

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zdroje pro zkoušky vysokým napětím

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal MOŠNA**
Osobní číslo: **E14B0044P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Zdroje pro zkoušky vysokým napětím**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zpracujte přehled napájecích systémů používaných pro generování vysokého napětí při zkouškách zařízení.
2. Uveďte požadavky na parametry a vlastnosti těchto zdrojů s ohledem na platné normy pro zkoušky vysokým napětím.
3. Navrhněte vybavení vn zkušebního pracoviště.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá zdroji vysokého napětí. Práce obsahuje přehled vysokonapěťových zkušebních zdrojů pro generování napětí stejnosměrného, střídavého a impulsního spínacího a atmosférického. V každé kapitole je stručný přehled a popis základních zdrojů, které se v laboratořích používají. Sekce jsou obohaceny o obrázkové přílohy k lepšímu pochopení dané problematiky. Součástí práce jsou i požadavky, které předepisují normy pro zkoušky vysokým napětím. Poslední částí této práce je popis základního vybavení pro pracoviště vysokého napětí.

Klíčová slova

Zdroje pro zkoušky vysokým napětím, zkušební napěťový zdroj, normy pro zkoušky, usměrňovač, kaskáda, Greinacherova kaskáda, zkušební transformátor, rezonanční obvod, atmosférický impuls, spínací impuls, Marxův generátor, zkušební laboratoř

Abstract

This bachelor thesis deals with sources of high voltage. It contains summary of high voltage sources for voltage generation of direct, alternating, switching and lightning impulse voltage. In each chapter, there is a brief overview and description of basic sources which are used in the laboratories. Sections are enriched of pictured attachments for better understanding of this problematic. There are also requirements to be the part of this thesis, which give the standards for high voltage testing. The last part of this thesis is a description of basic equipment for high voltage laboratory.

Key words

Sources for high voltage testing, test voltage source, test standards, rectifier, cascade, Greinacher cascade, test transformer, resonant circuit, lightning impulse, switching impulse, Marx generator, testing laboratory

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za objasnění dané problematiky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	10
2 ZDROJE PRO ZKOUŠKY VYSOKÝM NAPĚTÍM	11
2.1 ZKUŠEBNÍ ZDROJE PRO STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ.....	12
2.1.1 Normy pro zkoušky stejnosměrným vysokým napětím	12
2.1.2 Jednocestný usměrňovač (jednofázový).....	13
2.1.3 Zdvojovače a násobiče.....	14
2.1.3.1 Greinacherova kaskáda.....	14
2.2 ZKUŠEBNÍ ZDROJE PRO STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ.....	17
2.2.1 Normy pro zkoušky střídavým vysokým napětím	17
2.2.2 Tank-type zkušební transformátory	18
2.2.3 Cylinder-type zkušební transformátory	19
2.2.4 Zkušební transformátorové kaskády.....	21
2.2.5 Střídavé vysokonapěťové systémy založené na rezonančních obvodech.....	22
2.2.5.1 Indukčně laděný rezonanční obvod s pevnou frekvencí (ACRL).....	25
2.2.5.2 Frekvenčně laděný rezonanční obvod s proměnnou frekvencí	22
2.3 ZKUŠEBNÍ ZDROJE PRO ATMOSFÉRICKÉ A SPÍNACÍ IMPULSNÍ NAPĚTÍ.....	29
2.3.1 Normy pro zkoušky atmosférickým impulsním vysokým napětím	29
2.3.2 Normy pro zkoušky spínacím impulsním vysokým napětím	31
2.3.3 Základní RC obvod	32
2.3.4 Vícestupňový impulsní generátor v Marxově zapojení	33
3 VYSOKONAPĚŤOVÉ ZKUŠEBNÍ PRACOVNÍŠTĚ	37
3.1 STRUČNÝ PŘEHLED TESTOVACÍCH KRITÉRIÍ	38
3.2 NÁVRH PRACOVNÍŠTĚ.....	40
4 ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	46

Seznam symbolů a zkratek

AC	Střídavé (např. napětí)
ACRL	Indukčně laděný rezonanční obvod s pevnou frekvencí
ACRF	Frekvenčně laděný rezonanční obvod s pevnou indukčností
C	Kapacita (F)
C_0	Kapacita zkoušeného objektu (F)
DC	Stejnoseměrné (např. napětí)
f	Frekvence (Hz)
I	Elektrický proud (A)
HV	Vysokonapěťový (např. zdroj)
L	Indukčnost (H)
l	Délka (m)
n	Počet stupňů kaskády (-)
P_F	Činný výkon (W)
PD.....	Částečný výboj (Partial discharge)
R	Elektrický odpor (Ω)
S_c	Celkový zdánlivý výkon (VA)
S_k	Zdánlivý výkon k-tého stupně kaskády (VA)
S_n	Zdánlivý výkon posledního stupně kaskády (VA)
S_0	Zdánlivý příkon zátěže (VA)
T	Doba periody (s)
U_{ACmax}	Maximální hodnota střídavého napětí (V)
U_C	Požadovaná výstupní hodnota napětí (V)
U_F	Napájecí napětí (V)
U_{max}	Maximální hodnota napětí (V)
U_{min}	Minimální hodnota střídavého napětí (V)
U_T	Zkušební napětí (V)
U_{Σ}	Napětí na všech stupních kaskády (V)
δU	Zvlnění napětí (V)
ΔU	Pokles napětí (V)
w	Šířka (m)
η	Účinnost (m)

1 Úvod

Tato práce vznikla jako bakalářská práce na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity. Jejím cílem je přinést souhrn vysokonapěťových zdrojů využívaných ve zkušebních laboratořích k testování nejrůznějších zařízení a strojů vysokého napětí. Tyto napěťové zdroje napodobují co možná nejdříve účinky provozních a impulsních napětí, které se v sítích vyskytují. Po úspěšné zkoušce tak může být zařízení připojeno do sítě bez nebezpečí selhání systému. Pro jednotlivé zkoušky jsou uvedeny i potřebné normy pro zkoušky vysokým napětím.

Práce je rozdělena na čtyři hlavní části.

První část se zabývá zkušebními zdroji stejnosměrného napětí. Mezi základní zdroje této kategorie patří jednocestný usměrňovač a Greinacherova kaskáda. Pro oba zdroje jsou zde vysvětleny principy funkce doplněné o obrázkové přílohy. Součástí jsou i požadované normy zkoušek.

Druhou, a nejobsáhlejší, částí jsou zdroje střídavého napětí, které napodobují účinky provozního napětí sítí. V souhrnu jsou sepsány využívané druhy transformátorů a z nich tvořené transformátorové kaskády. Dalšími střídavými popsányi zdroji jsou vysokonapěťové systémy založené na rezonančních obvodech, které jsou rozděleny na dvě možné varianty. Tou první je indukčně laděný rezonanční obvod s pevnou frekvencí (ACRL) a druhou naopak frekvenčně laděný rezonanční obvod s proměnnou frekvencí.

Třetí, neméně důležitou, částí jsou zkušební zdroje pro atmosférické a spínací impulsní napětí. Této části je vynaložen rozsáhlejší prostor pro normy zkoušek, jelikož je potřeba co nejvhodněji napodobit tvar a parametry vlně impulsního napětí tak, aby zařízení obstálo při atmosférickém či spínacím přepětí. V této kapitole je popsán princip funkce základního RC obvodu, který je základem pro vícestupňový impulsní generátor v Marxově zapojení, který je nejčastějším zdrojem impulsního napětí.

Poslední část je věnována návrhu vysokonapěťového pracoviště, které se zabývá volbou velikosti prostorů v závislosti na použitém napětí, stínění a zemnění celého systému pro správné a bezpečné fungování takové laboratoře, dále odběr energie ze sítě či speciálními prostory jako je například komora pro umělé znečištění. V závěru práce je i návrh osvětlení a způsoby přemístování předmětů po pracovišti.

2 Zdroje pro zkoušky vysokým napětím

Zdroje pro zkoušky vysokým napětím se používají ke zkouškám elektrotechnických zařízení, která slouží k výrobě, přenosu, rozvodu a spotřebě elektrické energie. Tato zařízení jsou dlouhodobě vystavována provoznímu napětí. Z krátkodobého hlediska jsou vystavována provoznímu (vnitřnímu) přepětí, které vzniká při odlehčení sítě, při zemním spojení nebo při spínání větší zátěže. Dalším typem přepětí je atmosférické (vnější), což jsou napěťové impulsy vznikající důsledkem atmosférických vlivů.

Z těchto důvodů jsou veškerá zařízení testována, zda jejich izolační vlastnosti odolají všem nežádoucím jevům a provoznímu stavu. U zařízení, která jsou již v provozu, se provádí již jen běžná diagnostika. Dle druhu přiloženého napětí určují příslušné normy vlastnosti a požadavky na konkrétní zkoušky zařízení.

Veškeré vyrobené předměty či zařízení se podrobují zkouškám typovým a kusovým. Typové zkoušky slouží k ověření, zda dané zařízení vyhovuje požadavkům norem. Kusové zkoušky ověřují zejména vady materiálu. Zkoušky se provádí tak, aby se zkoušený předmět co nejvíce blížil prostorovému uspořádání, kterému bude vystaven za ostrého provozu.

Zkoušky se provádějí za různých podmínek:

1. za sucha, kde je suchý a čistý povrch zařízení,
2. za umělého deště, kde se napodobuje vliv přírodního deště na vnější izolaci,
3. při umělém znečištění, kde se napodobují provozní podmínky.

Rozdělení zkoušek dle druhu přikládání napětí:

1. dielektrické zkoušky střídavým napětím,
2. dielektrické zkoušky stejnosměrným napětím,
3. dielektrické zkoušky impulsním napětím,
4. kombinace výše uvedených zkoušek.

Tyto zkoušky se většinou provádějí ve vysokonapěťových laboratořích, které jsou na tuto problematiku navrženy a které dokáží zajistit splnění všech požadovaných norem.

Zkušební zdroje tedy dělíme do těchto skupin:

1. zkušební zdroje stejnosměrného napětí,
2. zkušební zdroje střídavého napětí a
3. zkušební zdroje impulsního napětí.

Tyto zdroje jsou velmi drahé a rozměrné, proto se při jejich pořizování dbá na jejich účel a požadavky. Např. požadovaný dostatečný výkon, požadovaná vrcholová hodnota napětí, plynulost regulace napětí, ekonomické hledisko a spousta dalších kritérií, které jsou pro dané zkoušky nezbytné. [2]

2.1 Zkušební zdroje pro stejnosměrné napětí

V současné době se používají pro generování vysokého zkušebního stejnosměrného napětí vysokonapěťové střídavé transformátory, kde jsou obvody doplněny o usměrňovače, které usměrňují střídavý proud na stejnosměrný. Moderní polovodičové usměrňovače, složené převážně z křemičitých diod, dokáží generovat zkušební napětí a proudy všech potřebných hodnot pomocí různých doplňujících obvodů násobičů či zdvojovačů. [1]

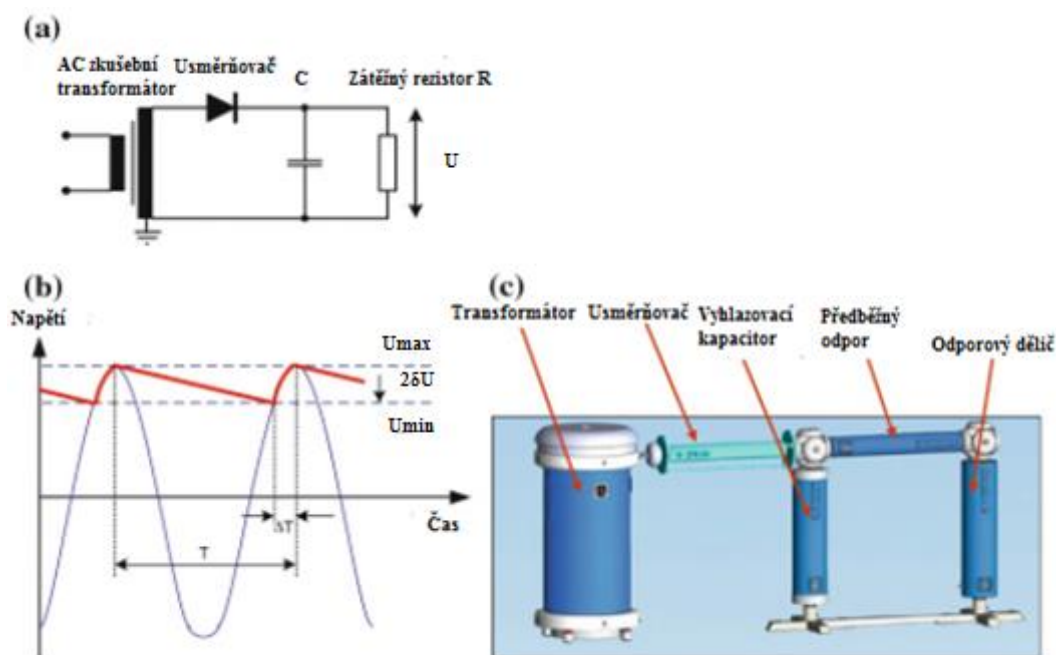
2.1.1 Normy pro zkoušky stejnosměrným vysokým napětím

Přiložené zkušební napětí na zkoušený objekt by mělo být stejnosměrné s činitelem zvlnění nepřesahujícím 3 %. Činitel zvlnění je dle norem definován jako poměr amplitudy zvlnění k hodnotě zkušebního napětí, kde amplituda zvlnění je polovina rozdílu mezi maximální a minimální hodnotou.

V případě zkoušky nepřesahující 60 sekund musí být měřené hodnoty zkušebního napětí drženy v rozmezí ± 1 % od určené hladiny po celou dobu této zkoušky. V případě, že zkouška trvá déle než 60 sekund, se naměřené hodnoty zkušebního napětí drží v toleranci ± 3 %. [4]

2.1.2 Jednocestný usměrňovač (jednofázový)

Jednocestný vysokonapěťový usměrňovač vznikne paralelním spojením kondenzátoru a odporové zátěže přes diodu k vysokonapěťovému transformátoru (**Obr. 1a**). Odporovou zátěží míníme většinou testovaný objekt nebo případně odporový dělič.



Obr. 1 Jednocestný usměrňovač. **a** Schéma zapojení. **b** Střídavé napájení a zvlnění stejnosměrného napětí. **c** Zkušební systém [1]

Při napájení obvodu transformátorem se dioda otevírá při kladné půlplně napájecího napětí transformátoru a uzavírá pro zápornou polaritu tohoto napětí. Dioda je otevřena pouze v době, kdy je napětí na výstupu transformátoru vyšší než napětí na nabíjeném kondenzátoru. V momentě, kdy napětí na zátěži dosáhne svého maxima U_{max} , usměrňovač se uzavře, kondenzátor skokově změní svoji polaritu proudu a začne být zdrojem do té doby, než napětí transformátoru znovu nepřesáhne napětí kondenzátoru (**Obr. 1 b**). Z vybíjení kondenzátoru je patrné, že na zátěži nelze dosáhnout konstantní hodnoty napětí.

Toto zvlnění vypočteme:

$$\delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{2} \quad (2.1)$$

Vztah mezi dobou trvání periody T a frekvencí f na napájecím střídavým napětím transformátoru vyjádříme:

$$\delta U = \frac{I \cdot T}{2 \cdot C} = \frac{I}{2 \cdot f \cdot C}, \quad (2.2)$$

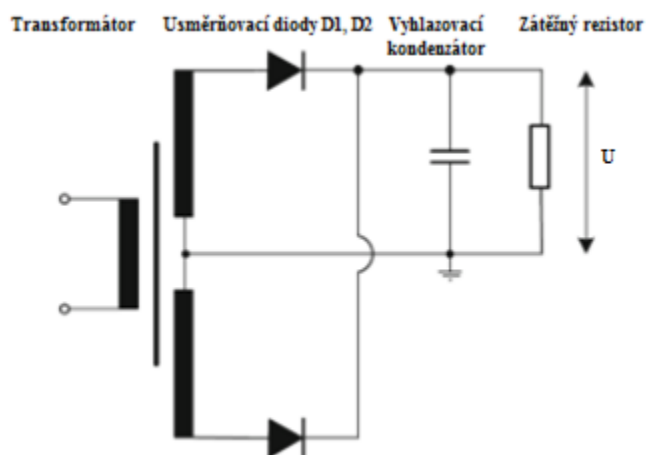
kde proud I vypočítáme:

$$I = \frac{U_{max} - U_{min}}{2 \cdot R} \quad (2.3)$$

Ze vzorců (2.2) a (2.3) vidíme, že při zvyšující se zátěži, frekvenci a kapacitě kondenzátoru se snižuje i celkové zvlnění napětí. Čím nižšího zvlnění dosáhneme, tím vyhlazenější a vhodnější průběh stejnosměrného napětí získáme.

Problém tohoto jednocestného usměřovače činí v nesymetrickém zatížení vysokonapětového napájecího transformátoru a jeho sycení, kdy závity protéká stejnosměrný proud.

Řešením tohoto problému je dvoucestný usměřovač (**Obr. 2**). K němu je potřeba napájecí transformátor s vyvedeným středem. Toto zapojení zabraňuje nasycení a snižuje zvlnění napětí na poloviční hodnotu oproti jednocestnému usměřovači, jelikož druhá dioda využívá záporné půlvlny napětí transformátoru a propouští tedy na testovaný objekt stejnosměrný proud. Tyto usměřovací obvody tvoří také základní stupně pro vysokonapětové stejnosměrné kaskádní generátory. [1]



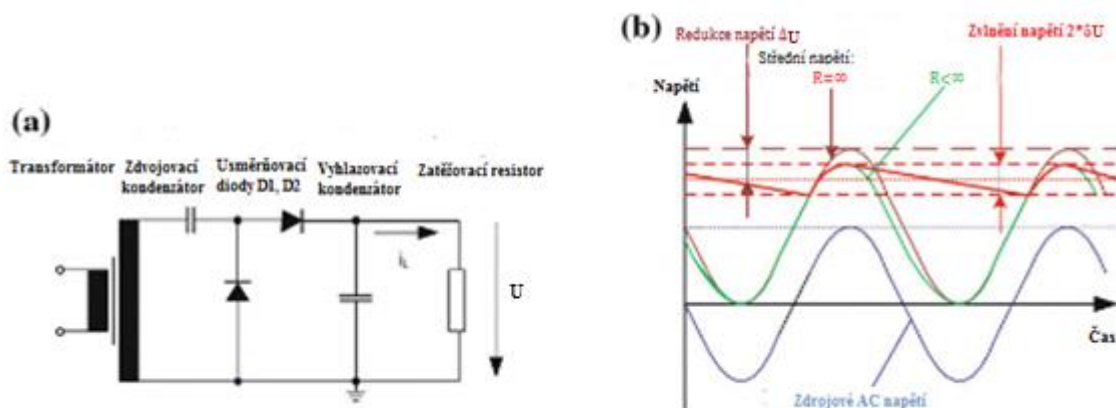
Obr. 2 Schéma zapojení dvoucestného usměřovače (D_1 , D_2 diody usměřovače) [1]

2.1.3 Zdvojovače a násobiče

Zdvojovače a násobiče jsou speciální zapojení, která získávají vyšší stejnosměrné napětí na výstupu, než je maximálně hodnota napájecího napětí transformátoru. Využitím filtračních

schopností kondenzátorů se zajistí, že na testovaném objektu bude několikanásobek původního usměrněného napětí.

Na **Obr. 3** vidíme sériové zapojení zdvojovače napětí. V době záporné půlplny napětí (dioda D_1 vodivá) se začne nabíjet kondenzátor C_1 a nabije se na amplitudu napětí zdroje. Při kladné půlplně (dioda D_2 vodivá) se kondenzátor C_2 nabije na napětí kondenzátoru C_1 a zároveň na amplitudu zdroje, tzn. na dvojnásobnou hodnotu amplitudy zdrojového napětí.

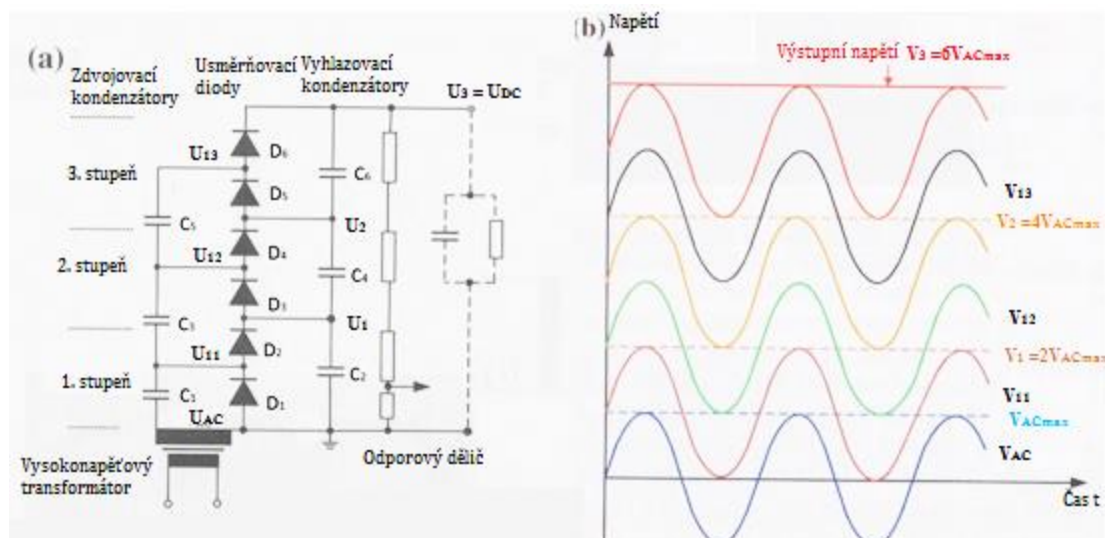


Obr. 3 a Schéma zapojení sériového zdvojovače napětí. b Průběh vyhlazeného stejnosměrného napětí na testovaném objektu (červenou barvou), průběh napájecího střídavého napětí (modrou barvou) [1]

2.1.3.1 Greinacherova kaskáda

Greinacherova kaskáda je speciální vysokonapěťové zařízení sloužící k přeměně zdrojového střídavého napětí na stejnosměrné pomocí sčítání napětí zdroje a kondenzátorů v obvodu.

Tato kaskáda (**Obr. 4a**) se rozděluje na několik sekcí. V levém sloupci schématu se objevují zdvojovací kondenzátory, někdy taktéž nazývané blokovací. V pravém sloupci se nacházejí vyhlazovací kondenzátory, které slouží ke zlepšení, tedy menšímu zvlnění, kvality napětí na testovaném objektu. Ve středním sloupci jsou sériově spojené diody.



Obr. 4 a Schéma zapojení Greinacherovy kaskády. b Průběh jednotlivých znásobených napětí [1]

V časové oblasti první kladné půlperiody se otevírá dioda D_1 , přes kterou teče proud do kondenzátoru C_1 , který se nabije (uvažujeme ideální diody) na hodnotu U_{ACmax} . Ve druhé, tedy záporné, půlperiodě se sčítá napětí kondenzátoru C_1 a napětí zdroje a přes otevřenou diodu D_2 nabijí kondenzátor C_2 na hodnotu $2 \cdot U_{ACmax}$. Při třetí půlperiodě napětí se sečte napětí zdroje, napětí na kondenzátorech C_1 i na C_2 a přes diodu D_3 se nabijí kondenzátor C_3 . Zároveň se dobíjí i kondenzátor C_1 . Ve čtvrté půlperiodě se spojí napětí zdroje a napětí kondenzátorů číslo 1 až 3 a skrz diodu D_4 nabijejí kondenzátor C_4 na hodnotu $2 \cdot U_{ACmax}$. Napětí v bodě U_2 je tedy již $4 \cdot U_{ACmax}$. Znovu se dobíjí i kondenzátor C_2 . V době páté půlperiody dojde k sériovému spojení zdroje a kondenzátorů 1 až 4, což způsobí opět otevření diody D_5 a nabíjení kondenzátoru C_5 . V poslední, šesté půlperiodě, tohoto nabíjení, se sériově spojí zdroj a kondenzátory 1 až 5 a součtem těchto napětí otevřou diodu D_6 , přes kterou se nabije i poslední kondenzátor C_6 , na kterém bude napětí $2 \cdot U_{ACmax}$. Na výstupních svorkách, testovaném objektu, kaskády tak bude celkové maximální napětí $6 \cdot U_{ACmax}$. [1], [2]

Stejnoseměrné napětí na každý stupeň kaskády je $2 \cdot U_{ACmax}$. Zdvajovací kondenzátory, včetně kondenzátoru nejnižšího stupně, musí odolat namáhání $2 \cdot U_{ACmax}$ a zároveň namáhání střídavým napájecím napětím. Nejnižší zdvojovací kondenzátor je sice namáhán pouze polovičním napětím oproti ostatním kondenzátorům, ovšem hraje hlavní roli ve zvlnění výsledného napětí. Z tohoto důvodu by měl mít dvojnásobnou kapacitu, aby snižoval zvlnění napětí. Vyhlazovací kondenzátory jsou obvykle navrženy tak, aby měly stejnou kapacitu z důvodu vhodnějšího lineárního rozdělení napětí při přechodových jevech. Zvlnění napětí

kaskády o n stupních vypočítáme:

$$\delta U = \frac{I}{f \cdot C} = \frac{n+n^2}{4} \quad (2.4)$$

Z tohoto vztahu vidíme, že zvlnění napětí roste dokonce s druhou mocninou stupňů kaskády.

Pokles napětí ΔU zjistíme ze vztahu:

$$\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} = \frac{2n+n^3}{3} \quad (2.5)$$

Pokles napětí na výstupu kaskády se dokonce snižuje s třetí mocninou počtu stupňů. Tento pokles může být v praxi výrazně vyšší, jelikož tento vztah zahrnuje pouze parametry transformátoru, nikoliv další parazitní kapacity v napájecím obvodu.

Účinnost tohoto systému vyjádříme jako podíl reálného napětí na výstupu kaskády ku celkovému napětí na všech stupních kaskády:

$$\eta = \frac{U_{\Sigma} - \Delta U}{U_{\Sigma}} \quad (2.6)$$

Greinacherova kaskáda je vhodná především pro kapacitní zkušební objekty a pro jmenovité proudy do 100 mA.

Pro vyšší požadované proudy se využívá zapojení symetrické Greinacherovy kaskády, které je ve svém třífázovém zapojení vhodná pro proudy od 500 mA.

2.2 Zkušební zdroje pro střídavé napětí

Vysokonapěťové namáhání izolací střídavým napětím je jedním z nejdůležitějších testů, které se na zařízeních provádějí. Tyto testované objekty se podrobují jednak zkouškám provozním střídavým napětím, tak i přechodným přepětím. Izolace se zkouší celou řadou výdržných testů či testů životnosti materiálu jak za sucha, tak za mokrého či znečištěného prostředí. [1]

2.2.1 Normy pro zkoušky střídavým vysokým napětím

Zkušební napětí je střídavé s kmitočtem v rozmezí od 45 Hz až po 65 Hz. Požadovaný tvar napájecí vlny napětí se blíží sinusovce s rozdílem amplitud, jak kladných, tak záporných, menším než 2 %. Výsledky zkoušek vysokým napětím nejsou ovlivněny malými odchylkami

od sinusovky, pokud se poměr vrcholové maximální hodnoty k hodnotě efektivní rovná $\sqrt{2}$ s maximální odchylkou $\pm 5\%$. Pokud má objekt nelineární impedanční charakteristiku, může být tato odchylka vyšší.

Při době zkoušky nepřesahující 60 sekund, musí být měřené hodnoty zkušebního napětí drženy v rozmezí $\pm 1\%$ od požadované hladiny po dobu trvání celé zkoušky. Pro zkoušky delší než 60 sekund, se naměřené hodnoty udržují v pásmu $\pm 3\%$ v průběhu celé zkoušky. Zdroj zkušebního napětí musí být navržen tak, aby pokryl i přechodové proudy způsobené výboji při zkouškách za deště či umělého znečištění.

Obecně se zkušební napětí získává ze zvyšovacího zkušební transformátoru, transformátorové kaskády, rezonančního obvodu s laditelnou tlumivkou nebo napájecího zdroje proměnné frekvence. Napětí zkušební obvodu musí být natolik stabilní, aby nebylo nikterak ovlivněno nežádoucími svodovými proudy. Celková kapacita zkoušeného objektu či dalších kondenzátorů v obvodu musí být dostatečně vysoká, 0,5 nF až 1 nF, aby měřené napětí průrazného výboje nebylo ovlivněno částečnými nepřeskokovými výboji na zkoušeném objektu.

Pro zkoušky za sucha s napětím do 100 kV (pevné izolace, izolační kapaliny nebo kombinace obou) je zdroj s proudem nad 100 mA a systém se zkratovou impedancí menší než 20 % dostačující. Pro zkoušky nad 100 kV na venkovní samočinně se obnovující izolace (izolátory, vypínače, odpojovače) je zdroj s proudem nad 100 mA a systém se zkratovou impedancí pod 20 % dostačující. Při zkouškách za sucha a bez předvýbojů, s trvalým výskytem předvýbojů a za deště je potřeba zdroj se jmenovitým proudem vyšším než 1 A. Pro zkoušky s umělým znečištěním je nutný proud 1 A až 5 A s doporučenou kapacitou obvodu alespoň 1 nF. [4]

2.2.2 Tank-type zkušební transformátory

Tyto transformátory se vyznačují nejlepšími chladicími vlastnostmi, jelikož je jejich aktivní část vnořena do kovové nádrže, která je vyplněna chladicím médiem, nejčastěji olejem. Pro zlepšení chlazení je možno tuto nádrž vybavit chladicími žebry, které zvyšují celkovou plochu objektu, a tím pádem tak zajistit lepší výměnu tepla mezi touto nádrží a okolním prostředím. Z tohoto důvodu jsou tyto zkušební transformátory vhodné pro nejvyšší požadované zkušební výkony a proudy (**Tab. 1**).

Magnetický obvod se většinou skládá ze 3 sloupků. Vnitřní vinutí nižšího napětí a vnější vinutí vyššího napětí bývají situovány na centrálním sloupku. Jádru transformátoru je na

stejném zemním potenciálu jako nádoba. Spodní konec vysokonapěťového vinutí bývá taktéž uzemněn, a to přes průchodku, na které lze měřit proud zkušební obvodem.

Velkou výhodou tohoto typu zkušební transformátoru je to, že z důvodu uzemněné nádrže neklade toto zařízení žádné požadavky na vzdálenost od okolních stěn či předmětů, proto není potřeba tak velkého prostoru jako je tomu u jiných typů. Tyto transformátory jsou vhodné i pro venkovní provoz. Proto mohou být, z důvodu ušetření prostoru v laboratoři, umístěny ve venkovních prostorech a pouze průchodku vést dovnitř testovací haly. [1]

Tab. 1 Charakteristické údaje pro zkušební tank-type transformátor s izolací z oleje impregnovaného papíru [1]

Maximální jmenovité hodnoty				
Napětí (kV)	Proud (A)	Zdánlivý výkon (kVA)	Maximální pracovní doba	Zkratová impedance (%)
1000	10	10000	nepřetržitá	5-10



Obr. 5 Zkušební tank-type transformátor (2 MVA) [1]

2.2.3 Cylinder-type zkušební transformátory

Protože je těleso tohoto transformátoru tvořeno izolačním válcem, nevyžaduje průchodku. Z tohoto důvodu je také značně omezen odvod tepla kvůli čemuž nejsou tyto typy zkušebních transformátorů vhodné pro tak vysoké výkony jako například tank-type transformátory. Jsou

vhodné pro zkušební procesy v době trvání do 10 hodin (**Tab. 2**). Pro delší zkoušky vyžaduje instalaci přídavných chladičů.

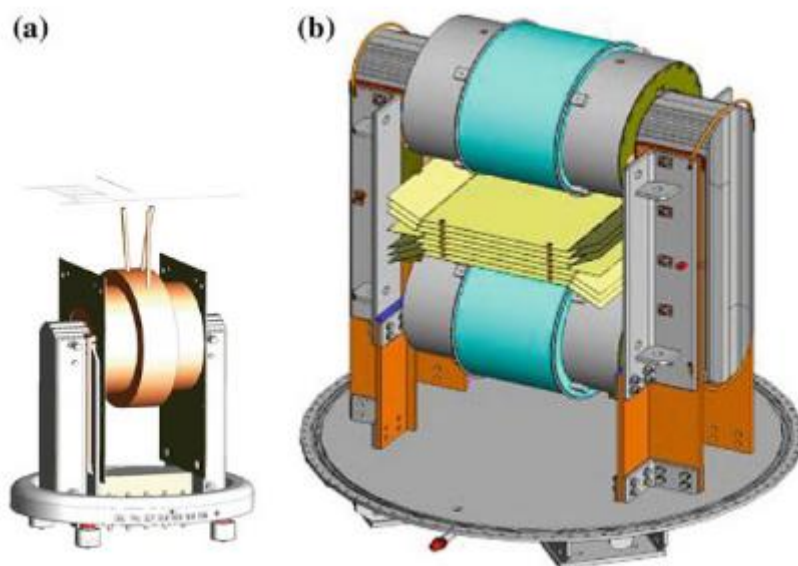
Existují dva principy konstrukce aktivní části:

1. Jedno nízkonapěťové a jedno vysokonapěťové společné koaxiální vinutí, přičemž jádro transformátoru je připojeno na zemní potenciál.
2. Dělené vinutí, kdy je jádro na polovičním potenciálu. Spodní vinutí má nízkonapěťový potenciál na vnější straně jádra a poloviční vysokonapěťový potenciál na vnitřní straně. S tímto polovičním potenciálem je spojeno jádro a také závit, který je spojen s horním vinutím, které má u jádra budící vinutí. Druhý vysokonapěťový potenciál je na vnější straně. Mezi těmito dvěma vysokonapěťovými vinutími je tak plně vysoké napětí. Proto je tento prostor oddělen impregnovaným papírem, který zlepšují izolační vlastnosti a odolnost.

Tento typ je vhodný pro transformátorové kaskády do zkušebního napětí až 1500 kV. Doporučují se pro víceúčelové zkušební laboratoře bez speciálních požadavků na funkci. [1]

Tab. 2 Charakteristické údaje pro zkušební cylinder-type transformátor s izolací z oleje impregnovaného papíru [1]

Maximální jmenovité hodnoty			Maximální pracovní doba	Zkratová impedance (%)
Napětí (kV)	Proud (A)	Zdánlivý výkon (kVA)		
500	<2	<1000	10 hodin	10-15

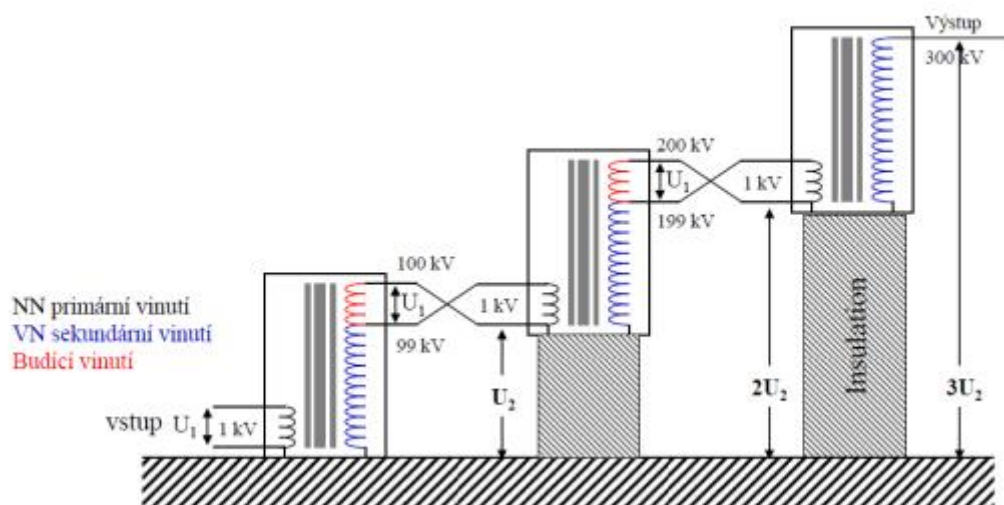


Obr. 6 Zkušební cylinder-type transformátor. **a** Konstrukce se společným koaxiálním vinutím. **b** Konstrukce s děleným vinutím [1]

2.2.4 Zkušební transformátorové kaskády

Tyto kaskády jsou konstruovány pro ty případy, kdy generování potřebné hladiny napětí nedokáže zajistit samostatný vysokonapěťový transformátor. Jsou užitečné pouze pro transformátory s olejo-papírovým izolačním systémem. Kaskády mohou být používány pro napětí vyšší než 600 kV.

Zkušební transformátory pro tyto kaskády mají kromě primárního a sekundárního vinutí taktéž terciální přenosové vinutí, které má vysokonapěťový potenciál. Poměr napětí na primárním a terciálním vinutí je 1:1. Terciální vinutí napájí primární vinutí dalšího stupně kaskády. Všechny transformátory v kaskádě jsou konstruovány stejným způsobem. Při konstruování kaskády se musí dbát na to, že první stupeň musí snést jmenovité zatížení celé kaskády. Jmenovitý výkon kaskády může být někdy o něco nižší než jmenovitý výkon samotných transformátorů. Tyto transformátory jsou vhodné i pro venkovní použití, což je v některých případech velká výhoda z důvodu rozlehlosti celého zařízení. [1]



Obr. 7 Zapojení třístupňové transformátorové kaskády [5]

První transformátor je uzemněn na nulový potenciál. Druhý transformátor je pak položen na napěťovou hladinu jako je výstupní napěťová hladina prvního transformátoru. Takto se hladina zvyšuje s každým dalším stupněm kaskády.

Jak již bylo zmíněno, první transformátor musí být dimenzován na celý výkon n -stupňové kaskády. Každý další stupeň k pak musí zvládnout vydržet výkon:

$$S_k = \frac{n-1}{n} S_c \quad (2.7)$$

Z tohoto vzorce plyne, že 2. stupeň je třeba dimenzovat na 1/2 a třetí stupeň na 1/3 celkového výkonu. Výkon posledního stupně n :

$$S_n = U_2 I_2 \quad (2.8)$$

Při zanedbání ztrát transformátorů platí pro výkon k -tého stupně kaskády vztah:

$$S_k = S_n (n + 1 - k) \quad (2.9)$$

Celkový výkon kaskády:

$$S_c = S_n \frac{n}{2} (n + 1) \quad (2.10)$$

Příkon zátěže:

$$S_o = n \cdot S_n \quad (2.11)$$

A z těchto údajů již dokážeme vypočítat celkovou účinnost kaskády pro n stupňů:

$$\eta = \frac{S_o}{S_c} = \frac{2}{n+1} \quad (2.12)$$

Zde vidíme, že účinnost kaskády o dvou stupních je necelých 67 %, třetího stupně již jen 50 %. Toto je hlavní důvod, proč se nejčastěji staví kaskády o maximálně třech stupních. [2]

2.2.5 Střídavé vysokonapěťové systémy založené na rezonančních obvodech

Rezonance je stav, kdy je impedance cívky rovna impedanci kondenzátoru, v tomto případě zkoušeného objektu. Pro vznik těchto systémů je zapotřebí sériové nebo paralelní spojení cívky s kapacitním zkoušeným objektem. Rezonance je možné dosáhnout buď změnou parametrů obvodu nebo změnou kmitočtu. Při této rezonanční frekvenci se výrazně zvýší proud procházející obvodem, pokud je RLC obvod zapojen sériově, jelikož v tomto stavu má obvod nejmenší impedanci. Naopak při paralelním spojení se výrazně zvýší napětí na zátěži (testovaném objektu), protože tento obvod má nejvyšší impedanci. Při této rezonanční frekvenci (**rovnice 2.13**) má obvod pouze činný odpor. Průběh napětí na zátěži je sinusový.

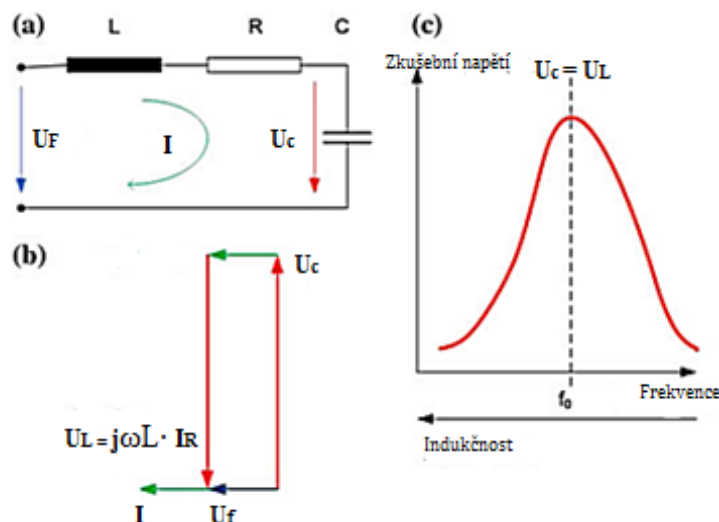
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.13)$$

Stabilitu zkušební napětí popisuje tzv. činitel kvality Q , který je definován jako poměr mezi zkušebním kapacitním výkonem a činným ztrátovým výkonem (**rovnice 2.14**). Tento ztrátový výkon je dán reálným odporem cívky a kondenzátoru.

$$Q = \frac{S_C}{P_R} = \frac{U_C}{U_R} = \frac{I}{\omega_0 C} = \frac{1}{\omega_0 C \cdot R} = \sqrt{\frac{L}{C \cdot R^2}} \approx \frac{U_T}{U_F}, \quad (2.14)$$

kde U_T je napětí zkušební a U_F napětí napájecí. Požadované výstupní napětí U_C můžeme zajistit ze vztahu:

$$U_C = Q \cdot U_F \quad (2.15)$$



Obr. 8 a Schéma rezonančního obvodu. b Fázorový diagram rezonančního obvodu. c Rezonanční křivka [1]

K dosažení rezonance se využívá dvou principů. Tím prvním je možnost naladění vysokonapěťové tlumivky takovým způsobem, aby se rezonanční frekvence shodovala s napájecí frekvencí. Tomuto způsobu se říká indukčně laděný rezonanční obvod. Druhou možností je regulovatelnost frekvence s využitím frekvenčního měniče, kde je rezonanční frekvence předem dána.

V obou případech je možné ladit indukčnost, resp. frekvenci, pouze v omezeném rozsahu, protože splnění podmínky rovnosti napájecí a rezonanční frekvence nelze dosáhnout pro nízké a velmi vysoké kapacitní zátěže. V případě poruchy na testovaném objektu se výrazně změní zatěžovací kapacita, systém vypadne ze stavu rezonance a následný zkratový proud je natolik zanedbatelný, že nedojde ke shoření zkoušeného objektu.

Zdrojový transformátor je navržen na nezbytný napájecí výkon a napětí, aby byl zajištěn nejnižší předpokládaný činitel kvality Q .

Sériový rezonanční obvod, kdy je vysokonapěťová tlumivka spojena v sérii s vinutím napájecího transformátoru, je nejdůležitějším zapojením rezonančních obvodů.

Paralelní rezonanční obvody jsou vhodné pro speciální testy velkých kapacitních objektů, kde není vyžadováno příliš vysoké napětí. V době rezonance jsou veškeré proudy kompenzovány tlumivkou.

Kompletní zkušební systém lze chápat jako paralelní spojení napájecího okruhu (činitel kvality Q_F) s testovaným objektem (Q_T). Kombinace těchto dvou činitelů kvality určuje celkový činitel jako: [1]

$$Q = \frac{Q_F \cdot Q_T}{Q_F + Q_T} \quad (2.16)$$

2.2.5.1 Indukčně laděný rezonanční obvod s pevnou frekvencí (ACRL)

V případě, že má indukčnost v obvodu magnetické jádro s proměnnou šířkou mezery, lze tímto laděním měnit indukčnost celé tlumivky. Indukčnost L lze pak vypočítat z přímé úměry druhé mocniny závitů cívky N , permeability vzduchu μ_0 , ploše průřezu magnetického jádra A , faktoru proporcionality k a z nepřímé úměry šířce vzduchové mezery a .

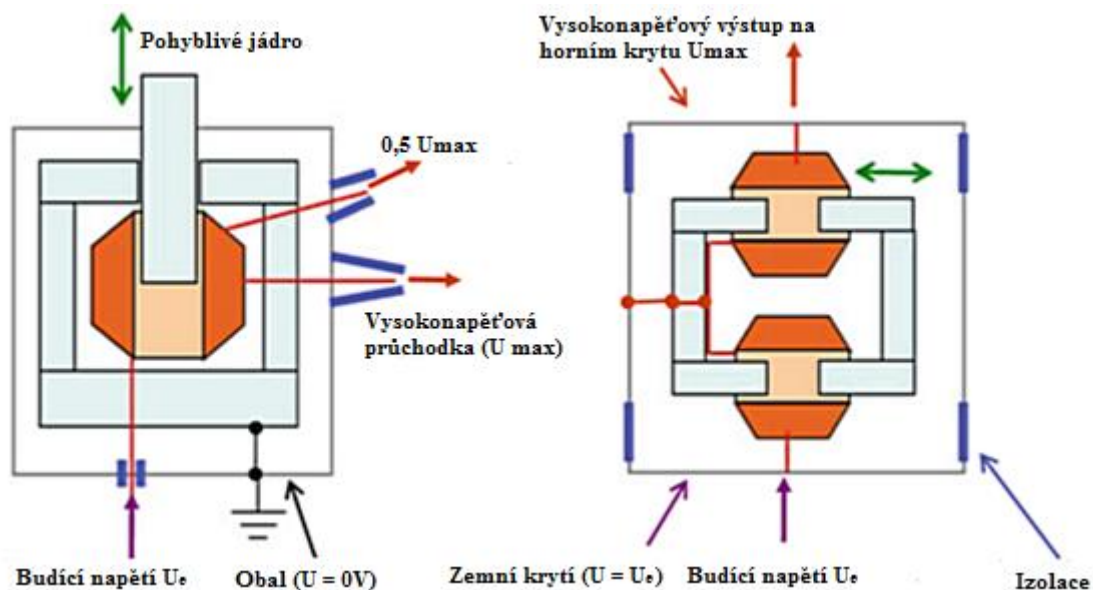
$$L = \frac{k \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{a} \quad (2.17)$$

Maximální indukčnost L_{max} lze dosáhnout minimální šířkou mezery a_{min} a rezonancí s minimální zátěžnou kapacitou C_{min} . Maximální zátěžná kapacita C_{max} lze určit naopak při maximální mezeře a_{max} a rezonancí s minimální indukčností L_{min} . Mezera v magnetickém jádře cívky se z důvodu snižování činitele jakosti nastavuje do:

$$\frac{C_{max}}{C_{min}} = \frac{L_{min}}{L_{max}} \approx \frac{a_{max}}{a_{min}} \approx 20 \quad (2.18)$$

Nastavení vzduchové mezery se řídí fázovým úhlem mezi zkušebním napětím a zkušebním proudem. Při dosažení maximálního úhlu je dosaženo i maximum rezonanční křivky. Čím větší je činitel jakosti, tím strmější je i rezonanční křivka, tím pádem jsou vyšší nároky na přesnost nastavení vzduchové mezery.

Obvykle bývá rezonanční obvod vybaven ještě základním zátěžovým kondenzátorem, který umožňuje dosáhnout rezonance při testování objektu bez kapacitního charakteru.



Obr. 9 Aktivní část laditelných indukčností. **a** Shell-type jádro s jednou vzduchovou mezerou a. **b** Two half jádro s dvěma vzduchovými mezerami o poloviční šířce $a/2$ [1]

Existuje několik druhů tlumivek, z těch nejzákladnějších:

1. Tank-type tlumivky
2. Cylinder-type tlumivky
3. Kaskády z tlumivek

U tank-type tlumivek závisí konstrukce na izolaci a tepelných poměrech. Většinou jsou tlumivky navrhovány s odbočkami napětí, které jsou nižší než jmenovité napětí. Vinutí může být navrženo na konstantní hodnotu proudu, takže stačí celé zhotovit z jednoho druhu vodiče, nebo na konstantní výkon, kde musí být pro vyšší proudy zajištěn i větší průřez vodiče, tudíž je celé vinutí složeno z několika různě silných vodičů dle potřeby. Pro tento typ tlumivek je vhodné shell-type jádro (**Obr. 10 a**), které se vyznačuje vysokou stabilitou a dokáže odolat velkému mechanickému namáhání. Z toho plyne, že nižší vibrace zaručí stabilnější výstupní napětí i menší hluk. Tyto tlumivky mají podobné vlastnosti jako tank-type zkušební transformátory, ale nepoužívají se pro kaskádní účely. Používají se hlavně k testování vedení až do hladiny 400 kV.

Cylinder-type tlumivky využívají two half jádro (**Obr. 10 b**). Vzduchová mezera je nastavena pro vzdálenost odpovídající požadované indukčnosti, která zajistí rezonanční stav s testovaným kapacitním objektem. Kolem tlumivky se nacházejí toroidní elektrody, které řídí intenzitu pole. Pro lepší využití omezeného prostoru uvnitř tlumivky, je vinutí obdélníkového průřezu.

Pro vyšší napětí lze sériově spojit cylinder-type tlumivky. Tlumivky se skládají na sebe do sloupců. Na rozdíl od transformátorové kaskády vzrůstá zkušební výkon kaskády tlumivek přidáním každé další o celý výkon dané tlumivky. Některé velmi výkonné kaskády s přídatným chlazením se používají k testování vedení vyžadující vyšší napětí než 400 kV. [1]



Obr. 10 Kaskáda z tří tlumivek o celkovém napětí 1200 kV, každá tlumivka 400 kV [1]

2.2.5.2 Frekvenčně laděný rezonanční obvod s proměnnou frekvencí (ACRF)

Oscilační obvod obsahuje tlumivku s pevně danou indukčností L a na zátěži testovaný objekt s danou kapacitou C_0 , jejichž rezonanční frekvence má hodnotu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_0}} \quad (2.19)$$

Vzhledem k odlišné kapacitě různých testovaných objektů vyžaduje každé takové zařízení různou rezonanční frekvenci. Z rovnice 2.19 vidíme, že maximální zátěžná kapacita C_{max} určuje minimální frekvenci f_{min} zdroje. Naopak nejvyšší frekvenci f_{max} zjistíme z nejnižší možné kapacitní zátěže C_{min} při pevně dané indukčnosti tlumivky.

Dle norem pro tyto testy je doporučen pouze určitý frekvenční rozsah zdroje, který je dán rozsahem zatížení. Z rovnice 2.19 zjistíme vztah pro C_{max} a C_{min} .

$$C_{max} = \frac{1}{(2\pi f_{min})^2 \cdot L} \quad (2.20)$$

$$C_{min} = \frac{1}{(2\pi f_{max})^2 \cdot L} \quad (2.21)$$

Ladící rozsah poměrem C_{max} a C_{min} z rovnic 2.20 a 2.21.

$$\frac{C_{max}}{C_{min}} = \left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right)^2 \quad (2.22)$$

Vyjádřením f_{min} z 2.22 a C_{min} z 2.21 získáme vztahy pro dosazení do rovnice maximálního proudu I_{max} :

$$I_{max} = 2\pi f_{min} \cdot C_{max} \cdot U_T = U_T \cdot \sqrt{\frac{C_{max}}{L}} \quad (2.23)$$

Maximální zkušební výkon soustavy zjistíme při největším možném proudu, tedy při nejnižší frekvenci obvodu:

$$S_T = U_T \cdot I_{max} \quad (2.24)$$

Vzhledem k tomu, že výkon S_T však závisí na frekvenci, zavádí se tzv. ekvivalentní výkon pro frekvenci 50 Hz:

$$S_{50} = \frac{50}{f_{min}} S_T \quad (2.25)$$

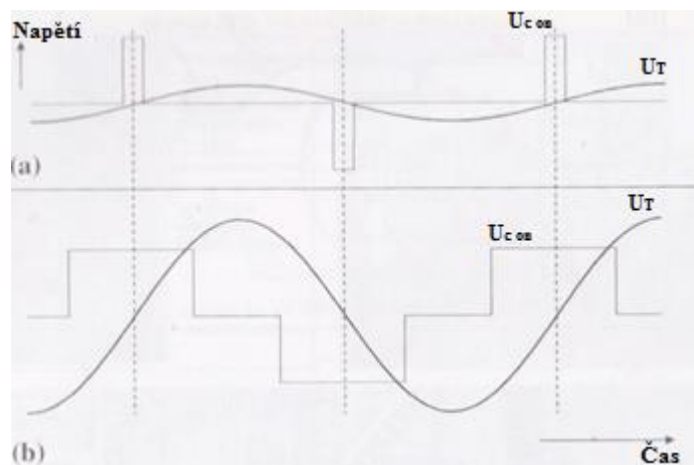
Potřebný činný výkon, který se rovná ztrátám v obvodu vypočítáme za pomoci činitele kvality:

$$P_F = \frac{S_T}{Q} \quad (2.26)$$

U systému s frekvenčně laděného rezonančního obvodu se činitel kvality pohybuje ve vyšších hodnotách, než je tomu u obvodu indukčně laděného. U prvně zmiňovaného systému se činitel kvality Q pohybuje v rozmezí 50-150, u druhého je to 20-60. U tohoto systému se činitel kvality zvyšuje, jelikož tlumivka s pevnou indukčností snižuje i rozptylový magnetický tok, takže i zmenšuje celkové ztráty.

Proměnnou frekvenci napájecího výkonu generují statické frekvenční měniče. V první části takového měniče se nachází usměrňovací obvod, který usměrní napájecí střídavé napětí sítě na stejnosměrné. V další části měniče obvod napěťového střídače opět pomocí IGBT tranzistorů nebo SKIIP modulů přemění na střídavé obdélníkové napětí. Oscilační obvod pracuje jako vysokonapěťový filtr a generuje tak sinusovou vlnu. Mezi obdélníkovým napětím, které kompenzuje činné ztráty, a zkušebním napětím na kapacitním objektu je

fázový úhel 90° . I přes vysoký činitel kvality ACFR systémů je potřeba nastavit frekvenci s vysokou přesností, až $\pm 0,1$ Hz. Velikost výstupního napětí z frekvenčního měniče je nastavována pomocí pulsní šířkové modulace (**Obr. 12**). [1]



Obr. 11 Obdélkové výstupní napětí frekvenčního měniče pro **a** nízké a **b** vysoké sinusové zkušební napětí na kapacitním testovaném objektu [1]

Pevné neladitelné tlumivky se dělí obdobně jako ty laditelné do těchto skupin:

1. Tank-type tlumivky
2. Cylinder-type tlumivky
3. Tlumivky s plynem SF₆

Stejně jako tank-type transformátory i tento typ pevných tlumivek se hodí pro použití těch nejvyšších zkušebních výkonů – S₅₀ až 50 MVA. Využití tkví v testování kabelových systémů po položení či opravách nebo třeba testování podmořských kabelů.

Designově se cylinder-type pevné tlumivky podobají jejím obdobným typům transformátorů tank-type. Jsou vhodné na nižší výkony a umísťují se na sebe do komínů. Používají se pro zkoušky plynem izolovaných systémů a pro testy výkonových transformátorů přiložením napětí.

Tlumivky s plynem SF₆ jsou uspořádané v kovovém pouzdře, které může být přímo připojeno k testovanému objektu. SF₆ izolace ve vzduchové mezeře mezi dvěma vinutími transformátoru musí být navržena na jmenovité napětí tlumivky, přičemž napětí mezi vnějšími vrstvami a pouzdem odpovídá polovině tohoto napětí. Tento typ tlumivky je vhodný pro jmenovitá napětí do 750 kV, zkušební proudy několika ampérů a krátkodobé testy. [1]

2.3 Zkušební zdroje pro atmosférické a spínací impulsní napětí

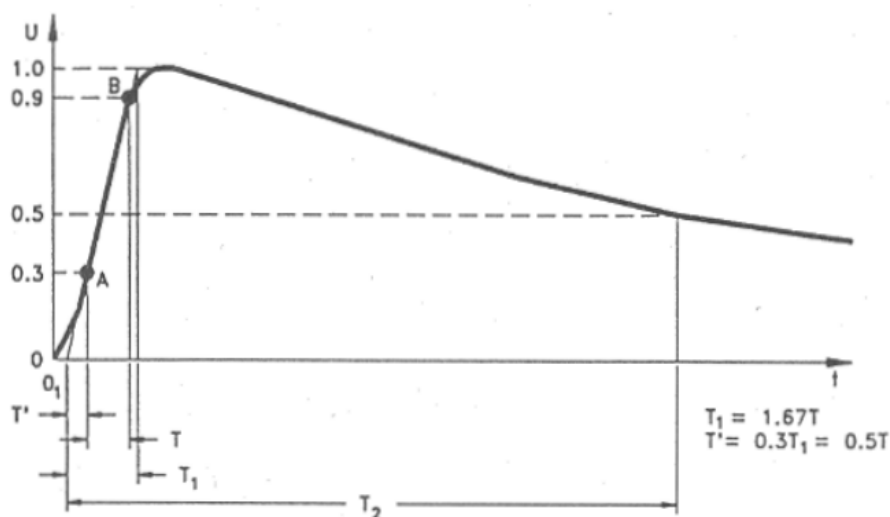
Důvodem pro zkoušky atmosférickým a spínacím impulsním napětím je zejména fakt, že přenosová soustava je vystavena právě přepětím atmosférickým, která jsou způsobena přímým nebo nepřímým úderem blesku, a spínacím, která vznikají přechodnými jevy při různých manipulacích na přenosové lince jako je zapnutí nebo odstávky systému. Tyto přepětí již nemají periodický charakter, nýbrž aperiodický, který se neopakuje a tvoří impuls.

Impuls je účelově přiložené přechodné přepětí aperiodického typu na testovaný objekt. Vyznačuje se rychlým nárůstem do vrcholové hodnoty a následným pomalým poklesem k nule. Atmosférický a spínací impuls se liší dobou čela a půltýlu impulsu. Atmosférické impulsy jsou ty, kde doba čela trvá maximálně 20 μs . Impulsy s delší dobou čela se nazývají spínací. [1], [3], [4]

2.3.1 Normy pro zkoušky atmosférickým impulsním vysokým napětím

Plné atmosférické impulsní napětí je definované jako atmosférické impulsní napětí, což je impulsní napětí s dobou čela kratší než 20 μs , které není přerušeno průrazným výbojem.

Doba čela T_1 je zdánlivý parametr, který je definován jako 1/0,6 násobek intervalu T mezi okamžiky, kdy impuls dosáhne 30 % a 90 % vrcholové hodnoty zkušební napětí (mezi body A a B v Obr. 12).



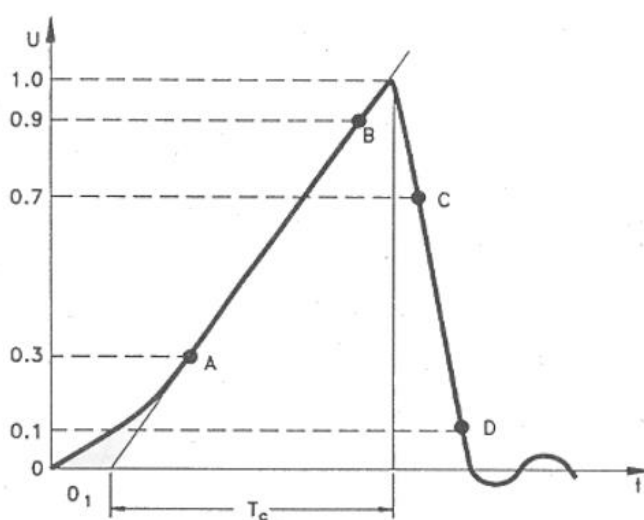
Obr. 12 Tvar a časové parametry plného impulsu napětí [4]

Hodnota vrcholu napětí se může při atmosférických impulsích pohybovat kolem 1 000 kV, někdy i více, při proudu v řádech stovek kA.

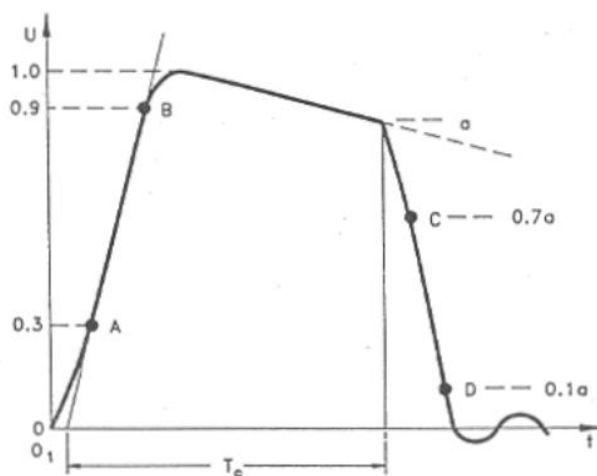
Zdánlivý počátek O_1 je definován jako okamžik, který předchází odpovídajícímu bodu A křivky zkušebního napětí o $0,3T_1$.

Doba půltýlu T_2 je zdánlivý parametr udávající časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem, kdy křivka zkušebního napětí klesla na 50 % své vrcholové hodnoty (**Obr. 12**).

Useknutý atmosférický impuls je takový impuls, při kterém průrazný výboj způsobí rychlé zhroucení napětí téměř na nulovou hodnotu buď s oscilacemi nebo bez nich. Useknutí může nastat v čele, ve vrcholu nebo v týlu zkušebního impulsu (**Obr. 13 a 14**).



Obr. 13 Atmosférické impulsní napětí useknuté v čele [4]



Obr. 14 Atmosférické impulsní napětí useknuté v týle [4]

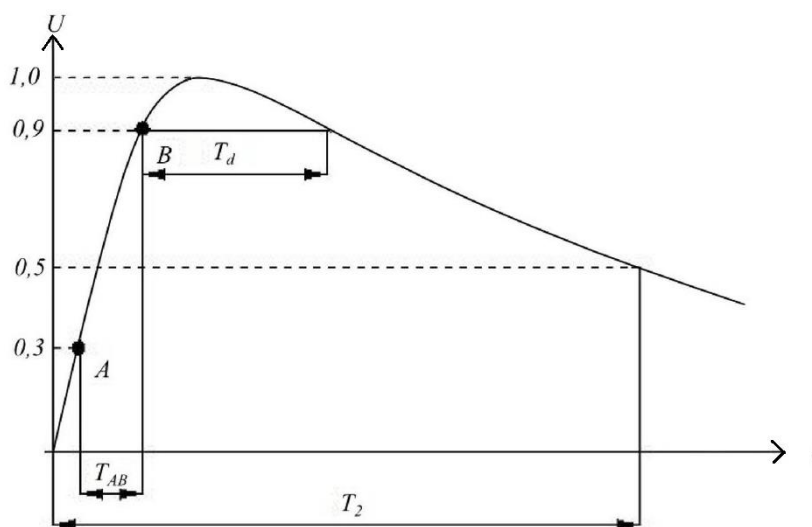
Normalizovaný atmosférický impuls napětí je dle norem považován jako hladký plný atmosférický impuls napětí, který má dobu čela $1,2 \mu\text{s}$ a dobu půltýlu $50 \mu\text{s}$. Též je označován jako impuls $1,2/50$.

Dle norem jsou také povolené odchylky od tohoto normalizovaného impulsu. Vrcholová hodnota zkušebního napětí se může pohybovat v rozmezí $\pm 3 \%$, doba čela v mezích $\pm 30 \%$ a doba půltýlu v toleranci $\pm 20 \%$.

Generování zkušebního impulsu probíhá pomocí impulsního generátoru, který je tvořen určitým počtem kondenzátorů, které jsou paralelně nabíjeny ze zdroje stejnosměrného napětí a vybíjeny v sériovém zapojení do obvodu se zkoušeným objektem. [4]

2.3.2 Normy pro zkoušky spínacím impulsním vysokým napětím

Spínací impulsní napětí je impulsní napětí vyznačující se dobou čela $20 \mu\text{s}$ nebo delší. Doba do vrcholu T_p je časový interval mezi skutečným začátkem impulsu do maximální hodnoty spínacího impulsního napětí (**Obr. 15**).



Obr. 15 Spínací impulsní napětí [4]

Obdobně jako u atmosférického impulsního napětí je T_2 doba půltýlu, což je interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí klesne na polovinu vrcholové hodnoty impulsu.

Doba T_d je interval, kdy spínací impulsní napětí přesahuje $0,9$ násobek vrcholové hodnoty napětí.

Normalizovaný spínací impuls je napěťový impuls o době do vrcholu T_p $250 \mu\text{s}$ a době

půltýlu T_2 2 500 μ s. Taktéž je tento impuls označován 250/2 500.

Normy připouští povolené odchylky reálných hodnot od normovaných, a to vrcholová hodnota napětí ± 3 %, dobu do vrcholu ± 20 % a dobu půltýlu ± 60 %.

Spínací impulsní napětí je většinou generováno konvenčními impulsními generátory.

2.3.3 Základní RC obvod

Na **Obr. 16 a** vidíme schéma zapojení základního RC obvodu. V podélné větvi obsahuje toto zapojení směrem od zdroje nabíjecí odpor R_c , spouštěcí jiskřiště SG a čelní odpor R_f . V příčné větvi potom nabíjecí kondenzátor C_i , týlní odpor R_t a zátěžovou kapacitu C_l .

Příčná kapacita C_i je nabíjena přes odpor R_c až do okamžiku, kdy dojde k průraznému napětí V_0 na spouštěcím jiskřišti SG . Po průrazu je kapacita C_i nabíjena přes čelní odpor R_f , který tak ovlivňuje tvar čela požadovaného impulsu, a během toho se kapacita C_i vybíjí přes týlní odpor R_t , který naopak tvaruje tyl impulsu. Superpozicí těchto dvou procesů získáme výsledný tvar impulsu. Vrcholová hodnota U_{ip} je nižší než hodnota průrazu jiskřiště U_0 . Vztah mezi těmito dvěma hodnotami udává tzv. činitel účinnosti η jednostupňového základního RC generátoru:

$$\eta = \frac{U_{ip}}{U_0} < 1 \quad (2.27)$$

$$\eta = \eta_s \cdot \eta_c \quad (2.28)$$

Tento činitel lze také vypočítat ze součinu účinnosti η_s , který je závislý na tvaru impulsu, a účinnosti η_c , který se mění v závislosti na parametrech obvodu. První jmenovaný je tím vyšší, čím je poměr mezi dobou týlu a čela větší. Druhý činitel se zvyšuje zvětšováním poměru kapacity C_i a C_l . η_s činitel nabývá u atmosférických impulsích, tedy u vlny 1,2/50, hodnoty 40. U spínacího impulsu 250/2 500 je tomu pouze 10. V praxi je tento činitel u atmosférických impulsů vyšší než u spínacích, a to v rozmezí od 0,85 do 0,95. U spínacích je to mezi 0,7 až 0,8. Časovou konstantu čela τ_f a týlu τ_t vypočítáme:

$$\tau_f = R_f \cdot C_i \quad (2.29)$$

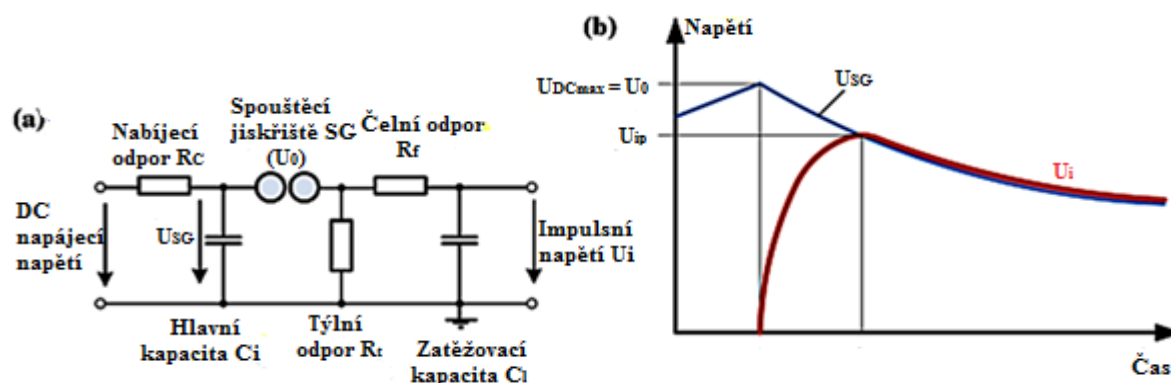
$$\tau_t = R_t \cdot C_i \quad (2.30)$$

Většinou má takový napěťový generátor předem dané pevné hodnoty kapacit. Časová konstanta čela se tak může upravovat pomocí vhodně zvoleného odporu R_f a časová konstanta týlu změnou odporu R_t .

Výběr hlavního kondenzátoru C_i a požadované maximální nabíjecí napětí U_{0max} určuje energii pulsního generátoru W_i :

$$W_i = \frac{1}{2} C_i U_{0max}^2 \quad (2.31)$$

Hlavní kapacita C_i se volí dle přepokládaného zatížení tak, aby byla splněna podmínka $C_i \gg C_l$. [1]



Obr. 16 Impulsní napěťový generátor a Schéma zapojení. b Průběh napětí na jiskřišti U_{SG} a na zátěži U_i [1]

2.3.4 Vícetupňový impulsní generátor v Marxově zapojení

Základní RC obvod slouží převážně k demonstraci funkce pulsního generátoru a využívá se do napětí 200 kV. Pro vyšší požadované napětí byl v roce 1923 vynalezen Otto Marxem vícetupňový generátor, který pokryl potřeby impulsních zkoušek nad 200 kV.

Impulsní kondenzátory C_i všech stupňů se nabíjejí přes nabíjecí odpory R_c , které jsou spojené v sérii do jednoho sloupce. V případě, že dimenzování velikosti odporů proběhne správně, pak nemá při nabíjení vliv to, že nabíjecí odpor n -tého stupně je n -násobně větší než nabíjecí odpor prvního stupně, jelikož nabíjecí čas je dostatečně dlouhý pro to, aby se všechny kapacity nabily na maximum.

Používá se tzv. tyristorové řízení, které zaručuje konstantní proud a při dosažení určitého napětí dojde k průrazu na spouštěcím jiskřišti. Pro toto použití je vhodné trigatronové zařízení (Obr. 18), které se nachází na spouštěcím jiskřišti prvního stupně. Pomocí něj dochází ke spuštění celého systému, je složeno z tří elektrod. Při dosažení požadovaného napětí dojde

k průrazu na elektrodách. Toto první jiskřiště je navrženo tak, že má nejnižší vzdálenost elektrod. Na dalších jiskřištích už je napětí zvětšené o napětí předešlých kondenzátorů, proto je mezera mezi nimi větší.

Při průrazu všech jiskřišť jsou tyto jiskřiště spojená v sérii s týlními odpory R_t (zeleně naznačené na **Obr. 17 a**) a jejich napětí se tak sečtou a tvoří výsledný impuls na testovaném objektu. Týlní rezistory mají větší odpor než jiskřiště, aby na nich mohlo dojít k průrazu a systém tak správně fungoval. [1], [6]

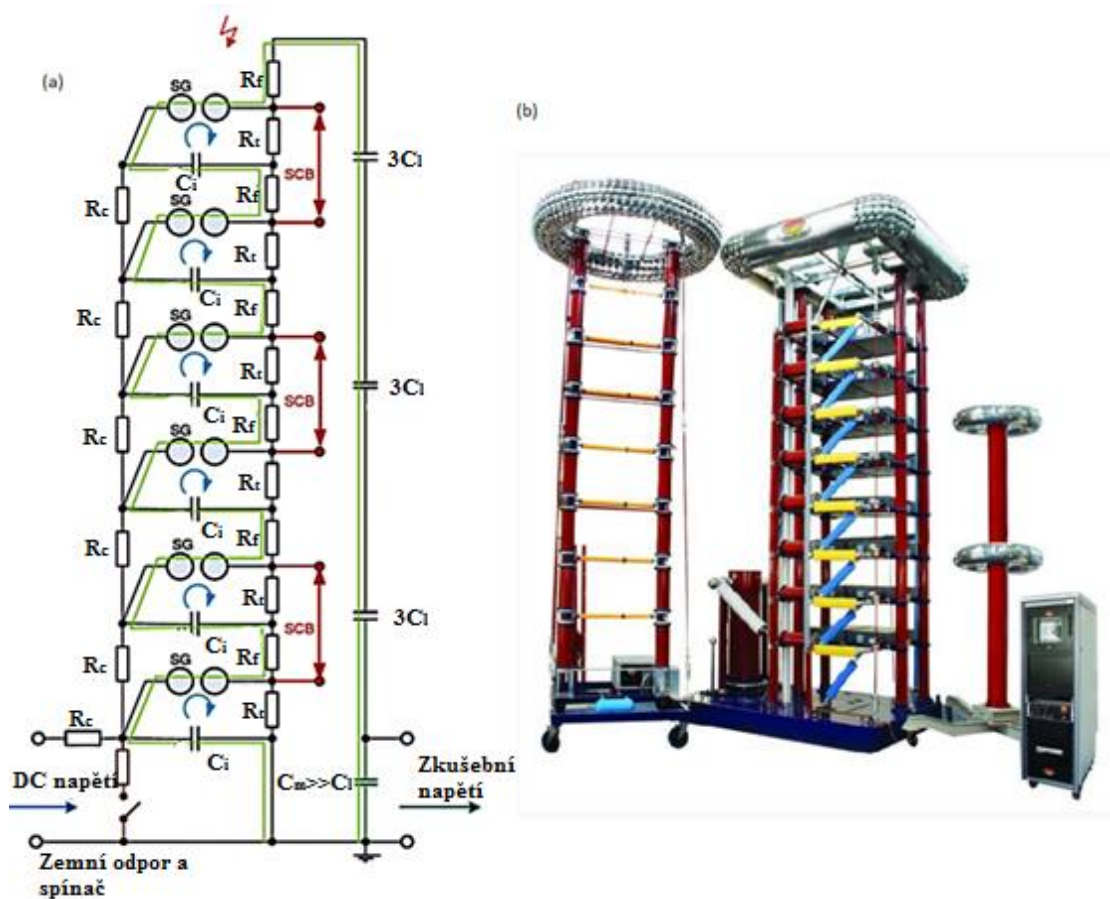
Výstupní impulsní napětí U_{in} závisí na činiteli účinnosti η , vstupním napětí U_0 a počtu stupňů n :

$$U_{in} = n \cdot \eta \cdot U_0 \quad (2.32)$$

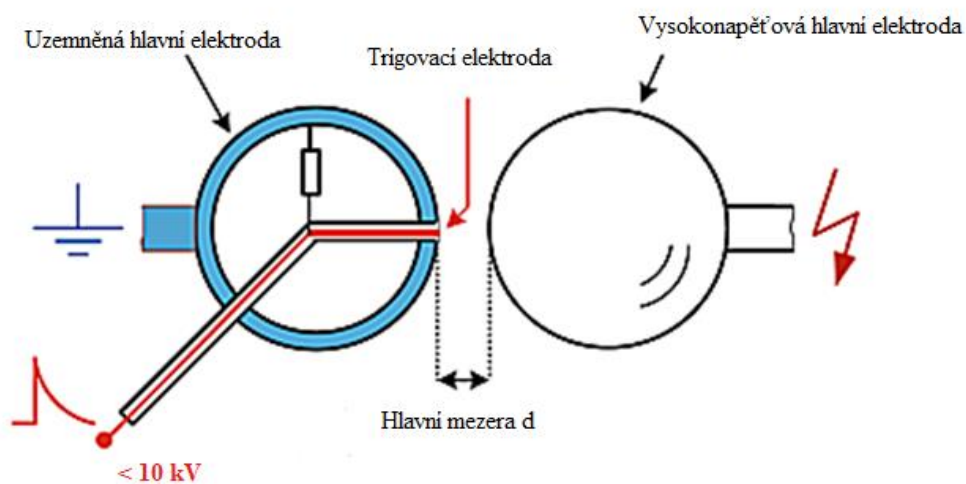
Termín

$$U_{0n \max} = n \cdot U_0 \quad (2.33)$$

se nazývá tzv. kumulativní nabíjecí napětí generátoru a často se označuje jako jmenovité napětí impulsního systému. Ovšem platí $U_{0n \max} > U_{in \max}$ a z tohoto důvodu je třeba při napěťových zkouškách počítat s činitelem účinnosti, protože na výstupním testovaném objektu se právě objeví hodnota U_{in} . [1]



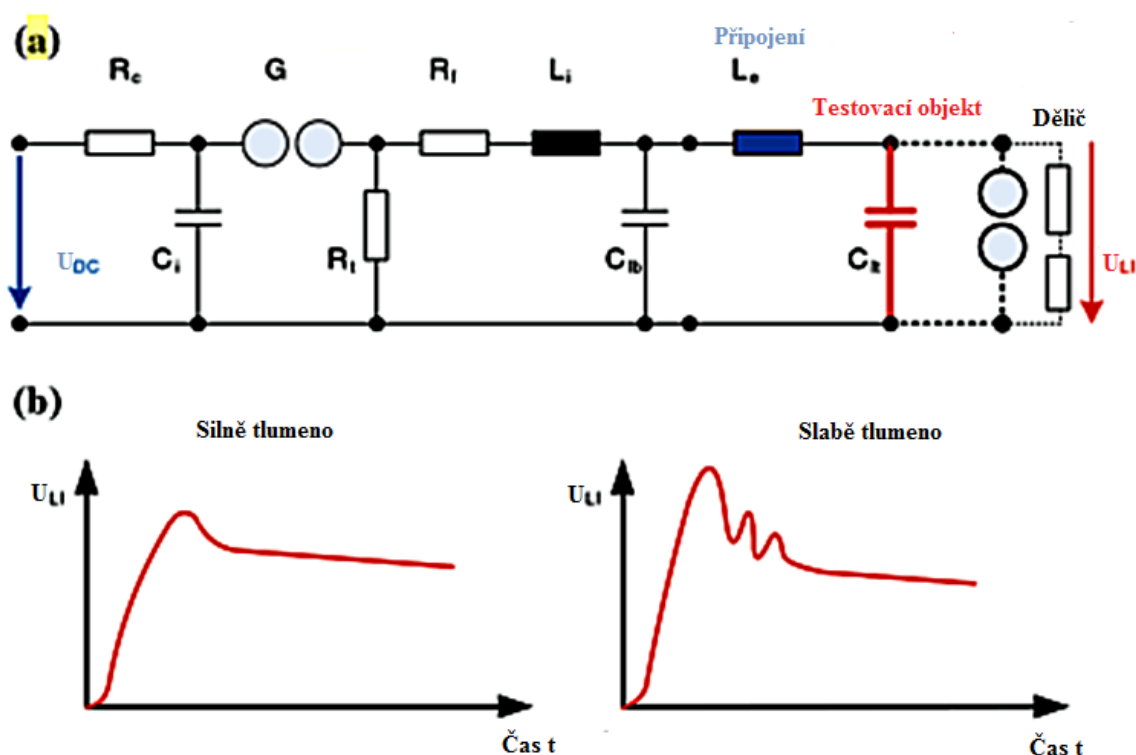
Obr. 17 a Schéma zapojení šesti stupňového impulsního generátoru. [1] b Osmi stupňový impulsní generátor [7]



Obr. 18 Trigatronová soustava sloužící ke spuštění jiskřiště na prvním stupni [1]

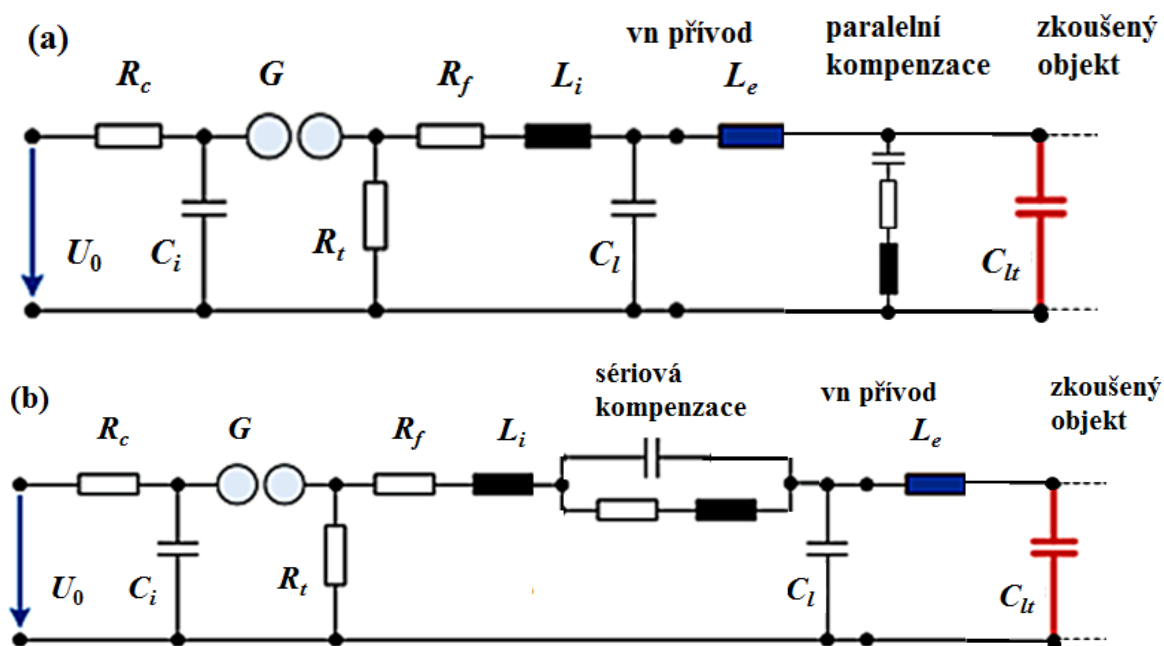
Do této doby není uvažován vliv indukčnosti na výsledné impulsy. Indukčnost je příčinou tlumených oscilací, které jsou superponované na aperiodický napěťový impuls. Na tlumení oscilací závisí čelní odpor. S jeho rostoucí hodnotou potlačuje oscilace lépe. Pro atmosférické impulsy se jeho hodnota pohybuje v desítkách ohmů a vlivem indukčnosti samotného generátoru a připojeného objektu vznikají oscilace. Pro generování spínacích impulsů je hodnota čelního odporu v řádech několika stovek ohmů, proto tedy oscilace potlačí úplně.

Na jeden metr smyčky tvořené nabíjecím proudem přes zátěžové kapacity a čelní odpory (na **Obr. 17 a** zelenou barvou) připadá zhruba $1 \mu\text{H}$. Vlastní indukčnost generátoru může být zlepšena jeho kompaktnějším designem – u těch lepších je to vlastní indukčnost menší než $4 \mu\text{H}$ na stupeň. Pro snížení indukčnosti čelních odporů lze využít bifilárního vinutí, což je protisměrné navinutí dvou drátů, které tak vykompenzují magnetické pole. Zbytková indukčnost je dána délkou nosné trubky.



Obr. 19 a Ekvivalentní obvod impulsního generátoru s indukčnostmi. **b** Příklad silně a slabě tlumeného impulsu [1]

Pro kompenzaci nežádoucích indukčností se používají dvě základní zapojení – paralelní a sériová (**Obr. 20**).



Obr. 20 a Paralelní kompenzace indukčnosti obvodu. b Sériová kompenzace indukčnosti obvodu [1]

Sériová rezonance zabraňuje pronikání vyšších frekvencí do kapacitního zkoušeného objektu. Kompenzační odpor a indukčnost musí být přizpůsobena velikosti čelního odporu R_f a vnitřní indukčnosti L_i . I kompenzační kapacita musí být přizpůsobena zátěžové kapacitě C_l .

Tab. 3 Indukčnosti dalších částí obvodu [1]

délka připojení (m)	Jednotlivý vodič d = 2 mm (μH)	Kovová fólie w = 10 cm (μH)	Kovová trubka d = 10 cm (μH)	Kovová fólie w = 50 cm nebo 2 folie s rozpěrkou mezi (μH)
1	1,37	0,70	0,59	0,40
10	1,83	1,26	0,96	0,84

3 Vysokonapět'ové zkušební pracoviště

Návrh vysokonapět'ového zkušební pracoviště se vždy odvíjí od toho, k čemu přesně má taková laboratoř sloužit. Důležitými faktory jsou druh a velikost požadovaného napětí. Dá se říci, že se každé pracoviště navrhuje individuálně přesně na míru daným požadavkům a neexistuje tak přesná instruktaž, podle které by vznikaly všechny laboratoře stejně.

3.1 Stručný přehled testovacích kritérií

Tab. 4 Druhy testů podle uživatelů vysokonapěťových zkušebních systémů [1]

	Rutinní testy nových či repasovaných HV zařízení	Typové testy nově vyvinutých HV zařízení	Výzkum a vývoj nových HV zařízení	Testy pro vývoj HV měření a kalibrací	Testy pro praktický výcvik a výuku
Výrobce a údržba zařízení pro elektrizační soustavu				-	-
Společnost pro výrobu, přenos a distribuci el. en.				-	-
Výzkumná instituce a zkušební laboratoř					-
Měřicí a kalibrační laboratoř	-	-			-
Univerzita a technická škola	-				

	Nutné
	Užitečné, nikoliv nutné
-	Není obvykle potřeba

Tab. 4 ukazuje, jak daní uživatelé zkušebních systémů provozují testy zařízení. Tmavě šedou barvou jsou vyznačeny ty testy, které jsou nutně vyžadované, světle šedou barvou jsou užitečné zkoušky a bílou barvou zařízení, která nejsou potřeba testovat.

Tab. 5 Zkušební systémy pro různé typy testů [1]

	AC zkušební systém	DC zkušební systém	Impulsní zkuš. systém
Rutinní testy nových či repasovaných HV zařízení	< 1200 kV	-	< 2000 kV
Typové testy nově vyvinutých HV zařízení	< 1500 kV	< 1500 kV	< 4000 kV
Výzkum a vývoj nových HV zařízení	< 1500 kV	< 1500 kV	< 4000 kV
Testy pro vývoj HV měření a kalibraci	< 400 kV	< 400 kV	< 800 kV
Testy pro praktický výcvik a výuku	< 200 kV	< 300 kV	< 800 kV

	Nutné vybavení
	Užitečné, nikoliv nutné
-	Není obvykle potřeba

Uvedená napětí v **Tab. 5** značí maximální jmenovitá napětí zkušebního zařízení. Většinou závisí jmenovité napětí zkušebního zařízení na nejvyšším jmenovitém napětí testovacího

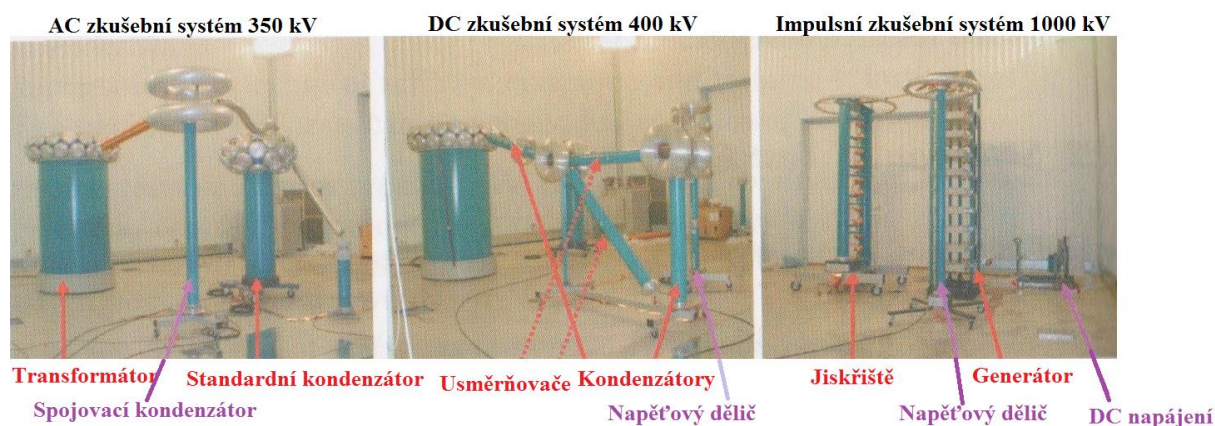
objektu.

Zkušební systémy pro rutinní testy musí být schopné zajistit testování výrobků nyní a v následujících deseti letech. Nejdůležitějšími zkouškami rutinních testů jsou ty střídavé. Zkoušky impulsním napětím se vyžadují u rutinních testů pouze v ojedinělých případech jako jsou třeba transformátory. Stejnoseměrné zkoušky pro rutinní testy jsou v současné době málokdy využívány, ale do budoucna se plánuje jejich rozvoj při rozšíření stejnosměrných systémů.

Tab. 6 Speciální příslušenství pro různé typy vysokonapěťových testů [1]

	Stínění pro PD měření	Zařízení pro umělý déšť	Komora pro umělé znečištění	Klimatická komora	Olejová nádrž	Nádrž se stlačeným plynem	Korónová klec
Rutinní testy nových či repasovaných HV zařízení			-	-			-
Typové testy nově vyvinutých HV zařízení							
Výzkum a vývoj nových HV zařízení							
Testy pro vývoj HV měření a kalibraci		-	-	-	-	-	-
Testy pro praktický výcvik a výuku		-	-	-		-	-

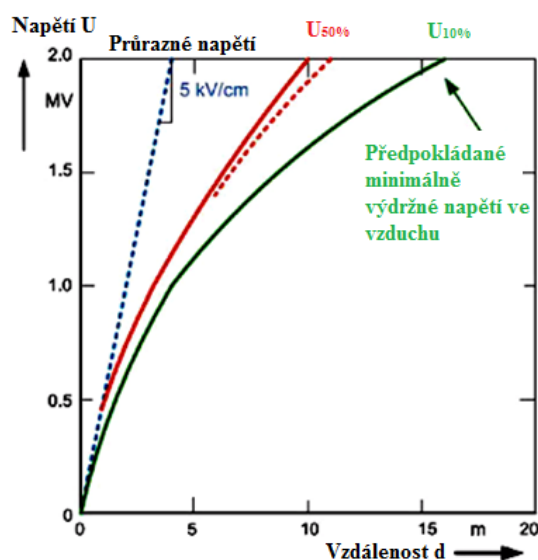
	Nutné vybavení
	Užitečné, nikoliv nutné
-	Není obvykle potřeba



Obr. 21 Napěťové zkušební systémy v laboratořích [1]

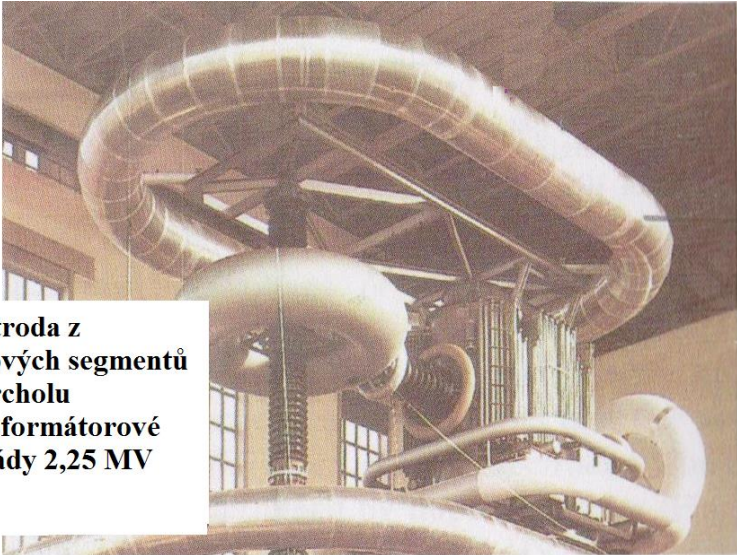
3.2 Návrh pracoviště

Velikost zkušební laboratoře závisí na velikosti testovaných zařízení, potřebné vzdálenosti mezi zkoušeným objektem a uzemněnými předměty nebo zařízeními pod napětím. Tento odstup je nutný pro eliminaci vlivu těchto prvků na testovaný objekt. Vzdálenost ve vzduchu mezi zkušebním systémem a jeho okolím musí vydržet alespoň 120 % jmenovitého napětí zkušebního systému. Pro spínací impulsní a střídavá zkušební napětí 2 MV by se potřebná vzdálenost mezi zkušebním zdrojem a ostatními předměty pohybovala okolo 16 metrů (**Obr. 23**). Taková vzdálenost je však ekonomicky velice náročná, tudíž se využívá k zajištění výdržného napětí vhodné stínění a řídicí elektrody, které upravují elektrické pole.



Obr. 22 Výdržné napětí pro uspořádání tyč – deska ve vzduchu [1]

Přijatelná maximální intenzita elektrického pole pro velké elektrody je pro vrcholovou hodnotu střídavého napětí a stejnosměrné napětí 10–15 kV/cm. U impulsního napětí je tomu 15–20 kV/cm. Do 2 MV se používají kulové či prstencové elektrody. Pro vyšší napětí než 2 MV se využívá složených elektrod svářených z válcových segmentů (**Obr. 24**).



**Elektroda z
válnových segmentů
na vrcholu
transformátorové
kaskády 2,25 MV**

Obr. 23 Elektroda z válkových segmentů [1]

Důležitým parametrem na začátku projektování je velikost pracoviště. Může se jednat jak o samostatnou místnost pro menší napětí, tak i celou plochu s mnoha pomocnými místnostmi kolem. Hlavním kritériem, které určuje, jak velké pracoviště bude, je velikost zkušebního napětí. Je vhodné mít i menší zkušební laboratoř pro nižší napětí.

Mezi pomocné místnosti patří například laboratoř pro testování kabelů, která má své vlastní stínění, nebo třeba laboratoř umělého znečištění.

Jako nejvhodnější tvar zkušebního pracoviště se jeví obdélníkové. Lze je jednoduše rozdělit na dvě oddělené zkušební plochy pomocí bezpečnostních plotů pro paralelní zkoušky. Poměr mezi šířkou w a délkou l pracoviště závisí na druhu použitého napětí. Pro zkoušky střídavé a impulsní se poměr w/l pohybuje mezi 0,5 až 0,6. V případě použití všech tří zkoušek – tedy střídavé, stejnosměrné a impulsní – je to hodnota v rozmezí od 0,7 do 0,8.

Při návrhu je dále důležité samotné stínění a zemnění.

Je nezbytné uzemnění budovy, hlavně z důvodu úderu blesku. Toto zemnění zahrnuje ocelovou výztuž budovy, zemnicí elektrody a další zemnicí tyče. V případě rozsáhlejšího komplexu jsou jednotlivá uzemnění spojena.

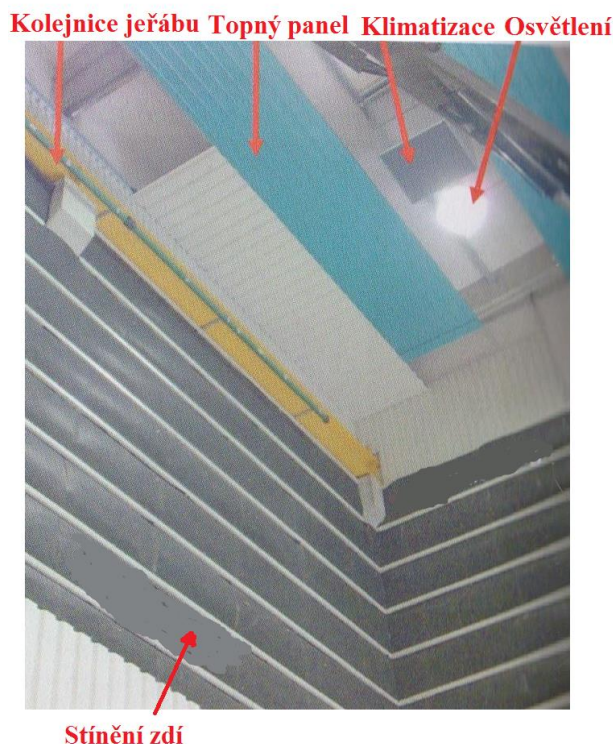
Uzemnění zkušebního pole se realizuje pomocí zemnicích tyčí, které se vnoří několik metrů pod zem. Efektivní zemnicí odpor zemnicích tyčí by neměl překročit 2Ω .

Elektromagnetické pole může narušovat měření. Z principu Faradayově kleci je známo, že uvnitř kovové klece neexistuje žádné elektrické pole. Z tohoto důvodu se laboratoře stíní proti elektromagnetickému poli uzavřenou kovovou konstrukcí, která je oddělena jak od země, tak

od uzemněné budovy, a v jednom místě je připojení k uzemnění zkušebního pole.

Všechna tato zemnění musí být spojena do jednoho společného bodu, aby byl zajištěn společný potenciál a aby nevznikaly smyčky, které by mohly negativně působit na vznik zvukových signálů.

Mezi další požadované stínění patří stínění stěn a stínění stropů, které zahrnuje tepelné panely, osvětlení či klimatizaci. Nedílnou součástí je i stínění dveří, které je jedno z těch nejdražších. [1]



Obr. 24 Stínění stropu laboratoře [1]

Energie pro vysokonapěťové laboratoře se nejčastěji odebírá ze sítí vysokého napětí. Pro tento účel by mělo být použito i více distribučních transformátorů v závislosti na jejich využití – maximální požadovaný zkušební výkon, výkon pro řídicí a měřicí systémy či výkon pro pomocná zařízení. Místnost pro napájení, která je samozřejmě také stíněná, by se měla v pracovišti nacházet poblíž vysokonapěťové zkušební haly.

Zařízení pro tvorbu umělého deště musí být navrženo tak, aby dokázalo zajistit správně svoji funkci pro největší vysokonapěťové zařízení v laboratoři. Na podlaze tak musí být vhodné odvodňovací kanály.

Komora pro umělé znečištění musí být vybavena rozprašovacím systémem napojeným k vodě a stlačenému vzduchu. Průchodka v této komoře musí vydržet zhoršené podmínky. Veškerý materiál v tomto znečištěném prostředí musí odolat korozním účinkům.

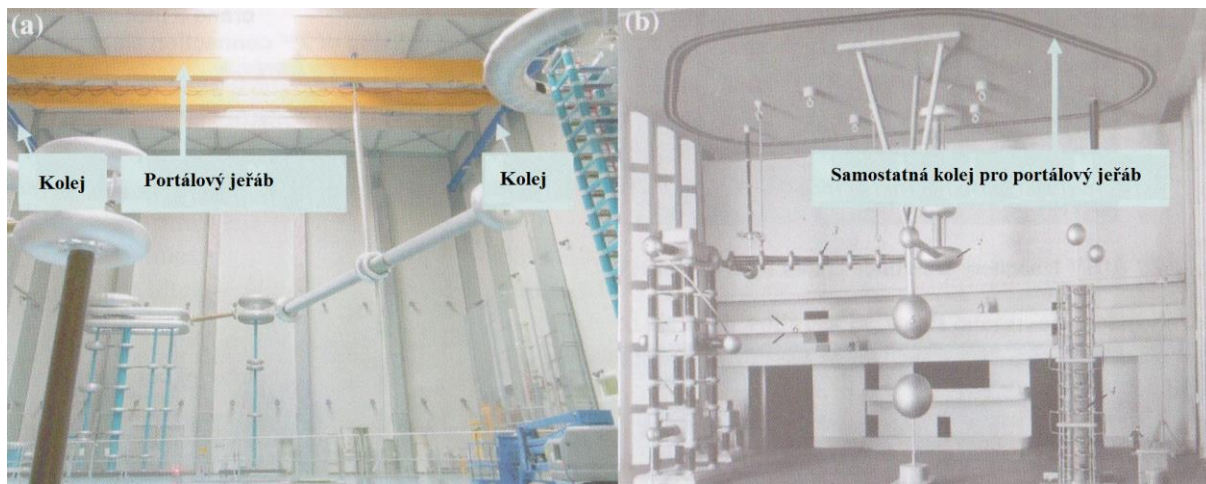
Pro různé komponenty, jako jsou například olejové nádrže nebo zkušební transformátory, je možno využít umístění pod povrchem podlahy v různě velkých žlabech. Ty musí být pečlivě dimenzovány společně se stíněním podlahy a zemnicím systémem. Všechny zdi i podlaha žlabu musí být taktéž stíněny. Nádrže je nutno izolovat od stíněné podlahy. [1]

V těchto laboratořích se často využívá umělého osvětlení. Okna se zde většinou nenachází vůbec. V některých případech, pokud je potřeba větších montážních prací, jsou instalována okna s kovovými rámy, které jsou spojené se stíněním. Možností je také zatemnění oken.

Ve stíněných místnostech se používají převážně žárovky, které nezpůsobují rušivé signály. Nezbytnou součástí osvětlení je i samostatné nouzové osvětlení.

Vysokonapěťová zkušební zařízení by měla být udržována v rozmezí teplot mezi 10 °C a 35 °C. U řídicích a měřicích systémů je vyžadována teplota od 15 °C až do 30 °C. Instalace vytápěcího systému je tak nutná v případě, že teplota pracoviště klesne po delší dobu několika dní pod 10°C. Místnosti s napájením nevyžadují vytápění, pokud teplota neklesne pod 5 °C. Je doporučeno mít i klimatizační jednotky udržující teplotu kolem 20 °C. Moderním a nejvhodnějším vytápěním velkých laboratoří je stropní vytápění sálavými panely. Další nedílnou součástí laboratoří je ventilační systém, který zabraňuje v případě tepelných zkoušek náhlému přehřívání prostorů.

Pro přemísťování těžších laboratorních komponentů se nejčastěji využívá portálových jeřábů. Ty můžou jezdit po dvou kolejích nacházejících se po straně laboratoře, ale pro pracoviště, kde jsou komponenty zavěšené ve stropě, se hodí jeřáby pohybující se po samostatné koleji (**Obr. 20**). V případě použití jeřábů na dvou kolejích je možné zbavit se problémů se zavěšenými předměty tak, že použijeme několik jeřábů, kde každý plní svou danou funkci v daném prostoru pracoviště.



Obr. 25 Portálové jeřáby **a** Na dvou kolejích. **b** Na jedné koleji [1]

Jednotlivá zkušební pracoviště s přilehlým prostorem jsou oddělena v bezpečné vzdálenosti bezpečnostními ploty s minimální výškou dvou metrů a maximální velikostí mřížky 4 centimetrů. Jednotlivé prvky plotu musí být spojené elektricky a uzemněné do společného bodu.

Součástí zabezpečení je i barevná výstraha – značky nebo světla. Červená značí, že je obvod odpojen a pod napětím. Zelená značí bezpečnou oblast pro vstup. Varovné značení musí být umístěno u každých dveří. Navíc musí být každá zkušební zóna vybavena nouzovými vypínači. [1]

4 Závěr

Prvním úkolem této práce bylo shromáždit informace o vysokonapěťových zdrojích využívaných v laboratořích vysokého napětí.

V první části b informace o zdrojích stejnosměrného napětí, kde byly vybrány dva důležité zdroje – jednocestný usměrňovač a násobič s názvem Greinacherova kaskáda.

Druhá část byla zaměřena poněkud detailněji na využívané zdroje pro střídavé napětí z důvodu důležitosti těchto zkoušek pro provozní napětí. Byly popsány rozdíly a funkce jednotlivých typů transformátorů a hlavně transformátorové kaskády. Dále byly vybrány systémy založené na rezonančních obvodech a s nimi spjaté druhy využívaných tlumivek.

V části zkušebních zdrojů pro atmosférické a spínací impulsní napětí byl věnován hlavní prostor pro vícestupňový generátor v Marxově zapojení, který dokáže napodobovat tyto impulsní vlny napětí.

Druhým úkolem práce byl návrh zkušebního pracoviště. Uvedeny zde byly základní kritéria, podle kterých se vybírá vhodná volba velikosti prostorů, stínění, zemnění, napájení či třeba osvětlení laboratoře.

Práce byla vypracovaná podle zásad uvedených v zadání práce. V dostatečné míře bylo věnováno přehledu napájecích systémů a požadavkům na platné normy pro tyto zkoušky.

Při návrhu pracoviště byly zmíněny jen základní a stručné požadavky na aplikaci této problematiky. V rozsahu bakalářské práce zde nejsou sepsány nikterak detailnější zásady navrhování takovéto laboratoře.

Řešením tohoto problému by mohla být například diplomová práce o větším rozsahu zabývající se právě tímto návrhem pracoviště.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAUSCHILD, Wolfgang a Eberhard LEMKE. *High-voltage test and measuring techniques*. Berlin: Springer, 2014. ISBN 978-364-2453-519.
- [2] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. *Vysoké napětí a elektrické přístroje* [online]. In: . [cit. 2017-06-04].
- [3] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978.
- [4] ČSN EN 60060-1:2011: *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*.
- [5] BUREŠ, Jiří. *Měřicí sestava pro zkoušky vysokým napětím* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z:
https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18795/1/DP_Bures_2015.pdf
- [6] *Marxův generátor* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/1697-marxuv-generator.html>
- [7] Voltage impulse generator. In: *WSTS* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z:
<http://www.wstestsystems.co.in/voltage-impulse-generator.htm>