vedením)

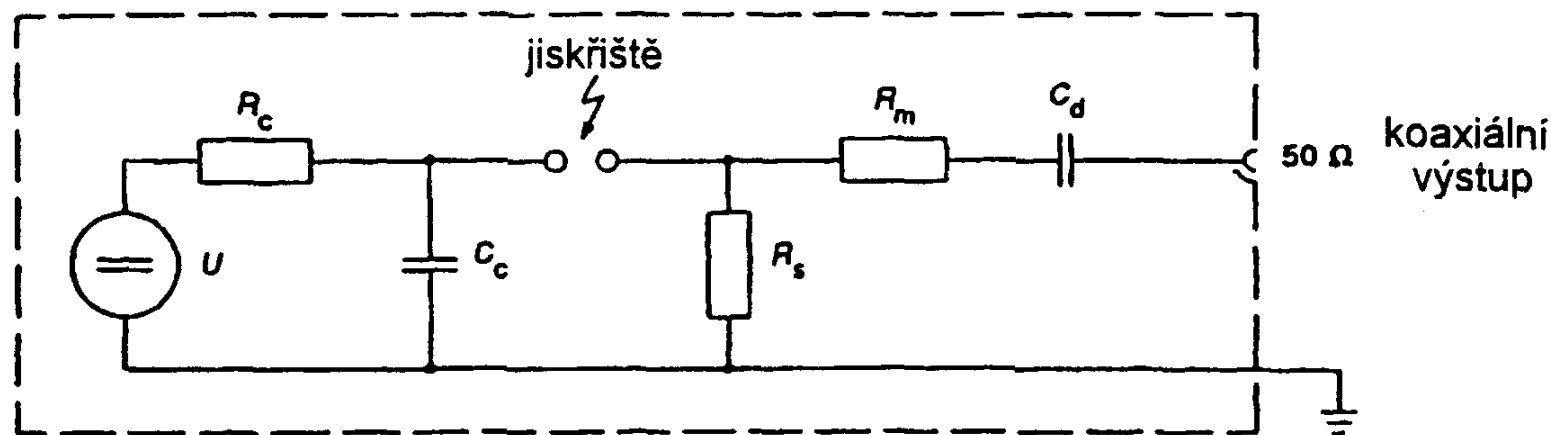
Skupiny rychlých přechodných jevů – „burst“ signál



- k simulaci uvedeného rušení byl zvolen typ zkušebního signálu, který se ukázal jako nejnebezpečnější.

- uvedené parametry platí pro výstupní zátěž generátoru 50Ω

Schéma generátoru skupin impulzů



U – zdroj vysokého napětí

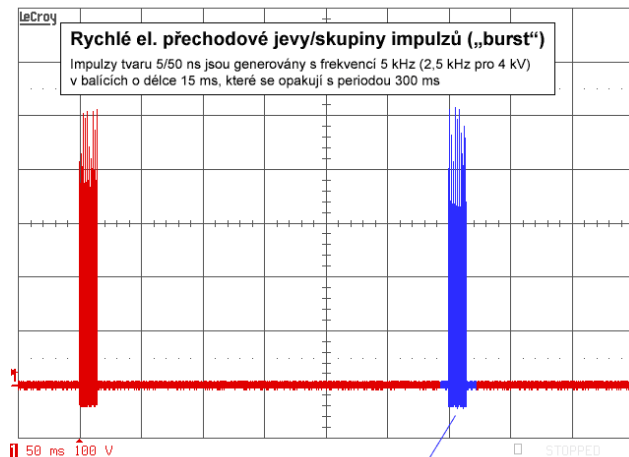
R_c – nabíjecí rezistor

C_c – kondenzátor (zásobník energie)

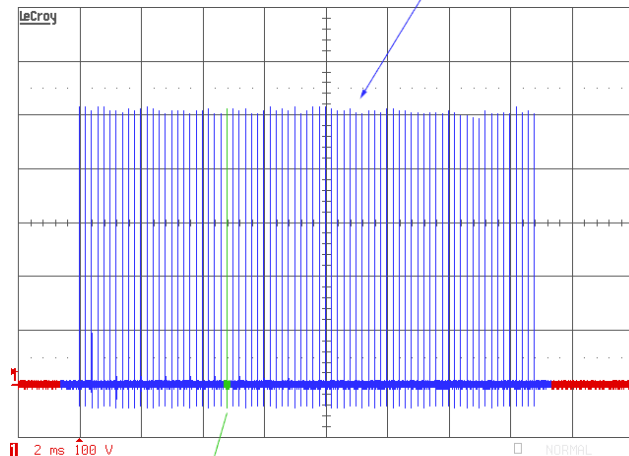
R_s – rezistor pro tvarování délky pulzu

R_m – rezistor pro přizpůsobení impedance

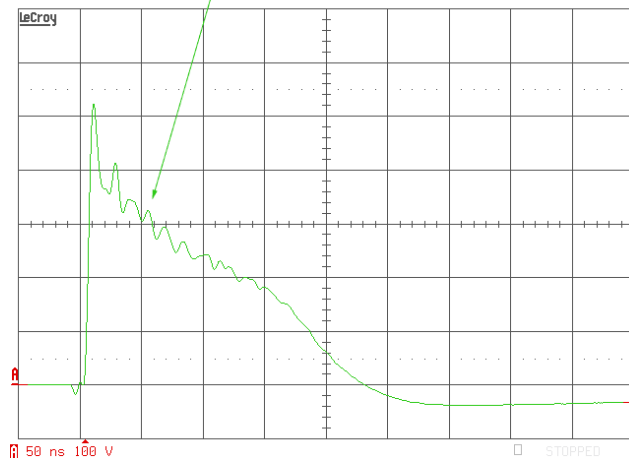
C_d – blokovací kondenzátor stejnosměrného napětí



Oscilografický záznam „burst“ signálu na výstupu testovacího generátoru



Detail skupiny impulzů s dobou trvání 15 ms



Detail impulzu tvaru 5/50 ns

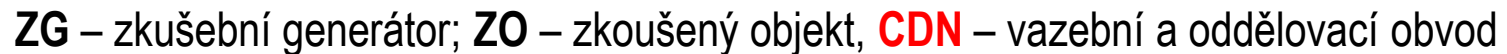
Vazební a oddělovací obvod – obvod CDN

(Coupling-Decoupling Network)

plní při zkouškách elektromagnetické odolnosti dvě základní funkce:

- **Funkce vazební** umožňuje přenos zkušebního (rušivého) signálu z generátoru do „vstupů“ zkoušeného zařízení v požadovaném kmitočtovém pásmu a současně blokovat zpětný vliv síťového nebo signálního napětí zařízení na generátor.
- **Funkce oddělovací** zabraňuje šíření zkušebního signálu do vnější napájecí, signálové či datové sítě připojené ke zkoušenému zařízení. Tak je zajištěno, že působení zkušebního signálu se omezí jen na testované zařízení a jiná zařízení připojená k téže síti budou chráněna. Současně tak bude vyloučen i vliv impedance vnější sítě na tvar či velikost zkušebního signálu.

pro navázání rušivého zkušebního signálu do napájecího vedení

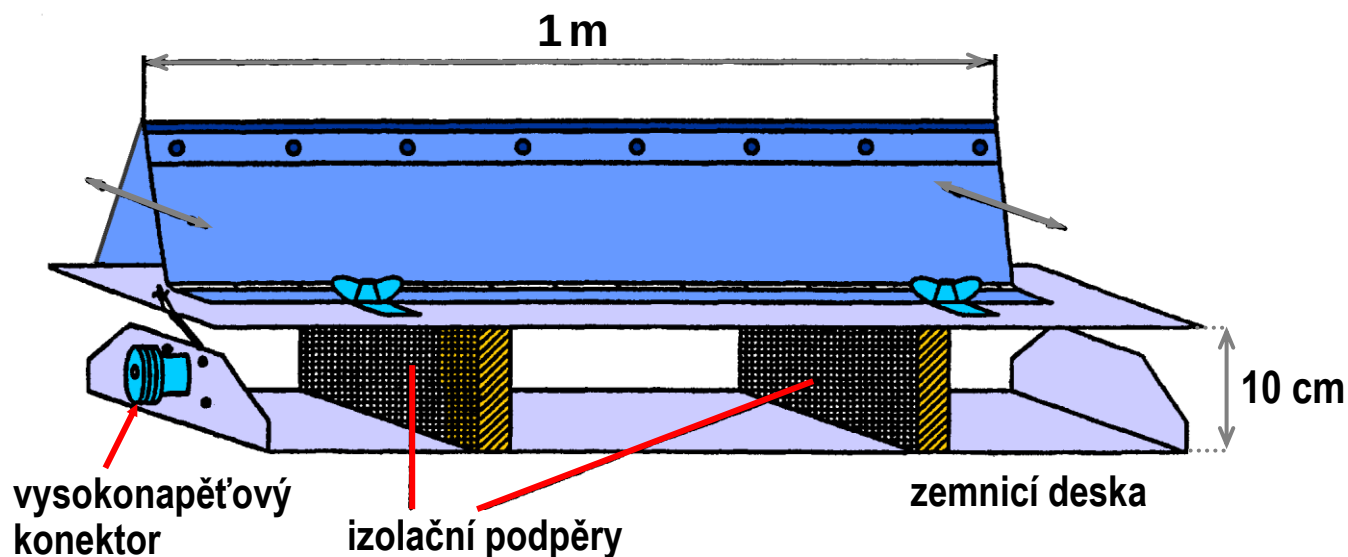


Podélné tlumivky L_1 a L_2 , zabraňují, aby zkušební vf generátor následkem nízké impedance napájecí sítě nepracoval do zkratu.

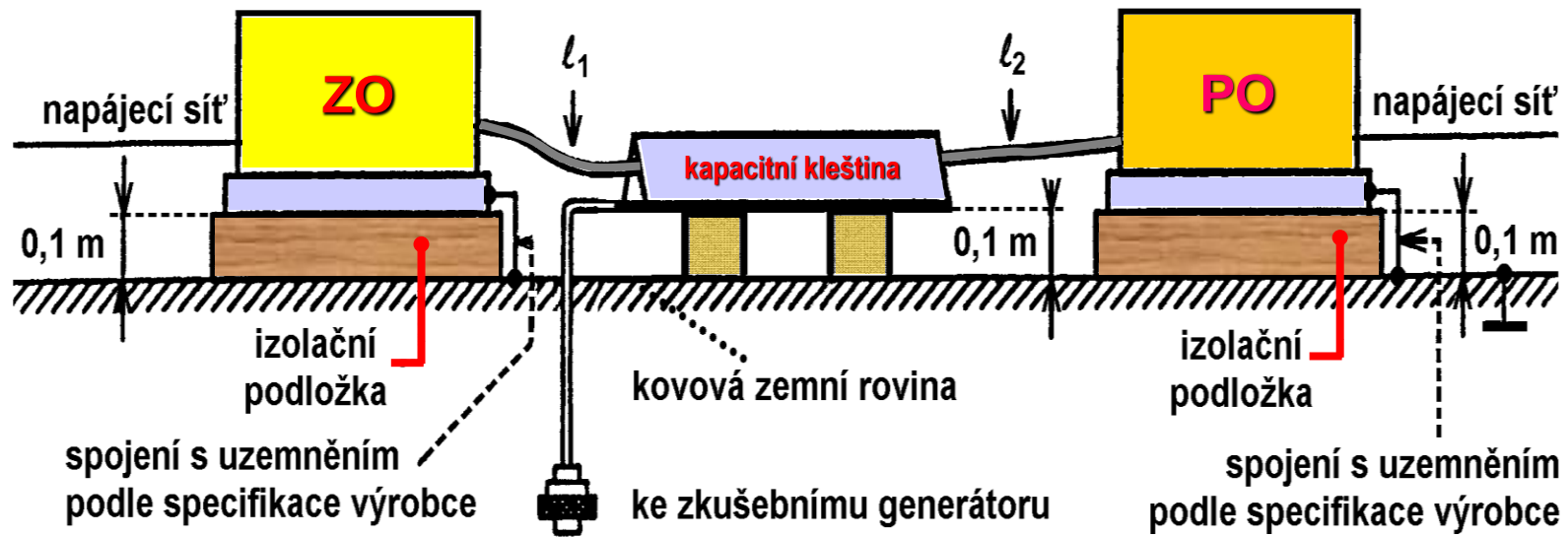
Hodnota vazebních kondenzátorů C_K činí obvykle asi 33 nF.

Kapacitní kleština

pro vazbu rušivého zkušebního signálu do zkoušeného zařízení bez galvanického spojení se svorkami jeho vstupů

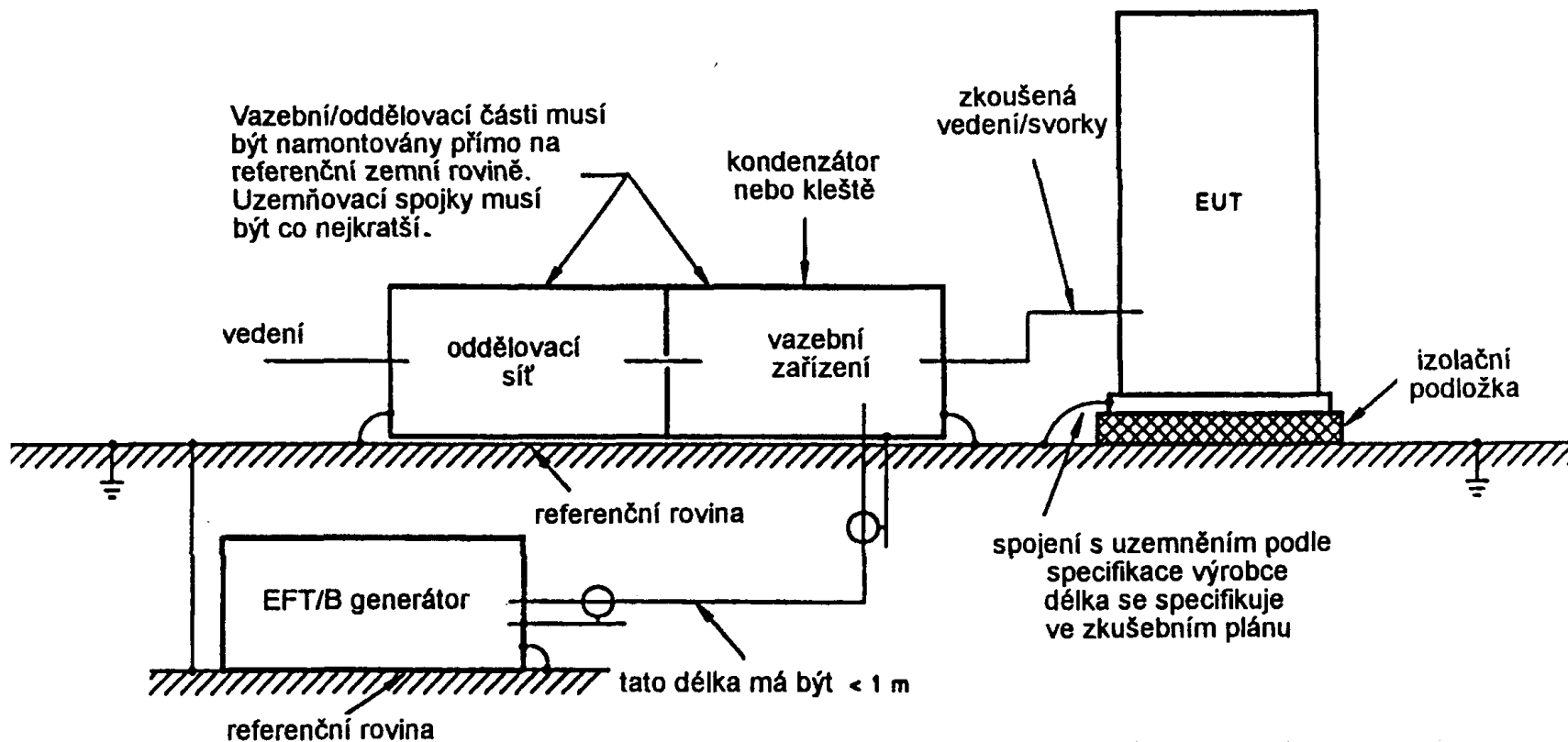


Uspořádání zkušebního pracoviště

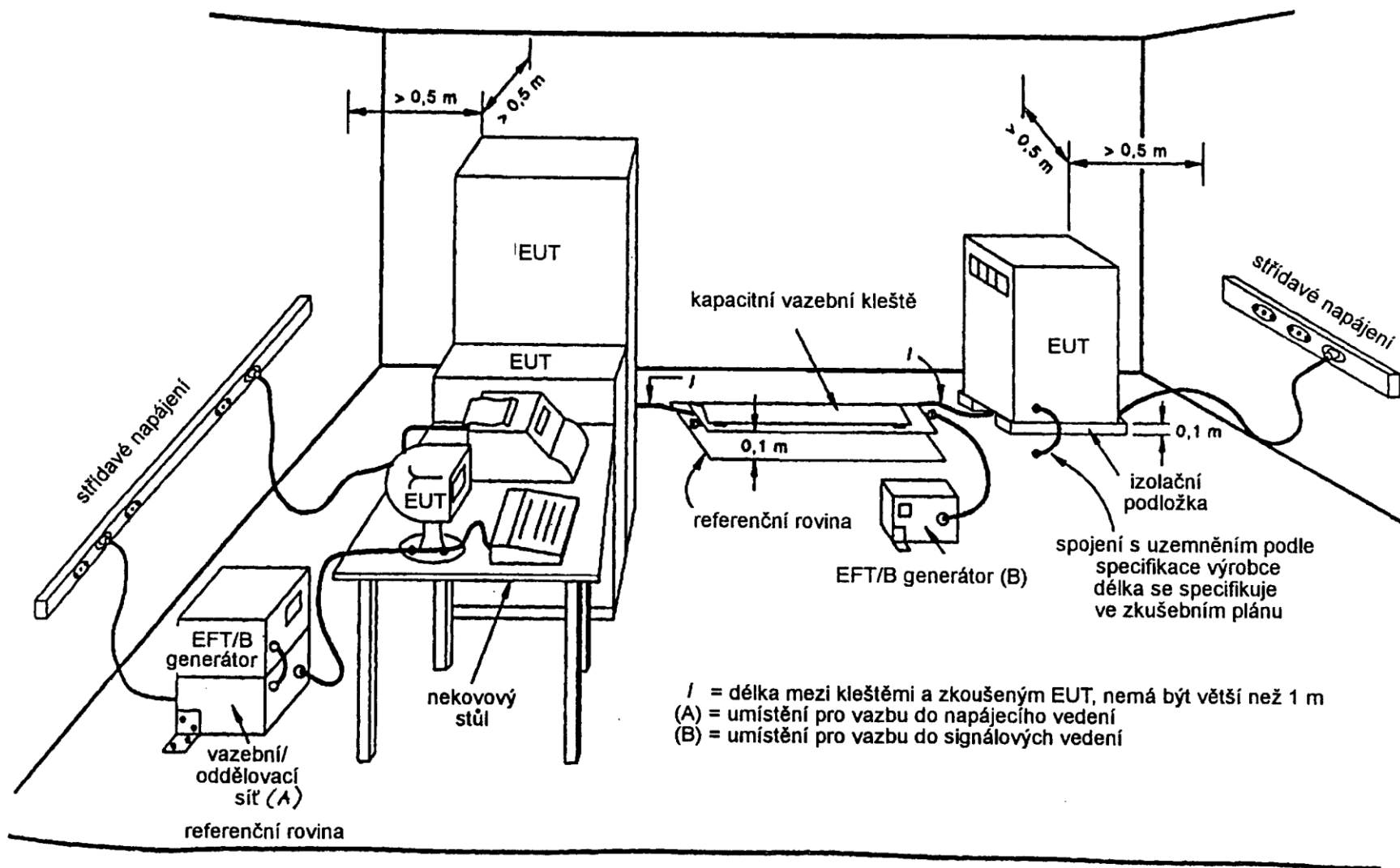


- kleština je umístěna na zemní kovové rovině o ploše alespoň 1 m²
- délka vazebního kabelu l_1 mezi kleštěmi a zkoušeným objektem **ZO** musí být kratší než 1m, délka l_2 kabelu mezi kleštěmi a dalším připojeným, avšak nezkoušeným zařízením **PO** musí být větší než $5 \cdot l_1$. Tím se zajistí, že zkušební signál bude působit jen na zkoušený objekt **ZO**
- je-li i zařízení **PO** předmětem zkoušky odolnosti, musí být $l_1 = l_2 \leq 1$ m.

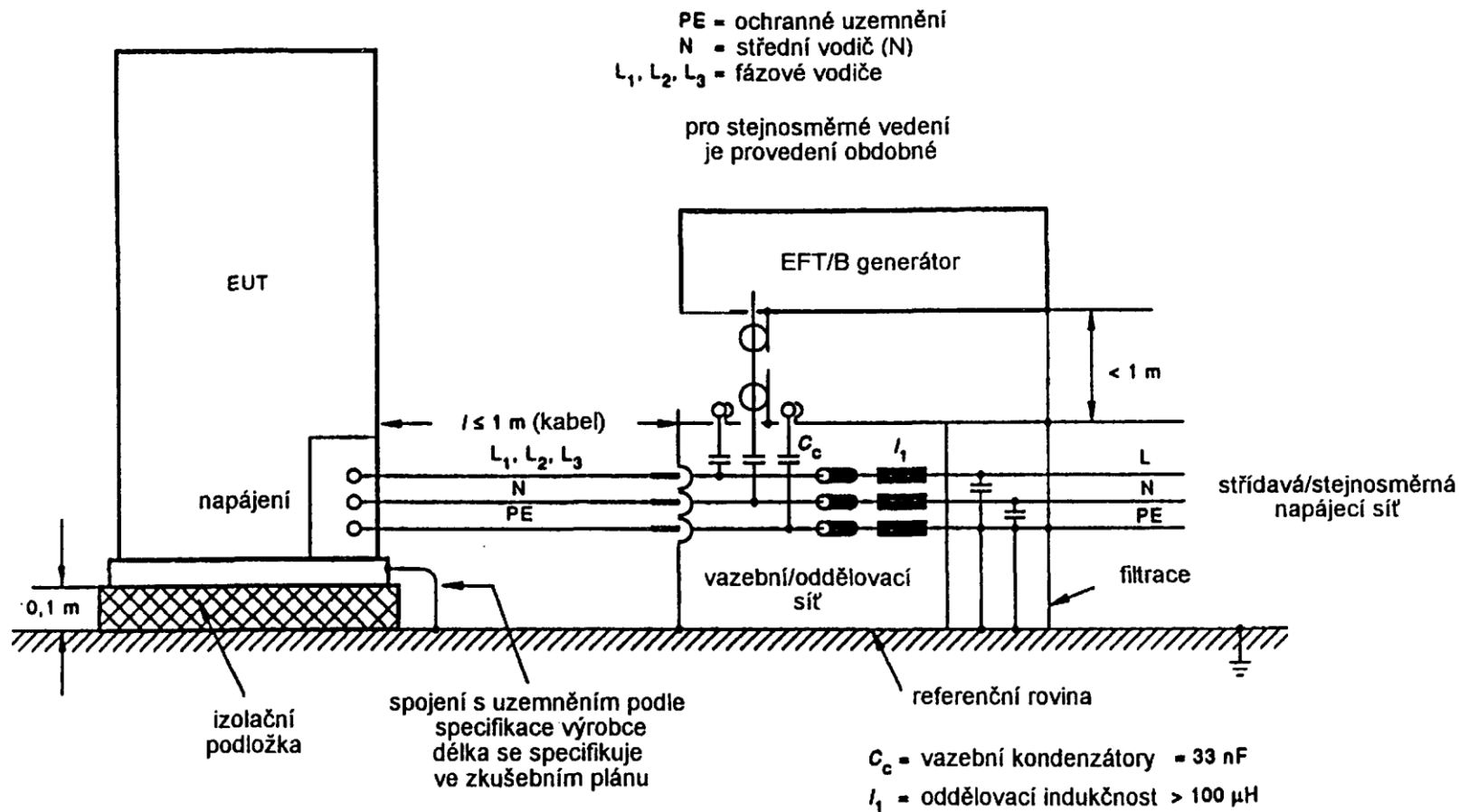
Blokové schéma pro zkoušku rychlými přechodovými jevy/skupinami impulzů



Všeobecné uspořádání pro laboratorní zkoušku



Příklad uspořádání měření při přímé vazbě v napájecí síti



Zkušební napětí naprázdno a opakovací kmitočet impulzů pro zkoušku rychlými elektrickými přechodovými jevy

Úroveň	Vstup: napájení, ochranná zem (PE)		Vstup: vstupní a výstupní signály, data, ovládání, měření	
	Napětí (amplituda) kV	Opakovací kmitočet kHz	Napětí (amplituda) kV	Opakovací kmitočet kHz
1	0,5	5	0,25	5
2	1	5	0,5	5
3	2	5	1	5
4	4	2,5	2	5
X	zvláštní	zvláštní	zvláštní	zvláštní

Minimální doba trvání vlastní zkoušky je 1 minuta.

Rázový impulz – zkouška odolnosti

ČSN EN 61000-4-5

Rázový impuls

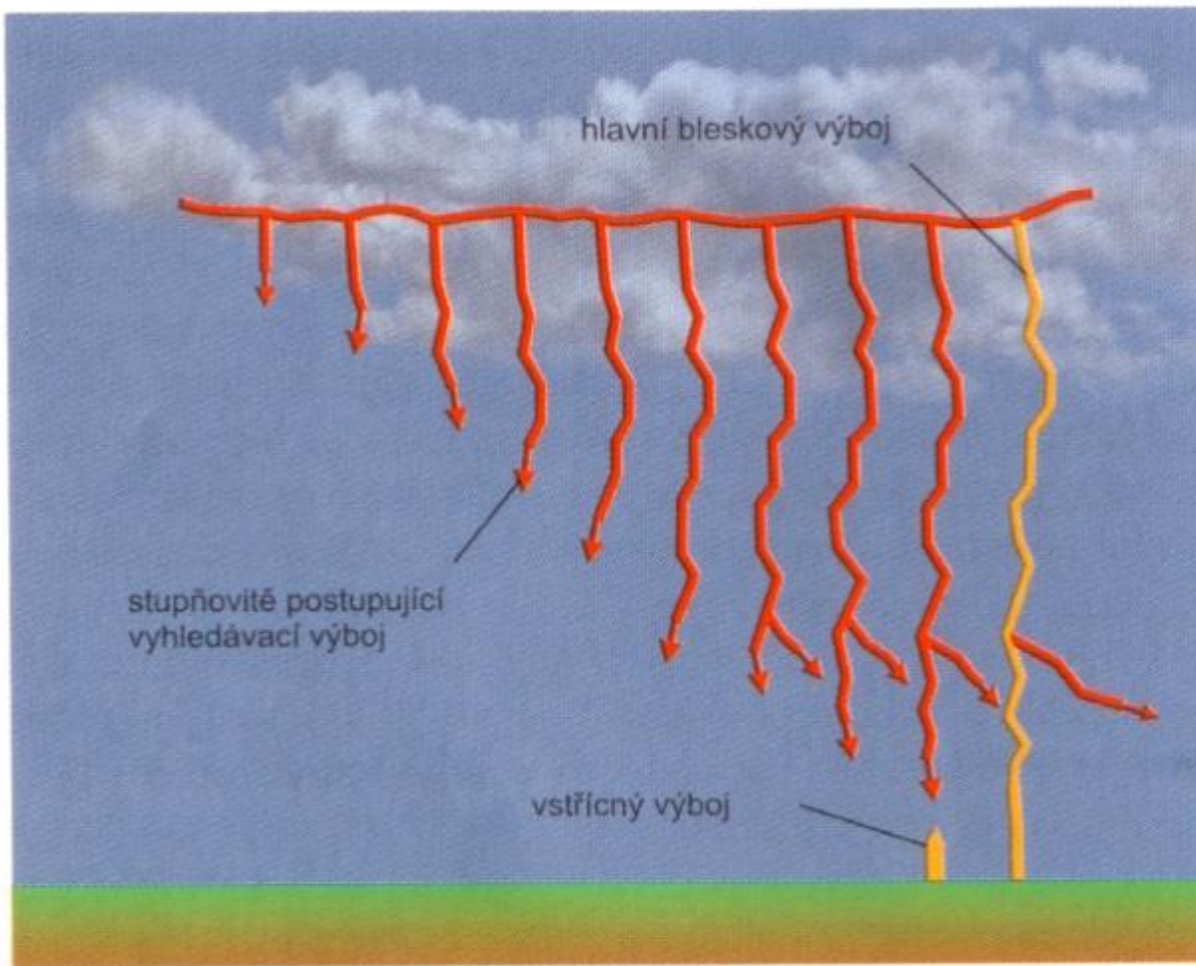
Vysokoenergetický jednosměrný impuls napětí nebo proudu se strmým čelem a dlouhým týlem.

Příčiny vzniku

- **atmosférická přepětí (bleskový výboj - LEMP)**
 - úder blesku ohrožuje elektrická a elektronická zařízení až do vzdálenosti 4 km
 - velikost proudu bleskového výboje činí až 150 kA
 - celkový náboj 150 až 300 C , energie impulsu 2,5 až 10 MJ
- **spínací přepětí**
 - spínací a poruchové jevy v napájecí síti
 - za nebezpečné zdroje přepětí (a rovněž vysokofrekvenčního rušení) je nutno považovat všechna zařízení, v nichž dochází ke vzniku elektrického oblouku

Přímý úder blesku do budovy - má za následek rázový impulz proudu, který neprotéká jen hromosvodovým svodem, ale může se uzavírat i přes kovové konstrukce budovy, a tedy protéká i vnitřkem budovy v blízkosti elektronických zařízení. Kromě silného magnetického pole indukuje v síťovém rozvodu budovy sekundární napěťové rázy.

Nepřímý účinek blesku - spočívá v zavedení napěťového rázového impulzu z vnějšího vedení nízkého, případně i vysokého napětí do vnitřního silového rozvodu budov. Je důležité, aby na vstupu budovy byla instalována primární přepěťová ochrana (bleskojistky, varistory) a aby budova byla vybavena dokonalým zemnicím systémem.



- Vůdčí výboj (leader)

Skoky 50 m

1 000 km/s

- Vstřícný výboj

50 m nad zemí

- Vodivý kanál

max. stovky μs

30 000 °C

- Elektrické pole země

Za klidného počasí ... -130 V/m

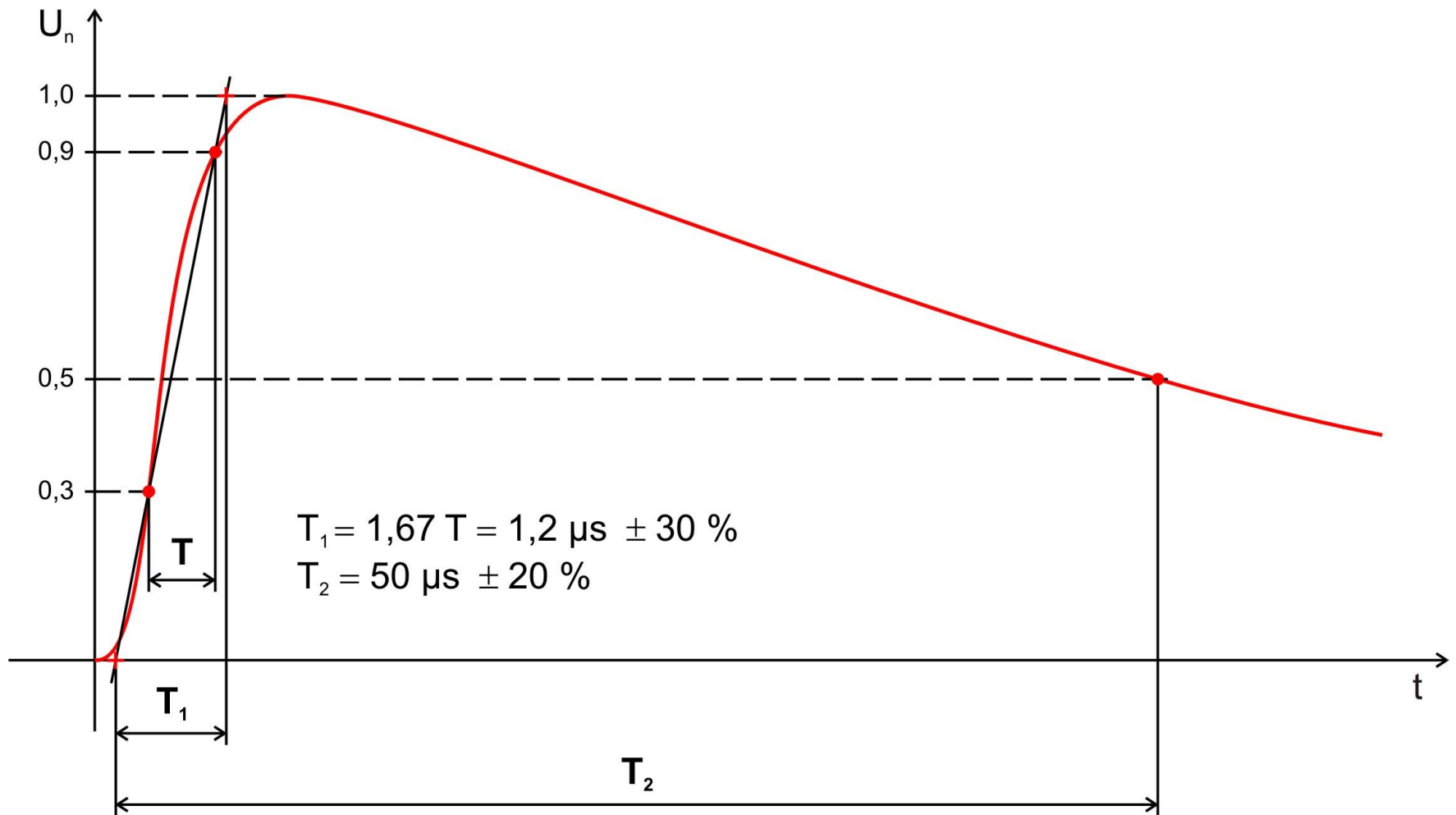
Za bouřky ... +10 000 V/m

- Následné výboje

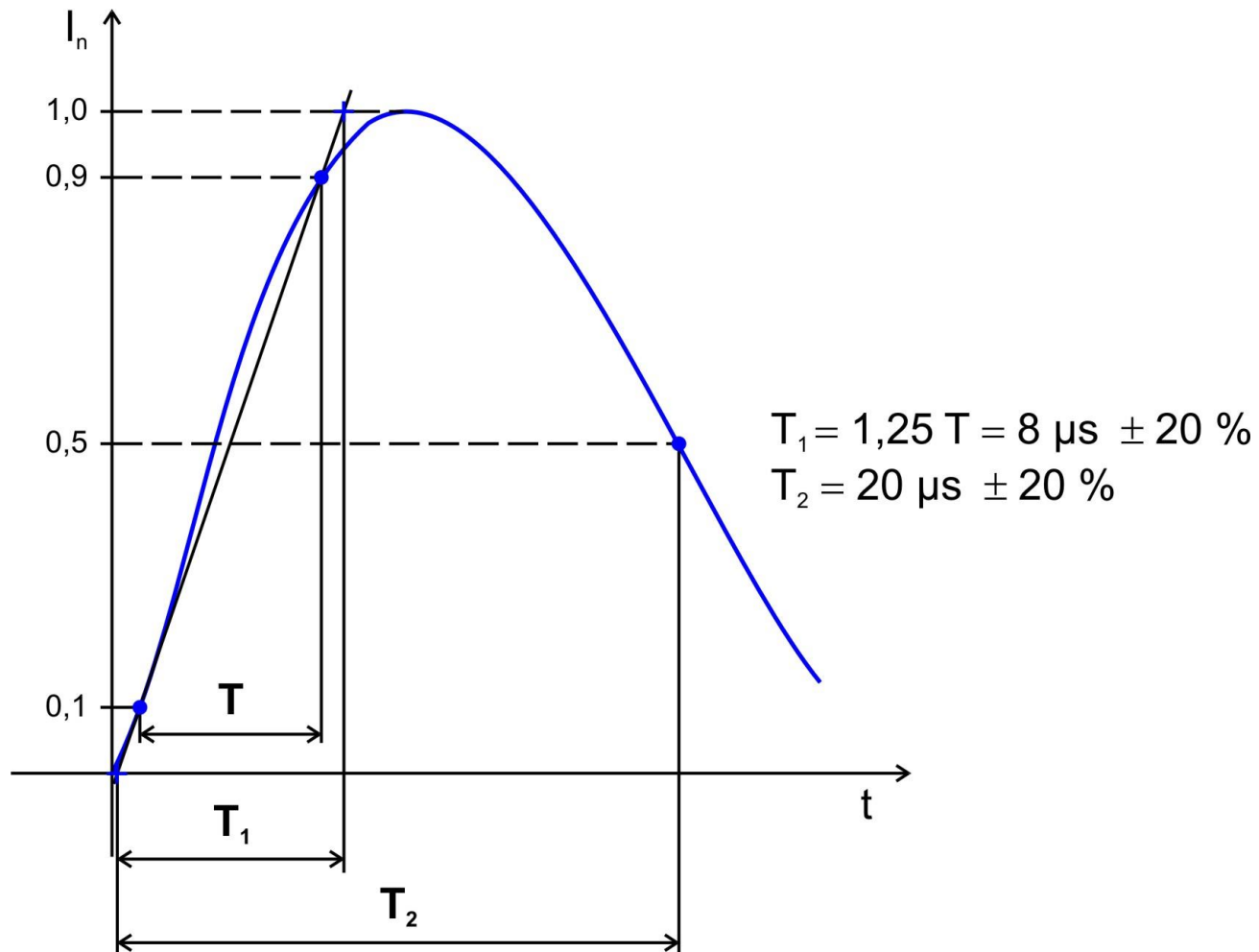
Normalizovaný atmosférický impulz

- impulz napětí **1,2/50 μs**
jiné: telekomunikace 0,5/700, 10/700, 100/700 μs
- impulz proudu **8/20 μs**
jiné: zkoušky svodičů bleskových proudů 10/350 μs
- energie **10 MJ** (tepelné účinky)
jiné: telekomunikace 360 J, 1 500 J
- frekvenční obsah **10^6 Hz**
 - svým vysokým energetickým obsahem mohou rázové impulzy způsobit škody na elektronických zařízeních i bez přímé galvanické vazby jen prostřednictvím elektromagnetické indukce.

Normalizovaný impulz napětí

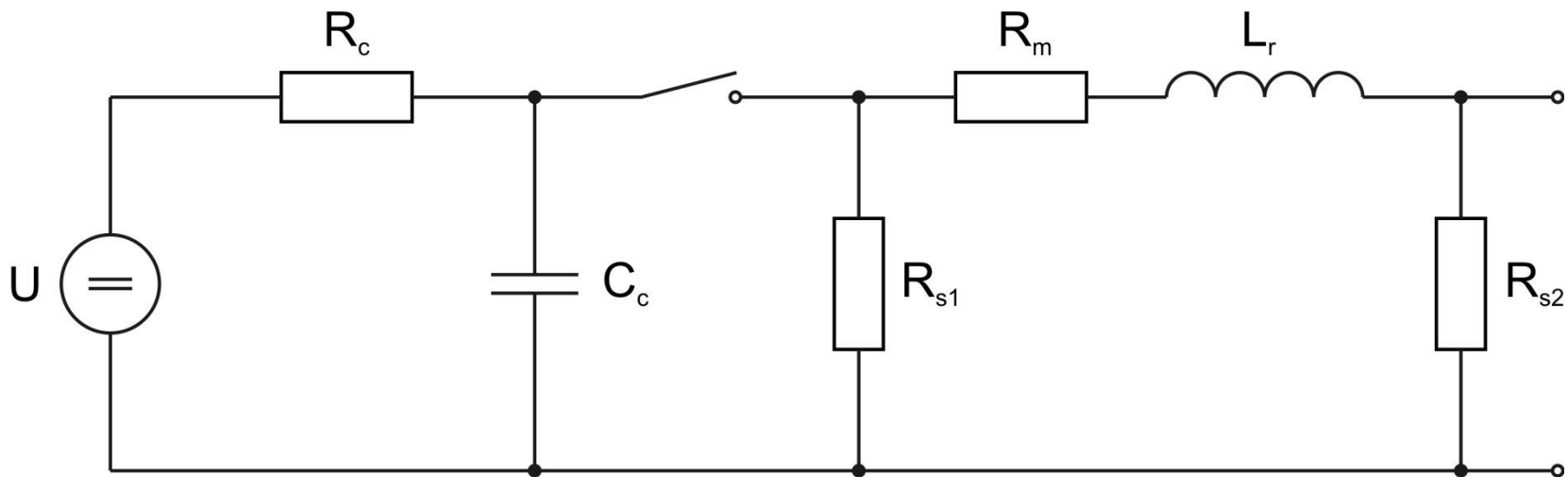


Normalizovaný impulz proudu



Generátor kombinované vlny (CWG)

- při chodu naprázdno generuje vlnu napětí 1,2/50
- při chodu nakrátko generuje vlnu proudu 8/20
- skutečné tvary vln jsou dány vstupní impedancí testovaného zařízení



U zdroj stejnosměrného napětí

R_c nabíjecí odpor

C_c akumulární kondenzátor

R_s tvarování týlu impulsu

R_m impedanční přizpůsobení

L_r tvarování čela impulsu

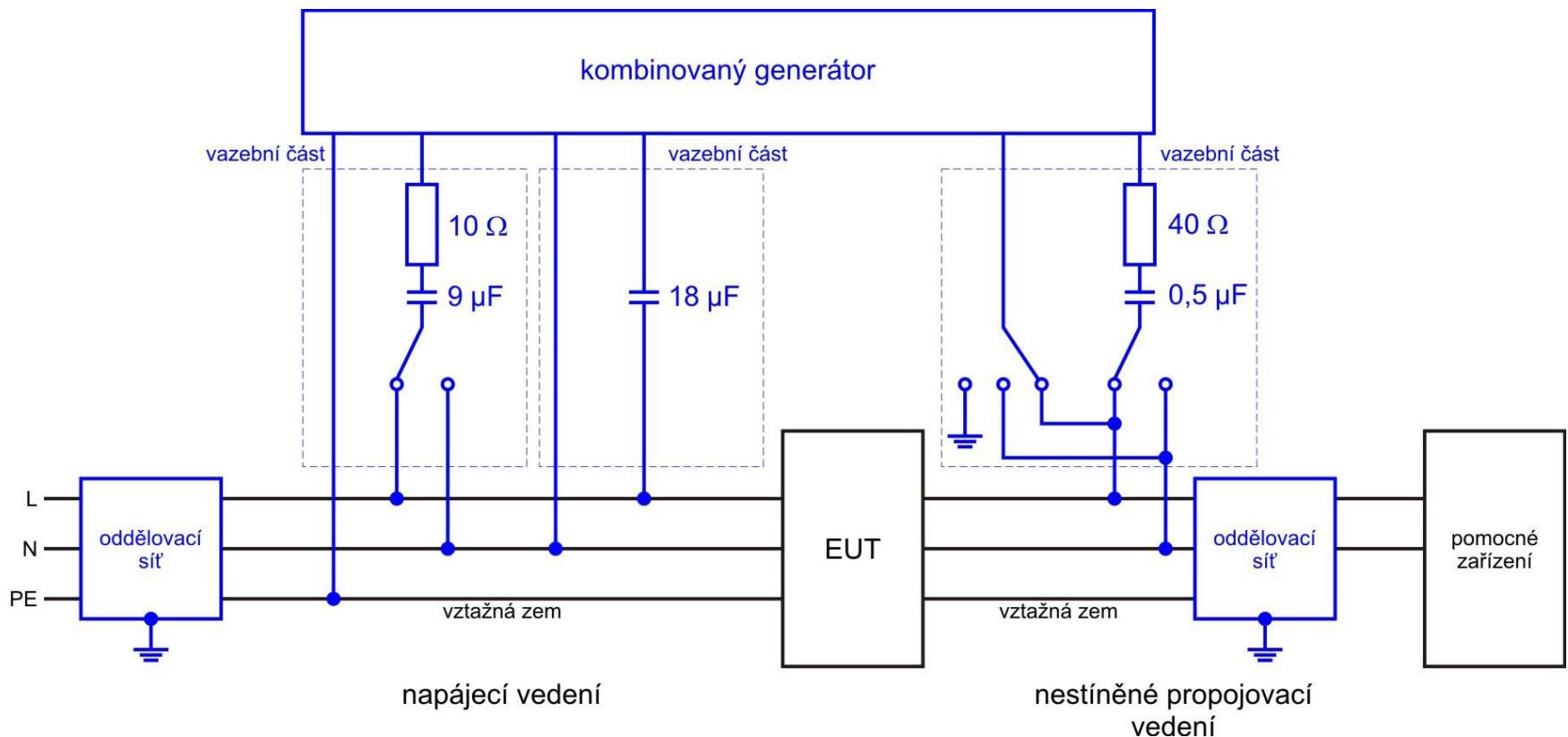
Zkušební zapojení

- síťové napájení**

vazba: vodič–zem ($10\ \Omega + 9\ \mu\text{F}$)
vodič–vodič ($18\ \mu\text{F}$)

- nestíněné propojovací vedení**

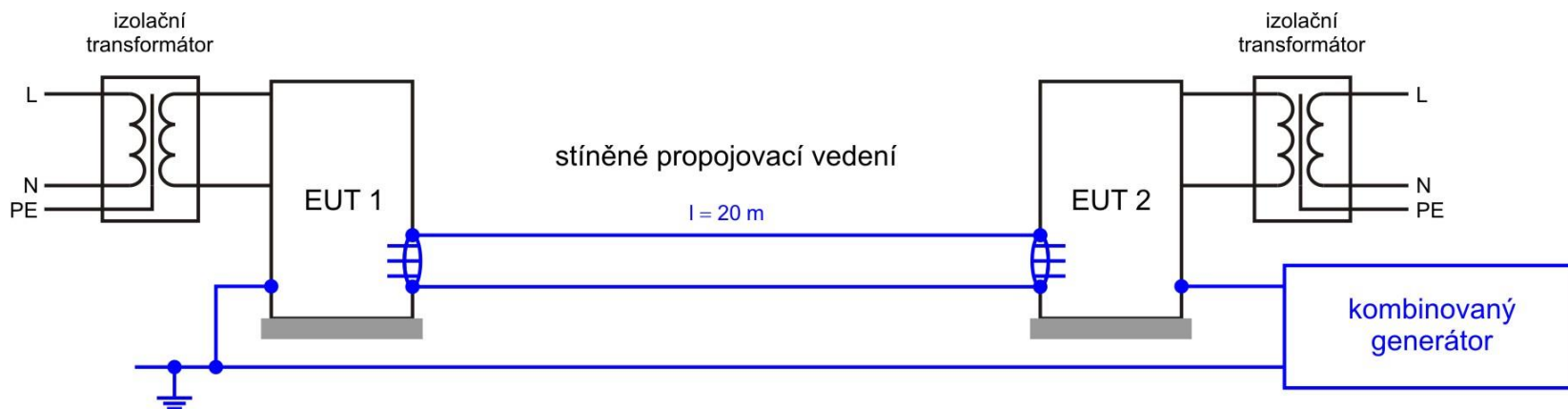
vazba: vodič–zem ($40\ \Omega + 0,5\ \mu\text{F}$)
vodič–vodič ($40\ \Omega + 0,5\ \mu\text{F}$)



Zkušební zapojení

- stíněné propojovací vedení**

galvanická vazba + indukované napětí ve vodičích propojovacího vedení



Zkušební úrovně

úroveň třída instalace	zkušební úrovně (amplituda): 5 impulzů $\pm$, 0°– 360°							
	síťové napájení		nesymetrická vedení, LDB		symetrická vedení		SDB, DB	
	vodič vodič	vodič zem	vodič vodič	vodič zem	vodič vodič	vodič zem	vodič vodič	vodič zem
1	–	0,5	–	0,5	–	0,5	–	–
2	0,5	1	0,5	1	–	1	–	0,5
3	1	2	1	2	–	2	–	–
4	2	4	2	4	–	2	–	–
5			2	4	–	4	–	–
X								
Pozn.: LDB dlouhá datová sběrnice (nad 30 m) SDB krátká datová sběrnice (do 10 m) DB datová sběrnice								

Vlastní zkouška odolnosti se provádí pěti kladnými a pěti zápornými impulzy s minutovým odstupem ve všech důležitých provozních stavech zkoušeného zařízení.

- Třída 0: Dobře chráněné elektrické prostředí,
často uvnitř zvláštní místnosti
- Třída 1: Částečně chráněné elektrické prostředí
- Třída 2: Elektrické prostředí, ve kterém jsou kabely dobře
odděleny i při krátkých souběžích
- Třída 3: Elektrické prostředí, ve kterém kabely probíhají paralelně
- Třída 4: Elektrické prostředí, ve kterém propojení probíhají
jako venkovní kabely podél silových kabelů a kabely
jsou používány zároveň pro elektronické i elektrické
obvody
- Třída 5: Elektrické prostředí pro elektronická zařízení připojená
na komunikační kabely a venkovní napájecí vedení v
řídce obydlené oblasti
- Třída x: Zvláštní podmínky stanovené ve specifikaci výrobku

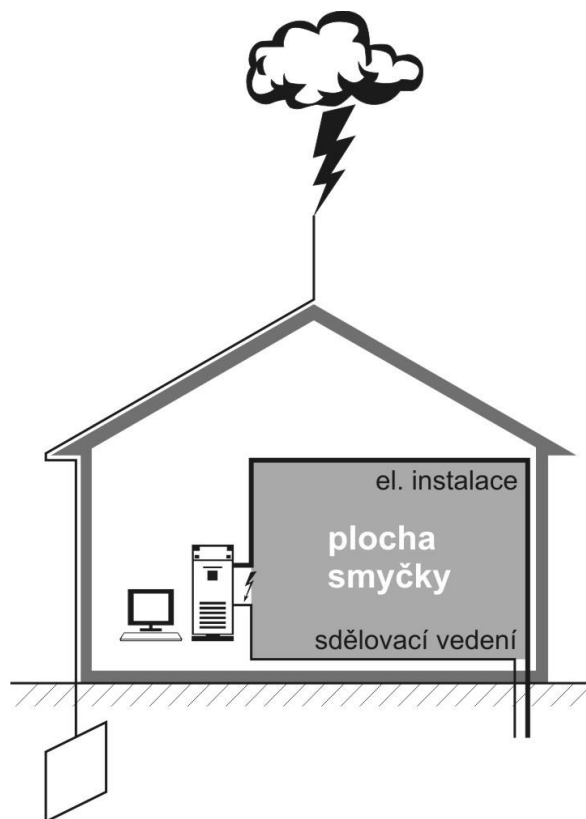
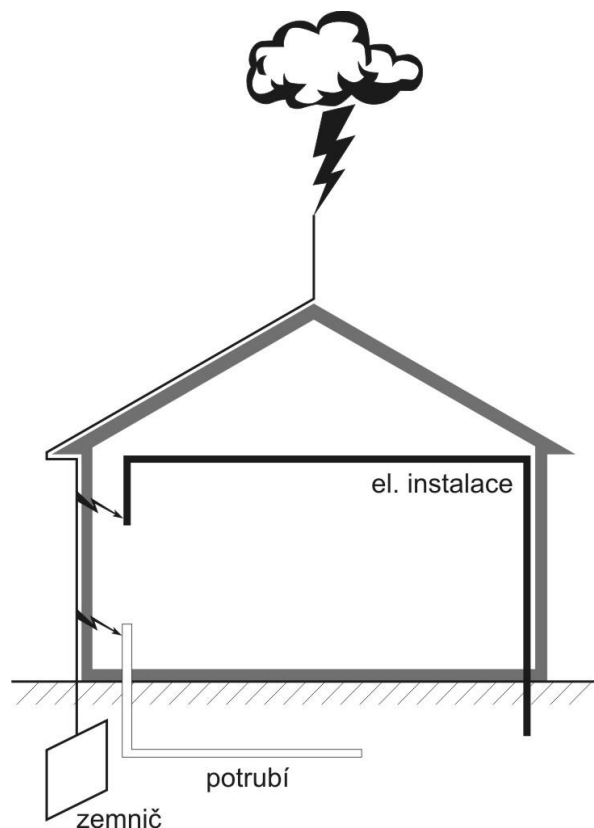
Atmosférická přepětí

- **přímý úder blesku do vedení vn**
přenos na nn přes indukčnosti přívodů trafa, kapacity mezi vinutími, přímou transformací (tlumeně), přes společné uzemnění
- **přímý úder blesku do vedení nn, telefonního vedení**
- **nepřímý úder blesku**
přenos přes induktivní a kapacitní vazby mezi vedením a dráhou bleskového proudu
- **statické přepětí na vedení**
blízkost bouřkového mraku způsobí nashromáždění opačného náboje na vedení a po výboji mezi mraky se náboj uvolní



Přepětí v budovách

- **zavlečení přepětí napájecí sítí, telefonním vedením**
- **indukování přepětí při blízkém úderu nebo úderu do hromosvodu**



Norma ČSN EN 62305-4 (ČSN EN 61312-3) definuje zóny ochrany před bleskem LPZ z hlediska přímého a nepřímého (elektromagnetického pulsu – LEMP) účinku blesku:

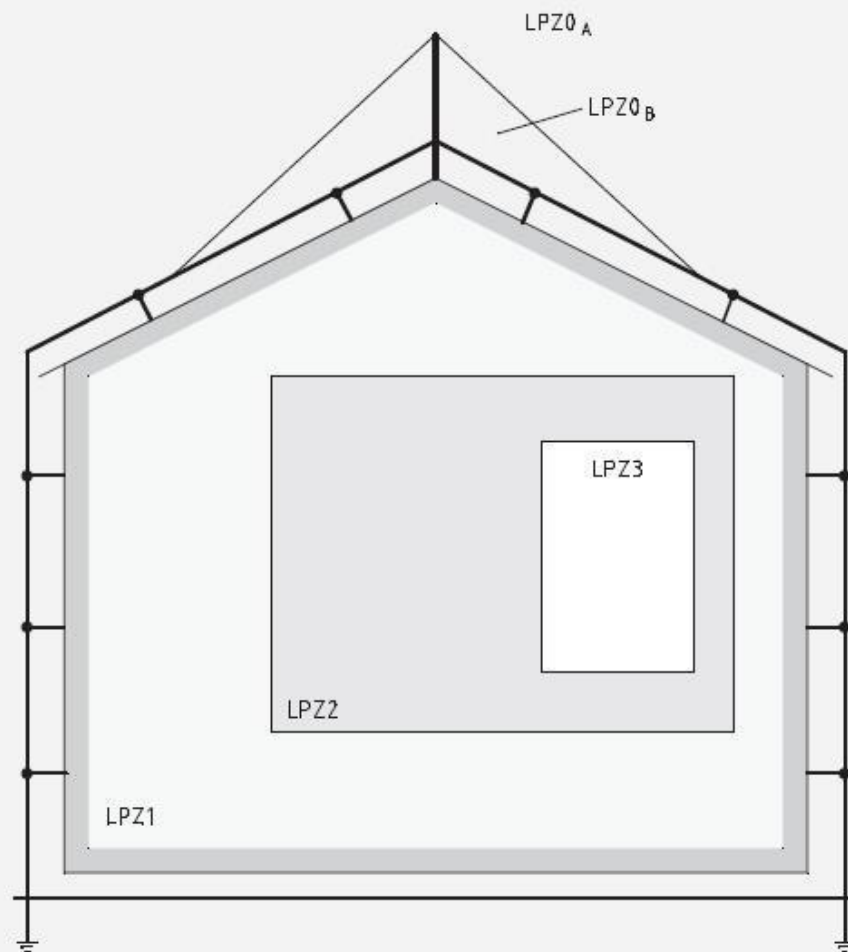
LPZ 0_A – volné prostranství (možnost přímého úderu blesku, netlumený LEMP)

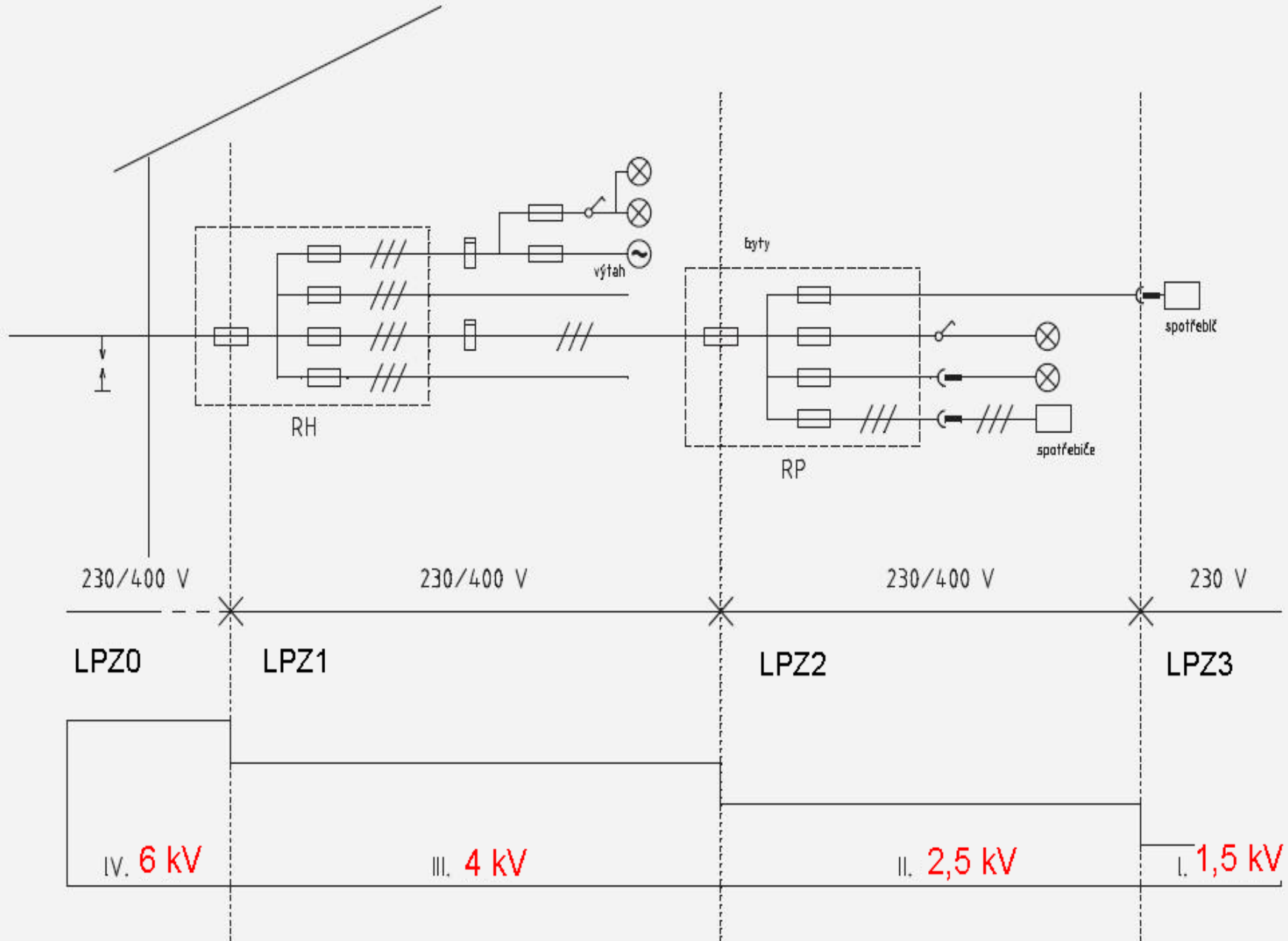
LPZ 0_B – ochranný prostor jímače hromosvodu (ochrana před přímým úderem blesku, netlumený LEMP)

LPZ 1 – vnitřek objektu (vyloučený přímý úder blesku, tlumený LEMP – v závislosti na stínění)

LPZ 2 – vnitřek místnosti –např. serverovna s vodivou podlahou, FeAl podlahy a obklady zdí (další útlum LEMP v souvislosti s vyšším stupněm odstínění)

LPZ 3 – vnitřek kovové skříně





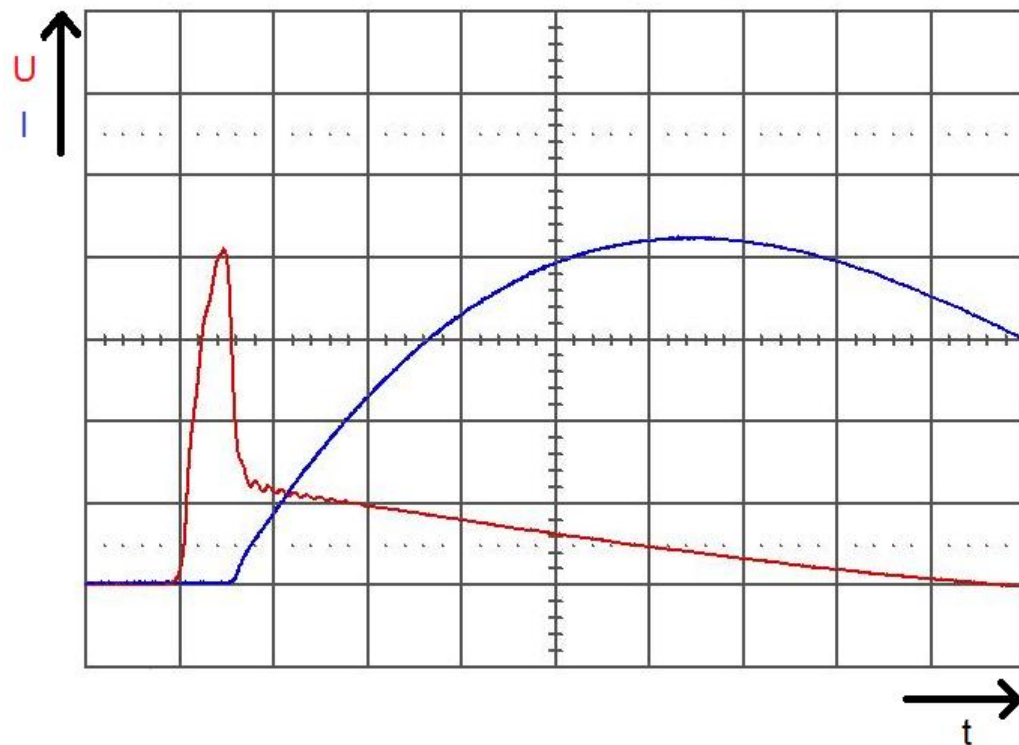
Jmenovité impulsní výdržné napětí zařízení (podle ČSN EN 60 664-1)

Ochrany proti přepětí

- funkční bleskosvodná soustava

- svodiče bleskových proudů

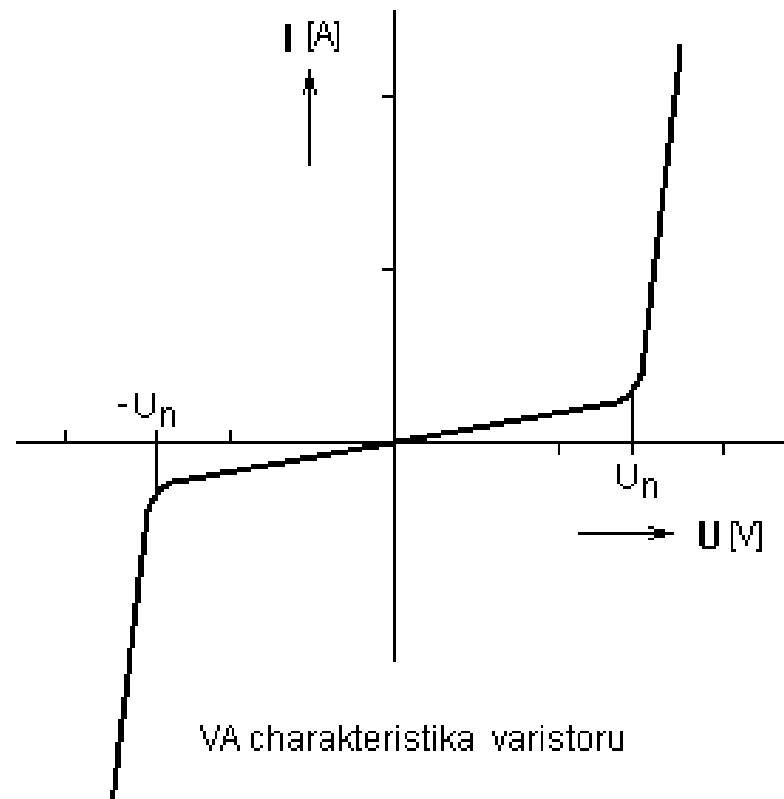
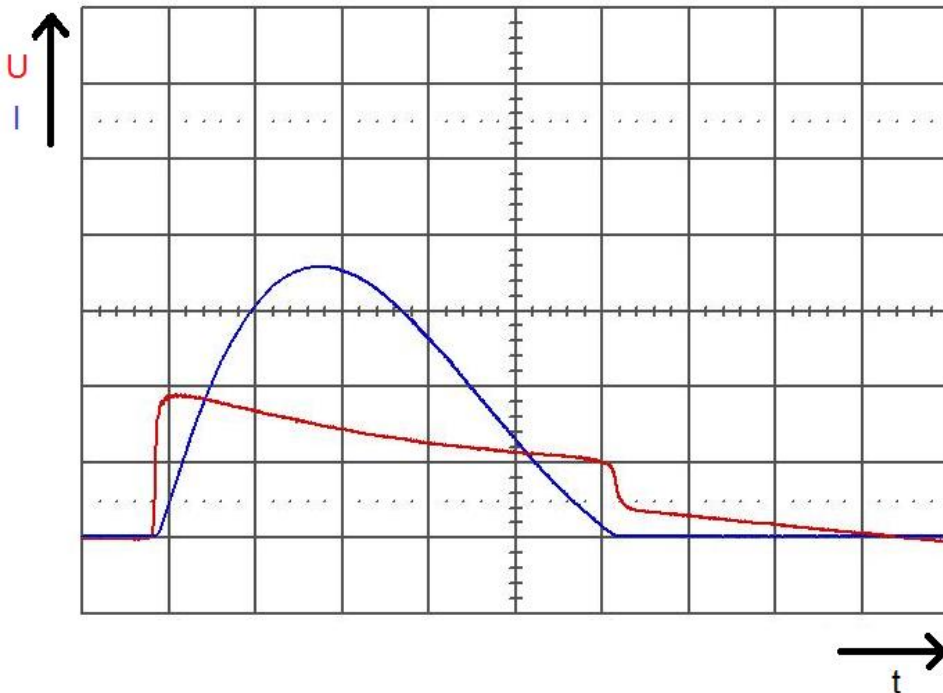
- bleskojistky (jiskřiště)
- zhášedlem je vzduch, inertní plyn
- vysoké proudy až 10^1 kA
- vysoké zapalovací napětí závislé na strmosti čela vlny
- odezva 10^2 ns



Ochrany proti přepětí

- **svodiče přepětí**

- Varistory (Variable resistor)
- oxidy kovů (ZnO+příměsi)
- proudy kolem 5 -10 kA
- nižší otevírací napětí nezávislé na strmosti čela vlny
- odezva kolem 25 ns



VA charakteristika varistoru

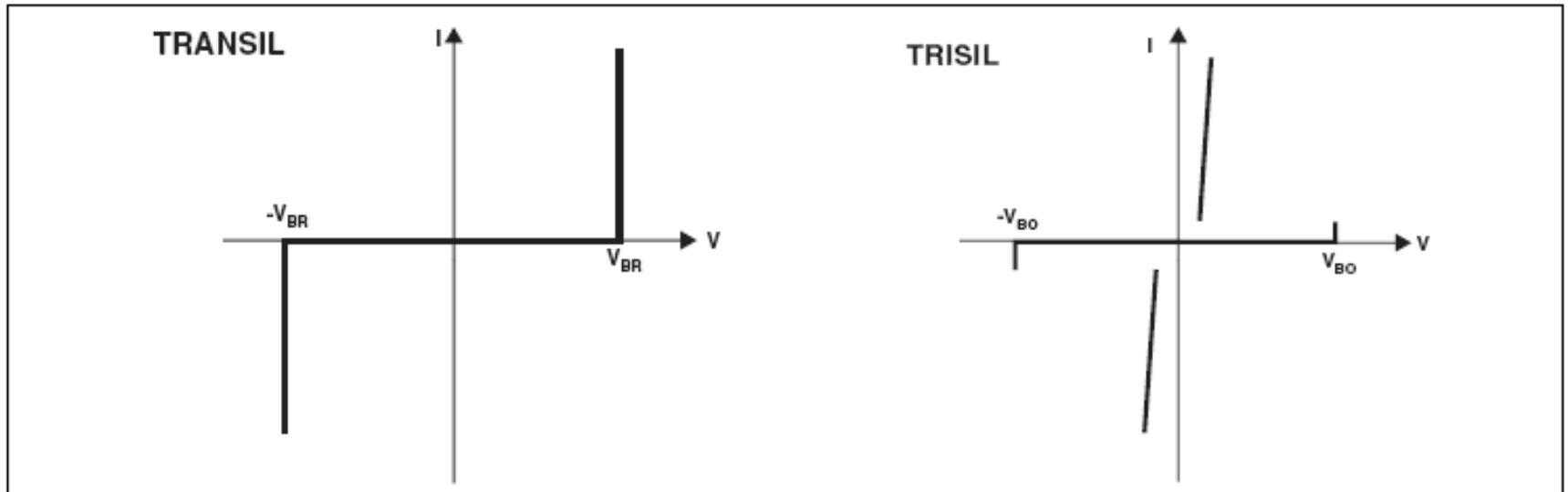
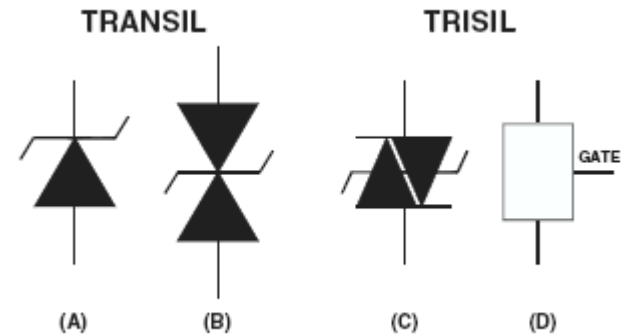
Napětí na varistoru

Proud varistorem

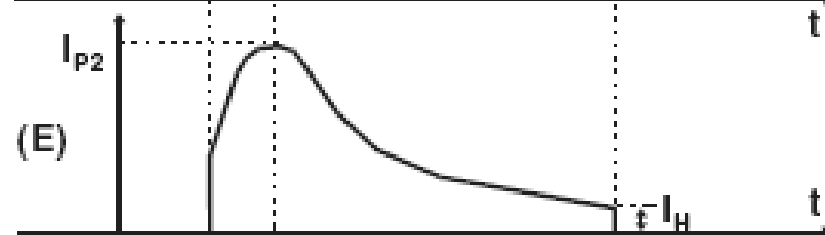
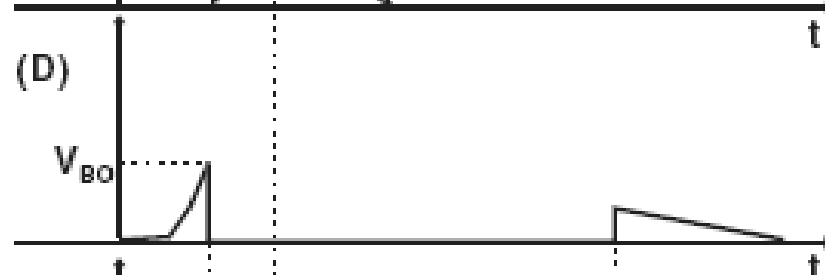
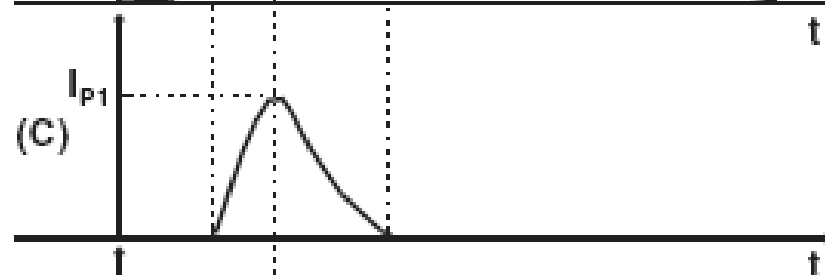
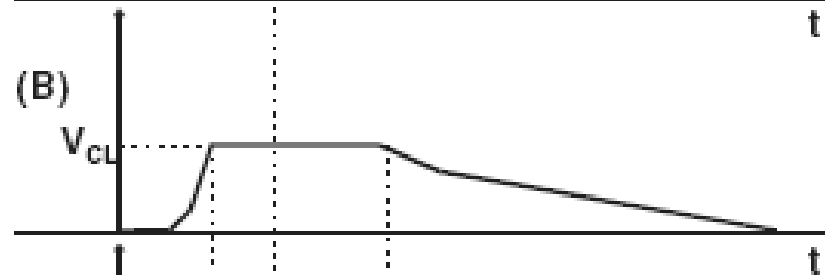
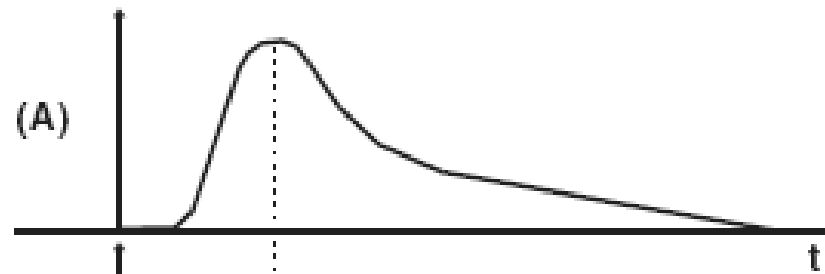
Ochrany proti přepětí

- **supresorové diody, transily, trisily**

- speciální Zenerovy diody
- proudy do 100 A
- nízké průrazné napětí nezávislé na strmosti čela
- velmi rychlá odezva do 10 ns

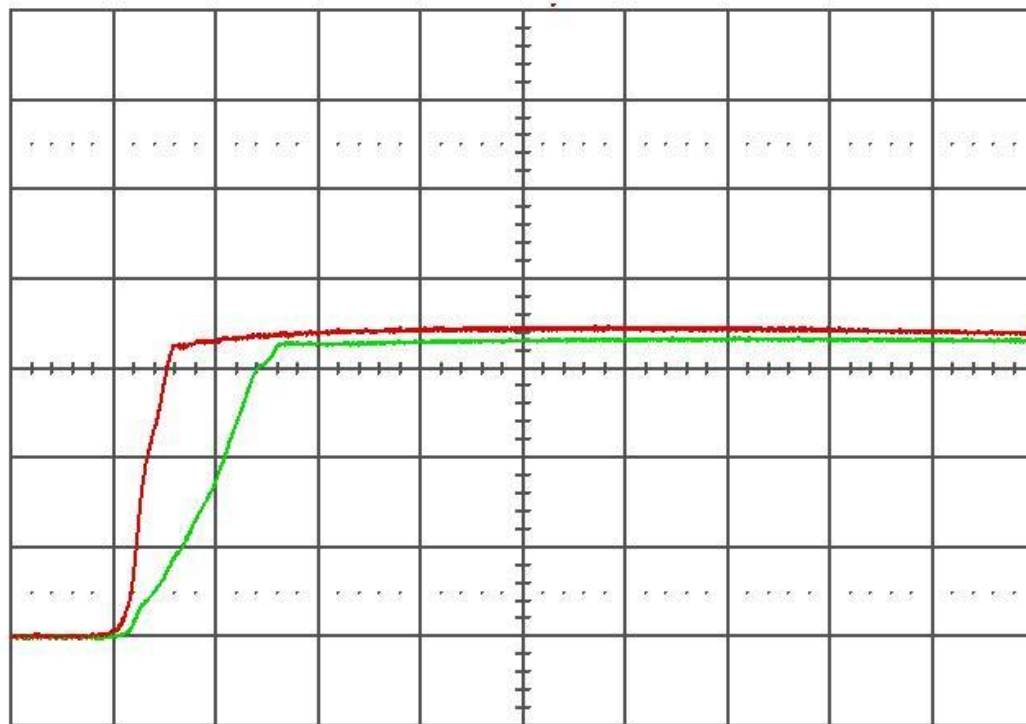
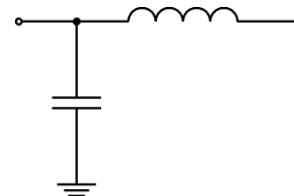


Ochrany proti přepětí



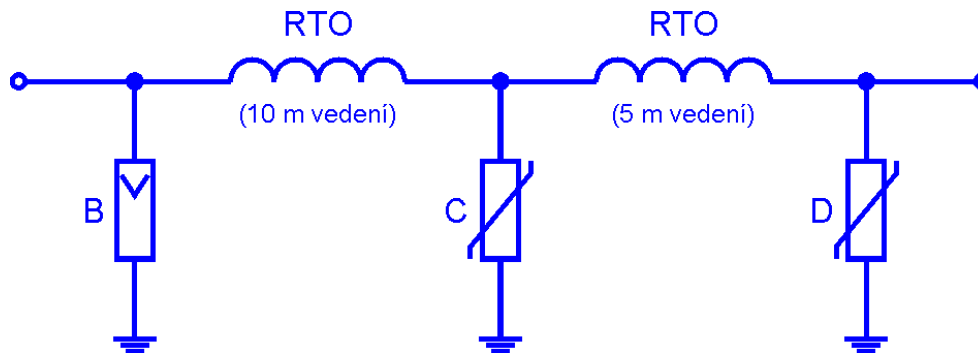
Ochrany proti přepětí

- **indukčnost, kapacita**
 - pohlcení energie přepětí na tvorbu magnetického nebo elektrického pole
 - zpomalení čela vlny



Koordinace přepět'ových ochran

- energii přepětí je nutné snižovat postupně
- komplexní ochranu proti přepětí tvoří tři stupně ochrany



- B hrubá ochrana**
bleskojistky v hlavním rozvaděči
- C jemná ochrana**
varistory v podružných rozvaděčích
- D jemná ochrana**
chráněné zásuvky, prodlužovačky,
filtry, atd.

RTO rázová oddělovací tlumivka
zpožďuje nárůst napětí
na následujícím prvku a zamezí
tak spuštění rychlejší ochrany
před pomalejší

Magnetické pole síťového kmitočtu – zkouška odolnosti

ČSN EN 61000-4-8

Magnetické pole síťového kmitočtu

Technická norma ČSN EN 61000-4-8

- stanovuje požadavky na odolnost zařízení průmyslových instalací, elektráren, rozvoden vn a vvn
- rušení je způsobeno proudem síťového kmitočtu ve vodičích nebo od jiných přístrojů (transformátory)
- proud za normálních provozních podmínek – ustálené magnetické pole relativně nízké intenzity
- poruchový proud – intenzivní magnetická pole krátkého trvání (reakce ochran)
- **intenzita magnetického pole:**
 - a) **domácí spotřebiče:** 0,03 – 10 A/m ve vzdálenosti 30 cm od přístroje
 - b) **vedení vvn:** 10 A/m/kA pod stožárem; 16 A/m/kA pod středem rozpětí; asi 1/3 uvedených hodnot 30 m od vedení (závisí na konfiguraci vedení, zatížení)
 - c) **rozvodny vvn:** pod sběrnicemi 14 A/m (220kV; 0,5 kA); 9 A/m (400kV; 0,5 kA), v místnosti ochran 1,1 – 7 A/m v závislosti na vzdálenosti a umístění zařízení
 - d) **elektrárny:** 14 - 85 A/m ve vzdálenosti 30 cm od sběrnic vn (2,2 kA) a 8,5 – 35 A/m ve vzdálenosti 1 m; 8 – 13 A/m ve vzdálenosti 30 cm od kobek 6 kV a 3,5 – 4 A/m ve vzdálenosti 1 m; 26 A/m ve vzdálenosti 30 cm od čerpadel 6 MVA; 14 A/m ve vzdálenosti 30 cm od transformátoru 600MVA

Magnetické pole síťového kmitočtu

Zkušební úrovně:

Tabulka 1 – spojité pole

Úroveň	Intenzita magnetického pole A/m
1	1
2	3
3	10
4	30
5	100
x	Otevřená úroveň, může být dána ve specifikaci výrobku.

Tabulka 2 – krátké trvání od 1 s do 3 s

Úroveň	Intenzita magnetického pole A/m
1	nepoužívá se
2	nepoužívá se
3	nepoužívá se
4	300
5	1000
x	Otevřená úroveň, může být dána ve specifikaci výrobku.

Magnetické pole síťového kmitočtu

Výběr zkušebních úrovní:

Třída 1: může být použit citlivý přístroj používající elektronový svazek

Třída 2: dobře chráněné prostředí (domácnost, obchod, chráněné prostory nemocnic vzdálené od vodičů ochranné země, prostory průmyslových instalací a vvn rozvoden)

- bez vlivu zařízení, které vytváří rozptylové toky (výkonový transformátor)
- bez vlivu sběrnic vvn

Třída 3: chráněné prostředí (prostory obchodních organizací, správní budovy, lehký průmysl, počítačový sál rozvodny vvn)

- el. zařízení a kabely generující rozptylové toky nebo mg. pole
- blízkost zemních vodičů ochranného systému
- obvody a sběrnice vn a vvn jsou vzdáleny několik stovek metrů

Třída 4: typické průmyslové prostředí (těžký průmysl, elektrárny, dozorny vvn rozvoden)

- krátké větve rozvodných vedení
- výkonová el. zařízení generující rozptylové toky
- zemní vodiče ochranného systému
- obvody a sběrnice vn a vvn jsou vzdáleny několik desítek metrů

Třída 5: těžké průmyslové prostředí (rozvodny vn a vvn těžkého průmyslu a elektráren)

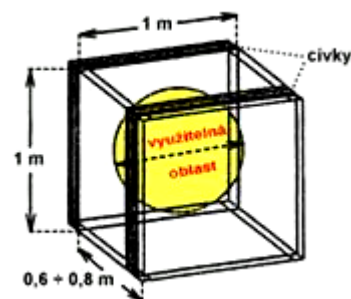
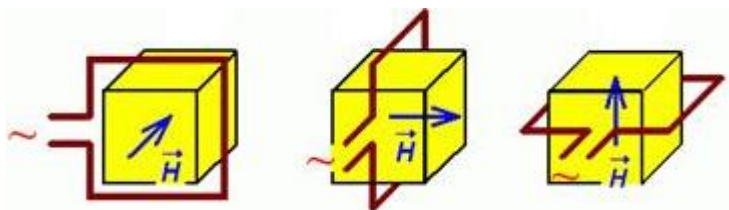
- vodiče, sběrnice nebo vedení vn a vvn přenášející desítky kA
- blízkost výkonových el. zařízení
- zemní vodiče ochranného systému
- blízkost sběrnic vn a vvn

Magnetické pole síťového kmitočtu

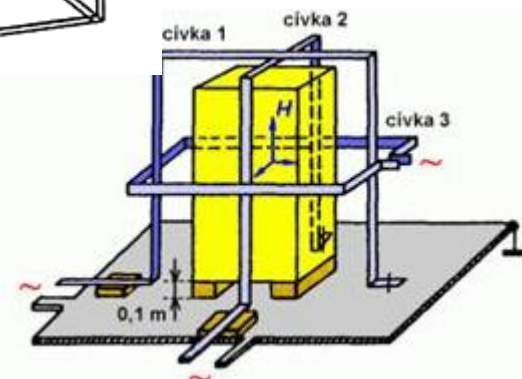
Indukční cívka:

Magnetické pole se vytváří průtokem proudu indukční cívkou a aplikuje se na EUT ponornou metodou. Indukční cívka musí generovat intenzitu pole odpovídající vybrané zkušební úrovni a s definovanou homogenitou pole $\pm 3\text{dB}$.

- zhotovena obvykle z Cu nebo Al (vodivý, nemagnetický materiál)
- **malá zařízení na stole:** jednozávitová čtvercová cívka o straně 1 m. Zkušební prostor normalizované čtvercové cívky s homogenitou pole 3dB je 0,6 m x 0,6 m x 0,5 m (výška) nebo Helmholtzova cívka (dva nebo více závitů vzdálených obvykle 0,6 m (0,8 m)). Dvojitá cívka zlepšuje homogenitu pole nebo zvětšuje zkušební prostor na 0,6 m x 0,6 m x 1 m (1,2 m).

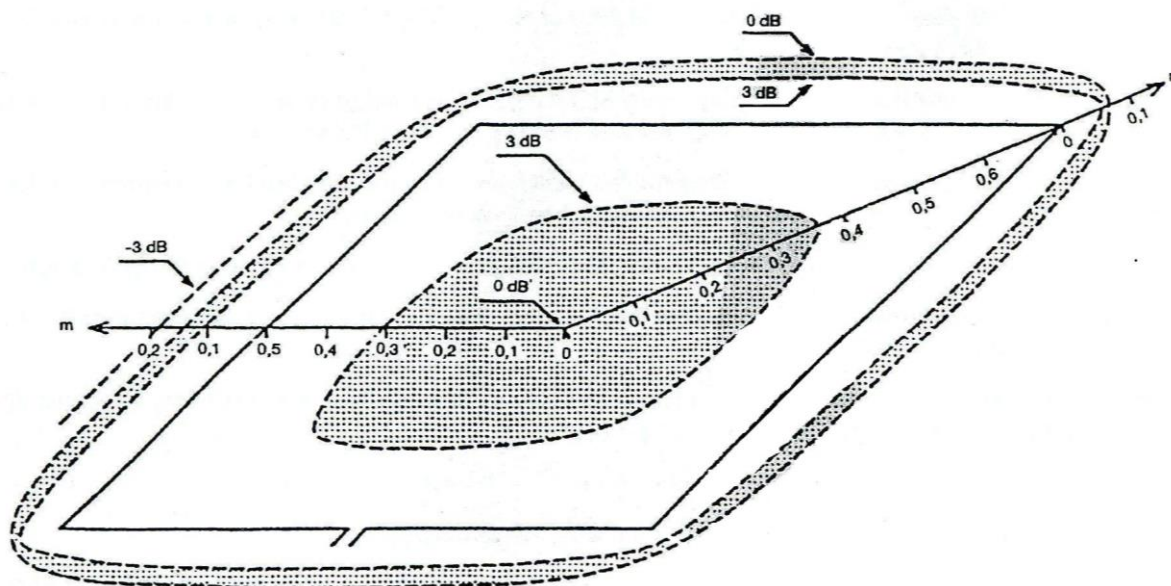


- **zařízení stojící na podlaze:** nejmenší vzdálenost mezi vodiči cívky a stěnami EUT je rovna 1/3 rozměru vyšetřovaného EUT. Zkušební objem uvnitř cívky je dán prostorem 60 % x 60 % každé strany cívky x hloubka odpovídající 50 % kratší strany cívky nebo obvykle používaná cívka 1 m x 2,6 m se zkušebním prostorem 0,6 x 0,6 x 2 m.



Magnetické pole síťového kmitočtu

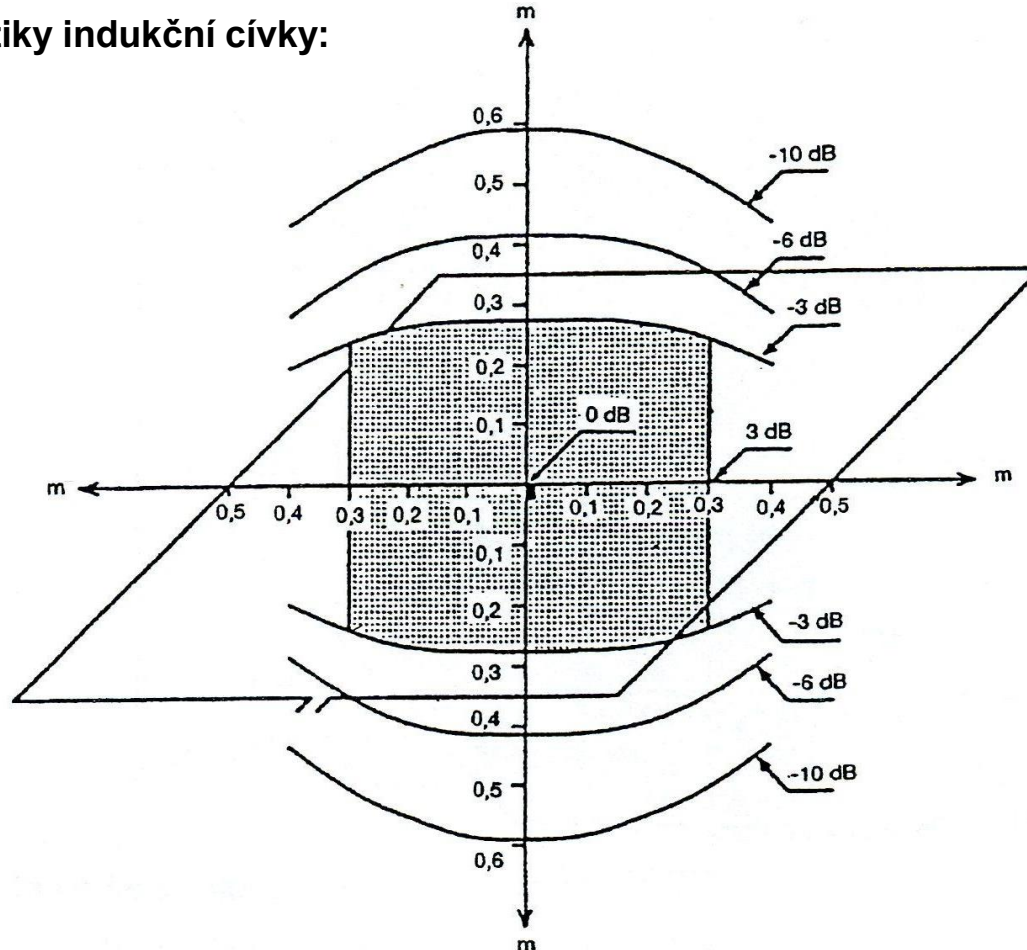
- Charakteristiky indukční cívky:



Normalizovaná cívka o straně 1 m:
indukčnost $2,5 \mu\text{H}$
Pravoúhlá indukční cívka 1 m x 2,6 m:
Indukčnost $6 \mu\text{H}$

Magnetické pole síťového kmitočtu

- Charakteristiky indukční cívky:



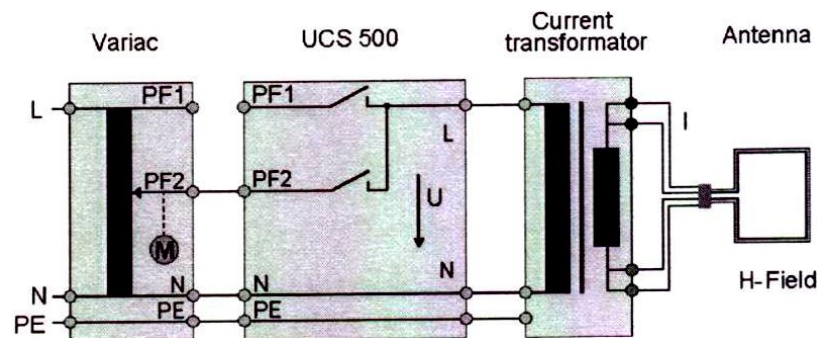
Magnetické pole síťového kmitočtu

Zkušební sestava:

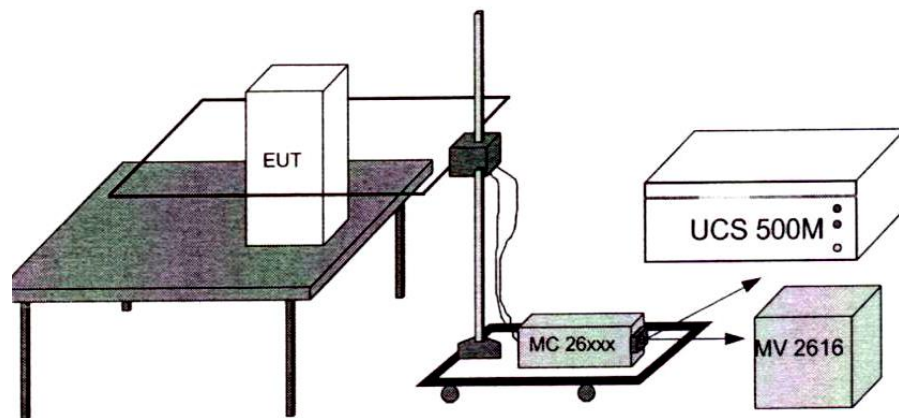
Sestava pro generování magnetického pole se skládá z regulátoru napětí, proudového transformátoru, obvodu pro řízení režimu zkoušky a antény (indukční cívky).

Faktor antény $F_{\text{ant}} = H \text{ (A/m)} / I_{\text{ant}} \text{ (A)} = 0,91$; tedy proud 100 A tekoucí anténou (cívkou) generuje ve středu antény magnetické pole 91 A/m nebo 109,9 A generuje 100 A/m.

Faktor transformátoru $F_{\text{trafo}} = I_{\text{ant}} \text{ (A)} / U_{\text{primáru trafa}} \text{ (V)} = 0,04$ pro 1 a 3 A/m
 $= 0,36$ pro 10 a 30 A/m

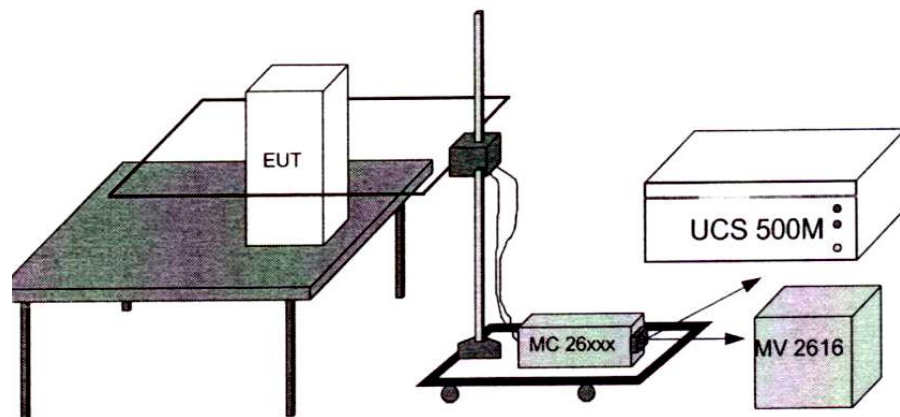


Napětí primáru	F_{trafo}	Proud cívkou	F_{ant}	Úroveň mg. pole
27,5 V	0,04	1,1 A	0,91	1 A/m
82,5 V	0,04	3,3 A	0,91	3 A/m
30,5 V	0,36	10,99 A	0,91	10 A/m
91,6 V	0,36	32,97 A	0,91	30 A/m



Magnetické pole síťového kmitočtu

Zkušební sestava:



UCS 500



MC 2630



MV 2616



Magnetické pole síťového kmitočtu

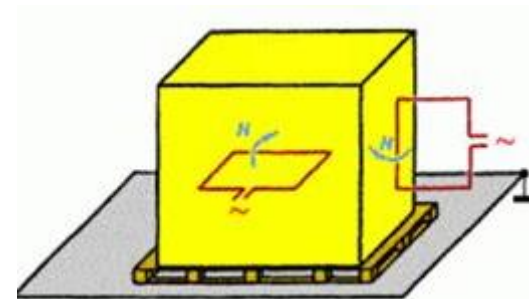
Postup zkoušky:

1) Zkušební uspořádání

- laboratoř musí být vybavena **zemní rovinou** spojenou s ochranným uzemňovacím systémem
laboratoře – nemagnetická tabule z kovového plechu, obvykle Cu, Al (tloušťka 0,25 mm; pro jiné kovy tloušťka 0,65 mm). Minimální rozměr 1 x 1 m, konečná velikost závisí na rozměrech EUT.
- EUT je umístěno na zemní rovině na izolační podložce o tloušťce 0,1 m a zapojeno tak, aby splňovalo funkční požadavky
- všechny vstupní a výstupní přívody EUT musí být vystaveny mg. poli v délce 1 m
- zkušební generátor musí být připojen k zemní rovině

2) Postup zkoušky

- elektromagnetické pozadí laboratoře musí být alespoň o 20dB nižší než vybraná zkušební úroveň
- EUT je uvedeno do provozu a je ověřena jeho funkčnost
- zkušební mg. pole musí být aplikováno ponornou metodou
- pro zjištění nejcitlivější polohy EUT (zejména velká stacionární zařízení) může být použita metoda přiblížení
- EUT je vystaveno mg. poli předepsané úrovně a homogenity pro každý navzájem kolmý směr. Pro velká zařízení je možné cívku posouvat po krocích odpovídajících 50 % nejkratší strany cívky.



Pulzy magnetického pole – zkouška odolnosti

ČSN EN 61000-4-9

Pulzy magnetického pole

- zkouška je určena pro elektronická zařízení instalovaná v elektrárnách a centrech dálkového řízení, neuvažuje rušení způsobená kapacitní nebo induktivní vazbou v kabelech nebo v jiných částech instalace (rušení po vedení)
- impulzní mg. pole jsou způsobena údery blesku, počátečními přechodovými jevy poruch v elektrických sítích, spínáním vvn sběrnic a vedení vývodovými vypínači

Zkušební úrovně:

Úroveň	Intenzita impulzního magnetického pole (A/m)
1	nepoužívá se
2	nepoužívá se
3	100
4	300
5	1000
x	Otevřená úroveň, může být dána ve specifikaci výrobku.

Pulzy magnetického pole

Výběr zkušebních úrovní:

Třída 1: nepoužívá se pro toto prostředí

Třída 2: nepoužívá se pro toto prostředí

Třída 3: chráněné prostředí (prostory obchodních organizací, správní budovy, lehký průmysl, počítačový sál rozvodny vvn)

- blízkost zemních vodičů ochranného systému hromosvodu a kovových konstrukcí

Třída 4: typické průmyslové prostředí (těžký průmysl, elektrárny, dozorny vvn rozvoden)

- uzemňovací vodiče ochranného systému hromosvodu a kovové konstrukce

- obvody a sběrnice vn a vvn jsou vzdáleny několik desítek metrů

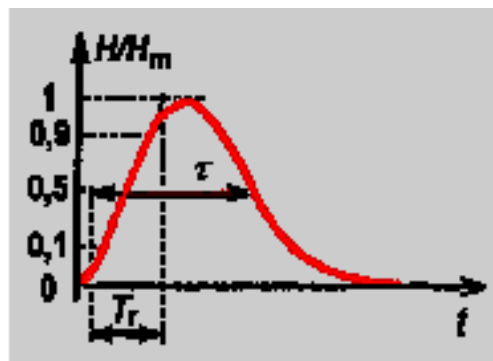
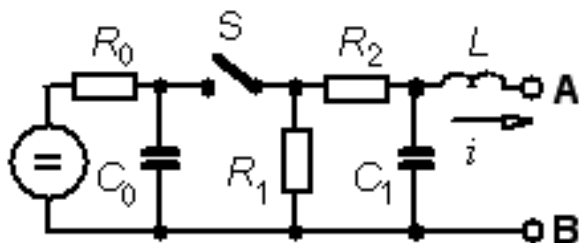
Třída 5: těžké průmyslové prostředí (rozvodny vn a vvn těžkého průmyslu a elektráren)

- vodiče, sběrnice nebo vedení vn a vvn přenášející desítky kA

- uzemňovací vodiče ochranného systému hromosvodu a vysoké kovové konstrukce (stožár vedení) přenášející celý proud blesku

Pulzy magnetického pole

- Zkušební magnetické pole je opět aplikováno **ponornou metodou** s využitím cívek se stejnou charakteristikou (viz ČSN EN 61000-4-8). Zásadní rozdíl je ve zdroji, který impulzní mg. pole generuje. Zkušební sestava neobsahuje ani autotransfornátor, ani proudový transformátor. **Cívka je připojena přímo na výstup kombinovaného** (provozuschnost za podmínek zkratu) **generátoru v režimu surge** (viz vazba, zpětná filtrace k síti, zakončovací CDN). Parametry generovaného impulsu 6,4/16 μs odpovídají tvaru impulsu 8/20 μs pro zkoušky zařízení na odolnost proti účinkům atmosférického impulsu (viz IEC 60-2 a ČSN EN 61000-4-5) – normy používají jiný způsob vyhodnocení tvaru impulsu.
- **Zkušební generátor:**



R_0 ...nabíjecí odpor
 C_0 ...hlavní kondenzátor
 R_1, R_2, C_1, L ...prvky pro tvarování impulsu a impedanční přizpůsobení
 $T_r = 6,4 \mu\text{s} \pm 30 \%$
 $\tau = 16 \mu\text{s} \pm 30 \%$

Postup zkoušky je z hlediska uspořádání měřicího místa a způsobu aplikace mg. pole shodný se zkouškou mg. polem síťového kmitočtu. Zkouška je provedena aplikací alespoň **5 impulsů kladné a 5 impulsů záporné polarity**.

Krátkodobé poklesy napětí,
krátká přerušení a pomalé změny
napětí

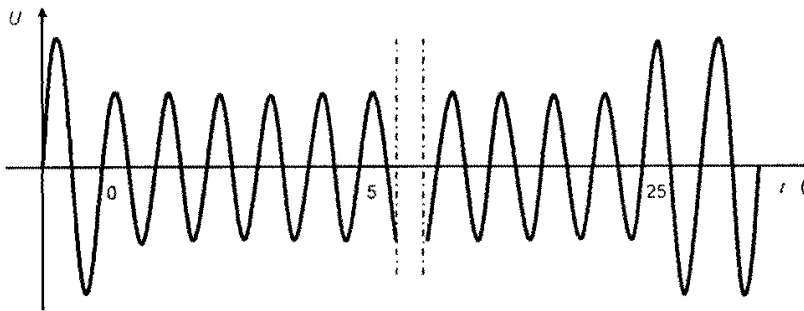
ČSN EN 61000-4-11

Poklesy napětí

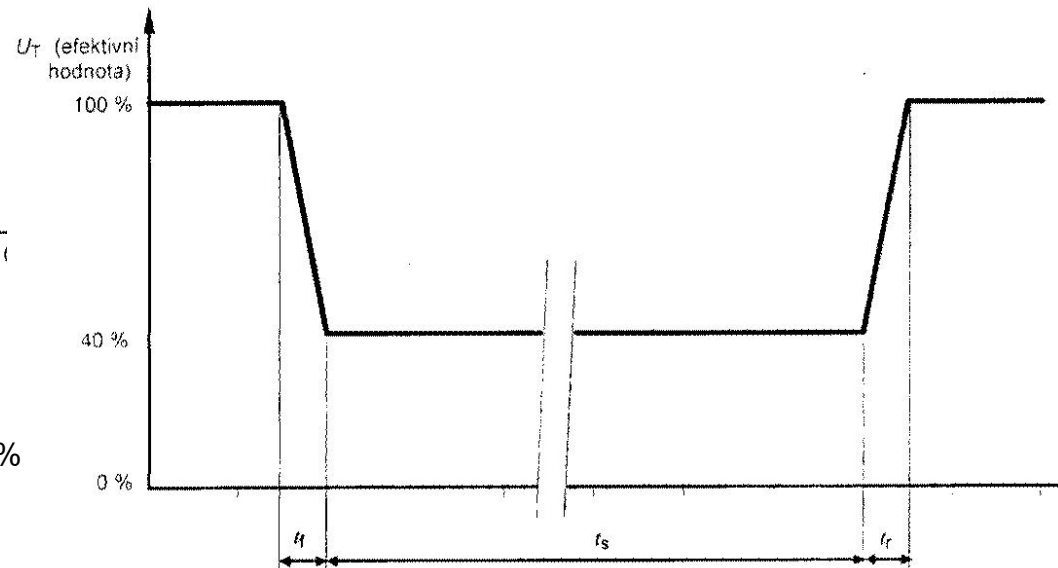
Poklesy napětí a krátká přerušení pro elektrická a elektronická zařízení připojovaná do nn sítí

50 Hz a 60 Hz s fázovým proudem menším než 16 A:

- poruchy v síti, náhlé a velké změny zatížení
- mohou se vyskytovat dva nebo více po sobě následujících poklesů
- změna napětí je skoková, skok může začínat i končit při jakémkoliv fázovém úhlu síťového napětí



Průběh sinusovky krátkodobého poklesu napětí na 70 % s dobou trvání 25 period. Skoková změna v okamžiku průchodu nulou.



Průběh efektivní hodnoty krátkodobého poklesu napětí na 40 %. Doby klesání t_f a stoupání t_r napětí jsou dány požadovanými charakteristikami generátoru (1 – 5 μ s).

Poklesy napětí

Zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy napětí t_s (50 Hz):

- základ pro stanovení zkušebních úrovní je jmenovité napětí pro zařízení
- pokud má zařízení určený rozsah jmenovitých napětí
 - a) nepřekračuje-li rozsah 20 % dolní hranice rozsahu, vztahují se poklesy k některému z napětí z tohoto rozsahu
 - b) jinak je zkouška aplikována na horní i na dolní napětí daného rozsahu

Třída	Zkušební úroveň (% jmenovitého napětí U_T)				
1	Velmi citlivá zařízení v prostředí chráněného napájení (filtry, přepětové ochrany, UPS). Zkouška se definuje pro konkrétní zařízení podle technických požadavků.				
2	0 % ½ periody	0 % 1 perioda	70 % 25 period		
3	0 % ½ periody	0 % 1 perioda	40 % 10 period	70 % 25 period	80 % 250 period
x	x	x	x	x	x

Poznámky:

Třída 2 – spotřebitelské sítě, průmyslové prostředí

Třída 3 – průmyslové prostředí vyžadující vyšší kompatibilní úroveň (měniče, svářečky, časté rozběhy velkých motorů, rychlé změny zatížení)

Třída x – definování úrovně závisí na technické specifikaci výrobku, zařízení napájená z veřejné sítě musí vyhovět alespoň třídě 2

Poklesy napětí

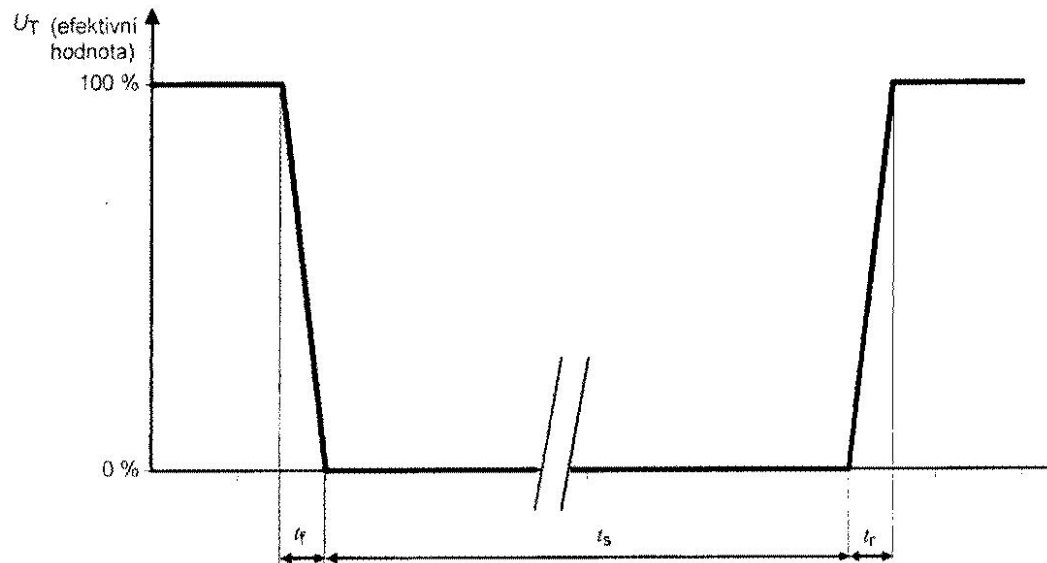
Třídy elektromagnetického prostředí:

- Třída 1:** chráněná napájení - UPS, filtry, přepěťové ochrany, použití velmi citlivých zařízení (laboratoře, některé počítače, automaty,...)
- Třída 2:** společné napájecí body spotřebitelských sítí a vnitřní napájecí body průmyslových závodů, kompatibilní úroveň je identická s veřejnou rozvodnou sítí
- Třída 3:** průmyslové prostředí (napájení přes měniče, svářečky, rozběhy velkých motorů, rychle se měnící zatížení)

Přerušení napětí

Zkušební úrovně a doby trvání pro krátká přerušení napětí t_s (50 Hz):

Třída	Zkušební úroveň (% jmenovitého napětí U_T)
1	Zkouška se definuje pro konkrétní zařízení podle technických požadavků.
2	0 % během 250 period
3	0 %během 250 period
X	X

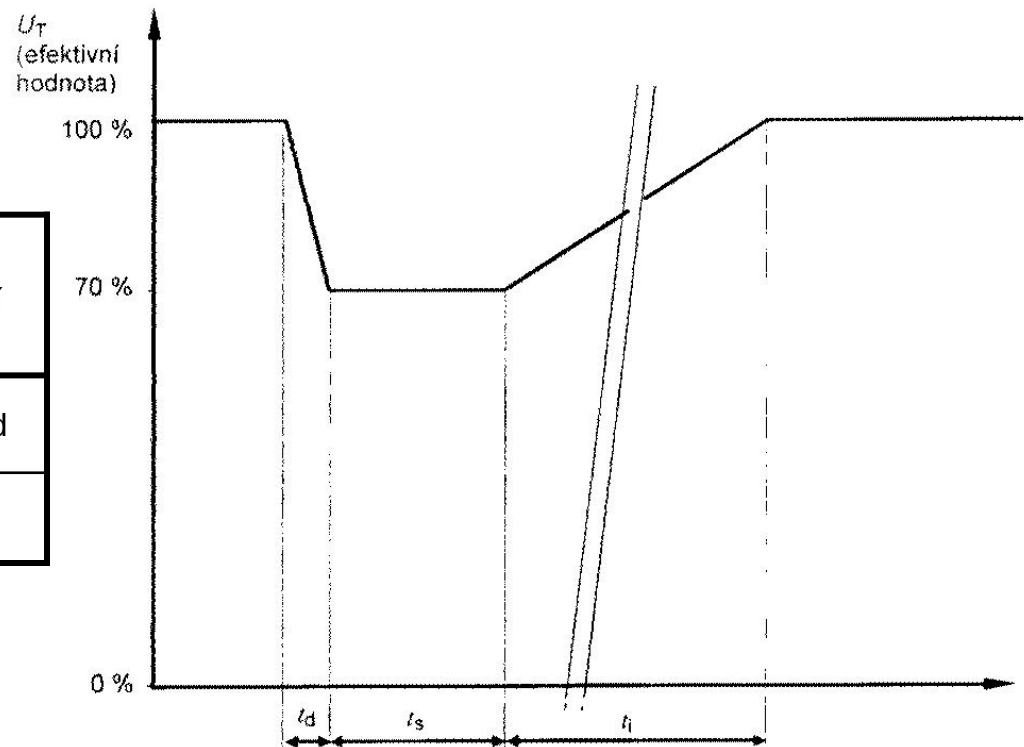


Pomalé změny napětí

Zkušební úrovně pro pomalé změny napětí (nezávazné):

- definovaný přechod mezi jmenovitým napětím a změněným napětím, spojitě proměnné zátěže připojené do sítě
- napětí se mění po určitou krátkou dobu obvykle jako důsledek změn zatížení sítě
- rychlost změny napětí by měla být konstantní (lze po krocích v okamžiku průchodu sinusovky nulou, krok $\leq 10\%$ jmenovitého napětí)

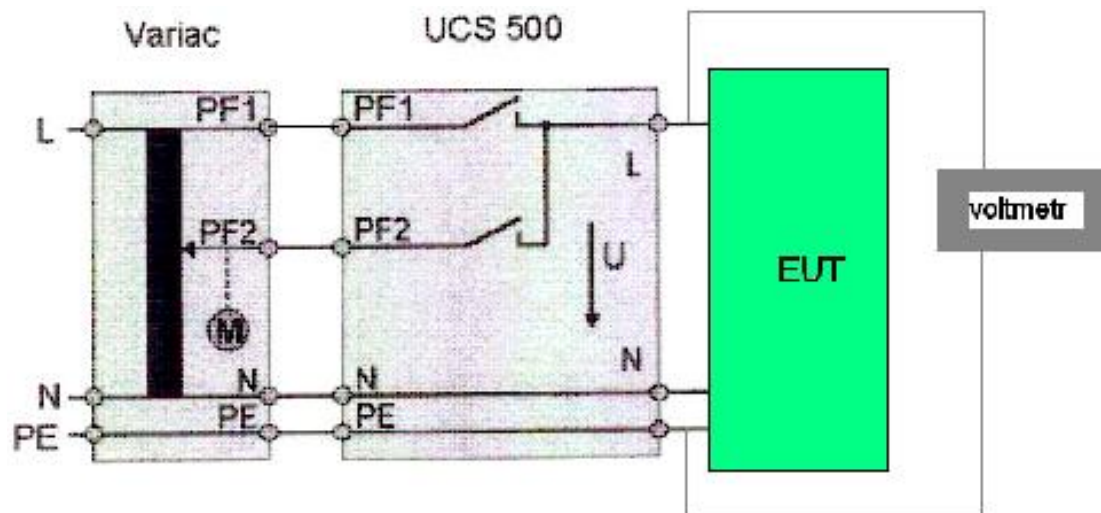
Zkušební úroveň napětí	Doba klesání napětí t_d	Doba sníženého napětí t_s	Doba stoupání napětí t_i
70 %	strmý přechod	1 perioda	25 period
x	x	x	x



Poklesy napětí

Zkušební sestava:

- EUT se pro každou vybranou kombinaci zkušební úrovně a doby trvání testuje v pořadí tři krátkodobé poklesy/přerušení s minimálními intervaly 10 s mezi každou dílčí zkouškou
- krátkodobé poklesy a změny napájecího napětí se musí objevit při průchodu napětí nulou a při dodatečných úhlech volených podle specifikace výrobku (obvykle 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° v každé fázi)
- úhel pro krátká přerušení se volí jako nejméně příznivý případ pro dané zařízení, není-li definován, použije se pro jednu z fází 0°
- pro trojfázové systémy se zkouší každá fáze zvlášť, je-li vyveden střední vodič, zkouší se pro fázové i sdružené napětí



Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

ČSN EN 61000-4-6

Indukované vf napětí

- zdroj rušení – elektromagnetické pole z úmyslných vf vysílačů od 9 kHz do 80 MHz, které působí na kabely připojené k instalovanému zařízení
- rozměry zařízení jsou ve srovnání s délkou vlny považovány za malé
- síťové přívody, komunikační vedení, propojovací kabely se chovají jako pasivní přijímací anténní sítě s délkou srovnatelnou nebo násobně větší než délka vlny, rušení je simulováno elektrickými a magnetickými blízkými poli
- rušivý signál je aplikován na jeden kabel, ostatní jsou použitím oddělovacích prostředků udržovány v nevybuzeném stavu

Zkušební úrovně (obvod naprázdno, nemodulovaný signál, efektivní hodnota):

Kmitočtový rozsah 150 kHz – 80 MHz		
Třída	Úroveň napětí	
	U_0 (dB μ V)	U_0 (V)
1	120	1
2	130	3
3	140	10
x	x	x

Poznámka:

Pro vyhodnocování úrovní vf rušivých signálů (pro odolnost i měření emisí) se používají dB a jako vztažná veličina 1 μ V.

Tedy úroveň signálu v dB, který v tomto případě generuje zdroj vf rušení, je dána vztahem:

$$U_0 \text{ (dB}\mu\text{V)} = 20 \log U_0 \text{ (V)} / 1 \text{ (}\mu\text{V)}$$

$$U_0 \text{ (dB}\mu\text{V)} = 20 \log 1\text{V} / 1 \cdot 10^{-6} = 120 \text{ dB}$$

Pro signály šířené prostorem se používá dB μ V/m; pro magnetické pole dB μ A nebo dB μ A/m; pro výkony dBpW.

Indukované vf napětí

Výběr zkušebních úrovní:

Třída 1: nízká úroveň, místa vzdálená víc než 1 km od radiových a televizních stanic, vysílače nízkého výkonu

Třída 2: nenáročné prostředí, přenosné vysílače nízkého výkonu (do 1W), ne v těsné blízkosti zařízení – obchodní prostředí

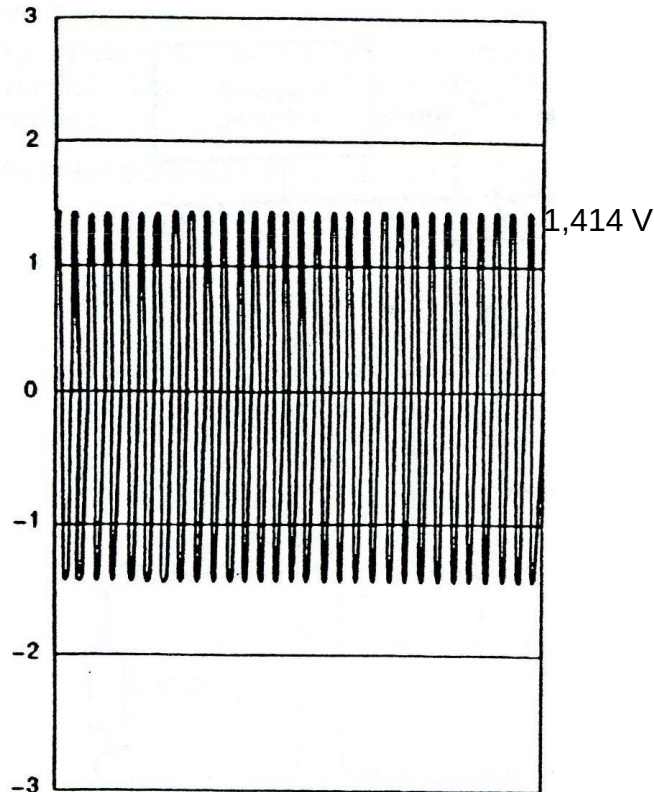
Třída 3: náročné prostředí, přenosné vysílačky 2W a více ve vzdálenosti větší než 1 m od zařízení, výkonové rozhlasové vysílače, průmyslová, vědecká a lékařská zařízení v blízkosti – průmyslové prostředí

Volba závisí také **na rozměrech (viz vlnová délka), způsobu napájení a provozu zařízení**, zařízení malých rozměrů mohou být zkoušena až do 230 MHz, pro počáteční kmitočet platí:

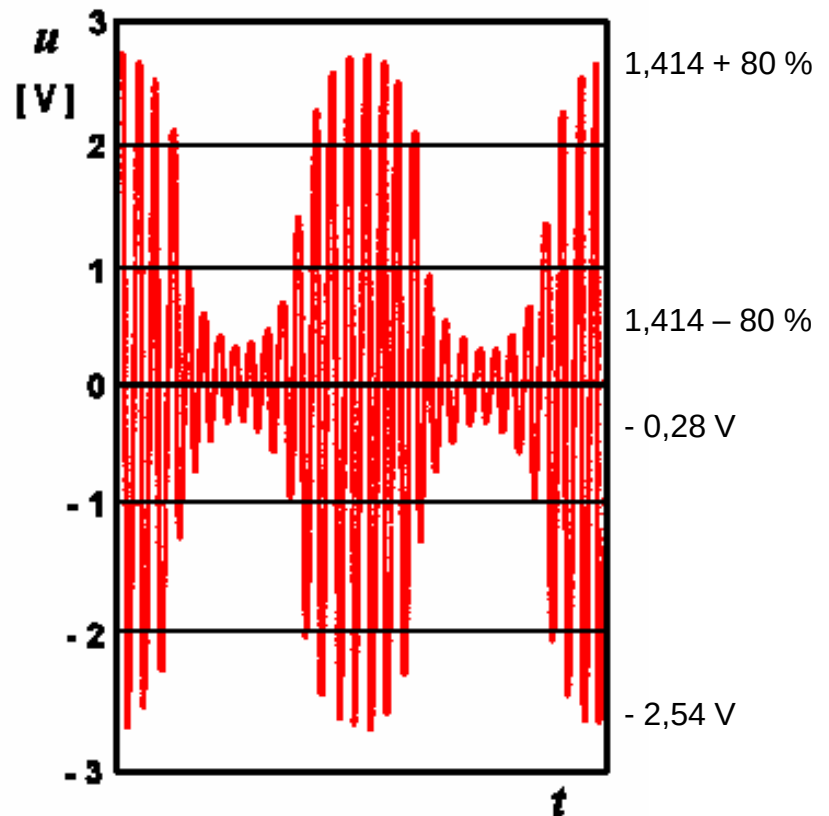
- a) Zařízení napájené z baterie (rozměr $< \lambda/4$), není spojeno se zemí ani s jiným zařízením a nebude použito během dobíjení baterie – nezkouší se
- b) Zařízení napájené z baterie (rozměr $\geq \lambda/4$), počáteční kmitočet zkoušky určí velikost zařízení včetně délky kabelů
- c) Zařízení připojené do sítě a nepřipojené k jinému zařízení, zařízení zatíženo umělou rukou, počáteční kmitočet 150 kHz
- d) Zařízení připojené do sítě a připojené ovládacími nebo telekomunikačními kabely k jinému zařízení, počáteční kmitočet 150 kHz

Indukované vf napětí

Tvar zkušebního signálu na výstupu vazebního členu ze strany EUT vstupu:



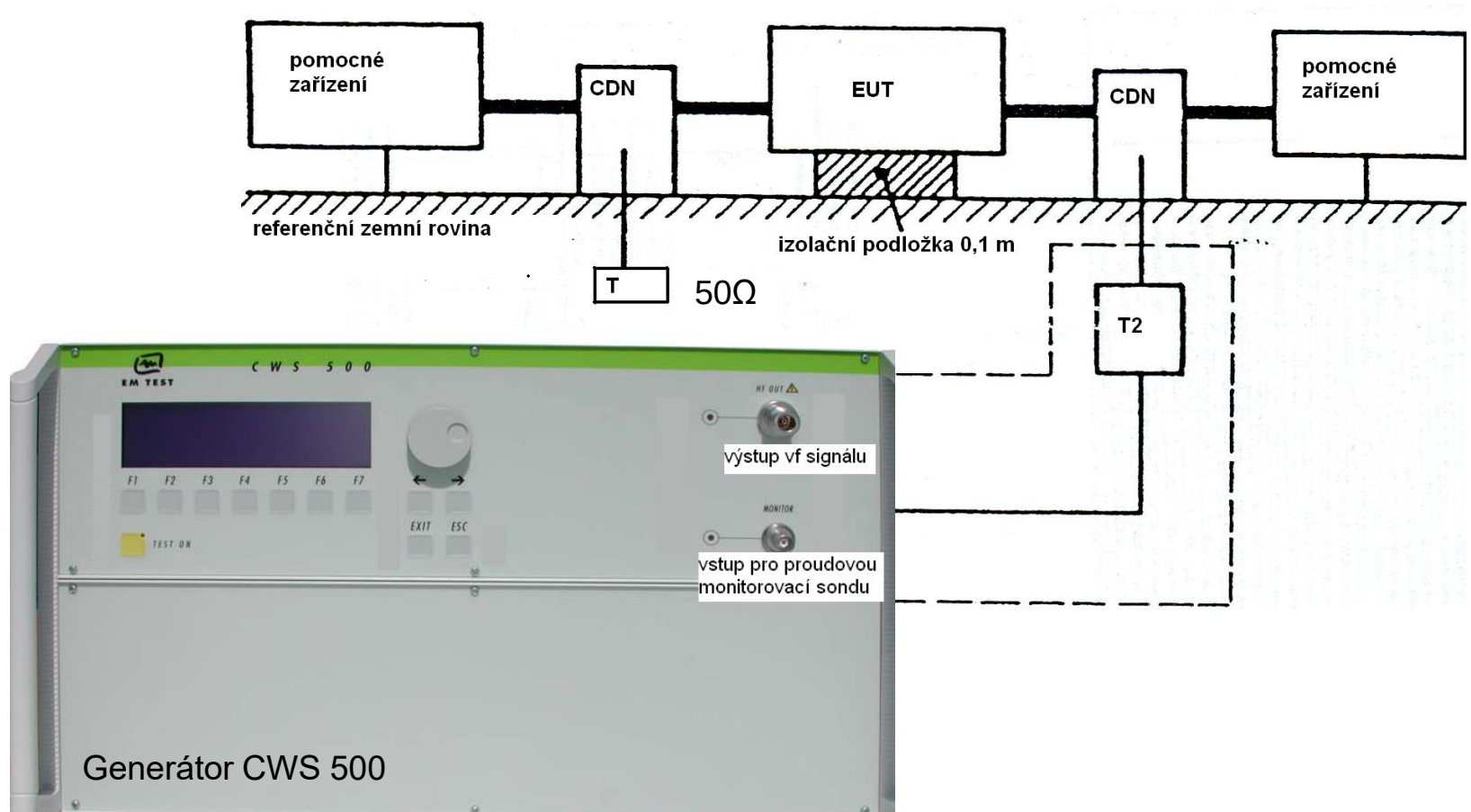
Nemodulovaný vf signál , efektivní hodnota 1V, třída 1.



Modulovaný vf signál s amplitudovou modulací 80 %

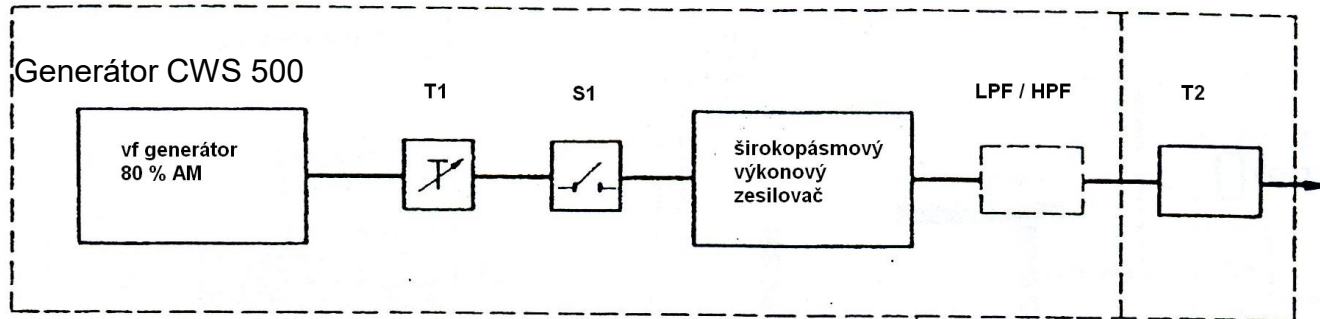
Indukované vf napětí

Zkušební sestava:



Indukované vf napětí

Zkušební sestava:



- vysokofrekvenční generátor pokrývající požadované kmitočtové pásmo 150 kHz – 80 MHz se schopností amplitudové modulace sinusovým průběhem 1 kHz $\pm$ 10 % s hloubkou modulace 80 % $\pm$ 5 %
- generátor je programovatelný (řídící software) s **kmitočtově závislými velikostmi kroků** (krok mezi jednotlivými frekvencemi, na které generátor přeladuje v rámci požadovaného frekvenčního pásma, je určen jako zvolené procento předchozí frekvence a **nesmí překročit 1 %**) a **dobou prodlevy** (doba po kterou generátor zůstává na jedné frekvenci, **nesmí být kratší než 0,5 s**)
- T1 – útlumový člen 0...40 dB k řízení výstupní úrovně zkušebního zdroje rušení
- S1 – vysokofrekvenční spínač
- LPF, HPF – filtry dolní a horní propust mohou být nutné pro měření některých zařízení k vyloučení vzájemné interference (rušení AE je vzhledem ke způsobu vyhodnocování zkoušky nežádoucí)
- T2 – útlumový člen s dostatečným výkonovým dimenzováním, 6 dB, $Z_0 = 50 \Omega$, redukuje nepřizpůsobení výkonového zesilovače k síti

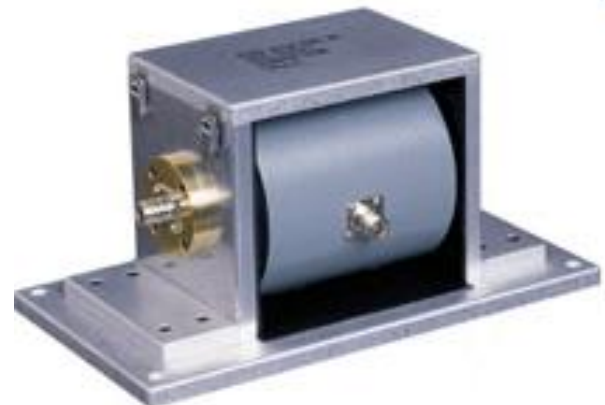
Vazební prvky

- pro **vytvoření vhodné vazby rušivého signálu** (v požadovaném kmitočtovém rozsahu s definovanou nesymetrickou impedancí proti referenční zemní rovině na vstupu/výstupu EUT 150Ω) na různé kabely připojené k EUT a pro zabránění vlivu aplikovaného signálu na jiná nezkoušená zařízení se musí použít **vazební a oddělovací prostředky – vazební/oddělovací síť CDN** (Coupling-Decoupling Network)
- **Elektromagnetické kleště EM 101**, frekvenční rozsah 0,15...1000 MHz, kombinovaná kapacitní a induktivní vazba

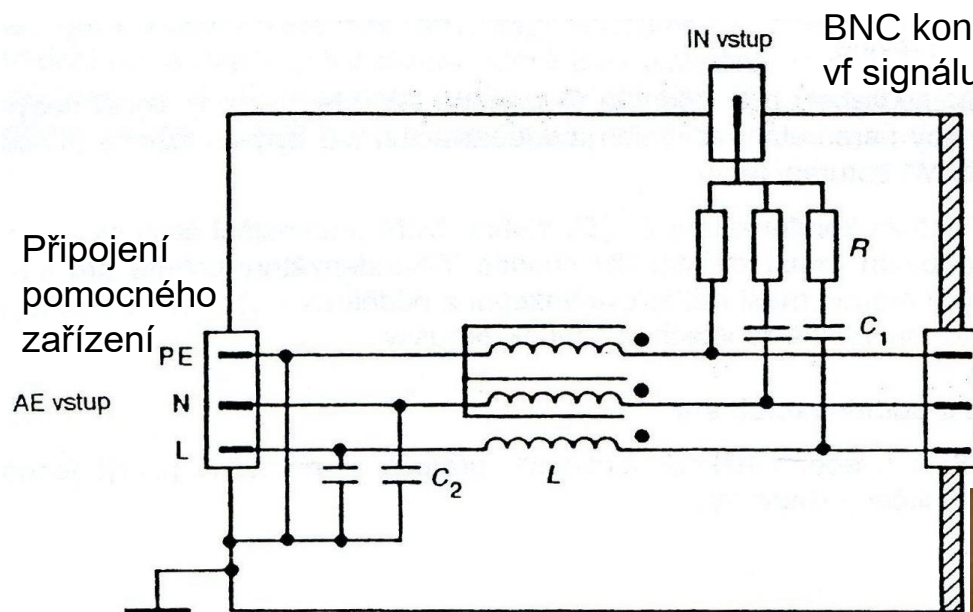


feritové prstence

- **BCI – Bulk Current Injection Clamp**, proudové kleště pro induktivní vazbu



Vazební / oddělovací síť



$$C_1 = 10 \text{ nF}, C_2 = 47 \text{ nF}$$

$$R = 100, 200, 300 \text{ } \Omega \text{ pro M1, M2, M3}$$

$$L \geq 280 \text{ } \mu\text{H}$$

EUT vstup Vstup, ke kterému je připojeno zkoušené zařízení.

CDN typ M pro nestíněná **napájecí vedení**

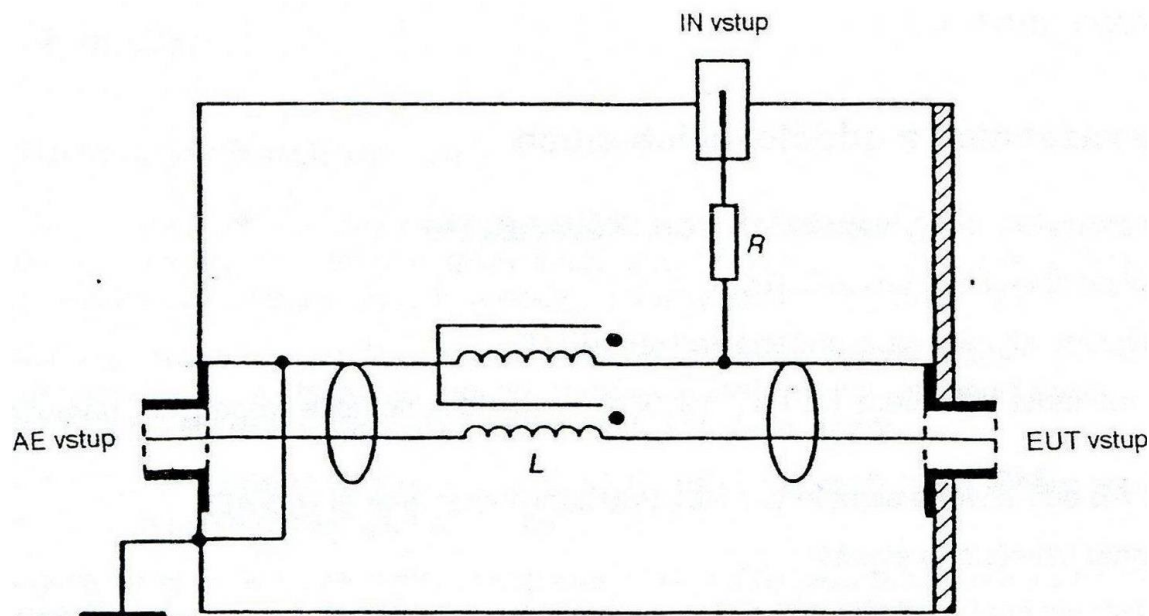
250 V AC/ 400 V DC, 16 A (80 A)

150 kHz – 230 MHz

Pozn: uvedená typová označení a specifikace platí pro CDN firmy FRANKONIA, vazební obvod je ale předepsán normou, takže odlišnosti mezi jednotlivými výrobci v označení CDN neznamenaají jiný způsob vazby.



Vazební / oddělovací síť



CDN typ S, RJ/S, USB pro **stíněné vodiče a stíněné datové vodiče** 50 Ω nebo 75 Ω

250 V AC/ 400 V DC, 0,5 A

150 kHz – 230 MHz

$R = 100 \Omega$, $L \geq 280 \mu\text{H}$

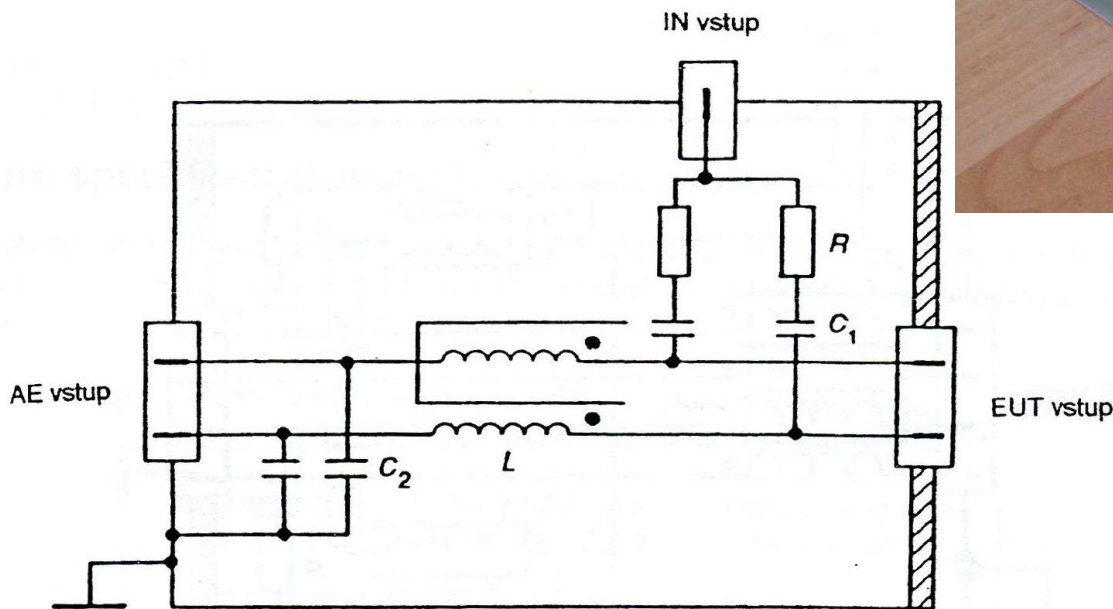
Vazební / oddělovací síť

CDN typ AF pro **nestíněné nesymetrické vodiče**

40 V AC/ 50 V DC, 0,5 A

150 kHz – 230 MHz

$R = 200 \Omega$...paralelní kombinace musí dát výsledných 100Ω , které s 50Ω vstupu tvoří požadovanou nesymetrickou impedanci 150Ω



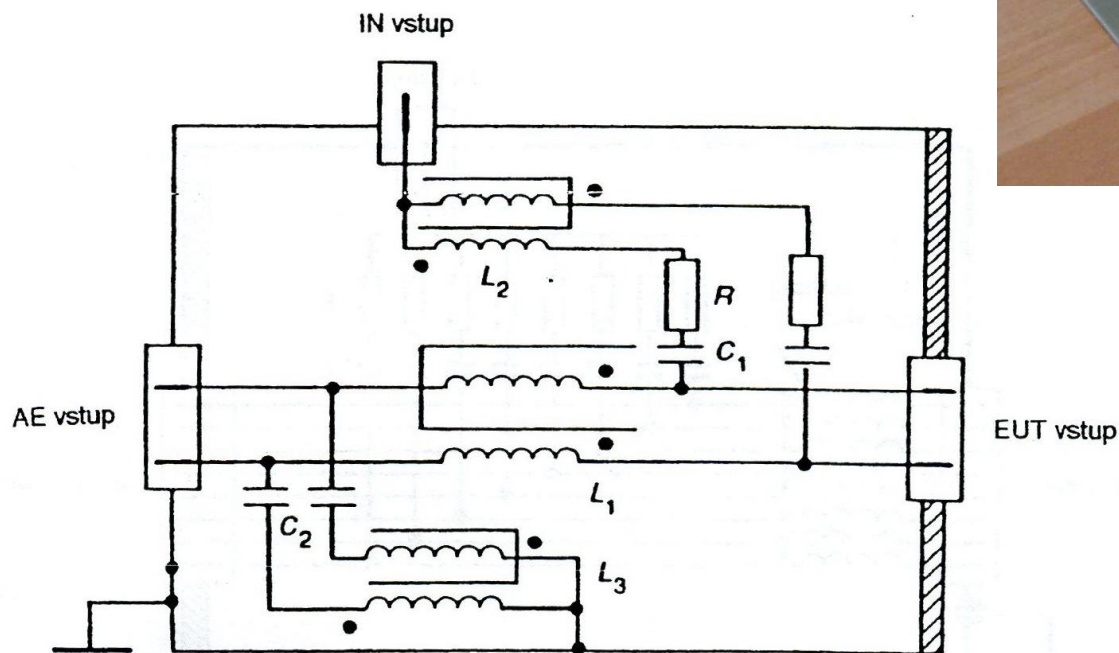
Vazební / oddělovací síť

CDN typ T pro **nestíněné symetrické vodiče**

150 V AC/ 200 V DC, 0,5 A

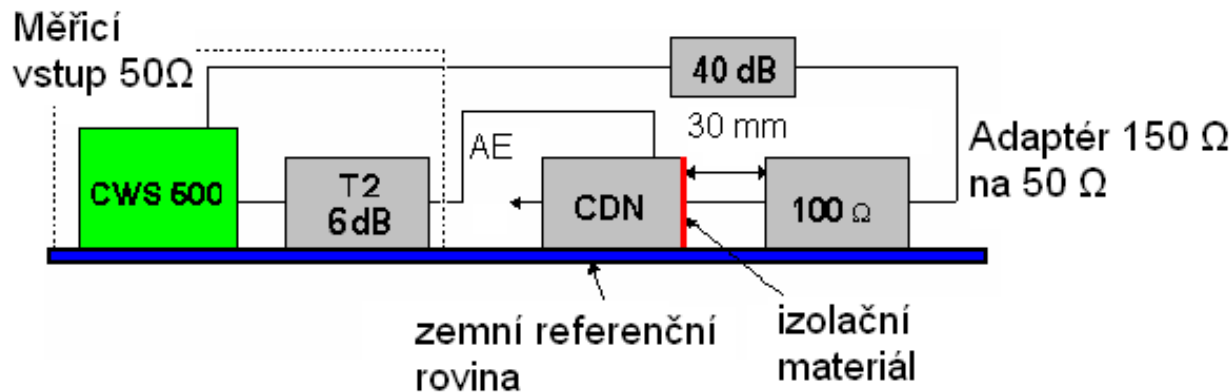
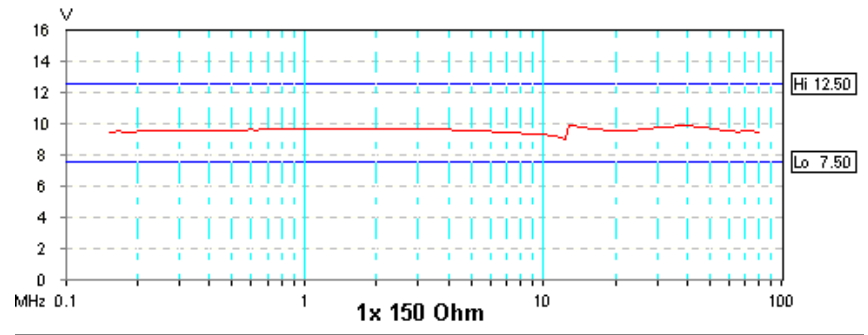
150 kHz – 230 MHz

$L_2 = L_3 = 6 \text{ mH}$



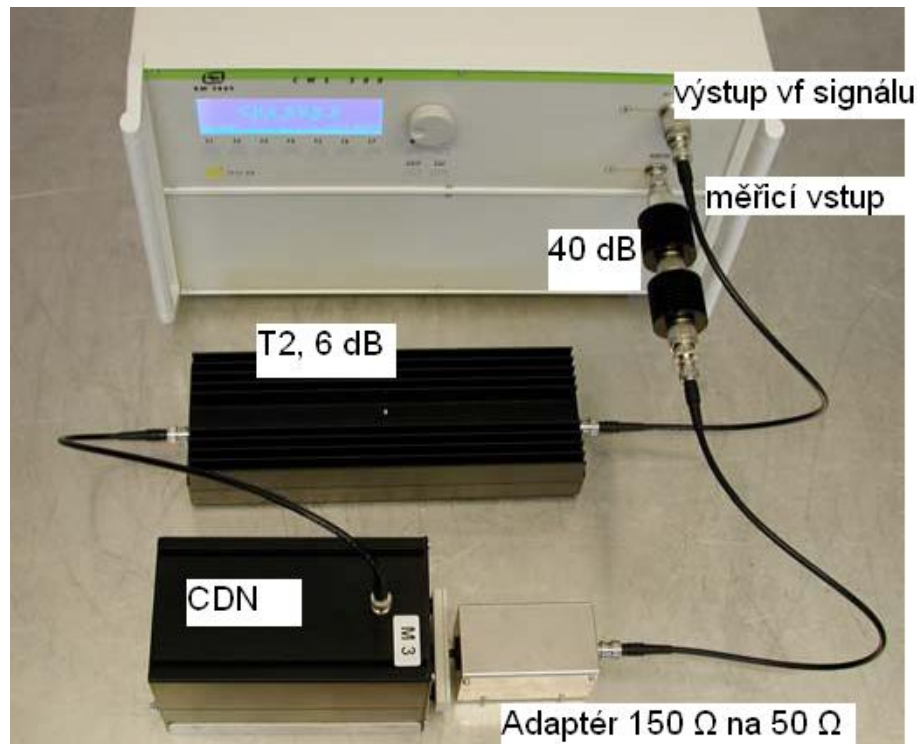
Kalibrace indukovaného vf napětí

- **Nastavení výstupní úrovně vstupu/výstupu vazebního prostředku u EUT:**
- cílem je kalibrace konkrétní sestavy generátoru a vazebního prostředku, která zajistí, že na EUT bude aplikován signál požadované úrovně v celém frekvenčním rozsahu
- referenční křivka umožní, aby byla úroveň signálu doladěna podle parametrů přenosové cesty na dané frekvenci

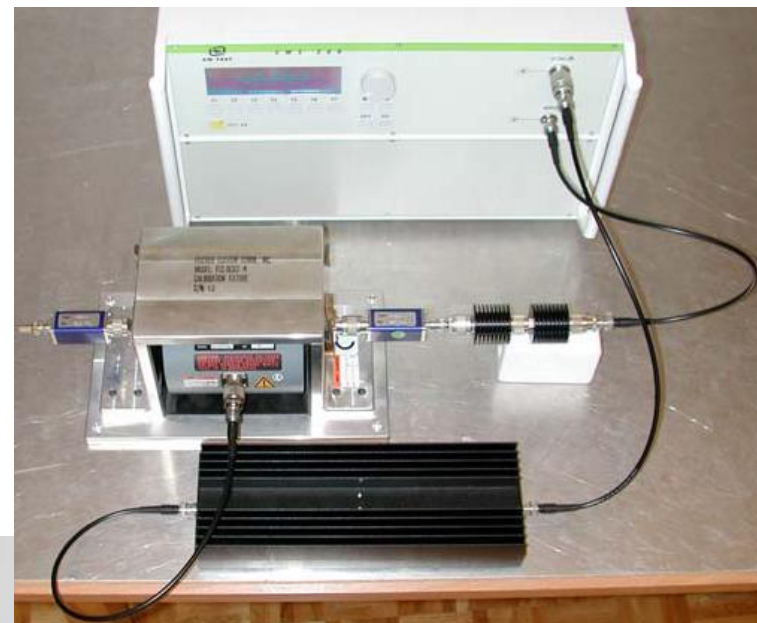


Kalibrace indukovaného vf napětí

- Příklady kalibračních sestav pro CDN, BCI:



Kalibrace CDN

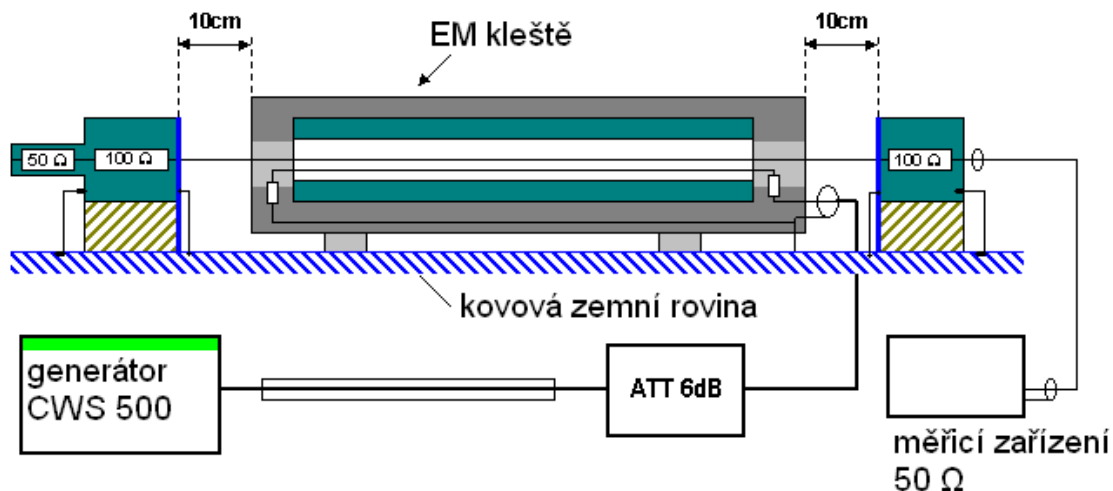


Kalibrace s BCI

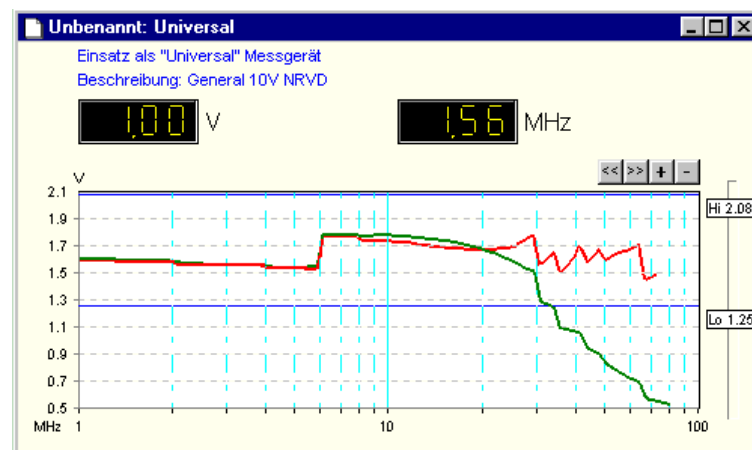


Kalibrace indukovaného vf napětí

Kalibrační sestava pro EM kleště:

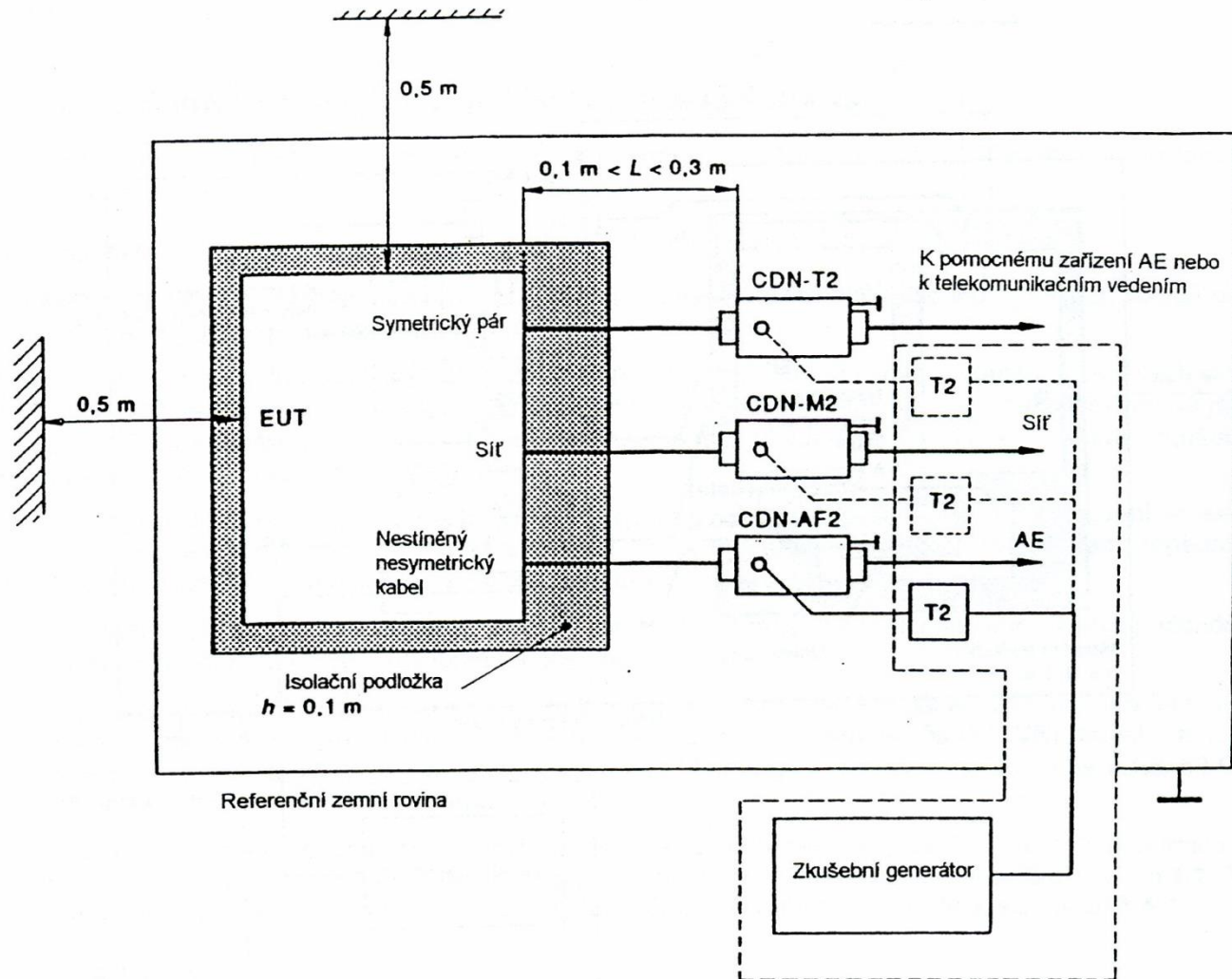


Pozn.: EUT port EM kleští musí být umístěn na straně měřicího zařízení. Pak má kalibrační křivka červený průběh. Jinak dochází k redukci signálu na vyšších frekvencích (zelená křivka).



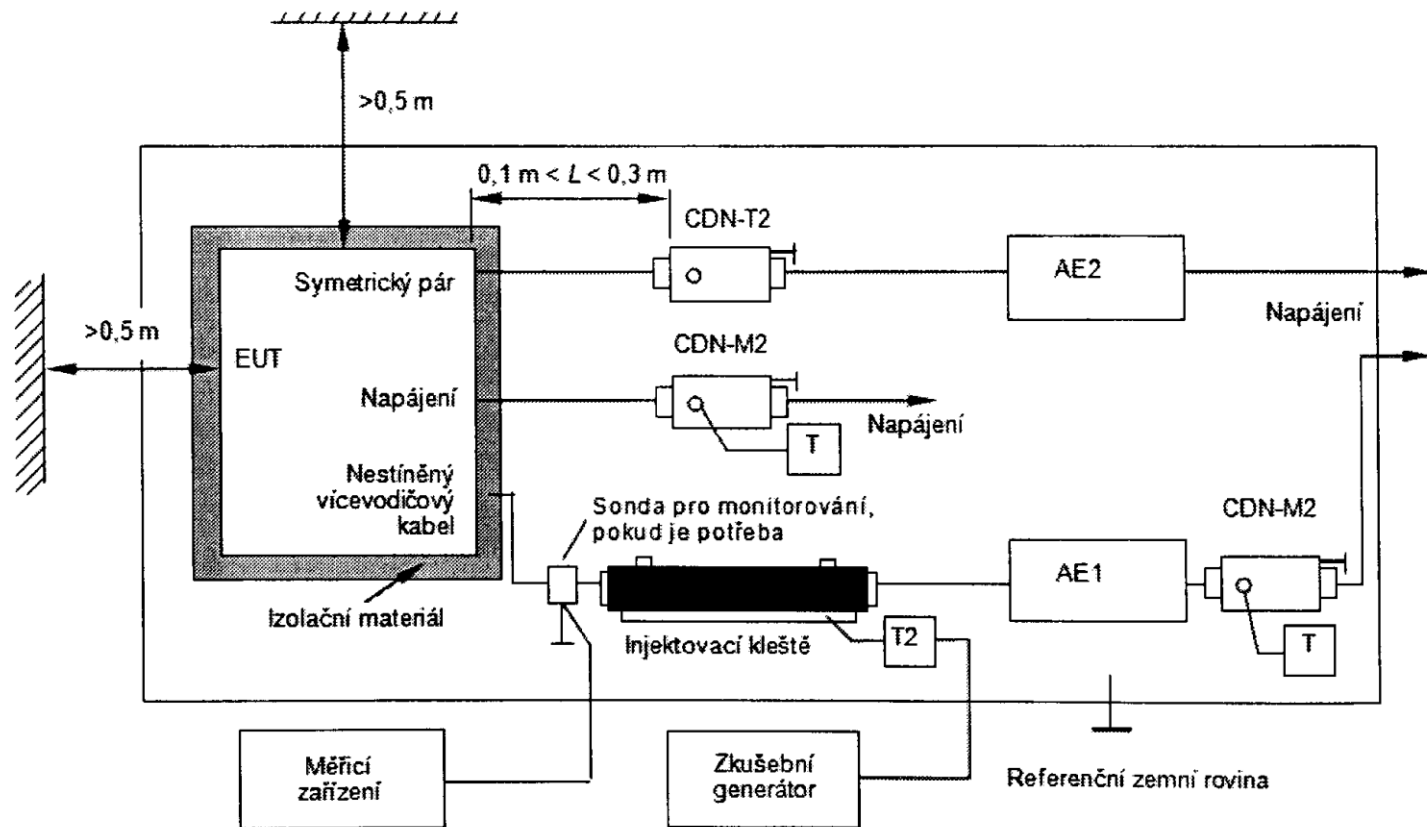
Indukované vf napětí

Příklad zkušební sestavy:



Indukované vf napětí

Zkušební sestava pro injektování kleštěmi:

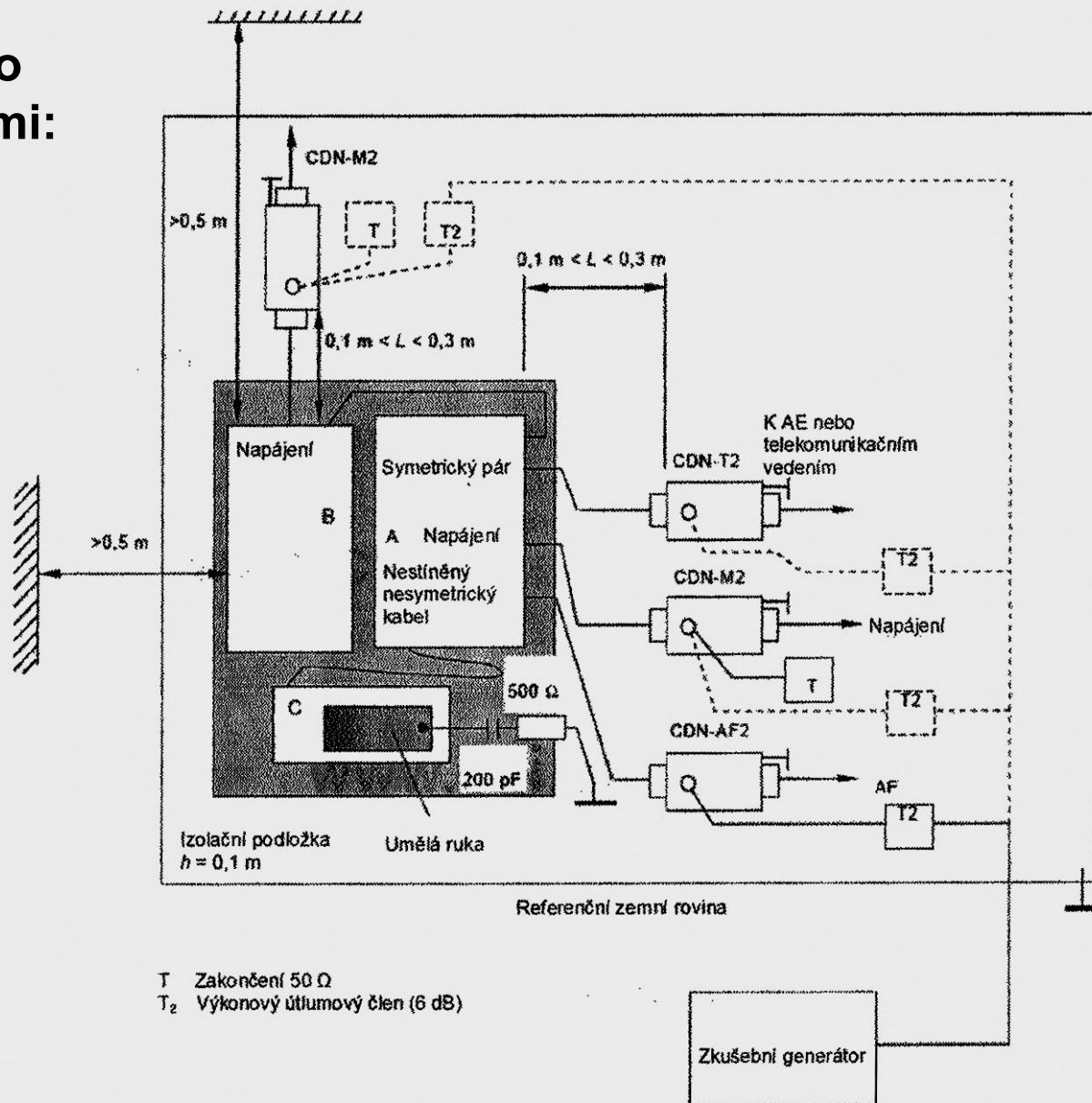


T Zakončení 50 Ω

T₂ Výkonový útlumový člen (6 dB)

Indukované vf napětí

Zkušební sestava pro
EUT s více jednotkami:



Indukované vf napětí

Zkušební sestava:

- zkoušené zařízení se umístí na izolační podložku 0,1 m nad referenční zemní rovinu
- kabely vycházející z EUT se podepřou ve výšce 30 mm nad zemní rovinou
- EUT je uzemněno v souladu s návodem výrobce a včetně vybraných kabelů instalováno a provozováno způsobem odpovídajícím typické aplikaci
- pokud je AE nad zemní rovinou, umístí se 0,1 m nad zemní rovinu na izolační podložku
- jedna CDN se připojí ke zkoušenému vstupu/výstupu a jedna CDN připojená k dalšímu vstupu/výstupu se zakončí 50 Ω , ostatní vstupy/výstupy jsou opatřeny nezakončenými CDN ve funkci oddělovacích sítí
- zkouška se musí provést s generátorem připojeným střídavě ke každému vazebnímu prostředku
- nezkoušené kabely se musí buď odpojit (pokud je to z funkčních důvodů možné) nebo opatřit nezakončenými CDN
- během zkoušky je vyšetřována plná funkce zkoušeného zařízení

Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - zkouška odolnosti

ČSN EN 61000-4-3

Vyzařované vf pole

- obrovský rozmach sítí pozemních i družicových rozhlasových a TV vysílačů a zejména mohutný celosvětový rozvoj systémů mobilních radiokomunikačních služeb, radiotelefonů, občanských stanic pracujících na kmitočtech 0,8 GHz až 3 GHz, vedl k tomu, že výrazně v posledních letech nabývá na významu posuzování elektromagnetické odolnosti všech elektronických zařízení vůči vlivu rušivých elektromagnetických polí.
- Protože tyto systémy nelze vypnout a nelze tedy ani odstranit jejich rušivé působení na jiná zařízení, je jedinou cestou zvyšovat elektromagnetickou odolnost elektronických zařízení vůči vf. polím, s nimiž tyto systémy pracují.

Vyzařované vf pole

- **Vysokofrekvenční** neboli **rádiové rušení** leží podle Radiokomunikačního řádu v pásmu od 10 kHz do 400 GHz. Ke zdrojům rádiového rušení patří prakticky všechny existující interferenční zdroje, neboť jejich rušivé signály sahají prakticky vždy až do těchto kmitočtových oblastí.
- Harmonická elektromagnetická pole o "nízkých" kmitočtech 10kHz-230Mhz se přivádějí do zkoušeného zařízení pomocí vazebních obvodů kapacitního či induktivního charakteru, případně jsou injektována do přívodních kabelů pomocí kapacitních kleští, viz ČSN EN 61000-4-6.
- na kmitočtech vyšších než 26 MHz se nicméně dává přednost simulaci rušivých elektromagnetických polí vyzařováním anténami - tyto zkoušky odolnosti v nejčastěji využívaném kmitočtovém rozsahu 80 MHz až 2000 MHz popisuje česká norma ČSN EN 61000-4-3.

Vyzařované vf pole

Zkušební úrovně vztahující se na všeobecné účely

Kmitočtové pásmo: 80 MHz - 1000 MHz	
Úroveň	Intenzita zkušebního pole V/m
1	1
2	3
3	10
x	zvláštní

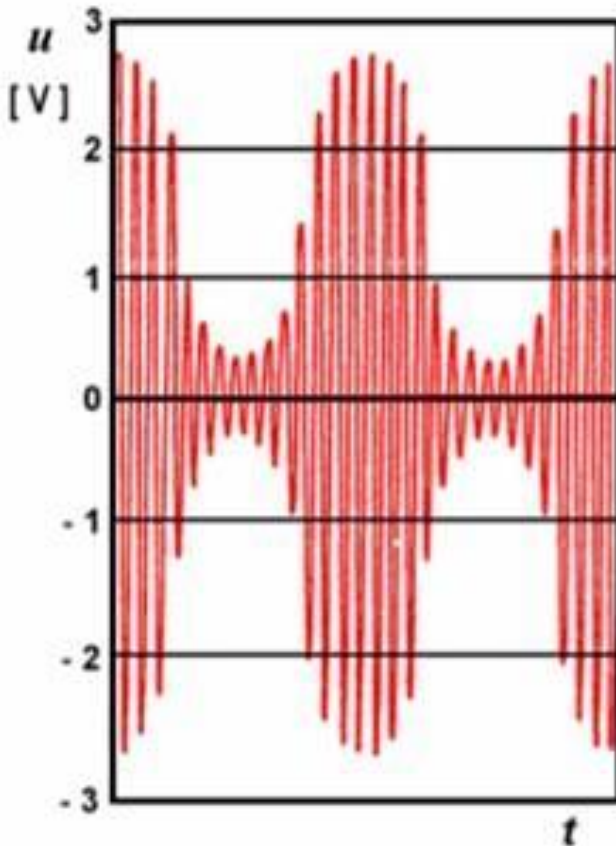
Zkušební úrovně týkající se ochrany před vf. vyzařováním z digitálních radiotelefonů

Kmitočtová pásma: 800 MHz - 960 MHz a 1,4 GHz - 2,0 GHz	
Úroveň	Intenzita zkušebního pole V/m
1	1
2	3
3	10
4	30
x	zvláštní

- úrovně odpovídají efektivním hodnotám intenzity pole harmonického nemodulovaného signálu

Vyzařované vf pole

Časový průběh zkušebního vf. signálu (zkušebního pole)



Pro zkoušku odolnosti je testovací signál amplitudově modulován do hloubky 80 % harmonickým napětím 1 kHz, aby bylo simulováno skutečné ohrožení. Amplitudová modulace vlnou 1 kHz je realizačně jednoduchá a univerzální.

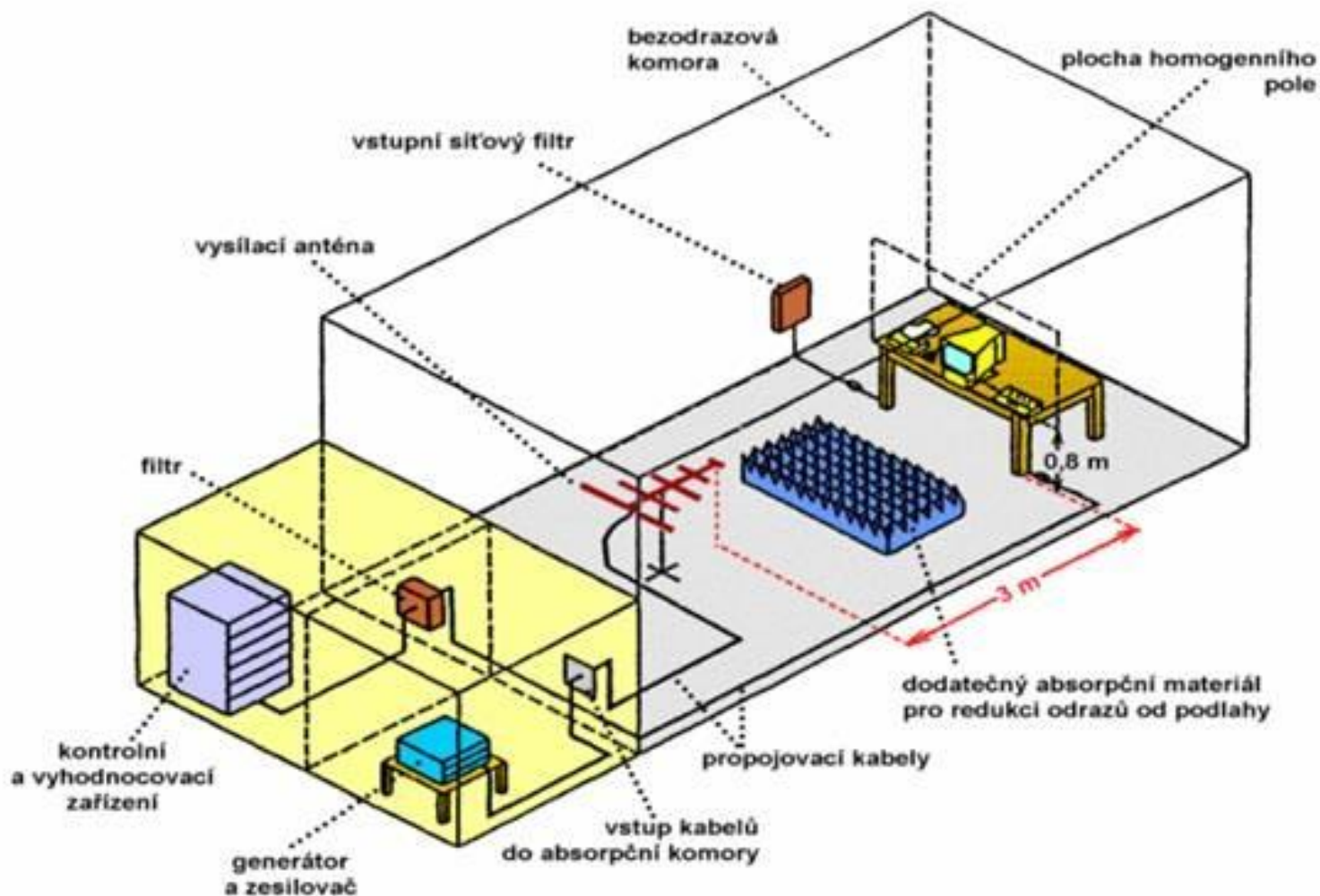
- zvolený typ modulace plně vyhovuje pro posouzení odolnosti zařízení i vůči jiným rušivým vf. signálům, např. s pulzní amplitudovou modulací, PCM a dalšími typy.

Vyzařované vf pole

- Základním principem zkoušek odolnosti vůči vyzařovanému vf. elektromagnetickému poli je ozařování zkoušeného objektu příslušnými úrovněmi pole pomocí vhodných antén.
- Protože potřebná intenzita buzených zkušebních polí dosahuje až několika desítek V/m při kmitočtech sahajících do oblasti GHz pásem, provádí se měření přednostně ve stíněných absorpčních prostorech.
 - odstranění vlivu vnějších polí na zkoušený objekt,
 - ochrana obsluhujícího personálu a blízkých elektronických měřicích a vyhodnocovacích zařízení před vlivem silného vf. zkušebního signálu,
 - měřicí a vyhodnocovací zařízení se umísťují do samostatné elektromagneticky stíněné místnosti.

Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti proti vf. vyzařovanému poli

(absorpční obložení stropu a stěn není naznačeno)



Základní technické a přístrojové vybavení

- **Vysokofrekvenční generátor** pokrývající žádané kmitočtové pásmo s možností amplitudové modulace sinusovou vlnou 1 kHz do hloubky 80 %. Generátor je vybaven ručním a automatickým laděním (rozmítáním kmitočtu) přes celé pracovní kmitočtové pásmo s rychlostí $1,5 \cdot 10^{-3}$ dekády/s nebo nižší. Výstup generátoru může být opatřen filtrem typu dolní, příp. pásmová propust pro potlačení vyšších harmonických složek generovaného signálu.
- **Širokopásmový výkonový zesilovač** k dosažení patřičného výkonu zkušebního signálu.



Antény

- **Vysílací směrová anténa**, příp. několik antén vyzařujících zkušební elektromagnetickou vlnu. Lze použít všechny antény používané k měření rušivých polí s přihlédnutím k jejich výkonové zatížitelnosti, tj. schopnosti vyzářit vysoký výkon k dosažení předepsané úrovně pole v místě zkoušeného objektu. Obvyklými typy jsou **bikónická** a **logaritmicko-periodická** anténa, příp. jiné typy antén s lineární polarizací.



Bikónická anténa

(20 - 300 MHz)



Logaritmicko-periodická anténa

(200 – 3000 MHz)

Vyzařované vf pole

- **Elektrické filtry** zapojené ve všech vstupech a výstupech kabelů a vedení do zkušební komory.
- **Pomocná zařízení** ke kontrole a vyhodnocování funkčnosti zkoušeného zařízení, příp. k zajištění dalších funkcí během zkoušky. Tato zařízení jsou umístěna vně absorpční stíněné komory a do jejího vnitřního prostoru bývají navázána pomocí optočlenů či optických kabelů.
- **Sonda intenzity pole** generovaného v prostoru bezodrazové komory – nutná ke kalibraci měřicího systému a k ověření homogenity pole (kalibrace pole).
- **Pomocná zařízení k měření úrovní výkonu** nezbytných pro požadovanou intenzitu pole.
- **Bezodrazová komora** o takové velikosti, aby bylo ve zkušebním prostoru uniformní pole dostatečné intenzity. Pro utlumení odrazů v komorách, které nejsou úplně obloženy absorbéry, mohou být použity dodatečné absorbéry.

Anténní faktor AF

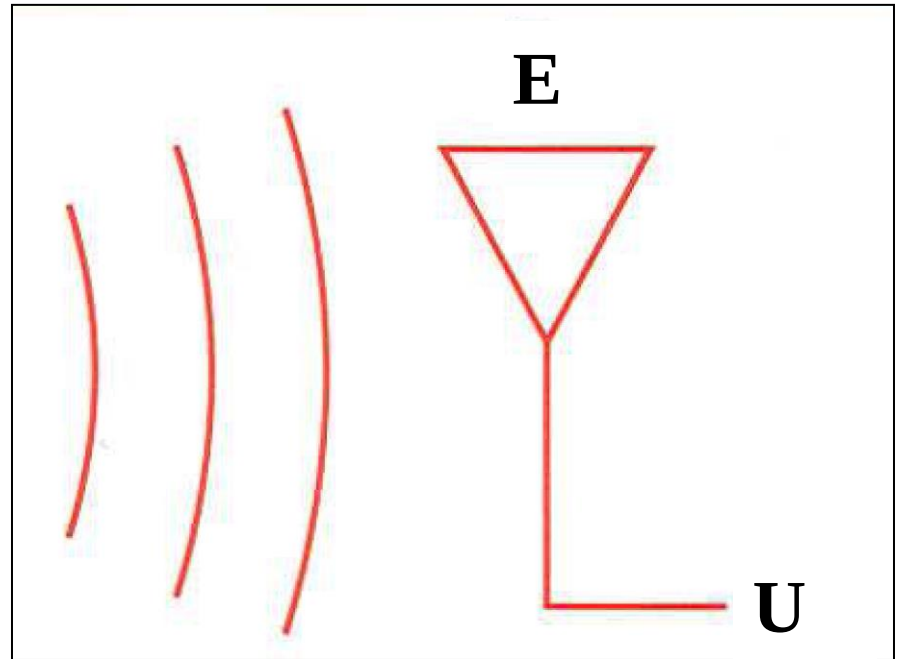
Tento parametr měřících (přijímacích) EMC antén uvádí ve vztah výstupní napětí měřicí antény **U** s intenzitou pole v místě antény **E** produkující uvedené napětí na připojené zátěži antény.

$$AF_{(1/m)} = \frac{E_{(V/m)}}{U_{(V)}}$$

Vyjádřeno pomocí dB (decibel):

$$AF_{dB(m^{-1})} = 20 \log \left(\frac{E}{U} \right)$$

$$AF_{dB(m^{-1})} = E_{dB(V/m)} - U_{dB(V)}$$



- anténní faktor typicky roste s rostoucí frekvencí

Vysílací anténní faktor TAF

Tento parametr charakterizuje vysílací schopnosti EMC antén a uvádí ve vztah intenzitu pole **E** generovaného anténou v dané vzdálenosti **d** se vstupním napětím **U_{in}** na vstupu antény.

$$E_{dB(V/m)} = U_{in(dBV)} + TAF_{(dBm^{-1})}$$

TAF je vypočítán ze zisku G_{dB} nebo přijímacího faktoru $AF_{dB(1/m)}$ antény:

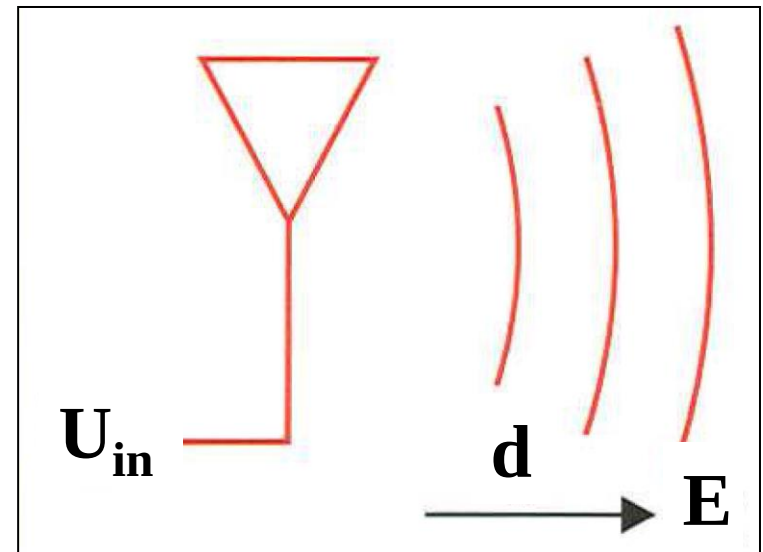
$$TAF_{(dBm^{-1})} = G_{dB} - 2.22 - 20 \log_{10}(d_m)$$

Zisk antény G_{dB} :

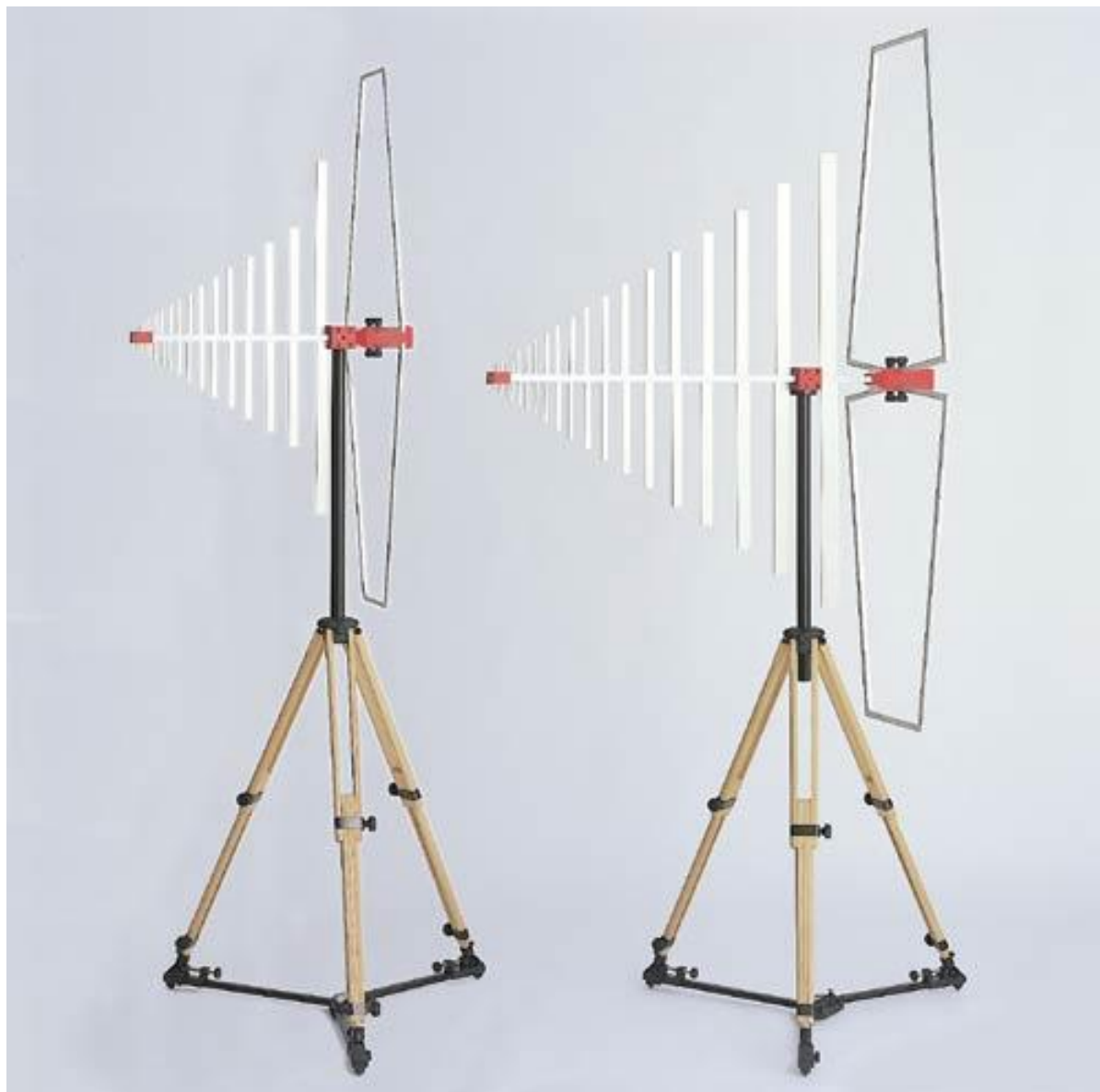
$$G_{dB} = 20 \log_{10}(f_{MHz}) - AF_{dB(m^{-1})} - 29,79$$

Po dosazení za G_{dB} :

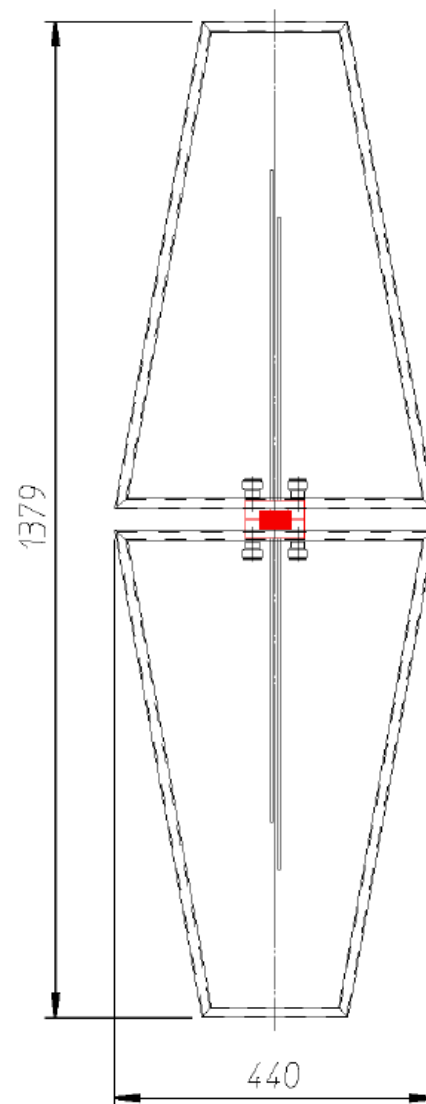
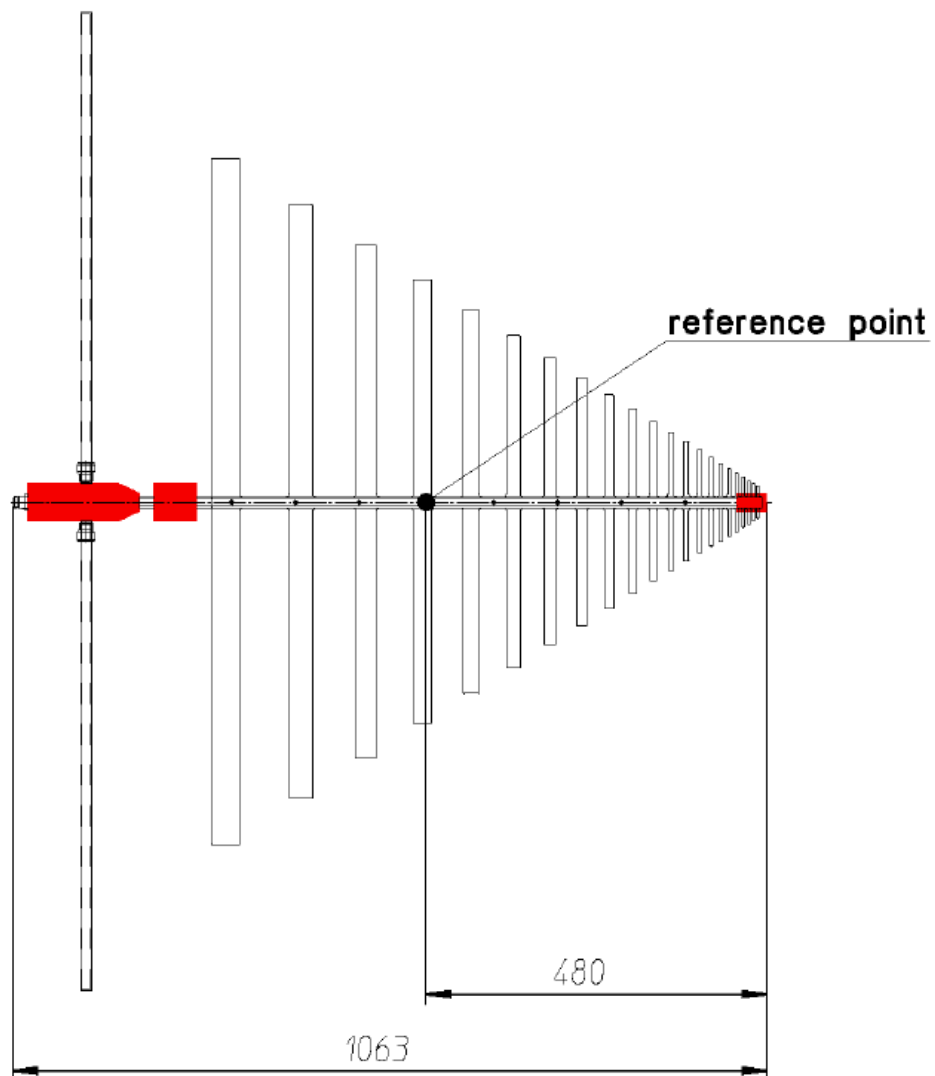
$$TAF_{(dBm^{-1})} = 20 \log(f_{MHz}) - AF_{dBm^{-1}} - 32.0 - 20 \log_{10}(d_m)$$



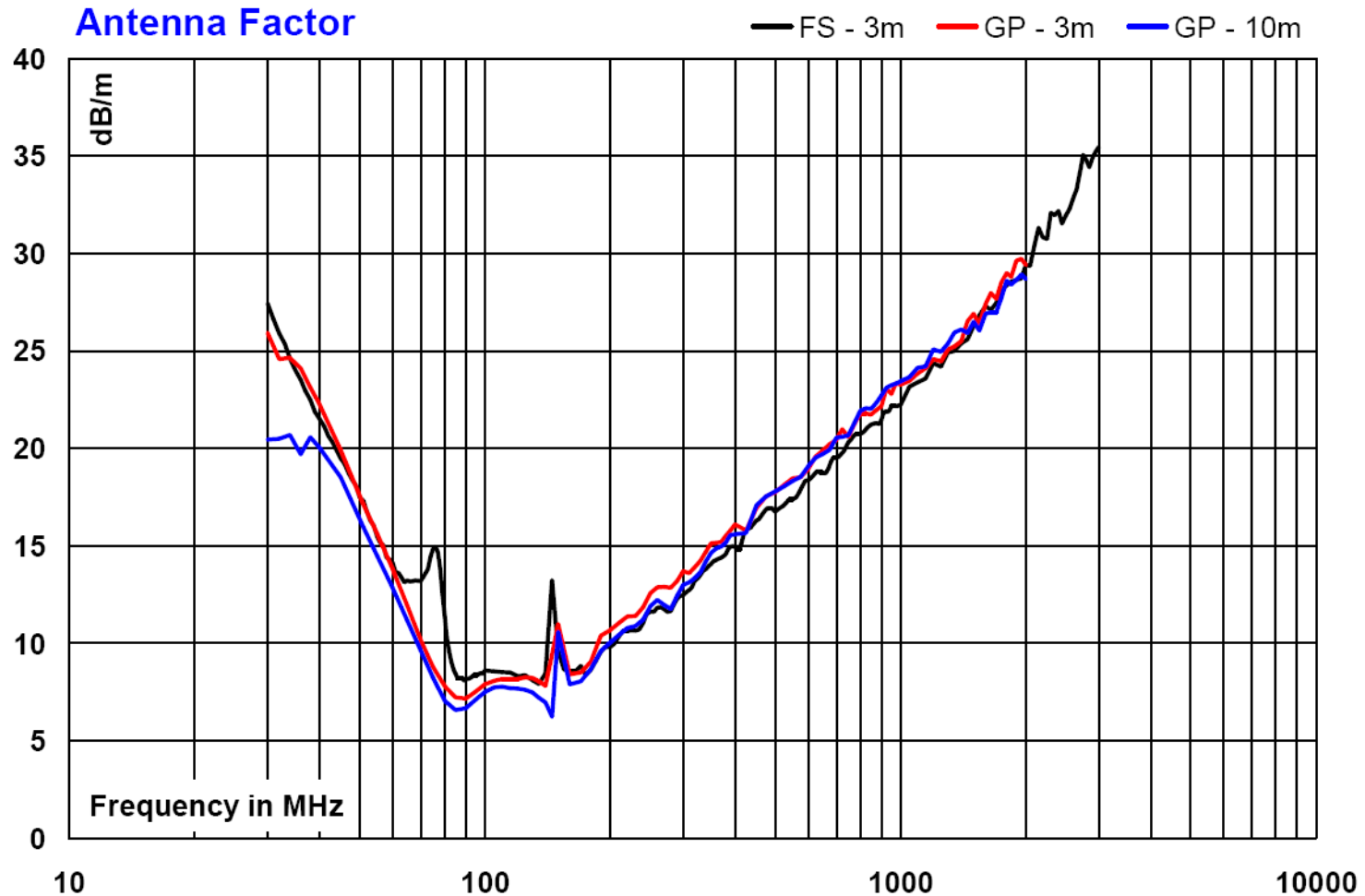
Složená širokopásmová anténa BiLog



Ultraširokopásmová anténa BTA – M, 30 MHz – 3 GHz



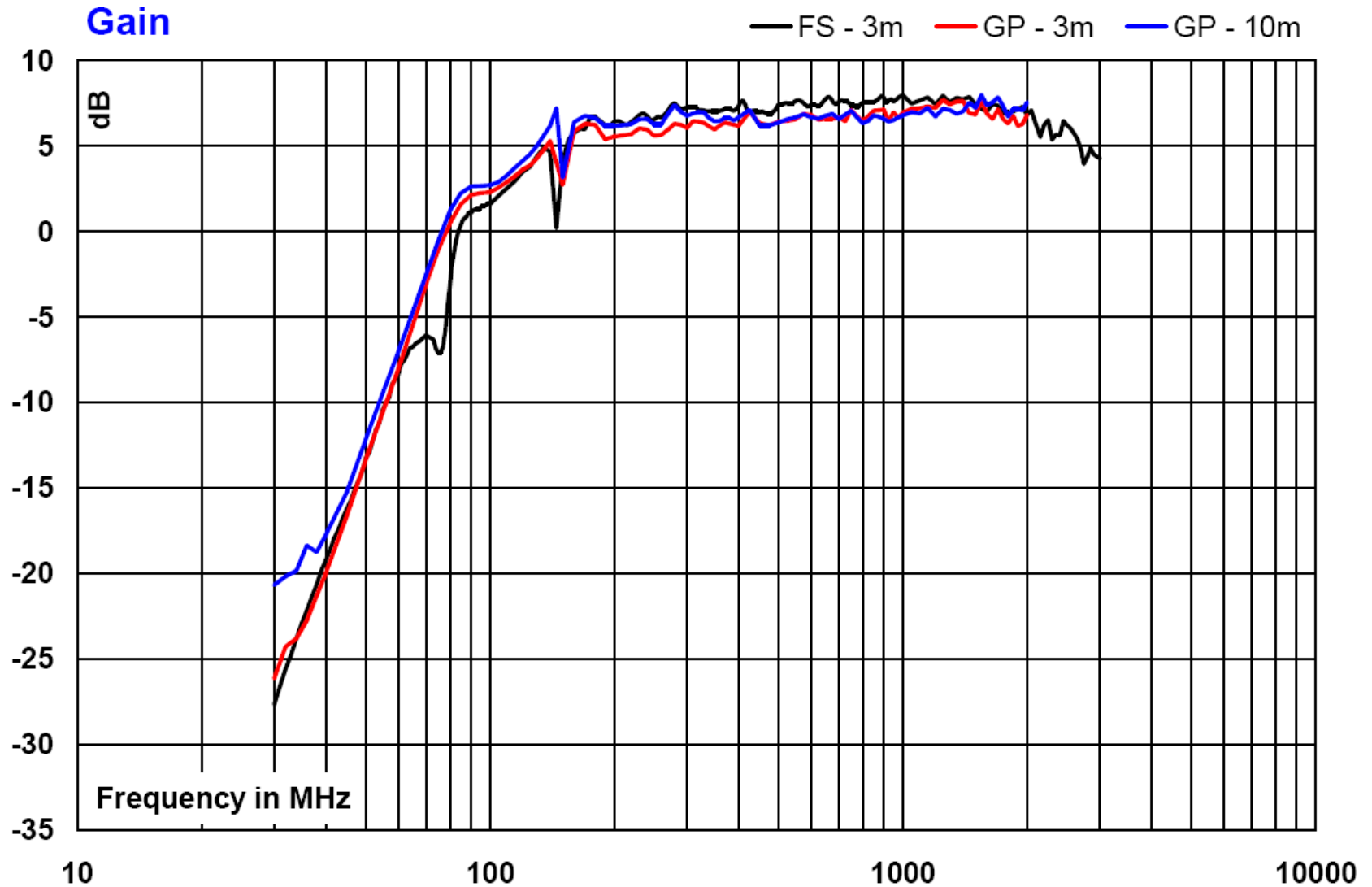
Ultraširokopásmová anténa BTA – M, 30 MHz – 3 GHz



FS = Free-space conditions

GP = over Ground-plane

Ultraširokopásmová anténa BTA – M, 30 MHz – 3 GHz



Potřebný budicí výkon vysílací antény pro dosažení požadovaných vysokých hodnot intenzity zkušebního elektrického pole:

$$P_V [\text{dBW}] = 20 \cdot \log E [\text{V/m}] + 20 \cdot \log r [\text{m}] - 20 \cdot \log f [\text{MHz}] + AF_{VA} [\text{dB/m}] + 15$$

- r - vzdálenost vysílací antény od zkoušeného objektu,
- E - zkušební intenzita elektrického pole v místě objektu,
- f - kmitočet vyzařovaného signálu,
- AF_{VA} - anténní faktor vysílací antény.

Příklad: Zařízení je podrobena zkoušce odolnosti vůči vyzařovanému poli o kmitočtu $f = 100$ MHz až do intenzity $E = 10$ V/m. Anténní faktor použité vysílací antény na daném kmitočtu je $AF_{VA} = 24$ dB/m, vzdálenost antény od zkoušeného zařízení je $r = 3$ m. Potřebný výkon budicího signálu je

$$P_V [\text{dBW}] = 20 \cdot \log 10 + 20 \cdot \log 3 - 20 \cdot \log 100 + 24 + 15 = 28,54 \text{ dBW} ,$$

tedy 714,5 W. Při amplitudové modulaci zkušebního signálu do hloubky $m = 80$ %, bude potřebný budicí výkon

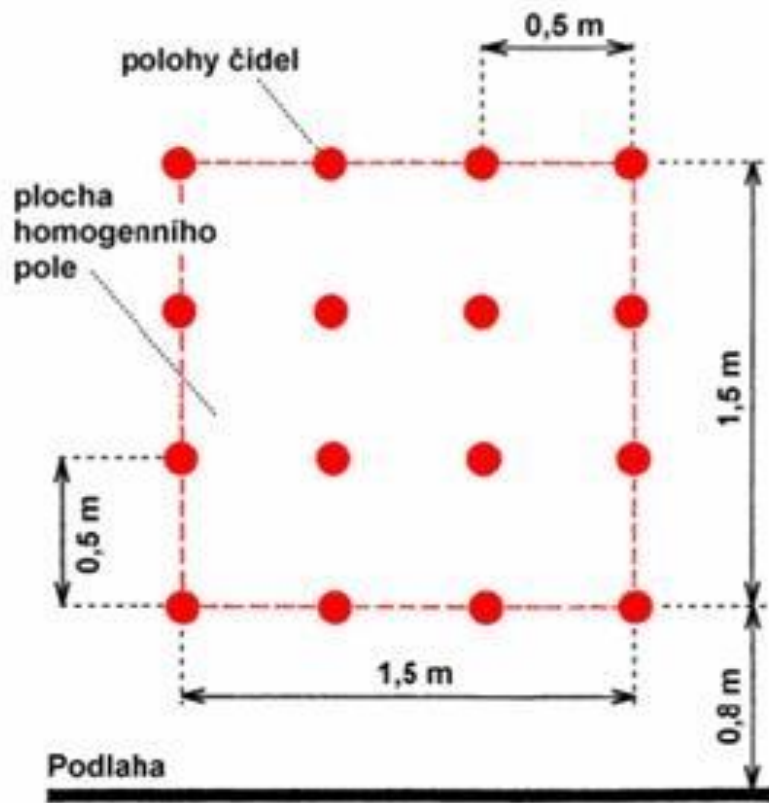
$$P_{V_{\text{mod}}} = (1 + m)^2 \cdot P_V = 1,8^2 \cdot 714,5 = 2315 \text{ W} .$$

Kalibrace (ověření homogenity) pole

- Pro dosažení správných a reprodukovatelných výsledků zkoušek odolnosti je nutno zajistit, aby intenzita zkušebního elektrického pole v celém objemu zkoušeného objektu měla normou danou konstantní velikost, a to v celém pracovním kmitočtovém pásmu.
- Ke splnění tohoto požadavku je nutno příslušnou zkušebnu, příp. simulované zkušební pole před vlastní zkouškou nejprve kalibrovat.
- kalibrace se provádí nemodulovaným harmonickým signálem, a to měřením velikosti generovaného pole v tzv. **ploše homogenního pole**.
- Při kalibraci je tato plocha (bez zkoušeného zařízení) ozařována vysílací anténou a malou, nejlépe všesměrovou přijímací anténou (senzorem neboli čidlem pole) je měřena intenzita pole v 16 měřicích bodech plochy

Plocha homogenního pole

- pomyslná vertikální plocha o velikosti 1,5 x 1,5 m ve výšce 0,8 m nad podlahou



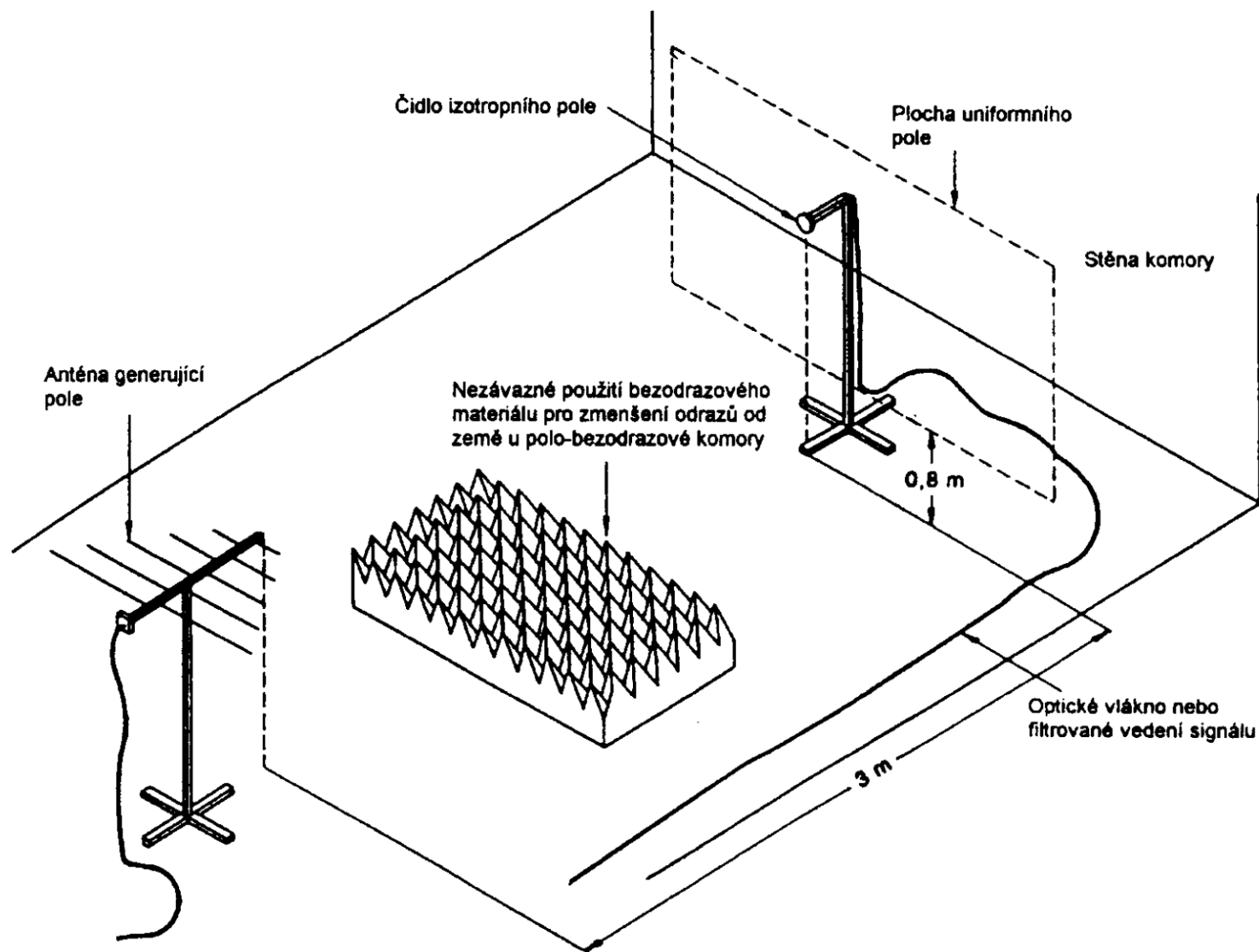
Pole v této ploše je považováno za homogenní, kolísá-li jeho měřená velikost o méně než 3 dB na 75 % plochy, tj. aspoň ve 12 z celkových 16 měřicích bodů.

Vysokofrekvenční výkon $P_{V\text{ kal}}$ dodávaný do vysílací antény je při kalibraci udržován na konstantní hodnotě, při níž je měřená kalibrační intenzita pole E_{kal} v ploše homogenního pole mezi 3 a 10 V/m.

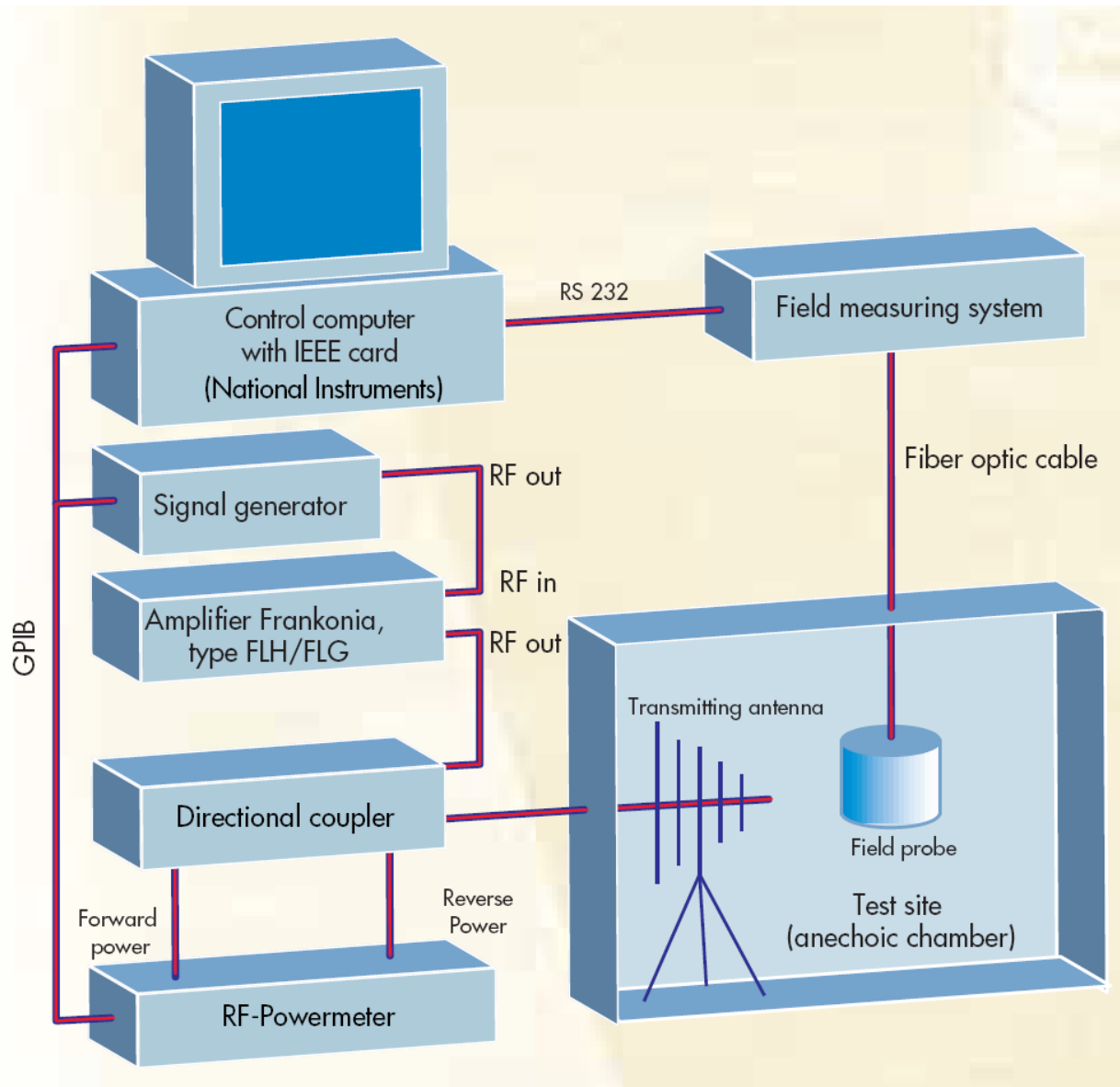
Ze známého výkonu $P_{V\text{ kal}}$ a měřené intenzity E_{kal} můžeme určit potřebný výkon generátoru P_V k dosažení požadované intenzity pole E_n (1, 3 či 10 V/m):

$$P_V = P_{V\text{ kal}} \cdot \left(\frac{E_n}{E_{\text{kal}}} \right)^2$$

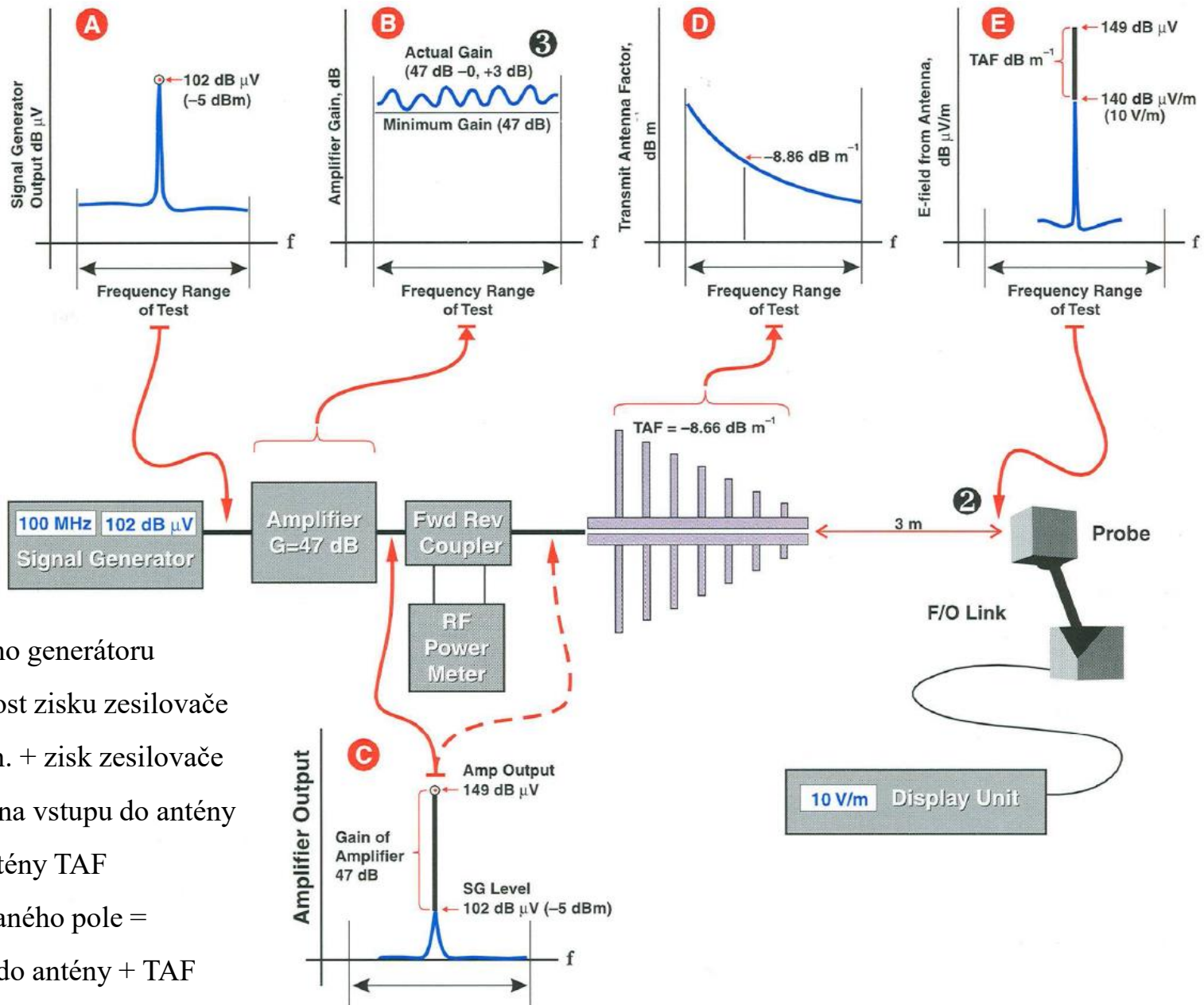
Kalibrace pole – ověření homogenity pole



Kalibrační (referenční) měření testovací sestavy



Blokový diagram typické sestavy pro test imunity



A výstup signálového generátoru

B frekvenční závislost zisku zesilovače

C výstup signál. gen. + zisk zesilovače
= úroveň signálu na vstupu do antény

D vysílací faktor antény TAF

E intenzita vyzařovaného pole =
= vstupní signál do antény + TAF

Grafické zobrazení úrovně testovacího signálu

1 Požadovaná intenzita pole

$10\text{V/m}(=20\text{dBV/m}=140\text{dBmV/m})$

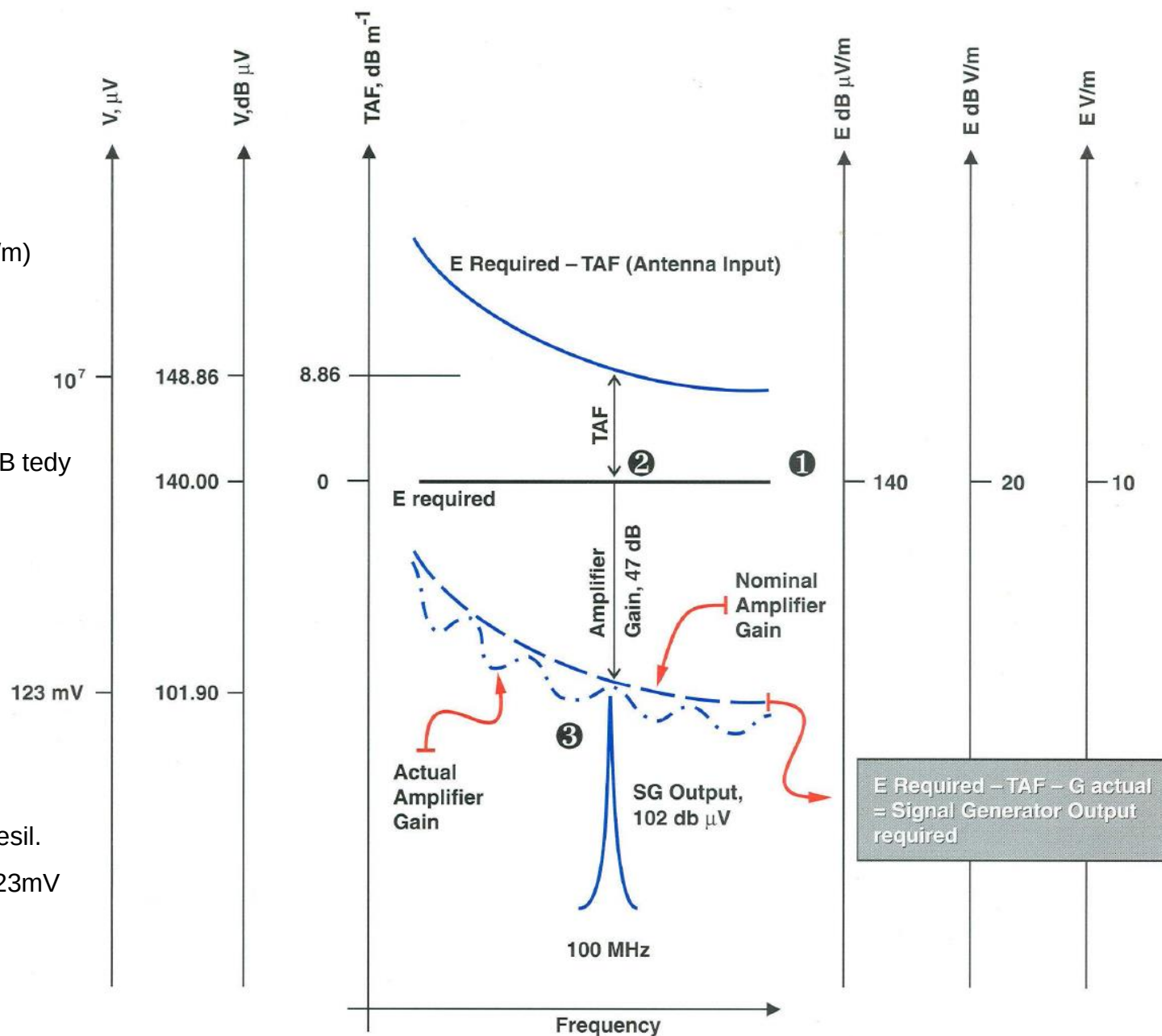
2 Na 100Mhz je TAF = -8,66dB tedy U_{in} vstupní do antény bude:

$140 - (-8,86) = 148,86\text{ dBmV}$

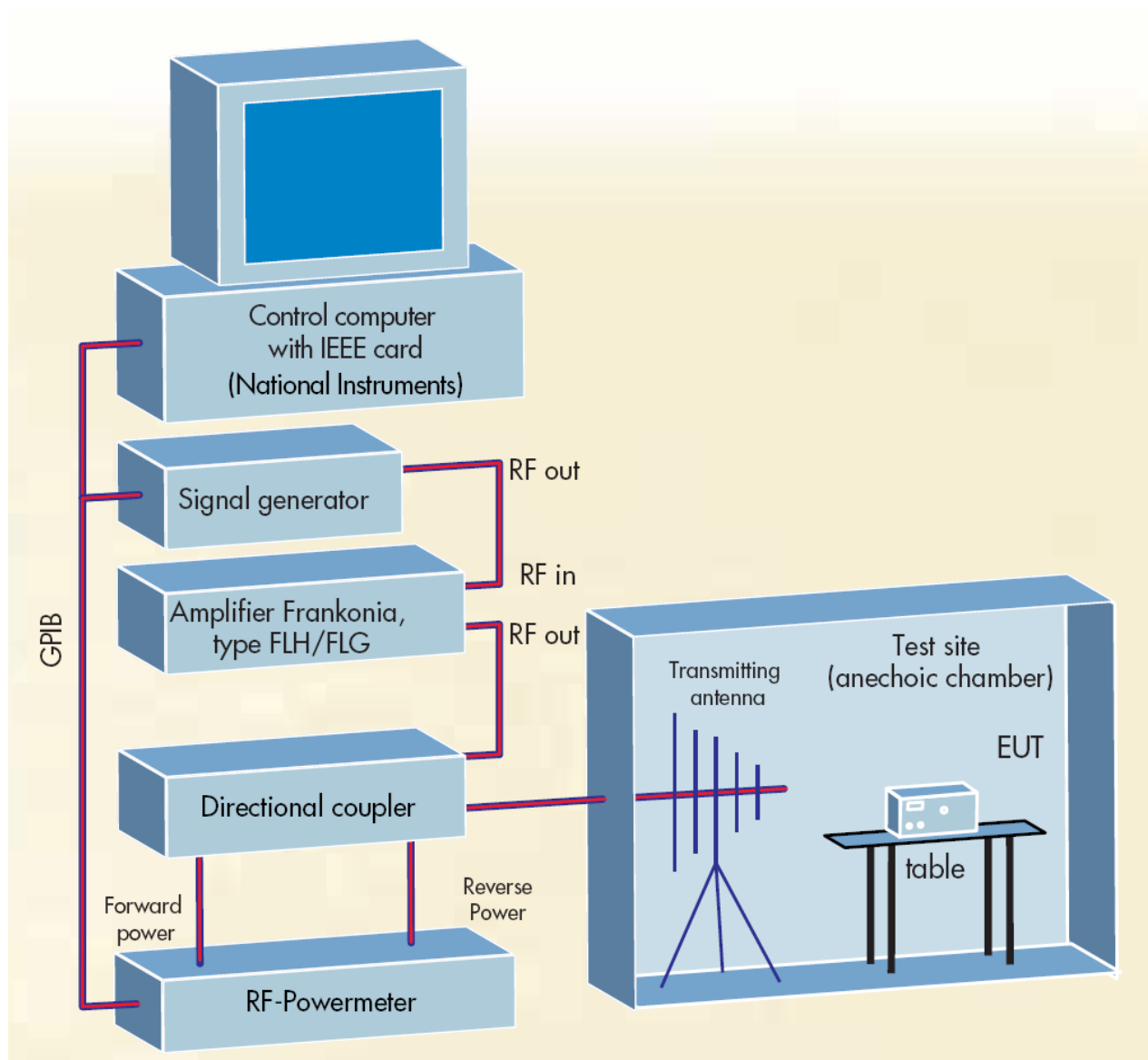
3 Pro 100Mhz na výstupu signálového generátoru bude:

Vstupní U_{in} do antény - zisk zesil.

$= 148,86 - 47 = 101,86\text{ dBmV} = 123\text{mV}$



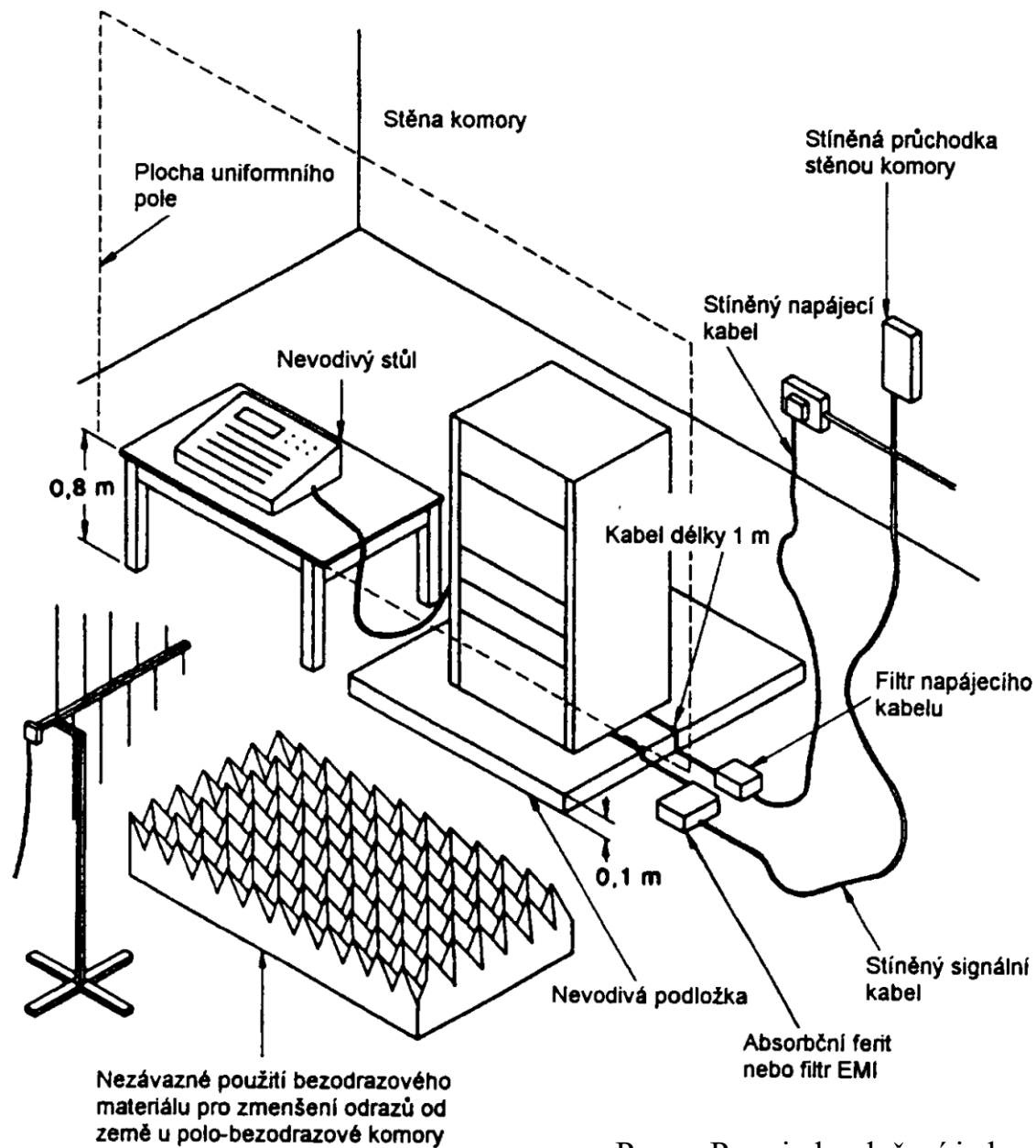
Zkušební sestava při testu odolnosti proti vf. rušení



Vyzařované vf pole

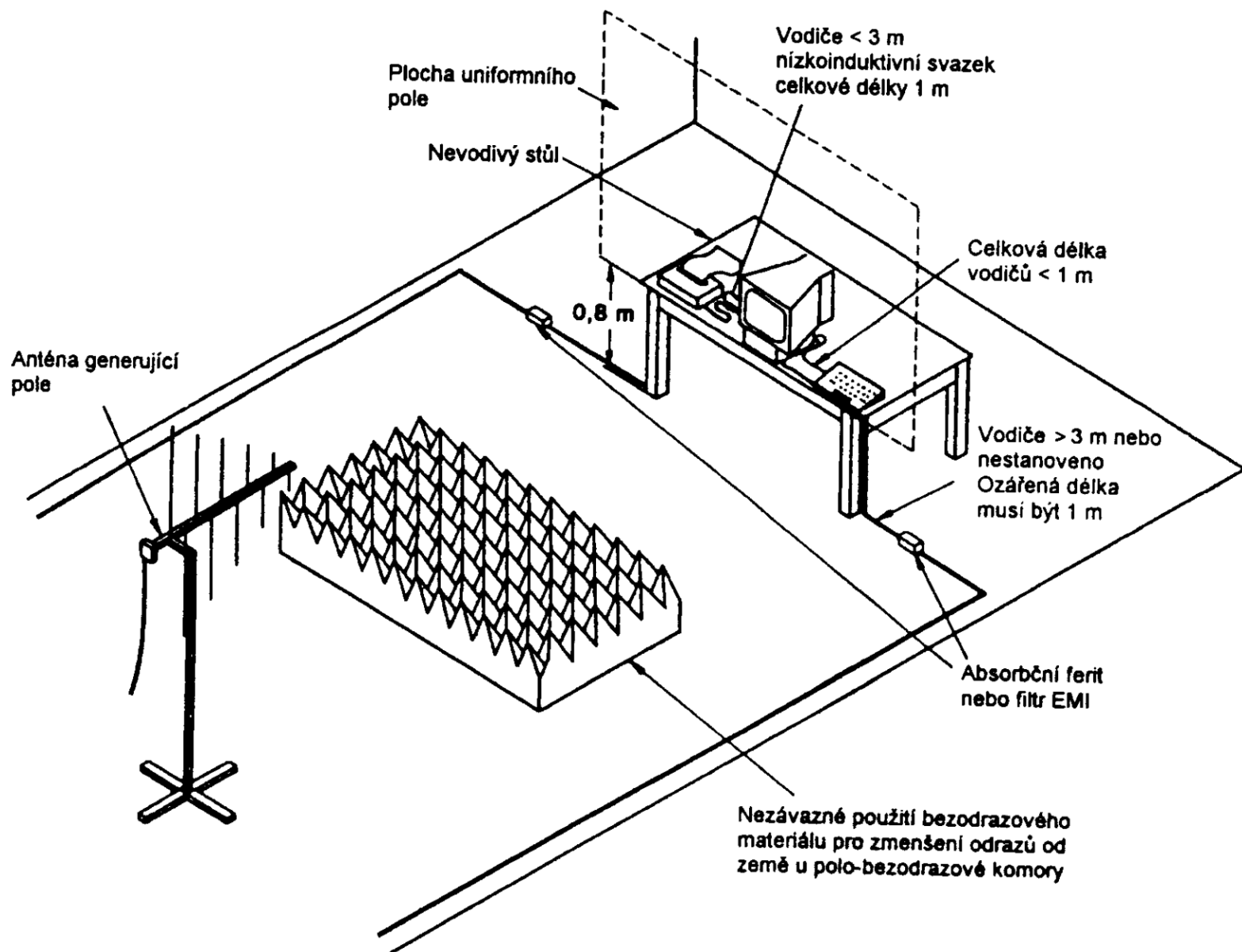
- Při zkoušce odolnosti se zkoušené zařízení umísťuje tak, aby jeho čelní stěna byla umístěna v kalibrované ploše homogenního pole, přičemž se takto postupně vystřídají všechny čtyři strany zařízení, a to při obou polarizacích testovacího pole.
- Je-li plocha některé čelní stěny zařízení větší než kalibrovaná plocha homogenního pole 1,5 x 1,5 m, je nutno uskutečnit řadu zkoušek odolnosti postupným ozařováním dílčích částí čelní plochy nepřesahujících rozměry použité kalibrované plochy.
- Při zkoušce musí být použita stejná anténa, stejné kabely a celkově stejná úprava zkušebny jako při její předchozí kalibraci. I malá přemístění antén, spojovacích kabelů a dalších částí uvnitř zkušebního prostoru mohou mít značný vliv na rozložení elektromagnetického pole ve zkušebně a tím i na výsledky zkoušek odolnosti.

Příklad zkušební sestavy pro zařízení stojící na podlaze

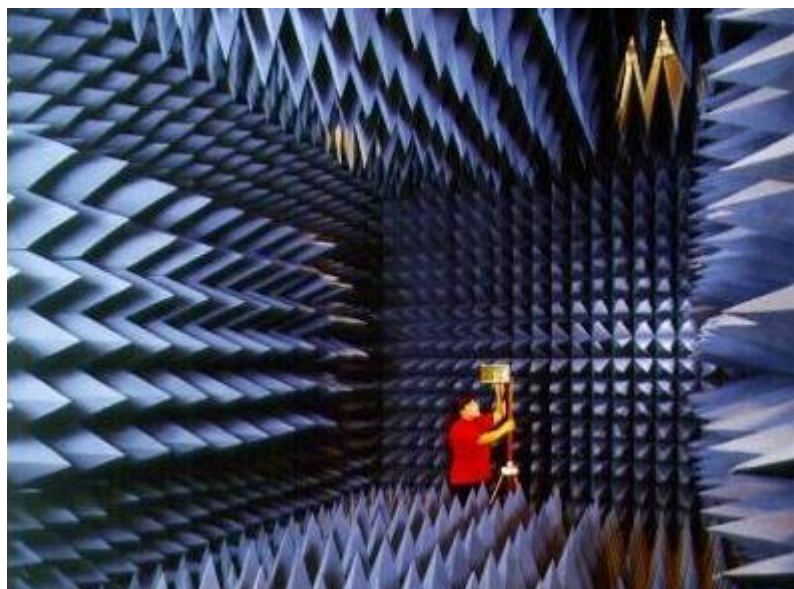


Pozn.: Pro zjednodušení je bezodrazové obložení stěn vynecháno.

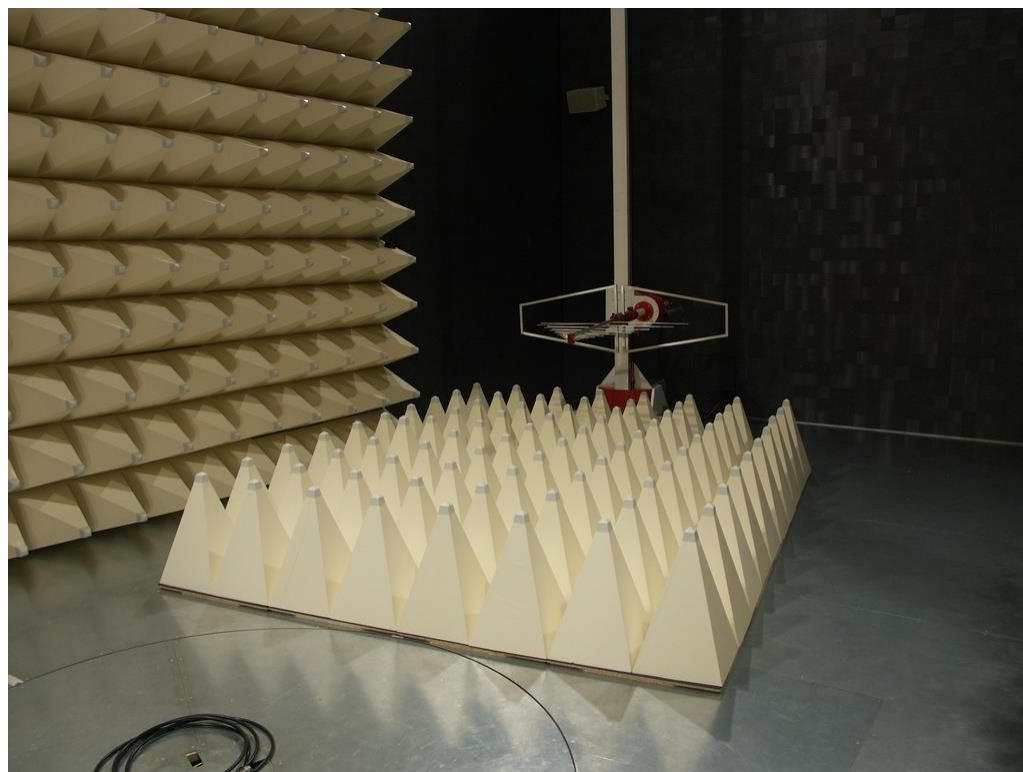
Příklad zkušební sestavy pro zařízení na stole



Bezodrazové absorpční komory



Interiér plně bezodrazové
komory



Interiér částečně
bezodrazové komory
FEL ZČU

