

## Úloha číslo 0.

Velká část měření v praktiku z elektřiny a magnetismu využívá k měření systém  $\mu$ LAB, který je tvořen počítačem řízenou měřicí jednotkou a sadou modulů pro zapojování prvků a generování a měření napětí. Cílem úvodního praktika je seznámení se s bezpečností práce, organizací praktik a s filozofií práce se systémem  $\mu$ LAB.

## : Bezpečnost

Práce s elektrickou energií může vést ke vzniku úrazů nebo majetkových škod. Proto je nutné dodržovat určitá bezpečnostní opatření. K základním předpisům, které se problematice bezpečnosti věnují, patří vyhláška č. 50/1978 Sb. „O odborné způsobilosti v elektrotechnice“. Ta jednak rozděluje pracovníky podle jejich kvalifikace na pracovníky

1. *seznámené*, kteří byli seznámeni s předpisy o zacházení s elektrickými zařízeními a upozorněni na možné ohrožení;
2. *poučené*, kteří byli seznámeni s předpisy pro činnost na elektrických zařízeních, jsou v této činnosti školeni, byli seznámeni s možností ohrožení a s poskytováním první pomoci. Do této kategorie patří i studenti, kteří absolvovali přednášku o bezpečnosti práce a první pomoci při úraze elektrickým proudem a kteří o tom podepsali zápis;
3. *znalé*, kteří mají příslušné odborné vzdělání a po zaškolení složili zkoušku ve stanoveném rozsahu;
4. další kategorie pracovníků,

jednak definuje povinnosti organizací ohledně kvalifikace a zkoušení pracovníků. Další významné předpisy pak jsou normy ČSN 34 3100, ČSN 34 3108 a ČSN 33 1310<sup>1</sup>.

Studenti, jakožto osoby poučené, v laboratoři pak mohou:

- samostatně obsluhovat jednoduchá elektrická zařízení všech napětí;
- pracovat na vypnutých a zajištěných částech nízkého napětí;
- pracovat v blízkosti nekrytých částí pod napětím, pro zařízení nízkého napětí ve vzdálenosti větší než 20 cm s dohledem.
- na částech vysokého a velmi vysokého napětí, které je vypnuto a zajištěno, mohou pracovat s dohledem a v blízkosti těchto částí pod napětím mohou pracovat pod dozorem ve vzdálenosti podle ČSN 34 3100.

Na zařízeních pod napětím pracovat nesmějí. Práce *podle pokynů* znamená, že byly dány nejnnutnější pokyny a za dodržování bezpečnostních předpisů zodpovídá pracovník sám. Práce *s dohledem* znamená, že byly dány podrobné pokyny a osoba provádějící dohled se před začátkem práce přesvědčí o provedení nutných bezpečnostních opatření a v průběhu práce provádí kontrolu jejich dodržování. Práce *pod dozorem* se provádí za trvalé přítomnosti dozorující osoby, která je zodpovědná za dodržování bezpečnostních předpisů.

Elektrická napětí se podle velikosti dělí na:	malá napětí	do 50 V
	nízká napětí	50–600 V
	vysoká napětí	600–30 000 V
	velmi vysoká napětí	30–300 kV
	zvláště vysoká napětí	300–800 kV
	ultra vysoká napětí	nad 800 kV

**Povinnosti** V souvislosti s provozem elektrických zařízení jsou kladeny povinnosti na *zaměstnavatele*, který daná zařízení provozuje. Ten může používat pouze zařízení a přístroje ověřené autorizovanou zkušebnou za podmínek stanovených výrobcem, zařízení musí pravidelně udržívat a revidovat, obsluhou zařízení smí pověřovat jen pracovníky s odbornou způsobilostí, musí pracovníky školit a poskytovat jim potřebné ochranné a pracovní pomůcky. *Zaměstnanci* pak musí dbát na bezpečnost svou i dalších osob, dodržovat příslušné předpisy, používat předepsané ochranné a pracovní pomůcky a účastnit se školení, výcviku a zkoušek.

**Účinky elektrického proudu<sup>2</sup>** Zdravý člověk začíná pociťovat proud o velikosti asi 5 mA (jazykem je však možno registrovat i proudy 50  $\mu$ A), první nepříjemné projevy (brnění, cukání) a slabé svalové křeče člověk registruje při velikosti proudu asi 7 mA, ale stále je schopen se sám pustit vodiče (dochází

<sup>1</sup>Normy týkající se elektrotechniky začínají čísly 33 až 38.

<sup>2</sup>Uvedené údaje se mohou v literatuře lišit, jedná se o průměrné hodnoty. U konkrétních osob závisí na pohlaví, věku a jejich fyzické kondici.

jen k podráždění nervové a svalové soustavy). Od proudu asi 13 mA se už sám nepustí. Při proudu 25 mA se objevuje ztížené dýchání a případně lehké bezvědomí, ale průchod proudu nemusí mít trvalé následky. Dále se objevuje pocit tepla a hučení v uších. Proud o velikosti 50 mA už způsobuje těžké bezvědomí a zástavu srdeční činnosti (případně fibrilaci srdečních komor) a po delší době působení zanechává trvalé následky. Proud vyšší než 100 mA způsobuje smrt. Pro účinky proudu  $I$  není důležitá jen jeho velikost, ale také doba působení  $t$ , čili celkový náboj  $Q = It$ . Náboj do 30 mC způsobuje pouze úlek, nad 85 mC už následky bývají smrtelné. Velikost poškození závisí i na místě průchodu proudu, nejškodlivější jsou proudy tekoucí přes srdce, mozek nebo míchu. V ČSN 33 2000 jsou takto stanoveny mezní hodnoty proudu a náboje, které jsou pro lidský organismus bezpečné:

	Proud		Náboj
	střídavý	stejnoseměrný	
Pro části, kterých se je nutno za provozu rukou dotýkat není	1,0 mA	3 mA	0,5 $\mu$ C
	3,5 mA	10 mA	50,0 $\mu$ C

Elektrický proud, procházející tělem, vyvolává také nepřímé účinky. Především způsobuje popáleniny vlivem Jouleova tepla, může způsobit oslnění elektrickým obloukem (který vzniká především při rozpojování vodivých cest) či působit elektromagnetickým zářením (které je jednak absorbováno tkáněmi, které se tímto ohřívají a může dojít k jejich poškození, jednak může dojít působením vysokofrekvenčních proudů k rozžhavení kovových předmětů, např. prstýnků, které mohou způsobit popáleniny). Dále může dojít k sekundárním úrazům způsobeným např. úlekiem při úrazu nebo upadnutím po přerušení průchodu proudu.

Ve svých účincích se liší proudy různých frekvencí, protože se liší způsob průchodu proudu. Buněčné membrány mají kapacitní charakter, a proto jsou pro stejnosměrný proud neprůchozí a dominantní je vodivost mezibuněčné tekutiny. Stejnoseměrný proud nevyvolává tak snadno svalové křeče, ale může v těle způsobovat elektrolytické pochody, které mohou, od určité prahové hodnoty, vést k rozkladu buněk a vleklým zdravotním potížím. Účinky střídavého proudu se do frekvence asi 100 Hz s frekvencí zvyšují, v rozsahu od 100 do 3000 Hz jsou úměrné  $\sqrt{f}$  a u vysokých frekvencí jejich účinek rychle klesá (při frekvenci nad 100 kHz nemá proud dráždivé účinky).

Velikost proudu, který při úrazu prochází lidským tělem, závisí na napětí zdroje, jeho vnitřním odporu, na odporu těla a na přechodových odporech (rukavice apod.). Nejvýznamnější tělním odporem je odpor kůže. Ten se mění v závislosti na vlhkosti (odpor suché kůže je asi 100–200 k $\Omega$ ), na době průchodu proudu (při vyšších proudových hustotách z počátku klesá, pak se ustálí, při nízkých hustotách v čase kolísá) i na psychickém a fyzickém stavu. Při napětích nižších než 20 V nedochází k průrazu pokožky. Celkový odpor těla závisí také na místě průchodu proudu – odpor mezi rukama je při 230 V asi 2000  $\Omega$ , při 1000 V už jen 500  $\Omega$  a méně.

Procházející proud vyvolává i magnetické pole. Jeho účinky však jsou v běžných případech zanedbatelné. Projevují se jen silná a dlouhodobá působení, a to např. změnou dráždivosti nervových struktur či ovlivněním průtoku tělních tekutin.

**Možnosti úrazu** K úrazu elektrickým proudem může dojít několika způsoby:

- **dotykem na živou část** elektrického zařízení při provozu, a to při současném dotyku na části s různým potenciálem (nejčastěji mezi živým vodičem a zemí). Jako **živá část** se označuje ta část zařízení, která je přímo určena k vedení proudu nebo je na ní napětí z funkčních důvodů, např. zásuvky či vodiče;
- **dotykem na neživou část** elektrického zařízení při jeho poruše. Protože **neživá část** je taková část zařízení, která není konstrukčně určena k vedení proudu, může se na ni objevit napětí jen nahodile (např. porušení izolace, kontakt s živou částí jiného zařízení apod.) a mělo by dojít ke spuštění ochrany zařízení;
- **krokovým napětím**, které se vyskytuje kolem vodiče, kterým prochází elektrický proud do země (např. spadlý drát, svodové proudy u rozvodů vysokého napětí). V okolí místa přechodu vzniká gradient elektrického napětí a tím může vzniknout i rozdíl potenciálu mezi pravou a levou nohou, tzv. **krokové napětí**. Velikost tohoto napětí závisí na elektrických parametrech, vzdálenosti od místa přechodu a na velikosti kroku. Bezpečná hodnota by neměla přesáhnout 90 V/m.

**Ochrany** Existuje několik základních přístupů, které snižují riziko zranění elektrickým proudem.

- **Zamezení dotyku** je ochranou, která se hodí pro části, které nepožadují častou údržbu. Spočívá v tom, že živou část učiníme nepřístupnou (náhodnému, úmyslnému či svévolnému) dotyku. Mezi základní ochrany patří ochrana *polohou*, při které je živá část chráněna při běžných podmínkách nepřístupným umístěním (např. elektrické vedení je umístěno vysoko nad zemí). Ochrana *zábranou*

využívá mechanické prostředky (ploty, mříže), které mají zabránit přístupu k zařízení. Obdobně se používá ochrana *krytím*, která se od ochrany zábranou liší v tom, že bývá přímo součástí elektrického zařízení a často má i jiné funkce (např. zařízení mechanicky chrání). Pro označení stupně krytí se používá značka ve tvaru „IP xy“, kde první číslo udává stupeň odolnosti vůči mechanickému vniknutí (0 – bez ochrany, 1 – dlaně, 2 – prstu, 3 – hrubého nástroje, 4 – jemného nástroje, 5 – prachu částečně a 6 – prachu zcela) a druhé číslo stupeň odolnosti proti vniknutí vody (0 – bez ochrany, 1 – kapající vody, 2 – mírného deště, 3 – prudkého šikmého deště, 4 – stříkající vody, 5 – tryskající vody, 6 – zaplavení, 7 – ponoření, 8 – ponoření pod tlakem). Ochrana *izolací* je taková ochrana živých částí, že je nebezpečný dotek vyloučen. K ochraně nedostačuje použití tzv. provozní izolace, která je nutná pro správnou funkci zařízení, ale musí jít buď o izolaci přídatnou, nebo zesílenou. Ochrana izolací se na přístroji vyznačuje značkou dvou soustředných čtverců. Další formou ochrany je ochrana *doplňkovou izolací*, která ovšem není přímou součástí elektrického předmětu – jedná se např. o rukavice, nevodivé podlahy apod. Tato izolace nesmí být používána samostatně.

- **Omezení nebezpečných účinků** je ochrana, při které je zamezeno tomu, aby tělem procházel nebezpečný proud. Ochrana **bezpečným napětím** využívá skutečnosti, že proud protékající tělem je omezen velikostí napájecího napětí a odporu vodivé cesty. Bude-li tedy napětí zvoleno dostatečně malé, nemůže při kontaktu se živou částí téci tak velký proud, který by způsoboval poškození. Protože velikost odporu závisí na prostředí (to ovlivňuje i odpor těla), mění se **bezpečné napětí** podle charakteru okolního prostředí. Rozlišují se proto prostředí *normální*, ve kterých vnější vlivy nezvyšují možnost úrazu elektřinou, prostředí *nebezpečná*, ve kterých je zvýšená možnost úrazu (např. prostory s vysokou vlhkostí, teplotou, s otřesy nebo malý prostor) a prostředí *zvlášť nebezpečná*, ve kterých je trvale značně zvýšeno riziko úrazu elektrickým proudem (mokré prostředí, souběh více nebezpečných faktorů). Pro každé z těchto prostředí je stanovena hodnota bezpečného napětí.

Prostředí	Část	Bezpečné napětí [V]	
		střídavé	stejnoseměrné
Normální	živá	50	100
	neživá	50	120
Nebezpečné	živá	25	60
	neživá	50	120
Zvlášť nebezpečné	živá	12	25
	neživá	25	60

Omezit velikost proudu lze také použitím *měkčého zdroje*, tedy zdroje s velkým vnitřním odporem. Jeho svorkové napětí při zatížení (dotekem, zkratem) prudce klesá tak, že protékající proud klesne pod bezpečnou hodnotu. Oba typy ochrany jsou však vhodné jen pro malé výkony.

Proud, který v případě doteku teče lidským tělem, lze omezit také *oddělením obvodů*. Elektrické zařízení zde nenapájíme přímo ze sítě, ale přes pomocný transformátor. Dojde-li na zařízení k nebezpečnému jednopólovému dotyku, uzavírá se přes tělo pouze zemní proud sekundáru transformátoru, který bývá velmi malý (je dán svodovým proudem izolace transformátoru a kapacitním proudem). Další ochrana *pospojováním* spočívá v tom, že se všechny neživé vodivé části, které jsou v dosahu, vzájemně propojí. Proto nemůže mezi nimi vzniknout rozdíl potenciálů a nemůže dojít k ohrožení. Tato ochrana však nemůže zabránit vzniku napětí mezi pospojovanými částmi a zemí, proto se používá jen jako doplňková.

- **Ochrana včasným odpojením** pracuje tak, že při vzniku nebezpečné situace velmi rychle odpojí napájecí napětí. Tento způsob ochrany je použitelný i pro vysoké výkony, ale ochrana reaguje až v případě vzniku nebezpečí. *Napěťové chrániče*, které odpojují zařízení od napájení, jsou nastaveny tak, aby k odpojení došlo v okamžiku, kdy napětí na neživé části překročí stanovenou mez. Aby nedošlo k ohrožení, musí k odpojení dojít v dostatečně krátké době – 0,8s při  $U = 120\text{ V}$ , 0,4s při  $U = 230\text{ V}$  a 0,2s při  $U = 400\text{ V}$ . V případě *proudového chrániče* se do obvodu zapojí diferenciální transformátor, jehož tělesem prochází přívody chráněného zařízení. Proud, přicházející do zařízení, vyvolává v jádře transformátoru magnetický tok. Proud, který ze zařízení odtéká v případě bezchybného provozu, vyvolává magnetický tok stejné velikosti, ale opačného znaménka. Výsledný magnetický tok je proto nulový a na výstupu transformátoru je nulové napětí. Dojde-li k poruše na zařízení, nebude část odtékajícího proudu procházet přívodem zařízení a výsledný magnetický tok nebude nulový. Na výstupu transformátoru se proto objeví nenulové napětí, které odpojí napájení. V případě *nadproudové ochrany* se měří odběr proudu zařízením. Překročí-li úroveň bezpečného proudu, napájení zařízení se ihned odpojí.

**Ochrana přenosných zařízení** Přenosná zařízení, která se k napájení připojují pomocí pohyblivých přívodů zakončených vidlicí, se z hlediska ochrany proti nebezpečnému dotykovému napětí zařazují do čtyř tříd:

- 0:** zařízení je připojeno pouze pomocí dvou vodičů a bezpečnost je zajištěna pouze okolím (resp. není zajištěna nijak). Zařízení této třídy je u nás zakázáno používat.
- I:** zařízení je připojeno třemi vodiči, z nichž jeden je ochranný – spojuje všechny neživé části zařízení navzájem a také s ochranou napájecí sítě. Jestliže se na neživé části objeví napětí, musí zareagovat síťová ochrana.
- II:** zařízení je připojeno dvěma vodiči, ale bezpečnost je zajištěna pomocí izolace (pracovní + přídavné/zesílené). Do této třídy patří velká část přenosných zařízení.
- III:** zařízení je chráněno tím, že je připojeno na bezpečné napětí (k připojení musí být použito jiných zásuvek a vidlic než pro síťové napětí).

**První pomoc při úraze elektrickým proudem** Postup při poskytování pomoci vždy záleží na konkrétní situaci. K úrazu dochází dvěma způsoby: jednorázovým *elektrickým výbojem*, po němž už postižený není dále ve styku s elektrickým zařízením a trvalým *elektrickým proudem*, při kterém škodlivé účinky stále pokračují. Ve druhém případě je před poskytnutím pomoci nutno přerušit průchod proudu skrze tělo postiženého (je však třeba zajistit, aby přerušením proudu nedošlo k dalšímu, mechanickému úrazu, například upadnutím). K vyprostění postiženého z dosahu proudu je možno

- vypnout elektrický obvod pomocí vypínače, nouzových tlačítek (v laboratoři), jističů;
- násilným přerušením elektrického obvodu v případě nemožnosti obvod (vůbec nebo rychle) vypnout – provádí se dostatečně izolovaným předmětem jako jsou izolované kleště nebo sekera s dřevěným topůrkem; tento způsob je však omezen jen na napětí do 600 V, při kterých nehrozí nebezpečí vzniku elektrického oblouku;
- odtáhnutím postiženého tak, aby nedošlo k ohrožení zachránce vodivým kontaktem se zařízením nebo s **postiženým**, proto je potřeba vytvořit dostatečně izolující prostředí (odtažení *suchou* dřevěnou holí, stání na izolující podložce apod.); při přímém kontaktu se doporučuje odtažovat jen jednou rukou.

Následně je třeba přistoupit k zdravotní první pomoci.

- Nejprve je nutno zajistit základní životní funkce a ošetřit např. tepenná krvácení.
- Dále je třeba zjistit, zda nedošlo k zástavě srdce nebo dechu a tyto stavy ošetřit (v případě, že nedojde k obnovení srdeční a dýchací činnosti, rozhoduje o ukončení první pomoci lékař).
- Jako poslední se ošetří sekundární poškození jako je krvácení ze žíly, popáleniny, zlomeniny, šok apod.

V neposlední řadě je v případě úrazu třeba přivolat lékařskou pomoc a informovat vedoucího, a to i tehdy, když postižený nejeví známky poškození. Do příjezdu lékařské pomoci se nesmí postiženému podávat jídlo ani pití.

**Požární bezpečnost** Elektrická zařízení mohou způsobit požár v důsledku vysoké teploty při poruše zařízení, případně i z důvodu jejich funkce. K příčinám požárů může patřit přetížení nebo zkrat, elektrická jiskra nebo oblouk a zvětšení přechodového odporu. Při likvidaci požáru je nutno dbát na bezpečnost i předcházení zbytečným škodám, které mohou vzniknout nevhodným postupem nebo použitím nesprávného typu hasicího přístroje. Proces hašení bývá založen např. na separaci látek (tedy i zamezení přístupu kyslíku), zvýšení zápalné teploty, převodu na nehořlavé látky či zvýšení odvodu tepla.

- Pokud je zařízení pod napětím, nelze jej hasit vodou a pěnovými hasicími přístroji. Pokud je to možné, před hasením zařízení od napájení odpojíme.
- K hašení elektrických zařízení jsou vhodné hasicí přístroje sněhové (principem je ochlazení oxidu uhličitého při expanzi), práškové a tetrachlorové, ale jejich vhodnost závisí na dané situaci. Tetrachlorové hasicí přístroje není možno používat v uzavřených prostorách, kde není možno zaručit dobré větrání, ale lze s nimi hasit např. i benzíny a oleje, sněhové přístroje mohou způsobit poškození zařízení vlivem prudké změny teploty a práškové přístroje ztíží následné očištění zařízení.
- Hasicí přístroj je tlaková láhev, proto je po zahřátí nebezpečný.
- Elektrické zařízení po požáru smí uvést do provozu jen odborník, který zařízení prohlédne, odstraní závady a přezkouší.

- Zvlášť opatrně je třeba postupovat při hašení hořících osob – nejlépe je použít vodu nebo zamezit přístupu kyslíku.
- Po použití hasicího přístroje je nutno jej nahlásit k doplnění.
- Při hasení pamatujte na omezenou dobu použitelnosti hasicího přístroje. Je-li jich k dispozici více, používají se najednou, nikoliv postupně.
- Nevhodné použití hasicího přístroje může oheň i rozšířit (rozvířit). Hasit je třeba ohnisko požáru, a to z co nejmenší vzdálenosti.

**Chemické nebezpečí** V elektrotechnických laboratořích zpravidla chemické nebezpečí nehrozí. Může však k němu dojít v případě požáru nebo zvýšení teploty zařízení, zvláště těch, ve kterých se vyskytují plastové součásti (např. kryty). V takovém případě je nejlépe zajistit větrání, odstranit příčinu a místnost opustit.

Chemické látky se podle zákona č. 157/1998 (ve znění dle 352/1999) klasifikují do několika skupin. Pro označení jejich nebezpečnosti se používají **R-věty**, tj. označení písmenem R a číslem. Například „R 7“ znamená „Může způsobit požár“ (viz [http://www.mvcr.cz/2003/hasici/odbor/izs/oschs/vety\\_hasici.html](http://www.mvcr.cz/2003/hasici/odbor/izs/oschs/vety_hasici.html)). Pro označení podmínek zacházení se používají **S-věty**, například „S 3“ znamená „Uchovávejte v chladnu“.

## ⋮ Bezpečnostní pokyny ⋮

- Zapojovat přístroje do síťových zásuvek a zapínat je smí jen vyučující.
- Studenti mohou pracovat jen s počítačem, systémem  $\mu$ LAB a čelními stranami ostatních přístrojů.
- Při měření je zakázáno používat jiné zdroje než určené vyučujícím.
- Je zakázáno používat nechráněných zásuvek, tj. zásuvek mimo rozvody na pracovním stole.
- Jestliže si student není jist svým zdravotním stavem nebo svými schopnostmi, neprodleně to oznámí vedoucímu praktik a dále nesmí pracovat.
- Vedoucímu praktik je nutno hlásit *jakýkoliv* úraz, i ty nezpůsobené elektrickým proudem. U všech úrazů musí být pořízen zápis.
- Před měřením proveďte kontrolu stavu přívodních šňůr a přístrojů, jakékoliv poškození nebo podezřelé chování hlase vedoucímu a přerušte práci.
- Při práci se řiďte pokyny k zacházení s přístroji a postupujte podle návodů.
- Do laboratoří noste vhodný oděv, bez volných částí, používejte oblečení s dlouhými rukávy. Nenoste volně vodivé předměty (např. řetízky).
- Na pracovním místě udržujte pořádek, nepřemísťujte svévolně vybavení.

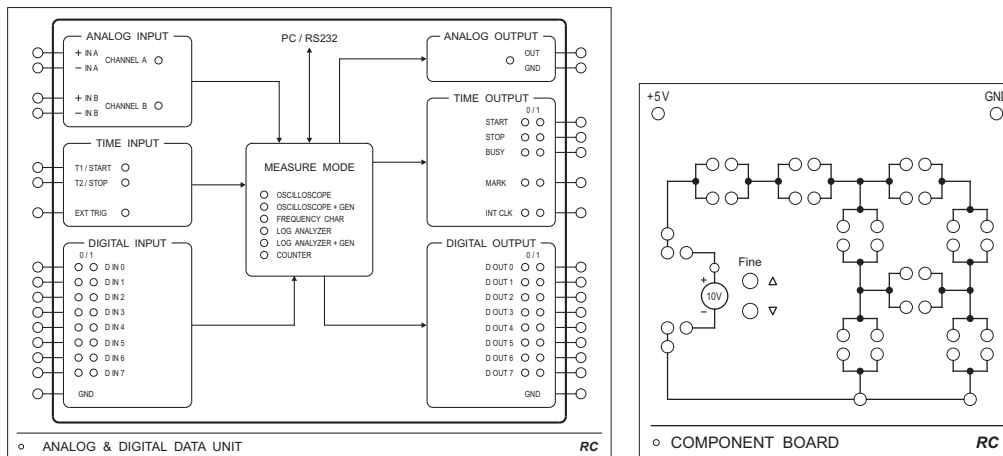
## ⋮ Systém $\mu$ Lab ⋮

Systém  $\mu$ LAB slouží ke školnímu ověřování zákonitostí elektrických a elektronických, a to prostřednictvím přímého fyzikálního procesu (nikoliv simulací). Sestává se z několika bloků. Základem je měřicí jednotka ANALOG & DIGITAL DATA UNIT, která je spojena s počítačem. Jednotka slouží k přesnému měření a vytváření napětí a lze ji ovládat pouze z počítače, a to programem RC2000. Tento program také výsledky měření ve vhodné formě zobrazuje.

K sestavování obvodů pak slouží moduly, prvky a panel. **Prvek** je jednoduchá součástka (rezistor, kondenzátor, dioda), která je připájena na modrou podložku opatřenou kolíky. Každý prvek je označen schématickou značkou a případně hodnotou (např. velikost odporu). K dispozici jsou i propojky, které nemají žádné označení. **Modul** je složitější elektronický obvod, který je umístěn v bílé krabičce (opatřené popiskem) a obsahuje zdířky, do kterých se zasunují buď vodiče nebo přímo prvky. Příkladem modulu je COMPONENT BOARD nebo FUNCTION GENERATOR. **Panel** slouží k upevnění modulů a k rozvodu napájecího napětí +5 V.

Jednotlivé moduly jsou opatřeny zdířkami, do kterých se zapojují buď přímo součástky (modul COMPONENT BOARD) nebo vodiče. Pokud slouží přednostně k zapojení prvků, jedná se o dvojici zdířek v konstantní vzdálenosti, mezi nimiž *není* zakreslena spojovací čára. Schéma vnitřního zapojení těchto zdířek je naznačeno modrou spojovací linkou, na které jsou případně vyznačeny uzly. Zdířky sloužící k připojení vodičů jsou zpravidla na funkčních modulech (např. FUNCTION GENERATOR) a bývají označeny podle své funkce (buď přímo u zdířky, nebo jsou v jednom bloku spolu s ostatními zdířkami a ovládacími prvky). Do zdířek je možno zasouvat pouze vodiče či prvky ze systému  $\mu$ LAB, jiné kolíky by je mohly poškodit.

Ovládací prvky na modulech jsou dvou typů. Jednak elektronické spínače, které po stisknutí (a uvolnění) změní stav modulu, jednak mechanické ovladače, které mění hodnotu uvedenou na mechanickém voliči. Druhý způsob ovládání se používá jen u odporových a kapacitních dekád.



Obrázek 1: Základní jednotka A&DDU a modul COMPONENT BOARD.

Posledním blokem systému  $\mu$ LAB je zdroj napětí DC SUPPLY +5V, který napájí A&DDU a panel. Před měřením je třeba jej zapnout uvedením vypínače do polohy „1“ (indikuje zeleně svítící dioda), pak se zapne počítač. Většina modulů má na vrchní straně dvě zdičky +5V a GND, které slouží k přivedení napájecího napětí. Zdičky propojte pomocí krátkých bílých vodičů opatřených barevnými konci s odpovídajícími zdičkami na panelu (zelené koncovky pro GND, červené pro +5V). Správné připojení modulu k napětí indikuje malá zelená dioda v levém dolním rohu, moduly by měly vydržet přepólování.

K propojování zdiček slouží barevně odlišené vodiče. Snažte se obvody zapojovat tak, aby vodiče plnicí různé „funkce“ měly různou barvu. Usnadněte tak orientaci v obvodě sobě i vyučujícímu. Při vypořádání vodičů dávejte pozor, aby nedocházelo ke zkratování volných konců. V případě běžných elektrických systémů by mohlo dojít k jejich poškození, v systému  $\mu$ LAB jsou zdroje elektronicky jištěny tak, aby obvodem nemohl procházet proud větší než 20 mA. Totéž platí pro vypořádání/zapojování součástek, při kterém může dojít k nežádoucím přechodným jevům.

**Popis základních modulů** V seznamu jsou uvedeny některé základní moduly a jejich funkce, ovšem jen ty, které se používají v praxi.

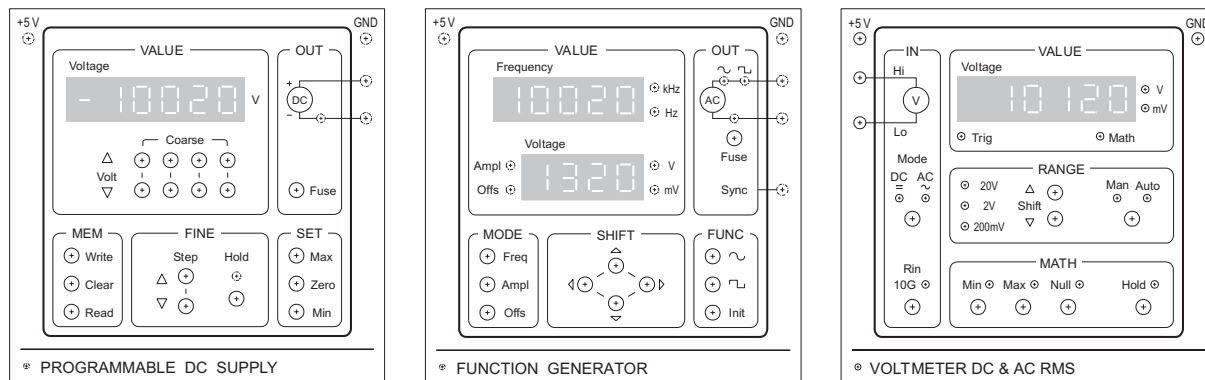
**A&DDU:** je základním měřicím prvkem systému  $\mu$ LAB, který je spojen (a řízen) s počítačem. Uvnitř obsahuje obvody, které měří vstupní napětí a obvody, které vytvářejí výstupní napětí. Na modulu jsou vstupy umístěny vlevo a výstupy vpravo. Ty vstupy, které jsou v dané chvíli smysluplně použitelné, jsou vysvíceny diodou. Uprostřed jednotky je blok MEASURE MODE, který nás informuje o tom, který měřicí režim je právě aktivní. Blok označený ANALOG INPUT slouží k přivedení dvou měřených napětí. Oba analogové vstupy CHANNEL A a CHANNEL B mají stejné vlastnosti, jsou od sebe i jiných vstupů galvanicky oddělené a jsou tzv. „osciloskopického“ typu, což znamená, že měří pouze časový průběh napětí a jejich vstupní odpor je velký (v ideálním případě by měl být nekonečný). Každý vstup má dvě zdičky označené např. +IN A, -IN A, do kterých je třeba připojit dva vodiče zapojené do měřeného obvodu. Vstupům je možno přiřadit libovolnou polaritu, ale s ohledem na grafické ztvárnění je potřeba oba vstupy zapojit shodně. K propojení použijte tzv. sondy (dvojice spojených vodičů), žlutou pro kanál A, modrou pro kanál B (aby barvy odpovídaly vykreslovaným průběhům), červený konec připojujte na „kladnou“ zdičku. V bloku ANALOG OUTPUT je jediný výstup, na kterém je v některých režimech počítačem generované napětí. Propojení s obvodem se provádí žlutou sondou, její červený konec se připojí na zdičku OUT. Výstupní napětí se zpravidla přivádí na vstup měřeného obvodu.

**COMPONENT BOARD:** je základní *pasivní* modul, který slouží k zapojování prvků. Obsahuje několik větví a umožňuje zapojení např. můstku. Na levé zdičky se zpravidla přivádí vstupní napětí (kladná polarita na horní, záporná na spodní). Do každého místa lze paralelně zapojit dva prvky, případně lze měřit napětí na daném prvku (připojením sondy). V místě pro zapojení prvku je příslušná větev rozpojena, je-li to třeba, musí se alespoň jeden pár zdiček spojit (např. pomocí propojky – modrého prvku bez označení – nebo zapojením ampérmetru, chceme-li měřit proud tekoucí větví). Na modulu je také umístěn zdroj pevného napětí +10 V, jehož výstupní svorky jsou druhé zleva. Chceme-li tento zdroj použít, musíme zdičky propojit s měřeným obvodem. Tlačítka FINE slouží k jemnému doladění velikosti napětí  $\sim 10$  V.

**PROGRAMMABLE DC SUPPLY:** je nastavitelný přesný zdroj stejnosměrného napětí v rozsahu  $\pm 10$  V. Napětí se odebírá ze zdírek v bloku OUT a jeho velikost lze nastavovat v bloku VALUE. Okamžitá hodnota napětí se zobrazuje na displeji a lze ji měnit pomocí tlačítek označených COARSE, každý pár tlačítek ovládá jeden dekadický řád. Zdroj je chráněn proti přetížení zkratem – zvýší-li se odběr proudu nad 20 mA, zdroj se odpojí a rozsvítí se červená dioda v bloku OUT. Po odstranění příčiny přetížení lze napájení obnovit stiskem FUSE.

**FUNCTION GENERATOR:** je zdroj časově proměnného napětí, který je schopen dodávat signály sinusové a obdélníkové. Výstupní signál se odebírá ze zdírek bloku OUT a je opět chráněn proti přetížení. Zelená dioda indikuje tvar průběhu, který lze volit tlačítky v bloku FUNC. Tlačítko INIT slouží k inicializaci modulu, tj. k nastavení výchozích hodnot. Nastavování výstupního napětí je trochu složitější než u stejnosměrného zdroje. V bloku VALUE jsou dva displeje, které zobrazují jednak frekvenci, jednak hodnotu napětí. Vedle každého displeje jsou dvě diody, které indikují použité jednotky (Hz/kHz a V/mV). Jedna číslice na displeji vždy bliká a její hodnotu lze měnit stiskem tlačítek se šipkami nahoru a dolů v bloku SHIFT. Tlačítka se šipkami vlevo a vpravo slouží k posuvu blikající číslice a umožňují měnit jiný dekadický řád. Při změně hodnot dochází k automatické změně rozsahu. Blok MODE určuje, který z parametrů zdroje budou měnit tlačítka v bloku SHIFT. Po stisku FREQ mění frekvenci zdroje, stiskem AMPL mění amplitudu signálu a stiskem OFFS mění posuv signálu vůči nulovému napětí, tj. stejnosměrnou složku signálu. Poslední dva parametry se zobrazují na stejném (spodním) displeji a k jejich rozlišení slouží příslušně popsání diody vedle displeje. Amplitudu napětí lze měnit v rozsahu 100 mV až 10 V, stejnosměrnou složku od  $-8$  do 8 V a frekvenci od 0,01 Hz do 10 kHz.

**VOLTMETER DC&AC RMS:** slouží k měření hodnoty stejnosměrného napětí nebo (skutečné) efektivní hodnoty střídavého napětí. Hodnota napětí se ukazuje na displeji, její jednotku indikují diody vedle. Měření trvá určitou dobu, proto je třeba před měřením nové hodnoty chvíli počkat. Měřené napětí se přivádí na zdířky v bloku IN a tlačítka MODE se vybírá měření stejnosměrného (DC) nebo střídavého (AC) napětí. Měřicí rozsah se přepíná tlačítky SHIFT v bloku RANGE a je indikován jednou z diod označených 20 V, 2 V nebo 200 mV.



Obrázek 2: Moduly PROGRAMMABLE DC SUPPLY, FUNCTION GENERATOR a VOLTMETER DC&AC RMS.

**R DECADE:** slouží k pohodlnému nastavování velikosti odporu. Dekáda se do obvodu připojuje pomocí dvou vodičů, které se připojí do zdírek napříč modulu. K dispozici jsou dvě dekády, „velká“ s odporem  $R \in \langle 0, 999 \rangle$  k $\Omega$  s krokem 1 k $\Omega$  a „malá“ s odporem  $R = 20 \Omega + \langle 0, 999 \rangle \Omega$  s krokem 1  $\Omega$ . Odpor  $R = 20 \Omega$  je u malé dekády z konstrukčních důvodů a je nutno ho vždy přičíst k údaji na voliči. Změna hodnoty odporu se provádí stiskem tlačítek + a – u příslušného řádu.

**C DECADE:** je obdobou odporové dekády, ale slouží k nastavování kapacity v rozsahu  $C \in \langle 0, 999 \rangle$  nF.

**L SET:** obsahuje pouze cívku s indukčností  $L = 1$  H a nenulovým vnitřním odporem, ale z konstrukčních důvodů je umístěna jako samostatný modul. Připojuje se obdobně jako dekády.

K měření se často využívá i externí digitální multimetr, nejčastěji pro měření proudu. K jeho spojení se systémem  $\mu$ LAB slouží speciální vodiče, které mají z jedné strany kolíky a z druhé „banánky“. Zelený vodič připojte na zdířku COM, červený vodič připojte na zdířku A, měříte-li proud, nebo V v ostatních

případech. Vlastní měřicí režim a rozsah je nutno zvolit otočným přepínačem a je nutno rozlišovat stejnosměrné (DC) a střídavé (AC) měření. Při změně režimu by měl být jeden z vodičů odpojen. Multimetr se zapíná tlačítkem ON a po určité době nečinnosti se sám vypíná.

## ⋮ Program RC2000 ⋮

Spuštění programu se provádí přes ikonu rc2000 na ploše počítače. Objeví se dialog, který obsahuje několik tlačítek. Ta slouží k výběru pracovního režimu – programu, který se bude používat. Pro tyto praktika jsou důležité programy OSCILLOSCOPE, V-A CHARACTERISTICS, FREQ CHARACTERISTICS a OSCILLOSCOPE & GENERATOR. Poslední tlačítko EXIT slouží k ukončení programu.

Zvolením některého programu zmizí úvodní dialog a otevře se hlavní okno (na některých počítačích se může otevírat maximalizované – pro přepnutí do jiných programů použijte klávesovou zkratku ALT+TAB, velikost okna nelze měnit). Úspěšné spuštění programu je indikováno rozsvícením diody s názvem programu na A&DDU. Rozsvítí se i diody u vstupů/výstupů, které má smysl využívat v tomto režimu. Ovládání jednotlivých režimů se liší podle jejich funkce, vždy však mají stejnou filozofii. Snaží se „kopírovat“ ovládání běžných tlačítkových přístrojů, nejsou k dispozici žádné nabídky (menu), vše se ovládá pouze myší, nastavování rozsahů apod. lze provádět pouze pomocí tlačítek „nahoru“ a „dolů“. Klávesnicí se vyplňují pouze popisky. Stiskem EXIT se hlavní okno uzavře a znovu se objeví dialog s výběrem programů.

Pokud se po spuštění objeví hláška, že A&DDU nebyla nalezena, je pravděpodobně vypnuto napájení nebo není jednotka propojena s počítačem. V prvním případě napájení zapněte a/nebo zkontrolujte napájecí přívody a stiskněte tlačítko Zkusit znovu. V druhém případě zavolejte vyučujícího.

### Popis obecných prvků programu

- LEGEND – popis názvu úlohy a jednotlivých měření.
  - EDIT – aktivuje popisová pole, lze změnit název úlohy, jméno experimentátora a popisky jednotlivých průběhů. Po stisku se tlačítko změní na END, které slouží k ukončení editace.
  - DELETE – vymaže obsah popisových polí.
- FILE – práce se soubory.
  - OPEN – otevření souboru z disku.
  - SAVE – uložení naměřených dat do souboru na disk, data jsou určena jen pro použití v programu RC2000 a nelze je otevřít v jiném programu
  - PRINT – obrazový výstup, po stisknutí se objeví nabídka s možností vytisknutí grafu (hezky formátovaný výstup, určený pro tvorbu protokolů), vytisknutí obrazovky (vhodné pro tvorbu dokumentace) a uložení obrazovky do souboru (shodné s předchozím, jen se obrazovka uloží do obrázku ve formátu BMP, vhodné pro protokoly odevzdávané v elektronické podobě). Před tiskem je vhodné nastavit popisky a legendy.
  - INIT – nastavení počátečních podmínek (stejných jako po startu programu, dojde i ke ztrátě popisků).
  - EXIT – ukončení programu a návrat k výběru měřicích režimů.
- ACQUISITION – volba měřicího módu. Pro běžné měření je vhodný mód NORMAL a následně RUN, pro analýzu více průběhů je určen mód SEQUENCE. Stavový panel umístěný v bloku ACQUISITION určuje stav A&DDU v průběhu měření (STOP, WAIT).
  - RUN – zapnutí měření, které se neustále opakuje a okamžitě reaguje na změny v obvodu. Při tomto režimu nelze měřené hodnoty ukládat a ani tisknout. Tlačítko je dvoustavové, opakovaný stisk měření vypne.
  - SINGLE – jednorázový start měření, po změření jednoho cyklu se data „zamrazí“ a zobrazí se graf, který do dalšího stisku tlačítka nereaguje na změny v obvodě.
- SEQUENCE – postupný záznam a zobrazení 1 až 4 měření do jednoho grafu. Měřené průběhy lze porovnávat a analyzovat navzájem mezi sebou, ale průběhy nejsou „živé“, tedy okamžitě nereagují na změny v obvodech. Postupný záznam se používá tehdy, chceme-li porovnávat reakci systému na změnu nějakých parametrů – nejprve zaznamenáme jeden průběh, pak změníme některé parametry a zaznamenáme nový průběh. Všechny průběhy pak můžeme graficky srovnávat. Režim postupného záznamu se vypne pomocí NORMAL.
  - M1, M2, M3, M4 – start jednotlivých měření, průběhy se vykreslují v barvě odpovídající teče vedle popisu tlačítka. Všechny průběhy mají stejné měřítko a jeho velikost je třeba zvážit před měřením, protože změnou rozsahu se všechny průběhy vymažou. (V různých režimech jsou tlačítka označena různě, např. B1.)



- CLR – smaže všechny křivky zaznamenané v sekvenci.
- GAIN nastavení rozsahu os v různých kanálech, matematických výsledků apod. Označení bývá doplněno dalším textem, podle konkrétního kanálu (např. GAIN (ALL), GAIN (III. QUADRANT)). Změna rozsahu se provádí stiskem příslušné šipky, při změně jediného rozsahu dochází k vymazání všech dat. Systém RC2000 je navržen tak, že nastavené zesílení ovlivní i přesnost měření. Proto se může stát, že při malém zesílení se budou vypisovat chybová hlášení.
  - CHA  $\uparrow \downarrow$  – nastavení rozsahu napěťové osy kanálu A.
  - CHB  $\uparrow \downarrow$  – nastavení rozsahu napěťové osy kanálu B.
- GRAPH – volba módu zobrazení křivek.
  - LINE – naměřené body jsou spojeny čarou.
  - POINT – naměřené body se nespojují.
- CURSOR – analýza dat pomocí kurzorů (ukazatelů), měří se např. napětí a proud v bodech 1 a 2 a počítá „odpor“ jejich směrnice, zobrazuje se časová poloha bodu, příslušná hramonická apod. Poloha kurzoru je v grafu indikována křížkem s číslem, pro některé hodnoty napětí nemusí být kurzor v grafu zobrazen. Kurzory nelze použít v režimu RUN.
  - ON – zapnutí kurzorů.
  - 1  $\leftarrow \rightarrow$  – posuv kurzoru 1 po naměřených křivkách.
  - 2  $\leftarrow \rightarrow$  – posuv kurzoru 2 po naměřených křivkách.

Některé programy zobrazují pouze jeden graf, jiné mohou zobrazovat grafy dva. Ve druhém případě je jeden z grafů „orientační“ a nelze v něm odečítat pomocí kurzoru.

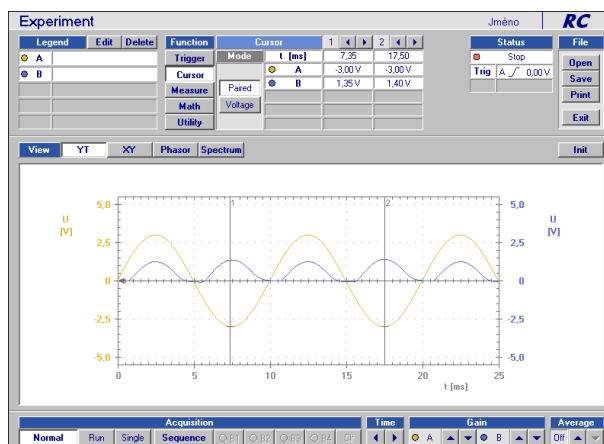
Pokud program některé hodnoty z dat počítá, může se stát, že hodnota nebude k dispozici. Na tuto skutečnost budete upozorněni buď zobrazením ?? nebo zobrazením chybové hlášky (např. „Perioda nebyla nalezena“) v okně grafu. Zobrazení hlášky může způsobit, že grafy nebudou vykreslovány – v tom případě je nutno změnit nastavení programu nebo parametry měřeného bovodu.

**Osciloskop** Tento režim slouží k zobrazování časového rozvoje napěťových průběhů. Je vybaven dvěma kanály, tj. je schopen najednou zobrazit dva signály.

- VIEW – zvolení módu zobrazení dat, vždy je zobrazen časový průběh signálu, alespoň v malém pravém okně. Pokud signály nejsou vhodné k zobrazení v levém okně, zobrazí se v něm varování.
  - YT – zobrazí časový průběh signálu na celou šířku okna.
  - XY – v levém grafu zobrazí průběh, ve kterém kanály A a B ovlivňují souřadnice  $x$  a  $y$ .
  - PHASOR – v levém grafu zobrazí fázorový diagram, pokud jsou signály harmonické.
  - SPECTRUM – v levém grafu zobrazí výkonové spektrum signálů.
- GAIN – nastaví rozsah napěťové osy pro jednotlivé kanály
  - CHA  $\uparrow \downarrow$  – rozsah vstupního kanálu A.
  - CHB  $\uparrow \downarrow$  – rozsah vstupního kanálu B.
- TIME  $\leftarrow \rightarrow$  – nastaví rozsah časové osy (a zároveň periodu vzorkování signálu).
- AVERAGE  $\uparrow \downarrow$  – nastaví zobrazování průměru z  $n$  průběhů (slouží k snížení vlivu šumu), pokud se neprůměruje, je nastaveno na OFF.
- STATUS – zobrazuje informace o současném stavu osciloskopu, tedy zda se měří, čeká na výsledek nebo je měření zastaveno (nápis TRIG, WAIT, STOP), druhé pole informuje o nastavení synchronizace (TRIG) – který kanál spouští, na kterou „hranu“ a při jaké úrovni.

Tlačítka v poli FUNCTION pracují jako přepínače vedlejšího okna a mají následující význam:

- TRIGGER – nastavuje synchronizační spoušť měření, tj. okamžik, ve kterém v závislosti na stavu jednoho vstupu začne měření **všech** signálů.
  - SOURCE – nastavuje zdroj synchronizace: kanály A, B, externí zdroj synchronizace (EXT) nebo synchronizaci úplně vypíná (OFF). Obecně nastavte synchronizaci A, nezobrazuje-li se nic, přepněte na OFF.
  - SLOPE – vybírá reakci na nárůst nebo pokles signálu.
  - LEVEL – nastavuje úroveň, při které se měření započne.
- CURSOR – nabízí možnost měření v grafech pomocí kurzorů.
  - PAIRED – zapíná měření hodnot ve dvou časových okamžicích (svislé kursory), volba času se děje pomocí dvou párů šipek  $\leftarrow$  a  $\rightarrow$ .



Obrázek 3: Obrazovka programu RC2000 v režimu OSCILLOSCOPE.

- VOLTAGE – zapíná vodorovné kursory, které vyznačují dvě úrovně napětí a umožňují srovnávat hodnoty signálů v celém grafu, volba napětí se provádí přes  $\uparrow$  a  $\downarrow$ .
- MEASURE – zapíná informační okno, které zobrazuje celkové údaje o změřených a vypočtených signálech. Jde o efektivní hodnotu ( $U_{RMS}$ ), střední hodnotu ( $U_{MEAN}$ ), maximální hodnotu ( $U_{MAX}$ ) a frekvenci (F). Efektivní  $U_e$  a střední  $U_s$  hodnoty se počítají podle svých definic.
- MATH – umožňuje zapnout zobrazení výsledku základních matematických operací se signály. Signály lze sčítat, odečítat, násobit a dělit, případně lze matematiku vypnout (NONE). Je-li matematika zapnuta, lze nastavit velikost os pro zobrazení výsledku pomocí GAIN  $\uparrow \downarrow$ . Při použití dělení mohou nastat problémy při průchodu nulou.
- UTILITY – přepíná bodové (POINT) a čárové (GRAPH) zobrazení průběhů.

**V-A charakteristiky** Tento režim slouží k měření voltampérových charakteristik prvků. Průběh napětí se zaznamenává vstupem IN A, průběh proudu se převádí na napětí pomocí malého odporu zapojeného v sérii s prvkem. Měřený prvek se musí napájet pouze z výstupu ANALOG OUTPUT, nelze ho připojit k běžnému zdroji.

- SENSE R – tlačítka v tomto bloku slouží k zadání hodnoty odporu rezistoru, který v sestaveném elektrickém obvodu slouží jako lineární převodník I/U.
- QUADRANT – volba kvadrantu, který bude zvětšen v pravém grafickém okně.
  - I. – první kvadrant, pro měření propustných směrů.
  - III. – třetí kvadrant, pro měření závěrných směrů.
- OUTPUT RAMP – nastavení průběhu, amplitudy, polarity a opakovací frekvence napětí  $U_{nap}$  na výstupu ANALOG OUTPUT, které slouží jako napájecí napětí pro sestavený elektrický obvod pro měření A-V charakteristik.
  - SLOPE – tvar výstupního napětí.
    - / – nerovnoramenná pila, pozvolný náběh a strmý pokles napětí.
    - \ – rovnoramenná pila, pokles i náběh napětí se stejnou strmostí.
  - AMPLITUDE  $\uparrow \downarrow$  – zvětšení nebo zmenšení amplitudy výstupního napětí, amplitudu je nutno zvolit tak, aby byl průběh dostatečně vykreslen (např. větší než  $|U_Z|$  v případě Zenerovy diody, je nutno zohlednit napěťové ztráty na všech odporech), ale nedošlo k průrazu diod ani k přetížení proudové ochrany.
  - POLARITY – nastavení typu výstupního napětí.
    - BIP – záporné i kladné hodnoty výstupního napětí.
    - UNI – jenom záporné nebo jenom kladné hodnoty výstupního napětí.
  - PERIOD  $\leftarrow \rightarrow$  – snížení a zvýšení frekvence výstupního napětí.

**Frekvenční charakteristiky** Tento režim slouží k měření amplitudových a fázových charakteristik, tedy ke sledování závislosti výstupního harmonického napětí na vstupním harmonickém napětí, když se mění frekvence harmonického signálu. Při měření připojíme na vstup obvodu výstup ANALOG OUTPUT, tentýž signál přivedeme na IN A a napětí z výstupu měřeného obvodu přivedeme na IN B.

- VIEW – přepíná režim pohledu.
  - FREQ. CH. – vykresluje amplitudové/fázové frekvenční charakteristiky rozvinuté podle frekvence.
  - NYQUIST – vykresluje Nyquistovy grafy, tj. křivku, kterou opisuje koncový bod fázoru při změně frekvence, slouží k posuzování stability obvodů.
- GRAPH – zapíná zobrazení průběhu amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky.
- |P| dB/DIV – nastavuje rozlišení svislé osy amplitudové charakteristiky na 5, 10 a 15 dB na dílek.
- OFFS DB  $\uparrow \downarrow$  – nastavuje posunutí grafu ve svislém směru, resp. polohu úrovně 0 dB.
- $\varphi$  DEG/DIV – přepíná rozlišení svislé osy fázové charakteristiky mezi 30 a 60 stupni na dílek.
- DECADES – nastavuje rozlišení frekvenční osy, tj. kolik řádů se bude vykreslovat (v rozmezí 1 Hz až 10 kHz).
- BEGIN – nastavuje nejnižší frekvenci, na které se bude měřit.

**Osciloskop a generátor** Tento režim je oproti OSCILLOSCOPE ochuzen o některá nastavení, ale umožňuje vytvářet uživatelem definované průběhy napětí. Výstup tohoto generátoru se získává z ANALOG OUTPUT na A&DDU.

- FUNCTION – slouží jako přepínač vedlejšího menu.
  - OUTPUT – nastavení definovaného výstupního signálu.
    - OPEN – otevření dříve uloženého průběhu.
    - SAVE – uložení současného průběhu.
    - EDIT – úprava výstupního signálu v grafickém editoru.

**Podprogram Editor signálů** Tento editor je přístupný pouze z některých programů (např. OSCILLOSCOPE & GENERATOR) a slouží k vytváření průběhů.

- POSITION – ukazuje aktuální polohu myši na časové a napěťové ose.
- MODE – nastavení režimu editace.
  - MOUSE – umožní editaci signálu libovolně pomocí myši. Po stisku levého tlačítka myši v daném bodě tažením vytvoříte úsečku, která bude definovat výstupní hodnoty v daném intervalu. Konec úsečky označíte uvolněním tlačítka myši.
  - SIN – vytvoření sinusového průběhu přes celou časovou osu.
  - SQUARE – vytvoření obdélníkového průběhu přes celou časovou osu.
  - TRIANGLE – vytvoření trojúhelníkového průběhu přes celou časovou osu.
  - RAMP – vytvoření průběhu s pozvolným nárůstem a okamžitým poklesem.
- PARAMETERS – obsah okna závisí na zvoleném režimu. Ve většině režimů lze nastavovat parametry, které slouží k vytváření definovaných průběhů.
  - AMPLITUDE – amplituda průběhu.
  - OFFSET – posunutí průběhu vzhledem k nulovému napětí.
  - PERIOD – perioda vytvářeného průběhu.
- FILE – slouží k uložení či načtení průběhu.
  - LEAVE EDITOR – opustí editační režim a vrátí se zpět do režimu OSCILLOSCOPE & GENERATOR, současný průběh bude použit pro ANALOG OUTPUT.

## ⋮ Tina

Program TINA bude využíván v Praktiku z Elektřiny a magnetismu jako dílčí část dvou měřicích úloh. Účelem je ukázat studentům některé možnosti, jež simulační programy poskytují a zároveň výsledky simulací srovnávat s praktickým měřením. Cílem tohoto návodu je naučit studenty základům postupů při tvorbě obvodů, použití potřebných analýz a jejich vyzkoušení, jak fungují v praxi.

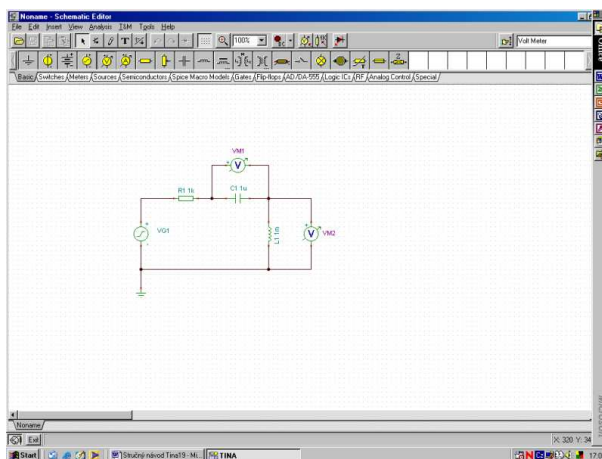
TINA je program určený pro návrh, simulaci a analýzu elektronických obvodů. Umožňuje simulaci analogových, digitálních i smíšených obvodů. Budeme používat klasický způsob analýzy analogových obvodů s grafickým zobrazením výsledků simulace ve formě grafů závislostí, dále můžeme odečítat výsledky simulace na panelech virtuálních měřicích přístrojů, nebo výsledky simulace uspořádané do tabulky. Program obsahuje bohatou knihovnu modelů součástek. Použitá demoverze však omezuje velikost analyzovaného obvodu na 10 uzlů. I když v demoverzi nelze tisknout a ukládat obvody, je možné přes schránku Windows přenášet jak zapojení, tak i výsledky simulace. Po spuštění programu přes ikonu Tina Demo na ploše počítače se objeví okno se základní řadou nabídek (FILE, EDIT, INSERT, VIEW, ANALYSIS, T&M, TOOLS, HELP). Následují vypínatelné lišty (TOOL BAR a COMPONENT BAR) a záložky vztahující se

k součástkám (obr. 4). V další části bude stručně uvedeno, jak vytvářet schéma obvodu a jak postupovat při jeho analýze.

## • Tvorba a úpravy elektrického schématu obvodu

Schéma elektrického obvodu se vytváří na kreslicí ploše. Pro lepší orientaci při kreslení je vhodné si zapnout mřížku v menu VIEW/GRID

Modely součástek jsou umístěny v *knihovně prvků*, jejich symboly najdeme na ikonách. Nejpoužívanější součástky jsou umístěny na liště COMPONENT BAR, ostatní jsou uspořádány do skupin podle své funkce v záložkách BASIC, METERS, SOURCES, SEMICONDUCTORS, GATES, FLIP-FLOPS, AD/DA-555, LOGIC ICS, RF, ANALOG CONTROL a SPECIAL.



Obrázek 4: Pracovní obrazovka programu TINA.

## • Práce se součástkami

Součástka nebo její část (popis) musí být před manipulací aktivována a to použitím LCLICK. Tím se změní barva součástky, nebo její aktivované části na červenou.

**Přesun součástky na plochu** LCLICK na ikonu součástky, kurzor se změni na ruku, kterou táhneme součástku na pracovní plochu, LCLICK – tím ji zakotvíme na požadované místo. Zrušení aktivace součástky – LCLICK mimo součástku na libovolné místo pracovní plochy. Součástka změni barvu na černou. Jestliže uchopíme hned další součástku, aktivace té předchozí se zruší sama.

**Posun součástky po ploše** LCLICK zmáčkneme a táhneme součástku na požadované místo, LCLICK mimo, aktivace se zruší, součástka změni barvu na černou.

**Rotace součástky** po aktivaci součástky PCLICK. Otevře se roletka s nabídkou: ROTATE LEFT, ROTATE RIGHT, MIRROR.

**Popis pasivních součástek** Každá součástka má implicitní nastavení popisu i jejího parametru. Pro zadání číselných hodnot se používají běžně užívané přípony v elektrotechnice: p (piko), n (nano), u (mikro), m (mili), k (kilo), M (mega), G (giga). Desetinná místa v čísle se oddělují desetinou čárkou (na numerické klávesnici je to tečka) př. 2,5k.

- změna parametru součástky – 2×LCLICK na parametr, otevře se panel. U názvu součástky změni hodnotu parametru, OK.
- změna popisu součástky – 2×LCLICK na popis, otevře se panel. V řádku LABEL změni označení součástky a stisknem OK.

**Popis zdrojů střídavého napětí** 2×LCLICK na symbol zdroje, otevře se panel VOLTAGE GENERATOR. V řádku SIGNAL vybereme UNIT STEP, pak LCLICK na tlačítko vpravo . Otevře se nabídka, zvolíme sinusový průběh, upravíme amplitudu, frekvenci a fázi.

**Vodivé spojení (Wire)** Každý prvek má svorky označené křížkem. Když kurzorem najedeme na svorku, kurzor se změní na pero. LCLICK na jednu svorku součástky, táhneme pero po mřížce pracovní plochy buď ke druhé svorce, tam ukončíme spoj opětovným LCLICK, nebo se napojíme kdekoliv na vodič, zde LCLICK a na vodiči se vytvoří uzel. Opravu špatného spojení provedeme aktivací vodiče pomocí LCLICK a klávesy DELETE (nebo z nabídky kontextového menu).

**Manipulace s objekty na pracovní ploše** Jestliže je více prvků umístěných samostatně na ploše a chceme je vymazat, označíme je všechny současně tak, že kolem vytvoříme obdélník: LCLICK zmáčkneme a současně táhneme shora dolů a vpravo. Všechny prvky v obdélníku se označí červeně. Označení celého zapojení lze provést stejným způsobem nebo volbou menu EDIT/SELECT ALL. K mazání označených částí slouží tlačítko DELETE nebo kontextové menu. Označení celého zapojení se používá při zápisu do schránky Windows pomocí příslušné ikony. Potom lze zapojení přenést do prohlížečícího programu IRFANVIEW a vytisknout (přímo z demoverze programu TINA tisknout nelze).

## ⋮ Použití analýz ve střídavých obvodech ⋮

Simulace v laboratorních měřeních z elektřiny a magnetizmu se budou týkat pouze harmonických obvodů. Proto se v tomto návodu zmíníme pouze o těch analýzách (základním ovládní), které budou používány. Abychom mohli analýzu vykonat, je potřebné dodržet určitá pravidla při zapojování obvodů:

1. Každý obvod musí mít referenční uzel (zemnicí).
2. Všechny uzly obvodu musí mít vytvořenou stejnosměrnou cestu na zem. Jestliže tomu tak není, je potřeba k takovému uzlu připojit svodový rezistor s velkou hodnotou odporu (min.  $R \approx 10^{10} \Omega$ ).

Druh simulace se volí pomocí menu ANALYSIS. V našem případě budeme používat dvě základní analýzy:

1. **AC Analysis (střídavá analýza)** Spustíme ji z menu ANALYSIS/AC ANALYSIS a nabízí nám

**Calculate nodal voltages** Kurzor se změní na sondu, kterou hledáme napětí na jednotlivých uzlech. V tabulce se objeví následující údaje: RMS, DC LEVEL, AMPLITUDE, PHASE. Jestliže jsou v obvodu zapojeny voltmetr nebo ampérmetr, u jejich značky se objeví fázor měřené veličiny. Použijeme-li wattmetr a poklepeme sondou na jeho značku, dostáváme tabulku se všemi výkony a účinníkem obvodu.

**Table of AC results** V obvodu se označí čísla jednotlivé uzly. Otevře se tabulka, kde jsou uvedena napětí na jednotlivých prvcích a jejich proudy, napětí zdroje, uzlové potenciály. Všechny veličiny jsou ve tvaru fázorů. Jestliže máme v obvodu zapojeny měřicí přístroje, potom se v tabulce objeví i jejich fázory. *Proud zdroje má ve výsledku otočenou fázi o  $180^\circ$  oproti skutečné hodnotě (jako by zdroj byl pasivní prvek).*

**AC Transfer characteristic** Otevře se panel, ve kterém nastavíme počáteční a konečnou frekvenci (START, END FREQUENCY). V nabídce DIAGRAM zvolíme druh zobrazené frekvenční charakteristiky a stiskneme OK. Dostaneme tak přenosovou charakteristiku v decibelech a fázovou charakteristiku ve stupních buď jednotlivě, nebo ve společném grafu. Obě charakteristiky mají semilogaritmické souřadnice. Závislosti v grafu si můžeme pomocí ikony 1 popsat a po aktivaci kurzorů (ikona 2) odečítat hodnoty veličin. Další možné úpravy v grafech provedeme dle bodu Práce s grafy.








**AC Transfer characteristic (parametrická analýza)** V případě, že u některého prvku budeme měnit parametr (v našem případě  $R$ ), je potřeba požadované hodnoty parametrů nastavit. Ve schématu označíme vybraný prvek pomocí ikony 5. Tím se otevře okno odpovídajícího vybraného prvku, kde klikneme na SELECT. Otevře se panel MULTIPLE ANALYSIS – RANGE SETTING s několika poli. V poli SWEEP TYPE zvolíme LIST a klikneme vpravo na tlačítko . Otevře se panel PARAMETER STEPPING – LIST EDITOR, kde vložíme požadované parametry prvku. Potvrdíme OK a uzavřeme postupně všechna pomocná okna. V zapojení u popisu, nyní již parametrického prvku, se objeví hvězdička. Analýzu spustíme obvyklým způsobem a dostaneme více závislostí v jednom grafu. Popis těchto křivek provedeme dle bodu Práce s grafy.

**Phasor diagram** Otevře se okno, kde program vykreslí fázory těch veličin, které jsou měřeny voltmetrem nebo ampérmetrem (nedávat současně, mají obvykle jiná měřítka). Fázory je potřeba popsat pomocí ikony 1. Další možnosti úpravy fázorového diagramu jsou uvedeny v bodě Práce s grafy.

2. **Transient Analyse (časová analýza)** Tato analýza je nejdůležitější simulační nástroj pro zobrazení průběhů závislých na čase (jako osciloskop). Spustíme ji z menu ANALYSIS/TRANSIENT ANALYSIS. Ve schématu musí být po spuštění analýzy definovány vstupní zdroj a svorky výstupních veličin, které chceme analyzovat. Výstupní veličiny určíme zapojením měřicích přístrojů (V-metr, A-metr, W-metr). Po otevření panelu TRANSIENT ANALYSIS nastavíme počáteční a konečnou hodnotu časového intervalu (START, END DISPLAY), uzavřeme pomocí OK. Otevře se okno TR RESULT, kde se vykreslí časové průběhy veličin, které snímáme některým z měřicích přístrojů. Automaticky se objeví i časový průběh zdroje. Popis křivek a úpravy v grafu provedeme podle bodu Práce s grafy.

## ⋮ Práce s grafy ⋮

S grafy se setkáme ve třech případech analýzy. Jsou to frekvenční charakteristiky, fázorový diagram a časové závislosti. Každé okno grafu má svoje menu a pracovní lištu pro úpravu grafů. Po každé analýze končící grafem se dole v okně grafu objeví záložka s popisem analýzy. Pomocí záložek se můžeme ke grafickým výstupům kdykoliv vrátit. Je-li okno grafu zavřené, opět ho vyvoláme pomocí menu TOOLS/DIAGRAM WINDOW. Nyní si vysvětlíme několik ikon z pracovní lišty, které budeme používat. Ikony vždy aktivujeme pomocí LCLICK.

1.  Ikona slouží pro popis grafu. Aktivujeme ikonu, kurzor posuneme na křivku, kterou chceme označit, až se kurzor změní na křížek (+). LCLICK – tím se přiřadí popis daný programem.
2.  Ikonu aktivujeme, pak se přesuneme na křivku, až se objeví křížek (+), LCLICK, objeví se panel A resp. B pro odečítání souřadnic  $x$  a  $y$  sledovaného průběhu. Deaktivujeme kurzory opětovným LCLICK na ikonu.
3.  Ikona slouží pro nakreslení přímky (např. pro ruční vytvoření fázoru). Aktivujeme ikonu, kurzor se změní na křížek (+), přesuneme se na místo začátku přímky, zde LCLICK a táhneme čáru na libovolné místo v okně. Ukončení přímky provedeme pomocí LCLICK na jejím konci a pomocí PCLICK ukončíme kreslicí režim. Lze vytvořit i lomenou čáru, když postupně používáme LCLICK v místě zlomu.
4.  Ikona umožní napsat a vložit jakýkoliv text na pracovní plochu. Po aktivaci ikony se otevře panel TEXT, napíšeme žádaný text, případně upravíme písmo (FONT) a uzavřeme panel ikonou 7. Text můžeme přesunovat na libovolné místo pracovní plochy.
5.  Tato ikona se používá na označení součástky, u které budeme měnit parametr v parametrické analýze. Po aktivaci ikony přesuneme značku na vybraný prvek a klikneme na něj. Po ukončeném zadání parametrů (viz Parametrická analýza) se vedle popisu prvku objeví křížek (označení parametrické součástky).
6.  Ikona automaticky vytváří legendu ke křivkám. Po aktivaci ikony se objeví legenda, kterou můžeme umístit kamkoli na pracovní plochu. Text v legendě aktivujeme 2×LCLICK a upravíme (viz ikona 4).
7.  Ikona pro uzavření panelu TEXT.

**Změny v grafech** Grafy, které získáme analýzou obvodu lze upravovat podle našich představ. Jedná se o změny popisů křivek, které jsou dané programem, změny měřítek na osách, které jsou rovněž nastavené programem a změny na použitých čarách grafu (síla, barva). Rovněž můžeme doplnit grafy o nadpisy použitím ikony 4.

**Posun popisu křivky** Popis aktivujeme LCLICK a posuneme jej na libovolné místo. Stejným způsobem se dají posouvat i fázory v komplexní rovině fázorového diagramu.

**Změna textu popisu křivky** 2×LCLICK na popis, objeví se panel TEXT, kde je možné povést jak změnu textu, tak i změnu písma (FONT). Panel uzavřeme ikonou 7.

**Změna popisu a měřítka na ose  $x$  a  $y$**  Najedeme kurzorem na popis osy až se kurzor změní na křížek (+). Potom 2×LCLICK, otevře se panel SET AXIS, kde provedeme požadované změny. Ukončíme tlačítkem OK.

**Zavedení další osy  $y$**  Jestliže se vykreslí nějaká křivka, která nemá vhodné měřítko, lze jí přiřadit novou osu  $y$ . PCLICK na křivku (křížkem), z nabídky vybereme ADD NEW Y AXIS. Otevře se nový graf s upraveným průběhem a další osou  $y$  pro vybranou veličinu.

**Změna čáry grafu** Najedeme kurzorem na křivku až se změní kurzor na křížek (+). 2×LCLICK na křivku, otevře se panel SET CURVE. Provedeme změny a ukončíme OK.

**Mazání křivek, popisů a textu** Jakékoliv mazání provádíme buď na označeném objektu tlačítkem DELETE z klávesnice, nebo přímo najedeme na daný objekt kurzorem, ten se změní na křížek (+), potom z kontextového menu vybereme DELETE.

Tento návod ukazuje pouze základní možnosti ovládání programu TINA. Je třeba si uvědomit, že v počítačovém prostředí se většinou dá nalézt několik cest, jak ovládat a nastavit program, ve kterém pracujeme. V popisu se používá návod podporující použití myši. Existuje však i možnost využívat klávesové zkratky. Bližší informace pak najdete v nápovědě.

## ⋮ Pomocné programy, další poznámky ⋮

Student se před měřením musí k počítači přihlásit, na všech počítačích je zřízen účet **host** s heslem **host**. Na počítačích se používá systém, který při restartu vrací stav disku do původního stavu. To znamená, že se **všechny změny v nastavení systému i uložené soubory vymažou**. Jedinou výjimkou jsou soubory v adresáři D:\user, ve kterém data zůstávají (mažou se ovšem po skončení výuky v semestru). K přenosu naměřených dat použijte internet nebo USB disky.

Během měření jsou k dispozici některé běžné programy pro systém WINDOWS – na výpočty systémová kalkulačka (v nabídce START/PROGRAMY/PŘÍSLUŠENSTVÍ), přepnutá do vědeckého režimu, na poznámky během měření POZNÁMKOVÝ BLOK nebo WORDPAD. K práci s obrázky je nainstalován prohlížeč IRFANVIEW v české verzi. Program RC2000 ukládá výstupy do formátu BMP, který je velmi velký pro přenášení. Je proto vhodné je převést na formát PNG – obrázek otevřete v IRFANVIEW a použijte volbu SAVE AS. Z nabídky vyberte volbu PNG - PORTABLE NETWORK GRAPHICS.

Během měření je možno používat prográmek PRAKTDATA, který umožňuje zobrazit body v rovině a může posloužit např. k ověření linearit závislostí apod. Obsahuje dvě vstupní pole, do kterých se zadají  $x$  a  $y$  souřadnice a stiskem ENTER (nebo ADD) se vloží do spodního seznamu. Budou-li hodnoty bodu menší než zvolené rozsahy, bod se vykreslí v pravém obrázku. Maximální hodnoty souřadnic a jejich popisky lze změnit tlačítkem EDIT. Pokud byl některý bod zadán špatně, je možno jej v seznamu označit myší a stiskem ENTER jej označit hvězdičkou – takový bod nebude zobrazován. Opětný stisk ENTER označení zruší. Naměřená data lze uložit přes tlačítko SAVE buď do textového (jenom data) nebo HTML (i s obrázkem) souboru. Ukládají se pouze hodnoty, které nejsou označeny hvězdičkou.

## Úloha číslo 1.

Cílem úlohy je ověření chování odporových prvků v obvodech se stacionárním proudem a ověření základních pouček z těchto obvodů (Théveninova věta, Kirchhoffovy zákony).

## : Teorie

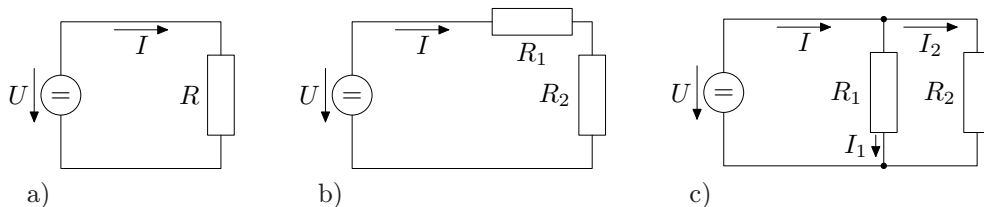
Chceme-li využít elektrického pole ke konání užitečné práce, používáme jej zpravidla ve formě **elektrického proudu**  $I$ , který je tvořen uspořádaným pohybem elektrického náboje. Tento proud prochází uzavřenou soustavou alespoň částečně vodivých prvků, která se nazývá **elektrický obvod**. Jednoduché obvody lze sestavit ze tří základních prvků:

1. zdroje elektromotorického napětí, který obvodu dodává energii;
2. rezistoru (odporového prvku), který energii spotřebovává (zpravidla jen disipuje do okolí);
3. vodiče, který slouží k vymezení proudové cesty (ideálním vodičem energie jen prochází, nespotebovává se),

kteří se do obvodu zapojují pomocí dvou svorek. Místo rezistoru lze zapojit *spotřebič*, který provádí vhodnou funkci – převádí elektrickou energii na energii jiného druhu (např. žárovka ji převádí na světelnou energii). Elektrický obvod může obsahovat libovolný počet prvků. Nejjednodušší obvod je sestaven ze zdroje, který má obě svorky vodiči připojeny ke svorkám rezistoru (obr. 5). Takový obvod má pouze jednu větev (jedinou smyčku) a každým průřezem obvodu prochází stejně velký proud  $I$ . Nalezení velikosti tohoto proudu  $I$  v závislosti na vlastnostech jednotlivých prvků je základním problémem teorie obvodů. Pro mnoho prvků platí **Ohmův zákon**

$$I = \frac{U}{R},$$

kteří tvrdí, že proud tekoucí rezistorem je přímo úměrný napětí na svorkách rezistoru (v případě ideálních vodičů je v našem případě rovno svorkovému napětí zdroje) a nepřímo úměrný veličině nazývané **odpor**, která se značí  $R$  a lze ji pro daný rezistor určit z jeho geometrie a materiálového složení. V obecném případě však nelze považovat  $R$  za konstantu charakterizující rezistor, ale spíše za funkci přiloženého napětí.



Obrázek 5: a) Nejjednodušší obvod, b) sériové zapojení, c) paralelní zapojení.

Složitější obvody mohou obsahovat více větví, tedy lze v jejich zapojení nalézt více uzavřených smyček. Větve vytvoříme tím, že na vodič umístíme **uzel**, ze kterého bude vycházet více jiných vodičů. V každém z vodičů (každou větví) pak může téci proud jiné velikosti, ale vždy musí být splněn **1. Kirchhoffův zákon**, podle kterého musí být součet proudů tekoucích do uzlu roven součtu proudů z uzlu vytékajících. Aby bylo možno rozlišit proudy vtékající a vytékající, musíme každému proudu přiřadit kladné nebo záporné znaménko. Velikosti proudu jednotlivých větví musí také splňovat **2. Kirchhoffův zákon**, podle kterého je v libovolné smyčce součet úbytků napětí na rezistorech přesně roven součtu všech napájecích napětí ve smyčce.

**Sériové a paralelní zapojení rezistorů** Uvažujme nyní dva rezistory  $R_1$  a  $R_2$ . Nejprve je do obvodu připojíme sériově, tj. spojíme dvě jejich svorky, zbylé dvě připojíme ke zdroji  $U$ . Protože nám tímto zapojením vznikne jen jedna smyčka, musí oběma rezistory procházet stejný proud  $I$ . Budeme hledat takovou hodnotu  $R_s$ , abychom při zapojení *jediného* rezistoru s odporem  $R_s$  získali stejný proud. Aplikujeme-li druhý Kirchhoffův zákon, získáme v prvním případě rovnici

$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2), \quad (1)$$

ve druhém případě

$$U = IR_s. \quad (2)$$



Srovnáním obou rovnic získáme pro hodnotu odporu **sériového zapojení** rezistorů vztah

$$R_s = R_1 + R_2 = \sum_{i=1}^2 R_i,$$

který lze lehce zobecnit pro  $n$  rezistorů.

Nyní zapojme oba rezistory paralelně, tj. spojíme vždy dvě a dvě svorky a získané uzly připojíme ke svorkám zdroje. V obvodě nám tím vzniknou dvě smyčky. Hledejme hodnotu  $R_p$ , kterou musí mít jediný rezistor připojený ke svorkám zdroje, aby z něho odebíral stejný proud jako kombinace  $R_1$  a  $R_2$ . Pro první případ z druhého Kirchhoffova zákona získáme dvě rovnice – pro smyčku s napájecím zdrojem platí

$$U = R_1 I_1 \quad (= R_2 I_2), \quad (3)$$

pro smyčku s rezistory platí

$$0 = -I_1 R_1 + I_2 R_2. \quad (4)$$

V případě jediného rezistoru máme rovnici  $U = R_p I$ , kde musí platit  $I = I_1 + I_2$ . Když dosadíme z rovnice (4), získáme  $U = R_p I_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$ . Srovnáním s rovnicí (4) získáme rovnici

$$R_1 = R_p \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \quad (5)$$

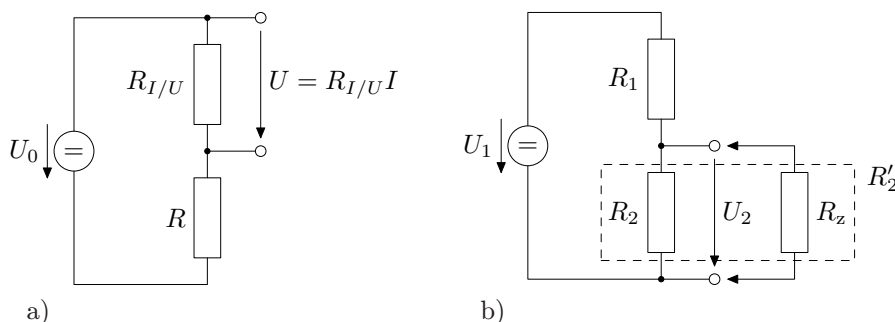
kterou lze přepsat do tvaru

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \sum_{n=1}^2 \frac{1}{R_i} \quad (6)$$

a následně snadno zobecnit pro **paralelní zapojení** více rezistorů.

Podívejme se nyní, jaké tečou v paralelním zapojení jednotlivými rezistory proudy. Protože mají stejná napětí, musí platit  $U_{R_1} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = U_{R_2}$ . Porovnáme-li prostřední členy, zjistíme že proudy se rozdělí v převráceném poměru hodnot odporu,  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ .

**Převodník proudu na napětí** Uvažujme zapojení na obr. 6a, ve kterém je sériové zapojení odporů  $R_{I/U} = 1 \Omega$  a  $R$ . Obvodem protéká nějaký proud  $I$ , který vyvolává úbytek napětí  $IR_{I/U} = I \cdot 1 \Omega$ . Jeho velikost je číselně rovna velikosti proudu v obvodu, a proto lze na něj nahlížet jako na **převodník proudu na napětí**. Potřebujeme-li tedy v obvodu měřit proud, můžeme experiment převést na měření napětí, což lze mnohdy realizovat snadněji (mnohé měřicí přístroje registrují jen velikost napětí). V praxi lze použít i jiné hodnoty  $R_{I/U}$ , ale pak musíme hodnoty odečtené z přístroje přepočítat (neprovádí-li to přístroj sám). Přesnost měření proudu touto metodou závisí jednak na přesnosti měření napětí, ale i na přesnosti, s jakou známe hodnotu odporu  $R_{I/U}$ . Pokud se kvůli měření rezistor do obvodu vkládá, vnáší systematickou chybu, protože odpor sériové kombinace  $R_{I/U} + R$  je větší než  $R$  a obvodem při měření teče menší proud. Velikost relativní chyby je  $\delta I = \frac{R_{I/U}}{R_{I/U} + R}$ , a klesá tedy s poklesem  $R_{I/U}$  a s růstem  $R$ . Proto by měl být měřicí odpor co nejmenší. Stejný závěr platí i pro *vnitřní odpor* libovolného ampérmetru.



Obrázek 6: a) Převodník proudu na napětí, b) napěťový dělič.

**Dělič napětí** Použijme podobné schéma jako v předchozím případě a uvažujme sériové zapojení rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  (obr. 6b). Sledujme nyní, jakou velikost má napětí  $U_2$  na druhém z rezistorů. Protože odpory jsou v sérii, je proud v obvodě dán  $I = \frac{U}{R_1 + R_2}$ . Podle Ohmova zákona je napětí na odporu

$$U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1.$$

Toto napětí je tedy zlomkem napájecího napětí  $U_1$ , přičemž poměr obou napětí je přesně definován. Uvedené zapojení proto tvoří **dělič napětí**. V praxi se používá k definovanému snížení napětí, např. když potřebujeme měřit napětí, jehož velikost přesahuje vstupní rozsah měřicího přístroje.

Nezatížený dělič však není užitečný, proto připojujeme k rezistoru  $R_2$  paralelně zátěžový odpor  $R_z$  (může to být také vnitřní odpor voltmetru). Tím se však naruší původní stav a dojde ke změně napětí  $U_2$  na hodnotu  $U'_2$ . Pro jeho stanovení nahradíme odpory  $R_2$  a  $R_z$  jediným odporem  $R'_2 = \frac{R_z R_2}{R_z + R_2}$ , a tím získáme *ekvivalentní* dělič napětí, jehož výstupní napětí bude

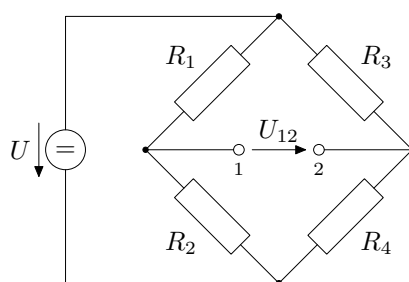
$$U'_2 = \frac{R'_2}{R_1 + R'_2} U_1 = \frac{1}{1 + R_1 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_z} \right)} U_1.$$

Výstupní napětí tedy bude zátěží ovlivněno, a to tím více, čím menší bude  $R_z$ . Závislost na zátěži je silně nelineární. Má-li být dělič napětí dostatečně *tvrdý*, musí být  $R_2 \ll R_z$ , což ovšem snižuje velikost napětí. Při návrhu vhodného děliče proto musíme zvolit kompromisní řešení.

**Théveninova věta** Při analýze obvodu nás mnohdy zajímá pouze proud tekoucí konkrétním rezistorem  $R_x$ . Je-li  $R_x$  zapojen v lineárním obvodu, můžeme celý „zbytek“ obvodu nahradit jediným zdrojem napětí  $U_{Th}$  s nenulovým vnitřním odporem  $R_{Th}$ . Théveninova věta říká, jakým způsobem určit parametry náhradního zdroje. Představme si, že rezistor  $R_x$  ze sítě vypojíme a zůstanou po něm svorky  $X$  a  $Y$ . Napětí  $U_{Th}$  bude rovno napětí mezi svorkami  $X - Y$  a odpor  $R_{Th}$  se bude rovnat odporu mezi svorkami  $X$  a  $Y$ , zkratujeme-li všechny (ideální) zdroje napětí. Hledaný proud tekoucí rezistorem  $R_x$  pak nalezneme ze vztahu

$$I_x = \frac{U_{Th}}{R_x + R_{Th}}.$$

**Metoda smyčkových proudů** Théveninova věta je vhodná pro určení proudu tekoucího jediným odporem. Chceme-li určit všechny proudy v obvodu, můžeme použít **metodu smyčkových proudů**. Její princip je následující: v daném obvodu si vyznačíme všechny *nezávislé* smyčky A, B, C a každou smyčku si vyznačíme šipkou a budeme předpokládat, že ve směru této šipky teče *fiktivní smyčkový proud*. Pro každou smyčku sestavíme rovnici podle druhého Kirchhoffova zákona, tj. algebraicky sečteme všechny zdroje a všechny úbytky napětí. Prochází-li jednou větví smyček několik, musíme je v napěťovém úbytku zohlednit všechny, včetně jejich orientace (např.  $U_{R_2} = R_2[I_A - I_B]$ ). Vyřešením soustavy rovnic získáme hodnoty smyčkových proudů, hodnoty reálných proudů získáme algebraickým součtem všech smyčkových proudů, které danou větví tečou.



a)

Obrázek 7: Wheatstonův můstek.

**Wheatstonův můstek** Pro přesná měření se často využívají kompenzační metody, v nichž měníme parametry měřicí sestavy tak dlouho, dokud ukazatel nedosáhne nulové hodnoty. Tím se zbavujeme závislosti na vlastnostech ukazatele hodnoty (v celém rozsahu, vliv mají pouze oblasti kolem nuly) a přesnost měření závisí jen na přesnosti, s jakou známe parametry měřicího obvodu. Pro měření odporů se používá **Wheatstonův můstek** (obr. 7) tvořený čtyřmi rezistory umístěnými ve stranách čtverce, jehož jedna diagonála slouží k přívodu napětí a druhá je měřicí. Měřený rezistor zapojíme např. místo  $R_1$  a budeme měnit hodnotu některého z rezistorů tak dlouho, až bude napětí  $U_{12}$  nulové. V tom případě můžeme svorky 1 a 2 spojit zkratem a získáme náhradní zapojení se dvěma dvojicemi paralelně zapojených odporů, přičemž každou dvojicí musí téci stejný proud, tj.  $I_1 + I_3 = I_2 + I_4$ . Vzhledem k tomu, jak se dělí proudy mezi paralelně zapojené rezistory, lze psát  $I_1 + I_3 = I_1 \left( 1 + \frac{R_3}{R_1} \right)$  a  $I_2 + I_4 = I_2 \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right)$ , což po dosazení dává rovnici  $I_1 \left( 1 + \frac{R_3}{R_1} \right) = I_2 \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right)$ . Protože svorky 1 a 2 nejsou ve skutečnosti propojené,

musí být  $I_1 = I_2$ . Po dosazení dostáváme *podmínku rovnováhy Wheatstonova můstku*

$$R_1 R_4 = R_2 R_3,$$

kterou lze formulovat slovy *ve vyváženém můstku se součiny protilehlých odporů musí sobě rovnat*.

Předpokládejme, že jsme vložili místo  $R_1$  neznámý rezistor. Díky němu se vyvážený můstek rozbíjí a mezi body 1, 2 se objeví napěťový rozdíl, který lze také využít k měření hodnoty odporu. Bude-li mezi body 1 a 2 umístěn ideální voltmetr s nekonečným vstupním odporem, budou obě větve nezávislé a napětí v příslušném bodě bude záviset na velikosti odporu a protékáném proudu, např.  $U_1 = R_2 I_{1,2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$ . Odečtením obou napětí získáme vztah pro výstupní napětí

$$U_{12} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U,$$

který ukazuje, že závislost na  $R_1$  je nelineární a napětí závisí i na napájení můstku. Z hlediska přesnosti je proto výhodnější můstek vyvažovat.

**Kondenzátor a cívka** Kromě odporových prvků patří mezi základní pasivní elektronické prvky ještě kondenzátory a cívky. V případě stacionárních proudů je však jejich uplatnění mizivé, neboť jsou to prvky které reagují na *změny obvodových proměnných*. **Kondenzátor** je tvořen dvěma vodivými elektrodami, které jsou od sebe odděleny nevodivou vrstvou. Ta brání stacionárnímu proudu v průchodu a proto kondenzátorem ustálený proud neprochází. Výjimkou je krátká doba po přiložení napájecího napětí, během níž se na elektrodách hromadí náboj (a roste mezi nimi napětí) – tento proces patří do nestacionárních obvodů. Ve stacionárních obvodech lze kondenzátory využít jen jako zdroje energie.

**Cívka** je tvořena vinutím z vodivého drátu a využívá vzájemné interakce mezi elektrickým a magnetickým polem. Stacionární proud je schopen vybudit „statické“ magnetické pole, které však není schopno zpětně ovlivnit elektrické pole a tím i proud. Magnetismus se zde proto na vlastnostech cívky neprojeví (opět vyjma krátkého okamžiku po zapnutí napájení, kdy se spotřebovává energie na vytvoření magnetického pole), uplatní se pouze vnitřní odpor cívky daný vlastnostmi vinutí.

## ⋮ Realizace měření ⋮

Při této úloze není třeba využívat počítač. Pro napájení používejte stejnosměrný zdroj PROGRAMMABLE DC SUPPLY, měření proudů provádějte digitálním multimetrem v režimu ampérmetru s rozsahem 20 mA DC.

Při návrhu děliče napětí zohledněte dostupné součástky a proudovou ochranu systému do 20 mA, napětí 10 V se nemusí zeslabit přesně na 3,5 V, může být (mírně) menší. Jako zátěž použijte malou odporovou dekádu a sledujte chování děliče při velmi malé zátěži (desítky  $\Omega$ ).

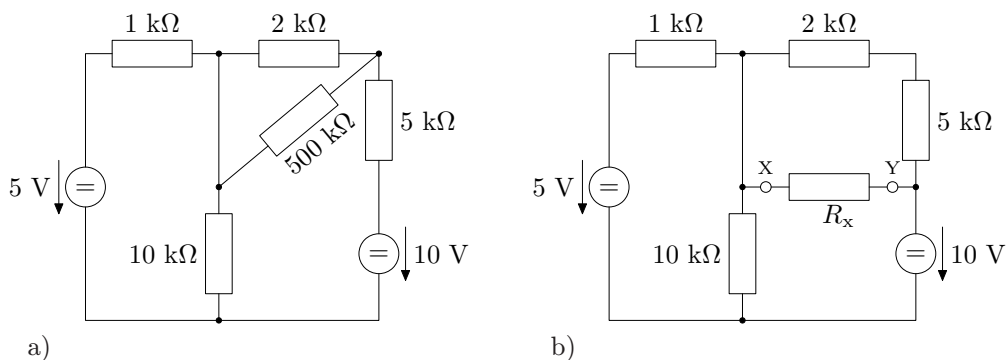
Teoretické výpočty obvodů pro ověření Kirchhoffových zákonů a Théveninovy věty proveďte doma. Při ověřování Kirchhoffových zákonů se může stát, že součty nebudou přesně nulové – je třeba počítat s chybou použitého přístroje. Měření napětí a napěťových úbytků je jednoduché, při měření proudů je nutno do větve zařadit multimetr – kde to nelze přímo, vyveďte kombinaci multimetr–rezistor na jiný panel (např. OPERATIONAL AMPLIFIER). Místo rezistoru  $R_D$  připojte malou odporovou dekádu. Napětí 10 V získáte z interního zdroje modulu COMPONENT BOARD, před použitím připojte na jeho svorky voltmetr a tlačítka FINE nastavte přesnou hodnotu napětí. Náhradní odpor  $R_{Th}$  určujte digitálním multimetrem v režimu ohmmetru při „zkratovaném“ zdroji napájení.

Při práci s kondenzátorem může při zapojování/vypojování docházet k překročení proudové ochrany a automatickému odstavení zdroje napájení. Činnost zdroje lze obnovit stiskem tlačítka FUSE.

## ⋮ Zadání úlohy ⋮

1. Ověřte linearitu závislosti  $I = I(U)$  pro jeden z rezistorů.
2. Zapojte nejprve sériově a pak paralelně dva rezistory 10 k $\Omega$ . Ověřte lineární závislost proudu na napětí, spočítejte výsledný odpor kombinace a ověřte vzorce experimentálně. Změřte, jak se mezi rezistory rozdělí napětí v sériovém a proud v paralelním zapojení. Totéž udělejte pro zapojení rezistorů s navzájem různými hodnotami odporu.
3. Zapojte do série digitální multimetr v režimu ampérmetru, odpor 1  $\Omega$  a odporovou dekádu  $R$ . Měřte úbytek napětí na odporu 1  $\Omega$  a srovnajte ho s hodnotou udávanou ampérmetrem, a to pro několik hodnot  $R$ .
4. Navrhněte dělič napětí, který umožní změřit napětí  $U_1 = 10$  V přístrojem s maximálním rozsahem 3,5 V. Dělič zapojte a ověřte jeho činnost v nezátíženém stavu. Připojte zátěž  $R_z$  (odporovou dekádu) a sledujte změnu výstupního napětí děliče v závislosti na  $R_z$ .

- Zapojte odporový můstek s parametry  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 10\ \Omega$  a  $R_4 = 500\ \Omega$ . Jako  $R_2$  zapojte odporovou dekádu, vyvažte můstek a sledujte změny výstupního napětí pro malé změny  $R_2$ . Nahraďte odpor  $R_1$  neznámým odporem a určete jeho hodnotu nejprve výpočtem z výstupního napětí ihned po zapojení, jednak z parametrů můstku po vyvážení. Ověřte, že vyvážení je nezávislé na velikosti napájecího napětí, ale změřené napětí na něm závisí.
- Zapojte obvod dle obrázku 8a). Metodou smyčkových proudů vypočtěte proudy v jednotlivých smyčkách. Měřením pak ověřte: **a)** platnost 1. Kirchhoffova zákona pro uzel, **b)** platnost 2. Kirchhoffova zákona pro smyčku obsahující alespoň jeden zdroj napětí, **c)** proudy ve všech smyčkách.



Obrázek 8: Obvod pro ověření a) Kirchhoffových zákonů, b) Théveninovy věty.

- Zapojte obvod dle obr. 8b) a ověřte Théveninovu větu. Nejprve změřte napětí a proud rezistorem  $R_x$  pro různé hodnoty odporu, pak jej vypočte. Změřte napětí  $U_{0Th}$  mezi svorkami  $X$  a  $Y$ , které představuje napětí náhradního zdroje. Pak všechny zdroje napětí nahraďte zkratovací svorkou a změřte náhradní odpor  $R_{Th}$  mezi svorkami  $X$  a  $Y$ . Zapojte náhradní obvod se zdrojem napětí  $U_{0Th}$ , „vnitřním“ odporem  $R_{Th}$  a odporem  $R_x$  a měřením ověřte, že hodnoty jsou shodné s předchozím měřením.
- K napájecímu zdroji připojte kondenzátor  $C = 10\ \mu\text{F}$  přes ochranný rezistor  $1\text{ k}\Omega$  a změřte na něm napětí a proud.
- Ke zdroji připojte cívku  $L$  a změřte závislost  $I = I(U)$  postupným zvyšováním napětí. Určete vnitřní odpor cívky  $R_L$ .

.....

### Použité přístroje a pomůcky

měřicí panel, zdroj napětí, A&DDU, COMPONENT BOARD, přesný stavitelný zdroj PROGRAMMABLE DC SUPPLY, VOLTMETER DC&AC RMS, digitální multimetr, sada rezistorů a propojek, odporová dekáda, kondenzátory, cívka, sada vodičů

### Studijní prameny

přednášky z elektřiny a magnetismu  
 Záhejský, J.: *Elektřina a magnetismus*, VUP Olomouc, 2001

## Úloha číslo 2.

Cílem úlohy je ověření chování prvků v lineárních obvodech s časově proměnným proudem. Ověří se koncepty fázorových diagramů a komplexních impedancí v případě harmonických proudů a také základní přechodné děje.

## : Teorie

Ve stacionárních obvodech mají proudy stálou velikost, nedochází k jejich změně v čase. Každý obvod však musí být něčím napájen a proces připojení napětí způsobí, že proud musí z nulové hodnoty narůst na svou konečnou hodnotu, což se děje v procesu nazývaném přechodný děj. V něm neplatí některé zákonitosti stacionárních obvodů a proto musíme všechna napětí i proudy považovat za funkce času, a zpravidla je označujeme malými písmeny  $i(t)$ ,  $u(t)$ . Přirozeným zobecněním je zavedení obvodů, ve kterých je „přechodný“ děj trvalý, tedy v nichž se proud neustále s časem mění. Ukazuje se, že takové obvody nejsou zajímavé jen teoreticky, ale i z hlediska praxe – neustálá změna proudů totiž vede k tvorbě nestacionárních magnetických i elektrických polí, které se vzájemně ovlivňují.

Obzvláště výhodné vlastnosti má obvod s **harmonickými průběhy** napětí a času, které se dají vyjádřit pomocí trigonometrických funkcí ve tvaru  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ . Jeho výhodou je nejen snadné vytváření takových průběhů, ale i zajímavé matematické vlastnosti vzhledem k časové derivaci a integraci. Harmonické obvody se označují jako **střídavé obvody**, protože v nich proudy mění svou orientaci (polaritu).

Uvažujme nejprve rezistor  $R$ , který je připojen ke zdroji proměnného napětí  $u(t) = U_m \sin \omega t$ . Protože rezistor nemá žádnou „paměť“ – nedochází v něm k žádné formě akumulace energie, je proud, který jím teče, přímo úměrný okamžitému napětí. Lze proto psát  $i(t) = \frac{1}{R}u(t) = \frac{1}{R}U_m \sin \omega t$ , což je v podstatě jen přepis vzorce ze stacionárního obvodu. Čistě teoreticky by mohl být odpor  $R$  závislý na frekvenci  $\omega$ , ale u ideálního odporu je konstantní. Závěrem lze říci, že obvod složený pouze z rezistorů se chová stejně ve stacionárních i časově proměnných obvodech.

Jiná situace nastává v obvodech s kondenzátory a cívkami. Uvažujme nejprve **kondenzátor**, tedy prvek schopný hromadění náboje. Pokud na desky kondenzátoru přivádíme náboj, vzrůstá v jeho objemu elektrické pole, což se projeví také růstem napětí (u deskového kondenzátoru je  $U = Ed$ , kde  $d$  je vzdálenost desek a  $E$  intenzita elektrického pole). Vzájemná závislost je lineární s konstantou úměrnosti zvanou **kapacita**  $C$ , přesně platí  $Q = CU$ . Uvažujme nyní vše v průběhu času. Uvažujme vybitý kondenzátor, který jsme připojili ke zdroji. Okamžité napětí závisí na okamžité hodnotě nahromaděného náboje na elektrodách, který z definice závisí na prošlém proudu, což lze vyjádřit rovnicí

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t') dt'.$$

Uvažujme, že procházející proud je harmonický,  $i(t) = I_m \sin \omega t$ . Po dosazení a integraci dostáváme

$$u(t) = \frac{1}{C} I_m \int_0^t \sin \omega t' dt' = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Vidíme, že mezi proudem a napětím je fázový rozdíl  $90^\circ$  a že amplituda napětí závisí i na frekvenci  $\omega$ . Tento vztah nelze vyjádřit ve tvaru  $u(t) = ki(t)$ , kde  $k$  je nějaká konstanta. Zkusme využít komplexních čísel a vyjádřit v nich proud. Máme  $i(t) = I_m \sin \omega t = \text{Im} \{ I_m e^{j\omega t} \}$ , kde  $\text{Im}$  je označení imaginární části a  $j$  je imaginární jednotka (v matematice se zpravidla značí  $i$ , zde by se pletla s proudem). Když obdobným způsobem vyjádříme napětí, zjistíme, že lze psát  $u(t) = \text{Im} \{ \frac{1}{\omega C} I_m e^{j(\omega t - \pi/2)} \} = \text{Im} \{ -j \frac{1}{\omega C} I_m e^{j\omega t} \}$ , kde jsme využili vztahu  $e^{-j\pi/2} = -j$ . V posledním vyjádření má souvislost mezi napětím a proudem lineární průběh, což nás vede k myšlence vyjádřit napětí i proud jako komplexní veličiny, které označíme  $\hat{I}$ ,  $\hat{U}$ . Konstantu úměrnosti označíme jako **reaktanci**  $X$  a můžeme psát

$$\hat{U} = -jX\hat{I},$$

což má formálně tvar Ohmova zákona. Veličinu  $X$  pak můžeme uvažovat jako odpor, který klade kondenzátor procházejícímu (harmonickému) proudu. Důležité však je, že reaktance je funkcí frekvence,

$$X = \frac{1}{\omega C}.$$

Protože jsme „střídavé“ veličiny uvedli do komplexní roviny, získaly nejen velikost, ale i směr. Uvažujme vztah pro napětí  $\hat{U} = U e^{j(\omega t - \pi/2)} = (U e^{-j\pi/2}) e^{j\omega t}$ , kde jsme rozepsali komplexní funkci. Člen v závorce

odpovídá komplexnímu číslu, které má velikost  $U$  a svírá s reálnou osou úhel  $90^\circ$ . Poslední člen odpovídá časové rotaci komplexního čísla okolo bodu  $(0, 0)$  s frekvencí  $\omega$ . Protože se zabýváme lineárními obvody, které nemohou změnit frekvenci průběhů, musí být poslední člen stejný pro všechna napětí i proudy – je zbytečné je ve vztazích uvádět a postačí pracovat pouze s pojmem **fázor**, což je člen odpovídající první závorce. Nese informaci jak o velikosti průběhu, tak o jeho fázi v čase 0 s. Vykreslíme-li do jednoho grafu několik průběhů napětí či proudů jako fázory, získáme **fázorový diagram**, který zachycuje *vzájemné* fázové i velikostní poměry mezi nimi. Například diagram napětí a proudu v případě kondenzátoru ukazuje, že je mezi nimi fázový posuv  $90^\circ$ .

Výhodou fázorových diagramů je jednoduché sčítání napětí. Místo sčítání sinusových a kosinových funkcí v časovém vyjádření zde budeme provádět *vektorové sčítání*. Pokud někdy potřebujeme zachytit i časovou závislost průběhů, lze si představit, že osy fázorových diagramů rotují frekvencí  $\omega$  v opačném směru než skutečné průběhy.

Podívejme se, jak se ve střídavém obvodu projeví **cívka** bez jádra. Průchodem proudu se v cívce budí magnetické pole. Mění-li proud svou velikost, mění se i magnetické pole, a změna magnetického pole je schopna zpětně indukovat napětí v obvodu. Velikost indukovaného napětí je

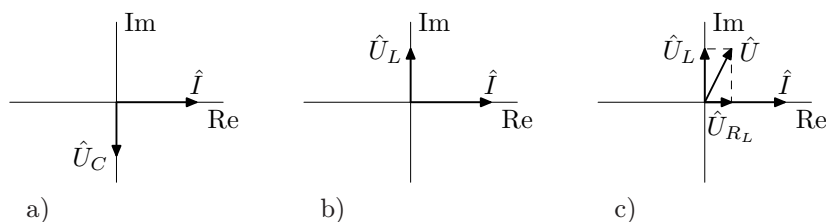
$$u(t) = -L \frac{di(t)}{dt},$$

kde **indukčnost**  $L$  je základním parametrem cívky. Uvažujme, že obvodem prochází střídavý proud  $i(t) = I_m \sin \omega t$ . Po dosazení obdržíme napětí na svorkách cívky ve tvaru

$$u(t) = L\omega I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + \pi/2).$$

Sledování postupu použitého u kondenzátoru vede k definici reaktance cívky

$$X = \omega L.$$



Obrázek 9: Fázorový diagram v případě a) ideálního kondenzátoru, b) ideální cívky, c) reálné cívky.

Uvažujme nyní sériové zapojení cívky  $L$  a rezistoru  $R$  a zkusme najít vztah mezi proudem a napětím na obou prvcích. Víme, že oběma prvky musí protékat stejný proud  $\hat{I}$ . O napětí na rezistoru už víme, že je násobkem proudu, tj.  $\hat{U}_R = R\hat{I}$ . Na cívce jsou napětí a proud vzájemně fázově posunuty, což můžeme zohlednit násobením imaginární jednotkou  $j$  a psát  $\hat{U}_L = jX\hat{I}$ . Ve fázorovém diagramu budou obě napětí navzájem kolmá a jejich vektorový součet dá

$$\hat{U} = \hat{U}_R + \hat{U}_L = (R + jX)\hat{I} = \hat{Z}\hat{I}, \quad (7)$$

kde  $\hat{Z} = R + jX$  je **impedance obvodu**, která odpovídá komplexnímu odporu, který obvod klade protékajícímu střídavému proudu. Rovnice (7) vyjadřuje *Ohmův zákon pro obvody střídavého proudu*. I když  $\hat{Z}$  není fázor v pravém smyslu (chybí mu časová závislost), lze jej zobrazit v komplexní Gaussově rovině. Protože má jak reálnou (odporovou), tak komplexní složku, neleží už podél jedné z os, ale svírá s reálnou osou úhel

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R},$$

který závisí na velikosti  $R$  a  $L$  a také na frekvenci. Stejný směr jako  $\hat{Z}$  bude mít výsledné napětí  $\hat{U}$ . Uvedená situace odpovídá *reálné cívce*, protože její vinutí má vždy nenulový odpor  $R_L$ .

Při řešení obvodů pracujeme s impedancí stejným způsobem jako s rezistory (také používáme stejnou schematicou značku), jen musíme zohlednit komplexní charakter, tj. její dvě složky. Platí pro ni stejné zákonitosti pro sériové a paralelní zapojení jako pro odpory. Pro impedanci samotné (ideální) cívky platí  $\hat{Z}_L = j\omega L$ , pro kondenzátor  $\hat{Z}_C = -j\frac{1}{\omega C}$ . Jako příklad uveďme výslednou impedanci *paralelního zapojení kondenzátoru a rezistoru*

$$\frac{1}{\hat{Z}_{R\parallel C}} = \frac{1}{R} + j\omega C \quad \Rightarrow \quad \hat{Z}_{R\parallel C} = \frac{-j\frac{R}{\omega C}}{R - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}.$$

Tato kombinace  $R$  a  $C$  se vyskytuje u každého *reálného kondenzátoru*, protože materiály používané pro výrobu kondenzátorů nemají nekonečný odpor. Úhel definovaný vztahem

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega RC}$$

se nazývá **ztrátový úhel** a  $\operatorname{tg} \delta$  je **ztrátový činitel**, který je základní charakteristikou kvality kondenzátoru, udávanou v katalogích.

Ve střídavých obvodech rovněž platí oba Kirchhoffovy zákony, vyjádřené ve tvarech

$$\sum_i \hat{I}_i = 0, \quad \sum_i \hat{U}_i = \sum_j \hat{Z}_j \hat{I}_j.$$

První vyjadřuje nulovou změnu proudu v uzlu, druhý pak rovnost napětí a úbytků v libovolné uzavřené smyčce. K řešení střídavých obvodů lze použít stejných metod jako u stejnosměrných obvodů.

**Princip superpozice** Uvažujme lineární obvod, ve kterém je zapojeno několik zdrojů napětí  $\hat{U}_i$  a sledujme proud  $\hat{I}_x$  protékající zvolenou impedancí  $\hat{Z}_x$ . Ukazuje se, že tento proud je součtem proudů  $I_{x_i}$ , které impedancí potečou, bude-li zapojen pouze  $i$ -tý zdroj. Uvedené tvrzení je obsahem **principu superpozice**. Tento princip platí i tehdy, je-li zapojen nějaký zdroj konstantního napětí nebo mají-li zdroje obecně různé frekvence  $\omega_i$  (což je ekvivalentní tomu, že průběh výsledného napětí není sinusový). V druhém případě je však třeba si uvědomit, že metoda komplexních vyjádření napětí a proudů má určitá omezení. Především je  $\hat{Z}$  funkcí frekvence a tedy pro každý zdroj má jinou hodnotu. Může se proto stát, že nejde zavést celkovou impedanci takovou, abychom mohli napsat Ohmův zákon ve tvaru  $\hat{U} = \hat{Z}\hat{I}$ , ale můžeme psát pouze  $\hat{U} = \sum_i \hat{Z}_i \hat{I}_i$ .

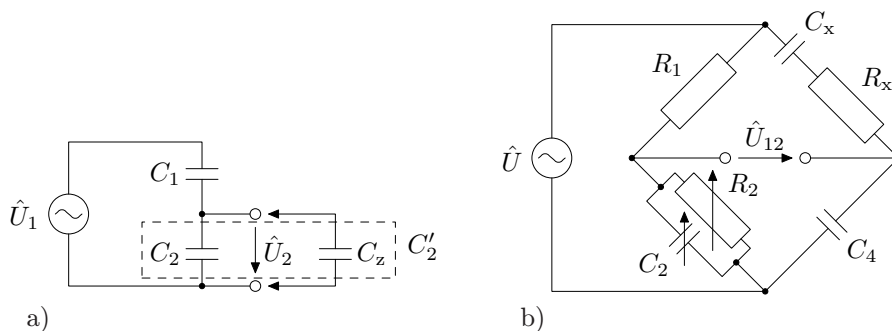
**Kapacitní dělič** Zapojme ke zdroji sériově dva kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  a sledujme napětí na druhém z nich. Bude platit

$$\hat{U}_2 = \hat{Z}_2 \hat{I} = \hat{Z}_2 \frac{\hat{U}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \hat{U},$$

tedy výstupní napětí bude zlomkem napájecího napětí a zapojení pracuje jako **napěťový dělič** (obr. 10a). Protože po dosazení se vyrušily všechny frekvence, je dělič frekvenčně nezávislý. Totéž bude platit, připojíme-li k výstupu zátěž čistě kapacitního charakteru  $C_z$ . Ve vztazích pouze stačí nahradit  $C_2 \rightarrow C_2 + C_z$ . Připojíme-li však čistě odporovou zátěž  $R_z$ , bude výstupní napětí

$$\hat{U}'_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2 - j \frac{1}{\omega R_z}} \hat{U}$$

frekvenčně závislé.



Obrázek 10: a) Kapacitní dělič, b) Scheringův můstek.

**Scheringův můstek** K měření obecných impedancí se používají můstky Wheatstonova typu, ve kterých bývá jeden rezistor nahrazen vhodnou impedancí  $\hat{Z}_2$  a druhý je tvořen měřenou impedancí. Tvar  $\hat{Z}_2$  závisí na charakteru měřené impedance, v případě měření reálného kondenzátoru se používá Scheringův můstek (obr. 10b). Je-li můstek vyvážen (napětí  $\hat{U}_{12}$  je nulové), musí platit

$$\left(1 + \frac{C_4}{C_x}\right) + j\omega R_x C_4 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + j\omega R_1 C_2,$$

což po rozdělení na reálné a imaginární složky určuje kapacitu i svodový odpor měřeného kondenzátoru

$$R_x = R_1 \frac{C_2}{C_4}, \quad C_x = C_4 \frac{R_2}{R_1}.$$

Je-li splněna jen jedna z podmínek, není napětí  $\hat{U}_{12}$  nulové, pouze má minimální hodnotu. Budeme-li tedy snižovat např. hodnotu odporu  $R_2$ , bude napětí nejprve klesat a pak opět růst. Dosazením hodnoty  $R_2$  odpovídající minimu lze určit velikost kapacity.

**Přechodné děje** Uvažujme sériové zapojení rezistoru  $R$  a kondenzátoru  $C$ , které připojíme přes spínač ke zdroji konstantního napětí  $U$ . Je-li spínač rozepnutý, neprochází obvodem proud a napětí na kondenzátoru je nulové (byl-li vybitý). Sledujme, co se stane po okamžiku  $t = 0$ , ve kterém spínač sepne. V čase  $t > 0$  bude na svorkách RC dvojice napětí  $U$  a procházející proud musí splňovat integrální rovnici

$$Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i(t') dt' = U.$$

Když rovnici zderivujeme podle času, získáme diferenciální rovnici, jejíž řešení lze psát ve tvaru  $i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$ . Dosadíme-li jej do původní rovnice, dostaneme z podmínky rovnosti obou stran hodnotu konstanty  $I_0 = U/R$  a výsledný proud tekoucí obvodem pak je

$$i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Fyzikálně to znamená, že ihned po zapnutí teče velký proud, jehož velikost závisí jen na  $R$  (kondenzátor se chová jako zkrat), proud však exponenciálně klesá a po době mnohem větší než **časová konstanta**  $\tau = RC$  je (téměř) nulový. Budeme-li sledovat napětí na kondenzátoru  $u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t') dt' = U(1 - e^{-t/\tau})$ , vidíme, že postupně roste z nulové hodnoty na hodnotu  $U$ , což znamená, že se snižuje napěťový spád na svorkách rezistoru. Proto také proud klesá – když se napětí vyrovnají, nemůže proud téci. Vzhledem k omezené době toku proudu se uvedený jev nazývá **přechodný děj** a projevuje se při jakékoliv náhlé změně napětí, a to i v jinak stacionárních obvodech. Obdobný exponenciální charakter má vybíjení kondenzátoru přes rezistor, stejně tak jevy v  $RL$  obvodech (s časovou konstantou  $\tau = \frac{L}{R}$ ).

## : Realizace měření :

Měření v této úloze realizujte pomocí funkčního generátoru v režimu generace sinusového průběhu s nulovým ofsetem, kde je to možné, použijte program RC2000 k zobrazení fázorů.

Ověření frekvenční nezávislosti proveďte tak, že zapojíte do série měřený rezistor a rezistor pro měření proudu. Na osciloskopu zobrazujte průběhy napětí na obou rezistorech a zároveň zapněte v nabídce MATH zobrazování podílu. Sledujte změnu podílu při změně frekvence zdroje. Velikosti odporu volte s ohledem na možnosti funkce MATH, měření rezistoru  $1 \text{ k}\Omega$  vyžaduje převodník  $100 \Omega$ .

Při použití kondenzátorů je nepřipojujte přímo ke zdroji, protože může dojít k překročení proudové ochrany systému. Použijte ochranný rezistor zapojený do série, jeho velikost volte tak, aby příliš neovlivnil fázové poměry. Optimální hodnota závisí i na použité frekvenci, proto si zvolte měřený rozsah frekvencí podle použitých součástek. Při  $C \sim 1 \mu\text{F}$  lze použít rezistor  $100 \Omega$ .

Měření sériové kombinace  $RC$  provádějte pro  $R = 1 \text{ k}\Omega$  a  $C = 1 \mu\text{F}$ . Do série zapojte ještě malý měřicí odpor  $1$  nebo  $10 \Omega$ . U paralelní kombinace zvolte větší měřicí odpor ( $100 \Omega$ ), aby nedošlo k sepnutí proudové ochrany při zařazení kondenzátoru. Zapojte  $C = 1 \mu\text{F}$ , zobrazte fázorový diagram a pak teprve připojte paralelně  $R = 2 \text{ k}\Omega$ . Impedanci obvodu určete měřením efektivních napětí na  $RC$  kombinaci a na měřicím odporu pomocí VOLTMETER DC&AC RMS.

Při sledování přechodného děje zvolte časovou základnu i parametry obvodu tak, aby byl průběh dobře viditelný; při měření nastavte TRIGGER na OFF. Časovou konstantu určujte pro změnu napětí z  $0 \text{ V}$  na  $1 \text{ V}$ , použijte režim SINGLE, zapněte kurzory a nastavte první kurzor do polohy odpovídající napěťovému skoku, druhým kurzorem posunujte tak dlouho, až bude ukazovat napětí  $0,63 \text{ V}$ . Podle výše uvedených vztahů při tomto napětí je časový posuv kurzorů roven  $\tau$ .

Měření neznámého kondenzátoru proveďte všemi uvedenými metodami. Při srovnávání výsledku vezměte v úvahu, že pouze můstková metoda vám umožní určit svodový odpor kondenzátoru.

Změřenou hodnotu odporu cívky  $R_L$  srovnajte s hodnotou získanou v úloze o stacionárních obvodech.

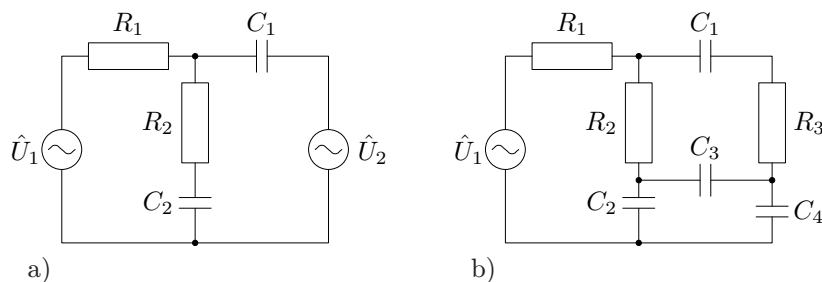
Při ověřování principu superpozice použijte dva nezávislé funkční generátory, které nastavíte na stejnou frekvenci. Před měřením si zjistěte, jaký je fázový rozdíl mezi oběma zdroji.



## : Zadání úlohy

:

1. Ověřte, že v rozsahu frekvencí  $(0, 400)$  Hz pro rezistor platí  $R(\omega) = R$  (nezávislost na frekvenci) a zobrazte fázorový diagram.
2. Sestavte odporový dělič a ověřte frekvenční nezávislost výstupního napětí.
3. Ke zdroji střídavého napětí zapojte kondenzátor  $100 \text{ nF}$  (přes omezující rezistor  $1 \text{ k}\Omega$ ) a ověřte frekvenční závislost proudu a napětí v rozsahu frekvencí  $\langle 0 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz} \rangle$ . Zobrazte fázorový diagram pro dvě různé frekvence a určete maximální napětí na kondenzátoru.
4. Ověřte vztahy pro paralelní a sériové zapojení kondenzátorů pomocí měření proudu a napětí.
5. Zobrazte fázorové diagramy v případě sériového a paralelního zapojení kondenzátoru a rezistoru (odporové dekády). Určete výslednou impedanci obvodu a srovnajte s teorií.
6. Sestavte kapacitní dělič napětí  $C_1 = 1 \mu\text{F}$  a  $C_2 = 10 \mu\text{F}$  a ověřte jeho frekvenční nezávislost v rozsahu  $\langle 10, 200 \rangle$  Hz. Zjistěte, co se stane po připojení **a)** kapacitní zátěže  $1 \mu\text{F}$ , **b)** odporové zátěže  $1 \text{ k}\Omega$ .
7. Zapojte stejnosměrný zdroj s nulovým napětím, připojte k němu  $R = 100 \text{ k}\Omega$  a  $C = 10 \mu\text{F}$  a zapojte osciloskop systému RC2000 s velmi pomalou časovou základnou ( $10 \text{ s}$ ). Sledujte průběh napětí na kondenzátoru při skokových změnách napětí ( $\Delta V = 1 \text{ V}$ ) a z průběhů graficky určete časovou konstantu obvodu.
8. Určete hodnotu neznámé kapacity pomocí časové konstanty, přímé metody a Scheringova můstku a výsledky srovnajte.
9. Ke zdroji střídavého napětí zapojte cívku a ověřte frekvenční závislost proudu a napětí v rozsahu frekvencí  $\langle 0 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz} \rangle$ . Zobrazte fázorový diagram pro dvě různé frekvence a určete vnitřní odpor cívky.
10. Zapojte obvod podle obr. 11a) a zobrazte průběh napětí na  $R_2C_2$ , jsou-li postupně zapojeny první, druhý a oba zdroje. Ověřte, že platí princip superpozice. Zobrazte i fázorové diagramy.



Obrázek 11: Zapojení a) pro ověření principu superpozice, b) pro ověření proudů.

11. Zapojte obvod podle obr. 11b) a změřte, jaký proud je odebírán ze zdroje a jaké proudy tečou v jednotlivých větvích, případně výsledky srovnajte s teoretickými výpočty.

### Použité přístroje a pomůcky

počítač s programem RC2000, měřicí panel, zdroj napětí, A&DDU, COMPONENT BOARD, přesný stavitelný zdroj PROGRAMMABLE DC SUPPLY, FUNCTION GENERATOR (2×), VOLTMETER DC&AC RMS, sada rezistorů a propojek, odporová dekáda, kondenzátory a cívka, sada vodičů

### Studijní prameny

přednášky z elektřiny a magnetismu

Záhejský, J.: *Elektřina a magnetismus*, VUP Olomouc, 2001

## Úloha číslo 3.

Cílem úlohy je seznámení se s některými nelineárními prvky a jejich vlivem na chování obvodu. Dále se úloha věnuje prvkům, které jsou řízené neelektrickými vlivy.

## : Teorie

Prvky, které jsou vytvořeny z homogenního kusu materiálu, jsou zpravidla lineární (např. kovový vodič). To znamená, že je lineární vztah mezi procházejícím proudem a úbytkem napětí na prvku (v případě ustáleného nebo jen velmi pozvolna se měnícího proudu) a že tedy lze jednoznačně definovat odpor  $R$ . V případě, že se prvek skládá z více materiálů, je speciálně zpracován nebo je přiloženo příliš velké napětí, může být linearita vztahu napětí – proud narušena a **nelineární prvek** je pak charakterizován nelineární závislostí

$$U = f(I)$$

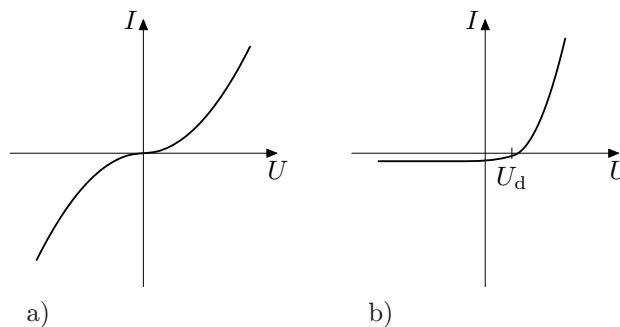
a jeho **voltampérová charakteristika** už není přímkou. Pro nelineární prvek nelze jednoznačně nadefinovat odpor, a tudíž pro něj neplatí Ohmův zákon, resp. ho lze psát pouze formálně ve tvaru  $U = R(I)I$ . Můžeme pak zavést **statický odpor** v daném bodě  $P$  definicí  $R_{P_{\text{stat}}} = \frac{U_P}{I_P}$ , který je vhodný např. pro analýzu energetických poměrů. Dále se zavádí **dynamický odpor** v bodě  $P$  vztahem  $R_{P_{\text{dyn}}} = \left. \frac{dU}{dI} \right|_P = f'(I_P)$ , který se používá pro analýzu reakce prvku na malé změny napětí (přenos signálu). Zvláštností dynamického odporu je, že může být i záporný, tedy s růstem napětí proud klesá. Této vlastnosti se využívá např. při konstrukci oscilátorů. Nelineární prvky mohou být závislé i na historii, což se projeví např. existencí hysterezních smyček, budeme-li cyklicky měnit velikost napětí na prvku.

Uvažujme prvek s kvadratickou charakteristikou  $U = I^2$  (neuvažujme nyní jednotky) a zapojme ho do série se dvěma zdroji napětí. Napětí na svorkách bude  $U = U_1 + U_2$  a obvodem poteče proud  $I = \sqrt{U_1 + U_2}$ . Vypočítejme teď vždy jeden ze zdrojů a určíme protékající proud, získáme  $I_{1,2} = \sqrt{U_{1,2}}$ . Protože  $\sqrt{U_1 + U_2} \neq \sqrt{U_1} + \sqrt{U_2}$ , v nelineárních obvodech neplatí princip superpozice. To také znamená, že nelze k řešení obvodů použít např. metodu smyčkových proudů či Théveninův teorém. Nelineární obvody je třeba často řešit numericky (nebo graficky).

Příkladem nelineárního prvku může být **varistor**, prvek s proměnným odporem závislým na napětí. Jeho voltampérová charakteristika je v ideálním případě symetrická kolem nuly a lze ji popsat vztahem

$$U = kI^{\frac{1}{\beta}},$$

kde  $k$  je konstanta a koeficient nelinearity  $\beta$  je dán poměrem statického a dynamického odporu. Této charakteristice bývá dosaženo technologií výroby, při které se spékají malá zrníčka polovodičového SiC. Protože hodnota statického i dynamického odporu s růstem proudu klesá, používá se tato součástka k ochraně před přepětím – připojí se paralelně ke vstupu obvodu, při zvýšení napětí vstup „zkratuje“.



Obrázek 12: Voltampérová charakteristika a) varistoru, b) diody.

Často užívaným nelineárním prvkem je polovodičová **dioda**. Jejím základem je PN přechod, který vzniká mezi polovodiči s různým charakterem dotace (polovodič typu P nebo N), resp. s různou koncentrací nosičů náboje. Protože koncentrace nosičů se na obou stranách přechodu liší, vzniká v místě přechodu gradient koncentrace, který způsobí difúzi částí nosičů na druhou stranu, čímž dojde ke vzniku napěťového rozdílu – difúzního napětí  $U_d$  mezi stranami přechodu a k vytvoření oblasti potenciálové bariéry šířky  $d$ , ve které nejsou volné nosiče (na druhé straně přechodu totiž zrekombinují). Předpokládejme nyní, že jsme na přechod připojili vnější napětí. Bude-li polarita napětí taková, že je kladný pól zdroje

připojen do oblasti N, dojde k „odsátí“ nosičů z objemu polovodiče směrem *od* přechodu a k zvětšení šířky  $d$ . Ve výsledku to znamená, že přechodem bude protékat jen velmi malý proud  $I_0$  a přechod bude polarizován v **závěrném směru**. Připojíme-li napětí opačně, bude nejprve působit proti  $U_d$  a snižovat šířku  $d$  a v této době poteče jen malý proud. Až vnější napětí překročí hodnotu  $U_d$ , bariéra zanikne a začne procházet velký proud – přechod bude polarizován v **propustném směru**. PN přechod (a tedy i dioda) se proto chová jako jednocestný ventil, který propouští proud jen v jednom směru. To lze říci jinými slovy tak, že odpor diody je v propustném směru nulový a v závěrném směru velmi velký. Reálná dioda se chová trochu složitěji a lze ji pro malá napětí popsat **Shockleyho diodovou rovnicí**

$$I = I_0 \left\{ e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right\},$$

kde  $U_T = \frac{k_B T}{e}$  je **teplotní napětí**,  $k_B$  Boltzmannova konstanta,  $T$  teplota PN přechodu a  $e$  elementární náboj. Přechod mezi závěrným a propustným směrem tedy není náhlý, ale má pozvolný charakter.

**Řízené prvky** Jako řízené prvky označujeme takové elektrické prvky, jejichž parametry výrazně závisí i na jiných veličinách než napětí a proud v obvodě. V jistém smyslu můžeme jako řízený prvek označit každý, protože mnoho vlastností závisí třeba na teplotě – tato závislost se však u běžných prvků považuje za nežádoucí.

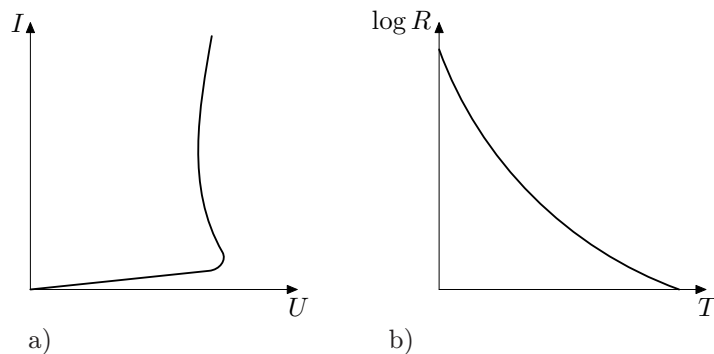
Prvky, které mění svůj odpor v závislosti na teplotě, se souhrnně označují jako **termorezistory**. Jejich základní charakteristikou je **teplotní součinitel odporu**

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T},$$

kteří udává poměrnou změnu rezistivity  $\rho$  při změně teploty  $T$ . Podle znaménka  $\alpha$  se rozlišují dva druhy termorezistorů. **Termistor** (označení NTC) je charakterizován zápornou hodnotou  $-\alpha$ . Vyrábí se nejčastěji spečením práškových oxidů kovů nebo z monokrystalického polovodiče. Jeho odpor prudce klesá s teplotou, přibližně jej lze charakterizovat vztahem

$$R_T = R_\infty e^{\frac{B}{T}},$$

kde  $R_T$  je odpor při teplotě  $T$ ,  $R_\infty$  je odpor při nekonečné teplotě a  $B$  je charakteristická konstanta termistoru. Hodnota odporu klesá o několik řádů při změně teploty o jeden řád. Voltampérová charakteristika vykazuje oblast se záporným dynamickým odporem a má charakter S-křivky.



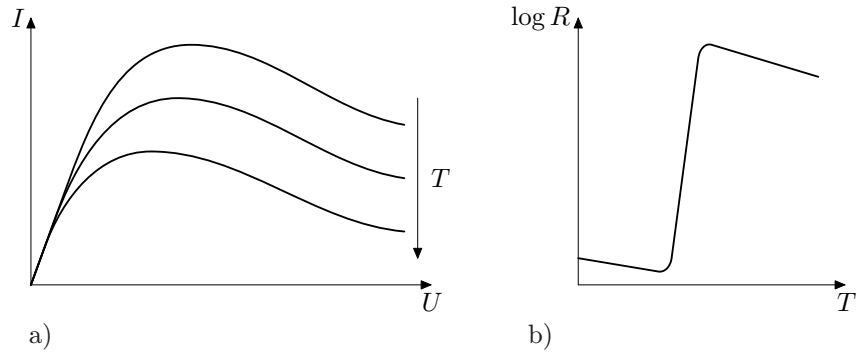
Obrázek 13: Termistor: a) voltampérová charakteristika, b) závislost odporu.

**Pozistor** (označení PTC) má součinitel  $\alpha$  kladný a jeho odpor tedy s teplotou roste. Závislost  $R = R(T)$  je však zpravidla složitější, při nízkých teplotách odpor při růstu teploty nepatrně klesá, až pak se objeví strmý nárůst (a případně zase pokles). Tato závislost se zpravidla udává ve formě

$$\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right),$$

kde  $f(\cdot)$  je vhodná funkce. Voltampérová charakteristika pozistoru také vykazuje oblast záporného dynamického odporu, a má při malých napětích oblast, kdy je téměř nezávislá na teplotě.

Změna teploty, na kterou termorezistory reagují, může být způsobena změnou okolní teploty nebo ohřevem vlivem procházejícího proudu. Podle aplikace můžeme jednu z nich považovat za nežádoucí. Při měření teploty musíme vlastní ohřev minimalizovat a tedy použít zapojení, při kterém teče co nejmenší proud.



Obrázek 14: Pozistor: a) voltampérová charakteristika, b) závislost odporu.

Jednou ze součástí, v nichž se vlastní ohřev využívá, je **žárovka**. Ta je tvořena dlouhým tenkým vodivým drátem (zpravidla spirálovitě svinutým), který je umístěn v evakuované nebo inertním plynem plněné baňce. Vzhledem k rozměrům drátu má drát velký odpor a průchodem proudem se silně zahřívá. Tím, že je zahřátý, však vyzařuje elektromagnetickou energii – při dostatečné teplotě začne žárovka svítit. Uvažujme nyní, že žárovka je v ustáleném stavu a že veškerý výkon proudem procházejícího žárovkou je odevzdáván do okolí, tj. že platí

$$\beta(T - T_0) = IU,$$

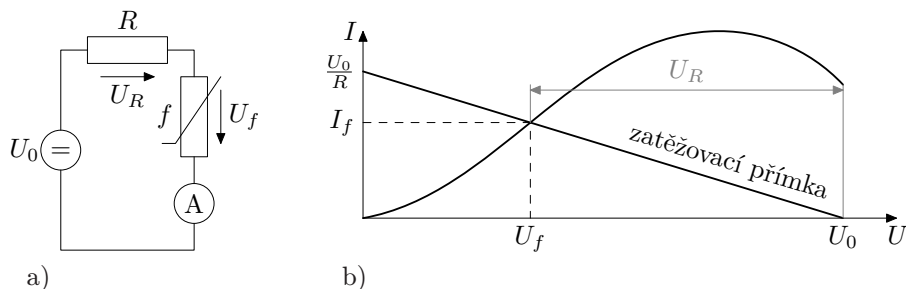
kde  $\beta$  je koeficient předávání energie,  $T$  je teplota vlákna a  $T_0$  je teplota okolí. Využijeme-li ještě rovnici pro změnu odporu s teplotou  $R_T = R_0(1 + \alpha T)$  a vztah pro velikost proudu  $I = \frac{U}{R_T}$ , dostaneme voltampérovou charakteristiku

$$I = \frac{U}{R_0} - \frac{\alpha}{\beta R_0^2} U^3.$$

Proto v případě  $\alpha \neq 0$  roste proud žárovkou rozdílně než odpovídá Ohmovu zákonu. Například pro uhlík je  $\alpha < 0$  a proud roste strměji, u wolframu je  $\alpha > 0$  a proud roste pomaleji. Ve skutečnost je závislost složitější, protože ochlazování probíhá více procesy (vyzařování závisí na  $T^4 - T_0^4$ ) a koeficienty ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) mohou záviset na teplotě.

**Způsoby řešení nelineárních obvodů** V případě obvodů s lineárními součástkami máme pro jejich řešení k dispozici celou řadu metod. Jejich aplikací nakonec dospějeme k lineární soustavě  $n$  rovnic. Řešení nelineárních obvodů je však komplikovanější. Některé metody nelze použít vůbec (např. smyčkové proudy), ostatní vedou k nelineárním soustavám rovnic. I v nelineárních obvodech musí platit oba Kirchhoffovy zákony, pouze při uvažování úbytků na nelineárních prvcích je třeba místo  $\Delta U = RI$  psát  $\Delta U = f(I)$ . Uvedme příklady řešení nelineárních obvodů:

- graficky řešíme obvody v případě, že je dostupné grafické vyjádření voltampérové charakteristiky nelineárního prvku. Uvažujme obvod, ve kterém je jeden zdroj napětí  $U_0$ , jeden lineární rezistor  $R$  a nelineární prvek. Na rezistor můžeme nahlížet jako na vnitřní odpor zdroje a můžeme proto sestavit **zatěžovací charakteristiku** zdroje. Ta vyjadřuje, jaké napětí je na svorkách zdroje, odebíráme-li z něj proud  $I$ . Charakteristiku dostaneme tak, že přímkou spojíme bod  $(U_0, 0)$ , odpovídající nulovému odběru proudu, s bodem  $(0, \frac{U_0}{R})$ , který odpovídá zkratovému proudu, který je zdroj schopen dodat. Nyní do téhož grafu vykreslíme voltampérovou charakteristiku nelineárního prvku. Její průsečík se zatěžovací přímkou odpovídá proudu  $I_f$ , který v obvodu prochází, a napětí  $U_f$ , které je na nelineárním prvku – tyto hodnoty jsou řešením problému.



Obrázek 15: Grafické řešení nelineárních obvodů a) schéma obvodu, b) způsob řešení.

2. numericky lze řešit obvody v případě, že je známo explicitní vyjádření voltampérové charakteristiky prvku, tj. známe  $U = f(I)$ . Pak můžeme sestavit rovnice dle prvního a/nebo druhého Kirchhoffova zákona, čímž získáme nelineární soustavu rovnic. Tu pak řešíme buď algebraickými metodami, je-li problém dostatečně jednoduchý, nebo numericky, je-li problém natolik složitý, že nelze rovnici řešit algebraicky. Ve druhém případě však dostáváme pouze *přibližné* řešení, zatížené numerickými chybami. Často je chybou zatížen i první způsob řešení, neboť analytický tvar  $U = f(I)$  bývá zjištěn prokládáním experimentálních dat.

Jako příklad uvažujme zapojení diody a rezistoru. Použijeme-li diodovou rovnici, získáme dle druhého Kirchhoffova zákona rovnici

$$U_0 = RI + U_T \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right),$$

v níž neznámý proud  $I$  vystupuje i v argumentu logaritmické funkce.

Numerické metody se používají také v počítačových programech pro řešení a simulaci obvodů.

3. linearizací řešíme obvody v případě, že se zajímáme o výsledky jen v určité oblasti. Metoda je už z principu jen přibližná a není schopna postihnout některé druhy chování v obvodech. Podstatou linearizace je nahrazení charakteristiky  $U = f(I)$  charakteristikou, která je tvořena na sebe navazujícími úsečkami. Pro každou úsečku nelineární prvek nahradíme rezistorem s odporem  $R$ , jehož velikost odpovídá směrnici dané úsečky, a pro tento *náhradní lineární* obvod sestavíme rovnice jako v případě lineárních obvodů.

Například voltampérovou charakteristiku diody můžeme v nejjednodušším přiblížení nahradit dvěma úsečkami

$$I = \begin{cases} 0 & \text{pro } U < U_d \\ \frac{U}{R_D} & \text{pro } U \geq U_d \end{cases},$$

kde  $R_D$  je dynamický odpor diody v propustném směru.

**Přechodové odpory** Mějme dva vodivé a dokonale hladké kvádry, které se sebe dokonale dotýkají. Jejich výsledný odpor bude součtem odporů jednotlivých kvádrů,  $R_A = R_1 + R_2$ . Uvažujme nyní, že dotykové strany kvádrů nejsou rovné, ale zakřivené. V místě dotyku pak proud nemůže procházet celým průřezem kvádrů, ale jen jeho částí. To však znamená, že se v oblasti dotyku sníží efektivní průřez kvádrů  $S$ , a vzhledem ke vztahu po výpočet odporu přímého vodiče  $R_v = \rho \frac{l}{S}$  se tedy zvýší celkový odpor, který spojení dvou kvádrů klade procházejícímu proudu. Bude tedy platit  $R_B = R_1 + R_2 + R_p > R_A$ , kde  $R_p$  označíme jako **přechodový odpor**, projevující se na rozhraní dvou těles.

Uvažujme dále, že zakřivené kvádry budeme tisknout proti sobě. Bude-li tlak dostatečně velký, dojde k deformaci stran kvádrů a ke změně velikosti plochy  $S$ , přes kterou může proud přicházet. To znamená, že takové uspořádání je citlivé na mechanické působení a lze jej tedy považovat za mechanicky řízenou součástku. Aby se zvýšil efekt mechanického působení, používají se místo kvádrů malá zrníčka (např. uhlíku), která nasypeme do válce z izolantu, který je z obou stran uzavřen vodivými elektrodami. Vzhledem k nepravidelnému tvaru a orientaci zrníčka nevyplňují celý prostor válce, ale jsou mezi nimi dutiny. Bude-li jedna elektroda posuvná a budeme-li ji stlačovat, budou se hranice zrn deformovat, což bude ovlivňovat průchod proudu mezi zrny a způsobí změnu odporu mezi elektrodami. Takovým způsobem můžeme snímat například změny akustického tlaku, což je základní princip uhlíkového mikrofónu.

## ∴ Realizace měření ∴

K měření voltampérových charakteristik použijte počítač se systémem RC2000 v režimu V-A CHARACTERISTICS. Pro měření proudu musíte do obvodu zařadit malý rezistor  $R_{I/U}$  jako převodník proudu na napětí, jeho velikost nastavte v bloku SENSE R. Měření statických odporů provádějte změnou napětí modulu PROGRAMMABLE DC SUPPLY a měřením proudu pomocí digitálního multimetru. Dynamický odpor měřte v programu RC2000 pomocí kurzorů: zvolte si jeden pracovní bod, kurzor „1“ umístěte kousek pod zvolený bod, kurzor 2 umístěte kousek nad zvolený bod – pole R v bloku CURSORS bude udávat hodnotu dynamického odporu ve zvoleném bodě. V případě tepelně závislých součástek měřte vždy metodou *bod po bodu* a nechte součástku před měřením tepelně ustálit.

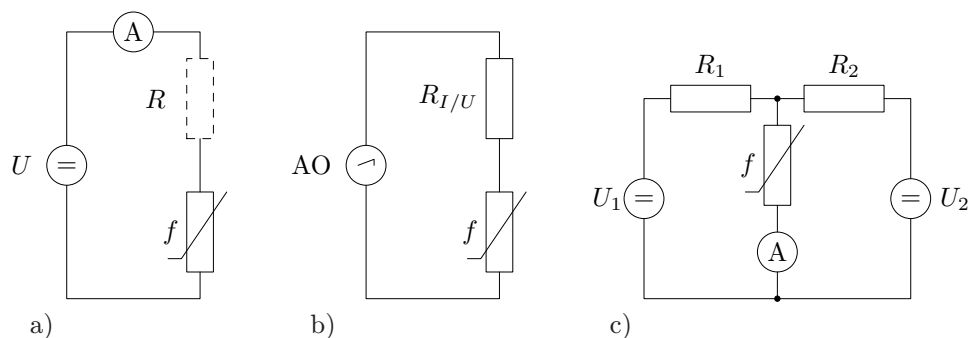
Potvrzení neplatnosti principu superpozice ověřte tak, že do větve s nelineárním prvkem zapojíte digitální multimetr v režimu ampérmetru, a změříte proud tekoucí při zapojení zdroje  $U_1$ , při zapojení  $U_2$  a při zapojení obou zdrojů.

Zahřívání termistoru a pozistoru provádějte jejich podržením v ruce, nárůst teploty o cca 15 °C by měl být patrný. Při měření žárovky není nutné aby svítila, její odpor se mění i při nižší teplotě. Proměřte její charakteristiku v intervalu (0, 4) V.

Grafickou metodu řešení nelineárních obvodů provádějte tak, že si vykreslíte voltampérovou charakteristiku nelineárního prvku (podle naměřených hodnot) a do téhož grafu vynesete zatěžovací přímku odpovídající napětí  $U_0$  a odporu  $R$ . Z průsečíku určíte hodnoty protékajícího proudu a napětí na nelineárním prvku, které pak srovnáte s naměřenými hodnotami napětí a proudu.

## : Zadání úlohy

1. Změřte voltampérovou charakteristiku varistoru a určete jeho dynamický a statický odpor v několika bodech.



Obrázek 16: Zapojení pro a) měření voltampérové charakteristiky *bod po bodu*, b) měření voltampérové charakteristiky programem RC2000, c) ověření neplatnosti principu superpozice.

2. Ověřte, že v nelineárním obvodě neplatí princip superpozice.
3. Uvažujte varistor zapojený do série s rezistorem o hodnotě  $R = 1, 2$  a  $5\text{ k}\Omega$  (obr. 15a) a změřte hodnoty napětí na rezistoru a varistoru a protékající proud. S využitím charakteristiky změřené v bodě 1 určete graficky proud  $I$  a napětí  $U_R$  a  $U_f$  a srovnajte jejich hodnoty s měřením.
4. Změřte voltampérovou charakteristiku termistoru, vykreslete do jednoho grafu průběhy pro několik teplot.
5. Změřte totéž pro pozistor.
6. Digitálním multimetrem změřte odpor žárovky „zastudena“. Pak ji zapojte do obvodu s ochranným rezistorem a pro několik hodnot napájecích napětí určete procházející proud a odpor žárovky.
7. Připojte k modulu FUNCTION GENERATOR sériovou kombinaci rezistoru  $R = 100\ \Omega$  a žárovky. Zobrazte současně průběhy napětí na generátoru a na žárovce při amplitudě  $5\text{ V}$ , a to pro dvě frekvence  $f_1 = 1\text{ Hz}$  a  $f_2 = 0,03\text{ Hz}$ . Vysvětlete pozorované rozdíly.
8. Změřte voltampérovou charakteristiku diody a určete její statický a dynamický odpor v několika bodech. Změřte proud, který prochází obvodem při obou polaritách napájecího napětí. Srovnajte hodnotu prahového napětí s teoretickou hodnotou.

### Použité přístroje a pomůcky

počítač s programem RC2000, měřicí panel, zdroj napětí, A&DDU, COMPONENT BOARD, přesný stavitelný zdroj PROGRAMMABLE DC SUPPLY, FUNCTION GENERATOR, digitální multimetr, sada rezistorů a propojek, varistor, termistor, pozistor, dioda, žárovka, odporová dekáda, sada vodičů

### Studijní prameny

přednášky z elektřiny a magnetismu

## Úloha číslo 4.

## Základní vlastnosti R, L, C obvodů při střídavém proudu

Cílem úlohy je vyšetřování elektrických vlastností obvodů obsahujících tři základní prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Předmětem zkoumání jsou napětí, proudy a jejich fáze, impedance, výkonové poměry a účinník obvodu. Předpokládáme v obvodech harmonické napájení a ustálený stav. Pro měření použijeme systém RC2000, pro simulaci obvodů pak simulační program TINA.

## : Teorie

Prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  můžeme zapojit do obvodu střídavého proudu různým způsobem. V obvodu se projevují především jejich odporové vlastnosti. Víme, že rezistor s určitým odporem  $R$  je prvek frekvenčně nezávislý. Prvky induktor  $L$  a kapacitor  $C$  kladou jiný odpor stejnosměrnému a jiný střídavému proudu. Při harmonickém napájení představuje u nich základní odporovou vlastnost reaktance  $X_L$  a  $X_C$ , které jsou závislé na frekvenci ( $X_L = \omega L$ ,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ). Tyto prvky rovněž ovlivňují fázové poměry v obvodu. Pro teoretické výpočty budeme používat symbolicko-komplexní vyjádření harmonických veličin pomocí fázorů a budeme předpokládat konstantní frekvenci  $f$ . Podrobněji si rozebereme sériové zapojení prvků  $R$ ,  $L$ ,  $C$ .

**Sériové zapojení  $R$ ,  $L$ ,  $C$**  Pro zkoumaný obvod na obr. 17 můžeme napsat rovnici dle II. Kirchhoffova zákona, kde pro celkové napětí  $\hat{U}$  platí

$$\hat{U} = \hat{U}_R + \hat{U}_L + \hat{U}_C. \quad (8)$$

Po dosazení platí  $\hat{U} = \hat{I} \left( R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right) = \hat{I}(R + jX_L - jX_C)$ . Jednotlivé „odporové“ vlastnosti lze vyjádřit pro ideální prvky pomocí **impedancí**

$$\hat{Z}_R = R, \quad \hat{Z}_L = j\omega L = jX_L, \quad \hat{Z}_C = -j\frac{1}{\omega C} = -jX_C. \quad (9)$$

Potom dostáváme komplexní impedanci obvodu

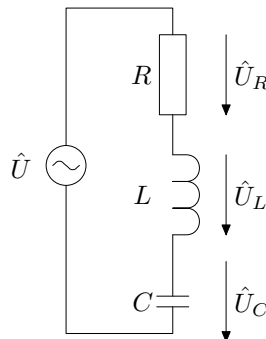
$$\hat{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + jX_L - jX_C, \quad (10)$$

kde veličiny  $X_L$  a  $X_C$  jsou reaktance a prvky  $L$  a  $C$  se pak nazývají **reaktanční prvky**. Pro napětí platí Ohmův zákon v symbolickém tvaru

$$\hat{U} = \hat{Z}\hat{I}, \quad (11)$$

ze kterého určíme komplexní impedanci pomocí fázoru proudu a napětí

$$\hat{Z} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = Ze^{j\varphi}. \quad (12)$$



Obrázek 17: Sériový obvod  $RLC$ .

Modul impedance (pouze velikost) pak můžeme určit dle vztahu

$$|\hat{Z}| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (13)$$

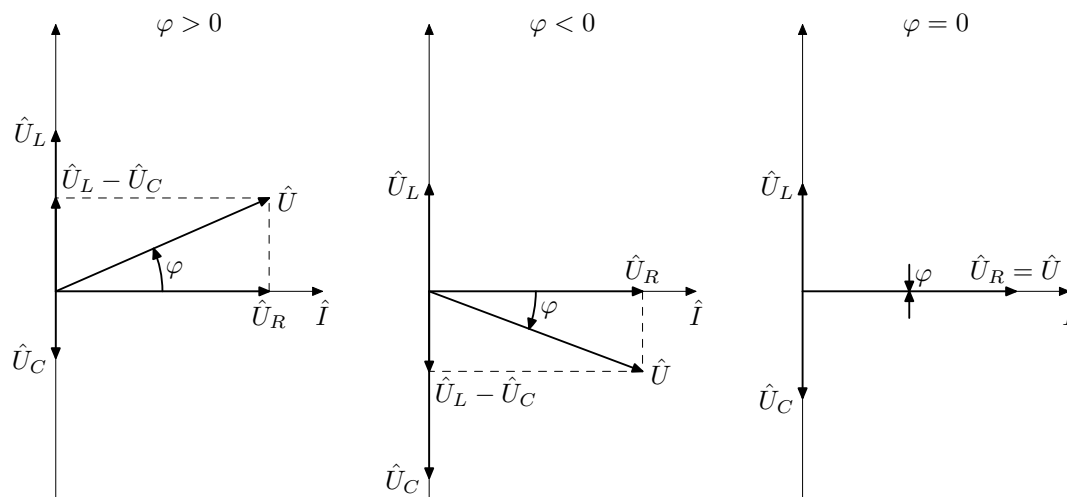
Pro argument impedance platí

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (14)$$

Znamená to, že stačí znát buď naměřené hodnoty  $U$  a  $I$ , nebo impedanci lze určit na základě známých parametrů obvodu  $R$ ,  $L$ ,  $C$  a frekvence  $f$ .

Matematické vyjádření poměrů v obvodu lze znázornit výhodně i graficky. Víme, že komplexní jednotka definovaná jako  $j = \sqrt{-1}$  vyjadřuje posun v Gaussově rovině o  $\frac{\pi}{2}$ . Toho využijeme při kreslení fázorového diagramu pro daný obvod.

Fázorový diagram sériového obvodu s prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  kreslíme následovně: Do referenčního směru (reálná osa Gaussovy roviny) položíme fázor proudu  $\hat{I}$ , který je společný pro všechny tři prvky. Vůči proudu pak orientujeme napětí na jednotlivých prvcích. Ve fázi s proudem nakreslíme napětí na rezistoru  $U_R$ . Napětí na induktoru  $U_L$  předbíhá proud o úhel  $\frac{\pi}{2}$  a napětí na kapacitoru  $U_C$  se opožďuje za proudem o  $\frac{\pi}{2}$ . Velikost střídavých veličin vyjadřujeme nejčastěji efektivní hodnotou, méně často hodnotou maximální. Jejich vzájemný vztah platný pro harmonický průběh je:  $U_m = \sqrt{2}U$ ,  $I_m = \sqrt{2}I$ . Efektivní hodnoty můžeme v praxi změřit přímo měřicími přístroji a to voltmetrem a ampérmetrem. S maximální hodnotou se setkáme v některých speciálních měřeních, také v systému RC2000, nebo při simulacích obvodů pomocí PC. Vezmeme-li do úvahy známé velikosti a fáze napětí a proudu a zakreslíme je do Gaussovy roviny, dostaneme **fázorový diagram**. Ten pak vyjadřuje komplexní poměry v obvodu, tedy velikosti i vzájemné posuny všech veličin (obr. 18). Velikost výsledného napětí  $U$  je dána geometrickým součtem dílčích napětí a můžeme určit jeho fázový posun  $\varphi$  vůči celkovému proudu  $I$ .



Obrázek 18: Fázorový diagram sériového  $RLC$  obvodu.

**Orientace úhlu  $\varphi$ , určení charakteru obvodu** Fázový posun  $\varphi$  mezi celkovým napětím a celkovým proudem v obvodu je veličinou, která určuje *charakter obvodu* a  $\varphi$  může nabývat kladných i záporných hodnot (obr. 18). Jestliže napětí přebíhá proud, úhel  $\varphi$  je kladný a obvod má induktivní charakter ( $\varphi > 0$  ind.), jestliže napětí zaostává za proudem, úhel  $\varphi$  je záporný a obvod má kapacitní charakter ( $\varphi < 0$  kap.). Je-li úhel  $\varphi = 0$ , potom proud a napětí jsou ve fázi, obvod má odporový charakter. Tento stav v obvodu se nazývá **rezonance**.

Efektivní hodnoty napětí na jednotlivých prvcích (pouze jejich velikosti), můžeme vyjádřit

$$U_R = RI, \quad U_L = \omega LI, \quad U_C = \frac{1}{\omega C}I. \quad (15)$$

Z fázorového diagramu potom plyne

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (16)$$

takže pro impedanci obvodu opět dostaneme známý vztah

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (17)$$



což odpovídá matematickému vztahu (13). Pro argument impedance platí analogicky vztah (14).

Z rovnice (16) vyplývá, že hodnota celkového napětí je závislá na velikosti napětí na jednotlivých prvcích, přičemž napětí na reaktančních prvcích  $U_L$  a  $U_C$  jsou závislá na frekvenci. Projeví se to na fázovém posunu v obvodu a nakonec i na charakteru obvodu. Proto zadaný obvod budeme zkoumat při určité konstantní frekvenci. Frekvenčně závislé poměry v obvodech budou náplní úlohy č. 5.

Pomocí fázového úhlu  $\varphi$  můžeme zavést další veličinu. Jedná se o **účinník obvodu**, který je definovaný jako kosinus fázového posunu mezi napětím a proudem ( $\cos \varphi$ ).

**Výkony ve střídavých obvodech** V obvodech s harmonickým napájením se setkáváme se třemi druhy výkonů. Jednotlivé výkony se liší svojí fyzikální podstatou, proto mají i odlišné jednotky. Dají se určit dle následujících vztahů

$$P = UI \cos \varphi, \quad (\text{činný výkon}) \quad [\text{W}] \quad (18)$$

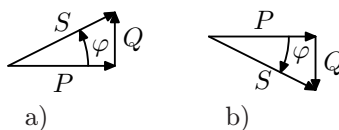
$$Q = UI \sin \varphi, \quad (\text{jalový výkon}) \quad [\text{Var}] \quad (19)$$

$$S = UI, \quad (\text{zdánlivý výkon}) \quad [\text{VA}] \quad (20)$$

kde  $U$  a  $I$  jsou efektivní hodnoty napětí a proudu. Pozor při výpočtu, pracujeme-li s maximálními hodnotami!

**Činný výkon** odpovídá energii dodané zdrojem do obvodu, kde se mění na rezistoru nevrátne na teplo. Elektrický proud vykonává práci. Jednotka činného výkonu je 1 W (watt). **Jalový výkon** vzniká na reaktančních prvcích ( $L$ ,  $C$ ). Elektrická energie zdroje se mění přechodně na energii magnetického pole induktoru  $L$  a energii elektrického pole kapacitoru  $C$  a opět se vrací zpátky do zdroje. Elektrický proud proto nevykonává žádnou práci. Jednotka jalového výkonu je 1 Var (voltampér reaktanční). **Zdánlivý výkon** můžeme chápat čistě formálně jako geometrický součet činného a jalového výkonu. Je však důležitý pro dimenzování elektrických zařízení. Jednotka zdánlivého výkonu je 1 VA (voltampér). Vztah mezi výkony je vidět na obr. 19, kde platí

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$



Obrázek 19: Vztah mezi výkonem činným, jalovým a zdánlivým pro a)  $\varphi > 0$ , b)  $\varphi < 0$ .

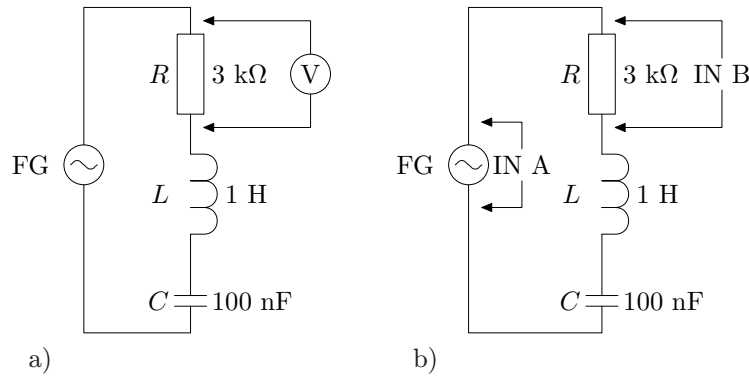
Vzhledem k tomu, že fázový posuv  $\varphi$  může nabývat kladných i záporných hodnot, projeví se charakter zátěže také při určování jalového výkonu (může být záporný). V souvislosti s výkony je důležitý i účinník obvodu, který udává poměr činného a zdánlivého výkonu, jak vyplývá ze vztahu (18)

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}. \quad (21)$$

## : Realizace měření

Při měření v obvodu s prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  použijeme měřicí jednotku A&DDU a program RC2000 v režimu OSCILLOSCOPE, příslušný modul COMPONENT BOARD pro zapojení obvodu, modul FUNCTION GENERATOR jako zdroj střídavého signálu, modul VOLTMETER DC&AC RMS pro měření efektivní hodnoty napětí a digitální multimetr pro měření efektivních hodnot proudu a napětí.

- Měření napětí na jednotlivých prvcích  $R$ ,  $L$ ,  $C$  voltmetrem.** Zapojte na modul COMPONENT BOARD sériový obvod  $R$ ,  $L$ ,  $C$  podle obr. 20a). Jako zdroj napětí  $U$  použijte modul FUNCTION GENERATOR a nastavte sinusový signál s amplitudou napětí 0,80 V, nulovým osetem a frekvencí 400 Hz. Voltmetrem měřte efektivní hodnoty napětí postupně na jednotlivých prvcích. Měření zopakujte použitím digitálního multimetru ve funkci voltmetru. Proud tekoucí obvodem zjistěte pomocí multimetru ve funkci ampérmetru. Obě měření proveďte pro dvě hodnoty kapacity  $C$  (100 nF, 200 nF).
- Měření napětí pomocí osciloskopu.** Obvod připojte k měřicí jednotce A&DDU pomocí vstupů IN A a IN B dle obr. 20b). Na systému RC2000 zvolte režim OSCILLOSCOPE. Hodnotu napětí generátoru FG nastavte jako v předchozím bodě, osciloskop přepněte do režimu PHASOR, zesílení



Obrázek 20: Zapojení pro měření a) voltmetrem, b) osciloskopem.

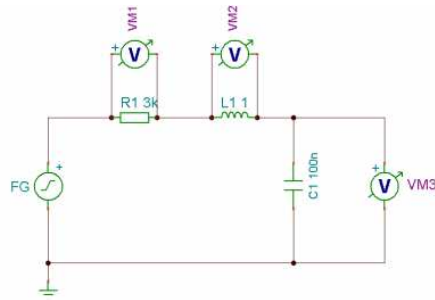
kanálů nastavte na  $0.5 \text{ V/DIV}$  a časové rozlišení  $2 \text{ MS/DIV}$ . Na vstupu IN A měřicí jednotky je připojeno napájecí napětí, na vstup IN B potom přivádějte vyšetřované napětí na jednotlivých prvcích. Volbou VIEW-PHASOR využijte možnosti dvou otevřených oken. V levém okně budou znázorněny fázorové poměry napětí, v pravém časové průběhy měřených veličin. Referenční veličina s nulovou fází je vždy ta, která je připojena na vstup IN A. Měření volte v módu SEQUENCE tlačítka B1, B2, B3. Tím se postupně spustí analýzy jednotlivých napětí a jejich zaznamenání do jednoho grafu. Veličiny si popište v tabulce LEGEND. Konkrétní hodnoty fázorů odečtete pomocí funkce CURSOR. Vyzkoušejte si funkci tlačítka REF, kterým lze změnit fázi referenční veličiny vždy na nulovou a pozorujte, jak se změní fázorový diagram. Sledujte přitom veličiny v tabulce CURSOR-PHASORS. Změřte proud ampérmetrem. Fázor proudu dodatečně zakreslete do fázorového diagramu. Měření proveďte pro dvě hodnoty kapacity  $C$  ( $100 \text{ nF}$ ,  $200 \text{ nF}$ ). Pro podrobné posouzení časových průběhů si přepněte do režimu VIEW-YT a vyzkoušejte si funkci kurzorů 1, 2 pro odečítání okamžité hodnoty napětí ve zvoleném čase. Zkoumejte, co se zobrazí aktivací VIEW-XY, a uvažte, kdy je vhodné tento režim zapnout.

3. **Použití simulačního programu TINA.** Simulační program, při volbě vhodné analýzy, umožňuje změřit nejen hodnoty napětí a proudu v libovolné části obvodu, ale i činný výkon zátěže. Proto budeme provádět měření ve dvou etapách. První etapa bude navazovat na měření dle bodů 1. a 2., ve druhé etapě budeme měřit činný výkon a určovat účinník obvodu.

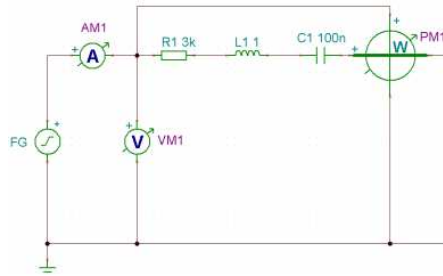
(a) **Měření napětí a proudu v obvodu  $R$ ,  $L$ ,  $C$  pomocí voltmetru a ampérmetru, fázorový diagram.** Po spuštění programu TINA postupně umísťujeme na pracovní plochu součástky a jejich parametry upravíme podle obr. 21. Nastavíme potřebné napětí zdroje shodné s předchozím měřením. Pro měření napětí slouží voltmetry VM1, VM2, VM3 připojené paralelně k jednotlivým součástkám  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Je třeba při jejich zapojování respektovat označení vstupních svorek (+) ve směru postupu energie. V nabídce hlavního menu zvolíme: ANALYSIS/AC ANALYSIS/PHASOR DIAGRAM. Program vygeneruje okno s fázorovým diagramem. Pomocí ikon si fázory popíšeme. Pro úplnost lze přikreslit i fázor proudu. Jeho hodnotu určíme nepřímou výpočtem. Proud lze změřit také ampérmetrem, který zapojíme do série se zátěží (nekreslete fázorový diagram, protože  $U$  a  $I$  mají různá měřítka). Proud do fázorového diagramu dokreslete ručně. Maximální hodnoty všech veličin obvodu ve formě fázoru lze získat z tabulky po zvolení menu: ANALYSIS/AC ANALYSIS/TABLE OF AC RESULTS. Časové průběhy veličin, ke kterým jsou připojeny měřicí přístroje, získáme volbou menu: ANALYSIS/TRANSIENT... Po otevření okna si zvolíme časovou oblast pro provedení analýzy.

(b) **Měření činného výkonu.** V obvodech střídavého proudu lze změřit činný výkon a to wattmetrem, který je zařazen v knihovně prvků programu TINA (záložka METERS). Činný výkon budeme měřit v obvodu na zátěži tvořenou sériovým zapojením prvků  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , obr. 22.

Voltmetrem změříme maximální hodnotu celkového napětí  $U_m$  a ampérmetrem maximální hodnotu proudu  $I_m$ . Voltmetr s ampérmetrem musí být zapojeny ve směru postupu energie svými vstupními svorkami (+). Rovněž wattmetr připojíme tak, aby bylo dodrženo správné zapojení vstupních svorek do obvodu (napěťová a proudová svorka – označené (+)). Maximální hodnoty všech hledaných veličin také najdeme v tabulce po zvolení menu: ANALYSIS/AC ANALYSIS/TABLE OF AC RESULTS. Z těchto hodnot lze pomocí vztahů (17–21) určit modul impedance  $Z$ , ostatní výkony na zátěži a účinník obvodu. Všechny výkony lze také zjistit přímo pomocí wattmetru. Spusťte analýzu z menu: ANALYSIS/AC ANALYSIS/CALCULATE NODAL



Obrázek 21: Zapojení simulovaného obvodu – měření napětí a proudu.



Obrázek 22: Zapojení simulovaného obvodu – měření výkonu.

VOLTAGES. Sondou klikněte na značku wattmetru a v otevřeném okně se zobrazí všechny výkonové poměry na zátěži. Porovnejte je s výpočty.

## : Zadání úlohy

1. Změřte efektivní hodnoty napětí na prvcích  $R$ ,  $L$ ,  $C$  při zadaném napájení ze zdroje FUNCTION GENERATOR a to použitím voltmetru ze systému RC2000 a digitálního multimetru ve funkci voltmetru. Měření proveďte pro dvě hodnoty kapacity  $C$  (100 nF, 200 nF).
2. Bod 1. doplňte měřením efektivní hodnoty proudu pomocí digitálního multimetru ve funkci ampérmetru. Proud zkontrolujte na základě měřených napětí i výpočtem. Určete impedanci obvodu dvěma způsoby pro obě zadané hodnoty kapacity  $C$ , určete rovněž charakter obvodu.
3. V režimu OSCILLOSCOPE systému RC2000 nakreslete fázorový diagram a průběh okamžitých hodnot napětí na prvcích  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Změřte celkový proud tekoucí obvodem. Určete fázory jednotlivých napětí a proudu pro dvě hodnoty kapacity  $C$ . Určete charakter obvodu v obou případech zátěže.
4. Použijte simulační program TINA pro nakreslení fázorového diagramu obvodu  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Uvažte, jak získat hodnotu proudu, kdy je vhodné použít ampérmetr. Určete fázory jednotlivých napětí a celkového proudu. Pozorujte rovněž časové průběhy napětí. Určete impedanci obvodu a jeho charakter. Obvod simulujte se dvěma hodnotami kapacity  $C$  (100 nF, 200 nF).
5. Změřte činný výkon na zátěži wattmetrem a vypočítejte účinník obvodu  $\cos \varphi$ , jalový a zdánlivý výkon. Využijte možnosti wattmetru pro určení všech výkonů. Měření proveďte pro dvě hodnoty kapacity  $C$ . Hodnoty všech výkonů zkontrolujte výpočtem z naměřených hodnot (body 2 a 3).
6. V závěru porovnejte výsledky jednotlivých měření, doplňte je příslušnými grafy a vyhodnoťte je.

### Použité přístroje a pomůcky

počítač s programem RC2000, program TINA, měřicí panel, A&DDU, COMPONENT BOARD, FUNCTION GENERATOR, VOLTMETER DC&AC RMS, digitální multimetr, sada rezistorů a propojek, kondenzátory, cívka, sada vodičů

### Studijní prameny

přednášky z elektřiny a magnetismu

## Úloha číslo 5.

## Vyšetřování frekvenčních vlastností rezonančních obvodů

Cílem úlohy je seznámení s frekvenčními vlastnostmi obvodů s prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  a jejich chování při sériové a paralelní rezonanci. V obvodech se předpokládá harmonické napájení a ustálený stav. Změří se frekvenční charakteristiky a ve stavu rezonance se určí odpovídající efektivní hodnoty napětí a proudů v obvodu. Pro měření bude využíván systém RC2000, pro simulaci obvodů pak simulační program TINA.

## : Teorie

Střídavý obvod s prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  je vždy charakterizován komplexní impedancí  $\hat{Z}$ , která je obecně daná vztahem

$$\hat{Z} = R \pm jX. \quad (22)$$

Nejprve si všimneme základních prvků z hlediska jejich frekvenčních závislostí. Rezistor je prvek frekvenčně nezávislý. Jeho odpor  $R$  se obvykle určuje při stejnosměrném napájení ( $f = 0$ ). Induktor a kapacitor jsou charakterizovány reaktancí  $X_L$  a  $X_C$ , které závisí na frekvenci ( $X_L = \omega L$ ,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ). Při stejnosměrném napájení se tyto prvky neuplatní, induktor zde představuje zkrat (jeho reaktance je nulová,  $X_L = 0$ ), kapacitor přerušuje obvod, neboť jeho reaktance jde do nekonečna (izolant mezi elektrodami,  $X_C \rightarrow \infty$ ). Při zkoumání frekvenčních vlastností obvodů sledujeme při různých frekvencích velikost impedance, hodnoty napětí a proudů nebo poměrové veličiny (přenosy). Komplexní impedanci určujeme dle vztahu (22) z parametrů zapojených součástí. Pro odpovídající modul (velikost) i argument (fázi) impedance pak platí

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}. \quad (23)$$

Impedanci lze určit také z naměřených hodnot napětí a proudu (určí se pouze velikost impedance)

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U_m}{I_m}, \quad (24)$$

kde  $U$ ,  $I$  jsou efektivní a  $U_m$ ,  $I_m$  jsou maximální hodnoty napětí a proudu. Rovněž lze komplexní impedanci obvodu  $\hat{Z}$  (tj. modul  $Z$  a argument  $\varphi$ ) stanovit měřením na měřiči impedance. Modul a argument impedance jsou obecně závislé na frekvenci

$$Z = f(\omega), \quad \varphi = f(\omega). \quad (25)$$

Tyto funkce se nazývají **modulová a fázová frekvenční charakteristika**.

Rovněž obvodové veličiny, proud a napětí vyjádřené jako fázory, lze sledovat v závislosti na frekvenci. Jejich absolutní hodnota pak určuje amplitudovou frekvenční charakteristiku a fázový posun fázovou frekvenční charakteristiku. V praxi se často setkáváme s frekvenčními charakteristikami poměrových veličin a to přenosu proudu ( $I_2/I_1$ ) a přenosu napětí ( $U_2/U_1$ ).

V obvodech, které obsahují rezistory, kapacitory a induktory jsou celkový proud a napětí obecně vůči sobě posunuty o úhel  $\varphi$ . Při určitém kmitočtu zjistíme, že dochází k zajímavému jevu. Napětí a proud jsou ve fázi ( $\varphi = 0$ ) a obvod se chová tak, jako by vůbec neobsahoval prvky  $L$  a  $C$ , má pouze odporový charakter. Tomuto jevu se říká **rezonance**. V praxi se nejčastěji setkáváme se sériovým zapojením  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , které je možné uvést do *sériové rezonance* (rezonance napětí), dále se zapojením paralelním, které lze uvést do *paralelní rezonance* (rezonance proudu).

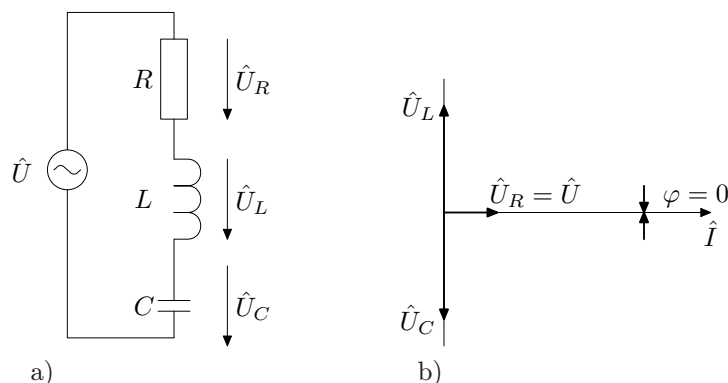
**Sériová rezonance** Uvažujeme sériový obvod  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , připojený na zdroj konstantního napětí  $U$  (obr. 23a) a nakreslíme odpovídající fázorový diagram (obr. 23b).

Proud  $I$  je pro všechny prvky společný, umístíme ho do reálné osy. Tvar fázorového diagramu závisí na relaci mezi  $U_L$  a  $U_C$ . Tato relace pak závisí na frekvenci obvodu. Abychom při určité frekvenci dosáhli nulového fázového posunu  $\varphi = 0$ , musí platit  $X_L = X_C$ . Obvod se tak dostává do rezonance, jak vyplývá z následujících vztahů

$$X_L = X_C \rightarrow U_L = U_C \rightarrow U = U_R \rightarrow \varphi = 0. \quad (26)$$

Rezonanční frekvenci určíme dosazením

$$X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (27)$$



Obrázek 23: Obvod se sériovou rezonancí a) zapojení, b) fázorový diagram.

Potom dostáváme **Thomsonův vztah** pro rezonanční kmitočet

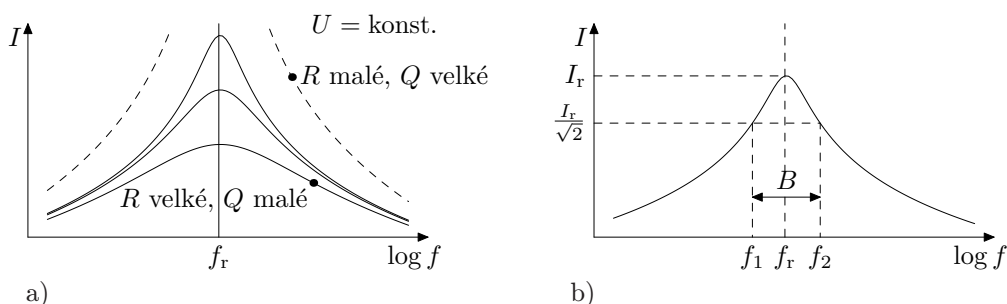
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (28)$$

Z Thomsonova vztahu vyplývá, že stav rezonance v sériovém obvodu  $RLC$  nezávisí na hodnotě rezistoru  $R$ .

Jestliže je obvod připojen na zdroj konstantního napětí  $U = \text{konst.}$ , potom změnou frekvence se mění proud, který je daný vztahem

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (29)$$

Odpovídající tzv. **rezonanční frekvenční křivky proudu** jsou na obr. 24a).



Obrázek 24: Rezonanční křivky proudu v sériovém  $RLC$  obvodě.

Jak poznáme, že došlo k rezonanci? Hodnotíme-li poměry při rezonanci, potom proud při rezonanci, tj. rezonanční proud  $I_r$  dosahuje maximální hodnoty, protože je omezen pouze činným odporem obvodu  $R$ , kdežto v obecném případě působí impedance  $Z$ , která je vždy větší než  $R$ .

$$I_r = \frac{U}{R} > \frac{U}{Z}. \quad (30)$$

Napětí na induktoru a kapacitoru jsou co do absolutní hodnoty stejné, vzájemně posunutá o  $180^\circ$ , napětí na rezistoru se rovná napájecímu napětí (obr. 23b).

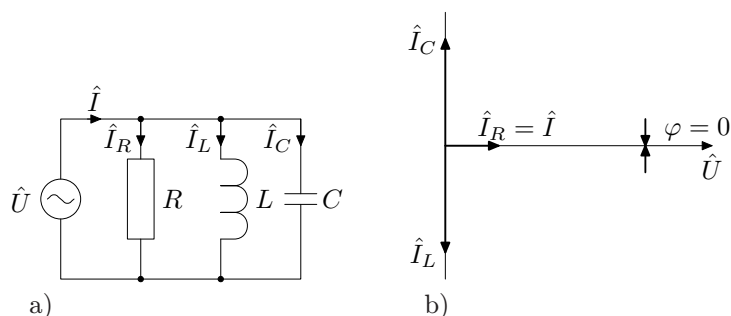
Při rezonanci dochází k dalšímu zajímavému jevu. Napětí na induktoru a kapacitoru může mnohonásobně převýšit napájecí napětí. Toto převýšení udává tzv. **činitel jakosti** rezonančního obvodu, definovaný jako poměr napětí na induktoru (kapacitoru) k napětí napájecímu při rezonanci. Činitel jakosti lze rovněž vyjádřit pomocí parametrů obvodu:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_r L I_r}{R I_r} = \frac{L}{R\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (31)$$

Na obr. 24a) je řada křivek, které jsou odlišné svojí strmostí. Čím je činitel kvality vyšší a obvod je kvalitnější, tím má užší rezonanční křivku v okolí rezonančního kmitočtu. Činitel kvality může dosahovat řádově hodnot až  $10^2$ , což se využívá např. v radiotechnice.

Z rezonanční křivky je patrné, že zdroj dodává do obvodu při rezonanci relativně největší proud a tedy i největší činný výkon  $P_{\max} = RI_r^2$ . Při poklesu proudu na hodnotu  $I = \frac{I_r}{\sqrt{2}}$  klesne výkon na polovinu svého maxima při rezonanci. Při tomto poklesu se vymezí na rezonanční křivce dva body, jimž odpovídají frekvence  $f_1$  a  $f_2$  (obr. 24b). Rozdíl těchto frekvencí se nazývá **šířka pásma**  $B$  udávaná v jednotkách Hz. Její význam je v tom, že v tomto pásmu je pokles proudu  $I$  vůči proudu při rezonanci  $I_r$  menší než 3 dB. Platí totiž vztah  $20 \log \frac{I}{I_r} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3$  dB.

**Paralelní rezonance** Rovněž při zkoumání paralelního rezonančního obvodu (obr. 25a) budeme předpokládat napájení ze zdroje konstantního napětí  $U = \text{konst.}$  Jedná se o rezonanci proudovou, kterou si ozřejmíme na fázorovém diagramu (obr. 25b). Pro paralelní obvod je základní veličinou napětí  $\hat{U}$  na



Obrázek 25: Obvod s paralelní rezonancí a) zapojení, b) fázorový diagram.

paralelní kombinaci prvků  $R, L, C$ . Položíme ho do reálné osy. Do rezonance pak obvod přivádíme proudy tak, aby fázový posun  $\varphi$  byl nulový. Pro tento obvod bude platit

$$X_L = X_C \rightarrow I_L = I_C \rightarrow I = I_R \rightarrow \varphi = 0. \quad (32)$$

Při rezonanci dochází opět k nulovému fázovému posunu mezi proudem a napětím, platí tedy stejná podmínka  $X_L = X_C$ . Potom bude i zde platit Thomsonův vztah (28) pro určení rezonanční frekvence, předpokládáme-li ideální prvky v obvodu a stav rezonance pak závisí pouze na parametrech  $L$  a  $C$ . V paralelním obvodu pracujeme výhodněji s admitancemi (**admittance**  $\hat{Y}$  je převrácená hodnota impedance,  $\hat{Y} = 1/\hat{Z}$ ). Komplexní admittance pro obvod na obr. 25a) bude

$$\hat{Y} = \frac{1}{R} + \left( \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) = G - j \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right), \quad (33)$$

kde  $G$  je **vodivost**. Jestliže paralelní rezonanční obvod bude napájen ze zdroje konstantního napětí  $U$  pro proud platí vztah

$$I = YU = \sqrt{G^2 + \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right)^2} U. \quad (34)$$

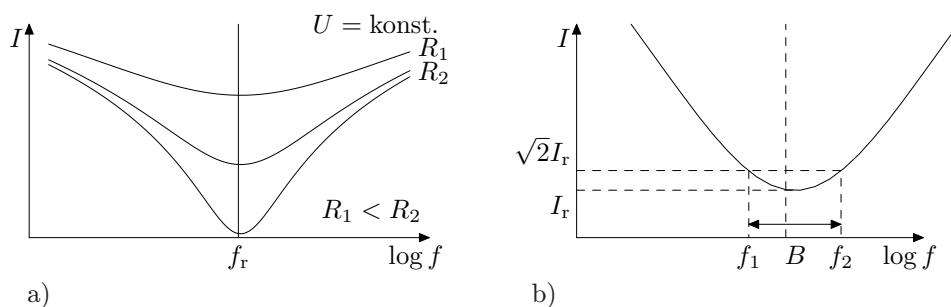
Proud se bude měnit při změně frekvence tak, jak je ukazují proudové rezonanční křivky na obr. 26a). Při rezonanci je proud nejmenší, protože je daný pouze vodivostí  $G$ , platí

$$I = GU < YU. \quad (35)$$

Jaké budou poměry při rezonanci? Proud ze zdroje teče pouze do rezistoru, protože proudy  $I_L$  a  $I_C$  jsou v absolutní hodnotě stejně velké, vzájemně pootočený o  $180^\circ$ , takže se navzájem ruší (obr. 25b). Obvod má pouze odporový charakter a fázový posun je nulový. **Činitel jakosti**  $Q$  je definovaný jako poměr proudu tekoucího induktorem (resp. kapacitorem) při rezonanci k proudu tekoucímu rezistorem, tj. ku proudu, který teče ze zdroje. Dá se určit i z parametrů obvodu.

$$Q = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I} = \frac{\frac{U}{\omega_r L}}{\frac{U}{R}} = \frac{R}{\omega_r L} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}. \quad (36)$$

Kvalita obvodu opět souvisí se strmostí rezonančních křivek proudu. Čím je křivka v blízkosti rezonanční frekvence užší, tím je obvod kvalitnější. Šířku pásma  $B$  v případě paralelního rezonančního obvodu



Obrázek 26: Rezonanční křivky proudu v paralelním  $RLC$  obvodu.

určíme vymezením frekvencí  $f_1$  a  $f_2$  na křivce proudu zvětšením minimální hodnoty rezonančního proudu na hodnotu  $I = \sqrt{2}I_r$ , což odpovídá v poměrových jednotkách zvýšení proudu o 3 dB, obr. 26b).

*Pozn.* V obou případech rezonance jsme předpokládali, že se obvod do rezonance dostane změnou frekvence. Z Thomsonova vztahu však vyplývá, že je možné obvod naladit do rezonance rovněž změnou indukčnosti  $L$  nebo změnou kapacity  $C$  při konstantní frekvenci  $f$ .

Paralelní zapojení prvků  $R$ ,  $L$ ,  $C$  je pouze teoretické, protože v praxi není možné realizovat cívku bez odporu vinutí  $R_L$ , který vždy uvažujeme zapojený do série s ideálním induktorem. Dostáváme tak sérioparalelní zapojení, u kterého již nejsou fázory napětí  $\hat{I}_L$  a  $\hat{I}_C$  vzájemně posunuty o  $180^\circ$  jako v předchozím případě. Uplatňuje se zde vliv odporu  $R_L$  a neplatí již Thomsonův vztah. Jestliže je odpor vinutí cívky  $R_L$  zanedbatelný ve srovnání s impedancí  $X_L$  ( $R_L \ll X_L$  při rezonanční frekvenci), lze použít vztahy uvedené pro ideální prvky. Jestliže však hledáme rezonanci u složitějších obvodů, použijeme obecné podmínky vzniku rezonance. Pro sériovou rezonanci platí:  $\text{Im } \hat{Z} = 0$ , tzn. imaginární část impedance se rovná nule. Pro paralelní rezonanci platí:  $\text{Im } \hat{Y} = 0$ , což znamená, že imaginární část admittance se rovná nule. Podrobnější analýza složitějších obvodů viz Studijní prameny.

Při měření frekvenčních charakteristik systémem RC2000 a rovněž při jejich simulaci programem TINA se setkáme s tím, že charakteristiky jsou vynášeny jako přenosy napětí  $P_U(U_{2m}/U_{1m})$  v jednotkách dB. Pro převod na tuto jednotku platí vztah

$$P_U = 20 \log \frac{U_{2m}}{U_{1m}} [\text{dB}]. \quad (37)$$

Přenos napětí zde představuje poměr sledované hodnoty napětí vůči jednotkovému vstupu  $U_{1m} = 1 \text{ V}$ . Dostáváme tak přímo maximální hodnotu napětí  $U_{2m}$  (v dB), kterou lze zpětně, na základě vztahu (37) a skutečného napětí zdroje, přepočítat na volty [V]. Pokud používáme rezistor jako převodník proudu na napětí, potom z napětí dopočítáme efektivní hodnotu proudu.

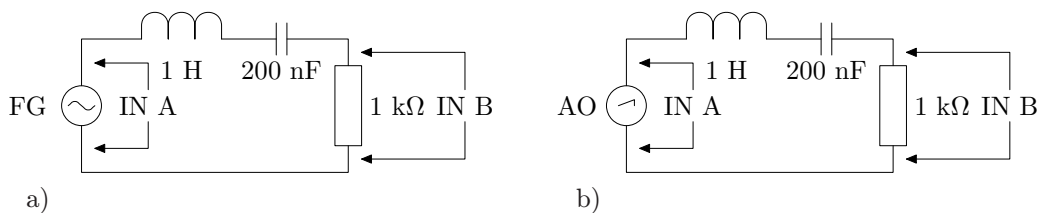
## § Realizace měření

Při měření v obvodu s prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  použijeme měřicí jednotku A&DDU, program RC2000 v režimu OSCILLOSCOPE, příslušný modul COMPONENT BOARD pro zapojení obvodu, modul FUNCTION GENERATOR jako zdroj střídavého signálu, digitální multimetr pro měření efektivních hodnot napětí a proudů.

Měření se uskuteční nejprve na sériovém a paralelním obvodu  $R$ ,  $L$ ,  $C$  použitím systému  $\mu\text{LAB}$ , dále budou oba obvody simulovány pomocí programu TINA.

### Sériový obvod $RLC$ (systém $\mu\text{LAB}$ )

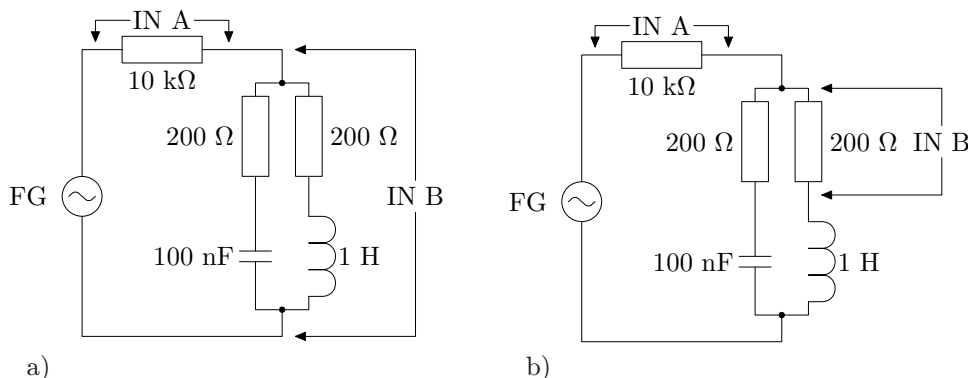
- Měření napětí pomocí osciloskopu.** Zapojte na modul COMPONENT BOARD obvod  $R$ ,  $L$ ,  $C$  dle obr. 27a). Na systému RC2000 zvolte režim OSCILLOSCOPE. Vstupní napětí z funkčního generátoru FG přiveďte na vstup IN A měřicí jednotky A&DDU. Nastavte na napájecím zdroji sinusový signál s amplitudou 1.00 V, nulovým osetem a s frekvencí blízkou rezonanční frekvenci  $f_r$  vypočtené z Thomsonova vztahu, osciloskop přepněte na zobrazení fázorů, zvolte zesílení kanálu CHA 0,5 V/DIV, CHB 2,5 V/DIV a časovou základnu 2 ms/DIV. Na vstup IN B přivádějte postupně vyšetřované napětí na jednotlivých prvcích. Volbou VIEW-PHASOR se otevřou dvě okna. V levém okně budou znázorněny fázorové poměry, v pravém časové průběhy měřených veličin. Měření provádějte v módu SEQUENCE postupným zapínáním B1, B2, B3 pro analýzu napětí na jednotlivých prvcích a nakreslení do jednoho grafu. Veličiny si popište v tabulce LEGEND. Změnou frekvence zdroje vyladte obvod do rezonance. Sledujte přitom fázorový diagram. Zjistěte skutečné hodnoty fázových posunů napětí použitím funkce CURSOR. Zjistěte, zda došlo ke změnám v obvodu změnou rezistoru  $R$  ( $500 \Omega$ ,  $2 \text{ k}\Omega$ ).



Obrázek 27: Zapojení sériového obvodu pro měření a) napětí pomocí osciloskopu, b) frekvenčních charakteristik.

2. **Měření frekvenčních charakteristik.** Zvolte program FREQUENCY CHARACTERISTICS a zapněte na něm AMPL/PHASE. Odpojte zdroj FG z předchozího měření a obvod připojte na zdroj s měnitelnou frekvencí AO, kterým je analogový výstup (ANALOG OUTPUT) měřicí jednotky A&DDU (obr. 27b). Nastavte BEGIN na 10 Hz, DECADES na 3, |P| DB na 10 a OFFSET DB na 20. Hledáme frekvenční křivky proudu, proud však musíme měřit nepřímo jako napětí na rezistoru  $U_R$ . Budeme analyzovat více závislostí a to pro tři různé odpory  $R$  (500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 2 k $\Omega$ ). Zvolte proto mód SEQUENCE, aby vznikl postupný záznam a zobrazení frekvenčních charakteristik do jednoho grafu. Jednotlivá měření se startují tlačítky M1, M2, M3. Průběhy si popište stručně do tabulky LEGEND. Frekvenční charakteristiky jsou vynášeny jako přenosy napětí  $P_U$ . Hodnotu napětí je proto potřebné přepočítat (viz vztah (37)) na veličinu, která nás zajímá (proud tekoucí obvodem). Pomocí funkce CURSOR specifikujte z frekvenční charakteristiky stav rezonance, určete rezonanční proud a šířku pásma. Průběhy rezonančních křivek posuďte z hlediska kvality rezonančního obvodu. Zobrazte si rovněž fázové frekvenční charakteristiky.

Dále budeme měřit frekvenční charakteristiky napětí na induktoru a kapacitoru. Změňte parametr |P| DB na 5, OFFSET DB na 5 a pro jednu hodnotu rezistoru  $R$  (1 k $\Omega$ ) proveďte měření. Určete z těchto křivek frekvenci, při které nastává rezonance.



Obrázek 28: Zapojení paralelního obvodu pro měření napětí pomocí osciloskopu.

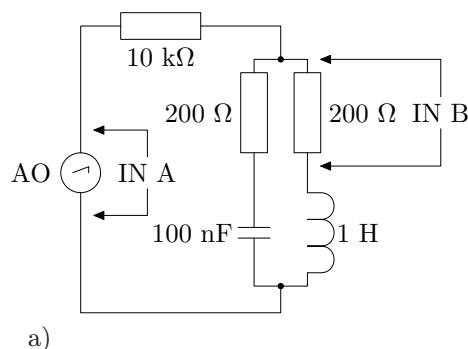
### Paralelní obvod $RLC$ (systém $\mu$ LAB)

1. **Měření pomocí osciloskopu.** U paralelního rezonančního obvodu se jedná o rezonanci proudu. Systém  $\mu$ LAB může měřit pouze napětí. Proud proto budeme měřit nepřímo, pomocí úbytku napětí na rezistoru. Rezistory jsou zapojeny do série s prvky  $L$  a  $C$ . Pro měření celkového proudu použijeme rezistor 10 k $\Omega$ . Zapojte na modul COMPONENT BOARD paralelní obvod dle obr. 28a) a připojte jej na měřicí jednotku A&DDU svorkami IN A a IN B. Na systému RC2000 zvolte program OSCILLOSCOPE. Napájecí napětí na FUNCTION GENERATOR nastavte na sinusový signál s amplitudou 8.0 V, nulovým ofsetem a frekvencí blízko rezonančního kmitočtu  $f_r$  určeného ze vztahu (28). Parametry osciloskopu nastavte následovně: GAIN CHA na 2.5 V/DIV, GAIN CHB 5 V/DIV, TIME na 1 MS/DIV. Otevřete si dvě okna funkce VIEW-PHASOR. V levém okně se bude kreslit fázorový diagram, v pravém okamžité hodnoty měřených veličin. Měření provádějte v módu NORMAL. Zobrazení se bude napětí úměrné celkovému proudu (IN A) a napětí na paralelní kombinaci  $L$ ,  $C$  v obvodu (IN B). Veličiny si popište do tabulky LEGEND. Změnou frekvence vyladte obvod do rezonance. Použijte funkci CURSOR, zjistíte potřebnou veličinu pro určení efektivní hodnoty celkového proudu; tuto hodnotu změřte i ampérmetrem. Dalším měřením určete fázové poměry proudů



v jednotlivých větvích obvodu (určujeme je nepřímo přes napětí – obr. 28b). Změňte parametry osciloskopu na GAIN CHA 2.5 V/DIV, GAIN CHB 0.5 V/DIV a svorky IN A a IN B připojte dle obr. 28b). Měření provádějte v módu SEQUENCE a snímejte napětí na jednotlivých rezistorech (převodník proud/napětí). Uvědomte si, co snímáme a jakou veličinu hledáme. Použijte funkce CURSOR pro odečtení veličin potřebných pro výpočty efektivních hodnot proudů  $I$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  tekoucích při rezonanci. Z nich sestrojte skutečný fázorový diagram pro paralelní LC obvod (včetně fázoru napětí).

2. **Měření frekvenčních charakteristik.** Zvolte program FREQUENCY CHARACTERISTICS. Odpojte generátor a obvod připojte na AO měřicí jednotky A&DDU dle obr. 29. Zvolte parametry GRAPH na AMPL/PHASE, BEGIN 10 Hz, DECADES 3, |P| dB na 5 a OFFSET dB na 10 a vynesete samostatně celkový proud  $I$ . Pro zbývající proudy  $I_L$  a  $I_C$  pak změňte OFFSET dB na 30 a vynesete tyto závislosti do jednoho grafu. Pro měření zvolte mód SEQUENCE, všechny frekvenční charakteristiky snímané na rezistorech pak budou v grafech udávány jako přenosy napětí  $P_U$  [dB]. Pomocí funkce CURSOR specifikujte z frekvenční charakteristiky odpovídající celkovému proudu stav rezonance a určete rezonanční proud a šířku pásma  $B$ .



Obrázek 29: Zapojení paralelního obvodu pro měření frekvenčních charakteristik.

## ⋮ Použití simulačního programu TINA ⋮

Simulační program umožňuje simulovat stejná měření jaká byla provedena pomocí systému RC2000 a to jak pro sériové, tak i paralelní zapojení  $R$ ,  $L$ ,  $C$  obvodu. Jednotlivé prvky přeneseme na pracovní plochu dle příslušného zapojení a nastavíme jejich parametry.

**Fázorový diagram.** Jestliže chceme zíkat fázorové diagramy při sériové a paralelní rezonanci, potom je potřebné připojit voltmetry vždy na měřicí body, tj. na svorky IN A a všude tam, kde se měřilo postupně na svorkách IN B (obr.27a), 28a,b). Pro jednotlivá měření nastavíme amplitudu zdrojů shodně s experimenty a příslušnou rezonanční frekvenci určenou dle (28). Analýzu spustíme volbou menu ANALYSIS/AC ANALYSIS/PHASOR. Program vygeneruje odpovídající fázorový diagram. Avšak, pro vykreslení fázorových diagramů do obvodů zapojujete buď pouze voltmetry, nebo jen ampérmetry, hodnoty  $U$  a  $I$  ve fázorovém diagramu nejsou řádově srovnatelné. Celkový proud, resp. napětí, lze dokreslit do fázorového diagramu pomocí ikon. Pozor na fázorový diagram paralelního obvodu! Uvědomte si poměry v tomto obvodu a nakreslete odpovídající fázorový diagram. Volbou menu ANALYSIS/AC ANALYSIS/TABLE OF AC RESULTS získáme z tabulky maximální hodnoty fázorů všech veličin obvodu. V tomto případě lze zapojit do obvodu oba přístroje (voltmetr i ampérmetr), jejichž hodnoty se pak zobrazí v tabulce.

**Časové průběhy.** Pro získání časových průběhů připojíme voltmetry paralelně k prvkům, jejichž napětí chceme snímat. V případě sledování proudu použijeme převodník proudu na napětí. Analýzu spustíme volbou menu: ANALYSIS/TRANSIENT. . . Po otevření okna si zvolíme časový interval pro vykonání analýzy. Všimněte si především vzájemných fázových posunů jednotlivých harmonických veličin. Automaticky se vykreslí průběh napětí zdroje.

**Frekvenční charakteristiky.** Při hledání frekvenčních závislostí připojíme na obvod sinusový zdroj. Jeho parametry nejsou podstatné, protože při použití frekvenční analýzy program sám nastaví jednotkovou amplitudu zdroje, frekvence je proměnná. Frekvenční charakteristika je vždy vynesena jako napěťový přenos v [dB]. Snímáme proto pomocí voltmetrů napětí na prvcích, kde nás zajímají frekvenční závislosti, nebo při snímání proudu použijeme rezistor jako převodník proudu na napětí, stejně jako v systému RC2000. Simulaci spustíme volbou menu: ANALYSIS/AC ANALYSIS/AC TRANSFER CHARACTERISTIC. Zvolíme zkoumanou frekvenční oblast a určíme, jakou frekvenční charakteristiku chceme sledovat (AMPLITUDE/PHASE). Dostáváme pak křivky, které je potřebné označit pomocí ikony. Z těchto charakteristik můžeme odečítat pomocí kurzoru hodnoty přenosu a zpětně je přepočítat na napětí, resp. proud.

V sériovém obvodu  $RLC$  jsme měnili odpor  $R$  jako parametrickou veličinu. Toto lze vyzkoušet i v programu TINA. Prostudujte si *Návod pro použití programu Tina – AC Transfer characteristic (parametrická analýza)*. Při vynášení frekvenčních charakteristik si pro lepší přehled zvolte i možnost samostatně vynést graf amplitudy pro tři hodnoty odporu  $R$  a zvlášť pro fáze. Při simulaci frekvenčních charakteristik paralelního obvodu sledujte stejné veličiny jako při měření systémem RC2000. Vyhodnocování je rovněž podobné, je nutný přepočet přenosů napětí na proud.

## : Zadání úlohy

1. V režimu OSCILLOSCOPE programu RC2000 zobrazte fázorový diagram sériového obvodu  $RLC$  pro frekvenci blízkou rezonanční. Změnou frekvence najdete přesný posun fázorů v rezonanci a určete odpovídající rezonanční frekvenci. Měření proveďte pro různé hodnoty odporu  $R$  (500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 2 k $\Omega$ ). Určete hodnoty napětí a proudu při rezonanci.
2. Změřte frekvenční charakteristiky proudu (amplitudové, fázové) pro tři odpory  $R$ . Určete sériovou rezonanční frekvenci, kvalitu obvodu a šířku frekvenčního pásma. Nakreslete frekvenční závislosti napětí na induktoru a kapacitoru pro hodnotu odporu  $R = 1$  k $\Omega$ . Určete z tohoto grafu rezonanční frekvenci.
3. V režimu OSCILLOSCOPE programu RC2000 se pokuste obvod vyladit do rezonance pomocí fázorů odpovídajících celkovému proudu v obvodu a celkovému napětí na paralelní kombinaci prvků  $L$  a  $C$ . Pro takto zjištěnou rezonanční frekvenci určete efektivní hodnoty všech proudů tekoucích obvodem a nakreslete fázorový diagram.
4. Změřte frekvenční charakteristiky všech větrových proudů paralelního rezonančního obvodu. Vyhodnoťte stav rezonance pro celkový proud a šířku frekvenčního pásma.
5. Použijte simulační program TINA a vhodné analýzy pro nakreslení fázorových diagramů v sériovém a paralelním rezonančním obvodu  $RLC$  a nakreslení odpovídajících časových závislostí při rezonanci.
6. Programu TINA použijte pro zkoumání frekvenčních vlastností sériového a paralelního obvodu  $RLC$ . V sériovém obvodu použijte tři různé hodnoty odporů. Vyhodnoťte proudy při rezonanci, kvalitu obvodů a příslušnou šířku frekvenčního pásma. U paralelního obvodu určete celkový proud tekoucí obvodem při rezonanci a odpovídající šířku pásma.
7. V závěru vyhodnoťte jednotlivé dosažené výsledky a porovnejte ty, které byly získané různými metodami. Doplňte je příslušnými grafy a diskutujte případné zajímavosti.

### Použité přístroje a pomůcky

počítač s programem RC2000, program TINA, měřicí panel, A&DDU, COMPONENT BOARD, FUNCTION GENERATOR, VOLTMETER DC&AC RMS, digitální multimetr, sada rezistorů a propojek, kondenzátory, cívka, sada vodičů

### Studijní prameny

přednášky z elektřiny a magnetismu

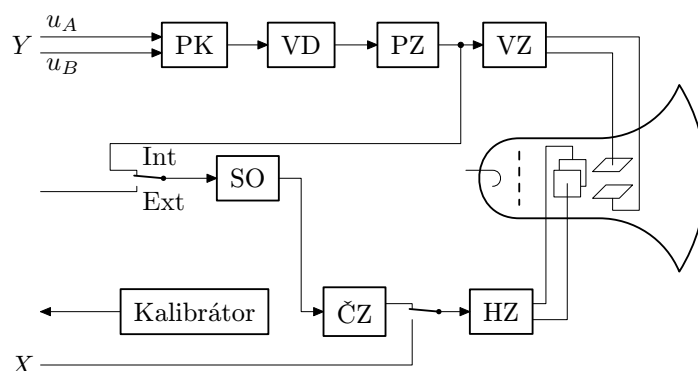
Fuka, J.; Havelka, B.: *Elektřina a magnetismus*, SPN Praha, 1965

**Úloha číslo 6.** *Cílem úlohy je pochopení principu činnosti osciloskopu a jeho nastavování. Dále se úloha zaměřuje na využití osciloskopu pro měření jiných než napěťových signálů, na určování fázových posuvů, poměrů frekvencí a další aplikace.*

## Teorie

Měřicí přístroje, jako jsou voltmetry či ampérmetry, nám mohou poskytnout o měřené veličině pouze jeden údaj. To může být postačující v případě, že známe přesný popis časového průběhu signálu, např. víme, že je konstantní nebo sinusový. Často však tuto informaci nemáme nebo potřebujeme zjistit další informace. Uvažujme například dva zdroje sinusového napětí. I když víme, že průběh je přesně sinusový a změříme velikost amplitudy jednotlivých napětí, nemůžeme říci, jaké napětí získáme při jejich sériovém zapojení, protože nevíme, jestli mezi nimi není fázový posuv. K získání informací o *průběhu* signálu slouží **osciloskop**, což je elektronický přístroj, který na obrazovce zobrazuje časový průběh (časové rozvinutí) napětí přivedeného na jeho vstup.

Konstrukci osciloskopu můžeme objasnit pomocí blokového schématu na obr. 30. Základem osciloskopu je obrazovka s vychylovacím soustavou a elektronovým svazkem. V zadní části skleněné baňky obrazovky je umístěna **katoda**, která je průchodem proudu zahřáta natolik, aby se z ní uvolňovaly termoemisi elektrony. Na přední, rozšířené části osciloskopu, je nanášena vodivá vrstva, která slouží jako **anoda** a je na ni přivedeno vysoké napětí ( $\sim 10\text{ kV}$ ) vzhledem ke katodě. Napěťový rozdíl způsobuje urychlování tepelně emitovaných elektronů do přední části obrazovky, kde dopadají na sklo uprostřed obrazovky. Bude-li vnitřní strana přední části – stínítko – pokryta tzv. luminoforem, bude místo dopadu elektronů svítit. Umístíme do místa, kde se obrazovka začíná rozšiřovat, pár plochých vodorovných elektrod, na které přivedeme napětí. Toto napětí způsobí, že na elektron bude působit síla ve vertikálním směru a místo dopadu elektronu se posune nahoru od středu obrazovky. Bude-li se napětí na elektrodách harmonicky měnit, bude se měnit i okamžitá velikost vychýlení a na stínítku budeme vidět vertikální čáru, jejíž velikost bude úměrná amplitudě signálu. Vložíme nyní ještě jeden pár elektrod kolmo k prvnímu páru (vytvoříme tím vychylovací soustavu) a přivedme na něj konstantní napětí. Na elektrony začne působit i horizontální síla a místo jejich dopadu se znova posune, tentokrát vodorovně. Proto se posune i úsečka zobrazovaná na stínítku osciloskopu. Přivedme nyní na druhý pár elektrod napětí, které bude lineárně narůstat od nuly až do určité velikosti, a pak okamžitě klesne zpět na nulu. Takové napětí způsobí, že se dopadající elektronový svazek bude zvolna posouvat zleva doprava a na konci obrazovky rychle přeskočí zpět na levou stranu. Protože svazek je zároveň harmonickým napětím ovlivňován ve svislém směru, získáme na obrazovce obrázek sinusovky – časového rozvinutí sinusového průběhu napětí. Nebude-li napětí harmonické, vykreslí osciloskop jinou křivku. Tímto způsobem budeme schopni zobrazit jakýkoliv časový průběh a z něho můžeme určit jakoukoliv charakteristiku signálu.



Obrázek 30: Blokové schéma osciloskopu (PK – přepínač kanálů, VD – vstupní dělič, PZ – předzesilovač, VZ – vertikální zesilovač, HZ – horizontální zesilovač, SO – synchronizační obvod, ČZ – generátor časové základny).

Napětí, které rozmítá elektronový svazek ve svislém směru, bývá zpravidla napětím, které chceme měřit a označuje se jako **kanál**. Napětí rozmítající svazek ve vodorovném směru se nazývá **časová základna**. Běžný osciloskop bývá zpravidla vybaven dvěma kanály, tedy umožňuje současně zobrazit dvě napětí. Protože je v praxi potřeba měřit napětí různých velikostí, nepřivádí se vstupy na vychylovací soustavu přímo, ale přes napěťový dělič, předzesilovač a vertikální zesilovač, což nám umožní vhodně

nastavit **citlivost** osciloskopu, aby se celý průběh vešel na obrazovku. Stínítko osciloskopu bývá opatřeno čtvercovou mříží, která vyznačuje **dílky**. Citlivost osciloskopu se pak udává v počtu voltů na dílek, tj. jako velikost napětí, které způsobí vychýlení svazku právě o jeden dílek. Citlivost se volí zpravidla mechanickým přepínačem označeným VOLTS/DIV.

Časová základna bývá v osciloskopu jen jedna, ale umožňuje volit délku lineárního nárůstu napětí, tj. velikost periody. Obdobně jako citlivost udává se zvolená perioda v jednotkách „sekunda na dílek“. Hodnota časové periody určuje míru rozvinutí průběhu vstupního napětí, čím je počet sekund na dílek menší, tím se průběh jeví „roztáženější“. Minimální hodnota periody souvisí s maximální frekvencí harmonického signálu, který ještě lze osciloskopem zobrazit (maximální frekvence může být i menší, pokud nestačí elektronika přístroje). Osciloskopy bývají běžně vybaveny **časovou lupou** (tlačítko 10×), která nám umožní zobrazit signál desetkrát zvětšený v čase, a to v libovolném okamžiku (změna periody časové základny nám zvětší pouze oblast na začátku signálu). Napětí časové základny je zpravidla malé a k vychylovací soustavě se přivádí přes horizontální zesilovač.

Okamžik, kdy začne časová základna generovat signál, není obecně v žádném vztahu k měřenému signálu a zobrazený signál se na obrazovce může pohybovat („ujíždět“), což ztíží určování jeho parametrů. Proto jsou osciloskopy vybaveny **synchronizací**, která nám umožní vhodně zvolit začátek časové základny. Zpravidla se používá *interní synchronizace*, při níž je okamžik spuštění časové základny odvozen z průchodu měřeného signálu nulou (případně jinou, volitelnou hodnotou). Při zobrazení s interní synchronizací bude průběh signálu na obrazovce nehybný. Většina osciloskopů umožňuje i *externí synchronizaci*, při které se okamžik spuštění časové základny odvozuje z nějakého vnějšího signálu (tento režim je vhodný pro měření složitějších signálů, případně při sledování vzájemných *časových* poměrů několika signálů).

Osciloskopy běžně umožňují měřit v režimu  $X-Y$ , v němž je odpojována časová základna a na druhý pár vychylovacích desek je přiveden jeden ze vstupních kanálů (zpravidla  $X$ ). Pak můžeme zobrazit vzájemnou závislost obou signálů, tj. závislost  $Y = f(X)$ . Tento režim nám umožňuje např. zobrazit voltampérové charakteristiky, hysterezní smyčky apod., použijeme-li vhodné převodníky příslušných veličin na napětí. Režim se dá použít i k měření poměru frekvencí, resp. k určení neznámé frekvence.



Obrázek 31: Čelní panel osciloskopu GOS 658G.

**Mechanická stavba osciloskopu** Každý kanál osciloskopu je na předním panelu reprezentován jedním BNC konektorem, do kterého se připojuje stíněný koaxiální kábel (z důvodu malého rušení při měření vysokofrekvenčních signálů). Odpor vstupu je v ideálním případě nekonečný (ideální voltmetr). Na druhém konci kabelu je třeba rozlišovat tzv. živý vodič, který se připojuje na signálovou část obvodu, a tzv. **zem**, která se připojí na společnou svorku všech zapojených přístrojů (osciloskopů, generátorů, zdrojů) – společná musí být i zem obou kanálů. Nejčastěji se používají dvě konstrukce: **a**) dva barevně odlišené „banánky“, které se přímo zapojí do obvodu (zem bývá černá, příp. zelená), **b**) sonda, která je tvořena přímým hrotem, který slouží jako živý vodič, a bočním káblíkem, který tvoří zem. Některé sondy mohou být opatřeny zabudovaným děličem napětí, což je nutno uvážit při odečítání velikosti napětí.

Vstup z konektoru nemusí vést přímo k vertikálním děličům a zesilovačům, ale může procházet obvodem pro odstranění stejnosměrné složky, není-li sepnuto tlačítko AC/DC. Filtraci lze provést průchodem skrz kondenzátor, ale zpravidla se používá složitější obvod. Je třeba uvážit, že tato filtrace může signál trochu deformovat. Osciloskopy bývají vybaveny i tlačítkem GND, které příslušný kanál uzemní a tím ho odpojí od měřeného obvodu. Tato vlastnost je užitečná např. při určování nulové polohy stopy.

Dvoukanálový osciloskop je vybaven přepínačem, který určuje, jaké signály se budou zobrazovat. Lze zvolit zobrazení jen jednoho z kanálů, zobrazení součtu obou signálů (volba ADD), případně rozdílu (volba ADD a sepnuté tlačítko INV), nebo obou kanálů zároveň (volba DUAL). Běžné dvoukanálové osciloskopy nemají nezávislé elektronové systémy pro oba kanály, ale používají jen jeden, který musí zobrazit oba průběhy. Používají se dvě metody simultánního vykreslení:

1. postupný režim – v jednom běhu časové základny se vykreslí průběh jednoho kanálu, při druhém běhu se zobrazí druhý kanál, vzhledem k setrvačnosti luminoforu budou viditelné oba průběhy.
2. prokládaný režim – perioda časové základny se rozdělí na přesně definované úseky a v každém úseku se střídavě zobrazuje jen jeden kanál. Oba průběhy se tedy vykreslí zároveň, ale jen v některých oblastech. Při pomalé časové základně nebudou přechody mezi úseky viditelné, ale při zmenšování periody se přechody objeví. Tento režim se zapíná tlačítkem CHOP, je nutno jej obnovit po každém přepnutí periody časové základny.

Osciloskopy bývají vybaveny řadou dalších vstupů/výstupů, které nejsou pro tuto praktika nutné. Jedinou výjimkou je výstup kalibračního napětí, na kterém se objevuje obdélníkový průběh s přesně definovanou amplitudou a frekvencí, který slouží ke kalibraci nastavení osciloskopu.

Moderní osciloskopy mívají na okrajích obrazovky informační pole, ve kterých se přímo zobrazují např. nastavený počet voltů na dílek, režim zobrazení, způsob synchronizace apod.

**Nastavení osciloskopu** Po zapnutí osciloskopu je zpravidla nutno vyladit stopu. Bez připojeného napětí na vstupu a se zapnutou časovou základnou by měla být na obrazovce vodorovná čára. Pomocí INTEN lze měnit jas stopy (intenzitu svazku), FOCUS mění zaostření svazku, tedy velikost a ostrost stopy elektronového svazku. Pokud není stopa přesně vodorovná, lze ji natočit pomocí TRACE ROTATION. Pomocí ILLUM lze měnit intenzitu podsvícení čtvercových dílků na stínítku.

Je-li osciloskop přepnut do režimu  $X-Y$ , bude při odpojených vstupech na obrazovce vysvícen jen malý bod. V takovém režimu by osciloskop neměl zůstat dlouho, protože by mohlo dojít k poškození (vypálení) luminoforu.

Citlivost vstupních kanálů lze měnit stupňovitě voličem VOLTS/DIV, ale také spojitě točítkem VAR. Hodnota, kterou udává stupňovitý volič platí jen tehdy, je-li točítko v pravé krajní poloze CAL. Poloha stopy na obrazovce závisí nejen na velikosti napětí a citlivosti, ale i na ovladači POSITION. Tím lze signálem posouvat nahoru a dolů, i mimo obrazovku. Obdobně lze ladit i horizontální polohu stopy (obou kanálů najednou).

**Speciální osciloskopy** Osciloskopy jsou přístroje velmi rozšířené a existují proto v celé řadě modifikací. Existují osciloskopy určené pro velmi vysoké frekvence, osciloskopy s paměťovým efektem (umožní po určité dobu uchovat průběh signálu, např. rychlého děje), či osciloskopy s více kanály než dvěma (nebo s více elektronovými systémy). V současné době už se nevyrobějí přístroje zcela analogové, pod označením analogový osciloskop se míní takový, který měřené průběhy zobrazuje spojitě, ale může být doplněn např. digitálním zobrazením velikosti signálu. Digitální osciloskop pracuje na jiném principu – u snímaného průběhu je s velkou frekvencí měřena okamžitá hodnota napětí, která se ukládá do paměti počítače. Na obrazovce se pak zobrazují pouze jednotlivé body, ze kterých se sestavuje průběh signálu. Výhodou digitálního osciloskopu je možnost uchování dat v paměti.

**Kurzory** Klasický voltmetr určuje u harmonických signálů buď efektivní  $U_{ef} = U$  (anglicky značenou „rms“), nebo střední  $U_s$  hodnotu napětí, které souvisí s amplitudou  $U_m$  vztahy

$$U_{ef} = U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad U_s = \frac{2}{\pi} U_m.$$

Uvedené vztahy platí jen pro přesně sinusový signál, má-li signál jiný průběh, dopouštíme se jejich použitím určité chyby. Přesto zejména jednodušší přístroje tyto vztahy používají; přístroje, které efektivní hodnoty počítají správně, se označují jako „True RMS“.

Měřit efektivní hodnoty osciloskopem by bylo náročné, proto zpravidla měříme amplitudu signálu  $U_m$ . I toto měření však vyžaduje znalost nulové hodnoty signálu, kterou lze dobře určit jen u „symetrických“ průběhů. Častěji se proto měří rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou, tzv. **špičkové napětí** (napětí špička–špička). V případě sinusového napětí platí  $U_{\text{šš}} = 2U_m$ .

U jednodušších osciloskopů se velikost určuje z počtu dílků, které signál „zabírá“, vynásobené citlivostí kanálu. Pro zvýšení přesnosti bývají dílky ještě rozděleny na menší části, ale toto dělení bývá jen na prostředním nitkovém kříži. Proto musíme točítky POSITION nastavit signál tak, aby se maximální/minimální hodnota nacházela na vertikální ose a nejlépe aby se jedna z nich kryla s celým dílkem. Měření předpokládá, že osciloskop pracuje s kalibrovanou citlivostí. Obdobným způsobem se určuje perioda signálu nebo vzájemné časové posuvy.

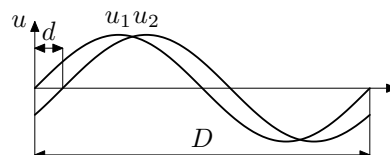
Lepší osciloskopy bývají vybaveny kurzory a digitálním měřením. Po stisku tlačítka CURSORS ON/OFF se na obrazovce objeví dvě vodorovné čáry, které definují polohu kurzorů. Napětí, které odpovídá svislé vzdálenosti těchto kurzorů, je zobrazeno ve vrchní části obrazovky jako  $\Delta V$  a jeho velikost v režimu DUAL odpovídá citlivosti prvního kanálu. Při měření napětí postupujeme tak, že točítkem POSITION v bloku CURSOR posuneme ten z kurzorů, který je vlevo označen trojúhelníkem, do vhodné polohy (např. maxima). Pak tlačítkem TRACK přepneme na druhý kurzor a nastavíme jej tak, aby se kryl s druhou polohou (minimem). Zobrazené napětí pak bude rovno  $U_{ss}$ . Stiskneme-li ještě jednou tlačítko TRACK, budou se oba kurzory pohybovat současně (budou zachovávat napěťový rozdíl).

Tlačítkem CURSOR FUNCTION můžeme přepínat různé funkce kurzorů. Můžeme měřit napěťový rozdíl ve voltech, v procentech (5 dílků znamená 100 %) nebo v decibelech (5 dílků je 0 dB). Další funkce slouží k měření časových a fázových veličin, kurzory jsou při nich svislé. Lze měřit časový rozdíl  $\Delta T$ , odpovídající frekvenci  $1/\Delta T$  či střidu cyklu (DUTY, 5 dílků odpovídá 100 %) nebo fázový posuv (PHASE, 5 dílků znamená  $360^\circ$ ).

**Časové závislosti vstupu** K zobrazení časového průběhu *napětí* stačí přivést signál na jeden ze vstupních kanálů a vhodně nastavit citlivost kanálu  $c_V$  tak, aby se celý průběh vešel na obrazovku, případně ho vertikálně posuneme do středu obrazovky. Je-li měřený signál periodický, je vhodné nastavit časovou základnu tak, aby byla vidět alespoň jedna perioda, a jemně ji doladíme, aby došlo k synchronizaci a ustálení obrazu. Srovnáním s dílkou pak můžeme určit jak amplitudu, tak frekvenci signálu.

Dvoukanálový osciloskop nám dovoluje měřit i *fázový posuv* dvou signálů. Časovou základnu nastavíme tak, aby byly vidět oba průběhy a doladíme horizontální pozici tak, aby průchod nulou jednoho ze signálů byl ve středu nitkového kříže. Pak určíme (v dílcích) vzdálenost další periody  $D$  a také vzdálenost  $d$  průchodu nulou druhého signálu (musí se jednat o průchod ve stejném smyslu, např. ze záporných do kladných hodnot). Velikost fázového posunu pak je

$$\varphi = \frac{d}{D} \cdot 360^\circ = \frac{\Delta T}{T} \cdot 360^\circ.$$



Pro snažší měření je vhodné, aby oba signály byly ve stejné výšce.

Měření *proudu* se provádí vždy nepřímým měřením úbytkem napětí na rezistoru známého (přesného) odporu. Použitý rezistor by měl být dostatečně malý, aby příliš neovlivnil proudové poměry v obvodě, hodnota jeho odporu musí být dostatečně přesně známa, neboť ovlivňuje celkovou přesnost měření, a musí mít takovou velikost, aby úbytek napětí byl dobře měřitelný. Velikost proudu se pak získá z velikosti napětí pomocí Ohmova zákona.

Přesnost měření napětí a proudů odečtem z obrazovky není velká, ale lze tato měření s výhodou použít pro neharmonické signály či signály vysokých frekvencí, u kterých běžné přístroje zkreslují. Přesnější hodnoty poskytuje měření pomocí kurzorů.

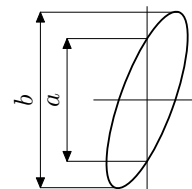
**Vzájemná závislost vstupů** V režimu X-Y můžeme zobrazovat i jiné než časové závislosti vstupů. Jednou z aplikací v oblasti harmonických signálů je určování *poměru frekvencí*, nebo přímo frekvencí, máme-li zdroj přesné frekvence. Signál s neznámou frekvencí  $f_1$  přivedeme na kanál Y (vertikální vstup) a na kanál X přivedeme signál se známou frekvencí  $f_0$ . Na obrazovce se zobrazí jedna z **Lissajousových křivek**, které vznikají při skládání dvou kolmých kmitů; tvar křivky závisí jak na frekvencích, tak na fázovém posunu. Bude-li frekvence  $f_1$  racionálním násobkem  $f_0$ , bude obraz stojatý a můžeme určit počet  $n_h$  bodů dotyku s horizontální tečnou a počet  $n_v$  bodů dotyku s vertikální tečnou ke křivce. Neznámou frekvenci pak určíme ze vztahu

$$f_1 = \frac{n_v}{n_h} f_0.$$

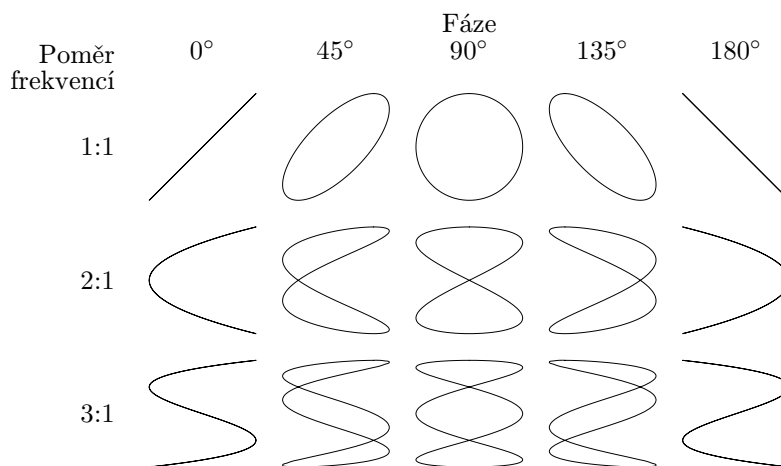
Pokud frekvence signálů nebudou v racionálním poměru, bude se obrazec měnit a frekvenci pak lze určit jen přibližně. V případě, že známe přesnou hodnotu  $f_0$ , můžeme uvedeným postupem zjistit hodnotu frekvence  $f_1$ , v opačném případě jen poměr frekvencí.

Osciloskopem lze měřit i *fázový posuv* dvou harmonických signálů se stejnou frekvencí. Každý ze signálů přivedeme na jeden vstup a na obrazovce se objeví nakloněná elipsa. Tvar elipsy závisí na fázovém poměru i poměru amplitud, může se měnit od přímky při  $\varphi = 45^\circ$  až po kružnici při  $\varphi = 90^\circ$  a  $U_1 = U_2$ . Hodnotu úhlu fázového posunu dostaneme ze vztahu

$$\sin \varphi = \frac{a}{b}.$$



Metoda však neumožňuje určit, který ze signálů předbíhá.



Obrázek 32: Lissajousovy obrazce.

## : Realizace měření

Veškerá měření provádějte s osciloskopem GOS 658G, jako zdrojů používejte modulů ze systému  $\mu$ LAB. Po zapnutí osciloskopu chvíli vyčkejte na jeho ustálení, pak teprve začněte ladit parametry stopy. Dbejte, aby nedošlo k poškození obrazovky.

Před měřením se seznamte s upevněním BNC konektoru. Při použití obou kanálů dbejte na správné zapojení zemních vodičů. Před připojením kanálu by měla být nastavena nejmenší citlivost, aby nedošlo k poškození vstupních obvodů.

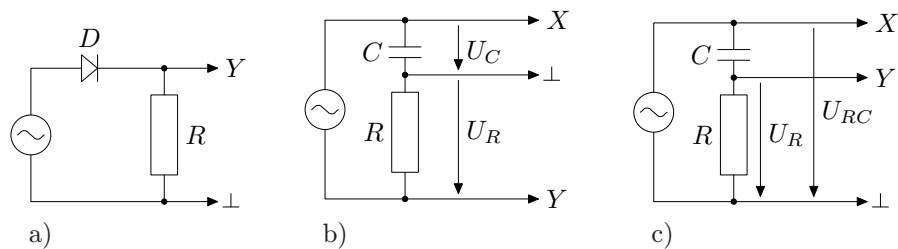
Kalibrační napětí je vyvedeno na úchytce pod obrazovkou, k přivedení do kanálu stačí do otvoru zasunout červený vodič, zelený může zůstat „ve vzduchu“.

Při zobrazování šumu nejprve ponechte stejnosměrnou složku napětí a sledujte, co se děje při změně citlivosti. Pak totéž zopakujte po filtraci stejnosměrné složky.

Při srovnávání efektivních hodnot vezměte do úvahy skutečnost, že digitální multimetr je konstruován na sinusový signál s frekvencí do 400 Hz.

## : Zadání úlohy

1. Vyzkoušejte si funkci základních nastavovacích prvků, např. ostření, jas, poloha stopy.
2. Pomocí zdroje kalibračního napětí (z osciloskopu) zkontrolujte vstupní citlivost vertikálního zesilovače.
3. Zobrazte stejnosměrné napětí z modulu PROGRAMMABLE DC SUPPLY pro několik hodnot napětí, nastavení citlivosti a ověřte výpočet napětí z dílků.
4. Zobrazte tentýž signál při zapnuté filtraci stejnosměrné složky. Volte zesílení tak, aby byl vidět šum zdroje a určete případně frekvenci.
5. Uchopte konec červeného vodiče do ruky a zobrazte průběh napětí.
6. Zobrazte sinusový signál z modulu FUNCTION GENERATOR. Vyzkoušejte si funkci časové základny pro několik frekvencí, citlivost pro několik hodnot amplitud. Ověřte si vztahy mezi efektivní hodnotou a amplitudou (využijte VOLTMETER DC&AC RMS a kurzory osciloskopu). Z dílků i kurzory ověřte frekvenci generátoru.
7. Zapojte do série rezistor a diodu, zobrazte průběh napětí, ověřte vztahy mezi amplitudou signálu a efektivní (rms) hodnotou, kterou udává VOLTMETER DC&AC RMS a digitální multimetr.
8. Využijte v předchozím zapojení rezistor jako převodník proudu na napětí a zobrazte zároveň vstupní napětí a protékající proud. Určete maximální hodnotu proudu  $I_m$ . Ověřte si funkci přepínače CHOP.
9. Zobrazte signál vzniklý součtem napětí ze dvou generátorů s rozdílnou frekvencí. Opět ověřte vztahy mezi amplitudou a efektivní hodnotou.
10. Zobrazte obdélníkový signál s frekvencemi  $f = 10$  kHz a  $f = 100$  Hz a vyzkoušejte funkci odstranění stejnosměrné složky.
11. Přepněte osciloskop do režimu  $X-Y$ . Na oba vstupy přiveďte sinusová napětí ze dvou generátorů s přesně stejnou frekvencí a zobrazte výsledek. Pak frekvence mírně rozlaďte (změňte nejnižší řád jednoho generátoru) a popište výsledek. Zobrazte Lissajousovy obrazce pro  $f_2 = n f_1$ ,  $n = 2, 3, 4, 5$ . Určete pomocí Lissajousových křivek frekvenci jednoho z generátorů (frekvenci druhého považujte za známou).



Obrázek 33: Schéma a) sériové kombinace rezistoru a diody, b, c) RC obvodu.

12. Přepněte osciloskop do režimu  $X$ - $Y$ . Sestavte sériový RC obvod s odporovou dekádou a na vstupy přiveďte postupně tato napětí:

- $X = U_C$ ,  $Y = U_R$  (obr. 33b),
- $X = U_{RC}$ ,  $Y = U_R$  (obr. 33c).

Změřením rozměrů elipsy stanovte fázový posun napětí  $U_{RC}$  a  $U_C$  vzhledem k napětí  $U_R$ . Pak vypněte  $X$ - $Y$  režim a určete fázový posuv pomocí kurzorů v časovém režimu osciloskopu. Ověřte souhlas výpočtem.

.....  
**Použité přístroje a pomůcky**

osciloskop GOS 658G, PROGRAMMABLE DC SUPPLY, FUNCTION GENERATOR, COMPONENT BOARD, VOLTMETER DC&AC RMS, digitální multimetr, sada rezistorů a kondenzátorů, sada vodičů a káblů

**Studijní prameny**

přednášky z elektřiny a magnetismu

Fajt, V.: *Elektrická měření*, SNTL/Alfa Praha, 1987



## Úloha číslo 7.

Cílem úlohy je seznámení se se základy magnetických obvodů a s magnetickými vlastnostmi některých látek (ocel, ferity), které se projevují ve statickém i dynamickém režimu.

## : Teorie

Obdobně jako u elektrického pole se v případě magnetického pole zavádí dvě vektorové veličiny, **magnetická indukce**  $\vec{B}$  a **magnetická intenzita**  $\vec{H}$ . První z nich lze považovat za základní, protože z ní lze určovat velikost silového působení na částice či velikost indukovaného napětí, dochází-li k časovým změnám. Magnetická intenzita je odvozená veličina a zavádí se spíše pro zjednodušení výpočtů. Mezi indukci a intenzitou v nekonečném látkovém prostředí platí vztah

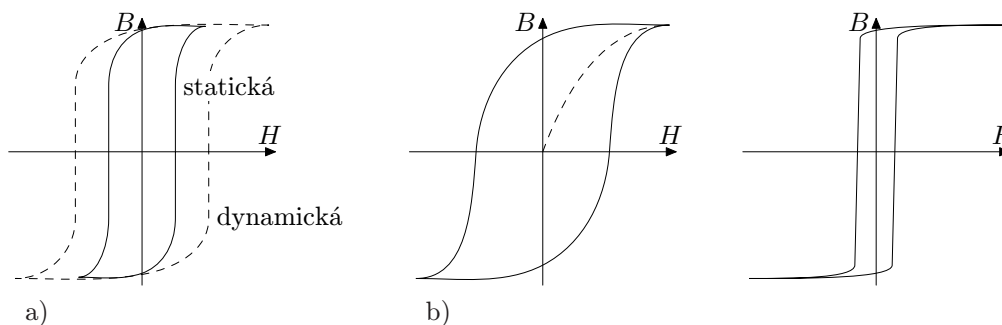
$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_r \mu_0 \vec{H}, \quad (38)$$

kde  $\vec{M}$  je **vektor magnetizace** látky,  $\mu_r$  je **relativní permeabilita**. Permeabilita vakua  $\mu_0$  má hodnotu  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ . Součin  $\mu = \mu_r \mu_0$  se označuje jako permeabilita prostředí. Relativní permeabilita udává, jak látkové prostředí ovlivňuje vnější (budící) magnetické pole. Je-li totiž látkové prostředí vloženo do magnetického pole, dochází mezi polem a elektrony k interakci, která vede k částečné orientaci elementárních smyček atomárních proudů do směru magnetického pole, ovšem s orientací závislou na látkové podstatě. To může vést jak k zesílení, tak zeslabení magnetického pole. Podle magnetických vlastností se látky dělí do tří skupin:

- látky **diamagnetické** mají konstantní permeabilitu  $0 < \mu_r < 1$ , která bývá jen nepatrně menší než jedna. Neexistuje materiál, který by měl  $\mu_r = 0$  a byl tudíž zcela nemagnetický (analogie izolantu v elektrickém poli). Diamagnetický materiál je vždy z magnetického pole vypuzován.
- látky **paramagnetické** mají konstantní permeabilitu  $\mu_r > 1$  a magnetické pole mírně zeslabují.
- látky **feromagnetické** mají permeabilitu  $\mu_r \gg 1$ , která je závislá na intenzitě magnetického pole,  $\mu_r = f(H)$ , a závislost bývá nelineární.

Charakterizace látky není absolutní, protože permeabilita závisí na teplotě – existuje **Curieho teplota**, nad kterou se feromagnetický materiál stává paramagnetikem.

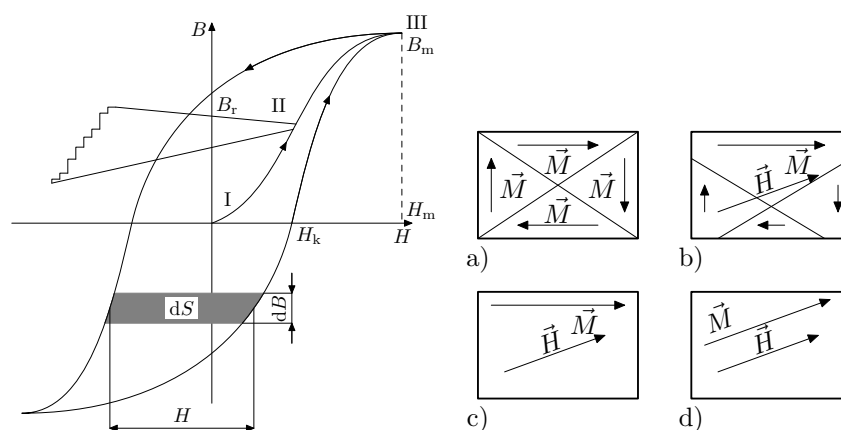
Grafické vyjádření závislosti (38) v případě látkového prostředí se nazývá **magnetizační charakteristika** (obr. 34a). V případě feromagnetických látek je magnetizační charakteristika nelineární a projevuje se v ní **hystereze**, proto se nazývá hysterezní křivkou (smyčkou). **Statická hysterezní smyčka** odpovídá vztahu (38), mění-li se intenzita magnetického pole *velmi pozvolna* (kvazistacionárně) od  $-H$  do  $+H$  a zpět. Při střídavém magnetování se tvar hysterezní smyčky feromagnetického materiálu mění vlivem vířivých proudů a dostáváme **dynamickou hysterezní smyčku**. Její tvar již není dán pouze magnetickými vlastnostmi materiálu, ale i jeho tloušťkou, měrným odporem a kmitočtem magnetování. Zvětšení plochy dynamické hysterezní smyčky odpovídá ztrátám vznikajícím indukovanými vířivými proudy. Při velmi nízkých kmitočtech střídavého magnetování (např. 10 Hz) odpovídá dynamická hysterezní smyčka statické hysterezní smyčce.



Obrázek 34: Hysterezní smyčka a) statická a dynamická, b) magneticky tvrdého a měkkého materiálu.

**Magneticky tvrdé** materiály mají hysterezní smyčku s velkou plochou (např. materiály pro trvalé magnety), magneticky měkké materiály mají hysterezní křivku úzkou a strmou (např. transformátorové plechy, kotvy elektromotorů aj.). Na hysterezní smyčce lze definovat několik významných bodů či oblastí:

1. **Křivku prvotní magnetizace** získáme, když budeme magnetickým polem plynule se zvětšujícím od nuly až do nasycení magnetovat materiál, který byl předem dokonale odmagnetován. Křivka prvotní magnetizace musí vycházet z počátku souřadnic a lze ji rozdělit na několik oborů (viz obr. 35). V oblasti slabých magnetických polí (obor I) dochází k vratnému narůstání objemu těch Weissových domén, jejichž směr spontánní magnetizace je nejbližší ke směru působícího magnetického pole (obr. 35a,b), aniž by se měnil směr jejich magnetizace. Domény se zvětšují na úkor jinak orientovaných domén. V oboru II, v níž křivka probíhá nejstrměji, dochází k *nevratným* přeskokům částí oblastí sousedících s oblastí nejpříznivěji orientovanou, až bude (obr. 35c) v celém objemu magnetované látky dosaženo stejné magnetizace (stále nedochází ke změně jejího směru). V oborech I a II tedy vzrůstá celková magnetizace látky posouváním hranic mezi jednotlivými spontánně orientovanými oblastmi. Posouvání hranic v oboru II se nazývá **Barkhausenův jev** a při detailním zakreslení křivky prvotní magnetizace se projeví stupňovitým průběhem. Experimentálně lze tento jev pozorovat při rychlé změně magnetického pole v daném oboru, při kterém se v cívce navinuté okolo látky indukují napěťové impulzy, vytvářející šum. V oboru III dochází k natočení směru magnetizace v celém tělese do směru působícího magnetického pole (obr. 35d), v okamžiku shodné orientace dochází k **nasycení** a při vzrůstu budícího magnetického pole už látka nepřispívá ke zvyšování magnetické indukce. Dojdeme-li s magnetizací až do oboru III, získáme maximální hysterezní smyčku. Přerušíme-li magnetizaci dříve, bude závislost  $B = f(H)$  při poklesu intenzity opisovat jinou hysterezní křivku, která bude mít podobný tvar, ale menší plochu i krajní hodnoty  $B$  a  $H$ . Je-li materiál podroben střídavé magnetizaci s rostoucí intenzitou, nebude závislost  $B = f(H)$  probíhat po křivce prvotní magnetizace, ale bude probíhat po malých hysterezních smyčkách, jejichž postupně rostoucí vrcholy budou opisovat **komutační křivku**.
2. **Stav nasycení** je určen hodnotou magnetické indukce nasycení  $B_s$ , což je pořadnice bodu na křivce prvotní magnetizace při takové intenzitě magnetického pole, při níž jsou hysterezní smyčky pro libovolné  $H > H_s$  totožné.
3. **Koercitivní intenzita**  $H_k$  odpovídá průsečíku kladné osy  $H$  s maximální hysterezní smyčkou.
4. **Remanentní magnetická indukce**  $B_r$  odpovídá indukci, kterou bude látka vykazovat po odstranění vnějšího magnetického pole, tj. v případě poklesu intenzity na  $H = 0$ . Její hodnota je dána průsečíkem kladné osy  $B$  s hysterezní smyčkou. Magneticky tvrdé materiály mají smyčky s velkou plochou, proto je i průsečík relativně vysoko a takový materiál proto může působit jako trvalý magnet.



Obrázek 35: Křivka prvotní magnetizace a změny Weissových domén.

Při střídavém magnetování feromagnetické látky vznikají ztráty energie – zdroj magnetizačního proudu dodává energii na vytvoření magnetického pole, která se v magnetovaném materiálu zčásti mění na teplo. Ztráty energie vznikají jednak pochody probíhajícími ve feromagnetiku při změnách Weissových domén (hysterezní ztráty), jednak vířivými proudy indukovanými střídavým magnetickým tokem ve vodivém materiálu. Druhá složka ztrát závisí na elektrickém odporu materiálu, proto se např. transformátory nedělají z jednoho kusu materiálu, ale skládají se z jednotlivých plechů malé tloušťky, čímž vzroste jejich odpor.

Z teorie je známo, že energie magnetického pole je dána vztahem  $W_m = \int H dB$ . Určíme-li geometricky „plochu“ hysterezní smyčky  $S_h$ , získáme výraz

$$S_h = \oint H dB,$$

kteřý lze po srovnání interpretovat jako změnu energie magnetického pole, a tedy jako práci vynaloženou zdrojem magnetizačního proudu během jednoho magnetizačního cyklu na přemagnetování jednotkového objemu materiálu. Tato práce se často označuje jako měrná ztrátová energie  $w_z$ . Po dosažení jednotek intenzity a indukce dojdeme k závěru, že plochu hysterezní smyčky je třeba vyjadřovat v jednotkách  $\text{Jm}^{-3}$ .

Pro použití feromagnetických materiálů v elektrotechnice (např. jádra cívek, magnetické obvody transformátorů apod.) se tyto materiály zpracovávají do různých tvarů s různými geometrickými rozměry. U konkrétních jader není magnetický indukční tok v různých místech průřezu jádra konstantní veličinou a rovněž není snadné stanovit přesnou délku střední magnetické indukční čáry magnetického obvodu. Proto výrobci pro usnadnění výpočtů udávají pro konkrétní jádra efektivní magnetický průřez jádra a efektivní délku střední indukční čáry, které jsou určeny měřením. Pro usnadnění návrhu cívek s feritovými jádry se používá pro stanovení počtu závitů  $z$  nutných k dosažení indukčnosti  $L$  vztah

$$L = A_L z^2,$$

v němž vystupuje **činitel indukčnosti**  $A_L$ , který odpovídá indukčnosti, kterou by měla jednovávitová cívka daného tvaru a velikosti, umístěná v dané poloze. Činitel indukčnosti bývá navržen tak, aby jádro nebylo přebuzeno ( $H < 0,4 \text{ Am}^{-1}$ ). Dalším důležitým parametrem feromagnetických materiálů je **počáteční permeabilita**  $\mu_{r_{\text{poč}}}$ , což je relativní permeabilita v počátku křivky prvotní magnetizace. Je dána vztahem

$$\mu_{r_{\text{poč}}} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{B}{H} \right)_{H \rightarrow 0} = \frac{1}{\mu_0} \text{tg } \alpha,$$

kde  $\text{tg } \alpha$  je směrnice tečny ke křivce prvotní magnetizace vedené v počátku. Počáteční permeabilita a činitel indukčnosti jsou základními parametry feritových jader a jsou na nich vždy číselně vyznačeny.

Pro ilustraci je na obr. 36 uvedena naměřená magnetizační křivka a závislost relativní permeability na intenzitě magnetického pole  $H$  pro konkrétní materiál (ferit) FONOX H21, včetně teplotní závislosti jeho počáteční permeability. Dále jsou v katalogu uvedeny následující parametry:

Obrázek 36: Katalogová magnetizační křivka a závislost relativní permeability feritu FONOX H21.

Počáteční permeabilita	$\mu_{r_{\text{poč}}} = 1900 \pm 20 \%$
Měrné ztráty (při $f = 15 \text{ kHz}$ , $B = 200 \text{ mT}$ , $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	$P_z \leq 23 \text{ mW.g}^{-1}$
Magnetická indukce (při $H = 260 \text{ A.m}^{-1}$ , $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ )	$B \geq 330 \text{ mT}$
Courierova teplota	$t \geq 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Měrný odpor	$\rho = 2 \Omega.\text{m}$
Magnetická indukce při nasycení ( $H = 3000 \text{ A.m}^{-1}$ )	$B = 500 \text{ mT}$
Koercitivní intenzita	$H_k = 20 \text{ A.m}^{-1}$
Měrná hmotnost	$\gamma = 4800 \text{ kg.m}^{-3}$

**Měření dynamických hysterezních křivek** Chceme-li změřit hysterezní křivky látky, můžeme postupovat tak, že z ní vytvoříme jádro cívky a budeme měřit proudové a napěťové poměry v obvodu. Z konstrukčních důvodů je vhodné na jádro navinout dvě cívky a sestavit tak transformátor. Uvažujme zapojení dle obr. 37, v němž jádro transformátoru tvoří uzavřený magnetický obvod. Velikost intenzity magnetického pole podle Ampérova zákona celkového proudu je

$$H = \frac{N_1 i_1}{l}, \quad (39)$$

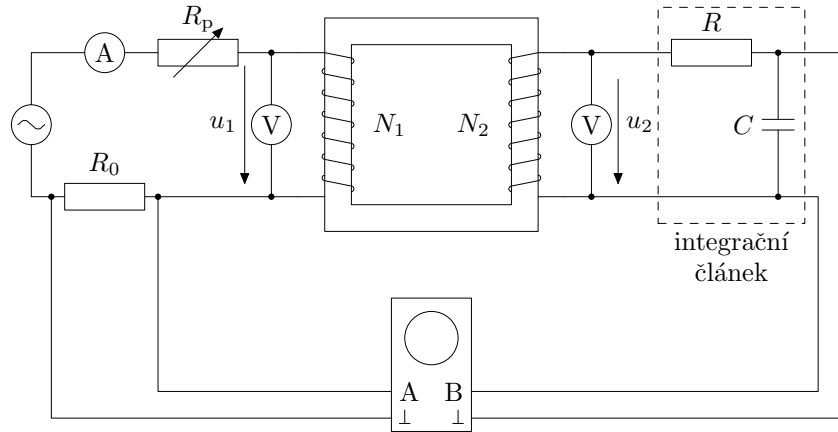
kde  $N_1$  je počet závitů první cívky,  $i_1$  je proud tekoucí první cívkou a  $l$  je délka střední magnetické indukční čáry. Napětí, které se indukuje ve druhém obvodu (na sekundáru) je dle indukčního zákona

$$u_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d(BS)}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt},$$

kde  $N_2$  je počet závitů druhé cívky,  $\Phi$  je indukční tok a  $S$  je průřez jádra.

Hysterezní křivku vyšetřovaného jádra můžeme zobrazit pomocí osciloskopu, k tomu ovšem potřebujeme získat napěťové signály, které budou úměrné  $H$  a  $B$ . Signál úměrný intenzitě můžeme získat, využijeme-li Ohmova zákona. Do vstupního obvodu zapojíme rezistor  $R_0$ , na němž proud  $i_1$  vytvoří napěťový úbytek  $u_{R_0} = R_0 i_1$ . Dosadíme-li do vztahu (39), získáme

$$H(t) = \frac{N_1 u_{R_0}(t)}{l R_0}.$$



Obrázek 37: Zapojení pro měření magnetických vlastností.

Mezi intenzitou  $H$  a napětím  $u_{R_0}$  je tedy přímá úměra a můžeme toto napětí přivést na vstup  $X$  osciloskopu, tj.  $u_X = u_{R_0} = \frac{R_0 l}{N_1} H = H/c_x$ , kde  $c_x$  je převodní konstanta.

Získání druhého napětí je složitější. Indukované napětí  $u_2$  není úměrné přímo indukci, ale její časové změně. Musíme proto do obvodu zařadit *integrační obvod*, který napětí  $u_2$  převede na  $u_Y = \int u_2 dt \sim B$ . K integraci můžeme použít RC článek z obr. 38. Předpokládejme, že platí

$$R \gg \frac{1}{\omega C},$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence harmonického napětí  $u_2$ , a že zdroj napětí je dostatečně tvrdý (malý vnitřní odpor). Za těchto podmínek bude kapacitance kondenzátoru velmi malá a proud bude určen především hodnotou odporu  $R$ . Bude tedy možno psát

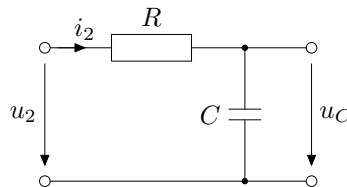
$$i_2 = \frac{u_2}{R}.$$

Tento proud protéká i kondenzátorem a postupně jej nabíjí. Podle definičních vztahů proudu a kapacity lze psát

$$u_C(t) = \frac{1}{C}q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_2(t') dt'$$

a po dosazení za  $i_2$  dostaneme

$$u_C(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t u_2(t') dt' = \text{konst.} \int_0^t u_2(t') dt'.$$



Obrázek 38: Zapojení integračního RC článku.

Dosadíme-li dále za  $u_2$ , získáme výslednou závislost výstupního napětí integračního článku na magnetické indukci ve tvaru

$$u_C(t) = -\frac{N_2 S}{RC} \int_0^t \frac{dB}{dt'} dt' = -\frac{N_2 S}{RC} B(t),$$

tedy napětí na kondenzátoru je přímo úměrné indukci a lze jej přivést na vstup  $Y$  osciloskopu, tj.

$$u_Y = u_C = -\frac{N_2 S}{RC} B = -\frac{1}{c_y} B,$$

kde  $c_y$  je převodní konstanta.

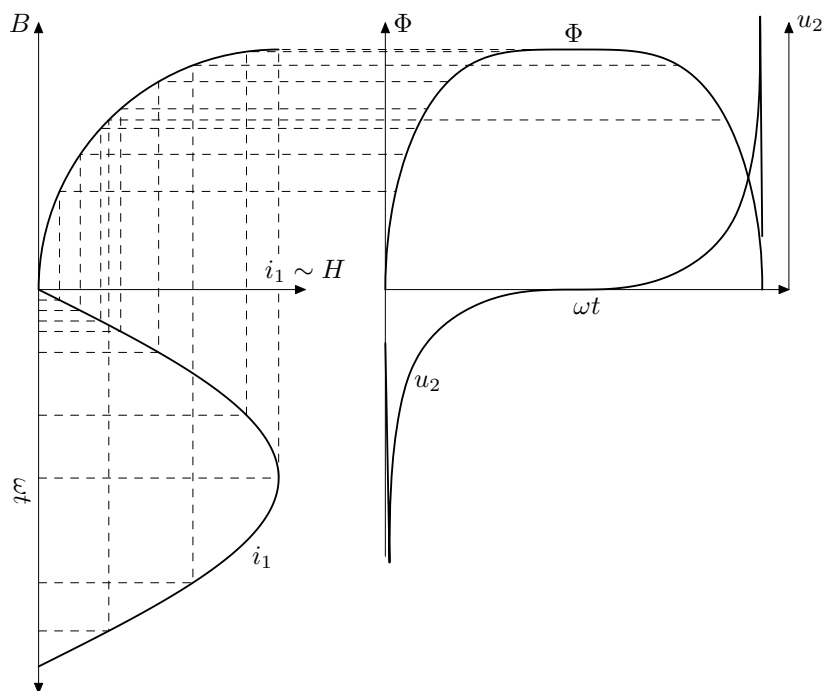
**Měření křivky prvotní magnetizace** Měření křivky prvotní magnetizace je poměrně obtížné, proto se častěji měří komutační křivka, která se při stejnosměrném nebo nízkofrekvenčním magnetování jen nepatrně liší od křivky prvotní magnetizace. **Komutační křivka** je křivkou, na níž leží vrcholy všech ustálených souměrných hysterezních smyček získaných při různých vrcholových hodnotách  $H_m$  magnetické intenzity.

Intenzita magnetického pole  $H$  je přímo úměrná budicímu proudu v primárním vinutí transformátoru. Závislost magnetické indukce  $B$  na  $H$  je však u feromagnetických látek výrazně nelineární, což způsobí neharmonický průběh některých veličin v obvodu transformátoru. Které veličiny budou neharmonické závisí na způsobu buzení transformátoru. Uvažujme proto dva případy:

1. Zařadíme-li do primárního obvodu transformátoru dostatečně velký odpor  $R_0$  ( $R_0 \gg L_1\omega$ ), pak z generátoru harmonického napětí bude do primárního vinutí transformátoru téci harmonický proud  $i_1$  a proto i intenzita  $H$  magnetického pole v jádře transformátoru bude mít harmonický průběh. Efektivní hodnotu proudu  $I_1$  v primárním vinutí můžeme změřit běžným ampérmetrem na střídavý proud. Maximální hodnota magnetické intenzity  $H_m$  pak bude

$$H_m = \sqrt{2} \frac{N_1 I_1}{l}, \quad (40)$$

kde  $I_1$  je efektivní hodnota proudu udávaná ampérmetrem. V tomto případě nebude mít magnetická indukce  $B$  harmonický průběh a totéž bude platit pro magnetický indukční tok  $\Phi$  v jádře transformátoru a napětí indukovaná v cívkách transformátoru. Časový průběh magnetické indukce  $B$  (tedy i toku  $\Phi = SB$ ) v jádře transformátoru při jeho buzení harmonickým proudem  $i_1$  je graficky odvozen na obr. 39, v němž pro jednoduchost byla hysterezní křivka nahrazena křivkou prvotní magnetizace. Z časového průběhu indukčního toku lze derivací odvodit průběh napětí  $u_2$ , které má silně neharmonický průběh.



Obrázek 39: Buzení harmonickým proudem.

2. Jiná situace nastává při napájení transformátoru z tvrdého zdroje harmonického napětí při zanedbatelném odporu a reaktanci primárního obvodu transformátoru. Pak je časový průběh magnetického indukčního toku  $\Phi$  i indukovaného napětí  $u_2$  harmonický, ale primárním obvodem procházející proud  $i_1$  je neharmonický (obr. 40). Můžeme tedy určit maximální hodnotu magnetické indukce  $B_m$  v jádře transformátoru výpočtem ze změřené efektivní hodnoty napětí  $U_2$ , protože lze psát

$$u_2(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} = -N_2 S \frac{dB_m}{dt} \sin \omega t = -N_2 S B_m \omega \cos \omega t,$$

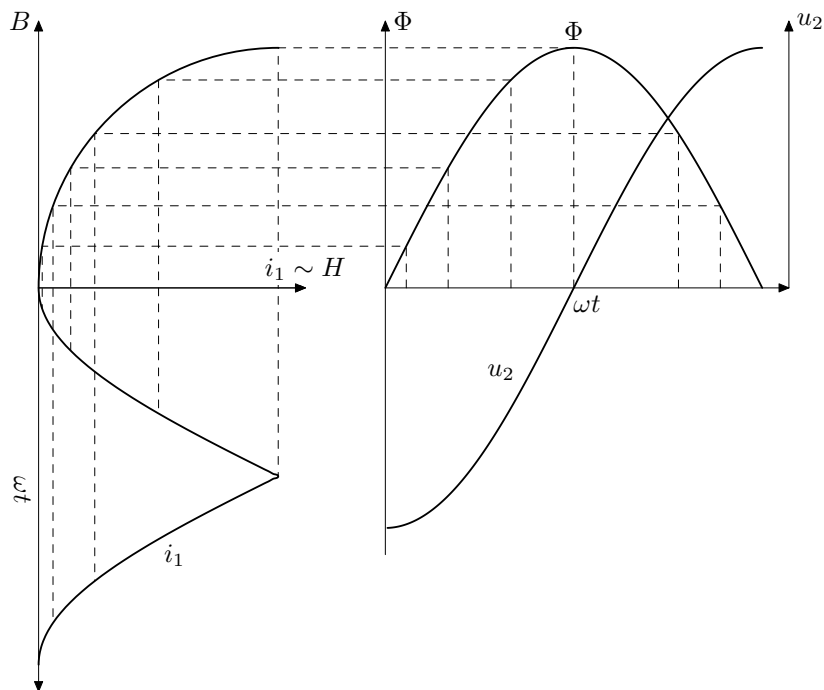
z čehož lze určit vztah mezi maximální indukci a efektivní hodnotou  $U_2$  udávanou voltmetrem

$$B_m = \frac{U_{m2}}{2\pi N_2 S f} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{U_2}{N_2 S f} = \frac{U_2}{4,44 N_2 S f}. \quad (41)$$

Maximální hodnotu intenzity  $H_m$  můžeme určit ze vztahu

$$H_m = \frac{N_1 I_{m1}}{l},$$

kde  $I_{m1}$  je vrcholová hodnota proudu  $i_1$ .



Obrázek 40: Buzení harmonickým napětím.

**Určení permeability** Nejprve se zabýváme určením *statické permeability* v bodě  $M$ . Ta je definována vztahem

$$\mu_{\text{stat}M} = \frac{B_M}{H_M}$$

a můžeme ji určit přímo odečtením souřadnic bodu  $M$  a dosazením. *Dynamickou permeabilitu* v bodě  $M$  určíme tak, že bodem  $M$  vedeme tečnu ke komutační křivce. Na vodorovné ose si vyznačíme malý úsek odpovídající změně  $\Delta H$  symetricky okolo bodu  $M$ . Krajní body úseku nám definují dva body na tečně, a ty po přenesení na svislou osu vytvoří interval délky  $\Delta B$ . Hodnotu dynamické permeability získáme vydělením obou úseků

$$\mu_{\text{dyn}M} = \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

Provedeme-li totéž pro  $M$  ztotožněný s počátkem, získáme hodnotu *počáteční permeability* (zde samozřejmě nevolíme interval symetricky, ale jen na kladné ose).

Provádíme-li odečty na papíře, musíme do vztahů zahrnout i převodní konstanty z délkových jednotek na příslušné jednotky magnetické intenzity a indukce.

**Celkové ztráty v transformátoru** Feromagnetická uzavřená jádra se používají jako magnetické obvody transformátorů. I když transformátory jsou elektrické stroje pracující s velkou účinností (až 98%), vznikají při transformaci kromě hysterezních ztrát v jádře transformátoru ještě další ztráty energie způsobené nenulovým odporem cívek a také vznikem vířivých proudů v materiálu jádra transformátoru, které se nachází ve střídavém magnetickém poli. Tyto ztráty rostou s frekvencí magnetování, což způsobí rozšíření dynamické hysterezní smyčky při vyšších frekvencích.

Celkové ztráty v transformátoru lze rozdělit podle místa vzniku:

- ztráty  $P_R$  ve vinutí cívek vznikající vlivem odporu vinutí,
- ztráty  $P_j$  ve feromagnetickém jádře, které jsou dvojího druhu

1. ztráty hysterezi  $P_h$ , které vznikají ve feromagnetiku při změnách Weissových domén magnetovaného materiálu,

2. ztráty vířivými (Foucaultovými) proudy  $P_v$ , které vznikají indukci vířivých proudů ve vodivém materiálu jádra transformátoru.

Celkové ztráty  $P_j$  v jádře při magnetování střídavým proudem jsou součtem obou složek  $P_j = P_h + P_v$  a způsobují oteplení jádra. V případě nezatiženého transformátoru je lze vyjádřit jako činný výkon proudu v primárním vinutí

$$P_j = \frac{1}{T} \int_0^T u_1 i_1 dt. \quad (42)$$

Vyjádříme-li  $u_1$  a  $i_1$  z předešlých rovnic jako

$$u_1 = N_1 S \frac{dB}{dt}, \quad i_1 = \frac{Hl}{N_1},$$

můžeme pro celkové ztráty v jádře psát

$$P_j = \frac{1}{T} \int_0^T N_1 S \frac{dB}{dt} \frac{Hl}{N_1} dt = fV \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt = fV \oint H dB = fV S_{h_{dyn}}, \quad (43)$$

kde  $V = Sl$  je objem jádra a  $S_{h_{dyn}}$  je plocha dynamické hysterezní smyčky. Pokud střídavé magnetování probíhá při nízkých kmitočtech (např.  $f = 10$  Hz), neuplatňují se ztráty vířivými proudy a dynamická hysterezní smyčka je téměř totožná se statickou hysterezní smyčkou, tj.  $S_{h_{stat}} = S_{h_{dyn}}$ . Pak

$$P_h = fV S_{h_{stat}}.$$

Při vyšších frekvencích magnetování se ztráty vířivými proudy uplatní a plocha hysterezní smyčky vzroste a celkové ztráty v jádře budou

$$P_h + P_v = fV S_{h_{dyn}}.$$

Z předchozích rovnic lze určit velikost ztrát vířivými proudy

$$P_v = fV (S_{h_{dyn}} - S_{h_{stat}}). \quad (44)$$

Pokud se u vířivých proudů výrazně neuplatňuje povrchový jev (skinefekt), roste rozdíl  $S_{h_{dyn}} - S_{h_{stat}}$  přibližně přímo úměrně frekvenci magnetování, takže výkon nutný ke kompenzaci ztrátového výkonu  $P_v$  roste s druhou mocninou frekvence, kdežto výkon nutný ke kompenzaci hysterezních ztrát roste přímo úměrně frekvenci.

## § Realizace měření

Měření magnetických vlastností budeme provádět dle zapojení na obr. 37. Měřený obvod by měl již být zapojen, zkontrolujte zapojení jednotlivých vodičů, zda odpovídá schématu, a zkontrolujte, jestli všechny měřicí přístroje na sekundární straně jsou spojeny na společnou zem. Napájení primáru se provádí ze zdroje 14 V přes reostat  $R_p$ , kterým se reguluje velikost proudu v primáru (do max. hodnoty 2 A). Protože se jedná o velmi tvrdý zdroj, při výpočtech uvažujte druhý způsob buzení (neharmonický proud  $i_1$ , harmonická napětí  $u_2$ ). Proud primáru měřte ručkovým ampérmetrem, který měří efektivní hodnotu proudu. Tím se dopouštíte určité chyby ve stanovení velikosti maximálního proudu  $I_{m1}$  (určíte přepočtem z naměřené efektivní hodnoty), ale ukazuje se, že chyba není podstatná.

Ke sledování průběhů vstupního proudu a výstupního napětí použijte program RC2000 v režimu osciloskopu. Při proudu 1 A je vhodné zvolit obě napěťové osy 500 mV a jednou zvětšit časové měřítko.

K dispozici jsou dvě dvoudílná jádra transformátoru, která mají po složení totožné geometrické rozměry. Jádro z transformátorových plechů má tvar U a l, feritové jádro tvar C. Protože feritová jádra jsou velmi křehká a požadují slušné zacházení, měřte rozměry na plechovém jádře. Při měření musí být jádra položena na podložce, protože vibrují s frekvencí sítě. Při výměně jader na ně musíte nasadit cívky – primární cívka má  $N_1 = 110$  závitů, sekundární cívka  $N_2 = 240$  závitů (vinutá tenším drátem). Před manipulací s jádry vypněte napájení obvodu.

Komutační křivku změříte tak, že postupně budete zvyšovat proud v primárním obvodu a pokaždé změříte napětí  $U_{\text{ss}}$  odpovídající maximálním hodnotám  $B_m$  a  $H_m$ , tvar smyčky sledujte na osciloskopu v režimu X–Y se zapnutým RUN. Hodnoty  $\mu_r$  určete graficky.

Pro určení hysterezních ztrát si zobrazte maximální hysterezní smyčku a nastavte citlivost osciloskopu tak, aby smyčka měla velkou plochu a byla dobře prokreslena. Naměřenou hysterezní smyčku v režimu

SINGLE nabídkou SAVE uložte do souboru s příponou .os a soubor načtěte programem PRAKTMAG. Pokud se vám zelenou barvou zobrazí správná hysterezní smyčka, zadejte hodnoty převodních konstant  $c_x$  a  $c_y$  (po změně hodnoty použijte klávesu ENTER) a nastavte citlivost kanálů osciloskopu, program sám určí plochu smyčky. Pokud zobrazená smyčka nevypadá důvěryhodně, musíte ji vytisknout přímo z osciloskopu a určit plochu graficky.

## : Zadání úlohy

Před měření by úloha měla být zapojena, pouze ji zkontrolujte a nesrovnalosti nahlaste vyučujícímu.

1. Určete geometrické rozměry jádra transformátoru a využijte jich k určení převodních konstant  $c_x$  a  $c_y$  mezi napětím na osciloskopu a veličinami  $H$  a  $B$ .
2. Pro jádro z transformátorových plechů změřte statickou komutační křivku a určete  $\mu_{r_{poc}}$  a  $\mu_r$  v bodě nasycení.
3. Měření zopakujte pro feritové jádro.
4. Pro jádro z transformátorových plechů změřte statickou hysterezní smyčku a určete hysterezní ztráty při  $f = 50$  Hz.

Na konci měření zapojení nerozpojujte.

.....

### Použité přístroje a pomůcky

počítač s programem RC2000, napájecí zdroj, ampérmetr, reostat, rezistor, svorkovnice, cívky, ocelové a feritové jádro, sada vodičů, pravítko, vyhodnocovací prostředky

### Studijní prameny

přednášky z elektřiny a magnetismu

..: