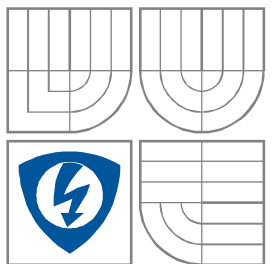


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

REALIZACE MATEMATICKÉHO MODELU CIRKULACE VZDUCHU FORMOU ELEKTRONICKÉHO OBVODU

REALIZATIONS OF MATHEMATICAL MODEL OF WIND TURBULATIONS AS LUMPED ELECTRONIC
CIRCUITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID BÜRGER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: David Bürger
Ročník: 3

ID: 154687
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Realizace matematického modelu cirkulace vzduchu formou elektronického obvodu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami syntézy analogových elektronických obvodů se soustředěnými parametry na základě znalosti matematického modelu reálného dynamického systému. Předpokládejte přitom, že je tento systém popsán soustavou obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu. Navrhněte různé obvodové realizace modifikovaného Lorenzova systému a ověřte jejich správnou činnost v obvodovém simulátoru. Varianty realizací volte tak, aby bylo možné variabilní parametry měnit jak potenciometry tak například externími zdroji dc napětí.

Vámi navržené struktury oscilátorů prakticky realizujte a ověřte laboratorním měřením. Při konstrukci se zaměřte i na designovou stránku finálního zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PETRŽELA, J. Teorie elektronických obvodů. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.

[2] PETRŽELA, J., HRUBOŠ, Z., GOTTHANS, T. Modeling deterministic chaos using electronic circuits. Radioengineering, vol. 20, no. 2, 2004.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá implementací matematického modelu známého jako modifikovaný Lorenzův systém, a to formou elektronického obvodu se soustředěnými parametry. Dynamický systém je autonomní, deterministický a je popsán soustavou tří obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu. Cílem je dosažení tří různých realizací, z nichž každá má specifické vlastnosti. V prvním případě se jedná o kanonickou realizaci ve smyslu integrátorového blokového schématu a interní parametry systému jsou nastavovány třemi potenciometry. Druhé zapojení představuje modifikaci směrem k nezávislému nastavování všech parametrů systému a tím k možnosti sledování vlivu těchto parametrů na dynamickou evoluci řešení modelu. Poslední obvod, na rozdíl od obou předchozích, pracuje v čistě proudovém režimu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lorenzův systém, MLT04, AD633, TL084, TL082, AD844, EL4083, EL2082, podivné atraktory, chaos

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with implementation of the mathematical model known as modified Lorenz system as an electronic circuit with lumped parameters. Dynamical system is autonomous, deterministic and is described by a set of first-order ordinary differential equations. Our aim is to derive three different circuitry realizations each having specific properties. In the first case realization is canonical in the sense of the integrator block conception where the internal system parameters are adjusted by three potentiometers. Second realization represents modification towards independent adjustment of all four system parameters and, consequently, to tracing dynamical evolution of model solution. Last oscillator, on the contrary to previous circuits, work in current mode rather than voltage regime.

KEYWORDS

Lorenz system, MLT04, AD633, TL084, TL082, AD844, EL4083, EL2082, strange attractors, chaos

BÜRGER, D. *Realizace matematického modelu cirkulace vzduchu formou elektronického obvodu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 50 s., 6 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Realizace matematického modelu cirkulace vzduchu formou elektronického obvodu 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Petrželovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a zvláště odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Úvod	1
1 DYNAMICKE SYTÉMY	2
1.1 Reálné dynamické systémy.....	2
1.2 Definice dynamického systému.....	3
1.3 Atraktor dynamického systému.....	3
1.4 Chaotický atraktor.....	3
1.5 Podivný atraktor.....	3
2 METODY SYNTÉZY	4
2.1 Syntéza založena na integrátorové blokové struktuře.....	4
2.2 Klasická syntéza.....	7
3 MODIFIKOVANÝ LORENZŮV SYTÉM	10
4 REALIZACE LORENZOVA DYNAMICKEHO SYSTÉMU	12
4.1 Základní realizace.....	12
4.2 Realizace Lorenzova dynamického systému MLT04.....	16
4.3 Realizace Lorenzova dynamického systému AD633.....	19
5 REALIZACE LORENZOVA DYNAMICKEHO SYSTÉMU V PROUDOVÉM REŽIMU	22
5.1 Řízené zdroje.....	22
5.2 Zapojení s AD844.....	25
5.3 EL4083 a EL2082.....	28
6 Závěr	32
Literatura	33
seznam symbolů, veličin a zratek	34
A.1 Obvodové zapojení chaotického oscilátoru v napěťovém režimu.....	35
A.2 Deska plošného spoje chaotického oscilátoru v napěťovém režimu – top (strana spojů).....	37

A.3	Deska plošného spoje chaotického oscilátoru v napěťovém režimu – bottom (strana spojů)	37
A.4	Osazovací plán chaotického oscilátoru v napěťovém režimu – top (strana součástek)	38
A.5	Obvod modelující modifikovaný Lorenzův systém, klasická montáž....	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1	Integrační sumační zesilovač	5
Obr. 2.2	Invertující sumační zesilovač.....	5
Obr. 2.3	diferenční zesilovač	6
Obr. 2.4	Realizace systémů: a) rozvoj admitance na řetězový zlomek, b) realizace nelineárního oscilátoru.....	8
Obr. 2.5	Zapojení Chuaova oscilátoru	9
Obr. 3.1	Chaotické atraktory modifikovaného Lorenzova systému, parametry {A,B,C,D} a) {1,4,8,1}, b) {1.3,5,7,2}, c) {0.25,4,8,1}, d) {0.3,-6,12,6}, e) {0.12,12,6,-1.6}, f) {1.25,4,1.21,-1}	11
Obr. 4.1	Schéma zapojení první realizace Lorenzova dynamického systému.....	13
Obr. 4.2	Schéma zapojení druhé ekvivalentní realizace Lorenzova systému, aktivním prvkem MO-DDVCC	14
Obr. 4.3	Časová analýza první realizace Lorenzova dynamického systému	14
Obr. 4.4	Zobrazení atraktoru první realizace Lorenzova dynamického systému v ose x	15
Obr. 4.5	Zobrazení atraktoru první realizace Lorenzova dynamického systému v ose y	15
Obr. 4.6	Zobrazení atraktoru první realizace Lorenzova dynamického systému v ose z	15
Obr. 4.7	Zobrazení spektra první realizace Lorenzova dynamického systému	16
Obr. 4.8	Zapojení Lorenzova dynamického systému analogovou násobičkou MLT04	17
Obr. 4.9	Časová analýza Lorenzova dynamického systému s MLT04.....	17
Obr. 4.10	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s MLT04 v ose x	18
Obr. 4.11	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s MLT04 v ose y	18
Obr. 4.12	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s MLT04 v ose z	18
Obr. 4.13	Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s MLT04	19
Obr. 4.14	Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému s analogovou násobičkou AD633	20
Obr. 4.15	Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému s násobičkou AD633	20

Obr. 4.16	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s AD633 v ose x	21
Obr. 4.17	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s AD633 v ose y	21
Obr. 4.18	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s AD633 v ose z	21
Obr. 4.19	Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s AD633.....	22
Obr. 5.1	Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému s ideálními řízenými zdroji	23
Obr. 5.2	Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému s ideálními řízenými zdroji.....	23
Obr. 5.3	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s řízenými zdroji v ose x	24
Obr. 5.4	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s řízenými zdroji v ose y	24
Obr. 5.5	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s řízenými zdroji v ose z	24
Obr. 5.6	Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s ideálními řízenými zdroji.....	25
Obr. 5.7	Analogické zapojení konvejeoru a řízených zdrojů	25
Obr. 5.8	Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému s kovejorem CCII+	26
Obr. 5.9	Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému s konvejorem CCII+	26
Obr. 5.10	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s konvejorem v ose x	27
Obr. 5.11	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s konvejorem v ose y	27
Obr. 5.12	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s konvejorem v ose z	27
Obr. 5.13	Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s konvejorem CCII+	28
Obr. 5.14	Analogické zapojení zpětného konvejeoru a řízených zdrojů.....	29
Obr. 5.15	Analogické zapojení pro čtyřkvadrantovou násobičku EL4083	29
Obr. 5.16	Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému v proudovém režimu	29
Obr. 5.17	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s jednou EL4083 v ose x.....	30
Obr. 5.18	Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému v	

	proudovém režimu	30
Obr. 5.19	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému proudový režim ose x	30
Obr. 5.20	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému proudový režim ose y	31
Obr. 5.21	Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému proudový režim ose z	31
Obr. 5.22	Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému v proudovém režimu	31

ÚVOD

Tato práce se zabývá realizací chaotických oscilátoru modifikovaného Lorenzova systému za předpokladu, že je tento systém popsán soustavou diferenciálních rovnic prvního řádu. Velké množství diferenciálních rovnic je nelineární a jejich chování můžeme popisovat prostřednictvím matematických modelů. Tato soustava diferenciálních rovnic se správným nastavením parametrů simuluje pomocí matematického modelu proudění vzduchu v atmosféře. Tyto tři diferenciální rovnice prvního řádu jsou nejlepším nástrojem pro modelování deterministických dynamických systému ve formě analogového elektronického obvodu.

Hlavním cílem je realizace tohoto modifikovaného Lorenzova systému ve formě analogového elektronického obvodu prostřednictvím integrátorového blokového schématu. Varianty realizací budou celkem tři. Dvě v napěťovém režimu a jedna realizace v proudovém režimu řízena externím zdrojem proudu. První napěťová realizace bude ovládána třemi parametry, které budou představovat potenciometry nebo externí zdroje DC napětí. Další realizace bude ovládána čtyřmi parametry, které na sobě budou zcela nezávislé což je změna oproti předchozímu obvodu. Poslední realizace bude na rozdíl od dvou předchozích realizací pracovat v čistě proudové režimu. Tato realizace by se dala pojmout jako analogické zapojení obvodu, který je řízen čtyřmi na sobě nezávislými parametry v napěťovém režimu. Realizace chaotického oscilátoru v proudovém režimu by měla být zcela něčím novým co ještě nebylo publikováno.

Chaotický oscilátor musíme brát jako velice citlivé řešení dynamického deterministického systému na nepatrnou změnu počátečních podmínek. Deterministický dynamický systém neuvažuje nejistoty a proto je velice dobře popsitelný a v hodný k realizaci elektronických obvodů. Výstupem chaotického oscilátoru je atraktor, který bude chaotický, ale přestože je chaotický může vykazovat určité pravidelnosti.

Hlavní cíl práce je navrhnout tři chaotické oscilátory taky aby každý byl realizován jinak nebo alespoň aby byli využity jiné součástky pro názorné předvedení, že dynamický deterministický systém je možno realizovat mnoha způsoby. A konečným výstupem práce bude deska plošných spojů, která by měla obsahovat tyto chaotické oscilátory.

1 DYNAMICKÉ SYSTÉMY

Dynamické systémy použijeme všude tam, kde potřebujeme vyjádřit dynamické chování, to znamená určitou změnu stavu systému v čase. Systém je složen z abstraktního stavového prostoru jeho souřadnice popisují stav systému v jakémkoliv časovém okamžiku, které řídí jeho chování v budoucnosti. Dynamický systém je autonomní, deterministický a je popsán soustavou diferenciálních rovnic, jež popisují tuto změnu [1]. Dále se používají k realizování reálných fyzikálních dějů, které vedou ke snadné realizaci elektronického obvodu.

1.1 Reálné dynamické systémy

Velké množství těchto systému lze popsat diferenciálními rovnicemi, které jsou nelineární. U těchto systémů potom pozorujeme chování prostřednictvím jejich matematických modelů. Základem u těchto systému je předpokládat, že vnitřní stavy namodelovaného systému mohou být konečným počtem veličin. V technické praxi se velmi často setkáme s linearizovanými modely. Tyto linearizované modely mají spoustu výhod jak je uvedeno v [3]. Pokud chceme studovat složitější systémy, linearizované modely se již nadále nedají použít. Při detailnějším zkoumání vlastností složitějších systémů bylo vyzorováno, že v různých odvětvích vědy a techniky se k řešení využívá podobných matematických modelů, které se mohou lišit pouze nepatrně jako např. (stavovými proměnnými, fyzikálním významem) [1]. Důkazem těchto tvrzení mohou být Lorenzovy rovnice [6] (1.1),

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= x(r - z) - y \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz\end{aligned}\tag{1.1}$$

kde σ je Prandtlovo (podobnostní) číslo a r Rayleighovo (redukované) číslo. Tyto rovnice byly původně určeny k modelování proudění vzduchu.

Chaos bychom mohli ztotožnit s vysokou citlivostí k řešení dynamického systému na nepatrnou změnu počátečních podmínek. S touto vlastností se velice často můžeme setkat u modelů popisujících reálné fyzikální děje. Je velice důležité rozlišovat jestli se jedná o vlastnost ustáleného dynamického chování nebo přechodný jev. Vysoká citlivost na počáteční podmínky je základní, ne-li však dostačující podmínkou pro vyhodnocení stavového atraktoru jako chaotického.

1.2 Definice dynamického systému

Dynamický systém je definován pomocí dynamických podmínek, které popisují změnu tohoto systému v čase. Stav systému v libovolném časovém okamžiku je popsán vektorem, který leží ve stavovém prostoru [3]. Dynamické podmínky jsou většinou zadány soustavou diferenciálních rovnic a nahrazením starého vektoru vektorem novým.

Dynamický systém může být deterministický nebo stochastický. Deterministický dynamický systém neuvažuje nejistotu na vstupech, dynamická soustava je uzavřená bez respektování pravděpodobností a jiných stochastických procesů. Tím pádem je poměrně přesně popsatelná, zatímco při popisu stochastického systému jsme odkázáni pouze na statistické vlastnosti takového systému (např. střední hodnota, disperse, směrodatná odchylka aj.)

1.3 Atraktor dynamického systému

Atraktor je podmnožinou stavového prostoru, ve kterém se systém nachází v čase $t \rightarrow \infty$ dynamický systém do tohoto stavu směřuje [1]. Jeden dynamický systém může mít více než jeden atraktor, vývoj konkrétních atraktorů tudíž závisí na počátečních podmínkách.

1.4 Chaotický atraktor

Chaotický atraktor znamená to, že výsledný atraktor nelze v podstatě nijak dopředu předpovědět. To je způsobeno tím, že je systém velmi citlivý na počáteční podmínky. Chaotičnost v tomto případě neznamená náhodnost, jelikož se bavíme o deterministických systémech. Tento jev bývá popisován příkladem, koule postavená na vrcholku jehlanu. Jakýkoliv vnější podnět způsobí, že koule tento stav opustí a dostane se do některého atraktoru (místa pod jehlanem) [2]. Tento atraktor nelze předpovědět, protože nemůžeme bez zásahu do měření zjistit počáteční podmínky.

1.5 Podivný atraktor

Podivný atraktor je nejzajímavějším případem atraktoru. 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 (nejsožitější geometrické tvary s jednoduchou matematickou strukturou [2]).

2 METODY SYNTÉZY

Syntéza elektronických obvodů je mnohoznačnou úlohou. Platí to hlavně u návrhu struktury a hodnot obvodových prvků chaotických oscilátorů. Výchozí je vždy znalost matematického modelu dynamického systému formou diferenciálních rovnic [5]. Jednotlivé metody vytvoření výsledného obvodu se liší, v praxi však převládají dva univerzální postupy. V této práci se používá metoda integrovaného obvodu. Klasická syntéza je zde popsána pro srovnání.

První z nich vychází z integrátorového blokového schématu. Jeho výhoda je jednoduchost, chaotický oscilátor je složen pouze ze čtyř funkčních bloků. Je to integrační sumační zesilovač, diferenční sumační zesilovač, invertující operační zesilovač a analogová násobička. Tyto jednotlivé stavové proměnné jsou tedy snadno měřitelné a také většina současných aktivních prvků pracuje se vstupními a výstupními napětími.

Druhý postup bývá označován jako klasická syntéza a jejím principem je realizace složená z paralelní kombinace nelineárního dvojpólu a lineární admitance odpovídající řádu. Výhoda této metody spočívá v minimalizaci počtu obvodových prvků, a to pasivních i aktivních.

2.1 Syntéza založena na integrátorové blokové struktuře

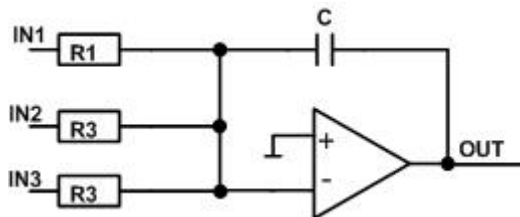
Obvodová realizace chaotického oscilátoru vychází z integrátorového blokového schématu. Obvod je určen časovou konstantou,

$$\tau = RC \text{ [s]} \quad (2.1)$$

kde R představuje hodnotu rezistoru a C je kapacita kondenzátor a τ je časová konstanta.

Tato konstanta je společná pro všechny integrátory. V zapojení na obrázku viz (Obr. 4.8), zde tvoří časovou konstantu odpory R_{11} , R_{12} a R_{17} společně s kondenzátory C_1 , C_2 , C_3 . Integrátorová metoda zde byla složena za použití čtyř základních funkčních bloků, kterými jsou integrační sumační zesilovač, invertující zesilovač, analogová násobička a diferenční zesilovač. Za pomoci těchto bloků a jejich obvodových rovnic jsme schopni navrhnout obvod podle předložených diferenciálních rovnic (3.1).

Integrační sumační zesilovač (Obr. 2.1) slouží jak už je vidět z názvu k integraci a zároveň sumaci kterou potřebujeme při vypočítání diferenciálních rovnic. Je tvořen operačním zesilovačem, který má na vstupu odpor a ve zpětné vazbě kondenzátor a ke vstupu mohou být připojeny další prvky přes odpor (zachování časové konstanty) tím je zavedena sumace. Jak je známo z teorie elektronických obvodů, když přivedeme na vstup například skokové proměnný signál tak na výstupu získáme tvar trojúhelníku.

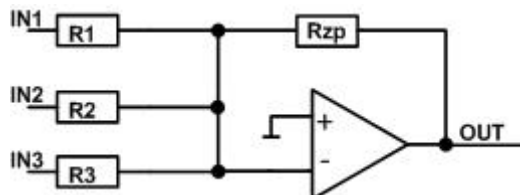


Obr. 2.1 Integrační sumační zesilovač

Další blok je invertující sumační zesilovač který, obrací fázi o 180°. Je popsán matematicky rovnicí (2.2). Poměr odporů udává míru zesílení výstupu.

$$U_{out} = - \left(\frac{R_{zp}}{R_1} U_1 + \frac{R_{zp}}{R_2} U_2 + \frac{R_{zp}}{R_3} U_3 \right) \quad (2.2)$$

Kde U_{out} je výstupní napětí R_1 , R_2 a R_3 vstupní odpory R_{zp} odpor ve zpětné vazbě a U_1 , U_2 a U_3 jsou vstupní napětí, mínus značí invertování výstupu.



Obr. 2.2 Invertující sumační zesilovač

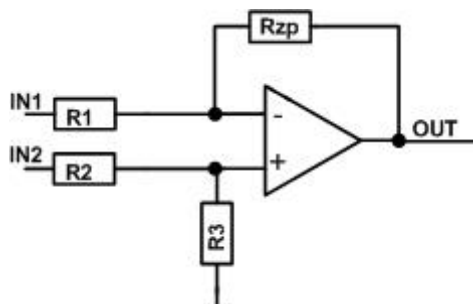
Třetím blokem je diferenční zesilovač, který se velmi často používá pro sledování dvou napětěových signálů. Výstupní napětí je rovné rozdílu napětí na vstupech operačního zesilovače. Operační zesilovač zesiluje rozdíl vstupních napětí U_2 je dáno odporovým děličem (2.4). Diferenční zesilovač je popsán matematicky (2.3),

$$U_{out} = \frac{R_{zp}}{R_1} (U_{2out} - U_1) \quad (2.3)$$

kde U_{out} je výstupní napětí R_{zp} je zpětnovazební odpor R_1 je vstupní odpor U_1 a U_{2out} vstupní napětí.

$$U_{2out} = \frac{R_3}{R_3 + R_2} U_{2in} \quad (2.4)$$

Kde U_{2out} je výstupní napětí z děliče R_3 , R_2 jsou odpory a U_{2in} vstupní napětí do děliče.



Obr. 2.3 diferenční zesilovač

Zapojení uvedená výše viz (Obr. 2.1, Obr. 2.2, Obr. 2.3) se používají pro výpočet lineárního vektorového pole.

Jako další bloky jsou využity dvě analogové násobičky jedna je čtyřkanálová čtyřkvadrantová analogová násobička MLT04 a druhá je čtyřkvadrantová analogová násobička AD633. První MLT04 má čtyři nezávislé kanály. Každý tento kanál pracuje podle přenosové funkce (2.5). Rozsah hodnot, kterých dané parametry mohou dosahovat jsou dostatečně široké, aby bylo možné obvodem modelovat mnoho jevů, chaotických atraktorů. A proto nejlepší způsob jak provést realizaci nelineární funkce je použít MLT04 nebo AD633.

$$W_i = 0.4 \times X_i \times Y_i \quad (2.5)$$

Kde W představuje výstup a X, Y představují vstupy. Za pomoci této rovnice můžeme prakticky realizovat člen rovnice jako je y^2 a součiny, čímž se velice zjednoduší realizace.

Další násobička AD633 pracuje velice podobně jako MLT04, pouze pracuje s jinou přenosovou funkcí (2.6),

$$W = \frac{(X_1 + X_2) \times (Y_1 + Y_2)}{10V} + Z \quad (2.6)$$

kde W představuje výstup a X, Y a Z představují vstupy. Tyto dva bloky se používají pro realizace nelineárního vektorového pole.

2.2 Klasická syntéza

Jednou z možností je realizovat lineární část vektorového pole pomocí admitančních funkcí vyššího řádu. Předpokládejme vstupní funkci třetího řádu zapsané formou lomené funkce. Tuto funkci lze realizovat lineárními rezistory, kapacitou a indukčností.

$$Y(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (2.7)$$

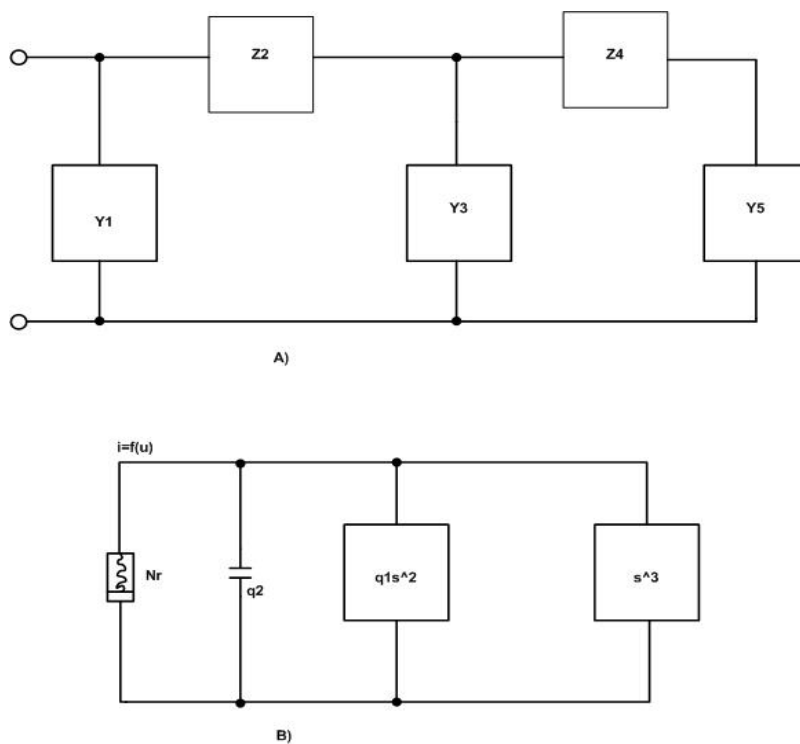
Kde $I(s)$ a $U(s)$ je Laplaceova transformace proudu a napětí (2.7) [5]. Z metody uzlových napětí plyne, že $Y(s)$ se může lišit pouze o jedna. Dále můžeme využít Cramerovo pravidlo determinantu. Po úpravě vzorce (2.7) prepíšeme do podoby

$$s^n + \left(a_{n-1} + \frac{G_k}{K}\right)s^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} \left(a_i + \frac{G_k}{K} a_i\right) = 0, \quad (2.8)$$

odkud pro $n=3$ se vyjádří návrhové vztahy. G_k značíme vodivost v k -tém segmentu funkce. $K=C_1=1$ tento koeficient volíme s ohledem na impedanční normování. Každá realizace poté vede na paralelní zapojení kapacitoru s rezistorem. Admitanční funkci $Y(s)$ dále realizujeme formou elektronického obvodu rozvojem na řetězový zlomek (2.9),

$$Y(s) = Y_1(s) + \frac{1}{Z_2 + \frac{1}{Y_3(s) + \dots}}, \quad (2.9)$$

samozřejmě dále může být rozšířen použitím opakovaného dělení nebo požitím parciálních zlomků. Vzhledem k tomu, že chaotický systém má jeden nebo více nevyvážených stavů, které jsou reprezentovány a_i nebo b_i tak tato metoda syntézy vede k vytváření negativních rezistorů, kondenzátorů, tlumivek nebo frekvenčně závislých rezistorů. Toto neplatí u každého chaotického oscilátoru.



Obr. 2.4 Realizace systémů: a) rozvoj admitance na řetězový zlomek, b) realizace nelineárního oscilátoru

Například Chuaův oscilátor. Zde může být operátor považován v čase jako derivát a poté uvažujeme o dvojpólu.[7]

$$\begin{aligned}
 \frac{d_{v_1}}{d_t} &= \frac{1}{C_1} [G(v_2 - v_1) - f_{v_1}] \\
 \frac{d_{v_2}}{d_t} &= \frac{1}{C_2} [G(v_1 - v_2) - i_3] \\
 \frac{d_{i_3}}{d_t} &= -\frac{1}{L} [v_2 + R_0 i_3]
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

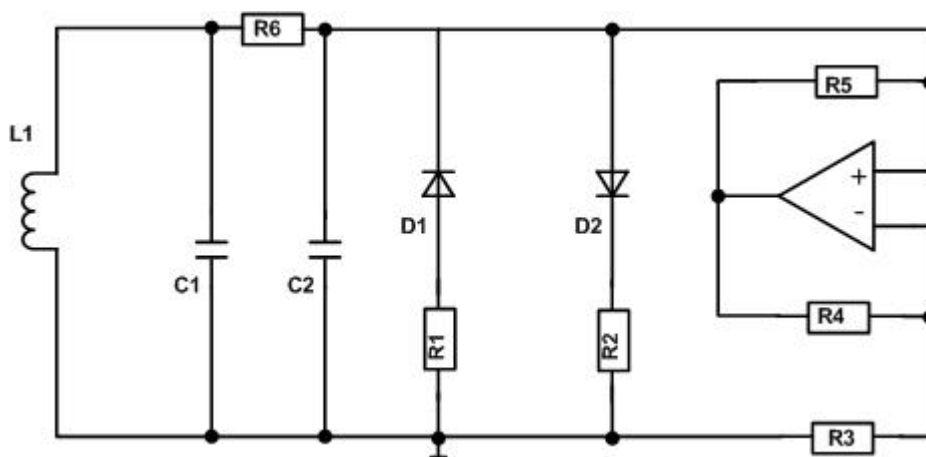
Kde $G=1/R_6$ a v_2, v_1 udává náboje na kondenzátorech C_1 , C_2 a L je indukčnost

Změnou proměnných ve stavových rovnicích Chuaova oscilátoru lze transformovat rovnice do následujícího tvaru.

$$\begin{aligned}
\frac{d_x}{d_\tau} &= k\alpha[y - x - f_{(x)}] \\
\frac{d_y}{d_\tau} &= k(x - y + z) \\
\frac{d_z}{d_\tau} &= k(-\beta_y - \gamma_z) \\
f_{(x)} &= bx + \frac{1}{2}(a - b)\{|x + 1| - |x - 1|\}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Kde

$$\begin{aligned}
x &= \frac{v_1}{E}, & y &= \frac{v_2}{E}, & z &= i_3 \left(\frac{R}{E} \right) \\
\alpha &= \frac{C_2}{C_1}, & \beta &= \frac{R^2 C_2}{L}, & \gamma &= \frac{RR_0 C_2}{L} \\
a &= RG_a, & b &= RG_b, & \tau &= \frac{t}{|RC_2|}, \\
k &= 1 \quad \text{pokud } RC_2 \geq 0 \\
k &= -1 \quad \text{pokud } RC_2 \leq 0
\end{aligned}
\tag{2.12}$$



Obr. 2.5 Zapojení Chuaova oscilátoru

3 MODIFIKOVANÝ LORENZŮV SYSTÉM

Diferenciální rovnice popisující modifikovaný Lorenzův systém můžeme zapsat jako soustavu tří diferenciálních rovnic prvního řádu

$$\dot{x} = -ax - y^2 - z^2 + ab, \dot{y} = x(y - cz) + d, \dot{z} = -z + x(cy + z) \quad (3.1)$$

Kde a, b, c, d jsou parametry, které nabývají reálných hodnot. Za použití numerické integrace.

Výpočetní operace byla provedena v programu Mathcad.

$$E(t, x) = \begin{pmatrix} -A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + B \times x_0 \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + x_1 \times \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$+ x_2 \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A \times C \\ D \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

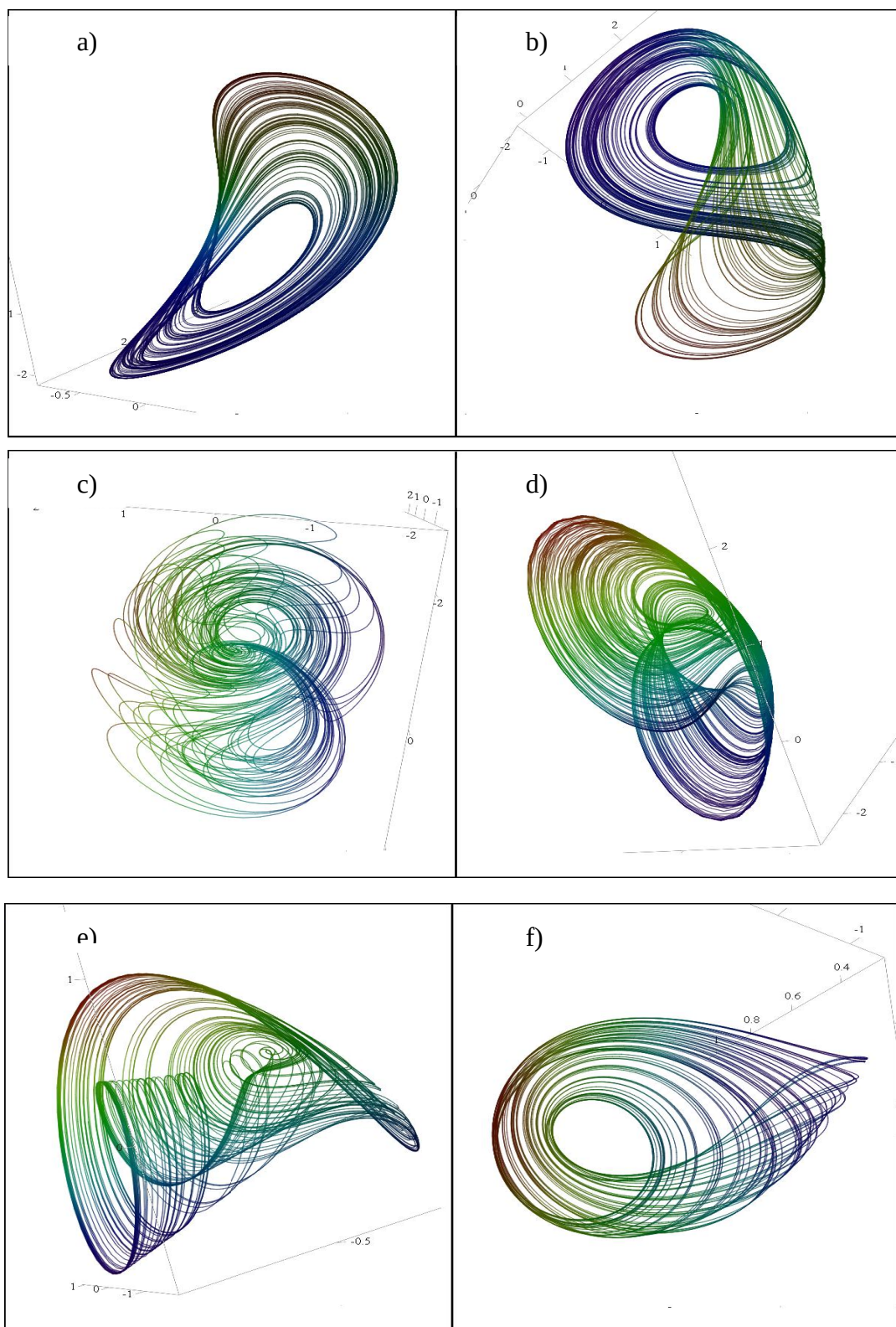
$$F(t, x) = T \times \begin{pmatrix} -A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times T^{-1} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + B \times (T^T)^{<0> \times T} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times T^{-1} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$+ (T^T)^{<1> \times T} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times T^{-1} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + (T^T)^{<2> \times T} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times T^{-1} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

$$+ T \times \begin{pmatrix} A \times C \\ D \\ 0 \end{pmatrix}$$

Kde A, B, C a D jsou nastavované parametry. Matice T jednotková matice na hlavní diagonále jedničky jinak nuly. T^{-1} je transformovaná matice a T^T je transponovaná rovnice.

Matice T zde představuje lineární transformaci souřadnic systému. Originální dynamický deterministický systém se dostane do potřebného stavu za podmínky, že matice T je rovna jednotkové matici. Transpozicí matice se myslí výměna řádků a sloupců (matice o dvou řádcích a třech sloupcích se stane maticí o třech řádcích a dvou sloupcích). Za pomoci této numerické integrace v souvislosti se změnou parametrů matematického modelu (Obr. 3.1) je vyobrazena numerická integrace chaotických atraktorů Lorenzova dynamického systému. Počet těchto trajektorií není kompletní, zde jsou shrnuty pouze ty, které byly vypočítány. Chaotické atraktory se také objeví za podmínek že $a \neq 0 \wedge b \neq 0 \wedge c \neq 0$.



Obr. 3.1 Chaotické atraktory modifikovaného Lorenzova systému, parametry $\{A,B,C,D\}$
a) $\{1,4,8,1\}$, b) $\{1.3,5,7,2\}$, c) $\{0.25,4,8,1\}$,
d) $\{0.3,-6,12,6\}$, e) $\{0.12,12,6,-1.6\}$, f) $\{1.25,4,1.21,-1\}$

4 REALIZACE LORENZOVA DYNAMICKÉHO SYSTÉMU

Doposud zde byly uváděny pouze teoretické příklady jak realizovat dynamické systémy. Nyní přejdeme z teorie do praktičtější části. Návrhů a simulací.

4.1 Základní realizace

U syntézy nelineárních dynamických systémů můžeme říci, že u jakékoliv vytvořené realizace existuje i její duální verze, která pracuje v proudovém režimu [5]. Simulování se provádělo ve vhodném nástroji pro ověření činností každého zapojení časovou analýzou v rámci obvodového simulátoru Orcad Pspice.

První realizace dynamického systému je demonstrována viz (Obr. 4.1). Tato simulace prokázala, že alternativní vektorové pole oddělující obě strany spirály nebude narušena ani mírnou modifikací rovnice (4.1). Toto zapojení také ukazuje motýlovitý chaos, který je dán Lorenzovým dynamickým systémem. viz. (Obr. 4.4),

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ -x(1-r+z) \\ xy \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

kde σ , b , r jsou parametry systému. Typické řešení chaotické rovnice se dá očekávat při $\sigma=10$, $b=8/3$ a $r=28$.

Po modifikaci odpovídající atraktor bude mít stejnou, ale redukovanou topologii [5]. Této realizace bylo dosaženo pouze se dvěma násobičkami AD633 a pasivními součástkami bez použití jakýchkoliv jiných aktivních prvků.

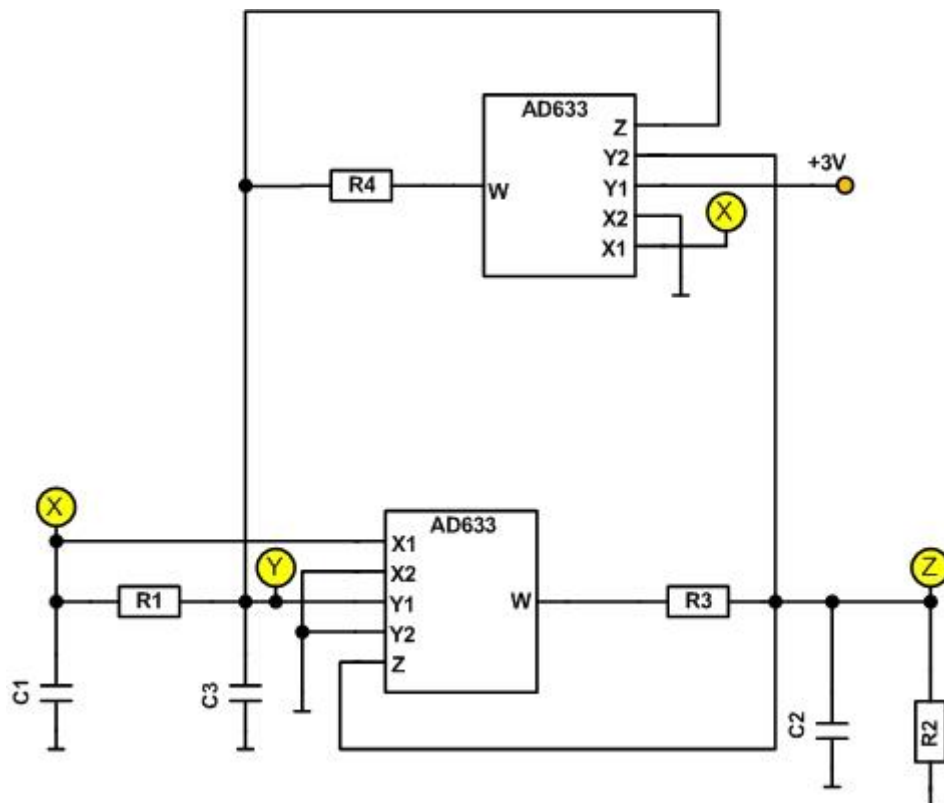
Druhá realizace dynamického systému již zcela odpovídá matematickému modelu. Je to realizace MO-DDVCC. MO znamená multiple output přes dva G zdroje (zdroj proudu řízený napětím), DD diferenciálně diferenční tzn. že nejdříve sečteme pomocí součástky SUM dvě napětí a dále blokem DIF je sečtené napětí odečteno od třetího napětí názorněji rovnicí (4.2).

$$U_v = U_1 + U_2 - U_3 \quad (4.2)$$

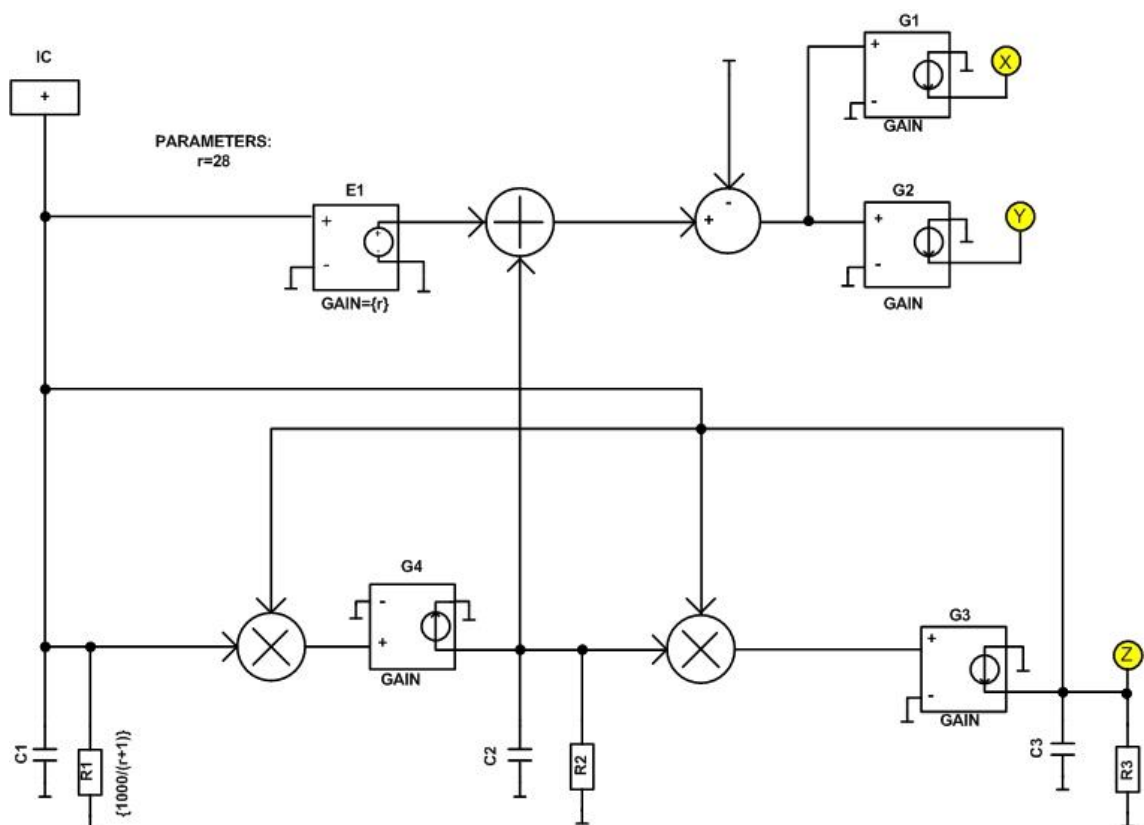
kde U_v značí výstupní napětí, U_1 a U_2 součet napětí součástkou SUM a U_3 je rozdílové napětí v u součástky DIF.

CC značí current conveyor. Využíváme zde ideálního násobení, které je spojeno s převodem napětí na proud. Parametr r je do obvodu zaveden pomocí pseudosoučástky PARAM. Obvodové zapojení systému viz. (Obr. 4.2). Toto obvodové zapojení je příkladem realizace formou paralelního rezonančního obvodu podle lineární části vektorového pole. Proud induktorem je druhá stavová proměnná. Ztrátovost cívky, která je realizována sériovým rezistorem vnáší do druhé diferenciální rovnice chybovost, která by mohla způsobit deformaci či dokonce destrukci stavového atraktoru [4]. Tuto chybu lze minimalizovat zavedením zdroje IDC do obvodu. Tento zdroj má

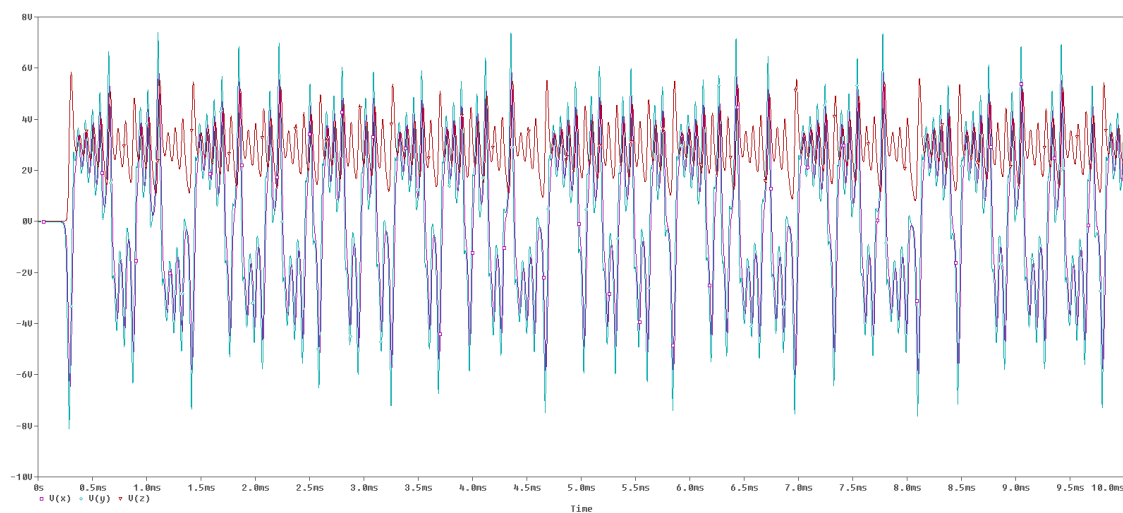
U obou zapojení se také pozorovalo spektrum, které podle teorie má být široké a spojitě viz. (Obr. 4.7).



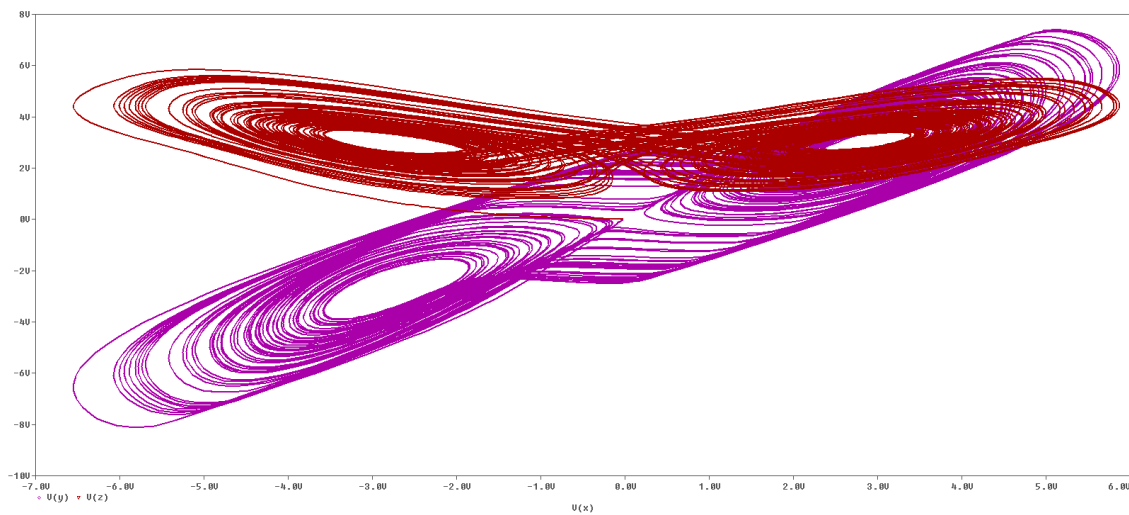
Obr. 4.1 Schéma zapojení první realizace Lorenzova dynamického systému



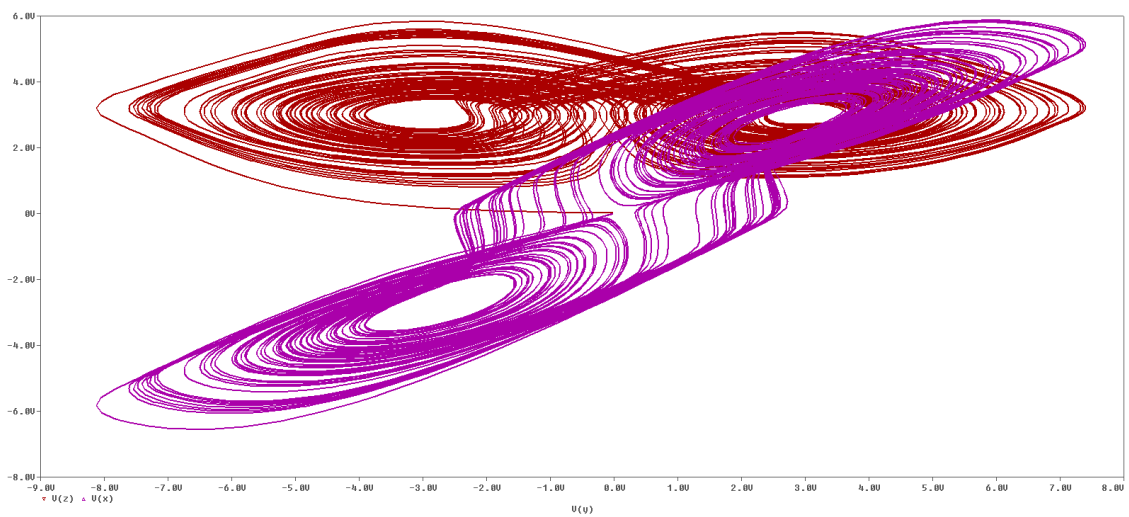
Obr. 4.2 Schéma zapojení druhé ekvivalentní realizace Lorenzova systému, aktivním prvkem MO-DDVCC



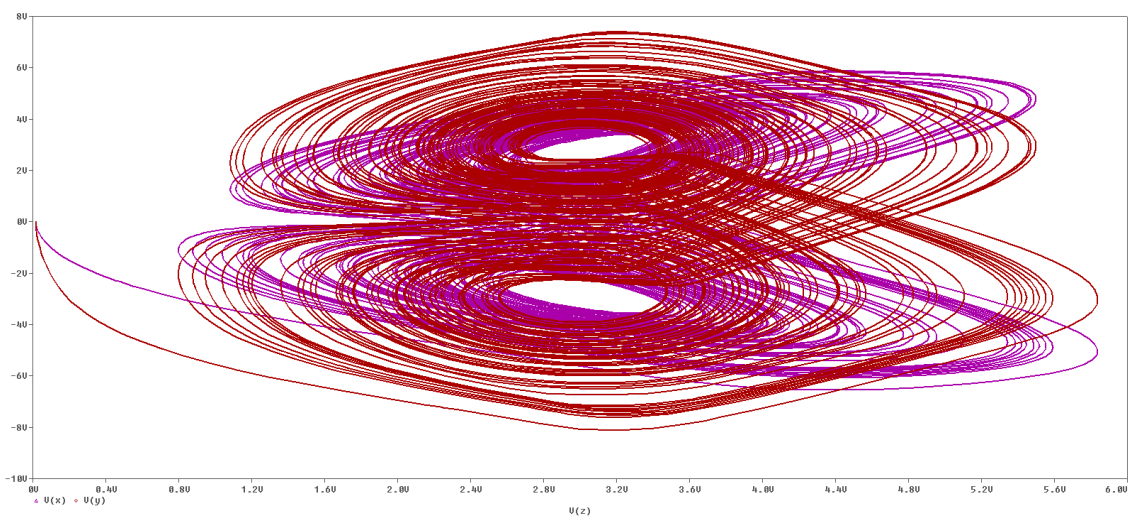
Obr. 4.3 Časová analýza první realizace Lorenzova dynamického systému



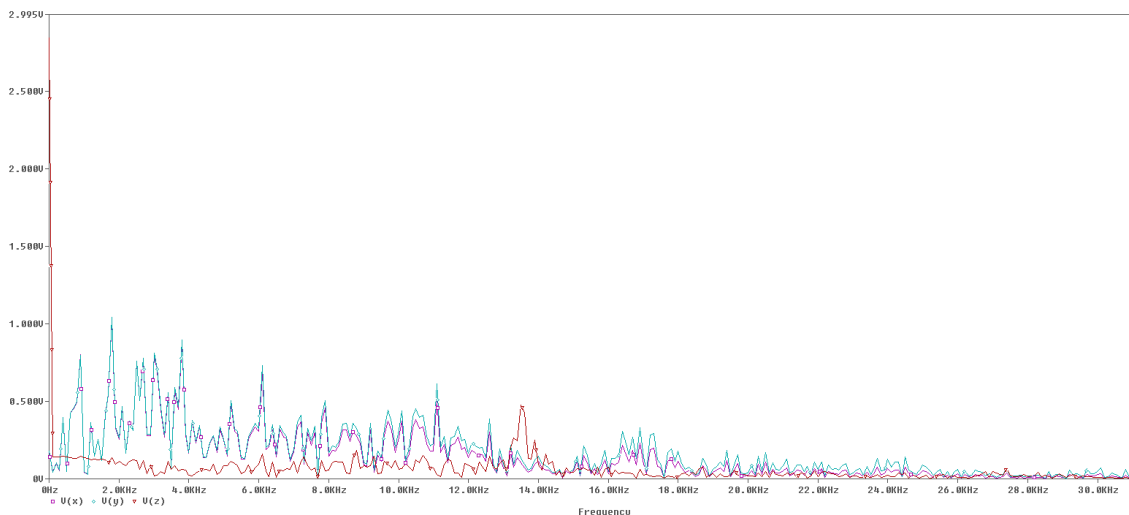
Obr. 4.4 Zobrazení atraktoru první realizace Lorenzova dynamického systému v ose x



Obr. 4.5 Zobrazení atraktoru první realizace Lorenzova dynamického systému v ose y



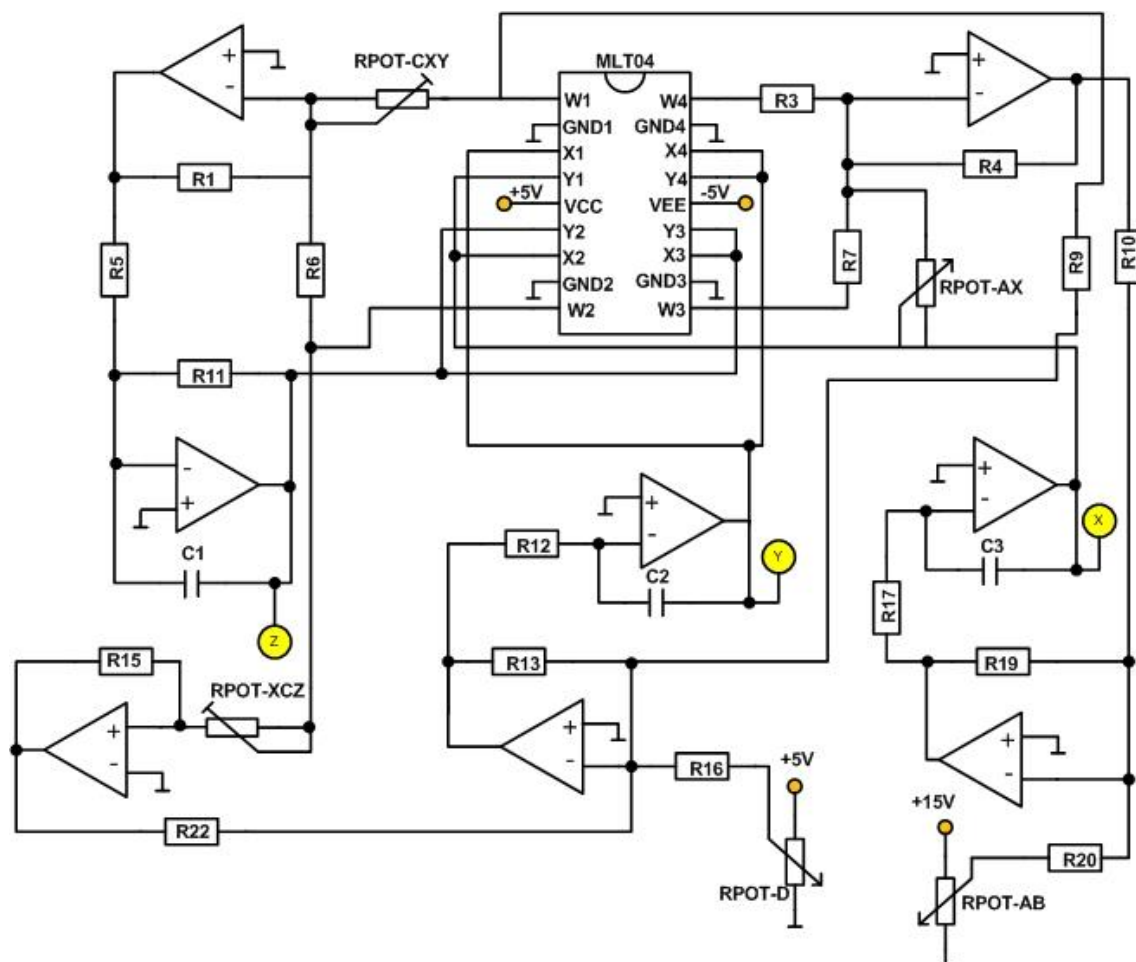
Obr. 4.6 Zobrazení atraktoru první realizace Lorenzova dynamického systému v ose z



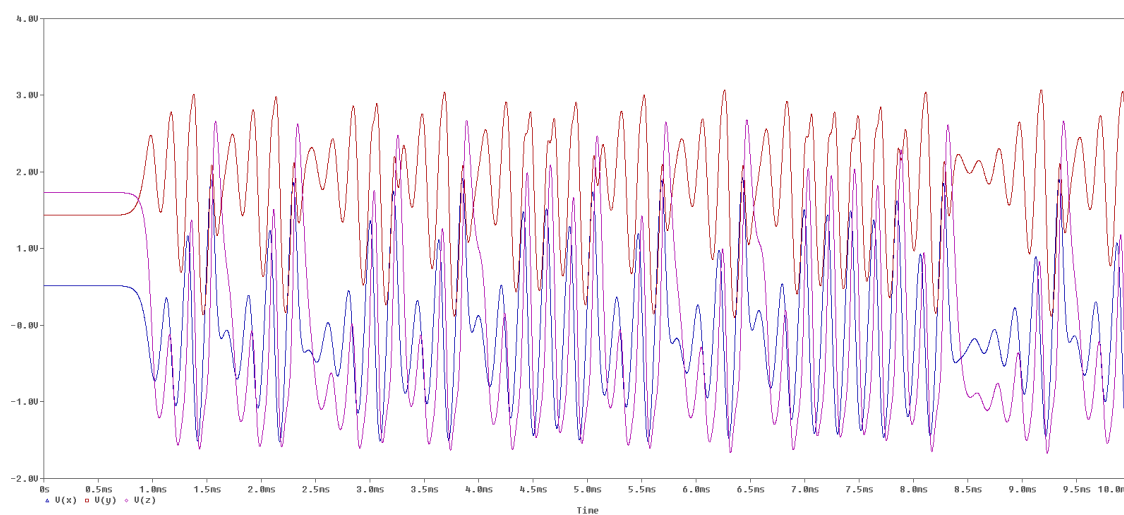
Obr. 4.7 Zobrazení spektra první realizace Lorenzova dynamického systému

4.2 Realizace Lorenzova dynamického systému MLT04

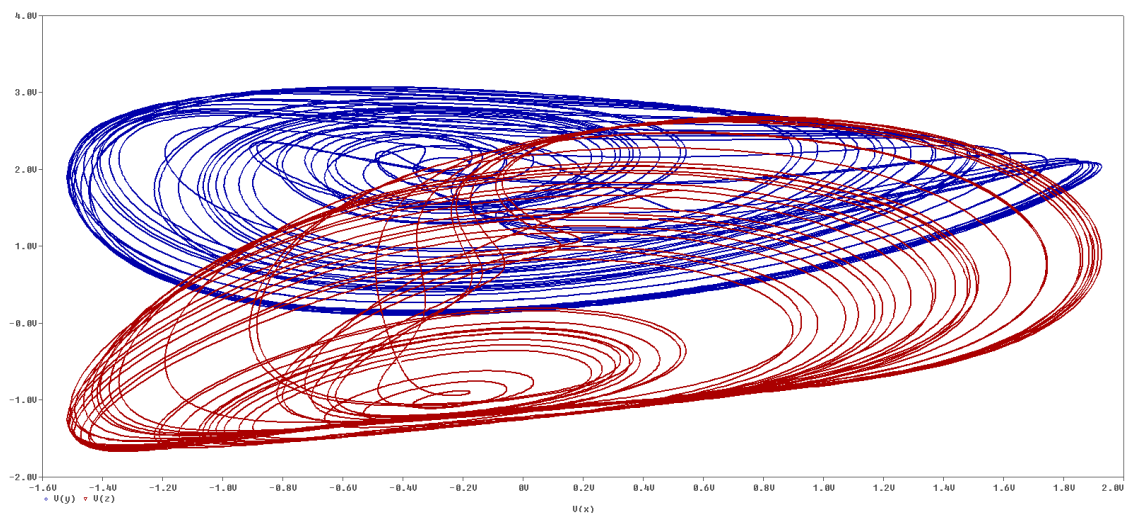
U tohoto zapojení se jedná o kanonickou realizaci ve smyslu integrátorového blokového schématu a interní parametry systému jsou nastavovány třemi potenciometry. Realizace pomocí čtyřkanálové čtyřkvadrantové analogové násobičky je z hlediska realizace a z hlediska ceny nejvhodnější jelikož se zde používá nejméně součástek. MLT04 má v jednom pouzdře čtyři tyto násobičky což je z hlediska úspor na plošné desce značně znát. Tato realizace vyplývá, ze soustavy rovnic (3.1) a je ovládána třemi parametry. Parametry a , b tvoří součin, takže jsou ovládány jedním potenciometrem a parametry c , d jsou nastavovány nezávislými potenciometry, které jsou ve schématu označeny jako $RPOT-AB$, $RPOT-D$ a $RPOT-CXY$. Členy rovnice jako jsou například y^2 , z^2 , které představují nelineární vektorové pole, jsou tvořeny právě pomocí čtyřkanálové čtyřkvadrantové analogové násobičky toto vyplývá z přenosové funkce, která platí pouze pro jeden kanál násobičky (2.5) přes tuto rovnici lze také provést násobení. Dále jsou v realizaci použity operační zesilovače zapojené jako invertující zesilovače a dále integrující sumační zesilovače. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku (Obr. 4.8). Analogová násobička MLT04 je napájena $\pm 5V$ DC a operační zesilovače jsou napájeny $\pm 15V$ DC. Dále jsou použity $C_1=C_2=C_3=100nF$, $R_5=R_{11}=R_{12}=R_{17}=1k\Omega$, $RPOT-CXY=RPOT-XCZ=20k\Omega$, $R_3=R_7=R_9=40k\Omega$, $R_1=R_4=R_{10}=R_{13}=R_{15}=R_{16}=R_{19}=R_{20}=R_{22}=100k\Omega$ a $RPOT-AX=RPOT-D=RPOT-AB=1M\Omega$. Parametry a , b , c a d jsou nastaveny tak aby vytvářely přibližně podobný chaotický atraktor, jako je tomu v části f viz. (Obr. 3.1). Je zde zobrazeno i kmitočtové spektrum, které je široké a spojitě jak vyplývá z teorie.



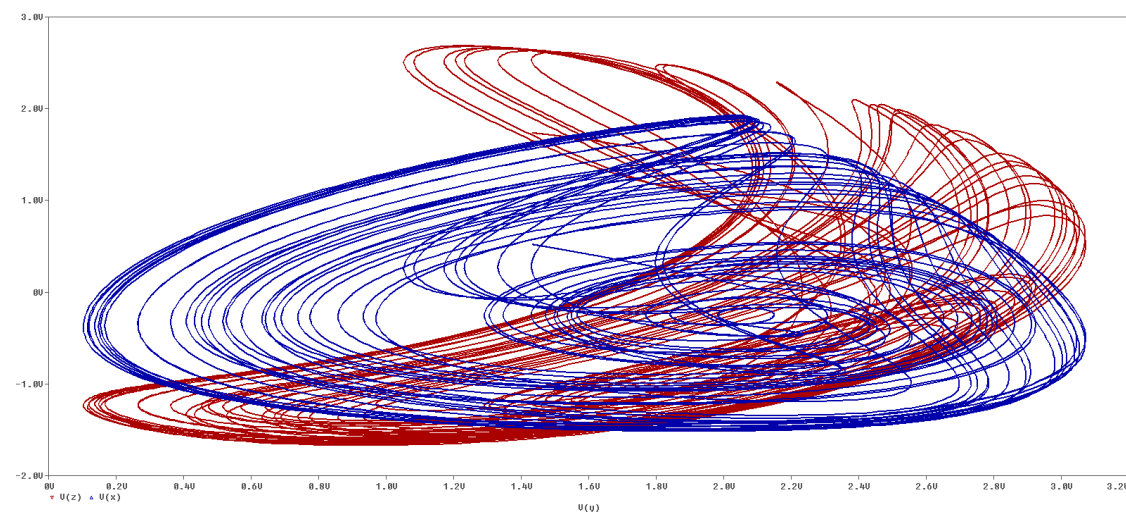
Obr. 4.8 Zapojení Lorenzova dynamického systému analogovou násobičkou MLT04



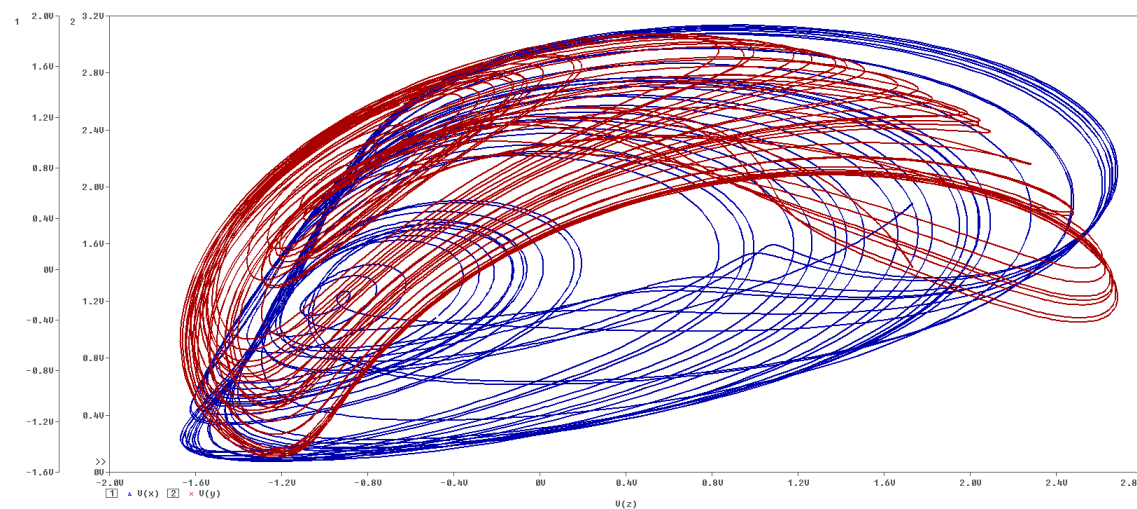
Obr. 4.9 Časová analýza Lorenzova dynamického systému s MLT04



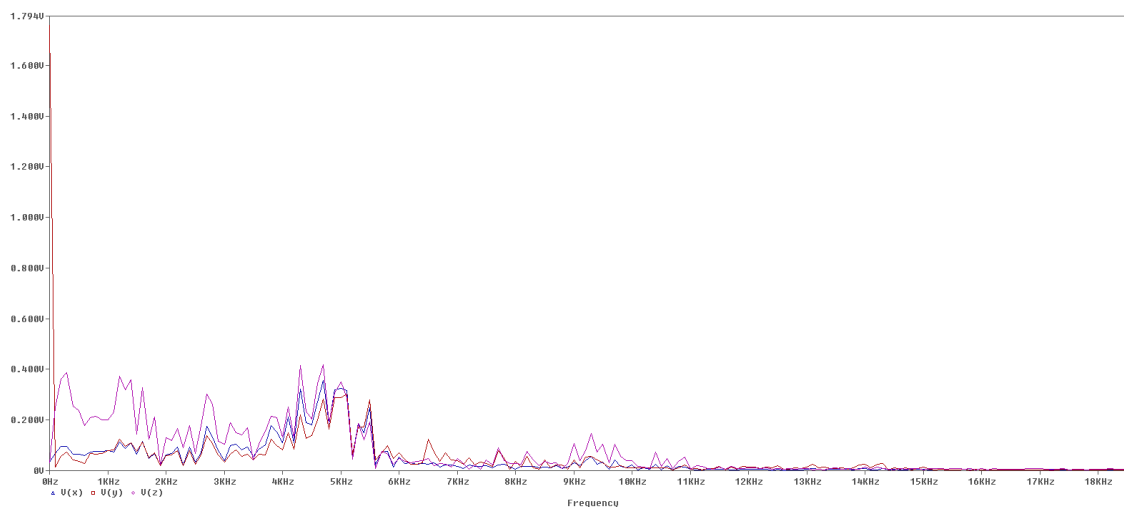
Obr. 4.10 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s MLT04 v ose x



Obr. 4.11 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s MLT04 v ose y



Obr. 4.12 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s MLT04 v ose z

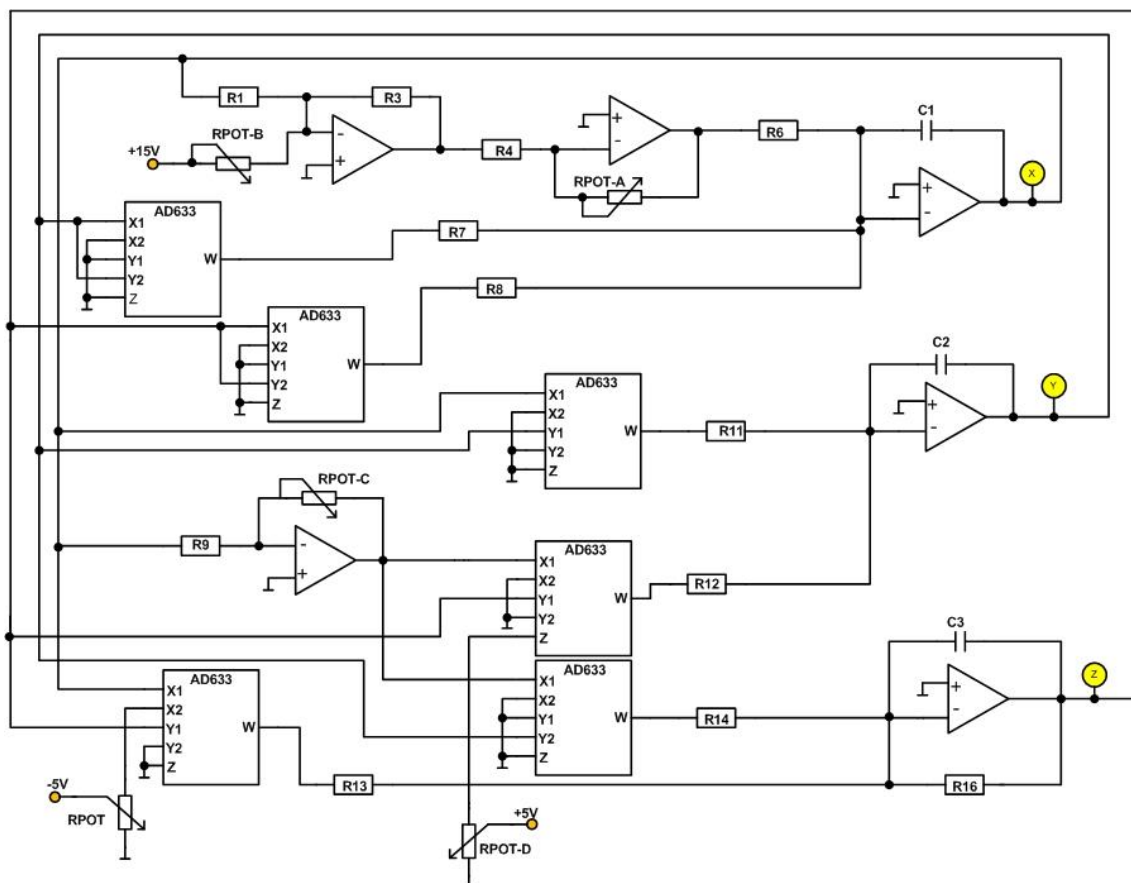


Obr. 4.13 Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s MLT04

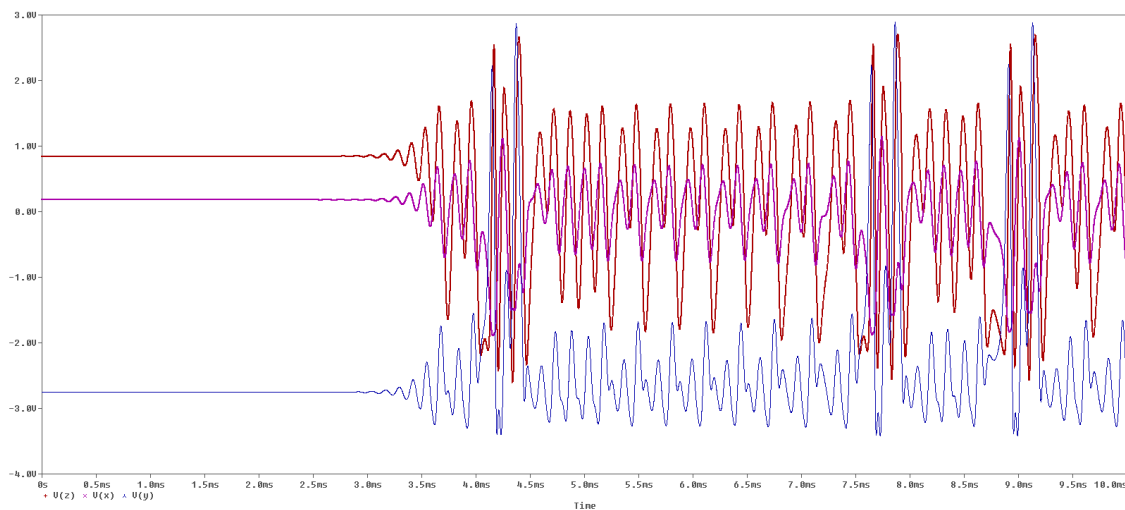
4.3 Realizace Lorenzova dynamického systému AD633

Druhé zapojení představuje modifikaci směrem k nezávislému nastavování všech parametrů systému a tím k možnosti sledování vlivu těchto parametrů na dynamickou evoluci řešení modelu. Realizace s analogovou násobičkou AD633 je velice podobná realizaci s čtyřkanálovou čtyřkvadrantovou násobičkou MLT04. Tato realizace je jiná v nastavování parametrů. Předchozí realizace byla ovládána čtyřmi parametry, ale dva byli na sobě závislé. Realizace násobičkou AD633 je nastavována čtyřmi parametry a , b , c , a d zcela nezávisle na sobě. Proto se dá říci, že je tato realizace názornější. Pokud bychom porovnali i cenové náklady tak tato realizace je dražší, jelikož tato násobička se prodává v samostatném pouzdře a toto zapojení využívá šest těchto bloků naopak MLT04 má čtyři v jednom pouzdře.

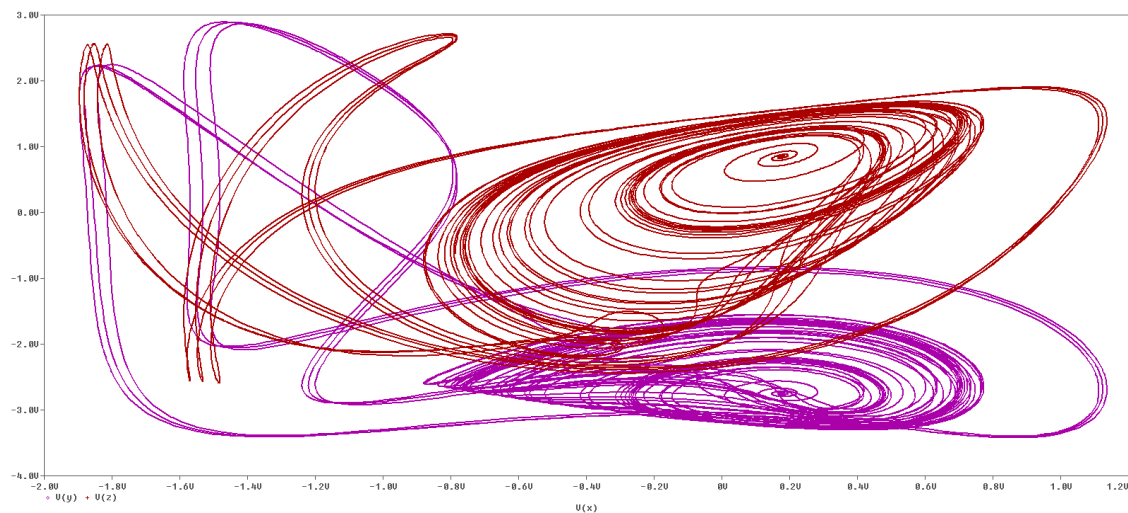
Samotná realizace jak bylo uvedeno výše je velice podobá té s MLT04 využíváme zde také rovnici, která platí pouze pro jeden kanál analogové násobičky a jsou jí realizovány kvadratické členy a dále i součiny (2.6). Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku (Obr. 4.14). Využíváme zde potenciometry ve zpětné vazbě, jako ovladače parametrů a , c , které jsou označeny ve schématu $RPOT-A$ a $RPOT-C$. Analogová násobička i operační zesilovač jsou připojeny na $\pm 15V$ DC. Další ovládací prvky jsou zdroje DC napětí, které představují další dva parametry b , d ve schématu jsou označeny jako $RPOT-B$ a $RPOT-D$. Další DC zdroj představující potenciometr označený jako $RPOT$ je připojen k vysoko impedančnímu vstupu spíše jako zesílení signálu. Z důvodu, že rovnice má ve jmenovateli $10V$ tak na výstupu W je připojen odpor o hodnotě $100\ \Omega$ aby byla zachována časová konstanta (2.1). Dále jsou použity $R_1=R_3=R_4=R_6=R_{16}=1k\Omega$, $R_7=R_8=R_{11}=R_{12}=R_{13}=R_{14}=100\Omega$, $R_9=10k\Omega$, $RPOT-C=40k\Omega$, $RPOT-A=100k\Omega$, $RPOT-B=RPOT=RPOT-D=1M\Omega$, $C_1=C_2=C_3=100nF$ Kmitočtové spektrum které má být podle teorie široké a spojité je zobrazeno viz. (Obr. 4.19).



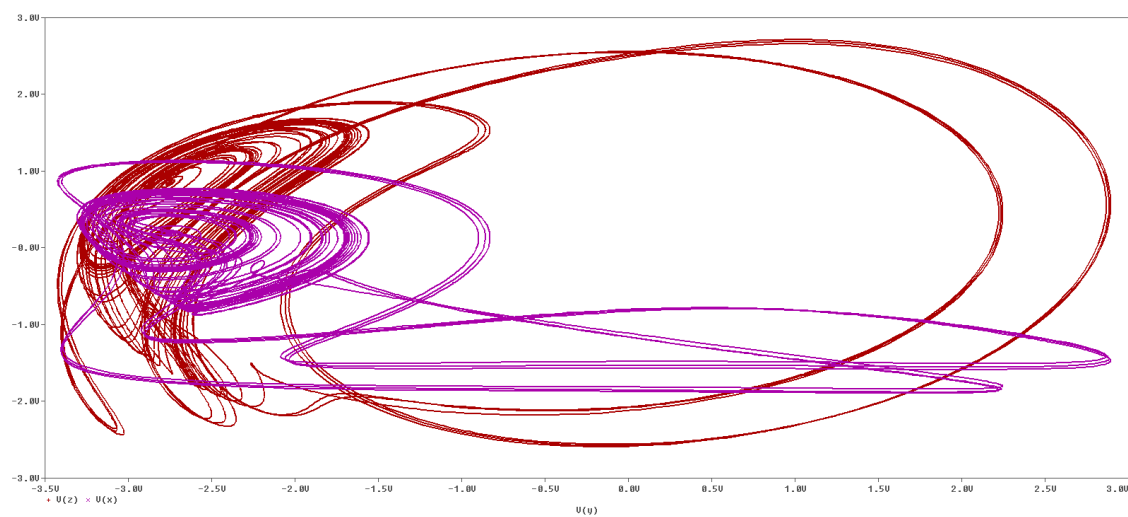
Obr. 4.14 Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému s analogovou násobičkou AD633



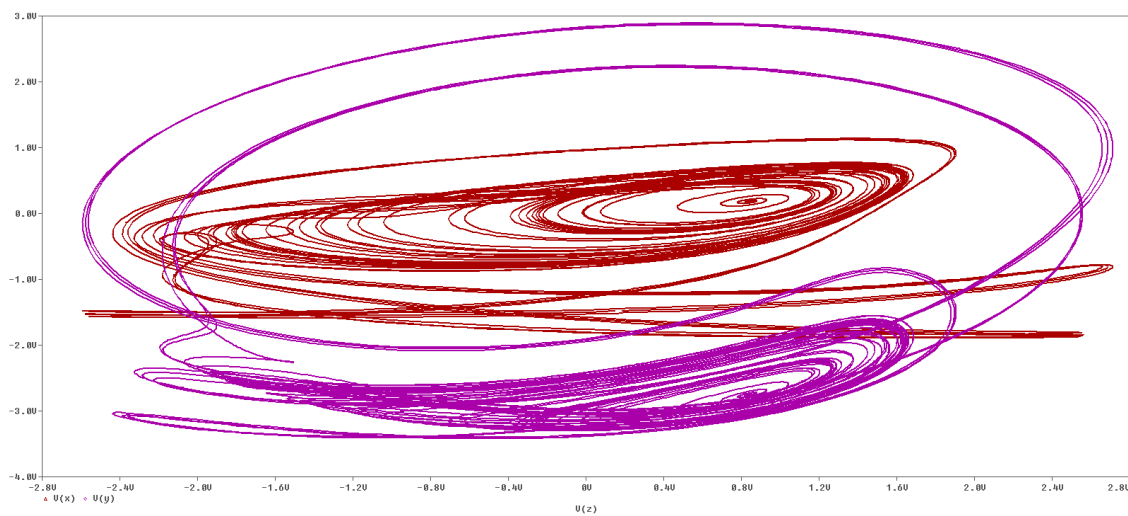
Obr. 4.15 Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému s násobičkou AD633



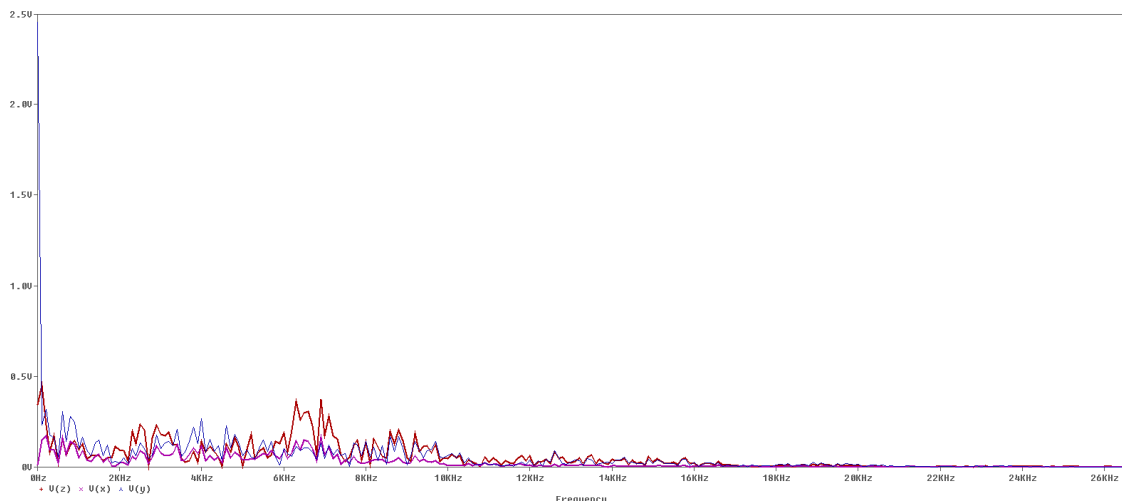
Obr. 4.16 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s AD633 v ose x



Obr. 4.17 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s AD633 v ose y



Obr. 4.18 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s AD633 v ose z



Obr. 4.19 Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s AD633

5 REALIZACE LORENZOVA DYNAMICKÉHO SYSTÉMU V PROUDOVÉM REŽIMU

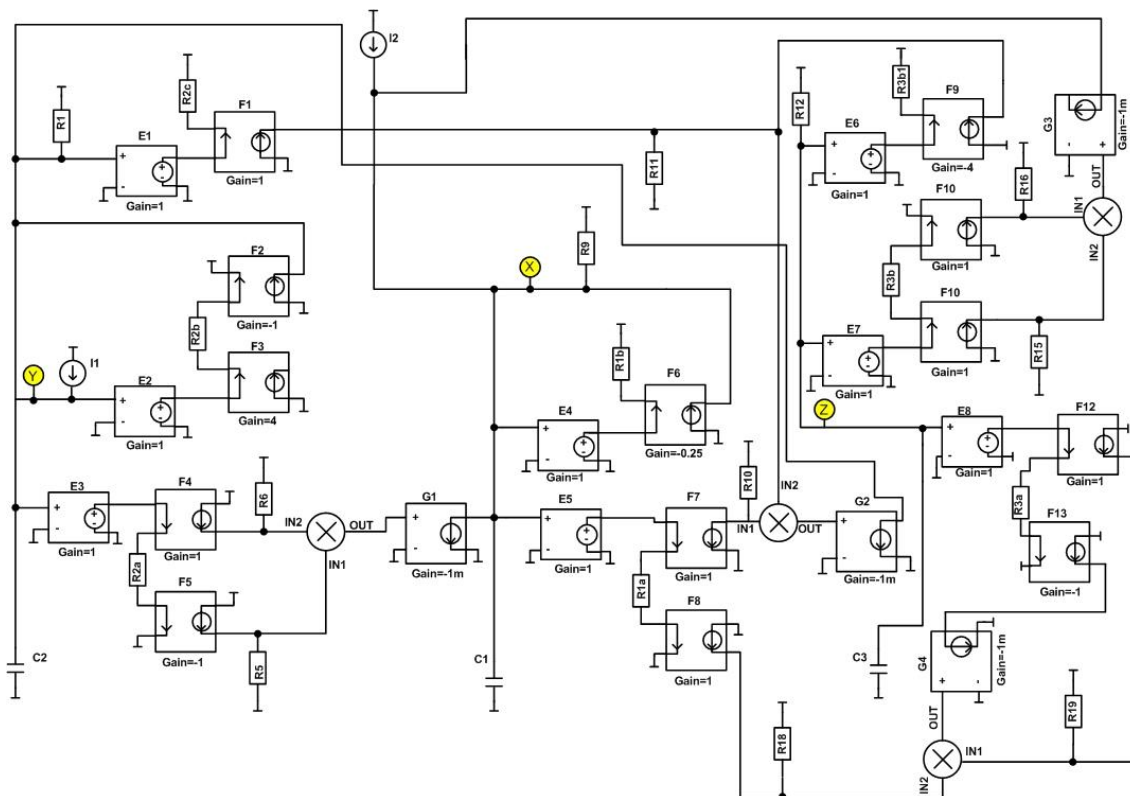
Poslední obvod, na rozdíl od obou předchozích, pracuje v čistě proudovém režimu. U syntézy nelineárních dynamických systémů můžeme říci, že u jakékoliv vytvořené realizace existuje i její duální verze, která pracuje v proudovém režimu. Počáteční myšlenka u tohoto návrhu směřuje k použití čtyřkvadrantové analogové násobičky v proudovém režimu EL4083, která využívá podobných přenosových funkcí jako předchozí MLT04 a AD633 každá tato přenosová funkce platí pro jednotlivý kanál.

$$(I_{xy} - \overline{I_{xy}}) = K \times \frac{(I_x \times I_y)}{I_z} \quad (4.4)$$

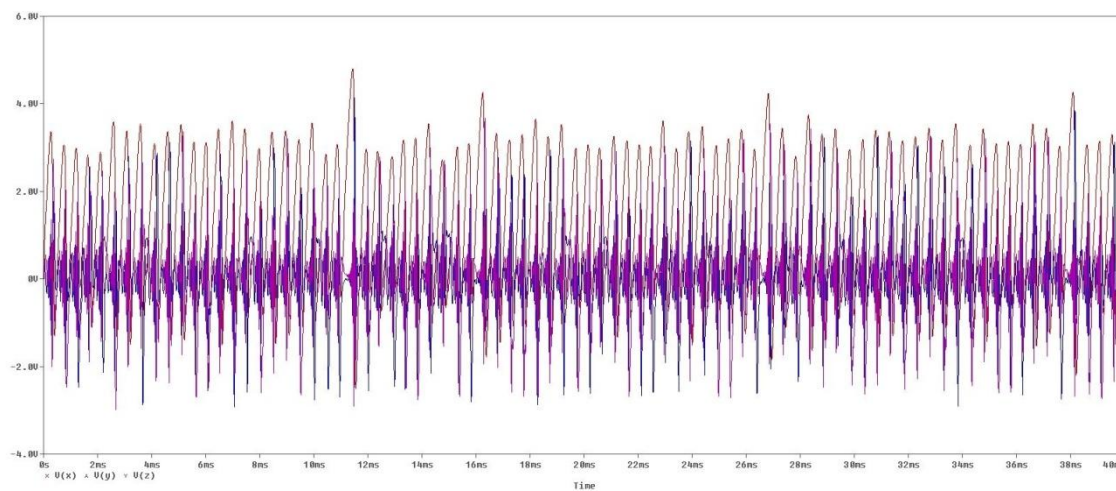
kde I_{xy} a $\overline{I_{xy}}$ (negované) jsou výstupy K je konstanta ($= 0,965$) a $I_{x,y,z}$ jsou vstupy.

5.1 Řízené zdroje

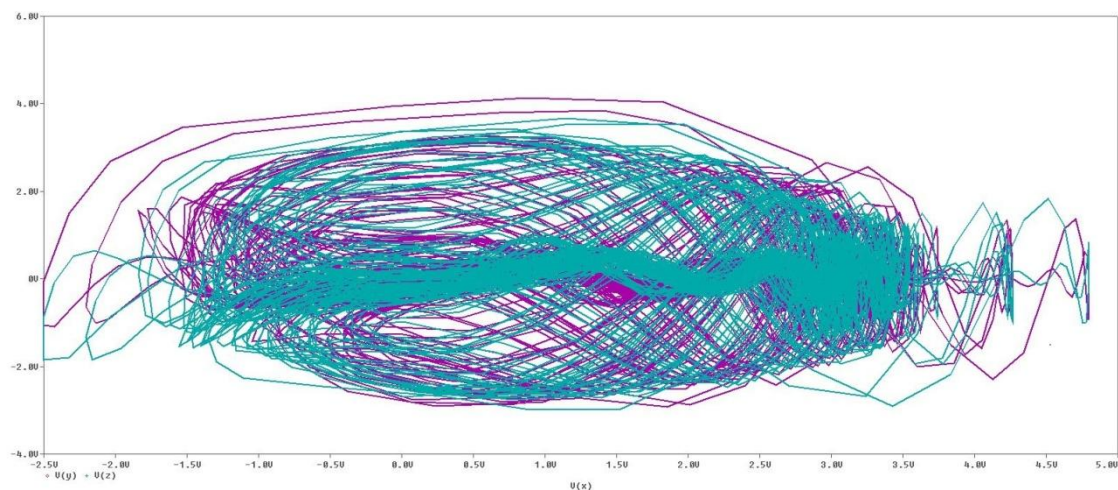
První realizace Lorenzova dynamického systému v proudovém režimu byla sestavena za pomoci ideálních bloků. První je označen ve schématu F a je to zdroj proudu řízený proudem další je značen G zdroj proudu řízený napětím a třetí E zdroj napětí řízený napětím. Dále je zde použita ideální násobička pod značením MUL. Dále $C_1=C_2=C_3=100\text{nF}$, $R_{1a}=R_{1b}=R_{2a}=R_{2b}=R_{2c}=R_{3a}=R_{3b}=R_{3b1}=R_5=R_6=R_{10}=R_{11}=R_{15}=R_{16}=R_{18}=R_{19}=1\text{k}\Omega$. K realizaci sestavené z těchto bloků se přistoupilo z důvodu analogových násobiček, které jsou tzv. makro bloky a dalším aspektem bylo, že jejich časová analýza v programu Pspice trvá velice dlouho jelikož se zde nedá nastavit minimální krok a výchozí nastavení tohoto kroku je přibližně 1 pikosekunda. Jak je vidět tak zapojení s řízenými zdroji vytvořilo chaotický atraktor.(Obr. 5.3)



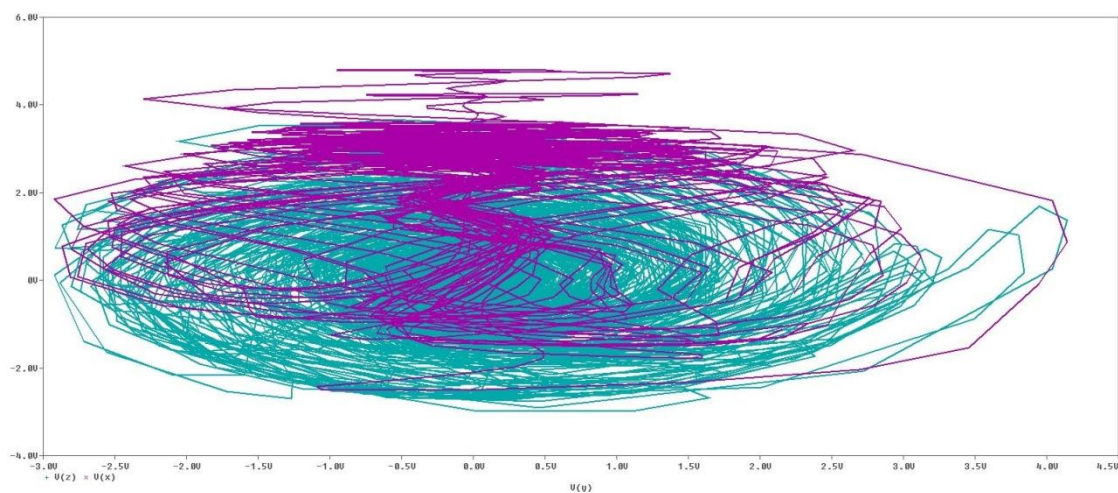
Obr. 5.1 Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému s ideálními řízenými zdroji



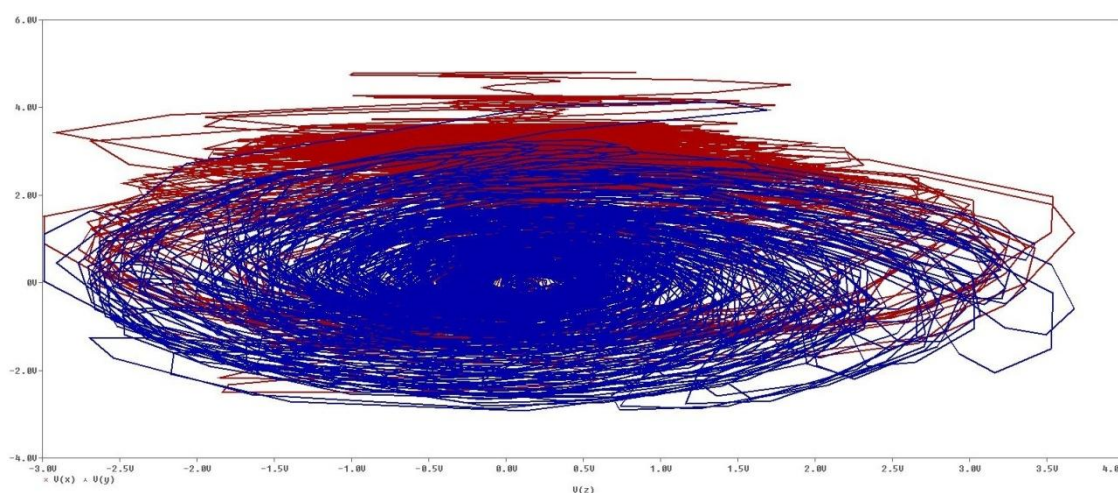
Obr. 5.2 Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému s ideálními řízenými zdroji



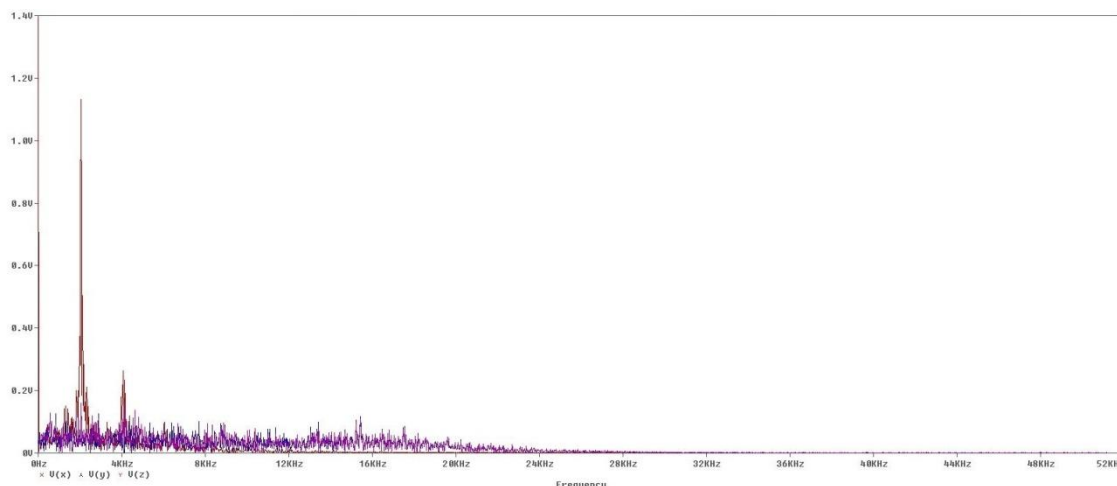
Obr. 5.3 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s řízenými zdroji v ose x



Obr. 5.4 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s řízenými zdroji v ose y



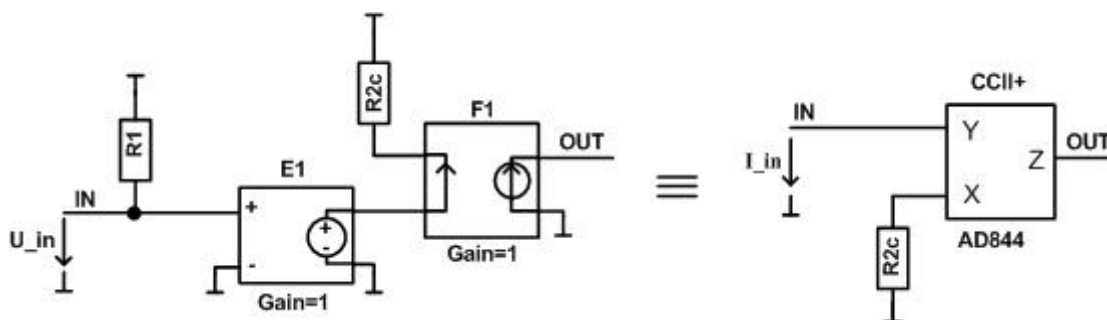
Obr. 5.5 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s řízenými zdroji v ose z



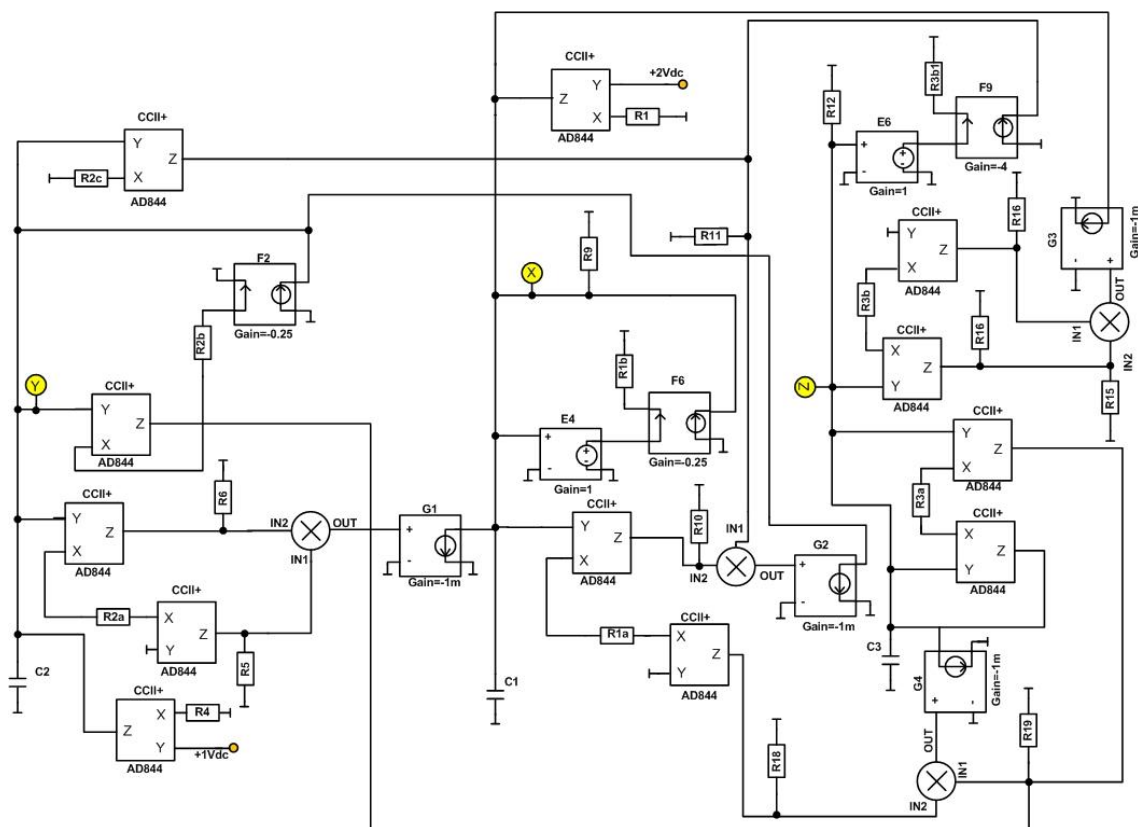
Obr. 5.6 Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s ideálními řízenými zdroji

5.2 Zapojení s AD844

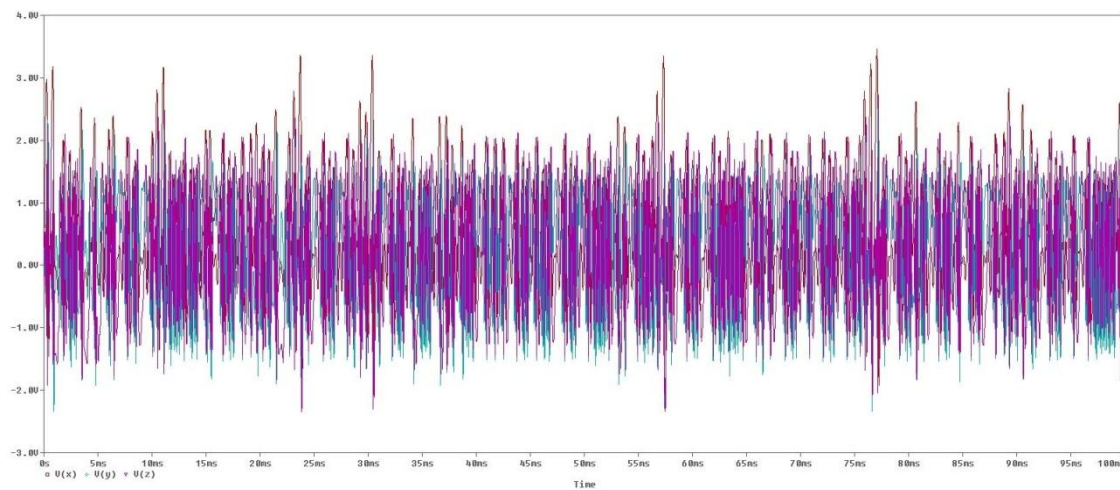
Další fáze byla nahradit řízené zdroje zesilovači AD844, které jsou sestavené z řízených zdrojů. Zde se ještě nebude nahrazovat celé schéma, ale pouze část, kterou nahradíme operačními zesilovači AD844, které mají velice dobré vlastnosti v proudovém režimu a jsou používány jako proudový konvektor CCII+. Konvektor je sestaven ze zdroje napětí řízeným napětím a zdroje proudu řízeným proudem tedy bloky E a F.(Obr. 5.7). Dále $C_1=C_2=C_3=100\text{nF}$, $R_{1a}=R_{1b}=R_{2a}=R_{2b}=R_{2c}=R_{3a}=R_{3b}=R_{3b1}=R_1=R_4=R_5=R_6=R_9=R_{10}=R_{11}=R_{15}=R_{16}=R_{17}=R_{18}=R_{19}=1\text{k}\Omega$. Jak je vidět tak tímto postupným nahrazováním se zatím chyba neudělala a obvod stále vytváří náš požadovaný chaotický atraktor. (Obr. 5.10)



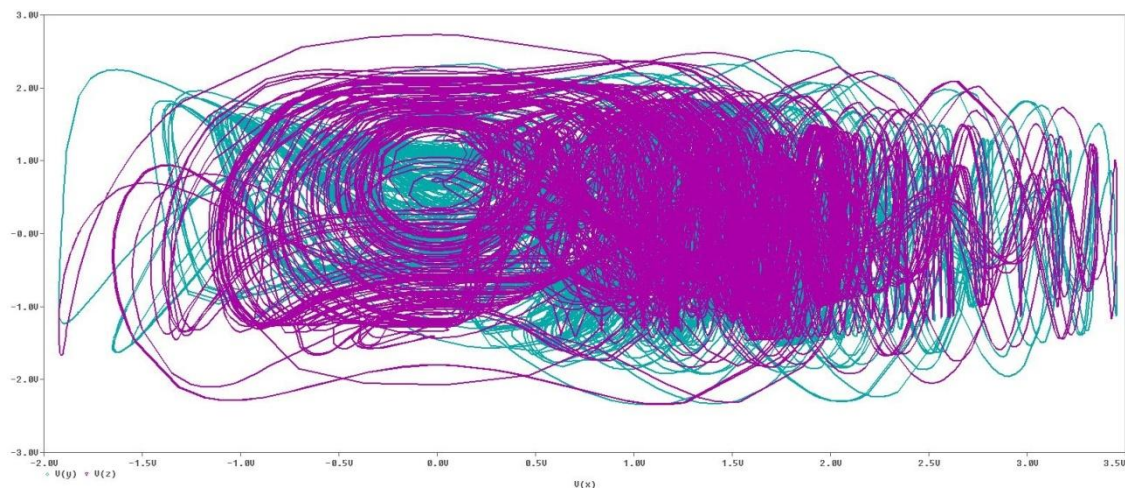
Obr. 5.7 Ekvivalentní zapojení konvektoru a řízených zdrojů



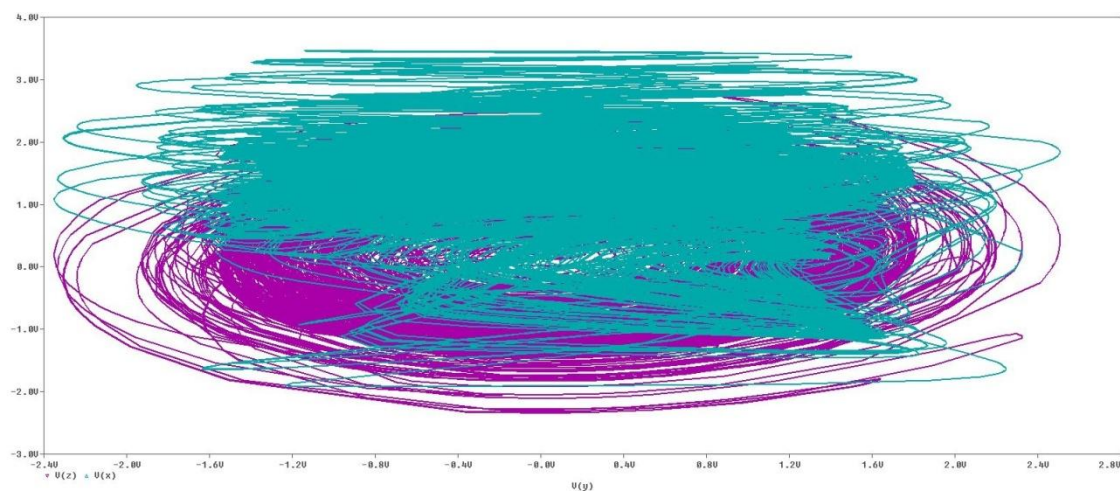
Obr. 5.8 Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému s kovejorem CCII+



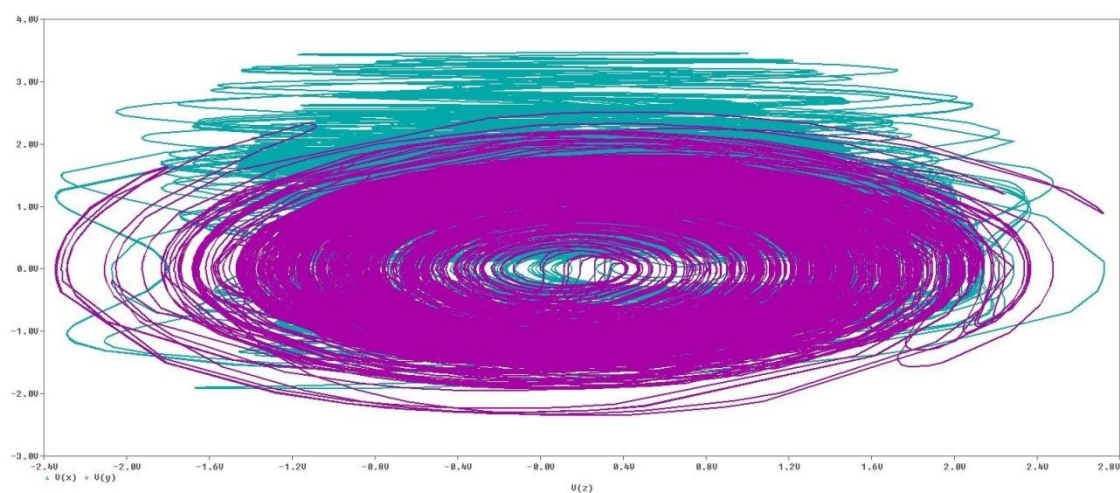
Obr. 5.9 Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému s konvejoem CCII+



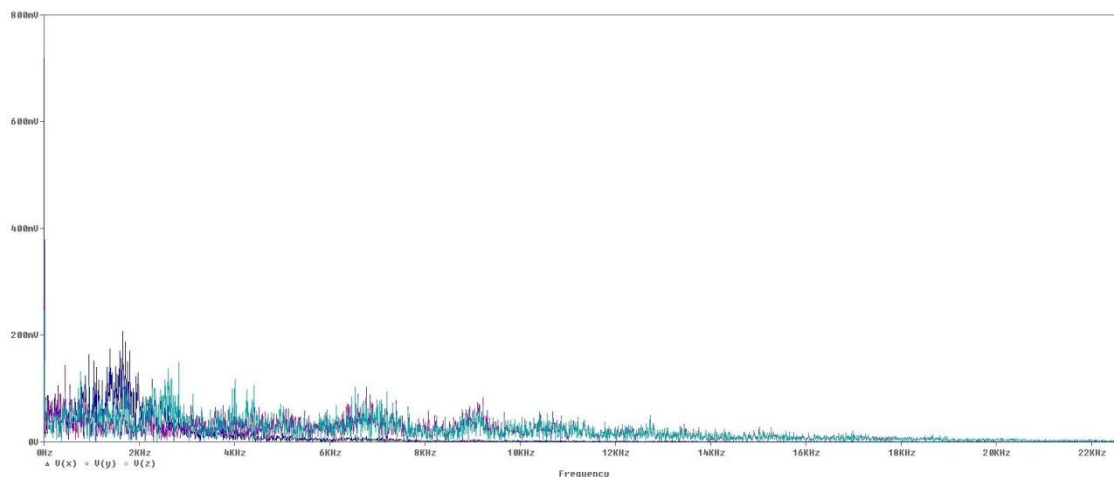
Obr. 5.10 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s konvejorem v ose x



Obr. 5.11 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s konvejorem v ose y



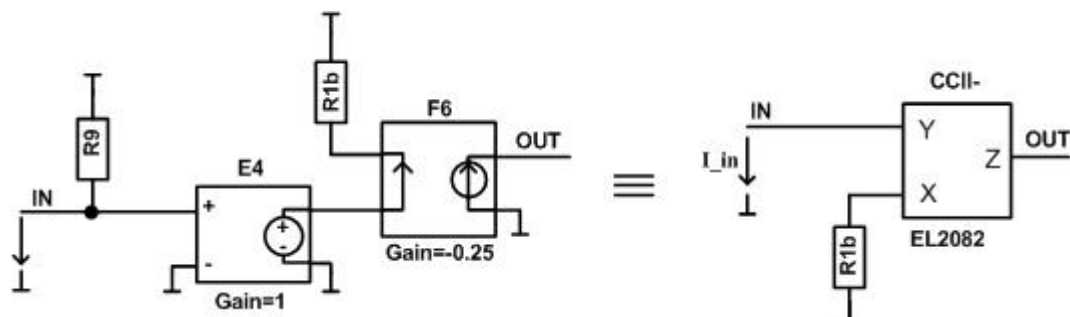
Obr. 5.12 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s konvejorem v ose z



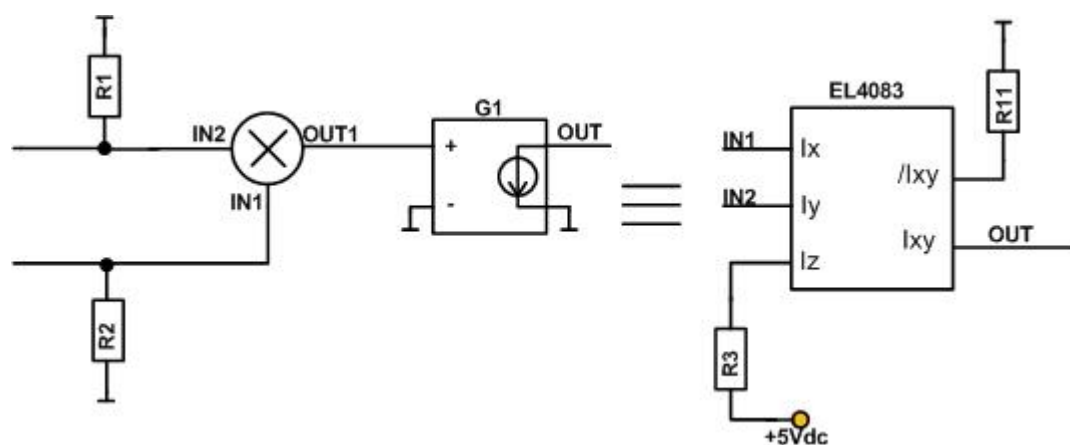
Obr. 5.13 Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému s konvejorem CCII+

5.3 EL4083 a EL2082

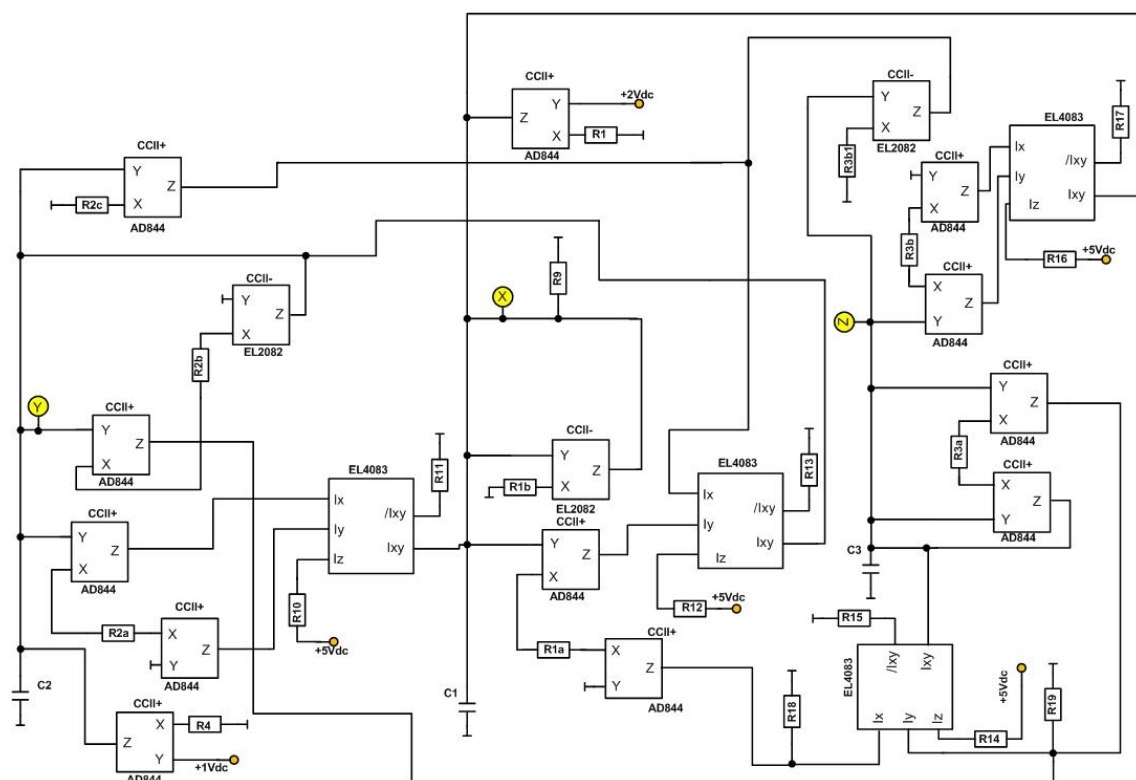
V této kapitole se budeme zabývat náhradou ostatních řízených zdrojů a násobiček MUL, které můžeme nahradit dvoukvadrantovou násobičkou EL2082 ta tvoří zpětný proudový konvektor CCII-. Zpětný proudový konvektor se tvoří obdobně jako CCII+ ze zdroje proudu řízeného proudem F a zdroje napětí řízeného napětím E. Rozdíl zda vytvoříme CCII- nebo CCII+ zaleží pouze na znaménku u zesílení GAIN. Pokud je toto znaménko záporné vytváří se CCII- a pokud kladné tak CCII+. Dále zde používáme analogovou čtyřkvadrantovou násobičku v proudovém režimu, která se skládá z násobičky MUL a zdroje proudu řízeného napětím G. Jak již bylo napsáno v kapitole (5.1) tak analogové násobičky EL4083 jsou v Pspice pro simulace veliký problém, jelikož pokud jich je více než dvě tak simulace trvá opravdu dlouho. A po přidání EL2082 simulace může trvat i v řádu několika hodin. Při zapojování se postupovalo po částech blok po bloku. Simulace s jednou násobičkou EL4083 vypadala dobře a dosáhlo se chaotického atraktoru (Obr. 5.17). Jakmile se nahradila druhá násobička tak se již nepodařilo dosáhnout chaotického atraktoru. Jakmile se nahradila násobička třetí a čtvrtá a poté zpětné konvejory tak se zobrazení chaotického atraktoru pouze zhoršovalo až oscilátor přestal pracovat úplně. Toto bylo velice pravděpodobně zapříčiněno analogovými násobičkami od élantecu, které jsou ve formě makro bloků a mají velice zdlouhavou analýzu v časové oblasti. $C_1=C_2=C_3=100\text{nF}$, $R_{1a}=R_{1b}=R_{2a}=R_{2b}=R_{2c}=R_{3a}=R_{3b}=R_{3b1}=R_1=R_4=R_9=R_{10}=R_{11}=R_{12}=R_{13}=R_{14}=R_{15}=R_{16}=R_{18}=R_{19}=1\text{k}\Omega$. Celkové schéma (Obr. 5.16)



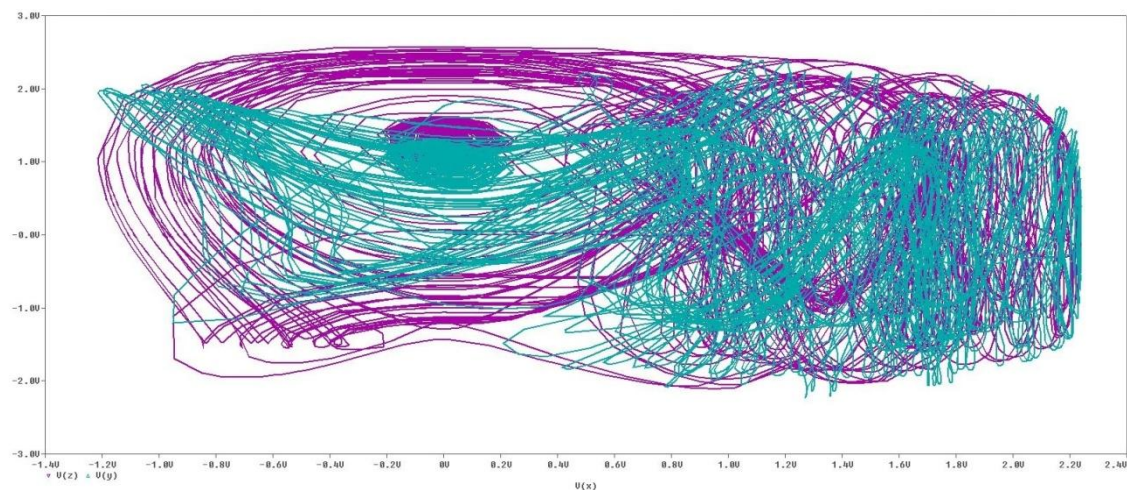
Obr. 5.14 Analogické zapojení zpětného konveju a řízených zdrojů



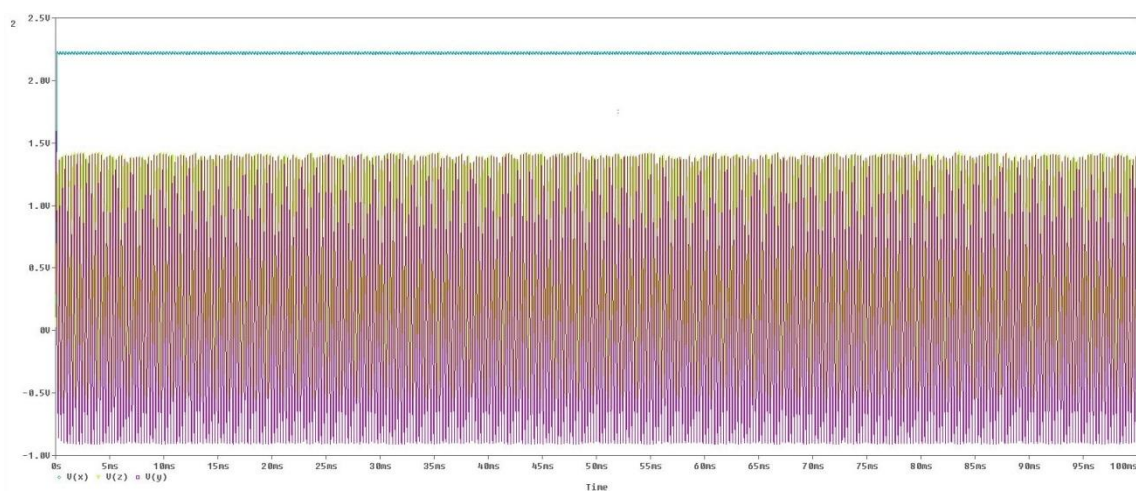
Obr. 5.15 Analogické zapojení pro čtyřkvadrantovou násobičku EL4083



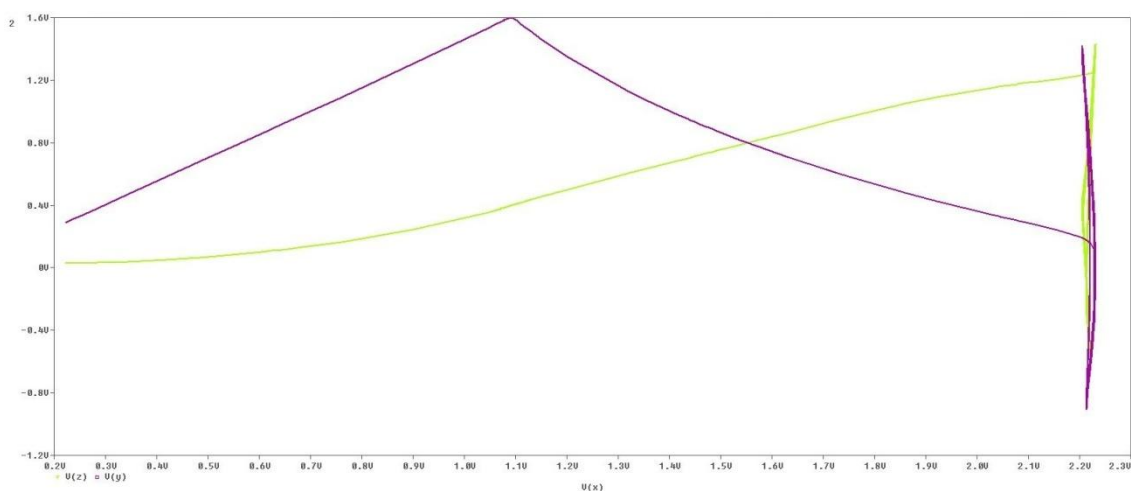
Obr. 5.16 Schéma zapojení Lorenzova dynamického systému v proudovém režimu



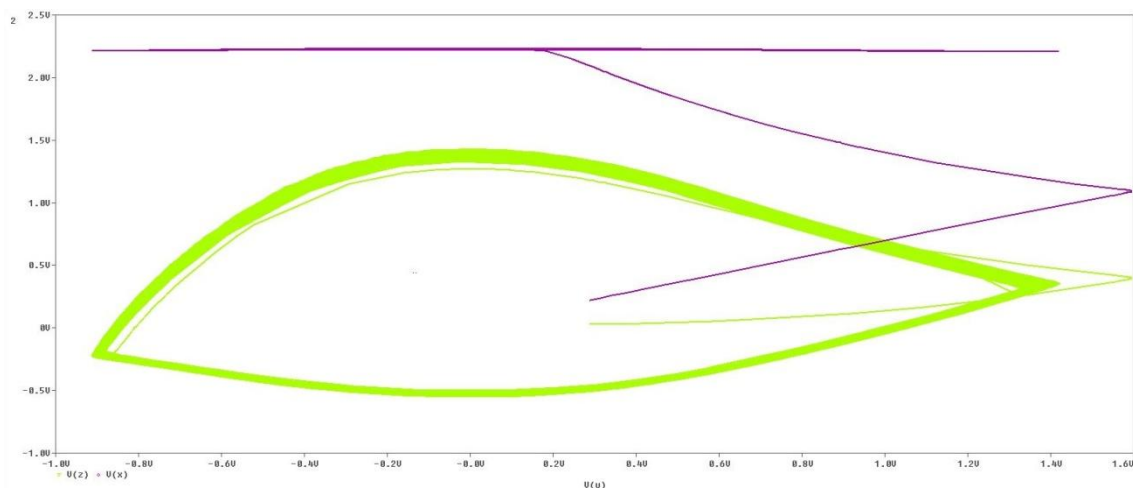
Obr. 5.17 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému s jednou EL4083 v ose x



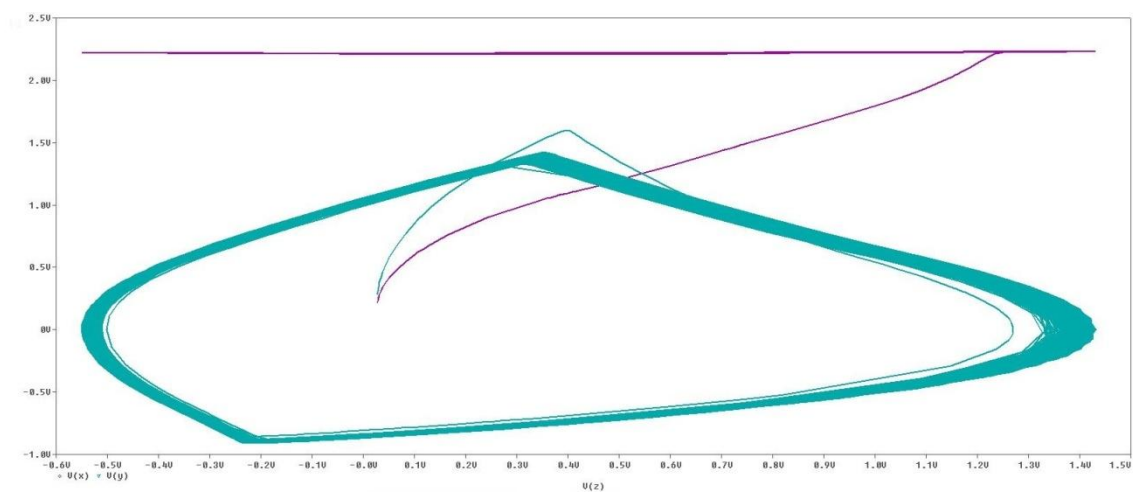
Obr. 5.18 Zobrazení časové analýzy Lorenzova dynamického systému v proudovém režimu



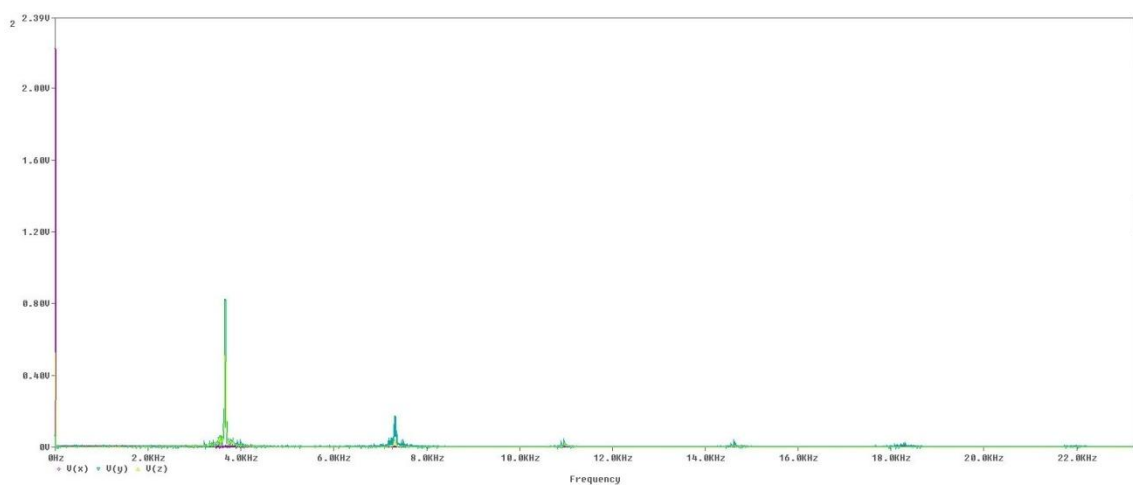
Obr. 5.19 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému proudový režim ose x



Obr. 5.20 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému proudový režim ose y



Obr. 5.21 Zobrazení atraktoru Lorenzova dynamického systému proudový režim ose z



Obr. 5.22 Zobrazené spektrum Lorenzova dynamického systému v proudovém režimu

6 ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo dosaženo tří realizací. Dvě realizace pracují v napěťovém režimu. Jedna simulace, která je prováděna čtyřkanálovou čtyřkvadrantovou analogovou násobičkou MLT04 je řízena třemi parametry přičemž jeden ze tří představuje součin dvou parametrů. Druhá simulace je provedena za pomoci čtyřkanálové analogové násobičky AD633, zapojení s touto násobičkou je řízeno čtyřmi parametry, které jsou na sobě zcela nezávislé. Třetí realizace je čistě v proudovém režimu.

Po navržení dvou obvodů v napěťovém režimu byly nakresleny v programu Orcad Pspice a simulovány. Simulace vypadají dobře, pro znázornění je u každé simulace uvedena analýza v čase kde je jasně vidět, že obvodové zapojení osciluje chaoticky tzn. není zde žádný opakující se děj, dále jsou uvedeny průměty v osách x, y a z dále pro zajímavost spektrum.

Zapojení s analogovou násobičkou AD633, které je ovládáno čtyřmi nezávislými parametry je zcela něčím novým co ještě nikde nebylo publikováno. Zapojení s MLT04 již není tak průlomové, jelikož už v nějakých publikacích existuje.

Obě zapojení mají nevýhody například zapojení s MLT04 není tak názorné z důvodu ovlivnění parametrů mezi sebou. Výhody jsou u návrhu jelikož MLT04 má čtyři násobičky v jednom pouzdře což je velká úspora místa. AD633 je oproti MLT04 dražší na výrobu. Výrobci nemají v nabídce pouzdro, kde by bylo více násobiček najednou a tudíž je na plošné desce mnoho bloků. Výhodou je větší názornost díky ovládání čtyřmi nezávislými parametry.

Třetí provedení Lorenzova chaotického systému je realizováno v proudovém režimu. Realizace v proudovém režimu je pouze dualitou napěťového režimu. Realizaci jsme začali navrhovat z počátku pomocí řízených zdrojů a ideálních násobiček abychom ověřily funkčnost proudového režimu. Dále jsme nahradily řízené zdroje operačními zesilovači a ověřili jsme funkčnost v programu Orcad Pspice. Po simulaci návrhu s operačními zesilovači se postupně začali nahrazovat ideální násobičky, proudovou analogovou násobičkou EL4083 po nahrazení jedné byla simulace úspěšná, ale bohužel po přidání druhé, třetí a čtvrté přestal oscilátor oscilovat toto mohlo být způsobeno vnitřním zapojením násobičky EL4083 a zesilovače EL2082, které jsou tvořeny makrobloky a jejich časová analýza je velice náročná z důvodu výchozího nastavení časového kroku přibližně na 1 pikosekundu.

Z důvodu neúspěšné celkové simulace a komerčně nedostupných součástek EL4083 a EL2082 se nakonec proudový oscilátor nerealizoval na desce plošných spojů.

Po provedení předcházejících simulací a návrhů se přistoupilo k realizaci reálného chaotického oscilátoru na desce plošných spojů. Po osazení desky plošného spoje součástkami se deska chaotického oscilátoru mohla "oživit" a naměřit potřebné výsledky. Po připojení plošného spoje k napájecímu zdroji však došlo k neočekávanému jevu, jelikož na desce byl zkrat. I po několika násobné kontrole zapojení chaotického oscilátoru v programu Eagle se nenašla konstrukční chyba. Kontrola byla provedena i na samotné desce. Proto z důvodu zřejmě mé konstrukční nebo návrhové chyby se nedokázalo chaotický oscilátor "oživit" a tudíž nemohla být ověřena jeho funkce jako reálného zapojení.

LITERATURA

- [1] PETRŽELA, Jiří. *Modelování zvláštních jevů ve vybraných nelineárních dynamických systémech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2006. 164 s., 150 s. Disertační práce. Vedoucí práce: prof. ing. Stanislav Hanus, CSc.
- [2] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Výpočet plochy Mandelbrotovy množiny metodou součtu pixelů: Nelineární dynamické systémy. [online]. 2.5.2001, roč. 2001, č. 22, s. 1-4 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01022/index.htm>
- [3] PETRŽELA, Jiří. Obvodová realizace konzervativního chaotického oscilátoru: Úvod. [online]. 5.1.2004, roč. 2004, č. 1, s. 1 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04001/index.html>
- [4] PETRŽELA, Jiří, Zdeněk HRUBOŠ, and Tomáš GOTTHANS. "Modeling Deterministic Chaos Using Electronic Circuits." *Radioengineering* 20.2 (2011).
- [5] PETRŽELA, Jiří. Ideal active elements for synthesis of the chaotic oscillators. 20.06.2013, č. 3, s. 1-7. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/>
- [6] LORENZ, Edward N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 1963, 20.2: 130-141.
- [7] PIVKA, Ladislav, Chai Wah WU a Anshan HUANG. *Chua's oscillator: A compendium of chaotic phenomena*. ISBN 10.1016/0016-0032(94)90087-6.

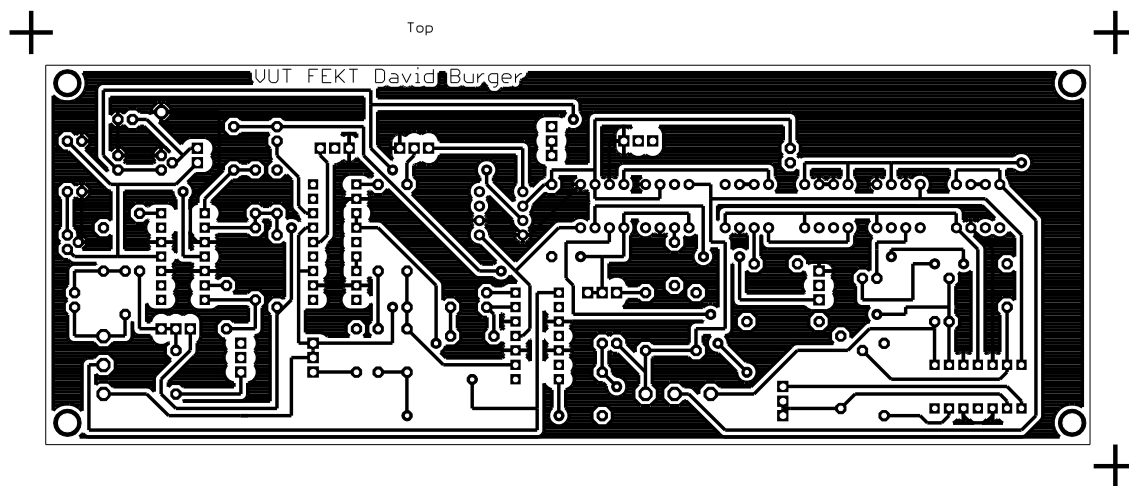
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZRATEK

σ	Prandtlovo číslo
r	Rayleighovo číslo
DC	Stojnosměrný signál
V-pot	Nastavitelný zdroj napětí
R-pot	Nastavitelný rezistor
MODDVCC	Multiple output, differential diferenc, current conveyor
MLT04	Čtyřkvadrantová čtyřkanálová analogová násobička
AD633	Čtyřkvadrantová analogová násobička
EL4083	Čtyřkanálová analogová násobička
E	Zdroj napětí řízený napětím
G	Zdroj proudu řízený napětím
F	Zdroj proudu řízený proudem
CCII+	Proudový konvektor
CCII-	Zpětný proudový konvektor
Output	výstup
Atraktor pro čas $t \rightarrow \infty$	je podmnožina stavového prostoru, ve kterém se systém nachází
T^{-1}	Inverze matice T, musí být čtvercová
T^T	Transpozice matice T, změna řádků za sloupce

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

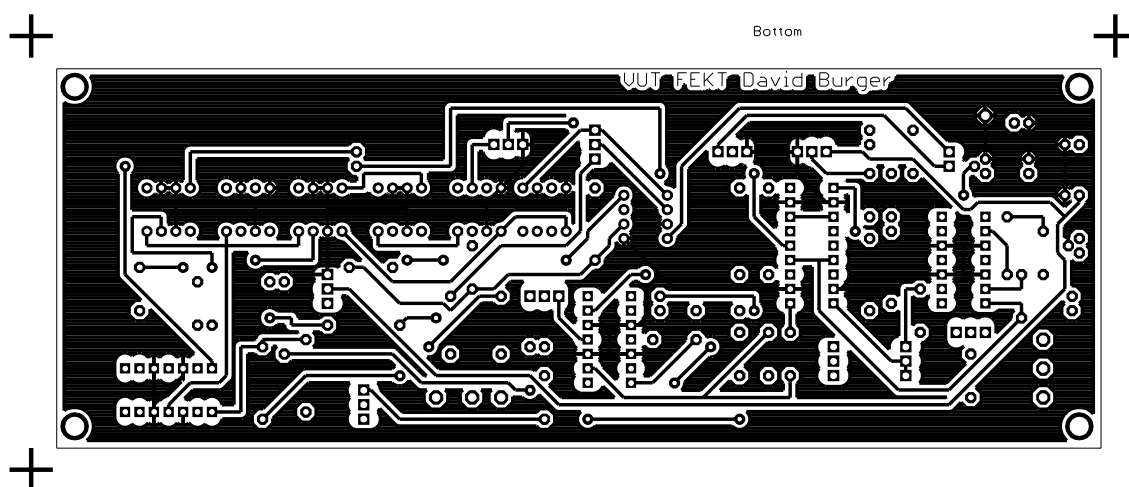
A.1 Obvodové zapojení chaotického oscilátoru v napětřovém režimu

A.2 Deska plošného spoje chaotického oscilátoru v napěťovém režimu – top (strana spojů)



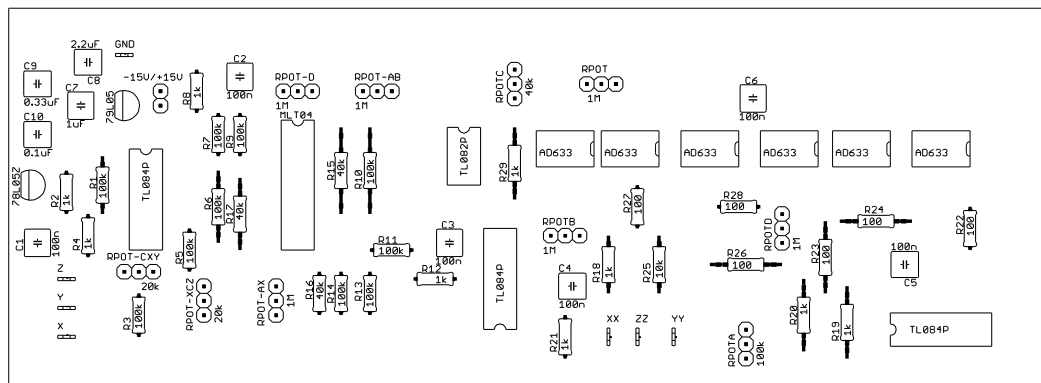
Rozměr desky 182,88 x 67,82 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje chaotického oscilátoru v napěťovém režimu – bottom (strana spojů)

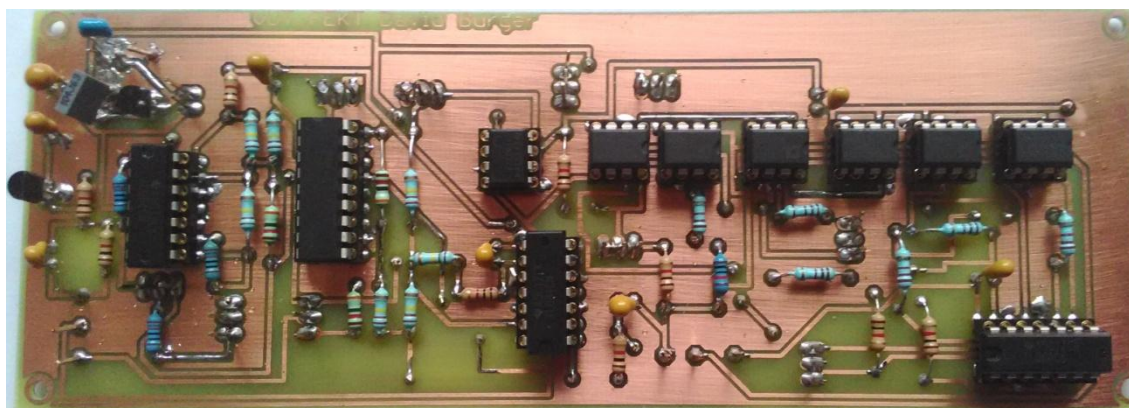


Rozměr desky 182,88 x 67,82 [mm], měřítko M1:1

A.4 Osazovací plán chaotického oscilátoru v napěťovém režimu – top (strana součástek)



A.5 Obvod modelující modifikovaný Lorenzův systém, klasická montáž



B SEZNAM SOUČÁSTEK

Tabulka 1 seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100n	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C2	100n	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C3	100n	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C4	100n	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C5	100n	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C6	100n	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C7	1u	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C8	2,2u	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C9	0,33u	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
C10	0,1u	C025-050X050	Tantalový kondenzátor
78L05		TO-220	Positive regulator
TL084		DIL14	Operační zesilovač
TL084		DIL14	Operační zesilovač
TL084		DIL14	Operační zesilovač
79L05		TO-220	Negative regulator
TL082		DIL08	Operační zesilovač
PINH-D-1X2		1X02	Napájení
R1	100k	R-EU_0207/10	Metalizovaný rezistor
R10	100k	R-EU_0207/15	Metalizovaný rezistor
R11	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R12	1k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R13	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R14	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R15	40k	R-EU_0207/15	Metalizovaný rezistor
R16	40k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R17	40k	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor
R18	1k	R-EU_0207/10	Metalizovaný rezistor
R19	1k	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor
R2	1k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R20	1k	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor
R21	1k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R22	100	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R23	100	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R24	100	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor
R25	10k	R-EU_0207/10	Metalizovaný rezistor
R26	100	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor

R27	100	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R28	100	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R29	1k	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor
R3	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R4	1k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R5	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R6	100k	R-EU_0207/12	Metalizovaný rezistor
R7	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R8	1k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
R9	100k	R-EU_0207/7	Metalizovaný rezistor
RPOT	1M	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOTA	100k	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOT-AB	1M	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOT-AX	1M	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOTB	1M	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOTC	100k	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOT-CXY	50k	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOTD	1M	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOT-D	1M	PINHD-1X3	Potenciometr
RPOT-XCZ	50k	PINHD-1X3	Potenciometr
AD633		DIL08	Násobička
AD633		DIL08	Násobička
AD633		DIL08	Násobička
AD633		DIL08	Násobička
AD633		DIL08	Násobička
AD633		DIL08	Násobička
MLT04		DIL18	Násobička