

Obsah

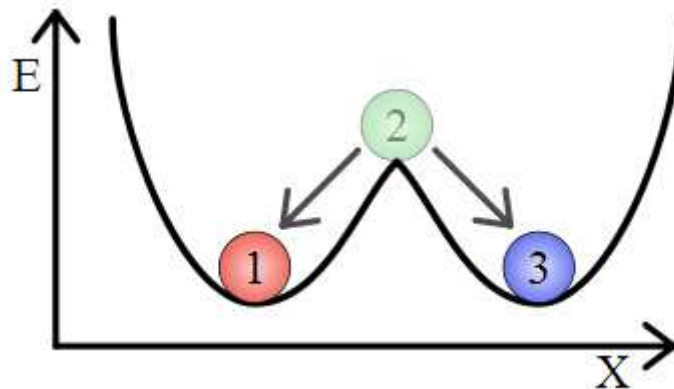
1 Úvod	1
2 Bistabilita	1
2.1 Bistabilní média.....	2
2.2 Optická bistabilita.....	2
2.3 Bistabilita v chemických reakcích.....	3
2.4 Bistabilita v elektrotechnice.....	3
3 Bifurkace	5
3.1 Jev bifurkace	5
4 Teoretický základ studia bistabilních dynamických systémů	7
4.1 Dvousložkový systém a jeho singulární body.....	7
4.2 Stacionární stavy bistabilního dynamického systému.....	8
4.3 Fázový portrét.....	11
5 Hystereze	13
5.1 Jev hystereze.....	13
5.2 Hystereze v elektrotechnice.....	14
6 Klopné obvody	17
6.1 Charakteristika a funkce klopných obvodů.....	17
6.2 Astabilní klopný obvod (multivibrátor).....	17
6.3 Astabilní klopný obvod (multivibrátor) s časovačem 555.....	18
6.4 Monostabilní klopný obvod.....	20
6.5 Monostabilní klopný obvod s časovačem 555.....	21
6.6 Bistabilní klopný obvod (BKO).....	22
6.7 Schmittův klopný obvod.....	31
7 Závěr	35
8 Použitá literatura	35

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá jevy bistability, hystereze, bifurkace a studiem bistabilních dynamických systémů a klopných obvodů různých typů. Tyto pojmy jsou v následujícím objasněny a je uvedeno jejich využití v různých vědních oborech (fyzika, chemie, elektrotechnika). Vybrané typy klopných obvodů (bistabilní klopný obvod, Schmittův klopný obvod) jsou pak simulovány pomocí programu Pspice. Při simulaci se mění různé parametry obvodů a sledují se souvislosti mezi vstupními a výstupními signály.

2 Bistabilita

Bistabilní stav systému je znázorněn na obr.1. Tento graf znázorňuje, jak se mění energie E systému v závislosti na řídicím parametru X . Z fyzikálního hlediska je bistabilita prezentována třemi stavy. Body 1 a 3 představují minima energie E a jsou to stavy stabilní, bod 2 představuje maximum energie E a jedná se o stav nestabilní.



Obr.1 Grafické znázornění bistability – $E = f(X)$

Předpokládejme, že se systém nachází v jednom ze stavů minima energie. Pro změnu stavu systému je zapotřebí dodat systému určitou energii. Tato energie musí mít alespoň takovou velikost, aby bylo překročeno energetické maximum ležící mezi jednotlivými minimy. Pokud by nebyla tato podmínka splněna, tak by se systém vrátil zpět do původního stavu.

Na rozdíl od bodů 1 a 3 je bod 2 nestabilní – systém je sice v rovnovážném stavu, ale jakákoliv malá výchylka jej převede do stavu s nižší energií a systém se již není schopen

samovolně vrátit do stavu 2. Nestabilní stav je takřka vždy považován za nežádoucí. Většinou nevadí to, že nevíme kam se systém překloupí, ale spíše to, že v něm může setrvat nepředvídatelně dlouhou dobu.

2.1 Bistabilní média

Jednou ze zajímavých prostorových struktur v určitých prostředích je rozruch, který při svém šíření uvádí systém z jednoho stabilního stavu do jiného. Příkladů takových procesů je mnoho a realizují se v odlišných systémech. V anorganickém světě je to například šíření ohně - stav mezi hořícím a nehořícím médiem se určitou rychlostí šíří z místa vybuzení a tím způsobuje, že se celý systém mění z nehořícího na hořící. Jsou tu tedy dva stabilní odlišné stavy charakterizované vhodnou stavovou veličinou, např. v uvedeném případě teplotou.

Jiný příklad může být z ekologie známý problém existence dvou stabilních stavů v evoluci biologických systémů. Pokud je daný biologický druh příliš málo rozšířený, nemá přirozené možnosti intenzivního rozmnožování. Vhodná porucha tohoto stavu však může stimulovat vznik "ekologické vlny", která má za následek vytvoření nového stabilního stavu, avšak s podstatně vyšší koncentrací jedinců omezenou prakticky jen množstvím potravy.

Systémy, které vykazují dva stabilní stacionární stavy, nazýváme obecně *bistabilními systémy*. Vlna, prostřednictvím které se uskutečňuje přechod mezi nimi, se nazývá *triggerová (spínací) vlna* [1].

2.2 Optická bistabilita

Optická bistabilita představuje existenci dvou metastabilních stavů systému pro daný soubor optických vstupních podmínek. Podmínkou pro vznik těchto stavů je, že systém je otevřený, tj. mezi ním a okolím může docházet k výměně energie (a látky).

Celková energie akumulovaná v tomto systému nezůstává konstantní a v době přechodu mezi stabilními stavy se mění. Statická převodní charakteristika závislosti výkonu některého výstupního signálu na vstupním může totiž vykazovat průběh hysterezní smyčky, zejména je-li v mechanismu předávání energie ze vstupu na výstup přítomna nelineární závislost a existuje-li v systému dostatečně silná kladná zpětná vazba.

Někdy bývá tato vazba doplněna vnějšími obvody. Pak hovoříme o reaktivní optické bistabilitě. Nelineárním mechanismem bývá zpravidla závislost indexu lomu prostředí na intenzitě procházejícího světla a taková optická bistabilita se někdy nazývá disperzní. Kladnou zpětnou vazbu prvku s disperzní optickou bistabilitou lze realizovat různými

způsoby, přičemž pro zkrácení doby přechodu mezi stabilními stavy jsou žádoucí co nejmenší rozměry celkového uspořádání a malé hodnoty akumulované energie stabilního stavu, který má vyšší energetickou hladinu. Tyto požadavky jsou nejlépe splněny ryze optickou vazbou v rezonanční dutině Fabry – Perotova interferometru [2].

2.3 Bistabilita v chemických reakcích

V organických systémech jsou podstatné procesy na bázi autokatalýzy, což je taková syntéza určité látky, ve které je ona sama svým katalyzátorem. Současně však je známo i to, že jednoduchá chemická reakce látky nemůže být autokatalytická, např. rychlost syntézy atomů vodíku a kyslíku při tvorbě vody nezávisí na tom, kolik vody se už vytvořilo [1].

Chemický proces charakterizovaný typickou autokatalytickou rovnicí lze zapsat ve tvaru



Je to proces, ve kterém se ze suroviny A za přítomnosti látky X syntetizují nové molekuly této látky. Látka X je tedy sama svým katalyzátorem. Jde o proces syntézy molekul látky X charakterizovaný rychlostní konstantou k_+ a obrácený proces rozpadu molekuly charakterizovaný konstantou k_- . Počet molekul látky A v objemové jednotce reaktoru označíme N_A a počet molekul látky X označíme N . Veličinu N_A můžeme (v regulovaném průtočném reaktoru) považovat za konstantu, a protože ve skutečnosti představuje koncentraci suroviny, tak ji označíme n_A .

Tvorba molekul X se projeví tak, že N se změní na $N+1$ nebo opačně při rozpadu $N \rightarrow N-1$. Proces syntézy i rozpadu molekul látky X je náhodný, proto v evoluci systému popsaného vztahem (2.1) se vyskytuje počet molekul látky X s určitou pravděpodobností, kterou označíme $P(N,t)$. Střední hodnota této veličiny je koncentrace látky X určená vztahem

$$n = \langle N \rangle = \sum N \cdot P(N,t) \quad (2.2)$$

2.4 Bistabilita v elektrotechnice

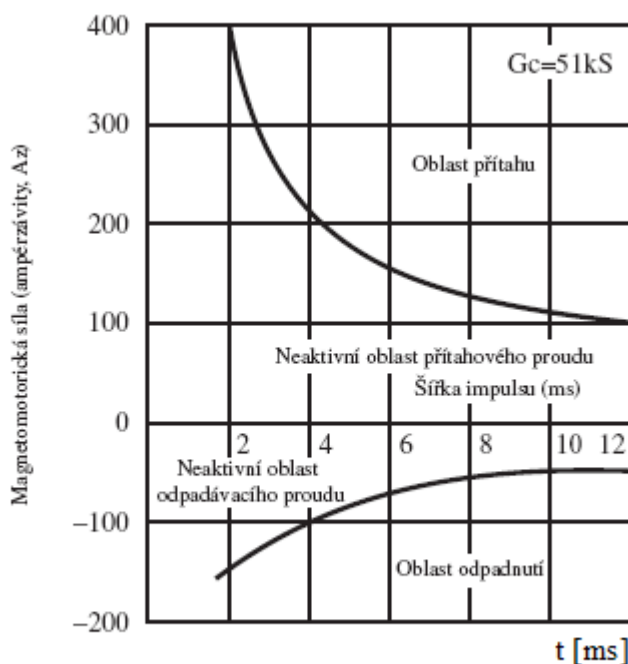
Polarizovaná a bistabilní polarizovaná relé

U těchto relé zpravidla záleží na polaritě proudu, tekoucího cívku nebo cívkami. Pokud jde o funkční charakteristiky těchto relé, polarizované (nebistabilní) relé „odpadne“, jakmile zanikne proud cívku. Průchod proudu správné polaritě se superponuje s účinkem

vestavěného permanentního magnetu a dochází k přitažení kotvy a sepnutí relé. Naopak u bistabilního relé se přitažení a odpadnutí kotvy provádí impulsem proudu cívku (cívkami) a stav přitažení nebo odpadnutí je zachován, i když je budící proud přerušen, takže k zachování těchto stavů není nutný zdroj proudu. K tomuto jevu dochází díky magnetické přitažné síle vyvolané permanentním magnetem. Bistabilní relé se vyrábí v polarizovaném provedení.

Polarizované bistabilní relé

Polarizované bistabilní relé obsahuje v části magnetického obvodu permanentní magnet. Jeho remanence zaručuje, že jsou zachovány přidržovací charakteristiky relé a správná přítlačná síla na kontakt. Relé se vyrábí ve dvou provedeních: s jednou cívku a se dvěma cívkami. Polarizované relé se přitahuje a „odpadává“ (překlápí) dodáním ovládacího impulsu, který je větší než prahové přitahové nebo odpadávací napětí (proud) do cívky. Na obr.2 je znázorněn příklad provozních charakteristik polarizovaného bistabilního relé. K jeho přitažení nebo odpadnutí většinou stačí šířka impulsu přibližně 10 ms. U relé s jednou cívku se přitažení nebo „odpadnutí“ provádí obrácením polarity proudu dodávaného do cívky, zatímco dvojcívková relé mají přitahovací a odpadávací cívky zvlášť a jsou aktivována napájecím napětím (proudem) předem definované polarity přivedeným do příslušné cívky. Z grafu je vidět, že citlivost relé při přitažení a odpadnutí je různá.



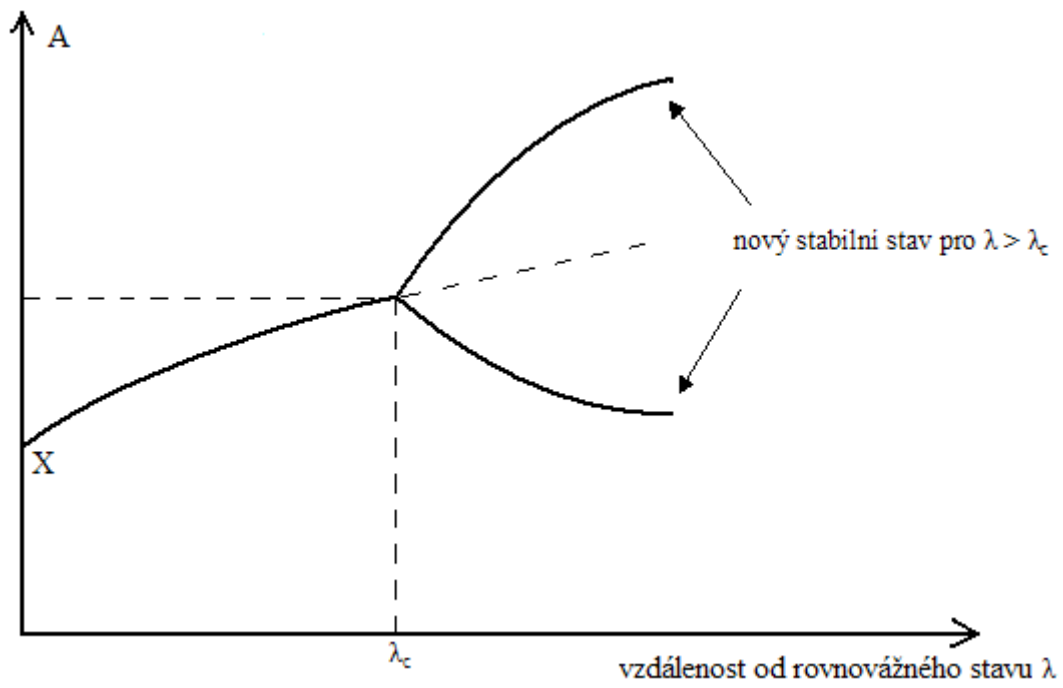
Obr.2 Provozní charakteristiky polarizovaného bistabilního relé

3 Bifurkace

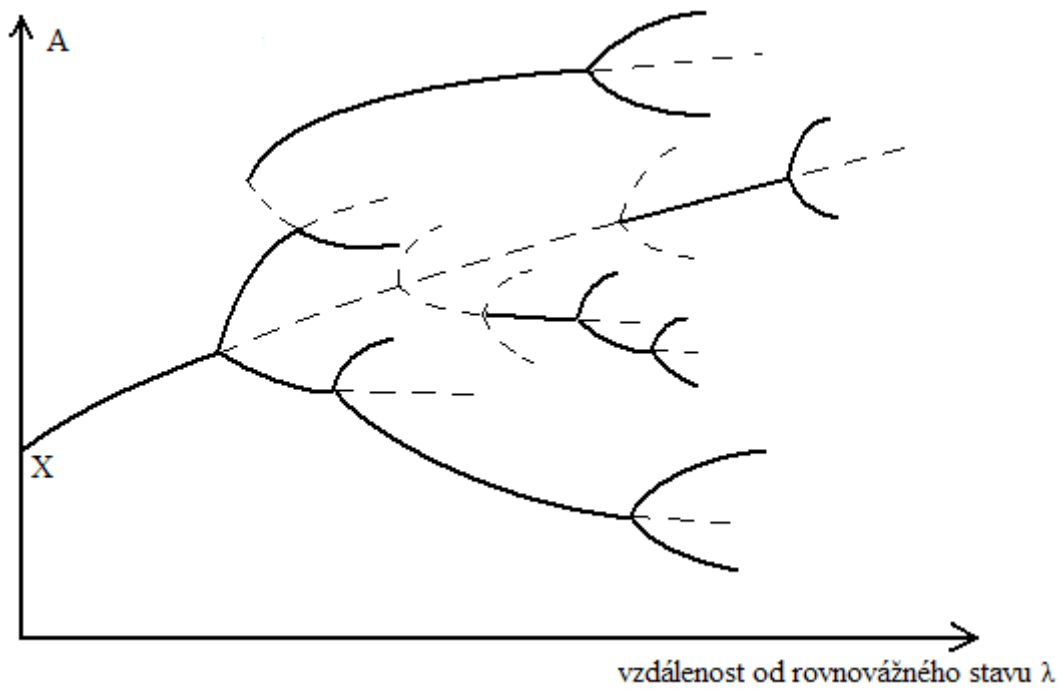
3.1 Jev bifurkace

Slovo bifurkace znamená „rozvětvení“ – systém si může ve stavu nestability vybrat ze dvou možných stavů. Pokud se systém nachází daleko od rovnovážného stavu, počet možných stabilních stavů, které může zaujmout, prudce roste. Systém má nesmírný počet možností vývoje a to zcela znemožňuje předpovědět, jak se bude v příštím okamžiku vyvíjet. To, že si systém zvolil při svém vývoji určité stavy, představuje jeho vývoj v čase. Pro znázornění použijeme tzv. bifurkační diagram – obr. 3. Je to grafické znázornění toho, za jakých podmínek systém přechází do jiného stavu. Bod X označuje rovnovážný stav. Pokud se od tohoto stavu budeme vzdalovat (řídící parametr λ se bude zvětšovat), tak dosáhneme tzv. kritického bodu označeného jako λ_c . V tomto bodě se systém stává nestabilním a má na výběr dvě možné vývojové cesty (dva možné stabilní stavy). To, pro kterou z nich se rozhodne, závisí na jakkoliv malé změně λ . Pokud se systém vzdálí daleko od rovnovážného stavu, počet možných stabilních stavů prudce roste – obr.4.

Jako příklad můžeme uvést chemické reakce. Chemikálie se slučují, a tak vzniká nová látka. Produkt však nevzniká najednou, ale nějakou dobu to trvá (závislost na čase). Obr.3 si můžeme představit jako chování zvláštního druhu chemické reakce. Na svislou osu grafu vynášíme koncentrace nějaké látky označené písmenem A, která se účastní reakce. Na vodorovnou osu je vynesena „vzdálenost“ systému od rovnovážného stavu, která je označena písmenem λ . Pokud je λ rovno nule, tak je systém ve stavu termodynamické rovnováhy. V tomto stavu nemá systém žádnou tendenci ke změnám – reakce neprobíhá. Koncentraci látky A v tomto stavu nazýváme rovnovážnou koncentrací X. Pokud budeme systém vzdalovat od rovnovážného stavu, dosáhneme kritického bodu, ve kterém má reakce možnost výběru ze dvou nových stabilních stavů – koncentrace látky A se v obou liší. Při dalším vzdalování od rovnovážného stavu rozdíl mezi stavy dále roste. Kritický bod tak dává smysl historii vývoje reakce [3].



Obr.3 Bifurkační diagram – jednoduchá bifurkace



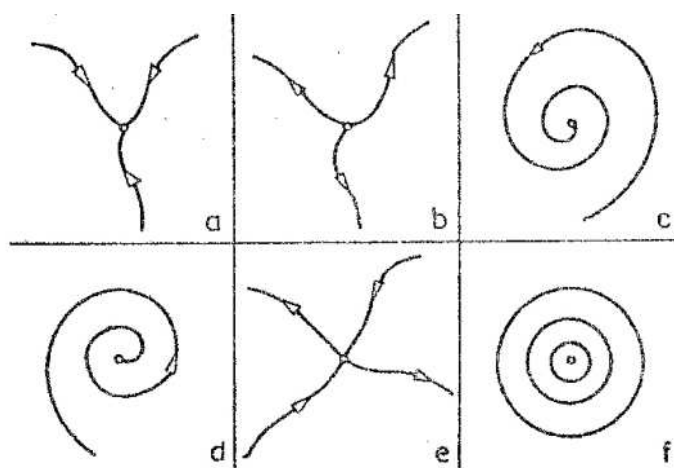
Obr.4 Úplný bifurkační diagram

4 Teoretický základ studia bistabilních dynamických systémů

4.1 Dvousložkový systém a jeho singulární body

Systém charakterizovaný dvěma proměnnými (nezávislými parametry) se nazývá dvousložkový systém. Jako příklady můžeme uvést systémy skládající se z kladně a záporně nabitých částic (fyzika), syntézu dvou látek z jedné výstupní suroviny (chemie), systém dvou autokatalytických reakcí (biologie) atd.

Po vyřešení příslušných evolučních rovnic získáme kořeny p_1 a p_2 . Při řešení evolučních rovnic pro stavové proměnné se uvažují jejich malé poruchy (tj. jejich odchylky od hodnot v jejich stacionárním stavu), což vede k podmínkám pro veličiny p_1 a p_2 , které se obdrží jako kořeny kvadratické rovnice (blíže viz např. [1, 4]). Pokud jsou tyto kořeny reálné a oba dva záporné, poruchy se utlumí a systém se vrátí do původního stacionárního stavu. Pokud jsou oba dva kořeny reálné kladné, poruchy začnou exponenciálně narůstat a původní stacionární stav se destabilizuje. Tyto dva případy se označují jako *stabilní*, respektive *nestabilní* uzel, protože ve fázové rovině jim odpovídá bod, do kterého všechny trajektorie vtékají, resp. z něj vytékají. Příslušný stabilní bod ve fázovém prostoru se nazývá *bodový atraktor*. Obr.5 znázorňuje jednotlivé druhy pohybu ve fázové rovině.



Obr.5 Šest druhů pohybu ve fázové rovině v dvousložkových systémech :
a – stabilní uzel, *b* – nestabilní uzel, *c* – stabilní ohnisko, *d* – nestabilní ohnisko, *e* – nestabilní sedlo, *f* – stabilní střed [1]

Pokud jsou kořeny rovnice p_1 a p_2 komplexní, pak v tomto případě začne malá porucha oscilovat s úhlovou frekvencí ω , přičemž amplituda oscilací se buď s časem zmenšuje nebo zvětšuje. Tyto stavy se nazývají *stabilní*, respektive *nestabilní ohnisko*.

Pokud jsou kořeny rovnice p_1 a p_2 reálné a přitom hodnota jednoho z nich je kladná a druhá záporná, hovoříme a *nestabilním sedle*.

Poslední případ je charakterizovaný tím, že oba dva kořeny rovnice p_1 a p_2 jsou ryze imaginární. Tomuto stavu odpovídají netlumené oscilace a ve fázové rovině soustředné kružnice. Probíhá *kmitání okolo stabilního středu*.

4.2 Stacionární stavy bistabilního dynamického systému

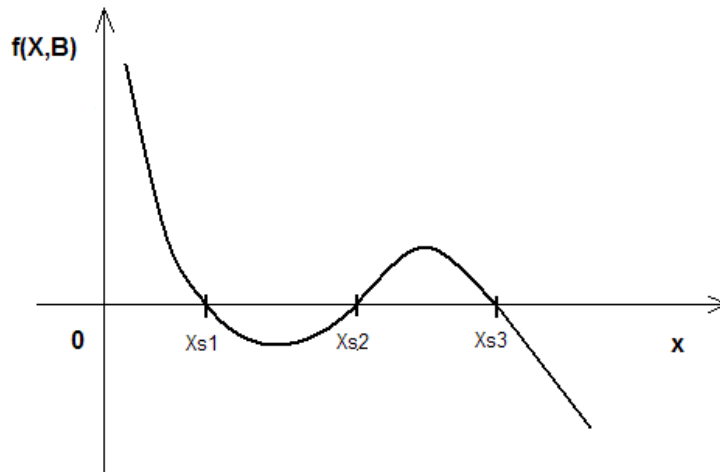
V následujícím se budeme zabývat systémy, jejichž chování lze popsat soustavou nelineárních diferenciálních rovnic prvního řádu. Pro chování jednotlivých stavových proměnných X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) platí :

$$dX_i / dt = f_i (X_k , B) \quad i, k = 1, 2, \dots, n$$

kde B představuje soubor parametrů systému.

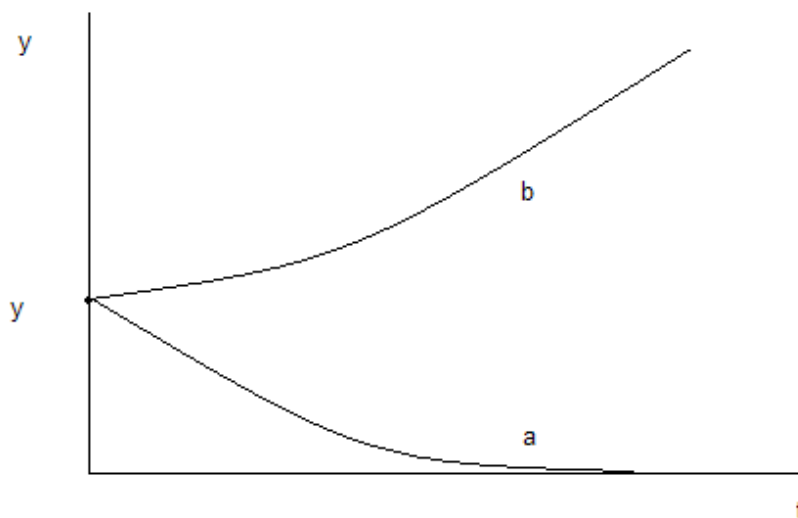
Stacionární body řešení: Jde o takové body fázového prostoru, ze kterých se systém samovolně nevyvíjí. Jsou definovány vztahem $f_i (X_k , B) = 0$, tj. derivace stavových proměnných jsou nulové. Nachází-li se systém ve stacionárním bodu, zůstane v tomto bodě fázového prostoru stále.

Aby systém vykazoval bistabilitu, musí být řešením jeho dynamické rovnice tři různé kořeny, z nichž v jednom je systém nestabilní a ve dvou stabilní. Označíme je jako X_{S1} , X_{S2} a X_{S3} . Možné grafické řešení této soustavy rovnic pro jednu stavovou proměnnou X je uvedeno na obr.6.



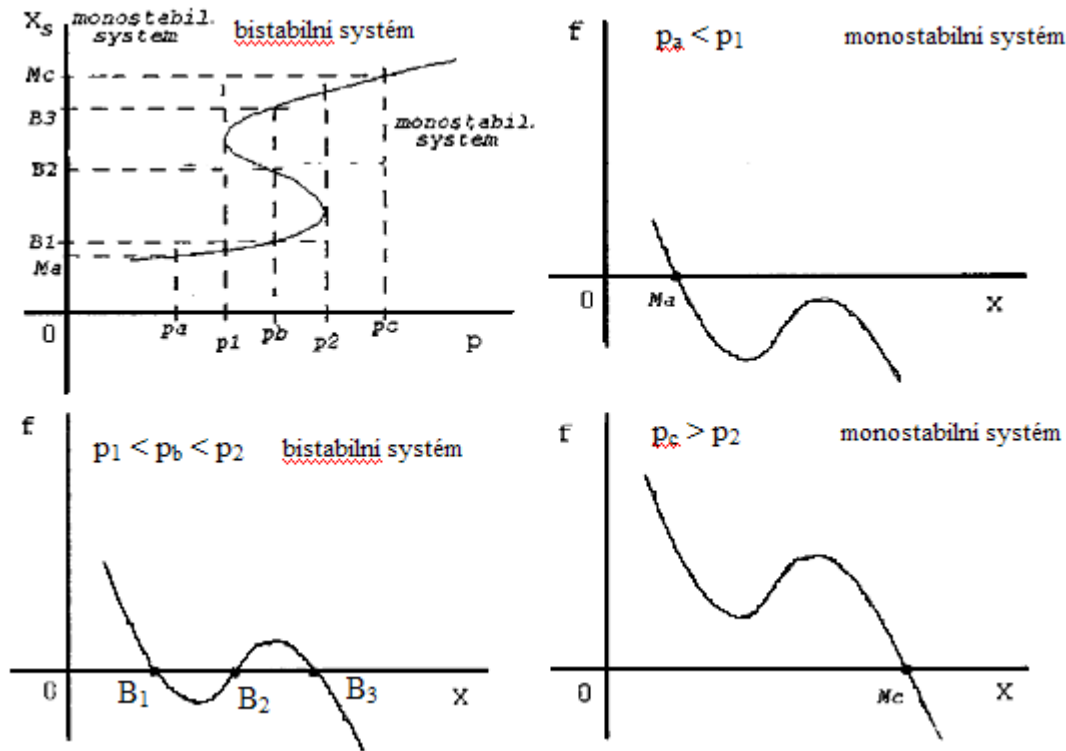
Obr.6 Grafické řešení soustavy rovnic pro jednu stavovou proměnnou X

V následujícím budeme zkoumat, zda je daný systém stabilní či nikoliv. Použijeme *metodu malých poruch*. Ta spočívá v tom, že necháme vnějšími vlivy změnit stacionární hodnoty o malou odchylku a zjišťujeme, jak na tyto změny reaguje zkoumaný systém. Pokud je systém schopný tuto poruchu utlumit a vrátit se zpět do původního stacionárního stavu, je tento stacionární stav stabilní (obr.7, větev a). V opačném případě, tj. v případě, že se malá porucha neodstraní, ale naopak se začne zvětšovat a způsobí destabilizaci příslušného stacionárního stavu, můžeme říct, že daný stacionární stav je nestabilní (obr.7, větev b).



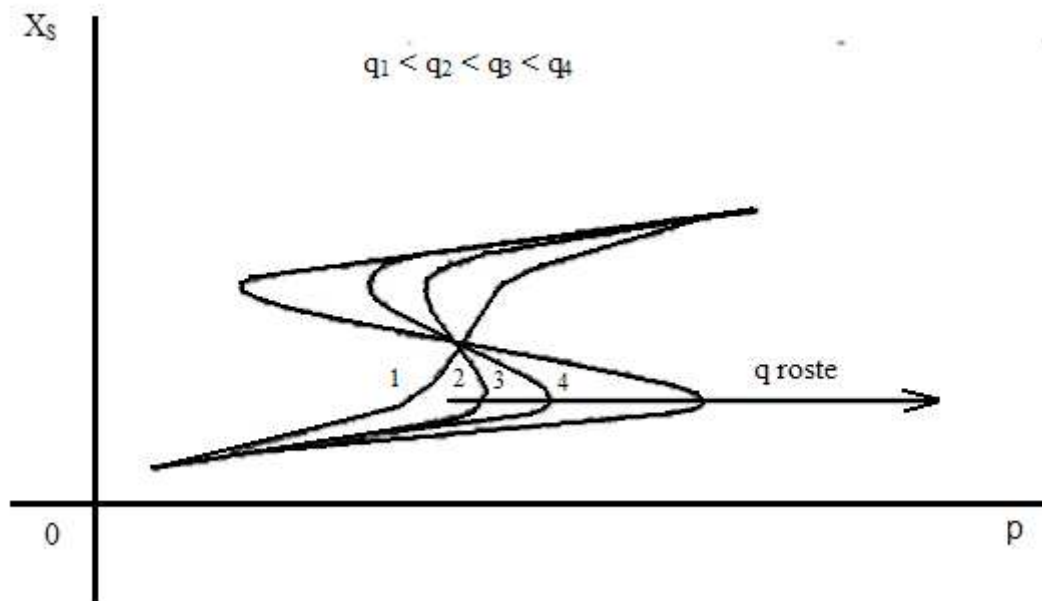
Obr.7 Časový vývoj poruchy

Bez složitých odvození lze zjistit, že v řešeních X_{S1} a X_{S3} je $(df/dx) < 0$ a tedy při malých změnách X se bude systém vracet zpět do původního stacionárního stavu, je stabilní. V X_{S2} je $(df/dx) > 0$, a proto je toto řešení nestabilní vůči odchylkám X . Tvar funkce $f(X, B)$ závisí na parametrech B . Jak naznačují následující obrázky, může bistabilní chování existovat jen v určitých intervalech těchto parametrů – obr.8



Obr.8 Chování bistabilního a monostabilního systému

V uvedeném grafu je vidět, že vůči pomalé změně velikosti parametru p pak v tomto případě systém vykazuje hysterezi. Je-li systém závislý ještě na parametru q , může tento také ovlivňovat rozmezí, ve kterém je systém bistabilní, např. způsobem zobrazeným na obrázku obr.9.

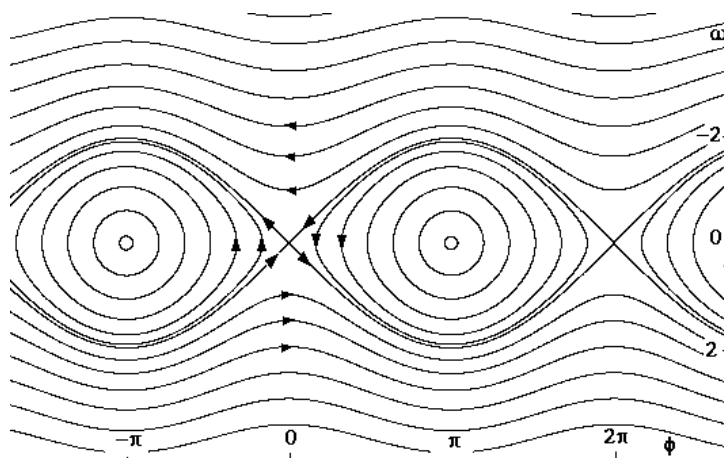


Obr.9 Rozmezí, ve kterém je systém bistabilní

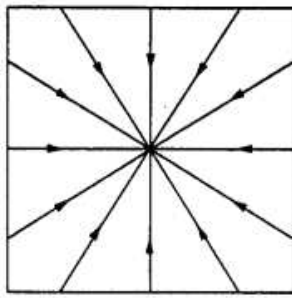
4.3 Fázový portrét

Soustava parametrických křivek pro uvažovanou množinu počátečních podmínek na obr.10 tvoří tzv.fázový portrét systému. Každý bod ve fázovém prostoru náleží právě jedné trajektorii systému. Z toho vyplývá, že trajektorie se nemohou nikde protínat, neboť v průsečíku by nebylo možné určit jednoznačně další vývoj systému a systém by již nebyl deterministický.

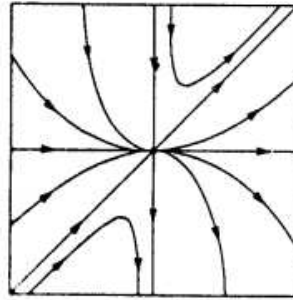
Na obr.11 je několik příkladů fázových portrétů různých systémů se dvěma stavovými proměnnými (fázovým prostorem je tedy rovina).



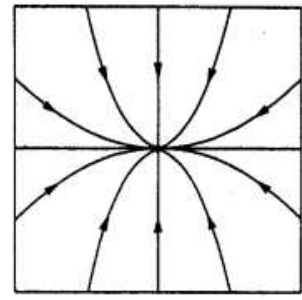
Obr.10 Soustava trajektorií ve fázovém prostoru pro různé počáteční podmínky



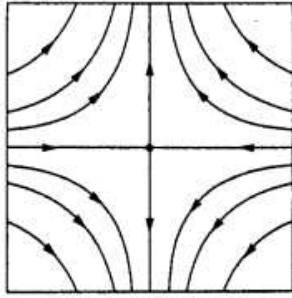
a) $\dot{x}_1 = -x_1, \dot{x}_2 = -x_2$



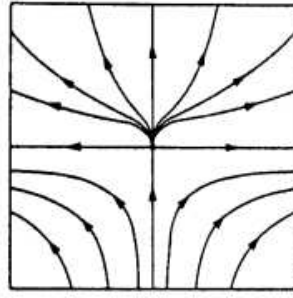
b) $\dot{x}_1 = x_1^2, \dot{x}_2 = x_2(2x_1 - x_2)$



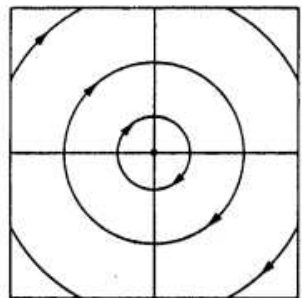
c) $\dot{x}_1 = -x_1, \dot{x}_2 = -2x_2$



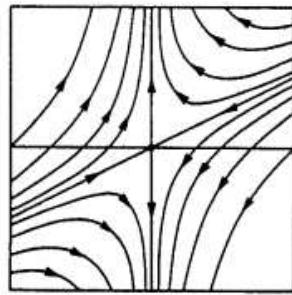
d) $\dot{x}_1 = -x_1, \dot{x}_2 = x_2$



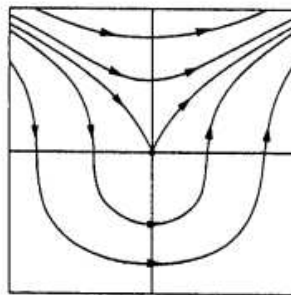
e) $\dot{x}_1 = x_1, \dot{x}_2 = x_2^2$



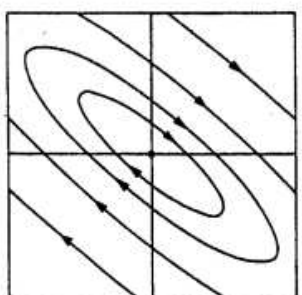
f) $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = -x_1$



g) $\dot{x}_1 = -x_1, \dot{x}_2 = -x_1 + x_2$



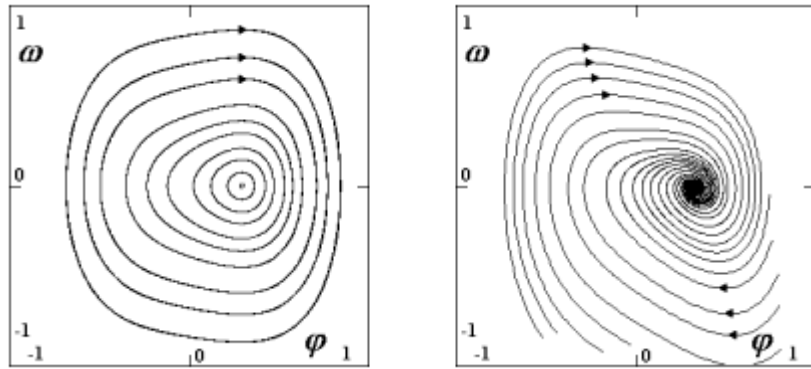
h) $\dot{x}_1 = x_2^2, \dot{x}_2 = x_1$



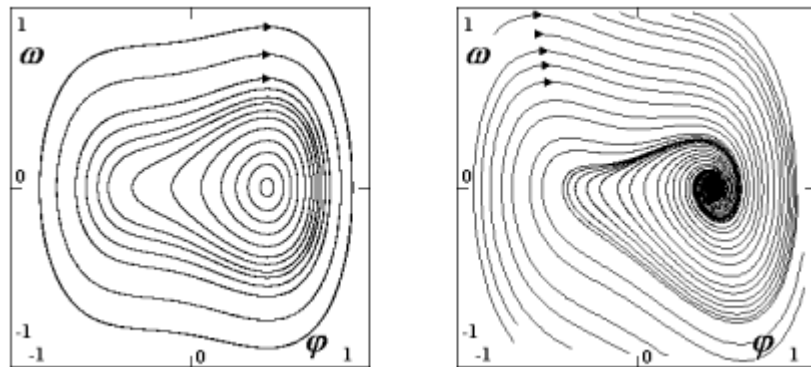
i) $\dot{x}_1 = 3x_1 + 4x_2,$
 $\dot{x}_2 = -3x_1 - 3x_2.$

Obr.11 Příklady fázových portrétů systémů se dvěma stavovými proměnnými [5]

Pro ilustraci dynamiky chování systému v okolí kritické vnější (budící) síly zobrazíme fázové portréty systému v rovině $\varphi - \omega$. Fázové portréty budou zobrazeny vždy ve dvojicích. Každá dvojice má shodnou velikost síly, ale jeden portrét ze dvojice bude pro systém netlumený a druhý pro systém tlumený – obr.12.



Obr.12 Dvojice fázových portrétů pro netlumený a tlumený systém



Obr.13 Dvojice postkritických fázových portrétů systému před vznikem druhého stabilního řešení

5 Hystereze

5.1 Jev hystereze

Jev hystereze spočívá v tom, že fyzikální veličina charakterizující stav systému (tělesa) nezávisí jednoznačně na fyzikální veličině charakterizující vnější působení na systém. Projevuje se tím, že stav systému v určitém okamžiku nezávisí jen na hodnotě veličiny vnějšího působení v tomto okamžiku, ale i na její hodnotě v časech předchozích.

V případě deterministického systému, který nemá žádnou hysterezi, můžeme určit, jaký bude stav na výstupu systému. Výstupní stav daný v určitém časovém okamžiku závisí pouze na vstupním stavu daném ve stejném časovém okamžiku.

Nyní uvažujme systém, který má hysterezi. V tomto případě nemůžeme určit výstupní stav systému jako v předchozím případě. Nestačí to, že známe aktuální stav vstupu systému, ale musíme vědět, v jakém stavu se nacházel vstup dřív – tedy musíme znát historii vstupu. Abychom tedy mohli určit výstupní stav systému, musíme znát předchozí stavy vstupu. Systémy s hysterezí tedy vykazují paměť [6].

Mnoho fyzikálních systémů projevuje hysterezi. Když například vložíme kousek železa do magnetického pole, tak dojde k jeho zmagnetování. Magnetizace (**M**) se bude v železe držet i poté, co ho vyjmeme z magnetického pole. Když jednou dojde ke zmagnetování, tak železo zůstane v tomto stavu neurčitou dobu. Aby došlo k odmagnetování, musí se použít magnetického pole (**H**) opačného směru. Tento jev se využívá například jako paměťový prvek v harddisku.

Graf průběhu fyzikálních změn při cyklickém opakování vnějších podmínek se nazývá *hysterezní křivka*, příkladem může být závislost magnetické indukce (**B**) látky, která je jádrem cívky, na intenzitě magnetického pole (**H**) této cívky.

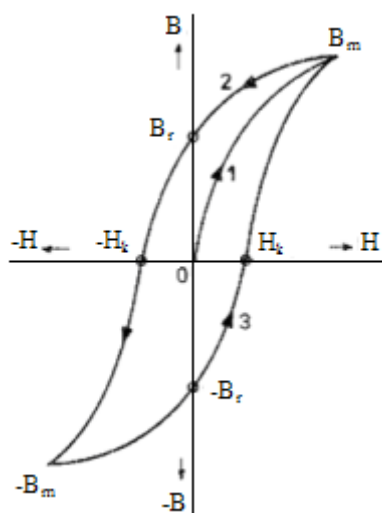
Systémy, které vykazují hysterezi se hojně využívají v praxi. Jako příklad můžeme uvést regulátor teploty, který ovládá chod pece. Pec může být buď ve stavu ZAPNUTO nebo VYPNUTO, nic mezi tím. Regulátor teploty je systém, jehož vstup tvoří teplota a jeho výstup je stav pece (zapnuto, vypnuto). Když požadujeme např. udržovat teplotu 20° C, tak můžeme regulátor teploty nastavit tak, aby pec zapínala při poklesu teploty pod 18° C a vypínala při překročení teploty 22° C. Tento regulátor teploty má hysterezi. Uvažme např., že teplota je 21° C. Díky této informaci nemůžeme předem určit, zda pec bude vypnutá nebo zapnutá – není možné předpovědět, co je momentálně na výstupu regulátoru, známe pouze momentální stav vstupu.

5.2 Hystereze v elektrotechnice

Magnetizační křivka feromagnetik

Hystereze je příčinou ztrát energie vznikající *přemagnetováním železných (obecně feromagnetických) materiálů*. Ztráty se projevují teplem a zjišťujeme je u transformátorových

plechů, železných jader v relátkách a stykačích, u materiálů v magnetofonových hlavách (permaloy), u všech točivých strojů atd. Při střídavé magnetizaci se neustále mění směr magnetického toku souhlasně se změnami směru proudu v cívce. Současně se mění směr a velikost magnetické indukce (**B**) v jádru. Fyzikální výklad magnetizační křivky je následující. Jakmile dojde k prvotnímu zmagnetování, v *materiálu se nadále udržuje zbytkový (remanentní) magnetismus*. Při změně magnetického pole, když klesá proud v cívce, zmenšuje se indukce (**B**) v materiálu společně s proudem, avšak nikoliv stejnou měrou. *Proud klesne na nulu, ale indukce B zcela nezmezí*. Setrvává na určité úrovni, takže materiál neustále vykazuje zbytkový magnetismus. Tento jev zobrazuje hysterezní smyčka na obr.14, která znázorňuje závislost indukce (**B**) na intenzitě (**H**).



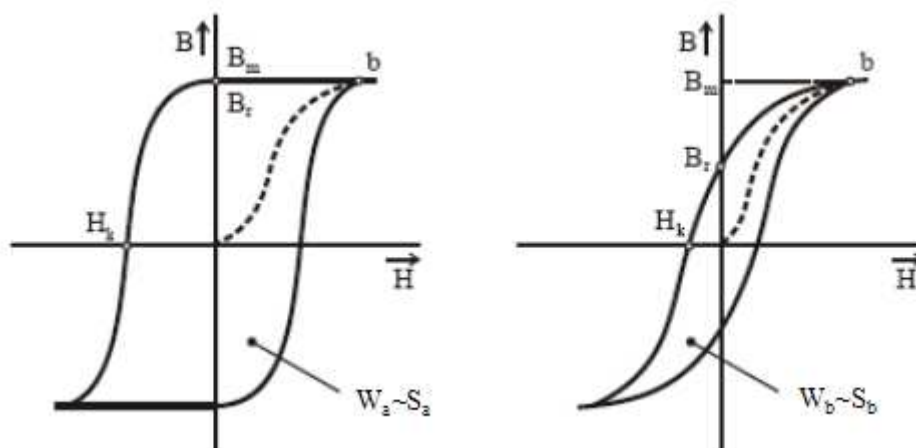
Obr.14 Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu. 1- magnetizační křivka, 2- křivka průběhu indukce (**B**) při změně směru proudu od max. kladné až po zápornou amplitudu, 3- křivka při zpětném toku proudu [7]

Průběh prvního zmagnetování materiálu odpovídá křivce 1, označované jako *magnetizační křivka*, případně „křivka prvotní magnetizace“. S rostoucí intenzitou (**H**) stoupá indukce (**B**) zpočátku rychle, potom pomaleji. Dále se již zvětšováním intenzity podstatně nezvýší, protože dosáhla hranice, kdy je materiál magneticky nasycen (bod B_m). Této hranice se v praxi nevyužívá, protože *magnetická vodivost se s velkou indukcí (sycením) snižuje*.

Tak, jak amplituda střídavého proudu v cívce klesá, zmenšuje se intenzita (**H**) i indukce (**B**) po křivce 2. V bodě B_r (remanentní indukce) již proud neteče, intenzita $H = 0$, ale

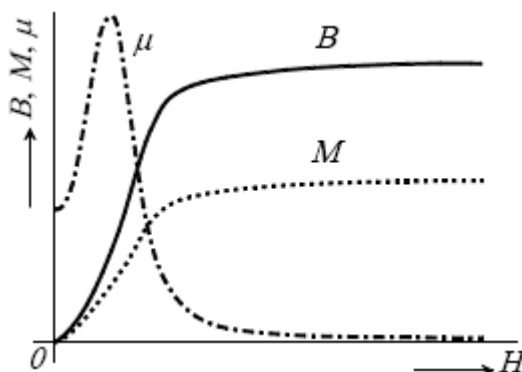
magnetismus materiálu se stále projevuje. Úplného odmagnetování je sice možné dosáhnout, ale až v bodě $-H_k$, který představuje velikost koercitivní síly. (Koercitivní síla je intenzita pole potřebná ke snížení remanentní indukce B_r na nulovou hodnotu).

Jenže to již znovu teče proud, ale opačným směrem (proto znaménko -). Křivka pokračuje až do bodu $-B_m$, kde proud dosahuje maximální záporné hodnoty. Podle křivky 3 klesá proud zpátky k nule, aby dále nabýval kladných hodnot. V bodě $-B_r$ je znovu $H = 0$, nicméně remanentní magnetismus – opačné orientace než v bodě B_r – setrvává. Hysterezní smyčka na obr.14 je poměrně úzká, takže koercitivní síla je malá a vznikají malé ztráty. Čím širší je smyčka, tím větší jsou hysterézní ztráty – obr.15. Průběh hysterézní smyčky názorně dokazuje, že i kdyby došlo k přerušení proudu v okamžiku jeho nulové hodnoty, zbytkový magnetismus v materiálu vždy existuje a musí se znovu při změně směru proudu překonávat.



Obr.15 Velké a malé hysterézní ztráty

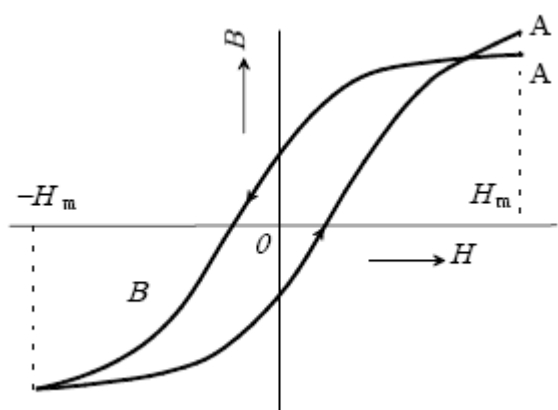
Křivka prvotní magnetizace - je závislost $B(H)$, resp. $M(H)$ resp. $\mu(H)$ získaná postupnou magnetizací odmagnetovaného materiálu (obr.16).



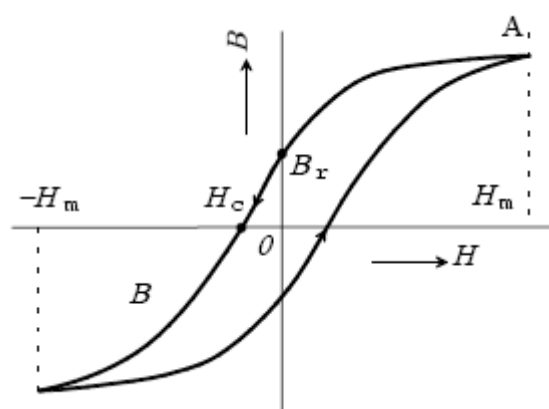
Obr.16 Křivka prvotní magnetizace [8]

Hysterézní křivka - získáme pozvolným magnetováním materiálu polem, jež nejprve z hodnoty H_m klesá na hodnotu $-H_m$ a poté zase zpět (obr.17).

Hysterézní smyčka - získáme několikanásobným opakováním předchozího cyklu magnetování (obr.18).



Obr.17 Hysterézní křivka



Obr.18 Hysterézní smyčka

6 Klopné obvody

6.1 Charakteristika a funkce klopných obvodů

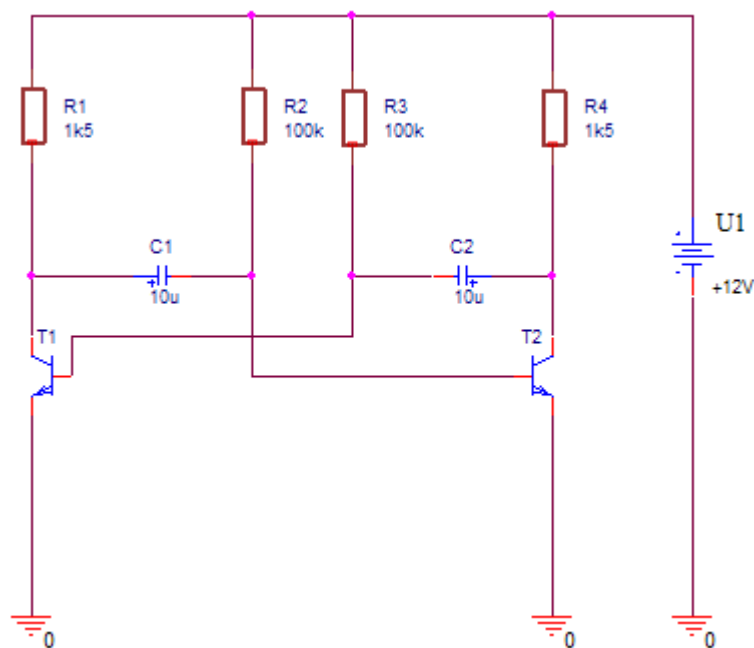
Klopné obvody jsou obvody, které se vyznačují tím, že ve většině případů mají dva ustálené stavy výstupů (sepnuto a rozepnuto). Obvykle obsahují dva spínací prvky zapojené tak, aby byl vždy jeden z nich sepnutý. Klopné obvody jsou schopné ze stejnosměrného napětí vyrobit impulsy různé délky a frekvence.

6.2 Astabilní klopný obvod (multivibrátor)

Tento obvod nemá žádnou klidovou polohu, tzn. neustále kmitá. Je to generátor obdélníkových průběhů (obr.19).

Po připojení napájecího napětí se jeden z tranzistorů otevře a druhý zahradí. Pro vysvětlení obvodu budeme za otevřený tranzistor považovat např. T_1 .

Když bude tranzistor T_1 otevřen, tak napětí U_{CE1} bude téměř nulové a tím pádem se kladný pól kondenzátoru C_1 připojí k zemi a začne se přes rezistor R_2 vybíjet. Na bázi tranzistoru T_2 se díky tomu objeví záporný náboj, který udržuje tranzistor T_2 v zahrazeném stavu. Kondenzátor C_1 se bude vybíjet k nule a poté se začne nabíjet na kladnou hodnotu. Jakmile dosáhne prahového napětí tranzistoru T_2 , tak se tranzistor otevře, napětí U_{CE2} klesne téměř na nulu, kondenzátor C_2 se připojí kladným pólem k zemi a díky zápornému náboji uzavře přes rezistor R_3 tranzistor T_1 . Tímto způsobem se obvod (multivibrátor) překlápí do druhého stavu, ve kterém je tranzistor T_1 zavřený a T_2 otevřený. Doba, po kterou je multivibrátor v jednom či druhém stavu závisí na velikosti C_1 a R_2 a C_2 a R_3 .



Obr.19 Astabilní klopný obvod (multivibrátor)

6.3 Astabilní klopný obvod (multivibrátor) s časovačem 555

Astabilní multivibrátory jsou impulsní generátory, impulsy vytváří nepřetržitě. Astabilní znamená, že žádný z obou výstupních stavů není stabilní a na výstupu se bez vnějšího ovlivňování oba stavy střídají. Astabilní multivibrátory jsou používány jako impulsní generátory, tónové generátory, blikáče apod.

Funkce obvodu : Astabilní klopný obvod začne samostatně pracovat ihned po připojení napájecího napětí. Zpočátku je časovací kondenzátor C_1 vybitý, a proto je spouštěcí vstup

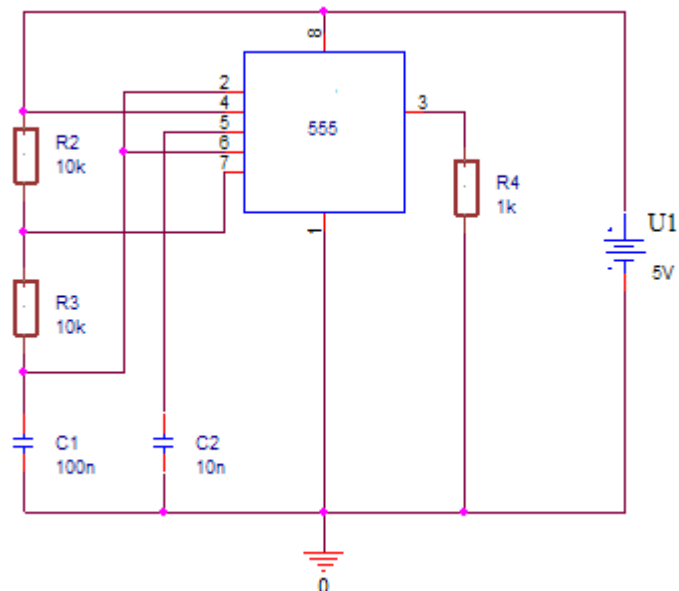
(vývod 2) na úrovni L. Klopný obvod R-S s úrovní L na výstupu nezpůsobí otevření vybíjecího tranzistoru, proto může začít nabíjení kondenzátoru C_1 přes odpory R_2 a R_3 . Jakmile napětí na kondenzátoru dosáhne hodnoty $2/3$ napájecího napětí, tak se výstup R-S klopného obvodu změní z úrovně L na H. Tím se otevře vybíjecí tranzistor a uzemní se vývod 7, přes který se vybíjí kondenzátor C_1 . Jakmile se kondenzátor vybijí na hodnotu $1/3$ napájecího napětí, klopný obvod R-S se překllopí z úrovně H na L, vybíjecí tranzistor se zavře a přes odpory R_2 a R_3 se nabíjí kondenzátor C_1 . Celý cyklus se opakuje podle výše popsaného postupu. Na obr. 20 je uvedeno schéma zapojení astabilního klopného obvodu s časovačem 555 [9].

V soulase s uvedeným zapojením kmitočet f přibližně vypočítáme podle vztahu :

$$f = 1,4 / (R_1 + 2R_2)C_1$$

Doba nabíjení kondenzátoru : $t_{nab} = 0,7 (R_1 + R_2)C_1$.

Doba vybíjení kondenzátoru : $t_{vyb} = 0,7R_2C_1$.

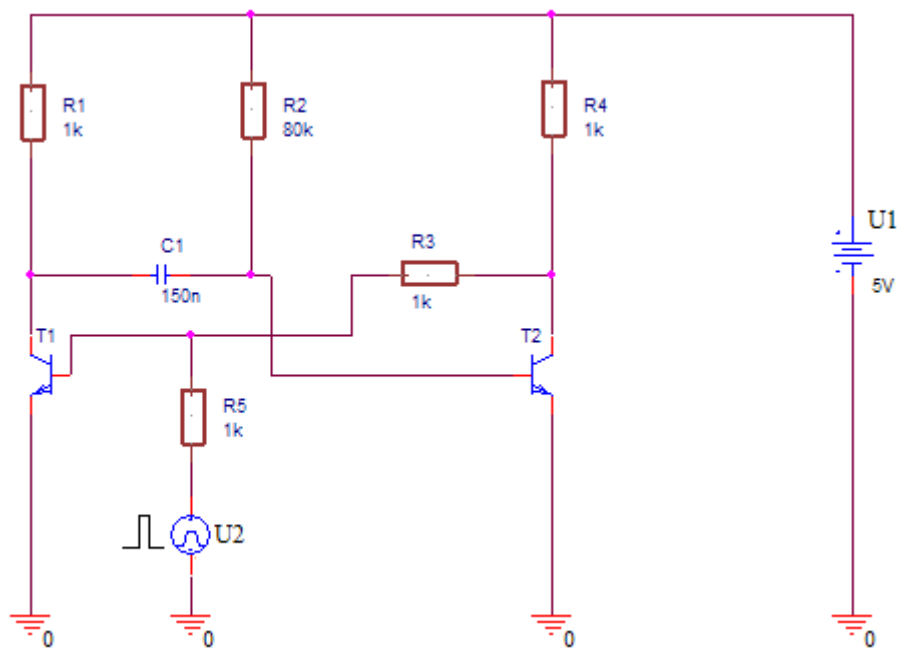


Obr.20 Astabilní klopný obvod s časovačem 555

6.4 Monostabilní klopný obvod

Monostabilní klopný obvod má jeden stabilní stav, ve kterém může setrvat libovolně dlouho. Z tohoto stavu je ho možné vychýlit spouštěcím impulsem do jiného (kvazistabilního) stavu, v němž setrvá po určitou dobu, a poté se vrátí zpět do původního stavu.

V klidové poloze bude tranzistor T_1 zahrazen a tranzistor T_2 otevřen. V tomto stavu se bude kondenzátor C_1 nabíjet na napětí s naznačenou polaritou. Pokud přivedeme kladný impuls do báze zahrazeného tranzistoru T_1 nebo záporný impuls do báze otevřeného tranzistoru T_2 , obvod se překlopí a kondenzátor C_1 se bude přes odpor R_2 a otevřený T_1 vybíjet. Bude se vybíjet k nule a poté na opačnou polaritu než je naznačeno. V okamžiku, kdy napětí na kondenzátoru dosáhne prahového napětí tranzistoru T_2 , tranzistor se otevře a jeho kolektorové napětí klesne na nulu. Tato záporná změna se přenesse do báze tranzistoru T_1 , ten se zahradí a obvod se dostane do výchozí klidové polohy. V ní setrvá do dalšího spouštěcího impulsu. Na obr. 21 je uvedeno schéma zapojení monostabilního klopného obvodu [10].



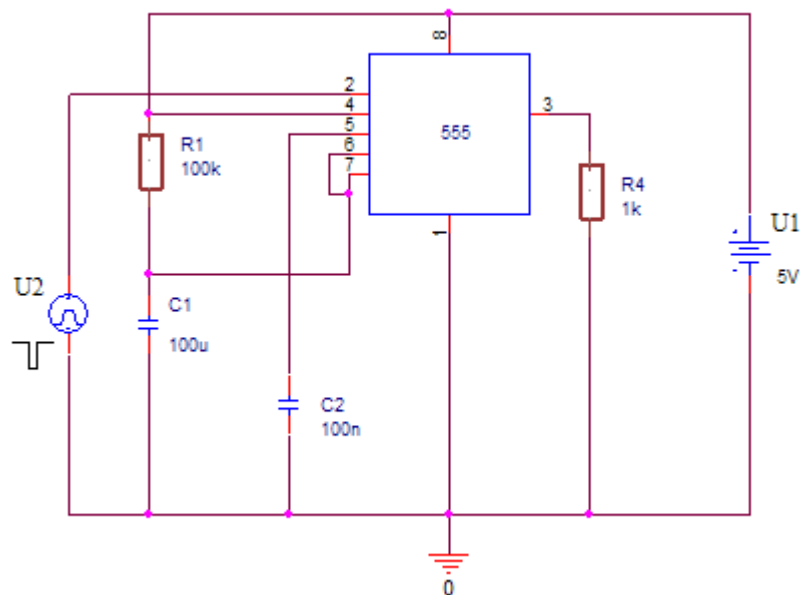
Obr.21 Monostabilní klopný obvod

6.5 Monostabilní klopný obvod s časovačem 555

Monostabilní multivibrátory vytvářejí po spuštění spouštěcím impulsem výstupní impuls s definovanou šířkou. Spouštěcí impuls na vstupu je vždy kratší než výstupní impuls a monostabilní multivibrátory jsou proto využívány pro prodloužení nebo pro obnovení impulsů. Délka impulsu je dána obvodovými prvky R_1 a C_1 . Monostabilní multivibrátor mění po jisté době stav svého výstupu, a proto je také nazýván časovač. Využívá se jako přesný časový spínač.

Hlavním vstupem časovače je spouštěcí vstup (vývod 2), druhý vstup (vývod 6) je připojen mezi R_1C_1 . Na hlavním výstupu (vývod 3) je odebírán výstupní impuls. Druhý výstup s pomocným tranzistorem (vývod 7) je připojen mezi R_1C_1 a tranzistor slouží k vybíjení kondenzátoru. Nulovací vstup (vývod 4) je spojen s napájecím napětím a pomocný vstup řídicího napětí (vývod 5) je buď volný nebo je zablokován kondenzátorem C_2 proti zemi. Na výstupu zesilovače (vývod 3) je v klidovém stavu úroveň L. Vývod číslo 6 patří neinvertujícímu vstupu vypínacího komparátoru, na kterém se očekává prahové napětí, které má způsobit pozdější vrácení výstupu 3 na původní napěťovou úroveň.

Funkce obvodu: Je-li vybíjecí tranzistor otevřený, pak na vývodu 7 je nulové napětí. Tranzistor se otevře díky tomu, že výstup R-S klopného obvodu bude na úrovni H a stejná úroveň je i na bázi tranzistoru. Uzemní-li se na okamžik vývod 2, R-S klopný obvod se překloupí a na jeho výstupu se změní úroveň z H na L. Vybíjecí tranzistor se zavře a vývod 7 přestane zkratovat kladné napětí přicházející na kondenzátor C_1 a ten se začne nabíjet (rychlost je určena velikostmi R_1, C_1) a na výstupu zesilovače se změní napěťová úroveň z L na H. Jakmile napětí na kondenzátoru překročí $2/3$ napájecího napětí, R-S klopný obvod se překloupí a jeho výstup se vrátí na úroveň H. Následně se změní výstupní úroveň napětí zesilovače z H na L. Kladné napětí na bázi vybíjecího tranzistoru otevře obvod kolektor-emitor a přes vývod 7 se kondenzátor rychle vybije. Stav na výstupu R-S klopného obvodu trvá a kondenzátor se nemůže nabíjet. Tím se cyklus vrátil na začátek a celý obvod je připraven k opakování činnosti. Znovu se čeká na záporný impuls na vývodu 2. Na obr. 22 je uvedeno schéma monostabilního klopného obvodu s časovačem 555 [9].

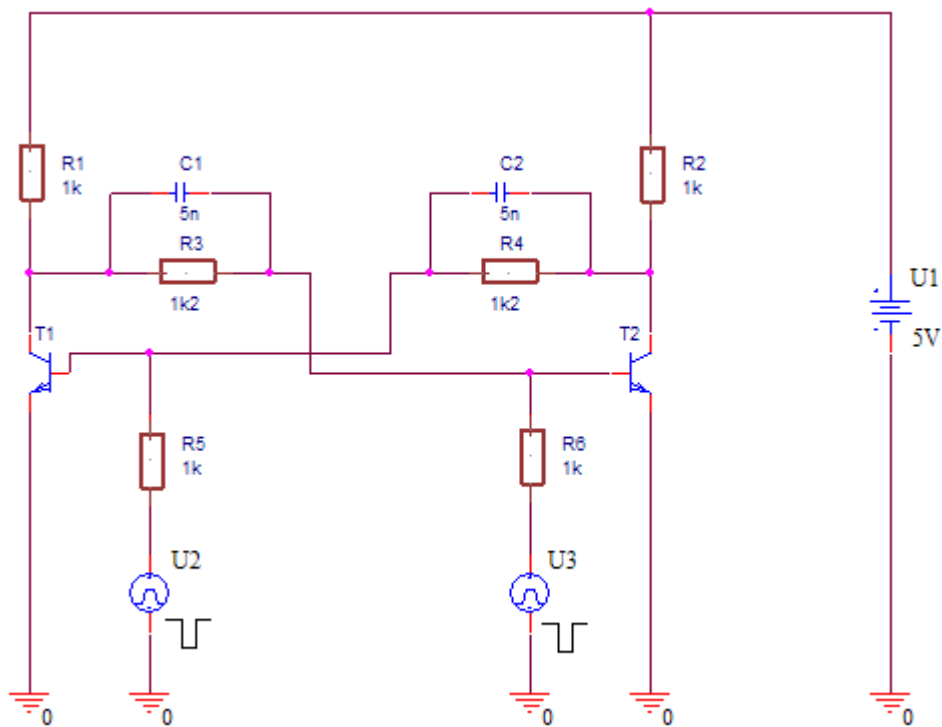


Obr.22 Monostabilní klopný obvod s časovačem 555

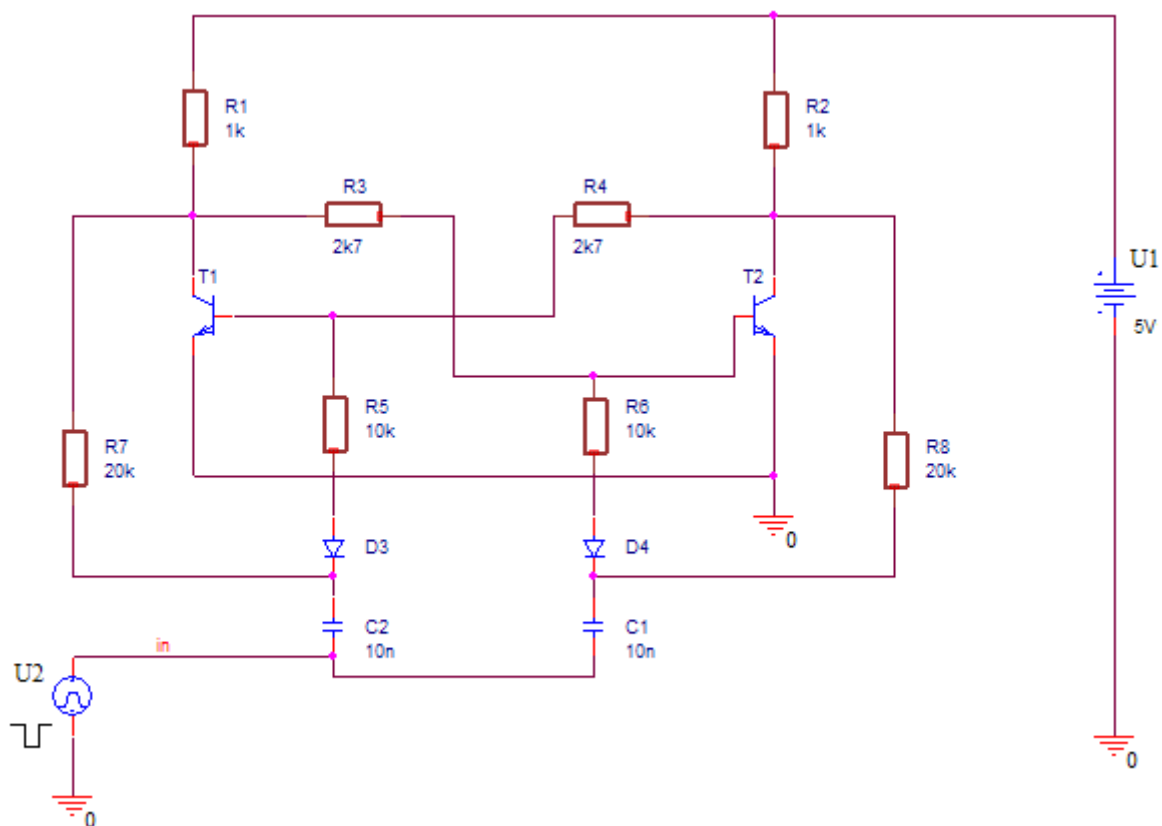
6.6 Bistabilní klopný obvod (BKO)

Bistabilní klopný obvod je takový elektronický obvod, který má dvě klidové polohy a v každé z nich může setrvat libovolně dlouhou dobu. Vnější impulsem lze klopný obvod překlopit z jedné stabilní polohy do druhé (viz obr. 1).

Po připojení ke zdroji napájecího napětí se obvod ustálí tak, že jeden tranzistor je otevřen a druhý zahrazen. Zavedeme-li v libovolném čase do báze otevřeného tranzistoru záporný impuls, začne se tento tranzistor zavírat a tím začne vzrůstat jeho kolektorové napětí. Tento vzrůst se přenesou na bázi druhého tranzistoru, který se díky tomu otevírá. Děj probíhá lavinovitě, až se původně zahrazený tranzistor úplně otevře a původně otevřený tranzistor zcela zahradí. Tím skončí překlápění a obvod setrvává v tomto stabilním stavu až do příchodu dalšího spouštěcího impulsu. Spouštět lze i zavedením kladného impulsu do báze zahrazeného tranzistoru. Spouštěcí impuls je vždy třeba přivést přes omezovací rezistor. Nikdy nesmí být přiloženo plné napětí, aby nedošlo k destrukci tranzistoru. Pro urychlení překlápění se zapojují tzv. urychlovací kondenzátory C_1 a C_2 (viz obr.23) o relativně malé kapacitě. Tyto kondenzátory mají za úkol vázat na sebe náboj otevřeného přechodu B–E v okamžiku přechodu tranzistoru z vodivého do zahrazeného stavu. Bistabilní klopný obvod lze spouštět buď nesouměrně, tzn. že spouštěcí impulsy budeme přivádět střídavě na oba vstupy – obr. 23 nebo souměrně, tzn. že spouštěcí impulsy přivádíme na jeden společný vstup přes hradlo – obr. 24 [10].



Obr.23 Bistabilní klopný obvod – nesouměrné spouštění



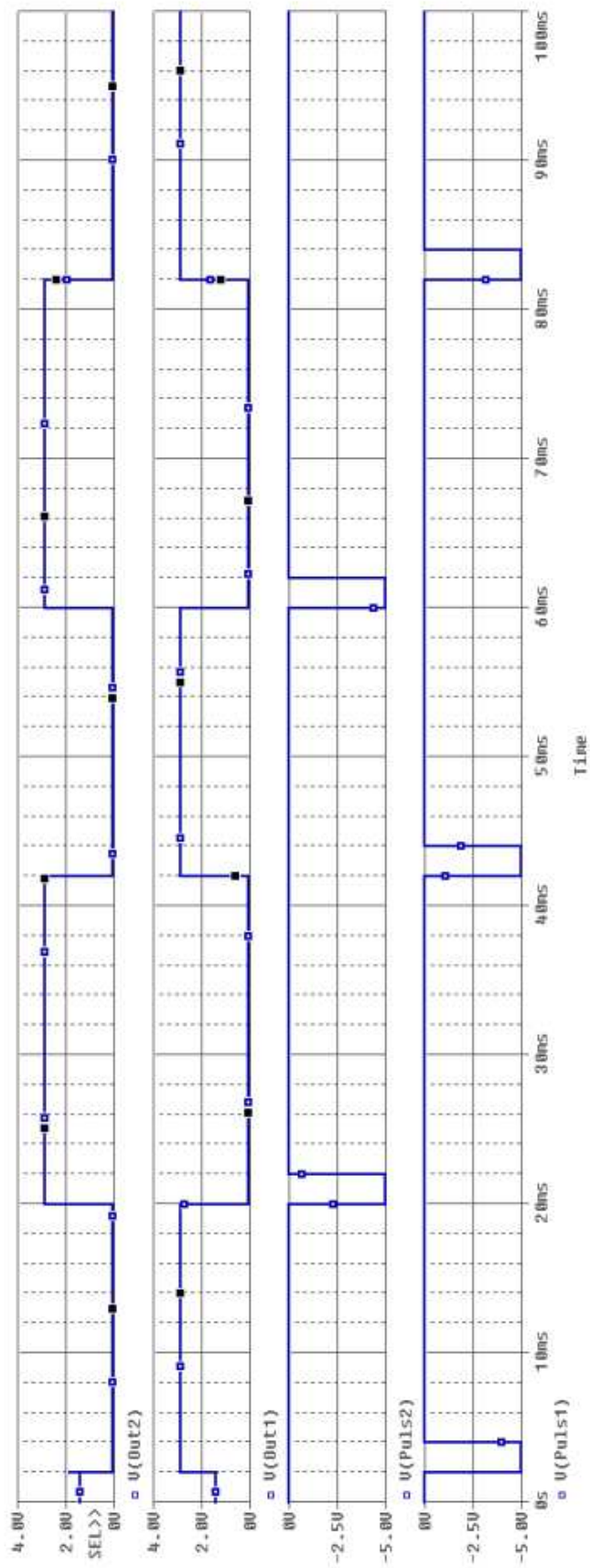
Obr.24 Bistabilní klopný obvod-souměrné spouštění

Simulace obvodu : Při simulování bistabilního klopného obvodu jsem zapojil obvod podle obr. 23, což odpovídá nesouměrnému spouštění obvodu (zdroj spouštěcích impulsů v každém vstupu). Pro simulaci jsem používal program Pspice [11].

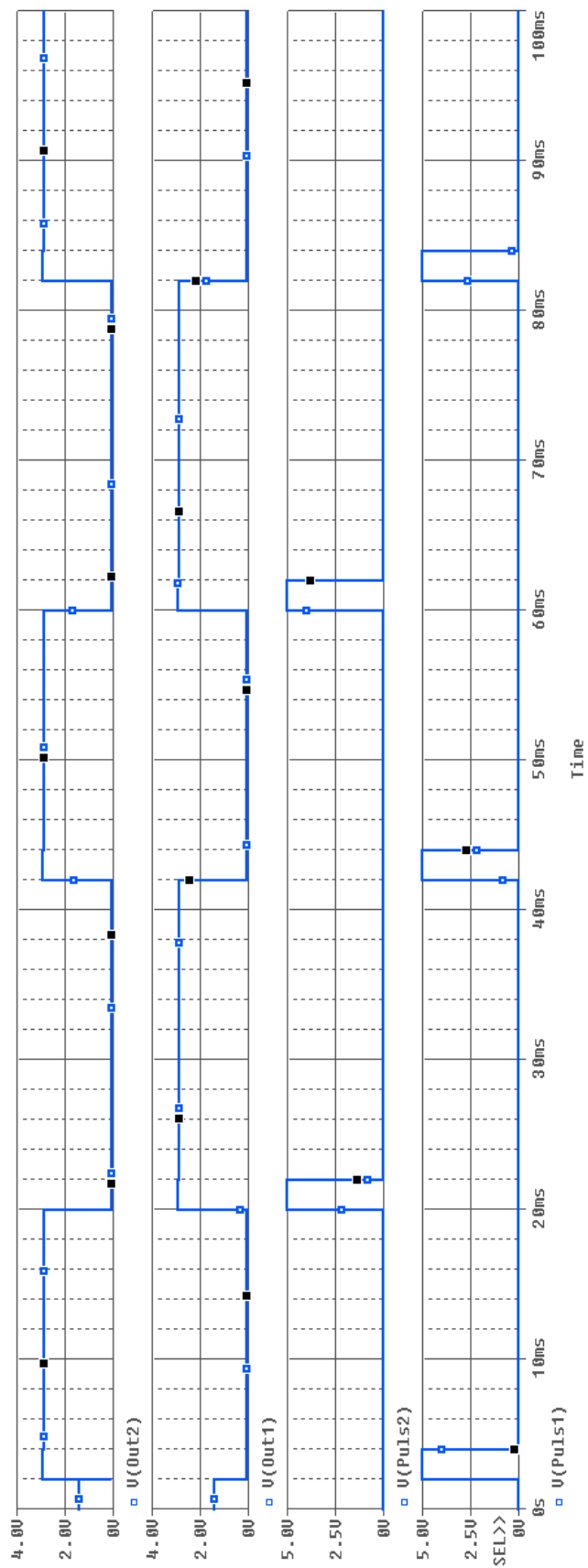
Při simulaci činnosti bistabilního klopného obvodu jsem sledoval časový průběh napětí výstupního signálu v obou uvedených režimech spouštění BKO (spouštění pomocí záporných i kladných vstupních impulsů), a to jednak při zapojení urychlovacích kondenzátorů C1, C2 a jednak bez jejich zapojení.

Na obr. 25 jsou uvedeny časové průběhy signálů na vstupu (záporné impulsy) a výstupu (obdélníkové signály) BKO. Obr. 26 zobrazuje totéž, s tím rozdílem, že vstupní spouštěcí impulsy jsou kladné.

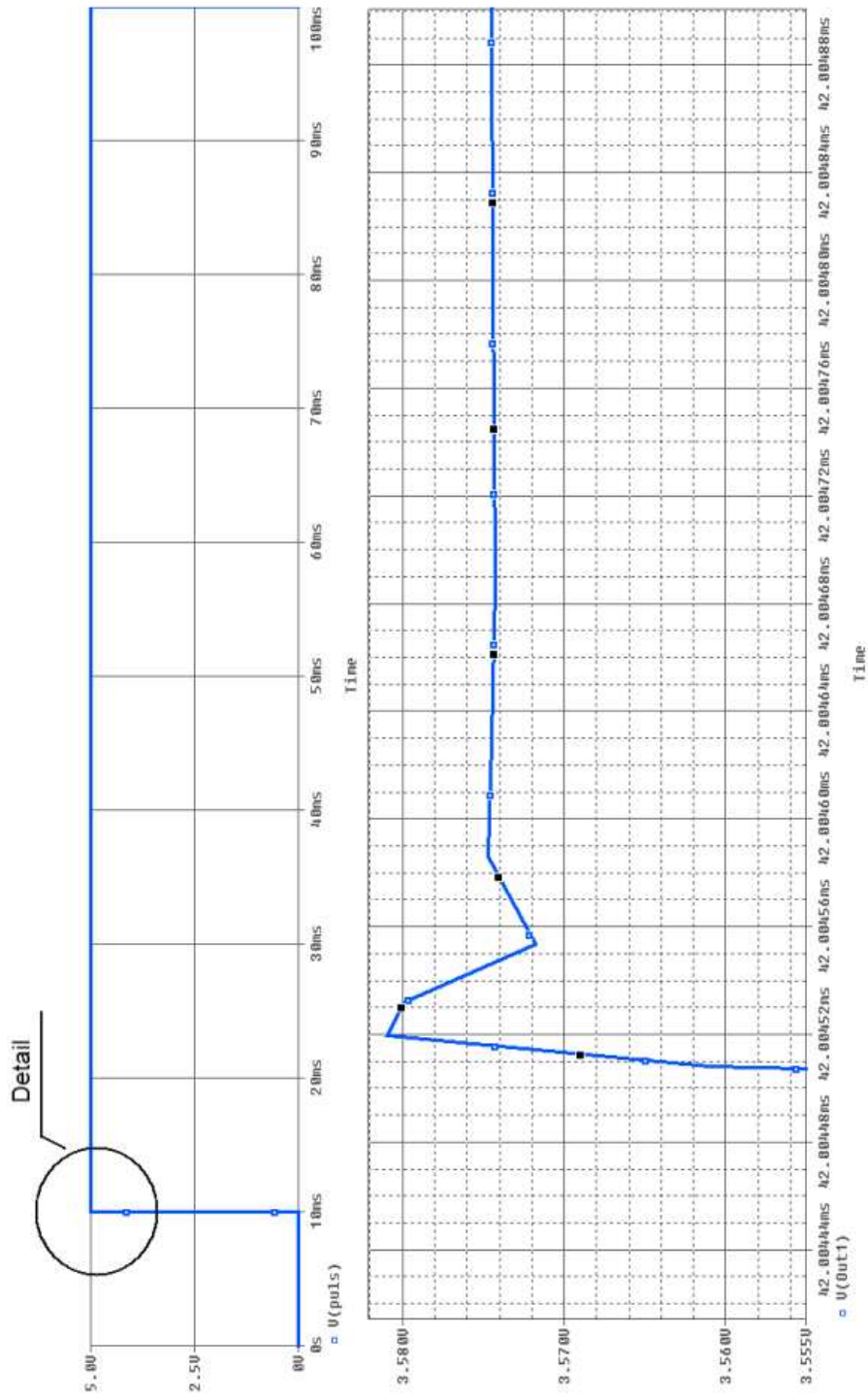
Pro urychlení překlápění tranzistorů se používají tzv. urychlovací kondenzátory. Při simulaci obvodu jsem používal kapacity 1nF, 5nF a 10nF. Odpovídající průběhy jsou zobrazeny na obr. 28 (kondenzátory o kapacitě 1nF), obr. 29 (kondenzátory o kapacitě 5nF) a obr. 30 (kondenzátory o kapacitě 10nF). Obr. 27 odpovídá průběhu výstupního signálu, kde nebyly použity urychlovací kondenzátory.



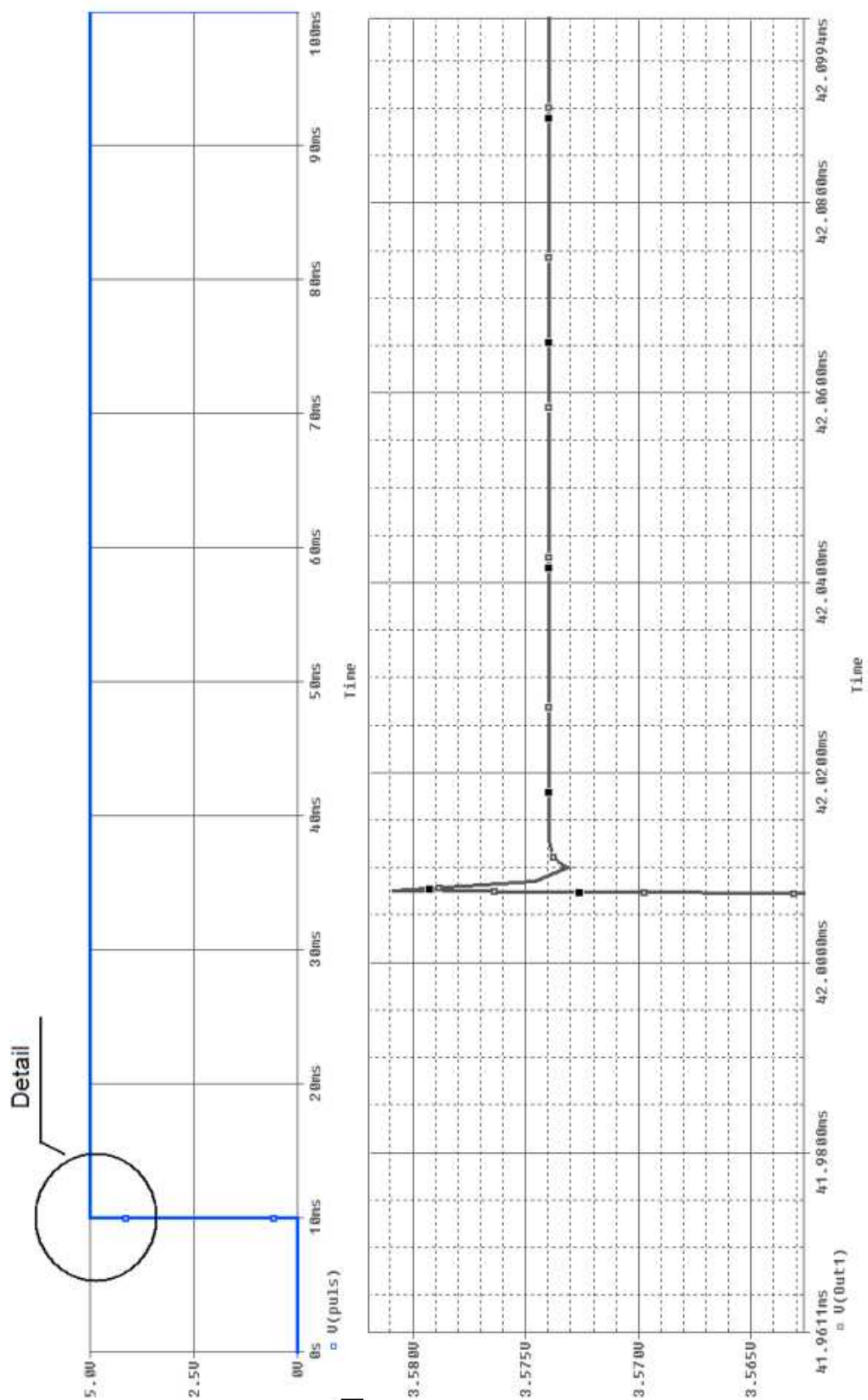
Obr.25 Průběhy na vstupu a výstupu bistabilního klopného obvodu s nesouměrným spouštěním (spouštěcí impulsy záporné)



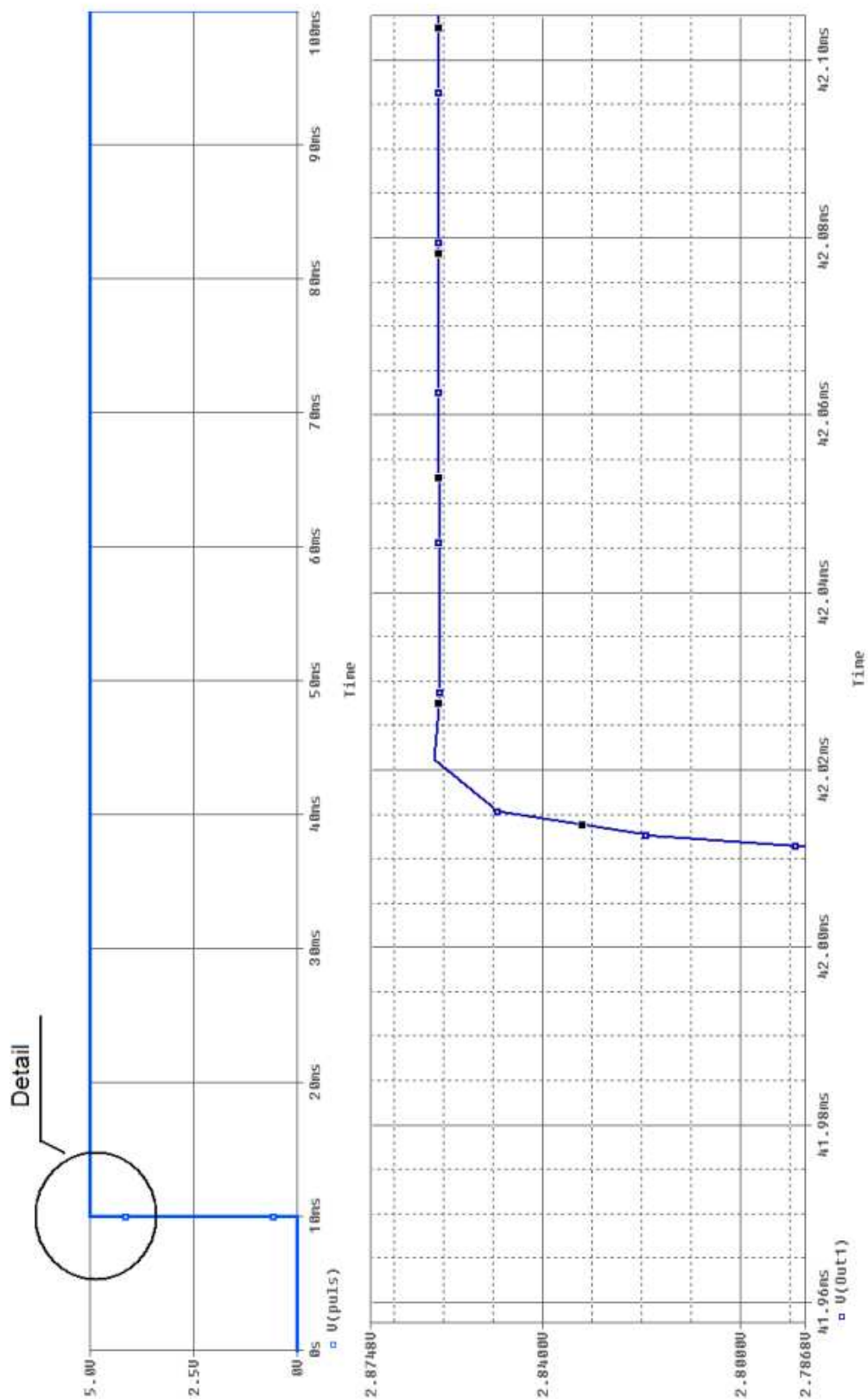
Obr.26 Průběhy na vstupu a výstupu bistabilního klopného obvodu s nesouměrným spouštěním (spouštěcí impulsy kladné)



Obr.27 Průběh výstupního signálu bistabilního klopného obvodu bez zapojení urychlovacích kondenzátorů



Obr.28 Průběh výstupního signálu bistabilního klopného obvodu s urychlovacími kondenzátory o kapacitě $1nF$

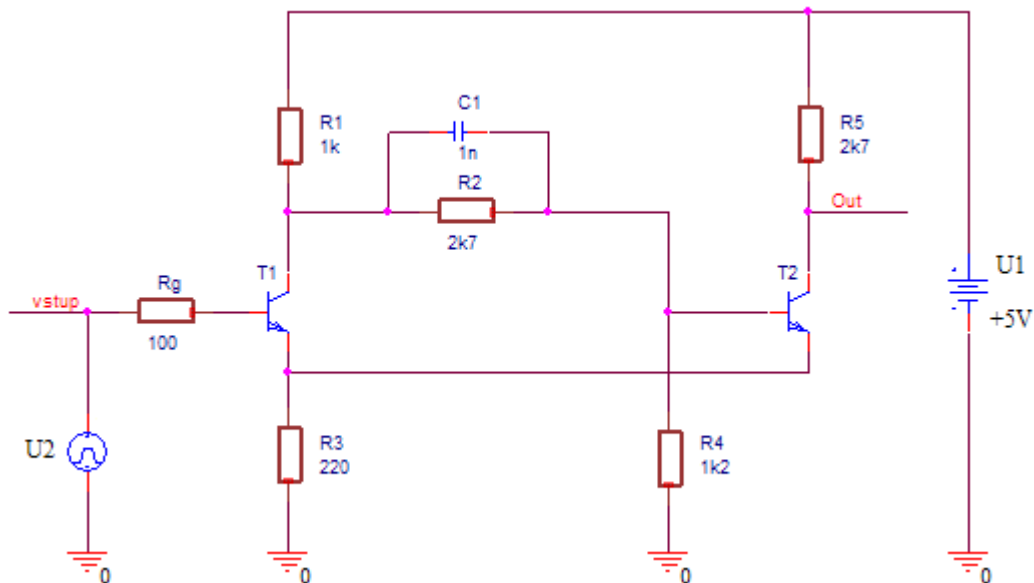


Obr.29 Průběh výstupního signálu bistabilního klopného obvodu s urychlovacími kondenzátory o kapacitě 5nF

6.7 Schmittův klopný obvod

Tento obvod má dva stabilní stavy, které se mění skokem při průchodu vstupního signálu nastavenou napěťovou úrovní. Napěťová úroveň je nastavena na vstupu (obr.30). Pomocí tohoto obvodu je možné získat z analogového signálu signál logický.

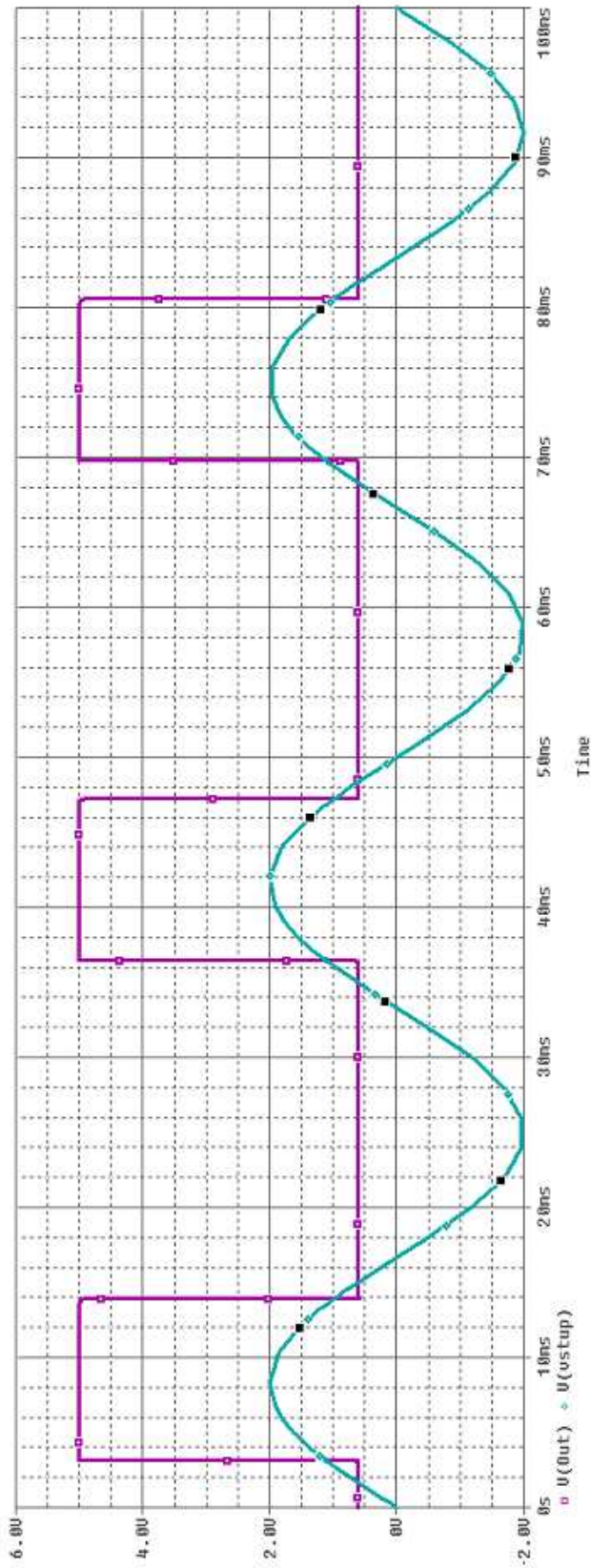
Schmittův klopný obvod se používá k zarovnání hran impulsů nebo jako napěťový komparátor [9].



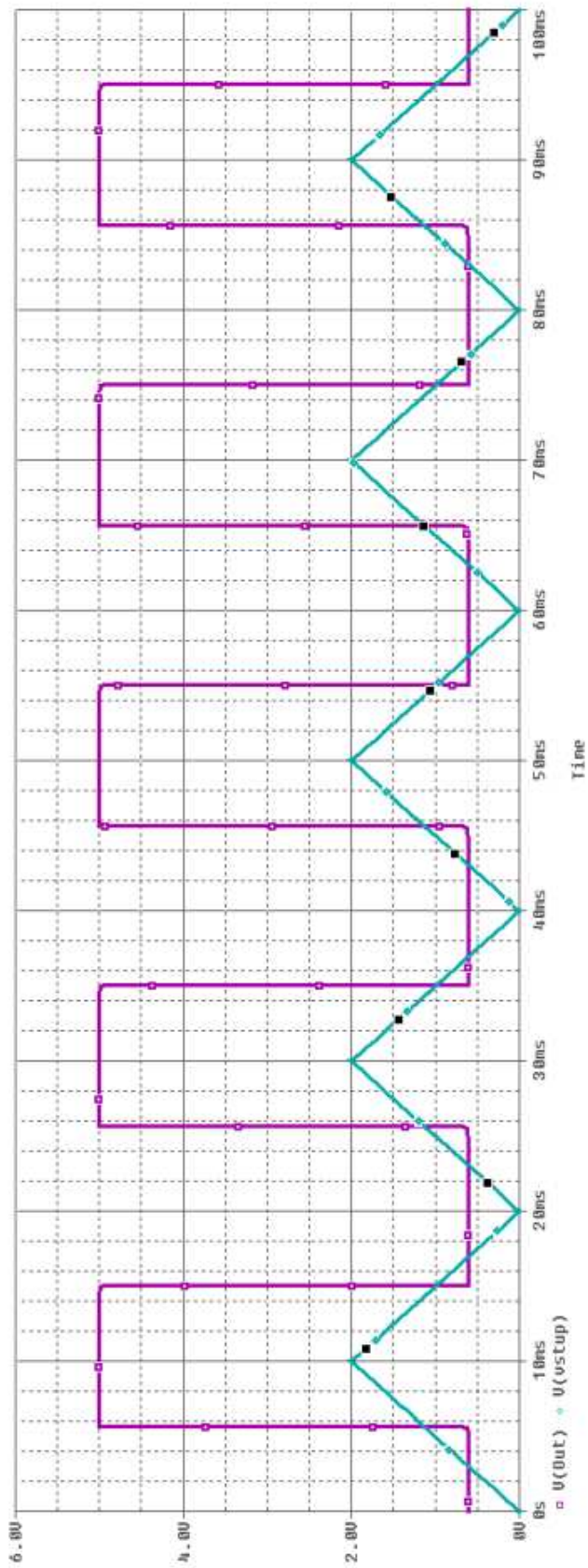
Obr.31 Schmittův klopný obvod

Simulace obvodu : Při simulování Schmittova klopného obvodu jsem obvod zapojil podle obr. 31 a pomocí programu Pspice jsem vytvořil níže uvedené časové průběhy vstupního a výstupního signálu – obr. 32. Ze získaného průběhu je vidět, že tvar výstupního signálu nezávisí na tvaru vstupního signálu. Výstupní signál má vždy obdélníkový průběh, jak v případě harmonického průběhu vstupního signálu (obr. 32), tak i v případě trojúhelníkového napěťového průběhu (obr. 33).

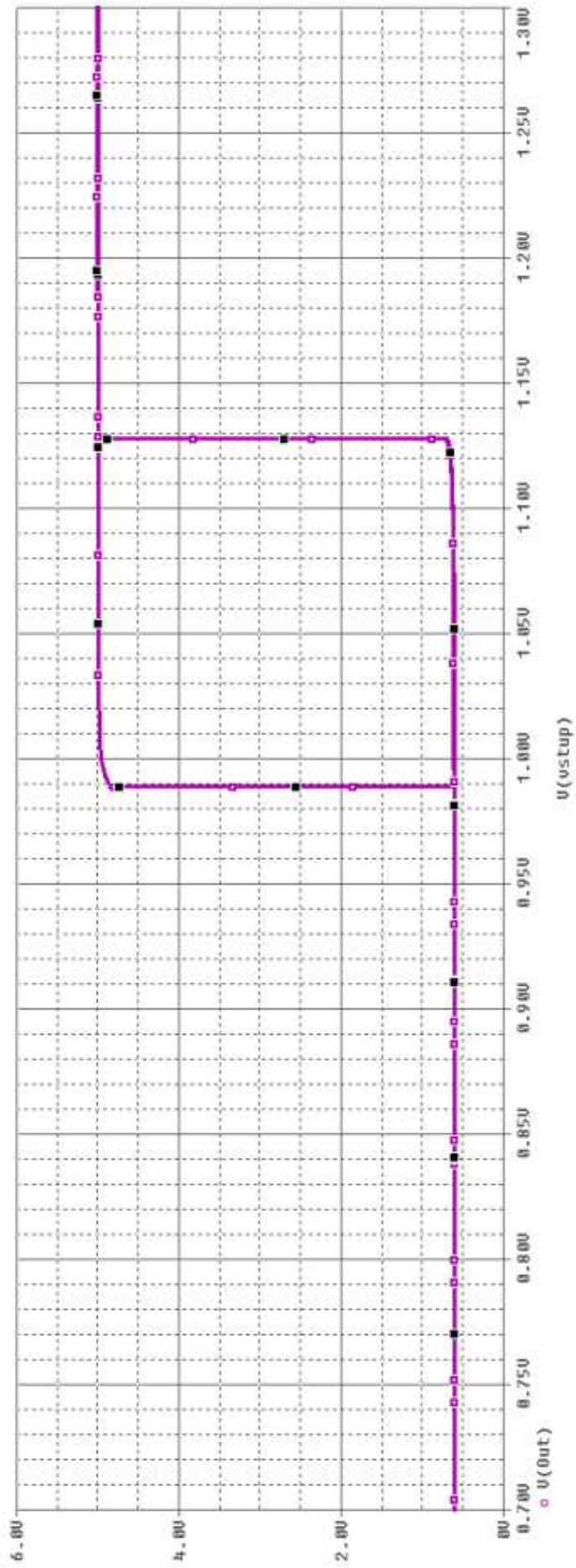
Na obr. 33 je znázorněna závislost výstupního napětí na vstupním napětí Schmittova klopného obvodu. Na uvedeném obrázku je dobře patrné, že uvedená závislost $U_2 = f(U_1)$ vykazuje hysterezi.



Obr.32 Průběhy vstupního (sinusového) a výstupního signálu Schmittova klopného obvodu



Obr.33 Průběhy vstupního (symetrického trojúhelníkového) a výstupního signálu Schmittova klopného obvodu



Obr.34 Hysterezní smyčka vytvořená pomocí Schmittova klopného obvodu

7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo pojednat o jevech bistability a hystereze jak obecně, tak i se zřetelem na uplatnění těchto jevů v elektrotechnice, především při výkladu činnosti klopných obvodů. Při studiu klopných obvodů jsem zvláštní pozornost věnoval obvodům bistabilního a Schmittova klopného obvodu. Tyto obvody jsem simuloval a studoval v programu Pspice. Při simulaci jsem měnil některé parametry obvodů a sledoval, jak se tyto změny projevují na vstupních a výstupních signálech. Získané výsledky byly vyjádřeny graficky.

Z výsledků simulace lze např. uvést, že u Schmittova klopného obvodu jsou na výstupu vždy obdélníkové pulzy, nezávisle na (mnou užitých) tvarech vstupního napěťového signálu. Současně simulace prokázala, že závislost výstupního napětí na vstupním napětí u stávajícího klopného obvodu vykazuje hysterezi.

8 Použitá literatura

- [1] Krempaský J.: Synergetika, STU Bratislava, 1994 (skriptum)
- [2] http://www.umel.feec.vutbr.cz/OKS/cz/pdf/skripta_kap_5.pdf
- [3] Coveney P., Highfield R.: Šíp času, OLDAG, Ostrava, 1995
- [4] Fiala J., Skála L.: Úvod do nelineární fyziky, Matfyzpress, Praha, 2003
- [5] <http://www.fce.vutbr.cz/studium/materialy/Dynsys/kap2/kap2.htm#fazovy%20portret>
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis>
- [7] Malina V.: Poznáváme elektroniku 6, Kopp, České Budějovice, 2001
- [8] <http://k315.feld.cvut.cz/download/men/POLE01.pdf>
- [9] Hájek J.: Časovač 555 praktická zapojení, BEN-technická literatura, Praha, 2000
- [10] Kolektiv autorů : Dílenská příručka, SOUE a U, Plzeň, 2001
- [11] http://user.unob.cz/Biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE_SBIRKA.pdf
- [12] Kouřil F., Vrba K.: Teorie nelineárních a parametrických obvodů, SNTL, Praha, 1982
- [13] Uhlíř J., Slípka J.: Polovodičové impulsové a spínací obvody, SNTL, Praha, 1976
- [14] Ebeling W., Feistel R.: Physik der Selbstorganisation und Evolution, Akademie-Verlag, Berlin, 1982
- [15] Amelkin V.: Differential Equations in Applications, MIR Publishers, Moscow, 1990