

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

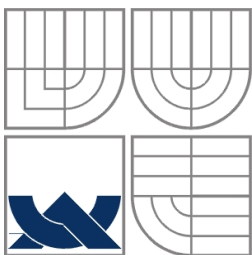
EKVIVALENTNÍ OBVODOVÉ REALIZACE JEDNODUCHÝCH CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

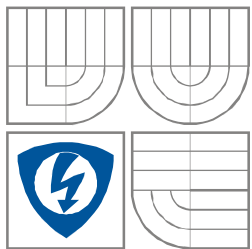
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAROMÍR KOBZA

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

EKVIVALENTNÍ OBVODOVÉ REALIZACE JEDNODUCHÝCH CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ

Equivalent circuitry realization simply chaotic oscillator

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jaromír Kobza

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jaromír Kobza
Bytem: V Úzkých 238, Rájec-Jestřebí
Narozen/a (datum a místo): 27. listopadu 1984 v Boskovicích

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Ekvivalentní obvodová realizace jednoduchých chaotických oscilátorů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
 3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
 4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.
-

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Ekvivalentní obvodová realizace jednoduchých chaotických oscilátorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiří Petřela, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

ABSTRAKT

Předmětem této práce je obvodová realizace autonomních chaotických RC oscilátorů s nelineárním prvkem a seznámení se základními pojmy a problematikou tohoto typu oscilátorů. Vše se týká jednoho universálního obvodu, který je na základě změny vstupních parametrů schopen generovat mnoho chaotických atraktorů.

Návrh zahrnuje generování parametrů obecného elektronického obvodu z matematické simulace diferenciálních rovnic dynamického systému. Dále se blíže zaměřuje na převedení těchto parametrů do funkční konfigurace samotného obvodu a jeho simulaci ve vybraném obvodovém simulátoru. Posledním úkolem je dosažení chaotických atraktorů u reálných obvodů a jejich měření osciloskopem a spektrálním analyzátozem. Součástí tohoto měření je ukázka vybraných zachycených typů atraktorů a zachycení spektra chaotického RC oscilátoru.

Klíčová slova

Nelineární systém, dynamický systém, diferenciální rovnice, atraktor, chaos, deterministický chaos, stavový prostor, numerická analýza, harmonický oscilátor, univerzální analogový oscilátor, obvodová syntéza, integrátorová syntéza, funkční bloky, nelineární obvod, operační zesilovač, obvodové zapojení, simulace, rovinné projekce, časové průběhy.

ABSTRACT

The aim of this paper is to introduce with basic theory the problems encountered when considering the circuit implementation of autonomous RC chaotic oscillator with nonlinearity. All oscillator prototypes are based on one type of universal oscillator circuit. This circuit is able to generate a lot of attractors on condition of different entrance parameters.

The design is based on a mathematical simulation, which includes the generation of electronic circuit values. The work is focused the transformation of these values to operational circuit configuration and simulation in a circuit simulator. The final task is to acquire chaotic attractors. Oscilloscope and spectrum analyser photos will verify the operation.

Key words

Nonlinear system, dynamic system, differential equation, attractor, chaos, deterministic chaos, numerical analysis, harmonic oscillator, universal analog oscillator, circuit synthesis, integrator synthesis, function block, nonlinear circuit, operational amplifier, circuitry implementation, simulation, flat projection, time characterization.

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	- 10 -
1. ÚVOD	- 11 -
2. ZÁKLADNÍ POJMY	- 12 -
2.1 Stavový prostor.....	- 12 -
2.2 Dynamický systém	- 12 -
2.3 Nelineární systém	- 12 -
2.4 Atraktor dynamického systému.....	- 13 -
2.5 Chaos	- 13 -
2.6 Chaotický systém.....	- 13 -
2.7 Chua oscilátor.....	- 14 -
2.8 Numerická analýza	- 14 -
2.9 Obvodová simulace	- 14 -
2.10 Obvodová syntéza	- 15 -
2.11 Harmonický oscilátor.....	- 15 -
3. VYUŽITÍ CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ	- 16 -
3.1 Chaos v komunikačních systémech	- 16 -
3.2 Další využití chaosu.....	- 16 -
4. MATEMATICKÝ MODEL	- 17 -
4.1 Matematický model s nelinearitou typu PWL	- 17 -
4.1.1 Diferenciální rovnice	- 18 -
4.2 Matematický model s kvadratickou nelinearitou	- 18 -
5. NUMERICKÁ ANALÝZA	- 19 -
5.1 Numerická analýza pro rc oscilátor s nelinearitou typu PWL	- 19 -
5.1.1 Matematický model, první kanonický model, double scroll atraktor	- 19 -
5.1.2 Matematický model, první kanonický model, strange atraktor	- 21 -
5.1.3 Matematický model, konfigurace CDCD	- 23 -
5.1.4 Matematický model, konfigurace EC-C.....	- 24 -
5.2 Numerická analýza pro rc oscilátor s kvadratickou nelinearitou	- 26 -
6. OBVODOVÉ FUNKČNÍ BLOKY	- 28 -
6.1 Napěťový zesilovač	- 28 -
6.2 Napěťový invertor	- 28 -
6.3 Sumátor	- 29 -
6.4 Diferenční zesilovač	- 30 -
6.5 Napěťový sledovač.....	- 30 -
6.6 Nelineární obvody	- 31 -
6.6.1 Proudový invertor.....	- 31 -
Obr. 13: Proudový invertor.....	- 31 -
6.6.2 Jednostranný diodový omezovač	- 31 -
Obr. 14: Jednostranný diodový omezovač.....	- 32 -
6.6.3 Oboustranný diodový omezovač.....	- 32 -
6.6.4 Analogová násobička(multiplikátor).....	- 33 -
7. OBVODOVÁ REALIZACE.....	- 35 -
7.1 využití funkčních bloků pro Univerzální rc oscilátor.....	- 36 -
7.1.1 Návrh jednotlivých prvků obvodu.....	- 36 -
7.2 Simulace v programu OrCAD PSpice	- 36 -
7.2.1 RC oscilátor 1.....	- 37 -

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

7.2.2 RC oscilátor 2.....	- 39 -
7.2.3 RC oscilátor 3.....	- 41 -
7.2.4 RC oscilátor s analogovou násobičkou.....	- 42 -
8. REALIZACE CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ.....	- 45 -
8.1 Rovinné projekce RC oscilátoru 1.....	- 46 -
8.2 Rovinné projekce RC oscilátoru 2.....	- 47 -
8.3 Rovinné projekce RC oscilátoru 3.....	- 48 -
8.4 Rovinné projekce RC oscilátoru s analogovou násobičkou.....	- 49 -
8.5 Spektrum chaotických oscilátorů	- 50 -
ZÁVĚR	- 52 -
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 53 -
10. OBSAH CD.....	- 54 -

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

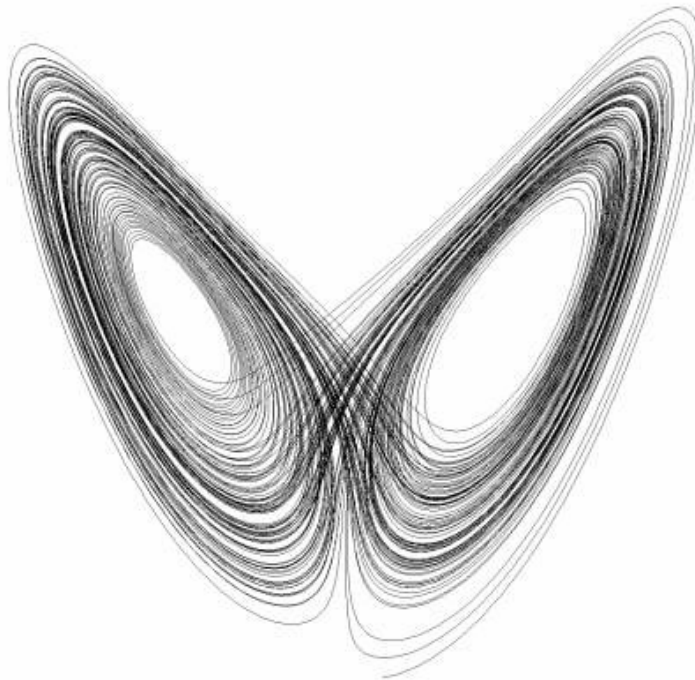
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Lorenzův atraktor	- 11 -
Obr. 2: Chua oscilátor.....	- 14 -
Obr. 3: Double-scroll atraktor.....	- 21 -
Obr. 4: Strange atraktor	- 22 -
Obr. 5: Double-scroll atraktor.....	- 24 -
Obr. 6: Double-scroll atraktor.....	- 26 -
Obr. 7: Strange atraktor	- 27 -
Obr. 8: Napěťový zesilovač	- 28 -
Obr. 9: Napěťový invertor	- 29 -
Obr. 10: Sumační zesilovač	- 29 -
Obr. 11: Diferenční zesilovač	- 30 -
Obr. 12: Napěťový sledovač.....	- 30 -
Obr. 13: Proudový invertor.....	- 31 -
Obr. 14: Jednostranný diodový omezovač.....	- 32 -
Obr. 15: Oboustranný diodový omezovač	- 32 -
Obr. 16: Přenos diodového omezovače	- 33 -
Obr. 17: Přenos diodového omezovače zachycen na analogovém osciloskopu s časovou základnou (vlevo) a se základnou X-Y.....	- 33 -
Obr. 18: Blokové schéma analogové násobičky AD633.....	- 34 -
Obr. 19: Přenos analogové násobičky	- 34 -
Obr. 20: Obecné zapojení chaotického oscilátoru [3]	- 35 -
Obr. 21: RC oscilátor 1 - schéma zapojení	- 37 -
Obr. 22: RC oscilátor 1 – <i>podivný atraktor</i>	- 38 -
Obr. 23: RC oscilátor 1 - časový průběh proměnných X, Y a Z.....	- 38 -
Obr. 24: RC oscilátor 2 - schéma zapojení	- 39 -
Obr. 25: RC oscilátor 2 - <i>double scroll atraktor</i>	- 40 -
Obr. 26: RC oscilátor 3 - schéma zapojení	- 41 -
Obr. 27: RC oscilátor 3 - <i>double scroll atraktor</i>	- 42 -
Obr. 28: RC oscilátor s analogovou násobičkou - schéma zapojení	- 43 -
Obr. 30: RC oscilátor s analogovou násobičkou – <i>podivný atraktor</i>	- 44 -
Obr. 31: Cyklické oscilace.....	- 45 -
Obr. 32: Přejít z cyklických oscilací k chaosu	- 45 -
Obr. 33: Rovinné projekce RC oscilátoru 1	- 46 -
Obr. 34: Rovinné projekce na RC oscilátoru 2	- 47 -
Obr. 35: Rovinné projekce RC oscilátoru 3	- 48 -
Obr. 36: Rovinné projekce RC oscilátoru 3.....	- 49 -
Obr. 37: Spektra chaotických oscilátorů.....	- 50 -

1. ÚVOD

Ukazuje se, že lineární systémy jsou pouhou idealizací a ve skutečnosti žádný reálný systém nelze dokonale popsat lineárním matematickým modelem. Lineární model může pro skutečný systém platit s dostatečnou přesností pouze pro malé fluktuace výchylek, vždy však existuje jistá mez, nad kterou je chování systému nelineární. Většina systémů je však silně nelineární, linearizovaný model pro takové systémy platí pouze pro nekonečně malé výchylky od rovnovážné polohy. Všechny dynamické systémy vyskytující se v přírodě jsou ve své podstatě nelineární a za určitých podmínek může být jejich chování popsáno jakožto deterministický chaos. Proto je chaotické chování v přírodě tak časté a v poslední době se stává předmětem stále silícího zájmu. Ke vzniku chaosu stačí pouhé tři nelineární diferenciální rovnice.

Jedním z prvních, kdo narazil, ač nevědomě, na problematiku chaotického chování byl Isaac Newton, když zkoumal trajektorii oběhu Země kolem Slunce. Zjistil že je kruhová až elipsovitá. Pak si ale položil otázku, jak by se systém choval, kdyby v soustavě bylo další slunce. Tento problém nedokázal vyřešit on ani nikdo v jeho době. Později se meteorolog a matematik Edward Lorenz zabýval meteorologickým modelem za pomoci počítače vytvořil systém podobný. Výsledkem byl první podivný atraktor zobrazený na obr.1, nazývaný „mávnutí motýlích křídel“.



Obr. 1: Lorenzův atraktor

2. ZÁKLADNÍ POJMY

2.1 STAVOVÝ PROSTOR

Stavový prostor určuje, jakých hodnot může nabývat stavový vektor dynamického systému. Stavový vektor je tvořen množinou proměnných, které mohou nabývat hodnot z určitého intervalu. Interval všech těchto hodnot potom určuje celý stavový prostor. Stavový prostor může být několika typů:

- **Konečný stavový prostor** má omezené množství stavů.
- **Spočítatelný stavový prostor** má sice nekonečné množství stavů, ale tyto stavy jsou spočítatelné. To znamená, že každému stavu můžeme přiřadit nějaké přirozené číslo.
- **Nekonečný stavový prostor** má jako stavové proměnné reálná čísla. To znamená, že je nejen nekonečný, ale není také spočítatelný. Neexistuje tedy takové mapování, aby každému stavu jednoznačně přiřadilo celé číslo. Nekonečný stavový prostor má například planeta obíhající okolo slunce. Stavové proměnné jsou zde souřadnice planety. Tyto proměnné nejsou ničím kvantovány, nejsou tedy spočítatelné.

2.2 DYNAMICKÝ SYSTÉM

Dynamický systém sestává ze stavového prostoru, jehož souřadnice popisují stav systému v daném čase a z dynamických podmínek, které popisují změnu tohoto systému v čase. Stav systému je potom popsán vektorem, který celý leží ve stavovém prostoru. Dynamické podmínky jsou většinou zadány soustavou diferenciálních rovnic, které popisují změnu stavového vektoru v čase. Změna stavu dynamického systému se děje provedením těchto diferenciálních rovnic a nahrazením starého stavového vektoru vektorem novým.

Dynamický systém může být deterministický nebo stochastický (náhodný). Deterministický dynamický systém lze poměrně přesně popsat, zatímco u systému stochastického jsme odkázáni pouze na statistické vlastnosti takového systému (například střední hodnota, disperze, směrodatná odchylka, centrální moment a jiné).

2.3 NELINEÁRNÍ SYSTÉM

Nelineární systém je takový systém, kde neplatí princip superpozice. To znamená že jestliže $f(x) = 0$ a současně $f(y) = 0$, není zaručeno, že také $f(x + y) = 0$. V nelineárním systému platí princip superpozice pouze pro malou množinu izolovaných bodů, kterým říkáme *fixní body*.

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

2.4 ATRAKTOR DYNAMICKÉHO SYSTÉMU

Atraktor dynamického systému je stav, do kterého systém směřuje. Je to tedy množina, ve které je stavový vektor, když je systém v nekonečném čase. Atraktory rozdělujeme do několika tříd:

pevné body: jde o nejjednodušší případ. Systém se tedy v nekonečném čase ustálil v nějakém stabilním stavu a v podstatě už nejde o dynamický systém

periodické (resp. kvaziperiodické) body: jde také o jednoduchý případ. Systém se ustálil tak, že osciluje mezi několika stavy. Příkladem je těleso, které se na své cestě vesmírem dostane do blízkosti velmi hmotného tělesa. Po určitém čase se pohyb tohoto tělesa ustálí na eliptické dráze

chaotický traktor: výsledný atraktor nelze v podstatě nijak dopředu předpovědět. To je způsobeno tím, že je systém velmi citlivý na počáteční podmínky. Chaotičnost v tomto případě neznamena náhodnost, protože se bavíme o deterministických systémech. Tento atraktor nelze předpovědět, protože nemůžeme bez zásahu do měření zjistit počáteční podmínky

podivný traktor: tento typ atraktoru vzniká, je-li systém popsán minimálně třemi diferenciálními rovnicemi. Takový systém může mít velmi komplikovaný atraktor, který sice bude chaotický, ale přesto bude vykazovat určité pravidelnosti. Termín **podivný atraktor** není ještě přesně matematicky definován, ale považujeme za něj takový atraktor, který vykazuje stejné vlastnosti, jaké mají fraktály (podivný atraktor je tedy fraktálem).

První dynamický systém, který měl podivný atraktor, vytvořil Edward Lorenz v roce 1963. Šlo o jednoduchý systém se třemi diferenciálními rovnicemi, které však ve svém důsledku vytvořily při simulaci chaotický atraktor, který měl fraktální strukturu. Na těchto rovnicích bylo také vidět velkou citlivost na počátečních podmínkách. I při velmi malé změně počátečních podmínek byl výsledek diametrálně odlišný. Termín „*strange attractor*“ poprvé zavedli ve své práci Ruelle a Takens v roce 1970.

2.5 CHAOS

Chaos může nastat v systému, který má více než dvě stavové proměnné, tedy například v trojrozměrném prostoru. Pro diskrétní procesy existuje i jednorozměrný chaos. Chaos je z časového hlediska budoucí stav deterministického dynamického systému, který není předpověditelný v důsledku velké citlivosti na počáteční podmínky. Aby byl systém chaotický, musí mít velké množství počátečních podmínek, které jsou nestabilní.

2.6 CHAOTICKÝ SYSTÉM

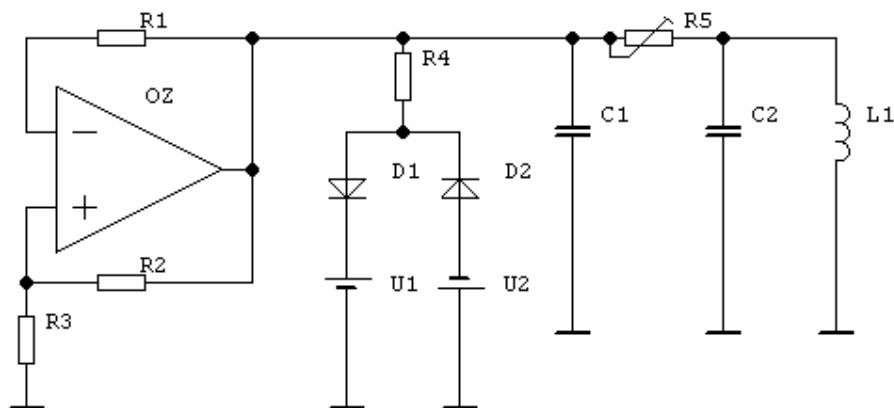
Chaotické systémy reprezentují třídu modelů neurčitosti lišící se od modelů stochastických. Zatímco se znalostí současného systému deterministického modelu můžeme předpovídat trajektorie budoucnosti na libovolně dlouhou dobu, u modelu stochastického nelze určit přesnou předpověď, dokonce ani pro libovolně krátký čas. Chyba předpovědi chaotického modelu roste exponenciálně a následná předpověď může být určována jen na omezenou dobu definovanou dovolenou chybou předpovědi. Procesy v chaotických modelech mají tvar nepravidelné oscilace, kde se mění jak frekvence tak amplituda. Před 20. stoletím,

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

byly lineární diferenciální rovnice hlavními matematickými modely oscilací v mechanických, elektrických, a jiných systémech. Přesto na přelomu století bylo zcela jasné, že lineární oscilační modely nedokážou popsat nové lékařské objevy, inženýrské jevy a procesy.

2.7 CHUA OSCILÁTOR

Chua oscilátor je jednoduchý elektronický obvod (obr.2), který exponuje chaotický atraktor. Poprvé ho publikoval v roce 1983 Leon O. Chua. Tento obvod vypadá velmi jednoduše, avšak jeho oživení je velmi obtížné. Záleží zejména na počátečních podmínkách a konfiguraci jednotlivých parametrů obvodu. Operační zesilovač a rezistory R_1 , R_2 a R_3 tvoří nelineární záporný rezistor. Diodový omezovač tvoří kladnou část nelineárního obvodu. C_1, C_2, L_1 a R_4 zastupují lineární část. Více informací v [4].



Obr. 2: Chua oscilátor

2.8 NUMERICKÁ ANALÝZA

Každý deterministický dynamický systém je plně popsán svými diferenciálními rovnicemi a množinou počátečních podmínek. Řešením uvažovaného dynamického systému je stavová trajektorie, která se nejčastěji zobrazuje ve stavovém prostoru, popřípadě rozšířeného o čas.

2.9 OBVODOVÁ SIMULACE

Modelování a simulace na počítači je bezesporu efektivní způsob, již zcela běžně používaný při návrhu nebo testování analogových obvodů. Poskytuje možnost zjistit zda je obvod funkční ještě před samotnou realizací. Dnes již existuje celá řada softwarového vybavení určeného k tomuto účelu. Mezi nejpoužívanější patří Pspice, Snap, Worbench, atd. V této práci bude využito zejména programu Pspice.

2.10 OBVODOVÁ SYNTÉZA

Je mnoho způsobů, jak provést obvodovou syntézu. Lze použít návrhu počítačové syntézy, spočívající v použití různých funkčních bloků. Pomocí jejich univerzálnosti a kombinací lze dosáhnout automaticky na základě rovnic vygenerování obvodu. Tento způsob je založen nejčastěji na základě integrátorové syntézy, která využívá funkčních bloků s operačními zesilovači. Tato metoda vygeneruje elektronický obvod, který často bývá neúměrně složitý. Zásah designéra je i zde nevyhnutelný.

2.11 HARMONICKÝ OSCILÁTOR

Obecně jsou oscilátory všechna zařízení, která vytvářejí periodicky proměnné průběhy fyzikálních veličin. Jsou to zařízení, které umí generovat napětí sinusového průběhu.

3. VYUŽITÍ CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ

Chaos se objevuje u řady nelineárních systémů. Dokonce systémy jen s několika stupni volnosti, o nichž se domníváme, že jsou jednoduché, mohou projevovat složité chování, které nelze v dlouhých časových intervalech předpovědět. Avšak tento chaos se od náhodnosti zásadním způsobem odlišuje. Chaotické systémy jsou deterministické, zatímco náhodné systémy jsou nedeterministické již ze své vnitřní podstaty. Rozdíly mezi chováním obou typů systémů lze sledovat ve fázovém prostoru

3.1 CHAOS V KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMECH

Chaosu lze v komunikaci využít jako náhradu za konvenční šifrování. Další výhodou je to, že chaotické signály mají velmi široké spektrum, což je velmi výhodné pro víceuživatelské aplikace. Princip spočívá v modulaci informace na chaotický signál, tak aby byla dostupná jen pro autorizovaného uživatele. Příjímač odstraní chaotickou složku a obnoví původní informaci. Kdokoliv, kdo zachytí vysílané signály, uvidí jen šumový, chaotický signál, ze kterého jen obtížně obnoví původní informaci. Druhá myšlenka má původ v širokopásmové komunikaci UWB (*Ultrawide Band Communications*), kde se používají pseudonáhodné signály pro zvětšení frekvenčního pásma. Důvodem používání těchto systémů je omezení interference signálů z jednotlivých zdrojů a také omezení vlivu zpožděných signálů v bezdrátové a mobilní komunikaci.

3.2 DALŠÍ VYUŽITÍ CHAOSU

Další možnosti využití chaosu jsou v aplikacích jako je fázový závěs, digitální filtry, synchronizační obvody a další. Zatím se však nepoužívá nikterak hojně a vzhledem k jeho citlivosti a složitosti nastavení k jeho výraznému využití prozatím nedochází.

Lze jej však s výhodou použít jako deterministický dynamický model simulující chování jiného než elektronického systému. Ten při realizaci může naznačit další možná chování. Zpětně je pak možné získat parametry obvodu a převést tyto hodnoty do zkoumaného systému.

Hlavní výhodou tohoto postupu je, že pomocí RC chaotických oscilátorů je možné najít řešení, která by mohla zůstat v jiném případě neodhalena. To poukazuje na celé spektrum chaotických atraktorů jediného systému, nepatrnou změnou hodnot součástek obvodu lze dosáhnout zcela odlišného řešení.

4. MATEMATICKÝ MODEL

Univerzální oscilátor nabízí možnost použít různé typy nelineárních obvodů. Zde se jedná zejména o po částech lineární obvod a kvadratickou nelinearitu. Tyto obvody jsou vybírány v první řadě pro jejich jednoduchost při dalších výpočtech. Jejich konstrukce v elektronickém obvodu je podobně jednoduchá. Následující rovnice jsou rozebírány v [2].

4.1 MATEMATICKÝ MODEL S NELINEARITOU TYPU PWL

V případě dynamického systému chaotických oscilátorů je třeba vycházet z jednoduché rovnice (1)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}h(\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}), \quad (1)$$

kde matice \mathbf{A} tvoří lineární část vektorového pole. Proměnná x je matice, jenž určuje v kolika rozměrech bude navrhovaný systém pracovat, b a w jsou vektory.

Nelineární člen je třísegmentová, počástech lineární saturační funkce, neboli PWL (*Piecewise Linear*). To znamená, že analýza může být provedena zvlášť pro obě postranní oblasti (2b) a pro vnitřní oblast (2a).

$$D_0 : P(s) = (s - \mu_1)(s - \mu_2)(s - \mu_3) = s^3 - p_1s^2 - p_2s - p_3 \quad (2a)$$

$$D_{\pm 1} : Q(s) = (s - \nu_1)(s - \nu_2)(s - \nu_3) = s^3 - q_1s^2 - q_2s - q_3 \quad (2b)$$

$$\mu_{1,2} = \mu' \pm i\mu'' \quad \nu_{1,2} = \nu' \pm i\nu''$$

Ve dvou postranních oblastech je rovnice funkce značně zjednodušená protože hodnota h je zde konstantní. Pak je výsledná rovnice (3).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x} \cdot (\mathbf{A} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{w}^T) \quad (3)$$

V oblasti vnitřního pásma již argument nelineární funkce nabývá hodnot dle rovnice (4).

$$h(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) = \frac{1}{2} \cdot (|\mathbf{w}^T \mathbf{x} + 1| - |\mathbf{w}^T \mathbf{x} - 1|) \quad (4)$$

4.1.1 Diferenciální rovnice

Matematická analýza diferenciálních rovnic se zabývá existencí řešení, jednoznačností, závislostí řešení na počátečních a okrajových podmínkách. V aplikacích je zajímavé zejména získání analytického řešení, tedy funkce $u(t)$, která rovnici řeší.

Diferenciální rovnice výstupní matice má tvar, který je transformovatelný pro obvodovou realizaci (5).

$$\dot{x} = \nu' [x + z - h(\mathbf{w}^T \mathbf{x})] - \nu'' y + \mu' [h(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) - z], \quad (5a)$$

$$\dot{y} = \nu'' x + \nu' y + b_2 [h(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) - z], \quad (5b)$$

$$\dot{z} = -\nu_3 [h(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) - z] + \mu_3 h(\mathbf{w}^T \mathbf{x}), \quad (5c)$$

kde dosud blíže nespecifikované konstanty a argumenty jsou

$$b_2 = \frac{(\mu' - \nu')^2}{\mu'' + \nu''}, \quad (6a)$$

$$\mathbf{w}^T \mathbf{x} = x + \frac{\mu' + \nu'}{\mu' - \nu'} y + z. \quad (6b)$$

4.2 MATEMATICKÝ MODEL S KVADRATICKU NELINEARITOU

Výchozí rovnice je zde podobná rovnici (1) s rozdílem nelineárního prvku (7).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{x}^2 \quad (7)$$

Další postup je srovnatelný s rovnicemi předchozího typu nelineárního obvodu.

5. NUMERICKÁ ANALÝZA

Pokud funkci nelze analyticky vyjádřit, je třeba použít numerické řešení diferenciálních rovnic. Numerická analýza je provedena v programu MathCad pomocí numerické Runge-Kuttovy integrační metody 4. řádu.

5.1 NUMERICKÁ ANALÝZA PRO RC OSCILÁTOR S NELINEARITOU TYPU PWL

Pro výpočet hodnot obvodových prvků je nejprve nutné zvolit koeficienty, které budou odpovídat po výpočtu chaotickému chování. Počet těchto kombinací koeficientů je dosud omezený a jejich volba je víceméně náhodná.

5.1.1 Matematický model, první kanonický model, double scroll atraktor

Zvolené parametry dynamického systému zachycuje tab. 1.

Tab. 1: Parametry dynamického systému

p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
0,09	0,433	0,653	-1,168	0,846	-1,295

V tab. 2 je uvedena volba koeficientů matematického modelu.

Tab. 2: Koeficienty matematického modelu

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}
q_1	-1	0	q_2	0	-1	q_3	0	0

Výpočet vektoru b a volba vektoru w jsou naznačeny v tab. 3.

Tab. 3 Koeficienty matematického modelu

b_1	b_2	b_3	w_1	w_2	w_3
$p_1 - q_1$	$p_2 - q_2$	$p_3 - q_3$	1	0	0

Počet rovnic a neznámých dovoluje zvolit si obvodové prvky, konkrétně kondenzátory (tab. 4).

Tab. 4: Zvolené koeficienty elektronického obvodu

C_1	C_2	C_3	A_1	A_0
1	1	1	0	0

Výpočet hodnot obvodových prvků

$$Gb_1 = b_1 \quad Gb_2 = b_2 \quad Gb_3 = b_3 \quad G_1 = 0 \quad G_2 = 0 \quad G_3 = 0$$

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

$$Gs_1 = -(a_{11} + b_1) \quad Gs_2 = -(a_{22} + b_2) \quad Gs_3 = -(a_{33} + b_3)$$

$$s_{12} = \frac{-a_{12}}{a_{11} + b_1} \quad s_{13} = \frac{-a_{13}}{a_{11} + b_1} \quad s_{21} = \frac{-a_{21}}{a_{22} + b_2} \quad s_{23} = \frac{-a_{23}}{a_{22} + b_2} \quad s_{31} = \frac{-a_{31}}{a_{33} + b_3} \quad s_{32} = \frac{-a_{32}}{a_{33} + b_3}$$

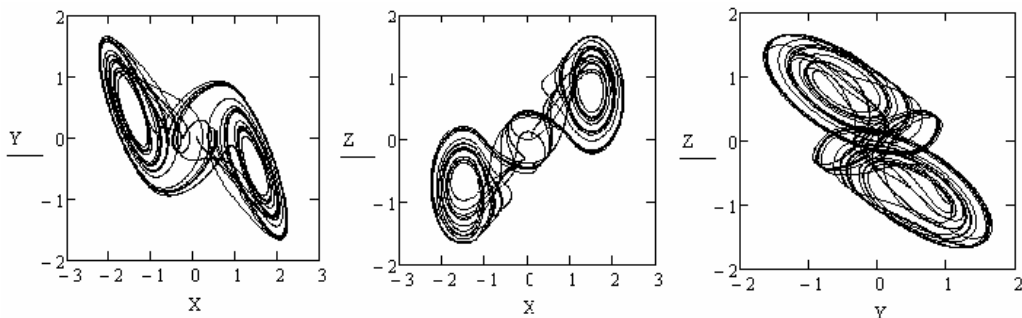
Tab. 5: Vypočtené číselné hodnoty prvků elektronického obvodu

$Gb_1 = 1,258$	$Gb_2 = -0,413$	$Gb_3 = 1,948$
$G_1 = 0$	$G_2 = 0$	$G_3 = 0$
$Gs_1 = -0,09$	$Gs_2 = 0,413$	$Gs_3 = -1,948$
$s_{12} = 11,111$	$s_{13} = 0$	$s_{21} = 2,048$
$s_{23} = -2,421$	$s_{31} = 0,665$	$s_{32} = 0$

$$A(t, x) = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_1}(G_1 + Gs_1 + Gb_1) & \frac{Gs_1 + s_{12}}{C_1} & \frac{Gs_1 + s_{13}}{C_1} \\ \frac{Gs_2 + s_{21}}{C_2} & \frac{-1}{C_2}(G_2 + Gs_2 + Gb_2) & \frac{Gs_2 + s_{23}}{C_2} \\ \frac{Gs_3 + s_{31}}{C_3} & \frac{Gs_3 + s_{32}}{C_3} & \frac{-1}{C_3}(G_3 + Gs_3 + Gb_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{Gb_1}{C_1} \\ \frac{Gb_2}{C_2} \\ \frac{Gb_3}{C_3} \end{pmatrix} \cdot \left[A_1 \cdot (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{A_0 - A_1}{2} \cdot \left(\left| (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + 1 \right| - \left| (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - 1 \right| \right) \right]$$

Parametry numerické integrace a výsledný chaotický atraktor

Konečný počet iterací je $final = 300$ a počet vzorků je $N = 8000$.



Obr. 3: Double-scroll atraktor

5.1.2 Matematický model, první kanonický model, strange atraktor

Tab. 6: Parametry dynamického systému

p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
0,8	100,21	20,018	-2,4	-0,71	-3,27

Tab. 7: Koefficienty matematického modelu

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}
q_1	-1	0	q_2	0	-1	q_3	0	0

Tab. 8 Koefficienty matematického modelu

b_1	b_2	b_3	w_1	w_2	w_3
$p_1 - q_1$	$p_2 - q_2$	$p_3 - q_3$	1	0	0

Tab. 9: Zvolené koeficienty elektronického obvodu

C_1	C_2	C_3	A_1	A_0
1	1	1	0	1

Výpočet hodnot obvodových prvků

$$Gb_1 = b_1 \quad Gb_2 = b_2 \quad Gb_3 = b_3 \quad G_1 = 0 \quad G_2 = 0 \quad G_3 = 0$$

$$Gs_1 = -(a_{11} + b_1) \quad Gs_2 = -(a_{22} + b_2) \quad Gs_3 = -(a_{33} + b_3)$$

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

$$s_{12} = \frac{-a_{12}}{a_{11} + b_1} \quad s_{13} = \frac{-a_{13}}{a_{11} + b_1} \quad s_{21} = \frac{-a_{21}}{a_{22} + b_2} \quad s_{23} = \frac{-a_{23}}{a_{22} + b_2} \quad s_{31} = \frac{-a_{31}}{a_{33} + b_3} \quad s_{32} = \frac{-a_{32}}{a_{33} + b_3}$$

Tab. 10: Vypočtené číselné hodnoty prvků elektronického obvodu

$Gb_1 = 3,2$	$Gb_2 = 100,92$	$Gb_3 = 23,288$
$G_1 = 0$	$G_2 = 0$	$G_3 = 0$
$Gs_1 = -0,8$	$Gs_2 = -100,92$	$Gs_3 = -23,288$
$s_{12} = 1,25$	$s_{13} = 0$	$s_{21} = 7,035 \cdot 10^{-3}$
$s_{23} = 9,909 \cdot 10^{-3}$	$s_{31} = 0,14$	$s_{32} = 0$

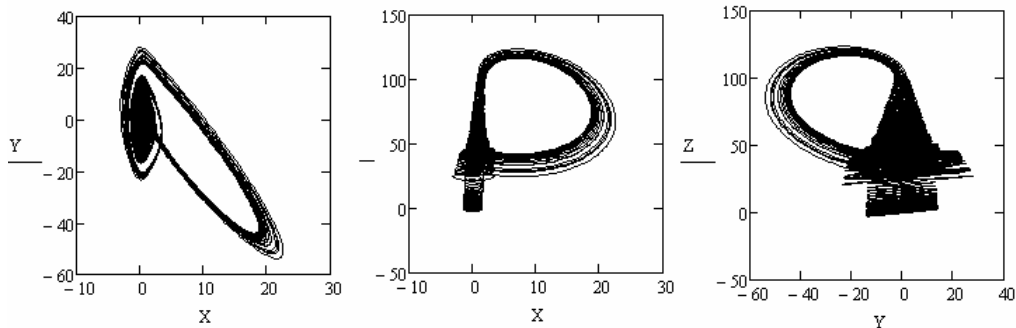
$$A(t, x) = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_1}(G_1 + Gs_1 + Gb_1) & \frac{Gs_1 + s_{12}}{C_1} & \frac{Gs_1 + s_{13}}{C_1} \\ \frac{Gs_2 + s_{21}}{C_2} & \frac{-1}{C_2}(G_2 + Gs_2 + Gb_2) & \frac{Gs_2 + s_{23}}{C_2} \\ \frac{Gs_3 + s_{31}}{C_3} & \frac{Gs_3 + s_{32}}{C_3} & \frac{-1}{C_3}(G_3 + Gs_3 + Gb_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{Gb_1}{C_1} \\ \frac{Gb_2}{C_2} \\ \frac{Gb_3}{C_3} \end{pmatrix}$$

$$\cdot \left[A_1 \cdot (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{A_0 - A_1}{2} \cdot \left(\left(w_1 \quad w_2 \quad w_3 \right) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + 1 \right) - \left(w_1 \quad w_2 \quad w_3 \right) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - 1 \right)$$

Parametry numerické integrace a výsledný chaotický atraktor

$final = 300$

$N = 8000$



Obr. 4: Strange atraktor

5.1.3 Matematický model, konfigurace CDCD

Tab. 11: Parametry dynamického systému

v'	v''	v_3	u'	u''	u_3	b_2	w_2
0.061	1	-1.29	-0.319	0.892	0.728	0.351	-1.082

Tab. 12: Koeficienty matematického modelu

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	b_1	b_3	w_1	w_3
v'	$-v''$	$v'-u'$	v''	v'	$-b_2$	0	0	v_3	$u'-v'$	u_3-v_3	1	1

Tab. 13: Zvolené koeficienty elektronického obvodu

C_1	C_2	C_3	A_1	A_0
1	1	1	0	0

Výpočet hodnot obvodových prvků

$$Gb_1 = b_1 \quad Gb_2 = b_2 \quad Gb_3 = b_3 \quad G_1 = 0 \quad G_2 = 0 \quad G_3 = 0$$

$$Gs_1 = -(a_{11} + b_1) \quad Gs_2 = -(a_{22} + b_2) \quad Gs_3 = -(a_{33} + b_3)$$

$$s_{12} = \frac{-a_{12}}{a_{11} + b_1} \quad s_{13} = \frac{-a_{13}}{a_{11} + b_1} \quad s_{21} = \frac{-a_{21}}{a_{22} + b_2} \quad s_{23} = \frac{-a_{23}}{a_{22} + b_2} \quad s_{31} = \frac{-a_{31}}{a_{33} + b_3} \quad s_{32} = \frac{-a_{32}}{a_{33} + b_3}$$

Tab. 14: Vypočtené číselné hodnoty prvků elektronického obvodu

$Gb_1 = -0,38$	$Gb_2 = 0,351$	$Gb_3 = 2,018$
$G_1 = 0$	$G_2 = 0$	$G_3 = 0$
$Gs_1 = 0,319$	$Gs_2 = -0,412$	$Gs_3 = -0,728$
$s_{12} = -3,135$	$s_{13} = 1,191$	$s_{21} = -2,427$
$s_{23} = 0,852$	$s_{31} = 0$	$s_{32} = 0$

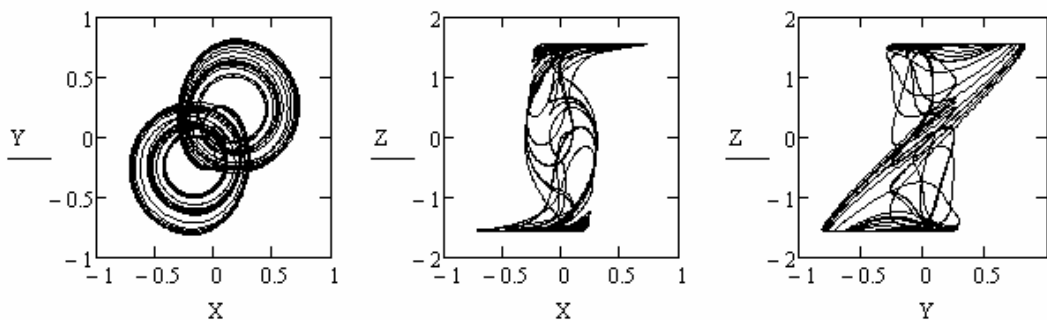
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

$$A(t, x) = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_1}(G_1 + Gs_1 + Gb_1) & \frac{Gs_1 + s_{12}}{C_1} & \frac{Gs_1 + s_{13}}{C_1} \\ \frac{Gs_2 + s_{21}}{C_2} & \frac{-1}{C_2}(G_2 + Gs_2 + Gb_2) & \frac{Gs_2 + s_{23}}{C_2} \\ \frac{Gs_3 + s_{31}}{C_3} & \frac{Gs_3 + s_{32}}{C_3} & \frac{-1}{C_3}(G_3 + Gs_3 + Gb_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{Gb_1}{C_1} \\ \frac{Gb_2}{C_2} \\ \frac{Gb_3}{C_3} \end{pmatrix} \cdot \left[A_1 \cdot (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{A_0 - A_1}{2} \cdot \left(\begin{pmatrix} w_1 \quad w_2 \quad w_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + 1 \right) - \left(\begin{pmatrix} w_1 \quad w_2 \quad w_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - 1 \right) \right]$$

Parametry numerické integrace a výsledný chaotický atraktor

final = 300

N = 8000



Obr. 5: Double-scroll atraktor

5.1.4 Matematický model, konfigurace EC-C

Tab. 15: Parametry dynamického systému

v'	v''	v_3	u'	u''	u_3	b_2	w_3
0.061	1	-1.29	-0.319	0.892	0.728	-0.603	1

Tab. 16: Koefficienty matematického modelu

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	b_1	b_3	w_1	w_2
$2v'$	-1	0	$v'^2 - u'^2$	0	0	0	0	v_3	$u' - v'$	$u_3 - v_3$	1	0

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

Tab. 17: Zvolené koeficienty elektronického obvodu

C_1	C_2	C_3	A_1	A_0
1	1	1	0	1

Výpočet hodnot obvodových prvků

$$Gb_1 = b_1 \quad Gb_2 = b_2 \quad Gb_3 = b_3 \quad G_1 = 0 \quad G_2 = 0 \quad G_3 = 0$$

$$Gs_1 = -(a_{11} + b_1) \quad Gs_2 = -(a_{22} + b_2) \quad Gs_3 = -(a_{33} + b_3)$$

$$s_{12} = \frac{-a_{12}}{a_{11} + b_1} \quad s_{13} = \frac{-a_{13}}{a_{11} + b_1} \quad s_{21} = \frac{-a_{21}}{a_{22} + b_2} \quad s_{23} = \frac{-a_{23}}{a_{22} + b_2} \quad s_{31} = \frac{-a_{31}}{a_{33} + b_3} \quad s_{32} = \frac{-a_{32}}{a_{33} + b_3}$$

Tab. 18: Vypočtené číselné hodnoty prvků elektronického obvodu

$Gb_1 = -0,38$	$Gb_2 = -1,603$	$Gb_3 = 2,018$
$G_1 = 0$	$G_2 = 0$	$G_3 = 0$
$Gs_1 = 0,258$	$Gs_2 = 1,603$	$Gs_3 = -0,728$
$s_{12} = -3,876$	$s_{13} = 0$	$s_{21} = 0,626$
$s_{23} = 0$	$s_{31} = 0$	$s_{32} = 0$

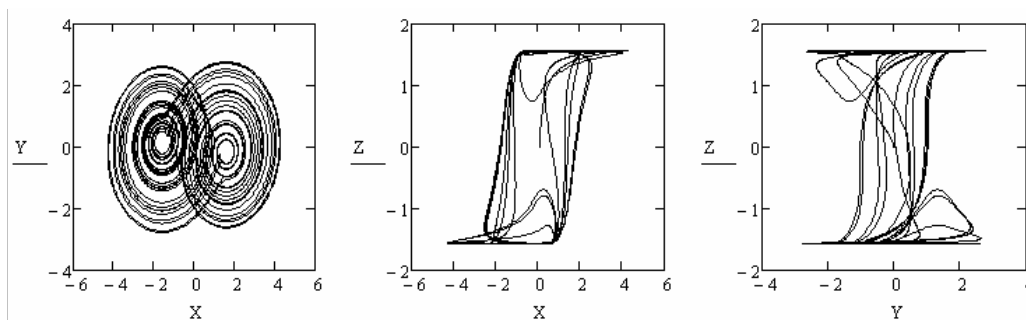
$$A(t, x) = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_1}(G_1 + Gs_1 + Gb_1) & \frac{Gs_1 + s_{12}}{C_1} & \frac{Gs_1 + s_{13}}{C_1} \\ \frac{Gs_2 + s_{21}}{C_2} & \frac{-1}{C_2}(G_2 + Gs_2 + Gb_2) & \frac{Gs_2 + s_{23}}{C_2} \\ \frac{Gs_3 + s_{31}}{C_3} & \frac{Gs_3 + s_{32}}{C_3} & \frac{-1}{C_3}(G_3 + Gs_3 + Gb_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Gb_1 \\ C_1 \\ Gb_2 \\ C_2 \\ Gb_3 \\ C_3 \end{pmatrix} \cdot$$

$$\cdot \left[A_1 \cdot (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{A_0 - A_1}{2} \cdot \left(\left(w_1 \quad w_2 \quad w_3 \right) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + 1 \right) - \left(w_1 \quad w_2 \quad w_3 \right) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - 1 \right) \right]$$

Parametry numerické integrace a výsledný chaotický atraktor

$final = 300$

$N = 8000$



Obr. 6: Double-scroll atraktor

5.2 NUMERICKÁ ANALÝZA PRO RC OSCILÁTOR S KVADRATICKOU NELINEARITOU

Koeficienty matematického modelu

$$a = 0,5 \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & a & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

výsledek^T:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	-1	-1,5	-1	1	1	1	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	1

$$zesílení = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & \end{pmatrix}$$

Výpočet hodnot obvodových prvků

$$C_1 = \frac{výsledek_0}{norma \cdot cas} \quad C_2 = \frac{výsledek_1}{norma \cdot cas} \quad C_3 = \frac{výsledek_2}{norma \cdot cas}$$

$$Rb_1 = \frac{norma}{výsledek_9} \quad Rb_1 = \frac{norma}{výsledek_{10}} \quad Rb_1 = \frac{norma}{výsledek_{11}}$$

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

$$R_1 = \frac{\text{norma}}{\text{výsledek}_3}$$

Tab. 19: Číselné hodnoty prvků elektronického obvodu

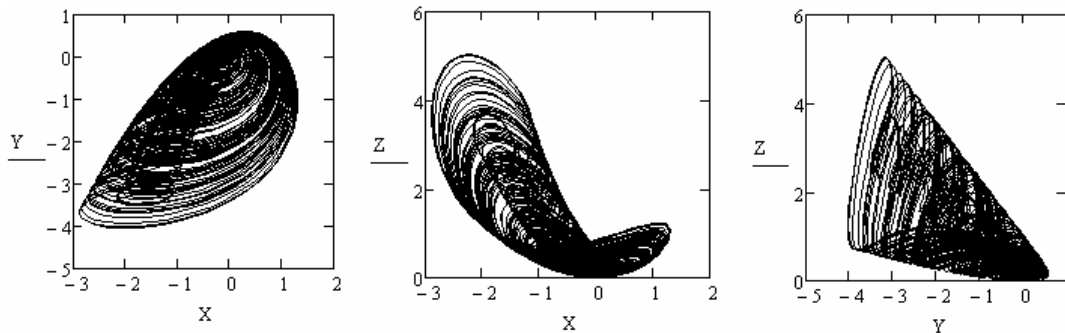
$C_1 = 10^{-6}$	$C_2 = 10^{-6}$	$C_3 = 10^{-6}$
$R_1 = -1 \cdot 10^3$	$R_2 = -666,667$	$R_{31} = -1 \cdot 10^3$
$Rs_1 = 10^3$	$Rs_2 = 10^3$	$Rs_3 = 10^3$
$Rb_1 = 10^{12}$	$Rb_2 = 10^{12}$	$Rb_3 = 10^3$

$$A(t, x) = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Rs_1} + \frac{1}{Rb_1} \right) & \frac{s_{12}}{C_1 + Rs_1} & \frac{s_{13}}{C_1 + Rs_1} \\ \frac{s_{21}}{C_2 + Rs_2} & \frac{-1}{C_2} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{Rs_2} + \frac{1}{Rb_2} \right) & \frac{s_{23}}{C_2 + Rs_2} \\ \frac{s_{31}}{C_3 + Rs_3} & \frac{s_{32}}{C_3 + Rs_3} & \frac{-1}{C_2} \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{Rs_3} + \frac{1}{Rb_3} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1 \cdot Rb_1} \\ \frac{1}{C_2 \cdot Rb_2} \\ \frac{1}{C_3 \cdot Rb_3} \end{pmatrix} \cdot (x_0^2)$$

Parametry numerické integrace a výsledný chaotický atraktor

final = 1

N = 10000



Obr. 7: Strange atraktor

6. OBVODOVÉ FUNKČNÍ BLOKY

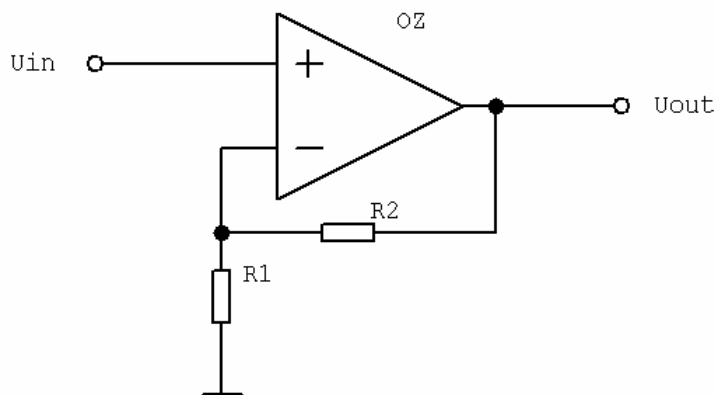
Obvodové funkční bloky jsou nedílnou součástí návrhu chaotických oscilátorů, nezbytné pro jejich obvodovou realizaci v dalších krocích.

Základním kamenem těchto prvků je v drtivé většině operační zesilovač, který svými vlastnostmi a univerzálností jednotlivých zapojení velmi dobře splňuje požadavky kladené při obvodové syntéze nejen toho typu oscilátor. Kapitola vychází z [6], jehož autor toto téma podrobně rozebral.

6.1 NAPĚŤOVÝ ZESILOVAČ

Napěťový zesilovač je připojen neinvertujícím vstupem operačního zesilovače k napěťovému signálovému zdroji. Následkem nulového diferenčního vstupního napětí ideálního operačního zesilovače se signálové napětí u_{in} přenáší zpětnovazebně také na invertující vstup. Přenos neinvertujícího zesilovače je dán rovnicí (8).

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

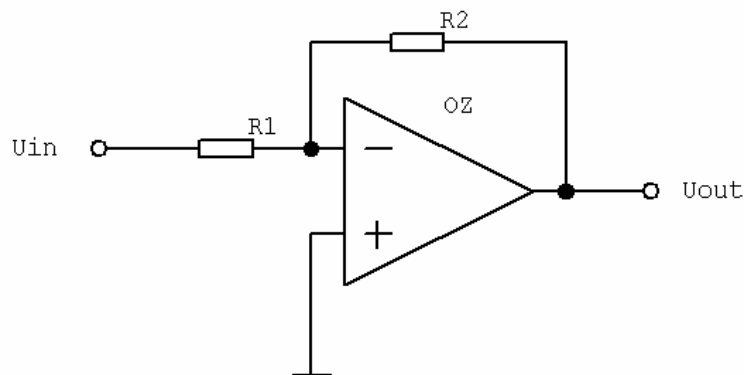


Obr. 8: Napěťový zesilovač

6.2 NAPĚŤOVÝ INVERTOR

Napěťový invertor je jedním z nejpoužívanějších operačních obvodů. Zesílení napěťového invertoru je záporné a nastavitelné v širokých mezích od 0 do $-\infty$ výběrem rezistorů R_1 a R_2 , dané vztahem (1). Zvláštním případem je jednotkový napěťový invertor se stejnými rezistory $R_1 = R_2$, který invertuje polaritu vstupního napětí.

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

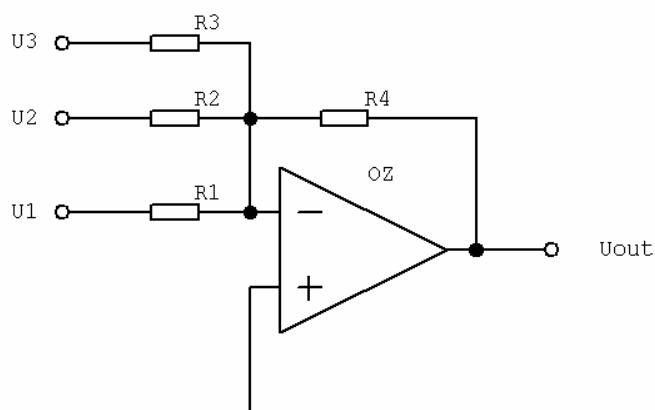


Obr. 9: Napěťový invertor

6.3 SUMÁTOR

Sumátor je rozšířením napěťového invertoru o další signálové zdroje připojené přes další sériové rezistory k invertujícímu vstupu operačního zesilovače. Zesílení každého vstupního napětí je nastaveno poměrem velikostí zpětnovazebního rezistoru R_0 a přilehlého rezistoru R_m nezávisle na zesílení ostatních vstupů, Přenos je dán rovnicí (10).

$$A_u = - \left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_2} + \dots + \frac{R_0}{R_m} \right) = - \sum_{k=1}^m \frac{R_0}{R_m} \quad (10)$$

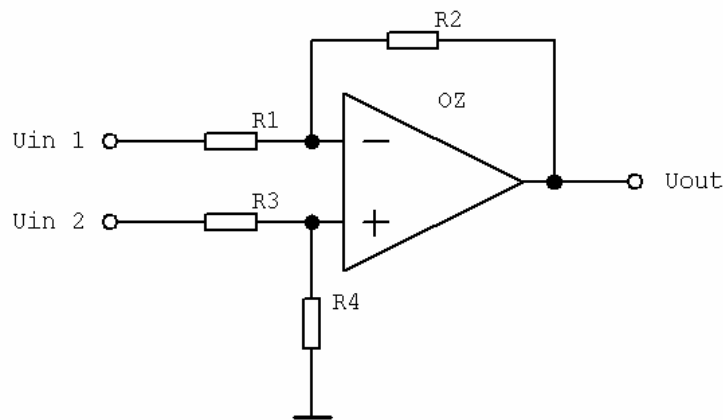


Obr. 10: Sumační zesilovač

6.4 DIFERENČNÍ ZESILOVAČ

Rozdílový zesilovač je lineární operační obvod se dvěma vstupy, jehož napětí lze určit superpozicí. Současnému působení obou vstupních napětí ve vyváženém operačním obvodu přísluší výstupní napětí, které je úměrné rozdílu vstupních napětí bez ohledu na jejich absolutní velikost

$$u_0 = \frac{R_2}{R_1}(u_2 - u_1). \quad (11)$$

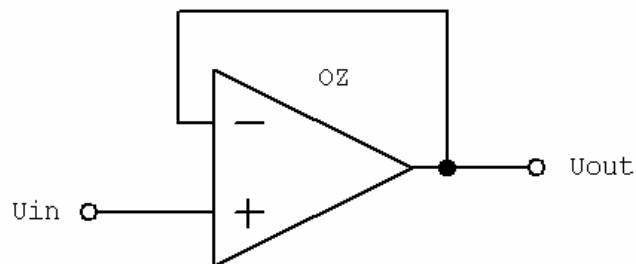


Obr. 11: Diferenční zesilovač

6.5 NAPĚŤOVÝ SLEDOVAČ

Napěťový sledovač je nejjednodušší operační obvod. Zpětná vazba je zde tvořena přímým spojem výstupu s invertujícím vstupem operačního zesilovače. Výstupní napětí je totožné se vstupním na vyšší energetické úrovni

$$u_0 = u_{in}$$



Obr. 12: Napěťový sledovač

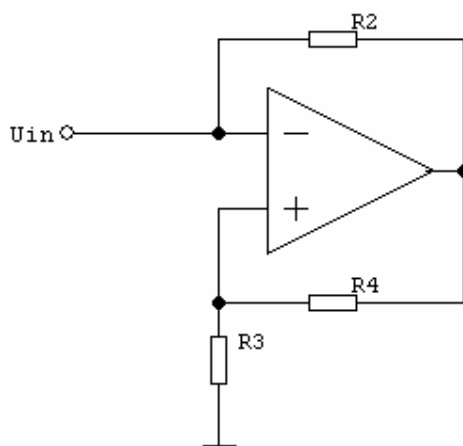
6.6 NELINEÁRNÍ OBVODY

Vlastnosti nelineárního prvku elektrického obvodu se projevují na jeho voltampérové charakteristice. Parametr (odpor rezistoru, indukčnost cívky, ...) se tedy mění se změnou napětí nebo proudu.

6.6.1 Proudový invertor

Jakákoliv impedance Z zapojená na místě zátěže se transformuje na vstup proudového invertoru jako záporná uzemněná impedance $-Z$. Proudový invertor působí jako negativní impedanční převodník

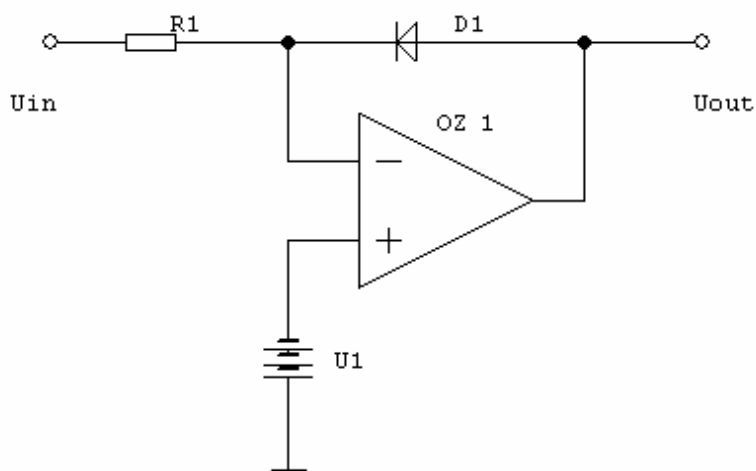
$$R_i = -R_N \quad (12)$$



Obr. 13: Proudový invertor

6.6.2 Jednostranný diodový omezovač

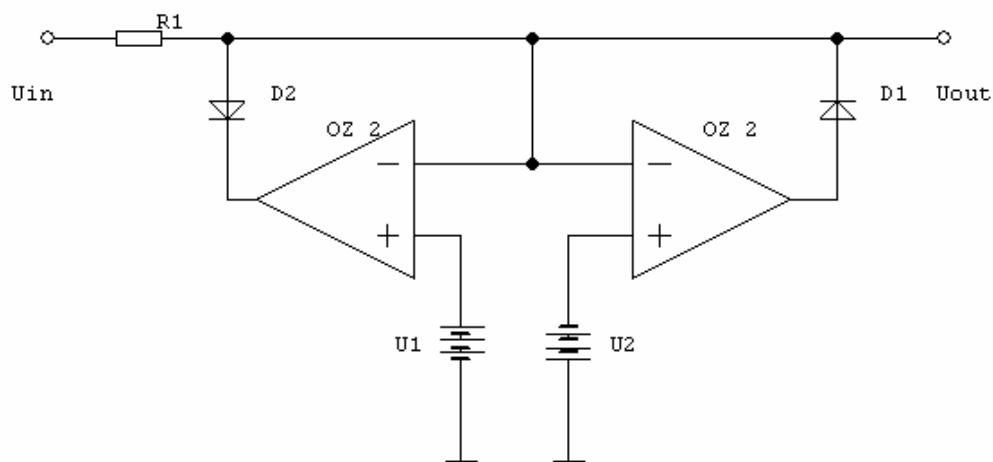
Diodový omezovač pracuje ve dvou stavech, odlišených polaritou vstupního napětí. Nejjednodušší zapojení diodového omezovače je s diodou ve zpětné vazbě. Přepětovým zdrojem zapojeným sériově s diodou lze nastavovat hranici omezování.



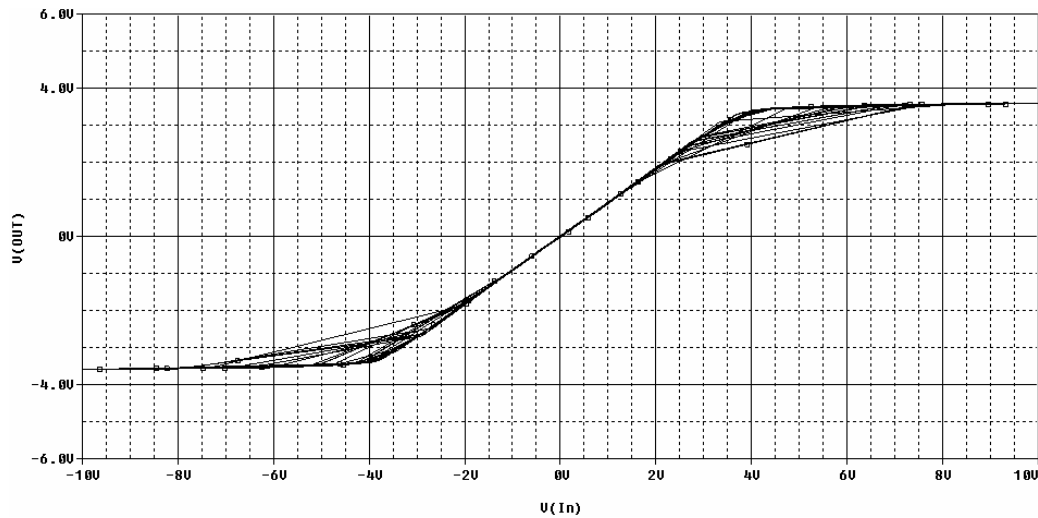
Obr. 14: Jednostranný diodový omezovač

6.6.3 Oboustranný diodový omezovač

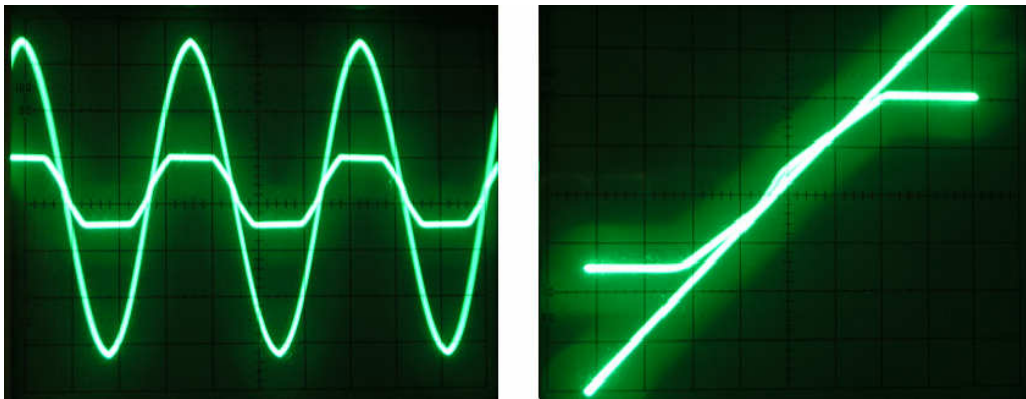
Oboustranný diodový omezovač je rozšiřujícím obvodem jednostranného diodového omezovače.



Obr. 15: Oboustranný diodový omezovač



Obr. 16: Přenos diodového omezovače



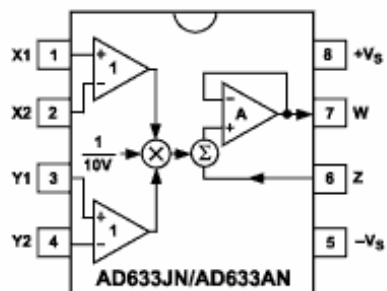
Obr. 17: Přenos diodového omezovače zachycen na analogovém osciloskopu s časovou základnou (vlevo) a se základnou X-Y

6.6.4 Analogová násobička(multiplikátor)

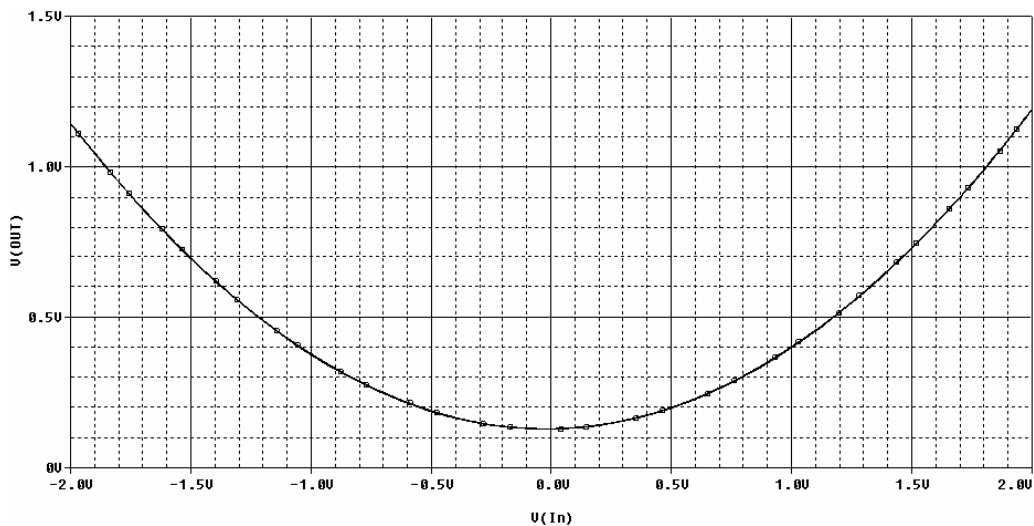
Násobení, dělení a odmocňování jsou důležité matematické operace, které se prostředky analogové techniky zajišťují velmi obtížně. Pro násobení a dělení byla vyvinuta řada obvodů, které se liší podle způsobu činnosti (modulační, logaritmické, s rozdělením proudů). Tyto obvody se v současnosti vyrábějí v integrované podobě. Násobička realizuje funkci

$$w = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10V} + z, \quad (13)$$

kde $x_1 - x_2$ a $y_1 - y_2$, z jsou vstupní napětí, jejichž rozsah je ± 10 V při napájecím napětí ± 15 V.



Obr. 18: Blokové schéma analogové násobičky AD633

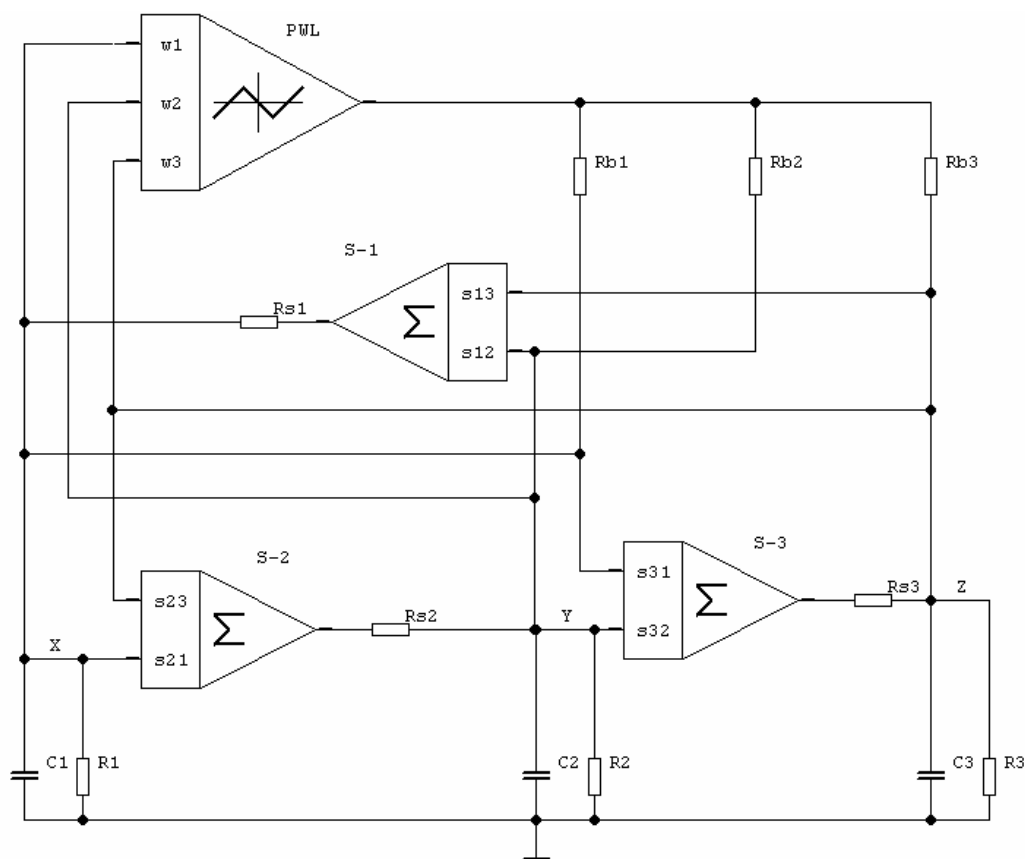


Obr. 19: Přenos analogové násobičky

7. OBVODOVÁ REALIZACE

Na základě výše uvedeného lze již jednotlivé komponenty integrovat do celistvého obvodu. Jak již bylo naznačeno, celá obvodová syntéza vychází z jednoho univerzálního typu oscilátoru (obr.18), který sestává z devíti rezistorů, tří kondenzátorů, čtyř přenosových prvků s operačními zesilovači a nelineárního členu. Oproti Chua oscilátoru je toto schéma poměrně složitější, dosáhnout chaotického atraktoru je zde však daleko snazší a v celkovém časovém součtu i rychlejší

Směrodatné zde jsou zejména hodnoty komponentů z numerické analýzy, kde ovšem často nejsou normovány, proto je nutné všechny hodnoty násobit vhodnou hodnotou (1000,10000,...), aby bylo možné dosáhnout reálných hodnot obvodových součástek.



Obr. 20:Obecné zapojení chaotického oscilátoru [3]

7.1 VYUŽITÍ FUNKČNÍCH BLOKŮ PRO UNIVERZÁLNÍ RC OSCILÁTOR

Při návrhu obvodu je vhodné postupně komponovat jednotlivé prvky a ověřovat jejich správnou funkci. Tzn. hodnoty jednotlivých bloků, zejména S-1, S-2, S-3 a PWL (*Piecewise Linear*), kontrolovat zvlášť a až po ověření integrovat do kompletního obvodu.

Výsledkem numerické analýzy jsou hodnoty obvodových prvků, které mnoho nabývají rozmanitých hodnot. Ty je třeba převést do formátu elektronického obvodu.

7.1.1 Návrh jednotlivých prvků obvodu

V případě, že je hodnota přenosu kladná a menší než 1, jde o nejjednodušší typ, kdy lze použít odporový dělič, zde je vhodné použít blok napěťového sledovače (obr.10) řazeného za děličem, případně i před něj, kvůli proudovému zatížení okolních komponent. Ze stejného důvodu je vhodné volit větší hodnoty rezistorů, řádově desítky kiloohmů.

Při záporném přenosu s absolutní hodnotou větší než 1 je vhodné použít invertující zesilovač (obr.7).

Při rozdílném znaménku vstupních parametrů je třeba použít diferenčního zesilovače (obr.9). Zde je na místě doporučit místo zdlouhavého a často nepřesného výpočtu optimizér, který je součástí programu PSpice.

Ostatní situace, které mohou nastat v prvcích S-1, S-2 a S-3 lze odvodit, a proto se jimi nebudu dále zabývat.

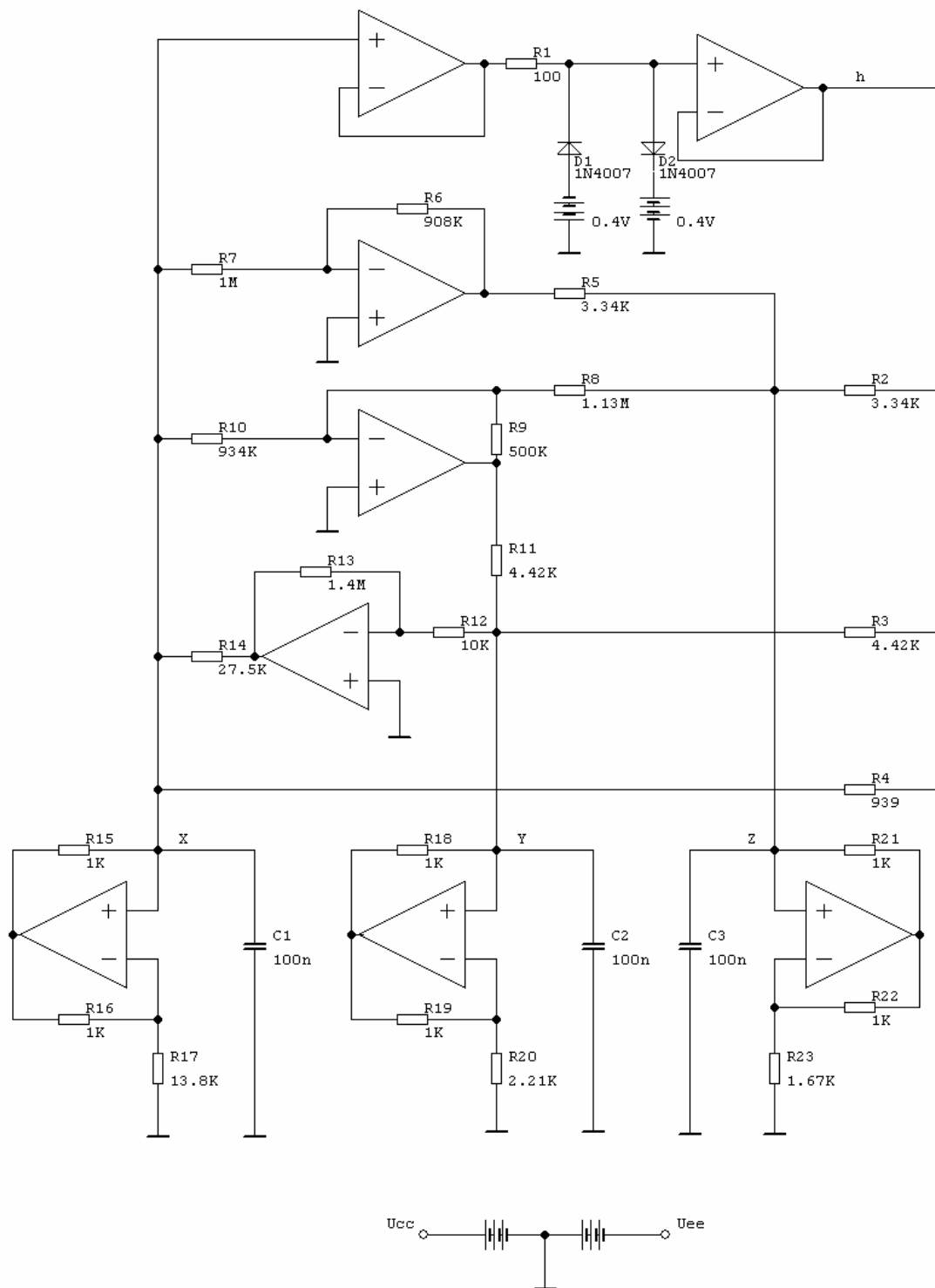
Dalším problémem je záporná hodnota rezistoru, kde lze užít proudový invertor, často zvaný chuova dioda. Pokud je záporná hodnota rezistoru v obvodu umístěna tak, že oba jeho kontakty jsou připojeny k „živým“ částem obvodu, je nutné použít dva tyto bloky zapojené sériově. Pokud je jeden jeho kontakt uzemněn, stačí výše uvedené zapojení (obr.11).

7.2 SIMULACE V PROGRAMU ORCAD PSPICE

Tento software přináší uživateli značné výhody. Provádí řadu výpočtů a celkový návrh obvodu je daleko rychlejší. Umožňuje pracovat v různých módech, zobrazovat a měřit bez nákladných přístrojů a navíc lze často při návrhu využít schématu a přímo ze simulátoru navrhnout desku plošných spojů. I tento úkon lze provést automaticky.

V následujících podkapitolách uvádím zapojení chaotických oscilátorů a jejich atraktory. Hodnoty rezistorů jsou uvedeny v ohmech. Simulace byly provedeny v programu OrCAD 10.3 PSpice.

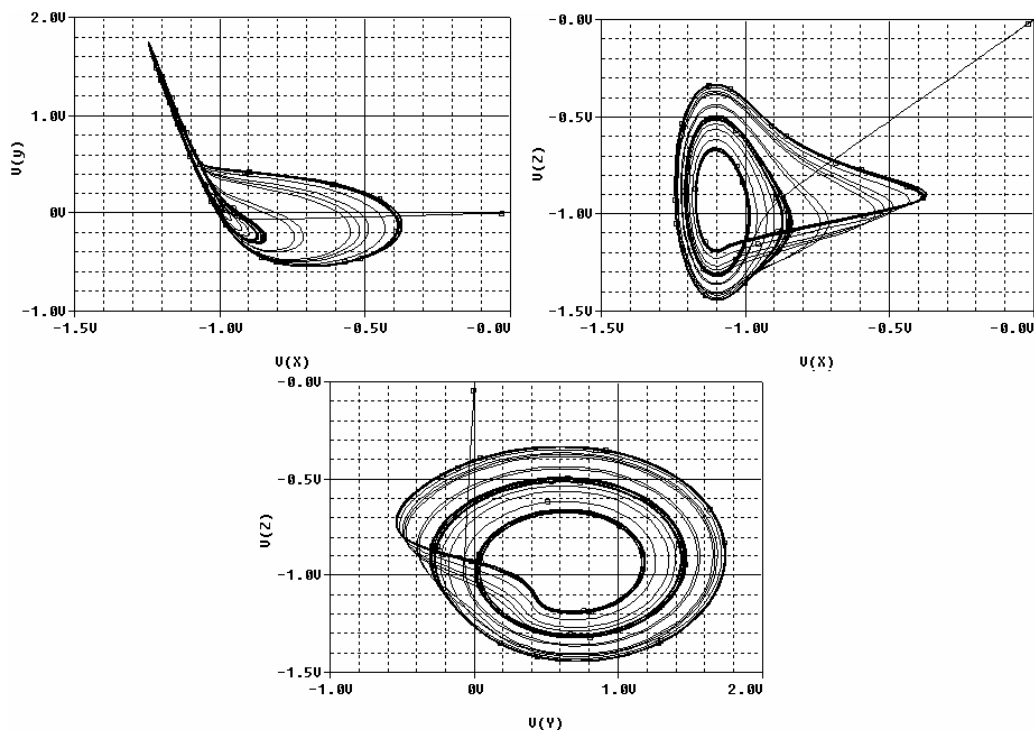
7.2.1 RC oscilátor 1



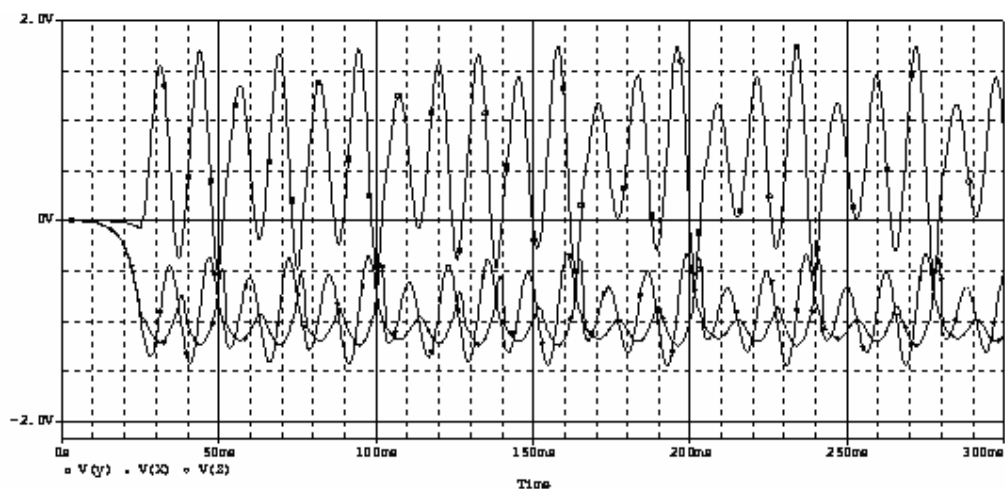
Obr. 21: RC oscilátor 1 - schéma zapojení

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

Schéma zapojení chotického RC oscilátoru při obvodové simulaci zachycuje (obr.21). Jeho charakteristiky (obr.22) jsou promítnuty v zobrazení os X-Y, X-Z a Y-Z. Na (obr.23) je vidět jeho charakteristika s časovou základnou a proměnnými X,Y i Z.

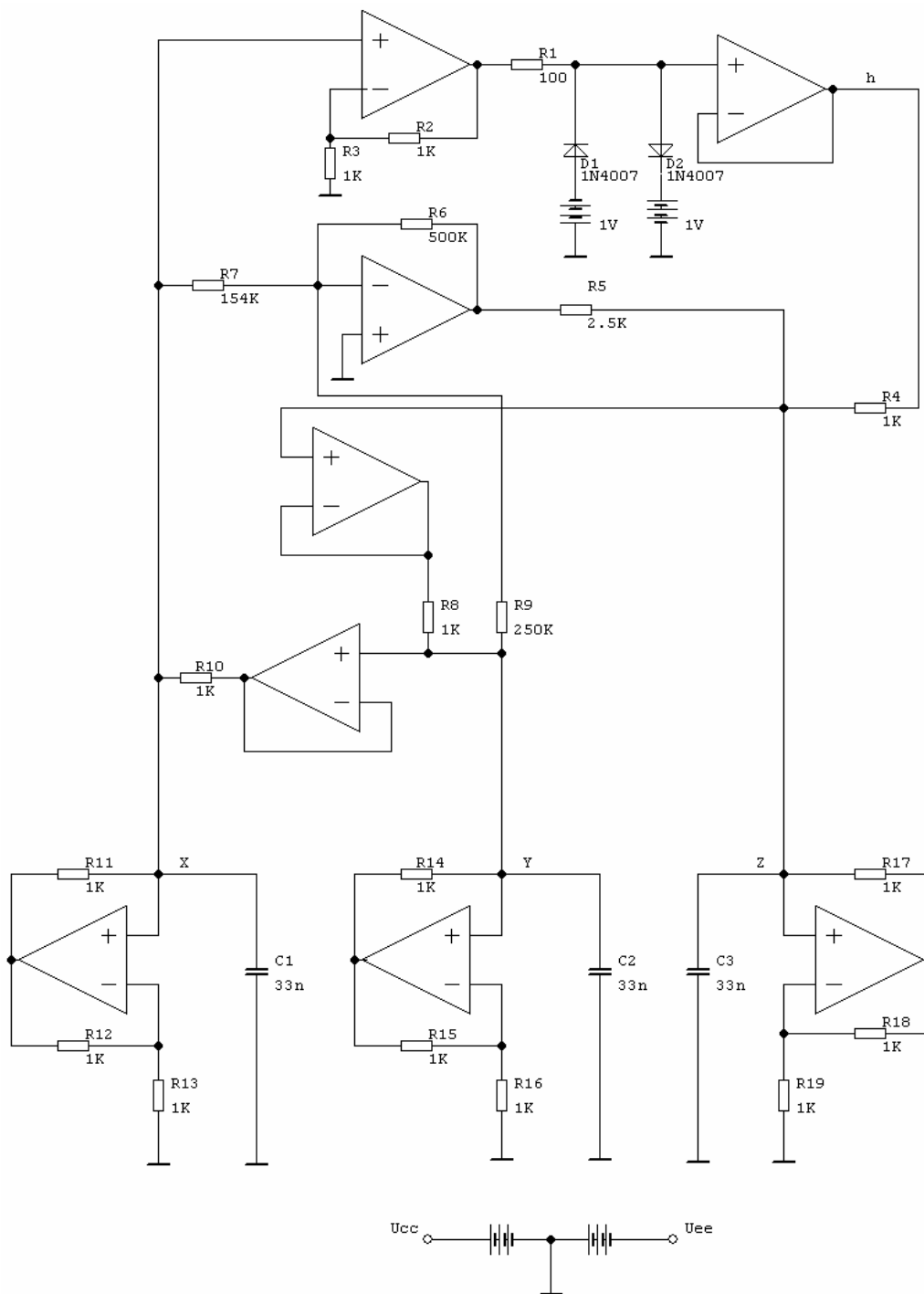


Obr. 22: RC oscilátor 1 – *podivný atraktor*



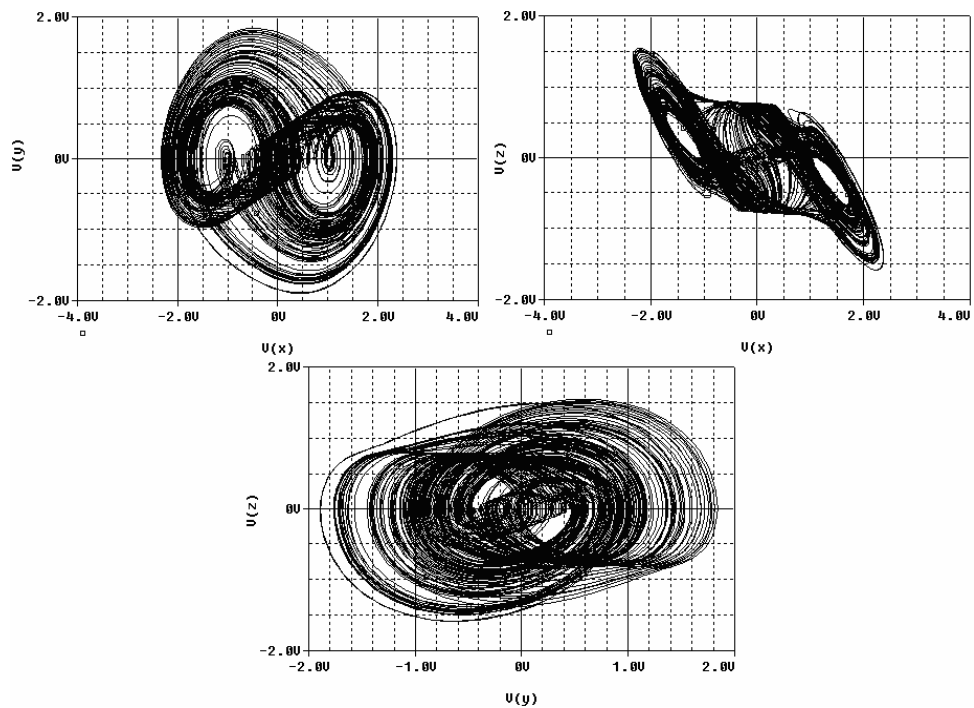
Obr. 23: RC oscilátor 1 - časový průběh proměnných X,Y a Z

7.2.2 RC oscilátor 2



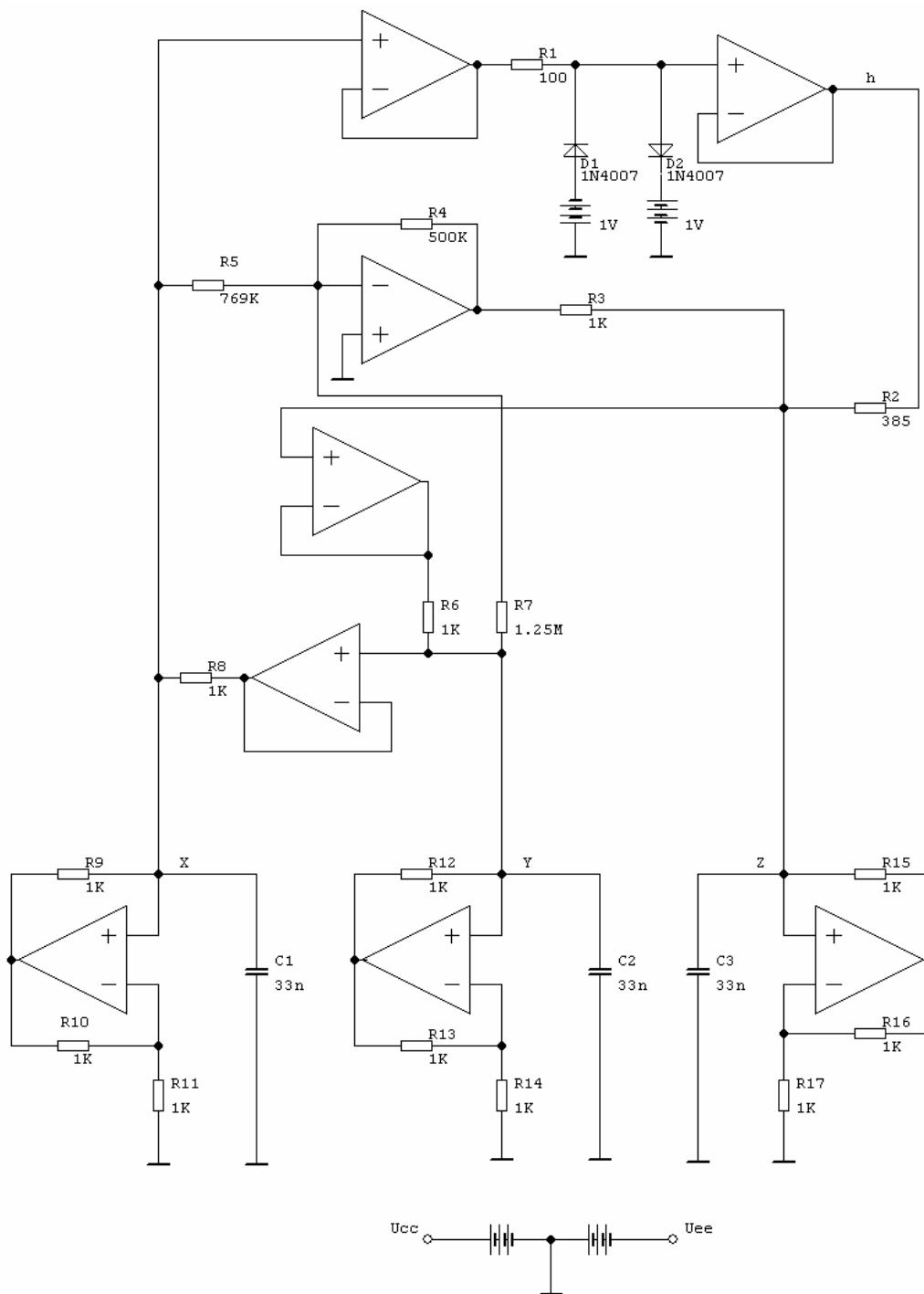
Obr. 24: RC oscilátor 2 - schéma zapojení

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

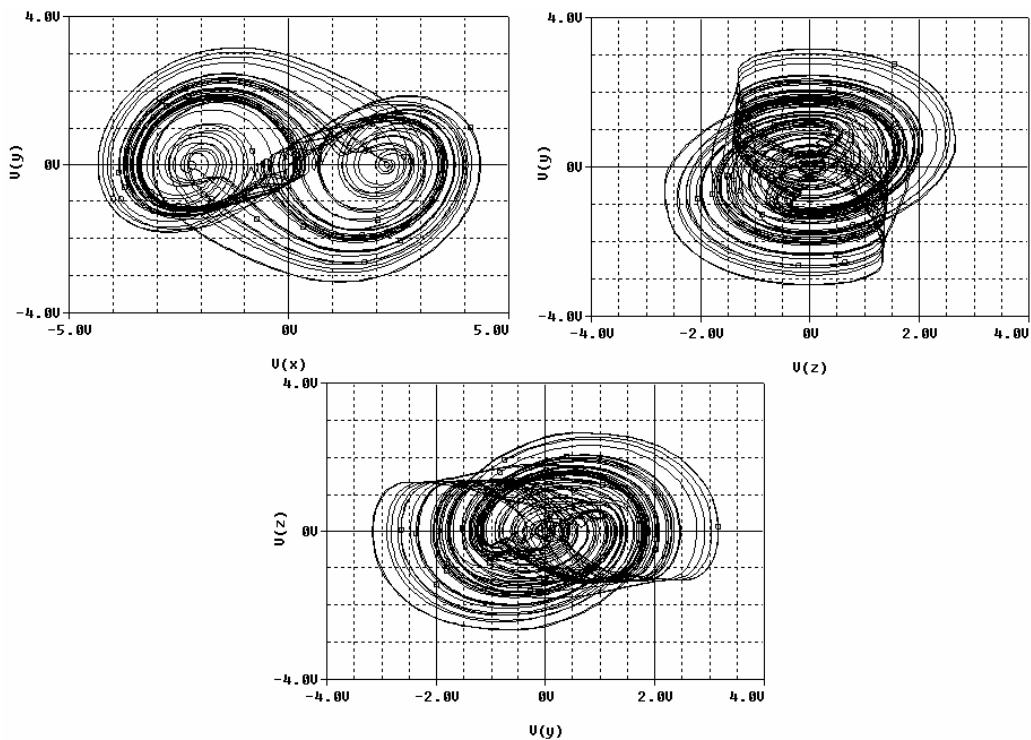


Obr. 25: RC oscilátor 2 - *double scroll* atraktor

7.2.3 RC oscilátor 3



Obr. 26: RC oscilátor 3 - schéma zapojení

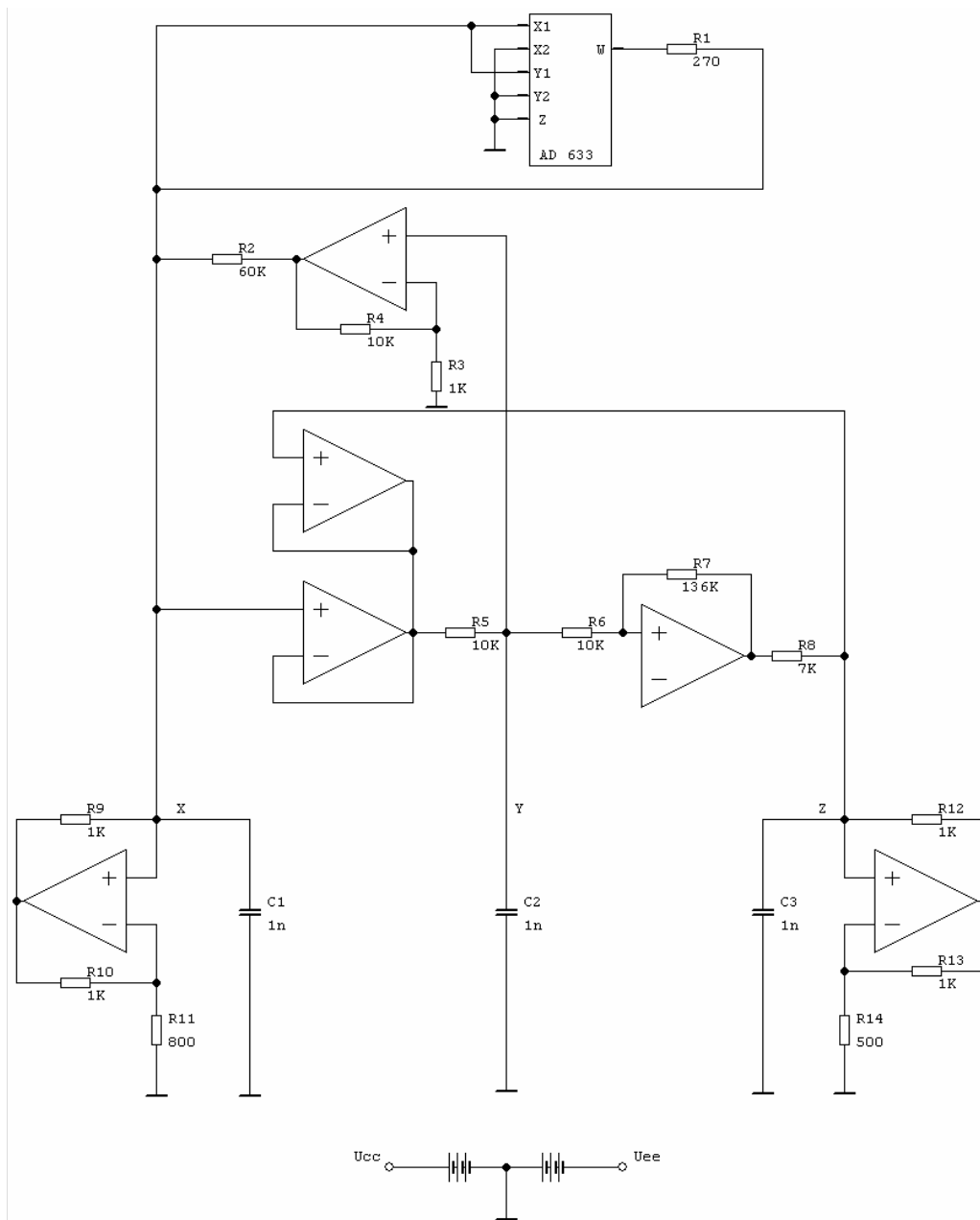


Obr. 27: RC oscilátor 3 - *double scroll atraktor*

7.2.4 RC oscilátor s analogovou násobičkou

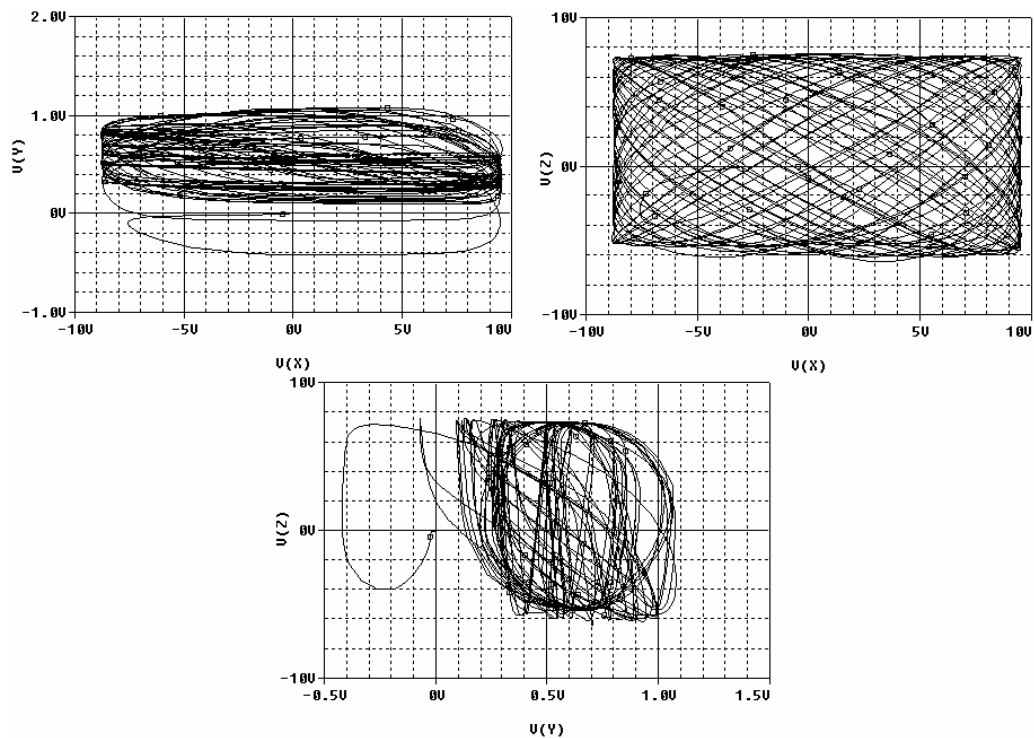
Tento typ RC oscilátoru na (obr.28) se od předchozích liší typem nelineárního obvodu. Ten se neskládá z diodového omezovače, ale z analogové násobičky AD 633.

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně



Obr. 28: RC oscilátor s analogovou násobičkou - schéma zapojení

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně



Obr. 29: RC oscilátor s analogovou násobičkou – *podivný atraktor*

8. REALIZACE CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ

Schémata uvedená v předchozí kapitole byla realizována na nepájivém poli plošných spojů. Při realizaci je třeba počítat s určitou odchylkou reálného zapojení od zapojení v obvodovém simulátoru. Dochází zde k určitým parazitním jevům (odpor propojovacích drátů a kontaktů, tolerance součástek, ...). Tyto nepříznivé jevy lze jednoduše eliminovat záměnou odporových trimrů za rezistory. Tato substituce je důležitá zejména na pozicích odporů R_{S1} , R_{S2} , R_{S3} , R_{b1} , R_{b2} a R_{b3} z obr.20. Pak je třeba pomocí osciloskopu hledat správnou konfiguraci laděním trimrů a dosáhnout chaotického chování. Pokud se to nepovede je možné nahradit i rezistory R_1 , R_2 a R_3 . Nastavení jednotlivých přenosových prvků S-1, S-2 a S-3 doporučuji volit co nejpřesněji. Rezistory v jednotlivých typech bloků s operačními zesilovači by měli odpovídat co nejpřesněji obvodové simulaci, tím pádem i numerické simulaci.

Hodnoty jednotlivých trimrů jsem volil dvojnásobné oproti původní hodnotě, což je kompromis mezi jemností ladění a rozsahem odporové dráhy trimru.

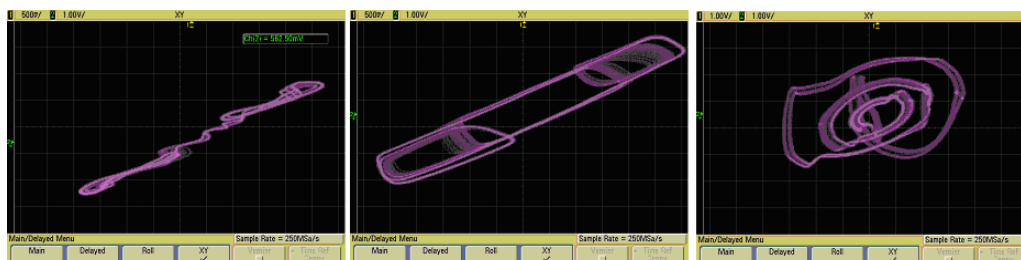
Napájení nelineárního obvodu diodového omezovače lze z pochopitelných důvodů realizovat odporovým děličem, který je napájen společně s integrovanými obvody operačních zesilovačů. V této práci jsem používal operační zesilovače TL 084 CN a analogovou násobičku AD 633AN.

Při ladění se obvykle nejprve objeví cyklické oscilace (obr.30).



Obr. 30: Cyklické oscilace

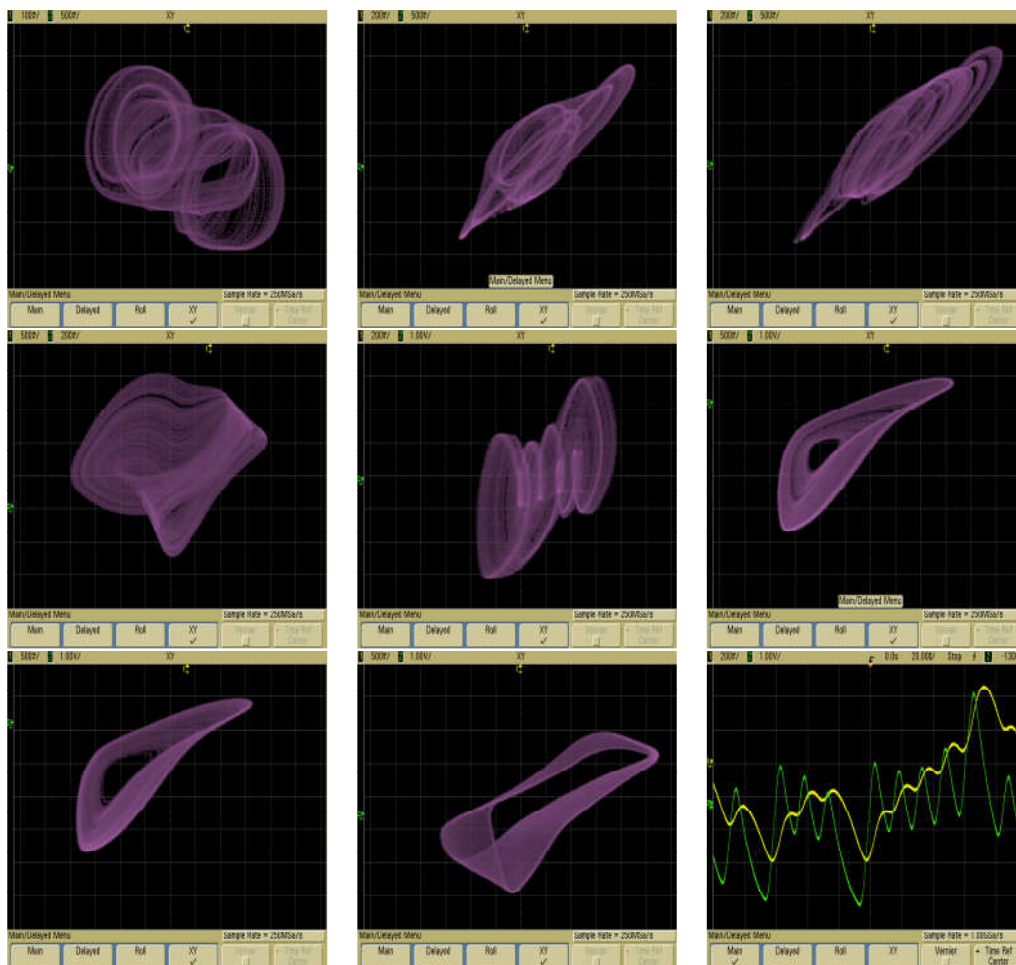
Pak následuje řada přeskoků a mnohdy velmi zvláštních „pletenců“ (obr.31), které jsou již velmi blízké chaotickému chování.



Obr. 31: Přechod cyklických oscilací k chaosu

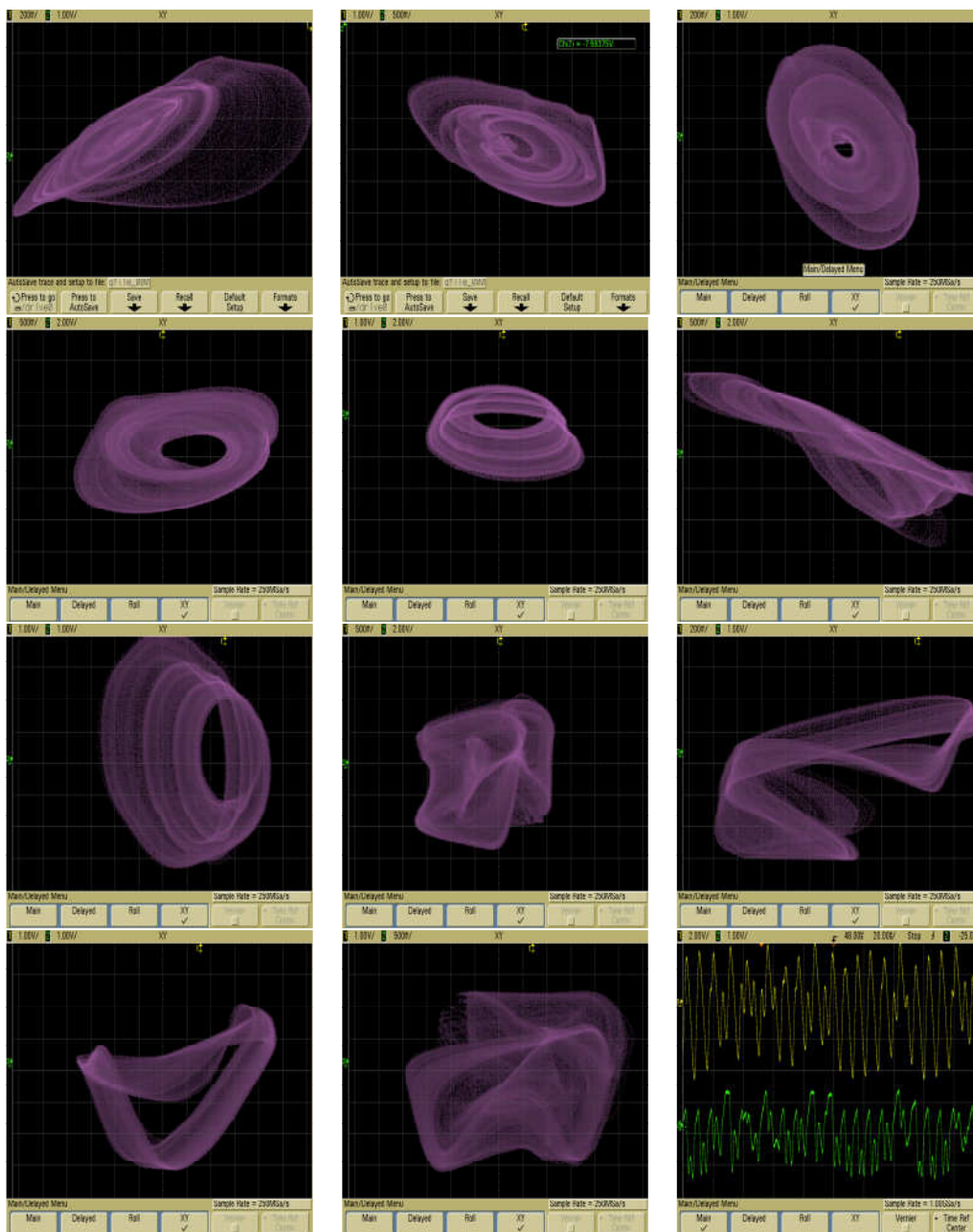
8.1 ROVINNÉ PROJEKCE RC OSCILÁTORU 1

Zachyceny jsou zde dosažené chaotické atraktory v režimu zobrazení X-Y a jeden snímek s časovou základnou.



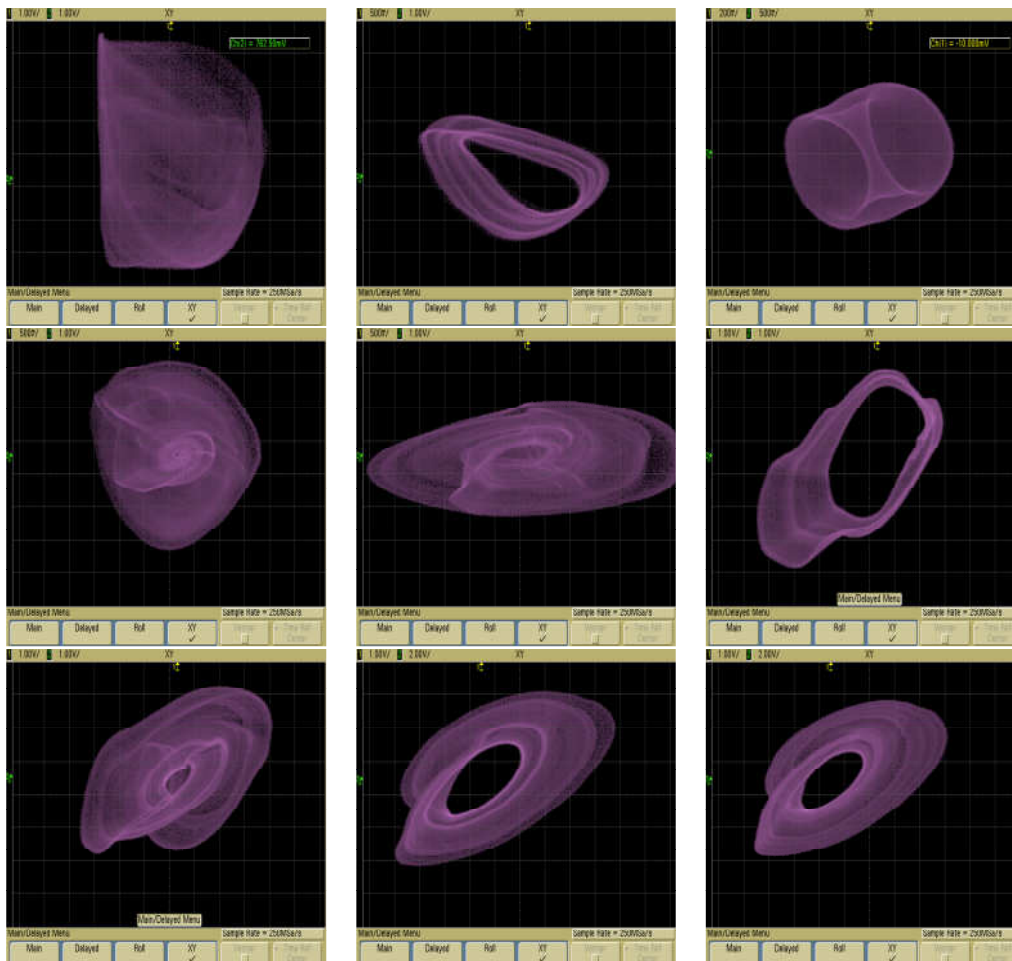
Obr. 32: Rovinné projekce a časový průběh RC oscilátoru 1

8.2 ROVINNÉ PROJEKCE RC OSCILÁTORU 2



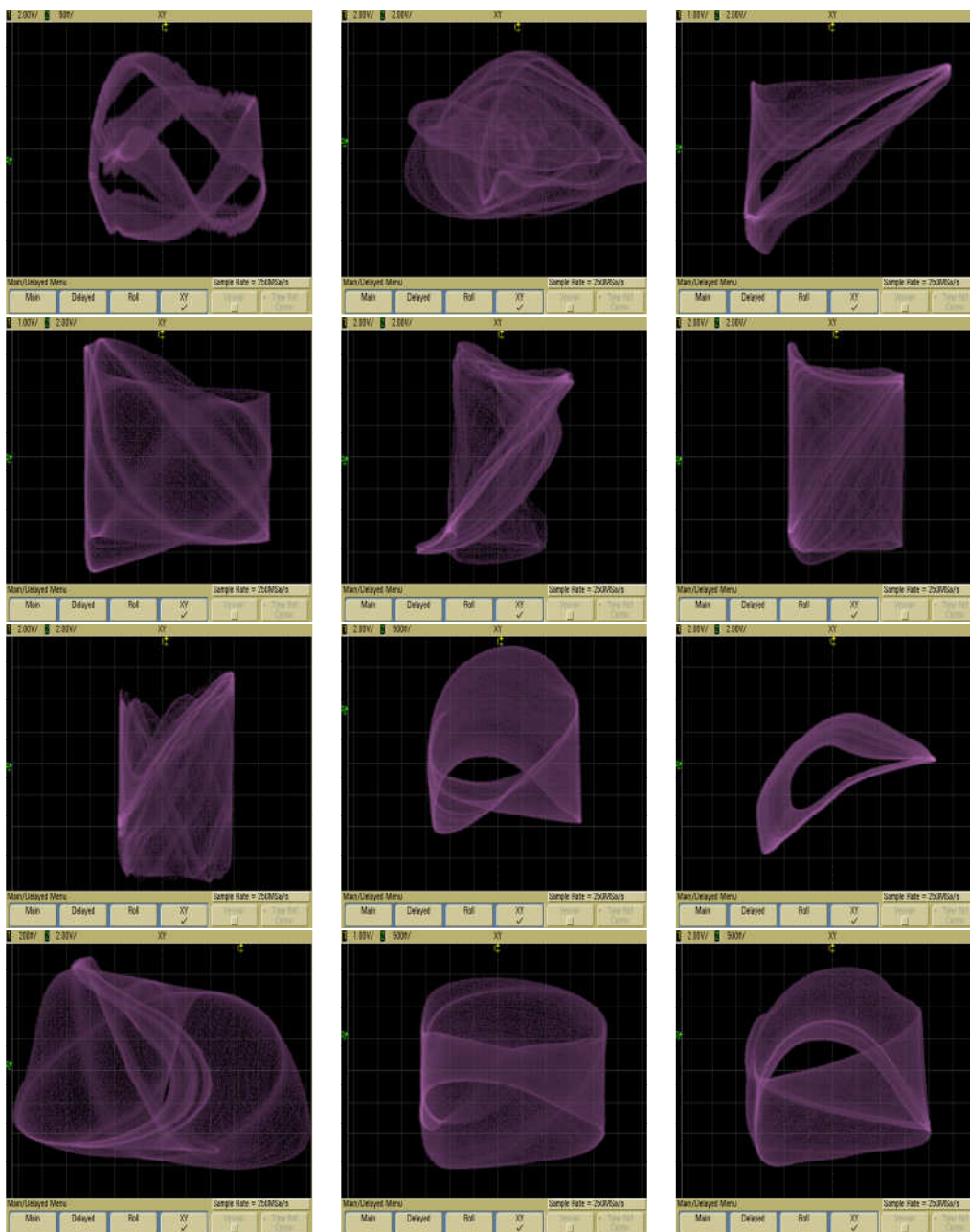
Obr. 33: Rovinné projekce a časový průběh RC oscilátoru 2

8.3 ROVINNÉ PROJEKCE RC OSCILÁTORU 3



Obr. 34: Rovinné projekce RC oscilátoru 3

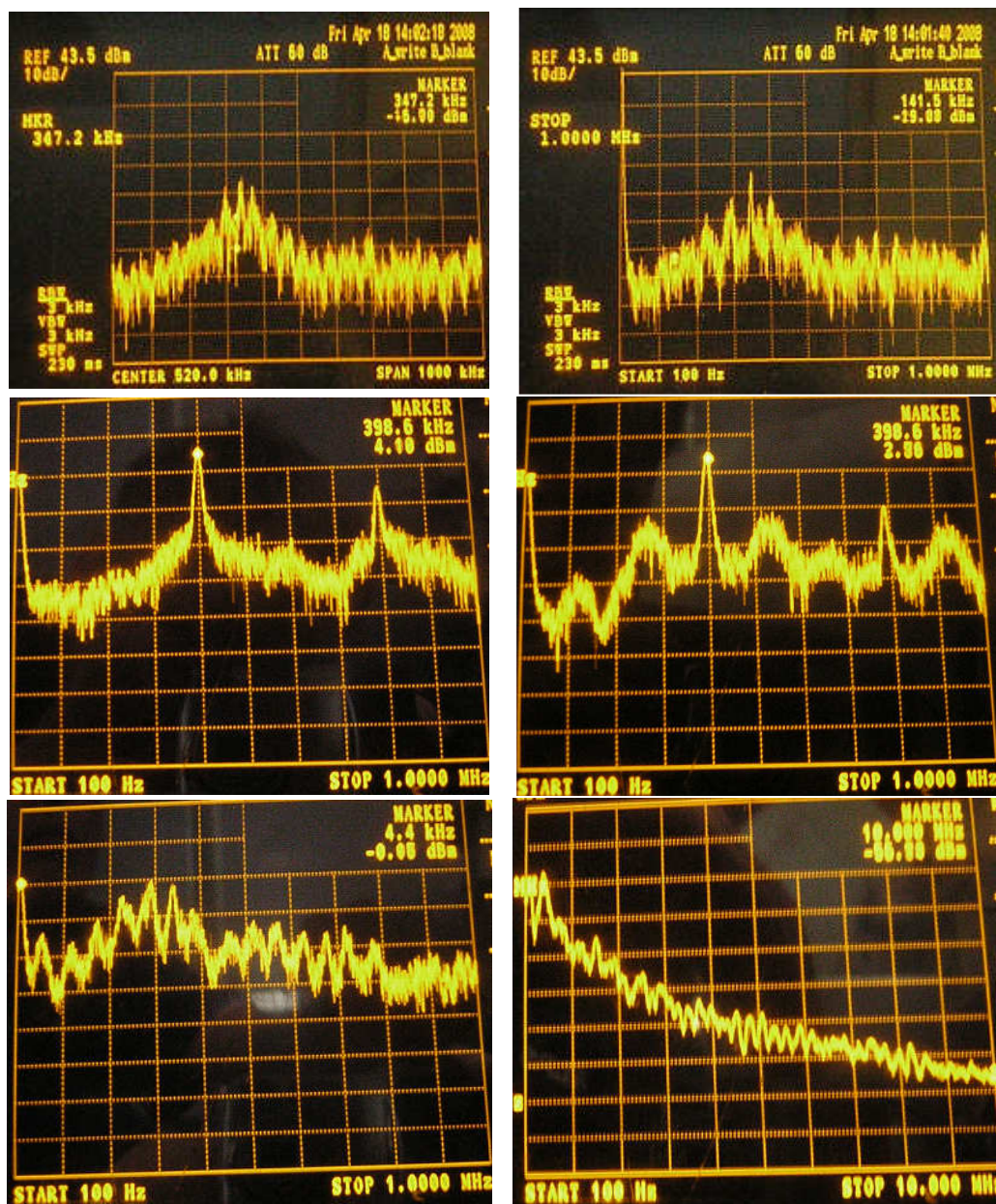
8.4 ROVINNÉ PROJEKCE RC OSCILÁTORU S ANALOVOU NÁSOBIČKOU



Obr. 35: Rovinné projekce RC oscilátoru

8.5 SPEKTRUM CHAOTICKÝCH OSCILÁTORŮ

Spektrum chaotických oscilátorů je velmi široké. Závisí na použité hodnotě kondenzátorů. Zachycení některých spekter je na (obr.36).



Obr. 36: Spektra chaotických oscilátorů

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

Použité měřicí přístroje:

Spektrální analyzátor	Advantest	R 3265A	100Hz 8GHz
Osciloskop	Agilent	MS60 6012A	100MHz, 2GSa/s
Napájecí zdroj	Diametral	P230R51D	2x(0-30)V/5A; 5V/3A

ZÁVĚR

V této práci jsem se seznámil s návrhem elektronického obvodu na základě matematického vyjádření chování dynamického systému. Součástí je popis jednotlivých kroků včetně komentáře. Základem obvodové realizace byl jeden univerzální typ oscilátoru, který je schopen generovat chaotické atraktory. Různé hodnoty, generované numerickou analýzou, obvodových součástek byly dosazovány do tohoto obvodu a následně sestaveny v obvodovém simulátoru. Zachyceny jsou jak obvody, tak jejich rovinné projekce. Následně jsem elektronické obvody fyzicky realizoval. Po doladění do stavu generování chaotického atraktoru, jsem provedl měření v podobě zachycení snímků na oscilátoru a spektrálním analyzátoru.

Jeden typ oscilátoru je schopen v určitém rozsahu hodnot generovat několik typů atraktorů. Tento jev závisí na rozptylu odporové dráhy laděného trimru. Zde lze získat různá řešení soustavy diferenciálních rovnic, která by zůstala při řešení numerickou analýzou navždy skryta. Dalším pozoruhodným jevem je velmi široké frekvenční spektrum, které vyplývá z toho, že chaotické chování postrádá periodu, což je jedna z jeho základních vlastností.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] J. Petržela, S. Hanus, J. Pospíšil. Experimental verification of the system of class C with reduced eigenvalue sensitivity. In *Proceedings of the 15th international conference RADIOELEKTRONIKA 2005*. Brno: FEEC BUT, 2005. s. 9-12. ISBN: 80-214-2904-6.
- [2] PETRŽELA, J. On the Class of Chaos Generators with Single Quadratic Nonlinearity. In *Proceedings RADIOELEKTRONIKA 2004*. Bratislava: FEI STU Bratislava, 2004. s. 5-8. ISBN: 80-227-2017-8.
- [3] PETRŽELA, J., HANUS, S. Universal Structure of RC Oscillator and the Chaos Generation. In *Proceedings of the 5th International Conference ICOSSE 2006*. Puerto de La Cruz (Španělsko): WSEAS, 2006. s. 100-103. ISBN: 960-8457-57-2.
- [4] Kennedy Michael Peter, Three steps to chaos - Part I: Evolution, and Part II: *Chua's Circuit Primer, IEEE Trnas on CAS I, Vol.40No.10,1993,pp.640-674*
- [5] Weiland Siep, *Chaos in the Chua circuit*, Project for the Course on Dynamical System
- [6] Dostál Jiří, *Operační zesilovače*. 1. vydání, BEN, Praha, 2005.
- [7] URL: <<http://www.sweb.cz/chaos.fraktaly/>>[cit. 20.3.2008]
- [8] URL: <<http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/2.htm>>[cit. 20.3.2008]
- [9] URL: <<http://www.hungry-lord.wz.cz/data/Aplikace.php>>[cit. 20.3.2008]

10. OBSAH CD

- Soubory numerické simulace, MathCad
- Soubory obvodové simulace, PSpice
- Bakalářská práce
- Všechny pořízené snímky reálných oscilátorů
- Licenční smlouva