



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

ANALÝZA PŘECHODOVÉHO DĚJE PŘI POHYBU OPTICKY ZACHYCENÉ ČÁSTICE V POD-TLUMENÉM REŽIMU

TRANSITIONAL MOTION ANALYSIS OF THE OPTICALLY TRAPPED PARTICLE IN UNDER-DAMPED
REGIME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martina Sússerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vratislav Harabiš, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Studentka: Martina Süsserová

ID: 155604

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Analýza přechodového děje při pohybu opticky zachycené částice v podtlumeném režimu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Proveďte literární rešerši vyhodnocení vlastností optické pasti pomocí náhodného pohybu částice v podtlumeném režimu za nízkých tlaků. Srovnajte různé přístupy (spektrální hustota energie, auto a kros korelace, histogram). 2) Ze záznamů trajektorie opticky zachycené částice získajte okamžitou rychlost a zkonstruujte fázový diagram zobrazující vývoj průměrné trajektorie, průměrné rychlosti a jejich dalších momentů pro různé počáteční podmínky. 3) Sledujte vliv frekvenčních filtrů na fázové diagramy. 4) Ze závislostí průměrných poloh a rychlostí na čase získajte parametry tlumeného oscilátoru (vlastní frekvence, koeficient tlumení, ...). Zkonstruujte mapy těchto parametrů a srovnajte výsledky s dalšími metodami určení vlastností optické pasti. 5) Z experimentálních nebo simulovaných dat zkonstruujte fázový diagram ve stacionárním stavu (po vymizení přechodového děje). Předpokládáme implementaci v jazyce Matlab.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Jan Gieseler, "Dynamics of optically levitated nanoparticles in high vacuum," PhD Dissertation, ICFO Spain, (2013).

[2] Simon F. Nørrelykke, Henrik Flyvbjerg, "Harmonic oscillator in heat bath:

Exact simulation of time-lapse-recorded data and exact analytical benchmark statistics," Phys. Rev. E 83, 041103 (2011).

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 24.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Vratislav Harabiš, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Ivo Provazník, 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

Bakalářská práce se zabývá analýzou pohybu opticky zachycené nanočástice za nízkých tlaků a seznamuje s metodami běžně užívanými při těchto podmínkách. Praktická část této práce byla provedena v prostředí Matlab, kde nejdříve byly z původních dat vyfiltrovány nežádoucí rušení signálu a analyzován jejich vliv na podobu fázových portrétů získaných přechodových dějů. Dále jsou ze záznamů průměrných trajektorií získány parametry tlumeného oscilátoru a pomocí histogramů demonstrovány distribuce pozičních dat během přechodového děje a po jeho vymizení (stacionární stav).

Klíčová slova

Optická pinzeta, přechodový děj, fázové portréty, vakuum, podkritické tlumení, koeficient tlumení, charakteristický čas, činitel jakosti.

Abstract

The bachelor thesis deals with the analysis of the movement of optically trapped nanoparticles at low pressures and familiarizes with methods commonly used in these conditions. The practical part of this work was done in Matlab, where the undesirable signal interference was filtered out from the original data and their influence on the phase portraits of the acquired transients was analyzed. Furthermore, the damped oscillator parameters are obtained from the records of average trajectories and the distribution of position data during the transient compared with distribution of position data at stationary state by histograms.

Keywords

Optical tweezers, transient, phase portraits, vacuum, underdamped, damping coefficient, characteristic time, Q-factor.

Bibliografická citace:

SÚSSEROVÁ, Martina. *Analýza přechodového děje při pohybu opticky zachycené částice v pod-tlumeném režimu*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. 2019. 67 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Vratislav Harabiš. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120416>.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Analýza přechodového děje při pohybu opticky zachycené částice v pod-tlumeném režimu 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. května 2019

.....
podpis autorky

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vratislavu Harabiši, Ph.D. a konzultantovi bakalářské práce Mgr. Martinu Šilerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 24. května 2019

.....
podpis autorky

Mé rodině, mým přátelům, učitelům, nepřátelům a mně.

Těm minulým, přítomným i budoucím, díky.

Obsah

0	Úvod.....	1
0.1	Cíle a struktura bakalářské práce.....	1
1	Optické zachycování.....	3
1.1	Tlak záření.....	3
1.2	Optická pinzeta.....	3
1.2.1	Síly.....	4
1.2.2	Vlastnosti optické pasti.....	6
1.2.3	Aplikace a směr výzkumu v biologii	8
2	Pohyb částice za nízkých tlaků.....	9
2.1	Brownův pohyb	9
2.2	Popis pohybu částice v optické pasti.....	9
2.3	Metody vyhodnocení vlastností optické pasti.....	11
2.3.1	Potenciálová analýza – histogramy.....	12
2.3.2	Střední kvadratický posuv – MSD.....	13
2.3.3	Autokorelace a vzájemná korelace.....	14
2.3.4	Spektrální hustota energie	15
3	Experimentální soustava.....	16
3.1	Technické parametry	16
3.2	Data	17
3.2.1	Filtrace dat.....	17
4	Analýza přechodového děje	19
4.1	Počáteční podmínky	19
4.2	Fázové portréty	22
4.3	Parametry	24
4.3.1	Parametry nezávislé na frekvenci:	24
4.3.2	Parametry závislé na počáteční frekvenci:	25
4.3.3	Histogramy	32
5	Diskuze	33
	Závěr.....	35
	Citovaná literatura	36
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	38
	Seznam příloh.....	39

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Schéma optická pasti	4
Obr. 1.2 Distribuce optických sil	5
Obr. 1.3 Ilustrace rozptylu paprsku na částici.	5
Obr. 1.4 Koeficient útlumu jako funkce tlaku	7
Obr. 1.5 Příklady tlumení v závislosti na koeficientu útlumu	7
Obr. 1.6 Monitorování párování jednotlivých bazí	8
Obr. 1.7 Záznamy kroků myosinu (vlevo), ilustrace změny konformace proteinu ...	8
Obr. 2.1 Trajektorie Brownova pohybu.....	9
Obr. 2.2 Ilustrační obrázek pohybu zachycené částice.....	10
Obr. 2.3 Znázornění Duffingovy nelinearity	11
Obr. 2.4 a) Pravděpodobnostní distribuce; b) Potenciály pasti	12
Obr. 2.5 Ilustrace MSD simulovanými daty	13
Obr. 2.6 Autokorelační funkce (pozice, rychlost), vzájemná korelace	14
Obr. 2.7 Výkonová spektra (pozice, rychlost)	15
Obr. 3.1 Schéma sestavení experimentální aparatury, vakuová komora	16
Obr. 3.2 Mechanismus zisku polohových souřadnic částice	16
Obr. 3.3 Požadovaný formát originálních dat	17
Obr. 3.4 Výkonové spektrum - před filtrací	18
Obr. 3.5 Výkonové spektrum - po filtraci.....	18
Obr. 4.1 Počet získaných pozic pro originální data. Osa X.....	20
Obr. 4.2 Počet získaných pozic pro filtrovaná data. Osa X.	21
Obr. 4.3 Počty pozic dat originálních (vlevo) a filtrovaných (vpravo). Osa Y.....	21
Obr. 4.4 Záznamy trajektorií a rychlostí před průměrováním	22
Obr. 4.5 Průměrné trajektorie a průměrné rychlosti.....	22
Obr. 4.6 Variances dat pozic a rychlostí	23
Obr. 4.7 Fázový portrét.....	23
Obr. 4.8 Závislosti char. času a koeficientu tlumení na tlaku.....	25
Obr. 4.9 Hodnoty oscilační frekvence před filtrací.....	26
Obr. 4.10 Hodnoty oscilační frekvence po filtraci. Osa X (vlevo) a osa Y (vpravo)	27
Obr. 4.11 Hodnoty vlastní závislé frekvence před filtrací. Osa X ← a osa Y →.....	28
Obr. 4.12 Hodnoty vlastní závislé frekvence po filtraci. Osa X ← a osa Y →	29
Obr. 4.13 Hodnoty Q-faktoru osy před filtrací. Osa x (vlevo), osa y (vpravo)	30
Obr. 4.14 Hodnoty Q-faktoru po filtraci. Osa X (vlevo) a osa Y (vpravo)	31
Obr. 4.15 Znázornění distribuce pozic.....	32
Obr. 4.16 Příklad vykreslení histogramů	32

Seznam tabulek

Tab. 4-1 Hodnoty charakteristického času a koeficientu tlumení	24
Tab. 4-2 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] před filtrací. Osa X.	26
Tab. 4-3 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] před filtrací. Osa Y.	26
Tab. 4-4 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] po filtraci. Osa X.....	27
Tab. 4-5 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] po filtraci. Osa Y.....	27
Tab. 4-6 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] před filtrací. Osa X.	28
Tab. 4-7 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] před filtrací. Osa Y.	28
Tab. 4-8 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] po filtraci. Osa X.....	29
Tab. 4-9 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] po filtraci. Osa X.....	29
Tab. 4-10 Hodnoty činitele jakosti. Osa X.	30
Tab. 4-11 Hodnoty činitele jakosti. Osa Y.	30
Tab. 4-12 Hodnoty Q-faktoru osy X po filtraci	31
Tab. 4-13 Hodnoty Q-faktoru osy Y po filtraci	31

0 ÚVOD

Optická pinzeta je ve své podstatě laserový paprsek, který dokáže zachycovat, držet a dále pohybovat s velmi malými předměty či částicemi. Tento systém objevil koncem 60. let americký fyzik Arthur Ashkin (1), který byl v roce 2018 ve svých 96 letech za svoji průkopnickou práci v této vědní disciplíně oceněn Nobelovou cenou za fyziku, čímž se současně stal nejstarším laureátem. Jeho ocenění bylo primárně uděleno za práci optické manipulace v biologii (2). Tato technologie byla již v předešlých letech oceněna Nobelovou cenou za fyziku, kdy jí v roce 1997 Steven Chu získal za laserové ochlazování atomů (3). V současné době dochází k rozmachu použití tohoto systému v mnoha vědních disciplínách zabývajících se mikroskopickými jevy. Jedním z takových přístupů jsou nanotechnologie (4).

*Using a term like nonlinear science is like referring to the bulk of zoology
as the study of non-elephant animals.
- Stanislav Ulam*

Nanomechanický oscilátor je jeden v nejjednodušších systému, které si dávají za cíl zkoumání mesoskopického světa, v němž se již začíná projevovat kvantové chování, a tudíž nenásledují pouze pravidla klasické fyziky (5). Předmětem této bakalářské práce je analýza pohybu opticky zachycené částice ve vakuu. Za těchto podmínek jsou oscilátory charakteristické pro svou vysokou rezonanční frekvenci a velmi nízkou aktivní hmotnost. Vysoký činitel jakosti je další velice důležitým faktorem, způsobeným výrazně nízkou interakcí s prostředím média obklopujícího pozorovanou nanočástici. Pro měření tohoto typu se pro mnohé přístupy zaměstnávají přídatné „ochlazovací“ systémy, jejichž účelem je částici zbavit volnosti pohybu a zkoumat tak chování částice v co největší blízkosti k ohnisku zachycení a zesílit tak kvantové chování částice (6). Toto ale také způsobuje ztrátu jiné hodnotné informace o chování částice, čímž je zde míněna nelinearita výrazně se projevující při vysokých amplitudách pohybu (7).

0.1 Cíle a struktura bakalářské práce

Existují různé běžně užívané metody analýzy pohybu opticky zachycené částice, které k dané problematice přistupují různými způsoby (8). Teoretická část této bakalářské práce po bližším stručném představení problematiky optické mikromanipulace, její historie, mechanismu a aplikace, čtenáře seznamuje

s problematikou optického zachycování a chování nanočástic za nízkých tlaků a objasňuje principy nejběžněji používaných analytických metod. Účelem praktické části této bakalářské práce je ale zmapování nelineárního chování částice, které tyto metody neberou v potaz.

Analýza přechodového děje spočívá ve vyhodnocení oscilačního průběhu pohybu částice pomocí vykreslení fázových portrétů za různých pozičních počátečních podmínek a odlišných hodnotách tlaku ve vakuové komoře. Vzhledem k zašumění signálu různými vlivy jsou dále pomocí frekvenční filtrace získány čistší signálová data. K cílům této bakalářské práce pak patří porovnání vlivu této úpravy na fázové portréty a získání parametrů tlumeného oscilátoru ze záznamů trajektorií, díky nimž je možné zjistit teoretickou délku času schopnosti systému „zapomenout“ vliv počáteční pozice.

1 OPTICKÉ ZACHYCOVÁNÍ

*And God said, Let there be light: and there was light.
Genesis 1-3*

1.1 Tlak záření

O schopnosti světla působit silovými účinky na osvětlené předměty existují zmínky již ze 17. století. V roce 1619 Kepler vypožoroval, že tvar ocasu komety vzniká díky silám vyvíjeným slunečními paprsky na částice obklopující tělo komety. Stejný úkaz inspiroval roku 1746 také L. Eulera, který rovněž přisuzoval tlakové síly paprskům světla. Byl tak prvním člověkem, který uvažoval o světle jako o podélné oscilaci. (9)

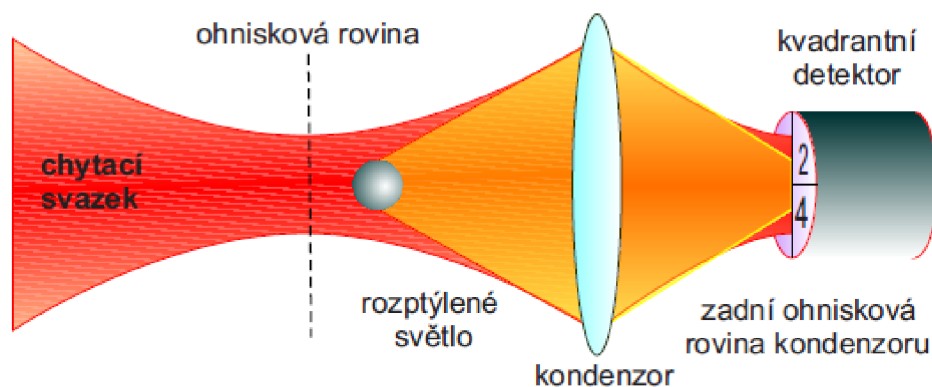
Roku 1862 J. C. Maxwell matematicky popsal schopnost světla působit tlakovými účinky na předmět, když zveřejnil svoji teorii elektromagnetismu (10). Ta mimo jiné předpověděla existenci hybného toku světla, který měl být úměrný intenzitě světla a také schopen hybně působit na osvětlený objekt. Tento jev se dnes všeobecně nazývá radiační tlak, který má schopnost hybně působit na objekt ve směru šíření paprsku. Na počátku 20. století došlo k prvnímu experimentálnímu ověření radiačního tlaku na makroskopických objektech P. Lebeděvem (9), a téměř současně také výzkumem E. F. Nicholse a G. F. Hulla (11). Nicméně praktické využití radiačního tlaku mělo svého širokého využití dostát až mnohem později. Roku 1905 se k zanedbatelné síle tohoto tlaku vyjádřil J. H. Poynting následovně: "Již velice krátká zkušenost s pokusy měřit tyto síly se jeví jako dostačující k tomu, aby si člověk uvědomil jejich extrémní mírnost, která se jeví jako dostačující ke zvažování zanechání dalších experimentů."

Studium radiačního tlaku bylo v té době považováno za vzrušující odvětví fyziky – nicméně s mizivou šancí praktického uplatnění (12). Tento přístup se k dnešnímu dni radikálně změnil díky příchodu kvantové teorie, jejíž zákony předpověděly možnost realizace technologie laseru (13).

1.2 Optická pinzeta

Na začátku 70. let 20. století se Arthur Ashkin zabýval využitím optických sil laseru k ovlivňování pohybu mikroskopických částic či neutrálních atomů. Jednou z předních prací A. Ashina byla práce popisující ovlivňování dynamiky průhledných křemíkových částic. Poprvé tak A. Ashkin v roce 1986 pozoroval to, čemu dnes již všeobecně říkáme optická pinzeta či optická past a tento jev definoval jako

“schopnost silně soustředěného světelného paprsku zachytit mikroskopické částice v prostoru.”. Oblast, ve které dochází k tomuto zachycení, je místem s vysokou intenzitou záření a jedná se o ohnisko paprsku (14).



(15)

Obr. 1.1 Schéma optická pasti

1.2.1 Síly

Optické zachytávání bylo prvně demonstrováno Ashkinem (1) na začátku 70. let. Působící síly rozdělil do dvou základních světelných sil – síly *rozptylové* (působící ve směru šíření laserového paprsku) a síly *gradientní* (působící podél intenzity gradientu kolmého vůči paprsku). Jejich existenci tehdy demonstroval za využití dvou protiběžných laserových paprsků, přičemž k zachycení došlo v místě, kde se jejich rozptylové síly vyrušily. (15)

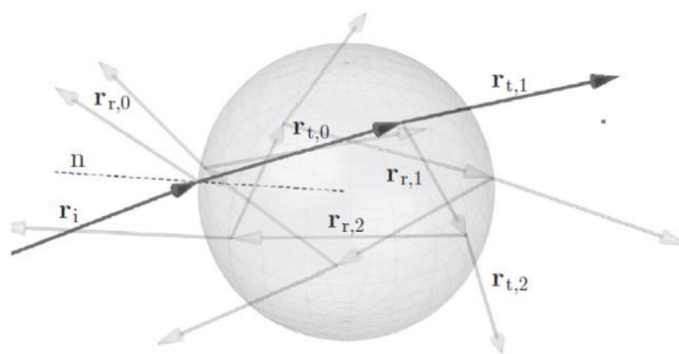
Optická past jednosvazkového laseru vzniká po jeho soustředění objektivem s vysokou numerickou aparaturou. Tento objev Ashkin učinil roku 1986, když zaostřením laserového paprsku vytvořil místo s lokálním extrémem optické intenzity, kde se částice ustálila, viz Obr. 1.1.



Obr. 1.2 Distribuce optických sil

$$F(r) = F_{grad}(r) + F_{scatt}(r) \tag{1.1}$$

K zachycení tak může dojít v místě, kdy je gradientní síla větší než síla rozptylová, čímž dochází ke vzniku potenciálové jámy – optické pasti. Na obrázku 1.2 jsou vykresleny intenzity obou optických sil. V oblasti, kde modrá čára zobrazující výslednou sílu danou rovnicí (1.1) prochází x-ovou osou, dochází k zachycení částice v místě takto vzniklého ohniska. (6)



Obr. 1.3 Ilustrace rozptylu paprsku na částici.

Obrázek 1.3 ilustruje rozptyl paprsku, který tím také předává částici hybnost, čímž se stává jedním ze zdrojů pohybu částice.

1.2.2 Vlastnosti optické pasti

Optická past sestává ze silně soustředěného laserového paprsku pomocí čočky s velice nízkou ohniskovou vzdáleností. Laserové světlo dopadající na objekt je skrz něj odraženo. V případě kulového předmětu pak laser přivádí tento objekt k ohnisku. Tato síla má ve své podstatě vlastnosti lineární pružiny v každém směru. V těchto podmínkách se pak konstantě pružnosti přezdívá **tuhost pasti** (16), která je závislá na **vlastní frekvenci oscilátoru**

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k_{trap}}{m}} \quad (1.2)$$

kde m je hmotnost částice a k_{trap} je tuhostí pasti.

Tuto frekvenci je také možné vypočítat z frekvence oscilační, která je převrácenou hodnotou periody mezi jednotlivými amplitudami podle vzorce

$$\Omega = \sqrt{\Omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{4}} \quad (1.3)$$

Kombinace nanočástic a vysokého vakua zajišťuje zisk oscilátoru o nízké hmotnosti a vysokých hodnot **činitele jakosti** (Q-faktor) (6) (17)

$$Q = \frac{\omega_0}{2\gamma} \quad (1.4)$$

kde ω_0 je vlastní frekvence oscilátoru a γ je **součinitel útlumu**. Parametr Q je velice užitečný, pokud jeho hodnoty jsou vysoké. Značí se jím do určité míry kvalita oscilátoru. (18)

Koeficientu tlumení

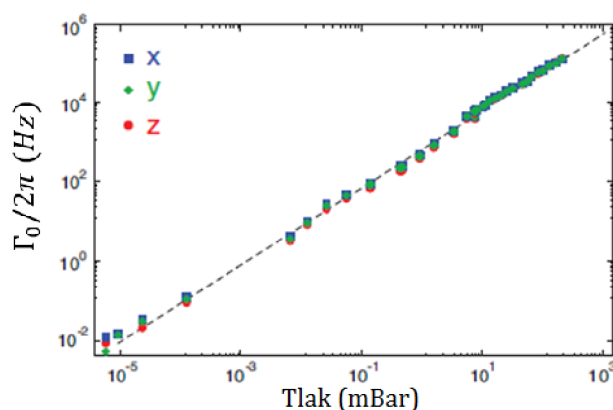
Výše uvedený součinitel útlumu zastává roli tlumícího činitele v obecných systémech, jehož odporová síla je způsobena interakcí předmětu s okolním prostředím, přičemž jeden z efektorů je hmotnost tlumeného předmětu. (6) Případ nanočástice zachycené ve vzduchu se ale v tomto ohledu liší od běžných výpočtů. Gieseler pak představuje upravený výpočet (1.3)

$$\Gamma_0 = \frac{6\pi\eta a}{m} \frac{0.619}{0.619 + K_n} (1 + c_K) \quad (1.5)$$

kde m je hmotnost částice, a její poloměr, η je viskozita vzduchu a kde

$$c_K = \frac{0.31 K_n}{(0.785 + 1.125K_n + K_n^2)} \quad (1.6)$$

kde K_n je Knudsenovo číslo $K_n = \bar{l}/a$, kde \bar{l} je střední volná dráha, která pokud je výrazně větší než poloměr částice, Γ_0 se stává úměrným tlaku (viz obr. 1.4)



(7)

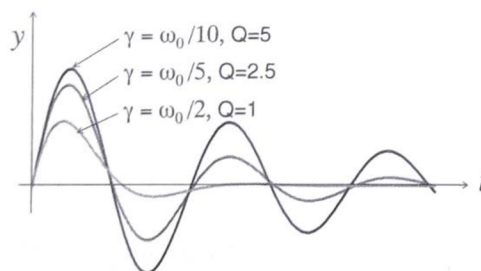
Obr. 1.4 Koeficient útlumu jako funkce tlaku

Charakteristický čas

Rychlost útlumu je definována časovou konstantou τ , která je definována jako převrácená hodnota koeficientu tlumení.

$$\tau = \frac{1}{\gamma} \quad (1.7)$$

Obrázek 1.5 ukazuje vliv součinitele útlumu na časový průběh podtlumených kmitů

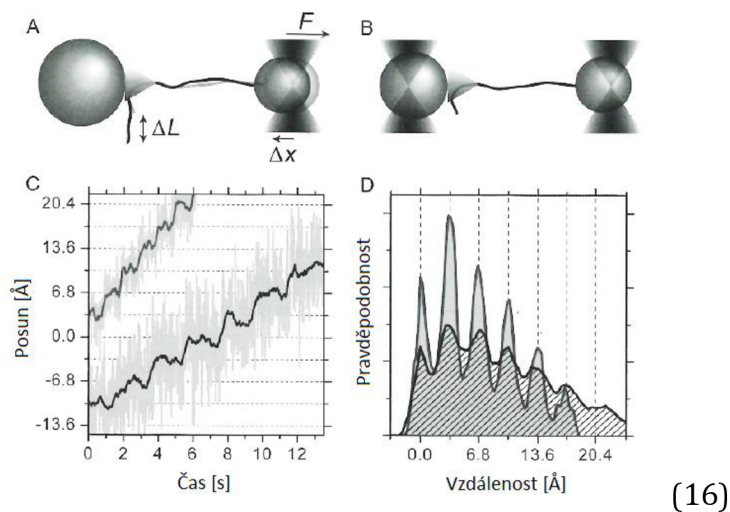


(19)

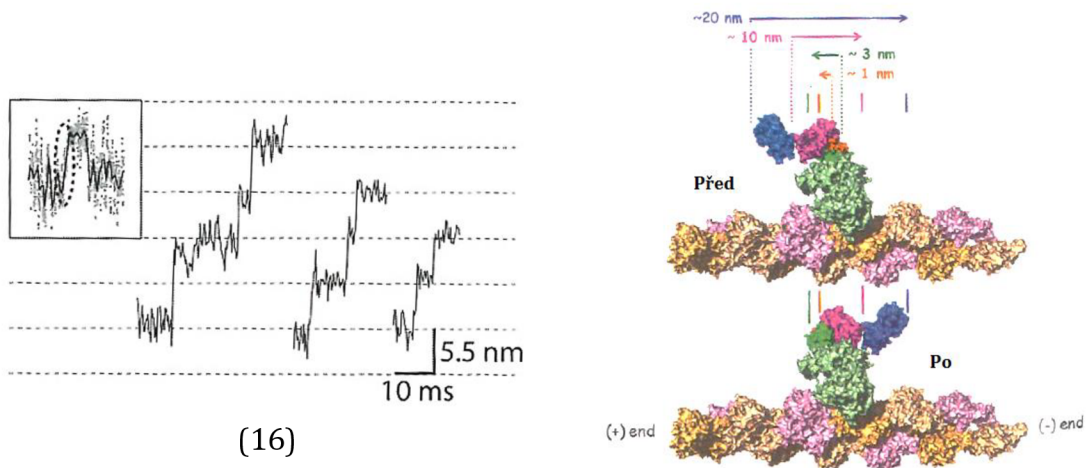
Obr. 1.5 Příklady tlumení v závislosti na koeficientu útlumu

1.2.3 Aplikace a směr výzkumu v biologii

Od publikace Ashkinova článku o zachycování pomocí gradientních optických pastí se optická pinzeta stala nepostradatelným nástrojem ke zkoumání biologických jevů. Schopnost manipulovat a zkoumat jednotlivé molekuly nebo soubory molekul vedlo k novému způsobu definování základních stavebních kamenů buňky a jejích mechanismů. Z tohoto hlediska byly například změřeny síly pohybu DNA polymerázy postupující podél molekuly DNA po jednotlivých bázích, přičemž takové měření vyžaduje přesnost měření v řádech jednotek angströmů. (16)



Obr. 1.6 Monitorování párování jednotlivých bází



Obr. 1.7 Záznamy kroků myosinu (vlevo), ilustrace změny konformace proteinu

Spojením technik pro ověřování pohyblivosti a jednomolekulových technik za použití laserového zachycování byly získány detailní informace o kinesinech, myozinech a enzymech pracující s DNA. Dále byly vynalezeny protokoly, které popisují spojení anti-GFP protilátek k mikročasticím. (16)

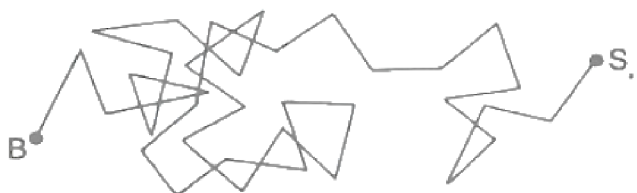
2 POHYB ČÁSTICE ZA NÍZKÝCH TLAKŮ

"Mass: The quantity of matter in a body; its inertia, or resistance to acceleration."

- Stephen Hawking

2.1 Brownův pohyb

Velice důležitým aspektem optického zachytávání je všudypřítomný Brownův pohyb tedy výsledek kolizí s molekulami okolního prostředí, ve kterém je mikroskopická částice pozorována. Vlastnosti tohoto pohybu jsou mimo jiné závislé na teplotě a viskozitě (8). Plošné vyobrazení Brownova pohybu je ukázáno na obrázku 2.1.



(18)

Obr. 2.1 Trajektorie Brownova pohybu

Pohyb zachycené částice je výsledkem souhry náhodného pohybu a deterministických optických sil. Následně dochází k postupnému usazování částice poblíž rovnovážné pozice v ohnisku laserového paprsku, ale i přesto se nikdy úplně nezastaví a osciluje zde díky setrvačnosti a Brownově pohybu. [1]

2.2 Popis pohybu částice v optické pasti

Pro tento systém je pohyb částice popisován Langevinovou rovnicí, která je druhým Newtonovým zákonem pro oscilátor s termální budivou silou. Její obecná rovnice je

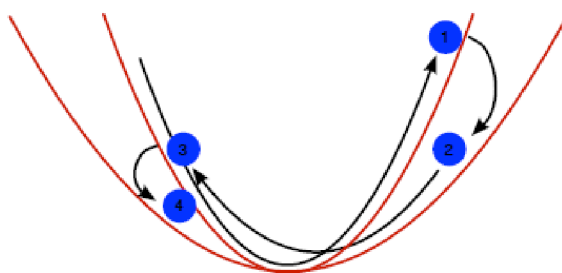
$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma m \frac{dx}{dt} + m\omega_0^2 x = F(t) \quad (2.1)$$

Pohybová rovnice popisující vynucený pohyb částice o hmotnosti m podél jedné osy v imerzním prostředí v harmonické potenciálové jámě ve vakuu má tvar (6)

$$\ddot{x} + \Gamma_0 \dot{x} + \Omega_0^2 x [1 + \xi x^2] = \frac{\mathcal{F}_{\text{fluct}}}{m} \quad (2.2)$$

kde Γ_0 je koeficient tlumení, Ω_0 je vlastní frekvence oscilátoru, ξ je Duffingova nelinearita, m je hmotnost částice a $\mathcal{F}_{\text{fluct}}$ je budící síla, která je dána časově náhodnými fluktuacemi, které mají charakter bílého šumu a ve spektrální rovině má rovnoměrně zastoupené všechny složky. Oscilátor je Stokesovou silou podtlumený. (15)

Pro podmínky tohoto experimentu je třeba částice o poloměru v rozmezí 35-120 nm. Menší částice by měly vysokou pravděpodobnost vyražení z pasti termálními silami, zatímco větší částice by byly vytlačeny příliš velkou rozptylovou silou. Setrvačná síla převládá ve vakuu několika milibarů, přičemž pohyb částice se stává balistickým. (6)



(6)

Obr. 2.2 Ilustrační obrázek pohybu zachycené částice

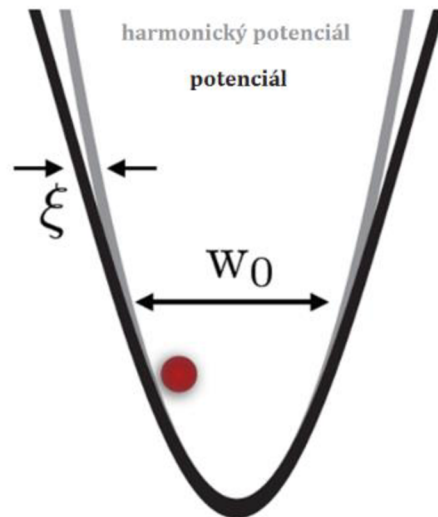
Pohyb částice sestává ze tří režimů pohybu, přičemž každý odpovídá jednomu prostorovému rozměru. Pro velké amplitudy se na sebe jednotlivé módy váží kubickými nelinearitami v optických silách. Koeficient tlumení může být kontrolován tlakem ve vakuové komoře. Třetí část rovnice (2.2) pak závisí na několika experimentálních parametrech.

Prefaktor je úměrný střední optické síle a definuje tak frekvenci f_0 zachycené částice.

Duffingova nelinearita je způsobena tvarem optického potenciálu. Jeho vliv nabývá důležitosti při amplitudách srovnatelných s šířkou laserového paprsku.

Pro aplikace nanomechanických rezonátorů, mezi které patří například snímání, je důležité porozumět jakým způsobem rezonátor odpovídá na vlivy svého okolí. Pro velké oscilační amplitudy pohybu částice převládá nelinearita. Tato

Duffingova nelinearita je běžná pro většinu nanomechanických oscilátorů, které tak jsou ideálním systémem pro zkoumání nelineárního dynamického chování. (6)



(8)

Obr. 2.3 Znázornění Duffingovy nelinearity

Pro veliké oscilační amplitudy optický potenciál přestává mít harmonický charakter. (6)

Ze vzorce pro výpočet oscilační frekvence částice

$$\Omega_m/2 = \Omega_0 + \frac{3\xi x_0^2}{8} \quad (2.3)$$

je možné získat hodnotu Duffingovy nelinearity.

$$\xi = \frac{8 \left(\frac{\Omega_m}{2} - \Omega_0 \right)}{3x^2} \quad (2.4)$$

2.3 Metody vyhodnocení vlastností optické pasti

Kalibrováním optické pasti se získává nejdůležitější charakteristika optické pasti, kterou je tuhost κ_x , jež je úměrná výkonu laseru. Mezi nejběžnější pasivní techniky kalibrace patří *potenciálová analýza*, *MSD (mean squared displacement)*, *ACF (autokorelace)*, *CCF (vzájemná korelace)* a *PSD (power spectrum density)*.

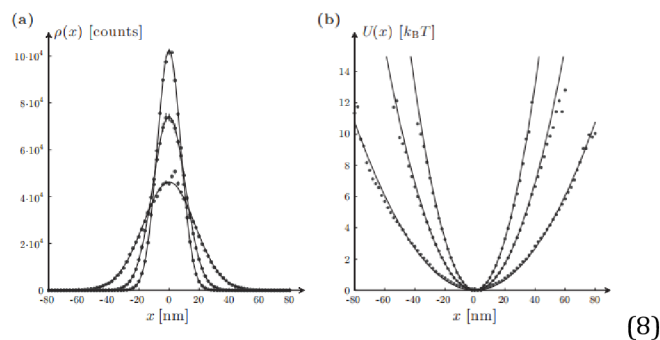
2.3.1 Potenciálová analýza – histogramy

Tato metoda jako jediná z uvedených nepředpokládá, že potenciál optické pasti je harmonický, což je také právě důvodem, proč se této metody může využít k ověření či vyvrácení této hypotézy. Na Obr. 2.4a je zobrazen histogram, který je výsledkem závislosti pozic a poziční pravděpodobnostní distribuce $\rho(x)$. Tato distribuce odpovídá Maxwell-Boltzmannově distribuci.

$$\rho(x) = \rho_0 \exp\left[-\frac{U(x)}{k_B T}\right] \quad (2.5)$$

Tato metoda nepředpokládá, že potenciál je harmonický, a proto se užívá k ověření této charakteristiky, a navíc je použitelná i pro komplikovanější potenciály. V praxi je třeba nezávislých vzorků x_l v časech t_l pro celkovou dobu měření T_s . Poziční hodnoty jsou dále seřazeny do série stejně velkých shluků podél x-ové osy tak, že c_m odpovídá počtu pozic spadajících do m-tého shluku. Výsledný histogram $\{c_m\}$ je aproximací poziční pravděpodobnostní distribuci $\rho(x)$. Tento proces může být opakován pro získání průměrných hodnot a standartní odchylky. Z hodnot c_m je konečně možný výpočet U_m :

$$U_m = -k_B T \log(c_m) \quad (2.6)$$



Obr. 2.4 a) Pravděpodobnostní distribuce; b) Potenciály pasti

Na Obr. 2.4a jsou vyobrazeny tři pravděpodobnostní distribuce a na Obr. 2.4a je vyobrazen vypočtený potenciál. Pro oba případy jsou data proložena teoretickou aproximací pro tři různé výkony laseru.

Určení potenciálu touto metodou je subjektem určitých systematických chyb jako například nekorelovaný šum (mechanické vibrace o nízké frekvenci) a detekční chyby. Také pokud data jsou korelovaná, přítomnost dolní propusti v záznamovém zařízení systému může mít také vliv na zkreslení. (8)

2.3.2 Střední kvadratický posuv – MSD

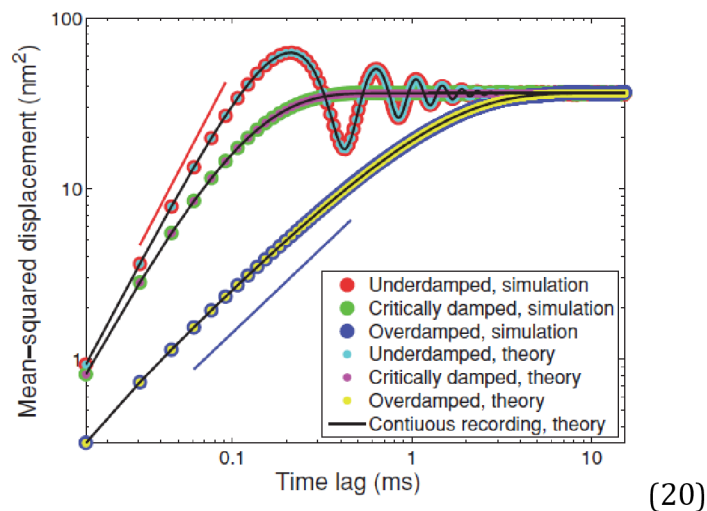
Přesnější charakterizace optické pasti podává MSD opticky zachycené částice. Podstatou MSD je kvantifikace pohybu částice od své počáteční pozice. Pro příklad pro balistický pohyb je MSD úměrné druhé mocnině času, pro difúzní pohyb je času přímo úměrné, ale pro zachycenou částici saturuje na konstantní hodnotě. (8)

Většinou je tato metoda použita jako první, protože je snadná a poskytuje exaktní analytické výsledky pro očekávané hodnoty a je odolná vůči experimentálním chybám měření. Dále jí také neohrožují diskretizační vlivy. Výhodou je také, že na rozdíl od kovariance je tento proces nevázaný.

Vztah mezi MSD a kovariancí je dán rovnicí

$$\text{MSD}(t) \equiv \langle [x(t) - x(0)]^2 \rangle = 2\langle x^2 \rangle - 2\langle x(t)x(0) \rangle \quad (2.7)$$

kde $\langle x^2 \rangle = k_B T / \kappa$. MSD je konstanta, od níž se odečte dvojnásobek autokorelace pozičního výpočtu. Červeno-modré body na obr. 2.5 znázorňuje průběh MSD pro podtlumený režim. (20)



Obr. 2.5 Ilustrace MSD simulovanými daty

Pro případ velice nízkých hmotností – je MSD

$$\langle [x(t) - x(0)]^2 \rangle = \frac{2D\gamma}{\kappa} \left(1 - e^{-\frac{t\gamma}{\kappa}} \right) \quad (2.8)$$

což vykazuje exponenciální přechod z lineární závislosti na čase ke konstantní hodnotě $2D\gamma/\kappa$ s rostoucím časem.

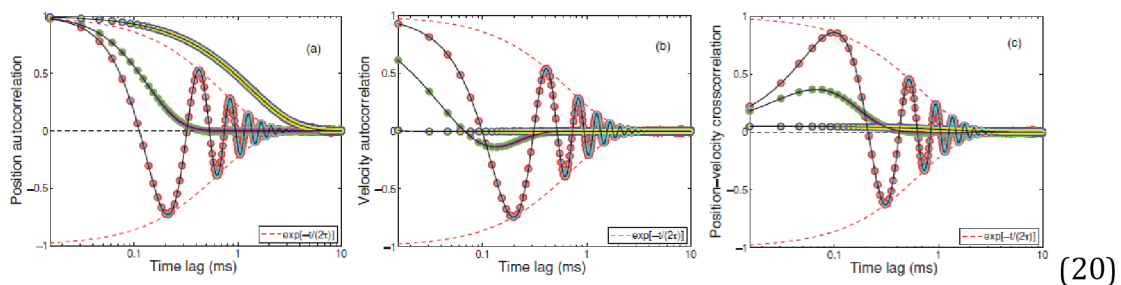
2.3.3 Autokorelace a vzájemná korelace

Autokorelační metoda se užívá v časové oblasti pro dekonvoluci více komplexní dynamiky zachycené částice. Poziční autokorelace poskytuje měření času, který částici trvá „zapomenout“ svojí původní polohu. Interval $2\tau_{ot,x}$ charakterizuje, jak částice vpadá do pasti: čím více vzrůstá tuhost, částice podstupuje působení silnější obnovovací síly a $\tau_{ot,x}$ se zmenšuje. (8) Rovnice (2.9) odpovídá poziční autokorelaci. Rovnice (2.10) odpovídá autokorelaci rychlostí a rovnice (2.11) je vzájemnou korelací poloh a rychlostí. (20)

$$C_{x,k} = \frac{\langle x(t)x(0) \rangle}{\langle x^2 \rangle} \quad (2.9)$$

$$C_{v,k} = \frac{\langle v(t)v(0) \rangle}{\langle v^2 \rangle} \quad (2.10)$$

$$C_{x,v,k} = \frac{\langle x(t)v(0) \rangle}{\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle v^2 \rangle}} \quad (2.11)$$



Obr. 2.6 Autokorelační funkce (pozice, rychlost), vzájemná korelace

Na obrázku 2.5 jsou vyobrazeny autokorelační průběhy jednotlivě pro poziční data a data rychlostí. Třetí obrázek je jejich vzájemnou korelací. (20)

Oscilace autokovariančních funkcí jsou způsobeny termálním šumem a mají náhodný fázový posun tímto šumem způsobený. Jeho zapříčiněním také dochází k exponenciálnímu poklesu amplitud v čase 2τ (viz obrázky 2.6). Stejně jako u MSD zde neexistují žádné diskretizační efekty – kovariance pro konečnou vzorkovací frekvenci je jednoduše kovariancí pro plynulý záznam. V případě rychlostí zpětně vypočtených je třeba odlišného výpočtu. (20) Zvláštním případem je optické zachytávání pro výpočet. V takovém případě je autokorelace

$$\langle x(t) x(t') \rangle = \langle x^2 \rangle e^{-2\pi f_c |t-t'|} \quad (2.12)$$

2.3.4 Spektrální hustota energie

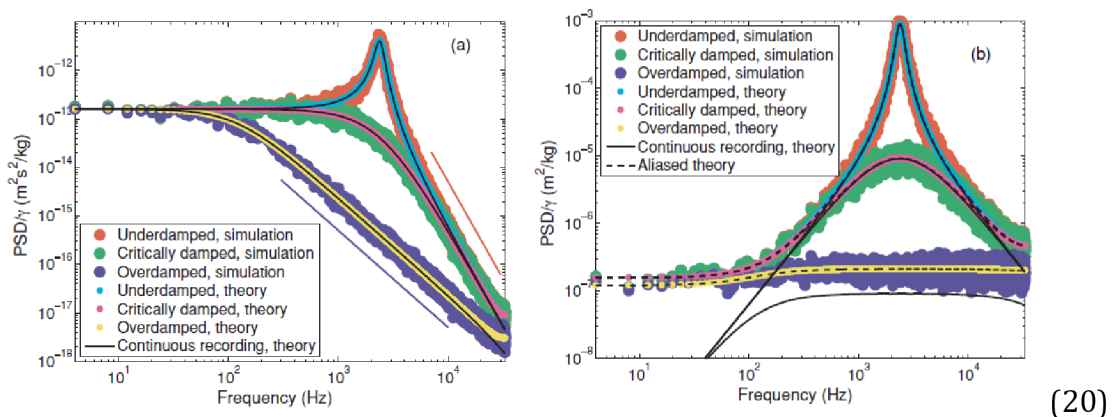
Analýza spektrální hustoty energie je nejspolehlivější metodou, pokud bereme v úvahu kulaté částice. Největší výhodou této metody je práce ve frekvenční oblasti, což dovoluje odstranění běžných rušivých šumů jako například drift signálu nebo sinusoidální šum (způsobený elektrickou sítí) (8). Výkonové spektrum pozičních a rychlostních dat je definováno jako očekávaná hodnota čtverce modulu Fourierovy transformace. Alternativou pro tento přístup je Fourierova transformace autokorelační funkce (viz výše).

Pro procesy s téměř nulovou tuhostí není poziční proces stacionární, a proto je pro výpočet výkonového spektra platný výraz

$$P^{(x)}(f_k) = \frac{D/(2\pi^2)}{f_c^2 + f_k^2} \quad (2.13)$$

kde f_c je „rohová“ frekvence.

Na obr. 2.7 jsou vyobrazeny výkonová spektra pro poziční a rychlostní data.



Obr. 2.7 Výkonová spektra (pozice, rychlost)

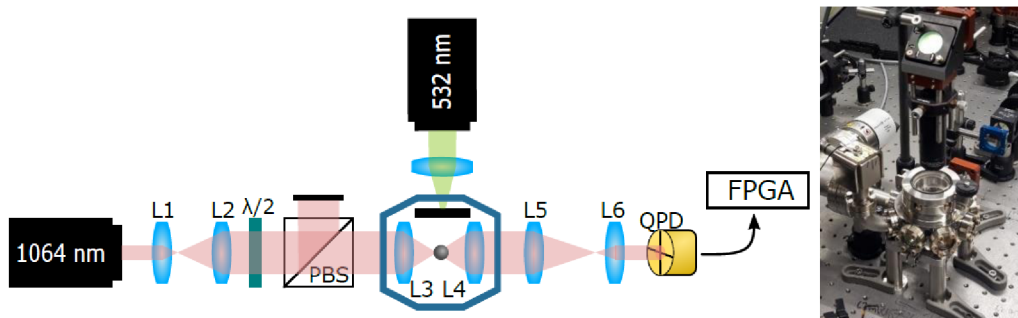
3 EXPERIMENTÁLNÍ SOUSTAVA A DATA

"The successful warrior is the average man, with laser-like focus."

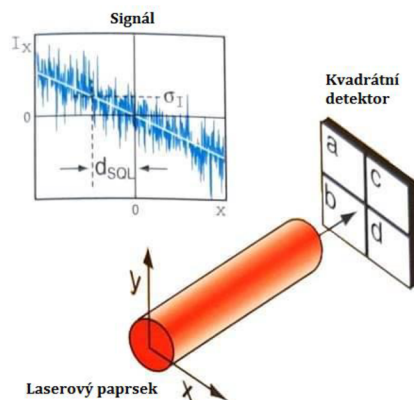
- Bruce Lee

3.1 Technické parametry

Experimentální data, jejichž analýzou se zabývá tato práce, byla naměřena na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. Zachycení částice je uskutečněno v lineárně polarizovaném laserovém paprsku o vlnové délce 1064 nm (Mephisto 2000NE). Pomocí čoček L1 a L2 (Obr. 3.1a) je paprsek čtyřnásobně rozšířen. Soustředění paprsku za účelu vytvoření optické pasti je podíleno asférickou čočkou (Lightpath 355330), která se nachází uvnitř vakuové komory. Zachytávané nanočástice jsou vpravovány do komory (obrázek 3.1b) v křemíkovém roztoku a za užití pulzního laserového paprsku o vlnové délce 532 nm (Continuum Minilite MLII) je nanočástice o poloměru 170 nm (Bangs Laboratories, Ing.) vpravena do záchyťového paprsku. Světlo, které nese informaci o poloze částice je detekováno kvadrátním detektorem (Hamamatsu G6849)



Obr. 3.1 Schéma sestavení experimentální aparatury, vakuová komora



(21)

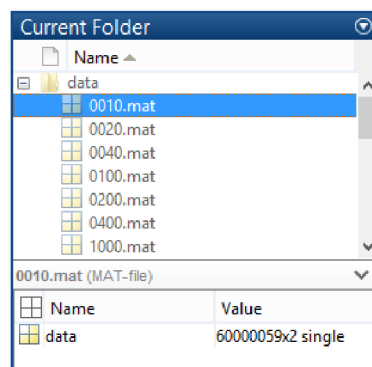
Obr. 3.2 Mechanismus zisku polohových souřadnic částice

Když laserový paprsek dopadá na kvadrátní fotodetektor, porovnání dopadajících intenzit na jednotlivé pixely dovoluje přesně znát polohu dopadajícího paprsku vůči detektoru. Navíc hodnoty obsahují fluktuace spojené s rozdíly v dopadu jednotlivých fotonů. (21)

Na obrázku 3.2 je vyobrazen signál s rozdílem v měřených hodnotách, a proto signál neodpovídá přímé čáře podél osy x a je předmětem fluktuací, které stanovují limit přesnosti měření. Tento kvantový šum je úměrný počtu dopadajících fotonů. Kvůli kvantové fyzice směrový směr světla fluktuuje. V případě průměru paprsku několik stovek mikrometrů jsou fluktuace několik Ångströmů každou mikrosekundu. (21)

3.2 Data

Data pro zpracování a analýzu přechodového děje opticky zachycené částice pro účely této bakalářské práce byla poskytnuta celkem pro sedm měření za různých tlaků. Každý soubor obsahoval data ve dvou sloupcích, které odpovídaly měřením pro osy x a y. Na Obr. 3.3 je vyobrazen požadovaný formát pojmenování souborů s daty, kde jména souborů jsou čtyřmístný údaj o tlaku v pascálech. Z obrázku je evidentní, že práce se zabývá zpracování dat s tlaky 10 Pa, 20 Pa, 40 Pa, 100 Pa, 200 Pa, 400 Pa a 1000 Pa. Celkem pro každou osu bylo poskytnuto šedesát měření po milionu vzorcích oddělených hodnotou „NaN“ za posledními vzorky každého měření. Jednotlivé soubory tedy obsahovali matice s názvem *data* o rozměrech 60000059x2.



Obr. 3.3 Požadovaný formát originálních dat

3.2.1 Filtrace dat

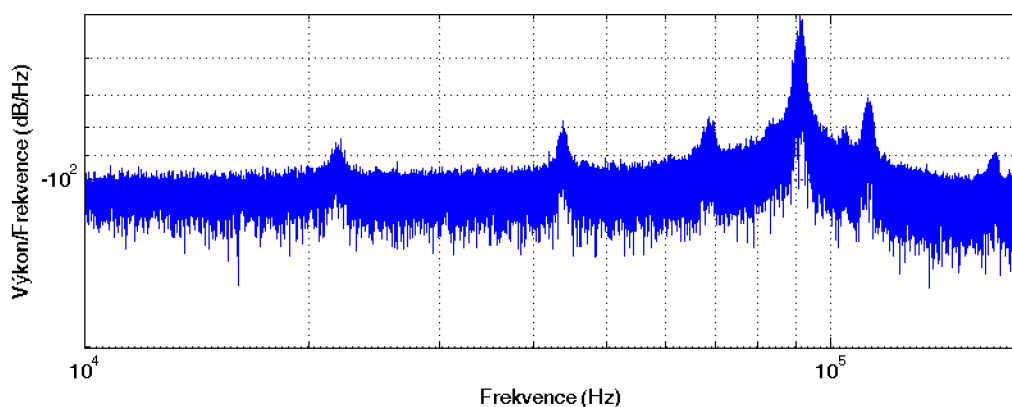
Na obrázku 3.4 je vyobrazeno výkonové spektrum signálu xp0010, kde jsou kromě hlavního maxima vyskytujícího se na rezonanční frekvenci, menší, ale stále výrazné píky na různých frekvencích. Pro přiblížení se očekávaným hodnotám měření a zjištění vlivu těchto maxim na signál či efekt na pohyb částice byla na signálu

provedena filtrace pomocí programu *kodfil.m*, který načítá originální signál např.: **xp0010.mat** (obr. 3.4), provádí filtraci pomocí FIR filtrů pro jednotlivá maxima v a vrací signál vyfiltrovaný, který dále ukládá jako **xp0010F.mat**. (obr. 3.5)

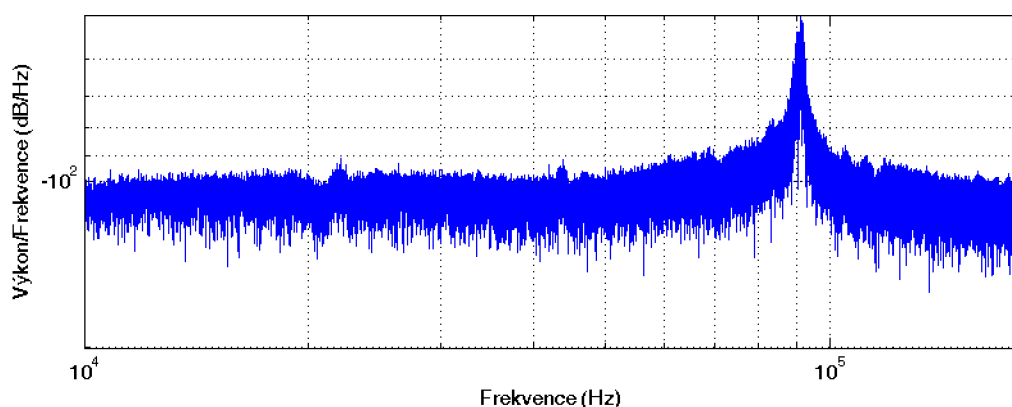
Program je nastaven pro jednotlivé kombinace os a tlaků individuálně, jelikož umístění maxim není statické pro všechna měření. Současně ale také signály mají vysokou podobnost ve svých spektrech. Přehled spekter v rozmezí tlaků 10 Pa a 200 Pa jsou v přílohách 1 a 2.

Filtrace nebyla provedena u měření s tlakem 400 Pa a 1000 Pa, jelikož zmíněná „neteoretická“ maxima se zde nevyskytují. Na základě tohoto faktu je následná analýza rozdělena do tří datasetů. Viz níže.

Vykreslení výkonových spekter zajišťuje program *spektVYK.m*.



Obr. 3.4 Výkonové spektrum - před filtrací



Obr. 3.5 Výkonové spektrum - po filtraci

Mezi všeobecné zdroje šumu a rušení měření bývají vzduchové fluktuační, vibrace podlahy, Brownův pohyb, akustické rušení aj. (16) (16)

4 ANALÝZA PŘECHODOVÉHO DĚJE

"Were not the gods forms created like me and you, mortal, transient?"

— Hermann Hesse

Pro účely zpracování dat této bakalářské práce bylo určeno pět různých počátečních amplitud pro přechodový děj, jejichž hodnoty jsou následující: 50 μm , 75 μm , 100 μm , 125 μm , 150 μm . Tolerance kolem nulové rychlosti je stanovena na 5000 $\mu\text{m/s}$ a tolerance pozičních dat amplitudy je 4 μm .

4.1 Počáteční podmínky

Skript *PocatecniPodminky.m* slouží prohledání pozičních záznamů trajektorie opticky zachycené částice, vyhledání žádaných úseků odpovídajících přechodovému ději pro dané počáteční amplitudy, a konečně jejich uložení do struktury pro následující analýzu.

Po spuštění skriptu se volí požadovaný signál z podložky *data*. Soubory v této složce by měly splňovat určitá pravidla pojmenování, jelikož právě jméno načteného signálu již poskytuje další vstupní informace o signálu, které jsou nezbytné pro třídění dat. Tuto identifikaci provádí funkce *reader.m*. Pokud chce uživatel hledat odpovídající přechodové děje pouze v originálním signálu, měl by zvolit pro načtení tento soubor (př.: *xp0010.mat*). Naopak pokud tento signál již filtroval pomocí funkce *kodfil.m*, měl by zvolit tento soubor (př.: *xp0010F*) pro získání dat z obou signálů.

Vstupy

Na první jména souboru pozici je písmeno X nebo Y v závislosti na tom, jedná-li se o data z osy X nebo Y. Druhou pozicí je vždy písmeno P značící poziční data. Další 4 pozice jsou čísla, která vyjadřují velikost tlaku v pascálech, za jakých byl pohyb částice naměřen. Poslední pozice určuje, jestli skript bude načítat a analyzovat pouze originální data, nebo i data filtrovaná. Např. prvek *XP0040F* značí, že se jedná o data z osy X, naměřené při tlaku 40 Pa, a skript bude analyzovat data originální i filtrovaná.

Výpočet

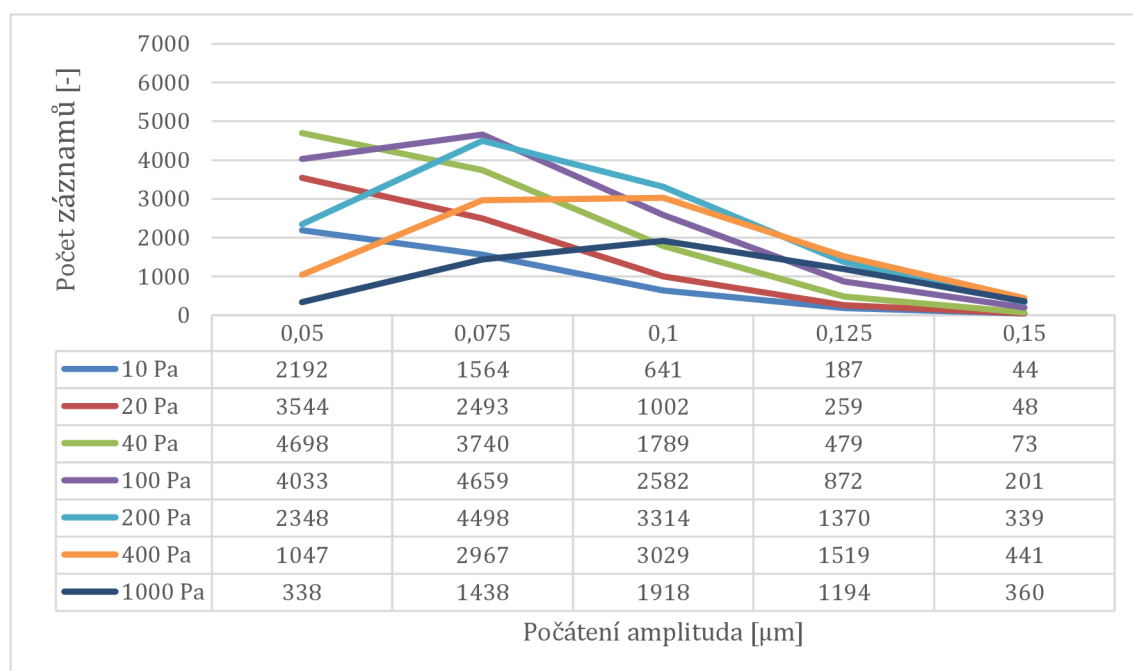
Pro následující zdárnou detekci amplitud jsou vypočítány okamžité rychlosti signálu. Následuje nalezení míst v signálu, kde jsou současně nulové rychlosti (místo amplitudy) a velikost pozičních dat odpovídá vyhledávané počáteční podmínce.

V případě detekce takového místa dochází k ověření, že následující čtyři maxima (amplitudy) mají postupně klesající charakter. V takovém případě program našel přechodový děj.

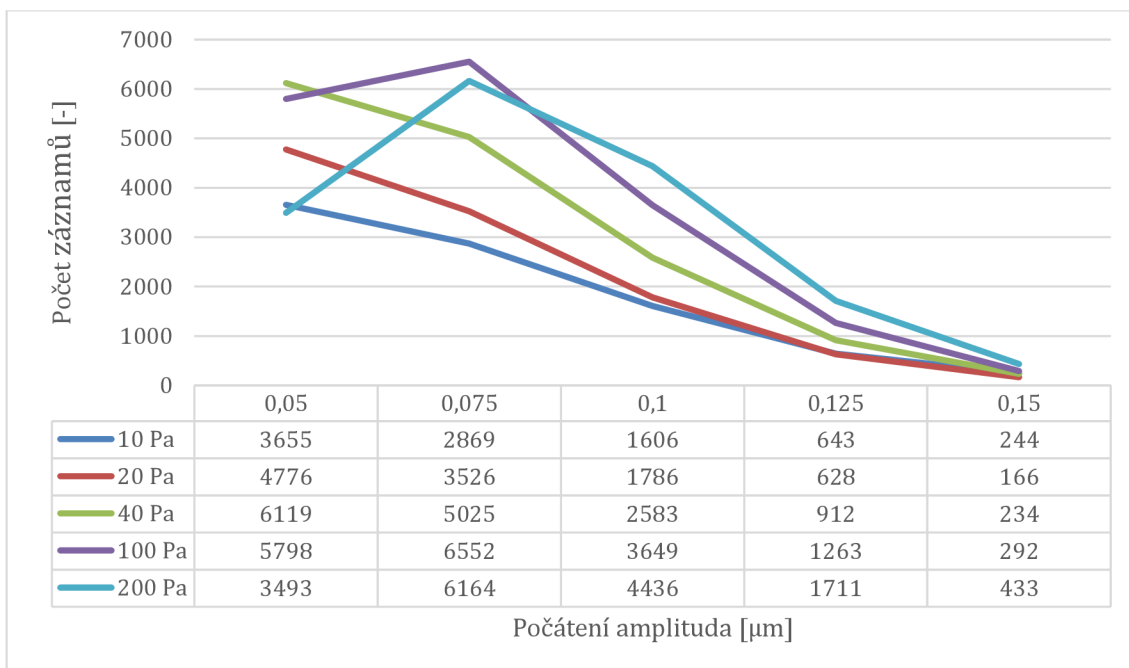
Výstupy

Z originálních dat jsou získávány poziční hodnoty odpovídajících počátků trajektorií pro originální signál, a záznamy trajektorie po dalších 90 vzorků ukládá do struktury **záznamy** funkce *saver.m*. Na obrázku 4.1 jsou vyobrazeny počty nalezených trajektorií v originálním signálu osy x pro různé tlaky a počáteční amplitudy.

V případě, že byla splněna podmínka přítomnosti filtrovaného signálu, program zjišťuje také trajektorie pro tento signál a ukládá je do struktury **zaznamyFF**. Na obrázku 4.2 jsou vyobrazeny počty nalezených trajektorií filtrovaného signálu.

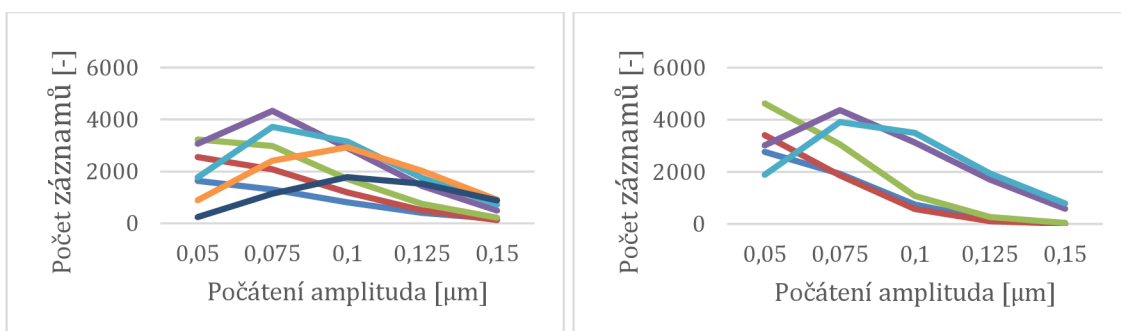


Obr. 4.1 Počet získaných pozic pro originální data. Osa X.



Obr. 4.2 Počet získaných pozic pro filtrovaná data. Osa X.

Zvláštním případem je struktura **zaznamyF**, která ukládá trajektorie ze signálu filtrované v pozicích určených signálem originálním. V takovém případě nemusí první hodnota trajektorie odpovídat podmínce počáteční amplitudy. Tato data dále slouží k porovnání vlivu filtrace na fázové portréty, kterými se tato práce zabývá v následujících kapitolách. Počet těchto trajektorií odpovídá počtu trajektorií ze signálu originálního (viz obrázek 5.1)

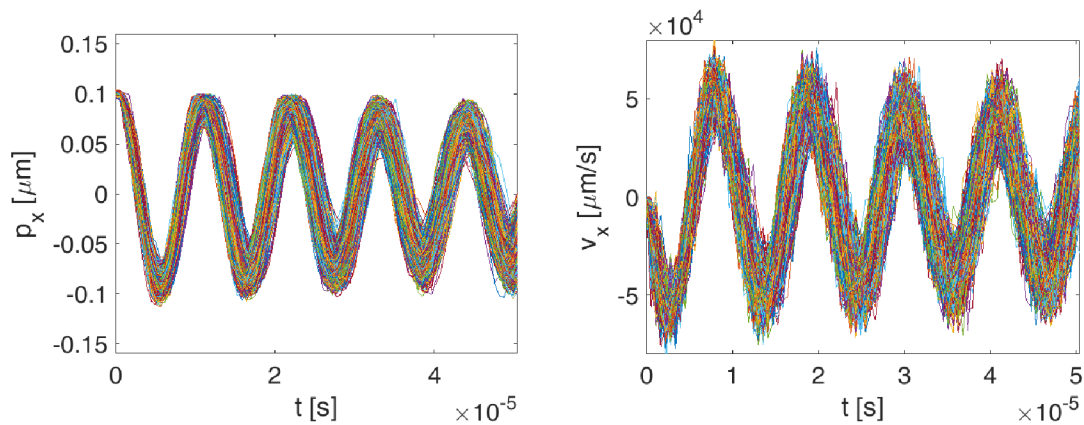


Obr. 4.3 Počty pozic dat originálních (vlevo) a filtrovaných (vpravo). Osa Y.

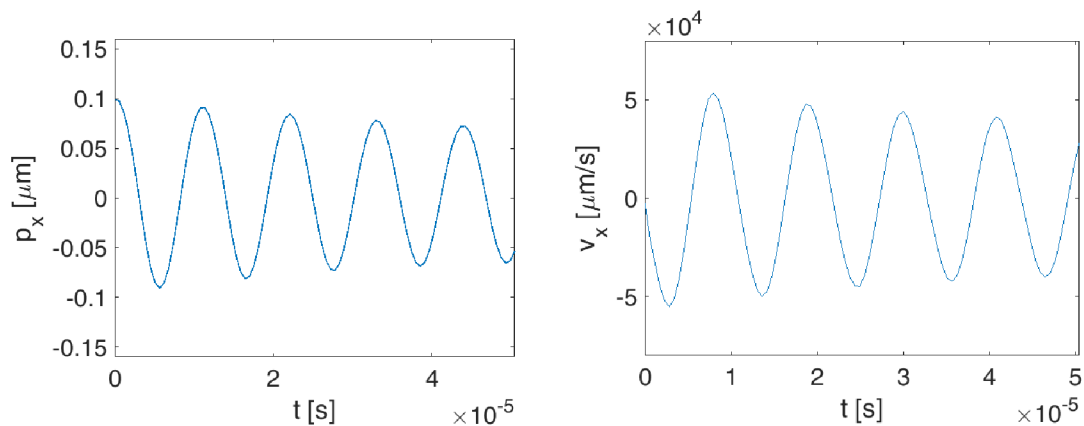
4.2 Fázové portréty

Pomocí skriptu *FazovePortrety.m* jsou získávána průměrná a varianční data pro získané poziční a rychlostní data uložena ve variantách struktury *zaznamy*. Z průměrných dat pak dále vykresluje fázové portréty.

Funkce *prumery.m* vrací strukturu **avezaznamy** pro originální data. V obdobném stylu jako výchozí proměnné jsou pojmenovány i alternativy pro filtrované signály **avezaznamyF** a **avezaznamyFF**. Příklad původních trajektorií a rychlostí je vyobrazen na obrázku 4.4. Výsledné průměrná trajektorie a rychlost získané z proměnných *zaznamyF.x0040.PP0100.p* a *zaznamyF.x0040.PP0100.v* jsou vyobrazeny na obrázku 4.5. Zde také můžeme pozorovat očekávané předběhání dat pozičních daty rychlostními.



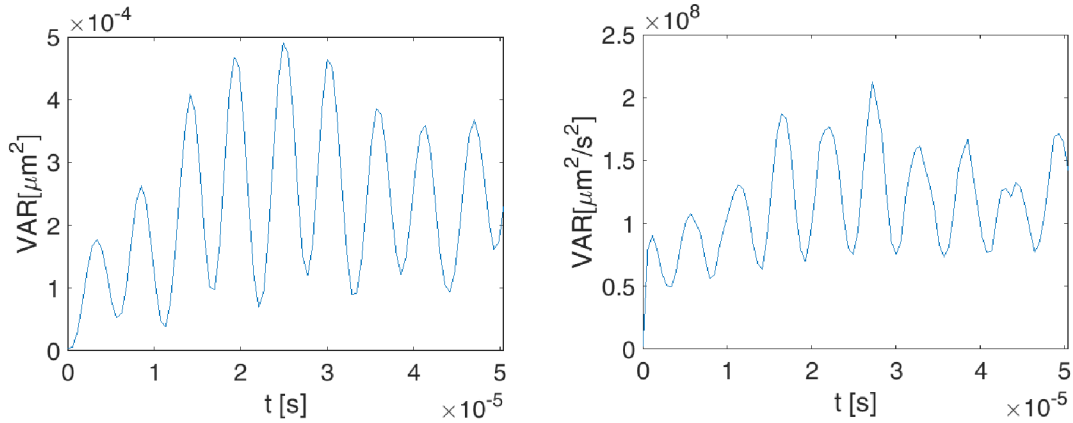
Obr. 4.4 Záznamy trajektorií a rychlostí před průměrováním



Obr. 4.5 Průměrné trajektorie a průměrné rychlosti

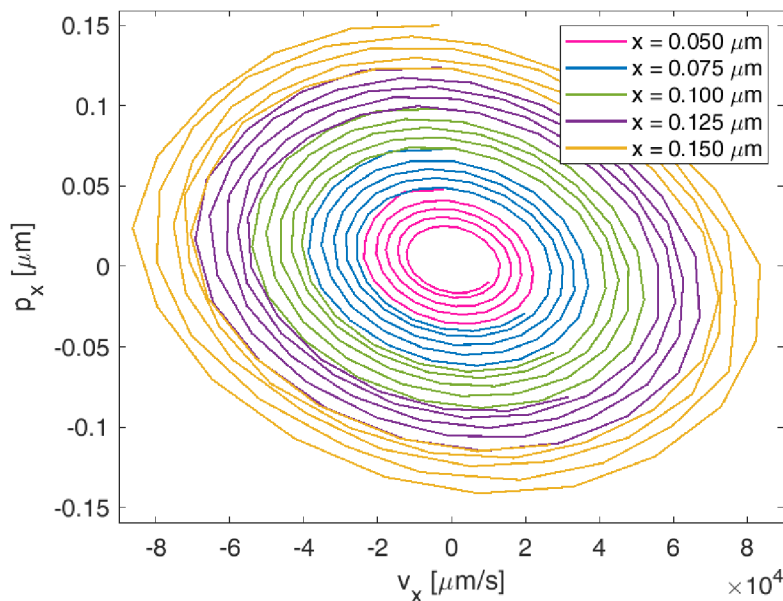
Funkce *variance.m* pracuje stejně jako funkce *prumery.m* se všemi získanými záznamy pouze s tím rozdílem, že jak název již napovídá, jejím úkolem je výpočet variančních dat **varzaznamy**, **varzaznamyF** a **varzaznamyFF**. Obrázek 4.6

vyobrazuje opět tyto hodnoty pro *zaznamyF.x0040.PP0100.p* a *zaznamyF.x0040.PP0100.v*.



Obr. 4.6 Variance dat pozic a rychlostí

Funkce *portrety.m* pracuje se strukturami *avezaznamy*. Z průměrných dat rychlostí a pozic pro jednotlivé podmínky pak vykresluje a ukládá fázové portréty. Obrázek 4.7 vyobrazuje, jak takový portrét pak vypadá opět pro data x-ové souřadnice, tlaku 40 Pa a v tomto případě pro všechny počáteční amplitudy fázový portrét.



Obr. 4.7 Fázový portrét

Poslední funkcí, kterou program *FazovePortrety.m* volá je funkce *matice.m*, která veškeré průměrné a varianční hodnoty pozic a rychlostí ukládá do matic o rozměrech 7(tlaky)x5(počáteční podmínky). Každý z těchto záznamů má opět délku 90 vzorků. Proměnné **poctyX**, **poctyXFF**, **poctyY**, a **poctyYFF** obsahují hodnoty počtu průměrovaných záznamů (viz obrázky 4.1-4)

Všechny výše zmíněné funkce obsahují na vstupu proměnnou *factor*, která pro funkce definuje, zda analyzuje data originální či filtrovaná, čímž se mění počet zpracovávaných tlaků, vzhledem k tomu, že data 400 Pa a 1000 Pa filtrována nebyla.

Přílohy 3-14 obsahují vyobrazení fázových portrétů, průměrných pozic a rychlostí a také jejich variancí pro osu X a všech sedm tlaků ve vzájemném porovnání dat originálních s daty filtrovanými pro stejná místa v signálu (podle detekcí z dat originálních) – porovnání druhu F, a dále porovnání dat originálních s daty filtrovanými pro vlastní místa detekcí – porovnání druhu FF.

4.3 Parametry

Tato část práce prezentuje výsledné hodnoty pro vybrané parametry představené v kapitole 1.2.2.

4.3.1 Parametry nezávislé na frekvenci:

Tab. 4-1 Hodnoty charakteristického času a koeficientu tlumení

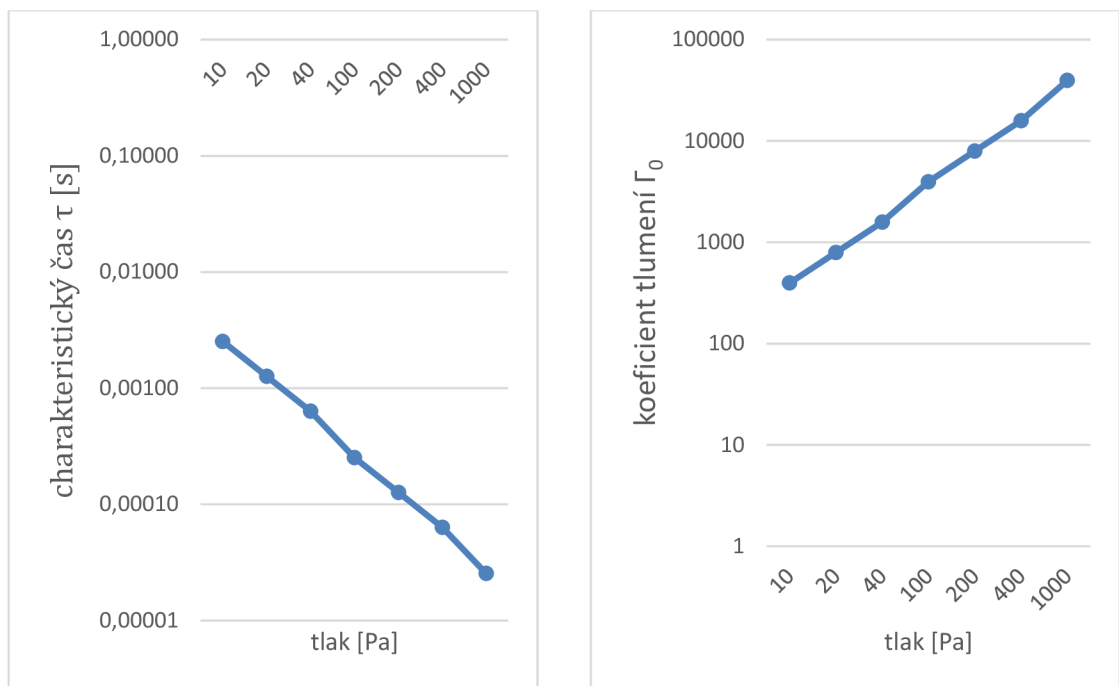
tlak [Pa]	tau [s]	Γ_0
10	0,00253	395,7358
20	0,00126	791,4408
40	0,00063	1582,758
100	0,00025	3955,968
200	0,00013	7908,842
400	0,00006	15805,29
1000	0,00003	39419,74

Koeficient tlumení Γ_0

je získáván pomocí funkce *gammaGeis.m* podle rovnice (1.5) jejíž vstupní hodnoty jsou poloměr částice a vektor tlaků. V rámci funkce je pro výsledné koeficient vypočtena dynamická viskozita vzduchu, hustota částice, hmotnost částice, Stokesův koeficient a Knudsenovo číslo.

Charakteristický čas τ

je vypočten jednoduše jako převrácená hodnota koeficientu tlumení. Grafická závislost těchto parametrů na tlaku je vyobrazena na obrázcích 4.8 a 4.9.



Obr. 4.8 Závislosti char. času a koeficientu tlumení na tlaku

4.3.2 Parametry závislé na počáteční frekvenci:

Ze zprůměrovaných trajektorií byly získány hodnoty *vlastní oscilační frekvence* tlumeného oscilátoru **freqX** a **freqY**. Tato frekvence byla vypočtena pomocí funkce *osciFreq.m*, kde jako vstupy slouží *strukturaXP* a *strukturaYP* společně s časovým intervalem t pro 90 vzorků a *factorem* (opět). Oscilační frekvence je definována jako převrácená hodnota periody, která je zjištěna po nalezení prvního maxima od počátku. Obrázky 4.9 a 4.10 a Tabulky 4-2,3,4,5 vypočtené hodnoty pro různé tlaky.

Z vlastní oscilační frekvence se pak pomocí vzorce (1.3) získává *vlastní závislá frekvence oscilátoru* **wx** a **wy**, která je vypočítaná pomocí funkce *natural.m*. Vstupy jsou *freqX* a *freqY*, *gamma*, s časovým intervalem t pro 90 vzorků a *factorem*. Výsledné hodnoty jsou vyobrazeny obrázky 4.11 a 4.12 a tabulkami 4-6,7,8,9.

Vlastní nulová frekvence oscilátoru se za použití aproximace **wx** a **wy**, získá v bodě, kde charakteristická křivka *vlastní závislé frekvence oscilátoru* protíná osu x v nulových hodnotách na obrázcích 4.11 a 4.12

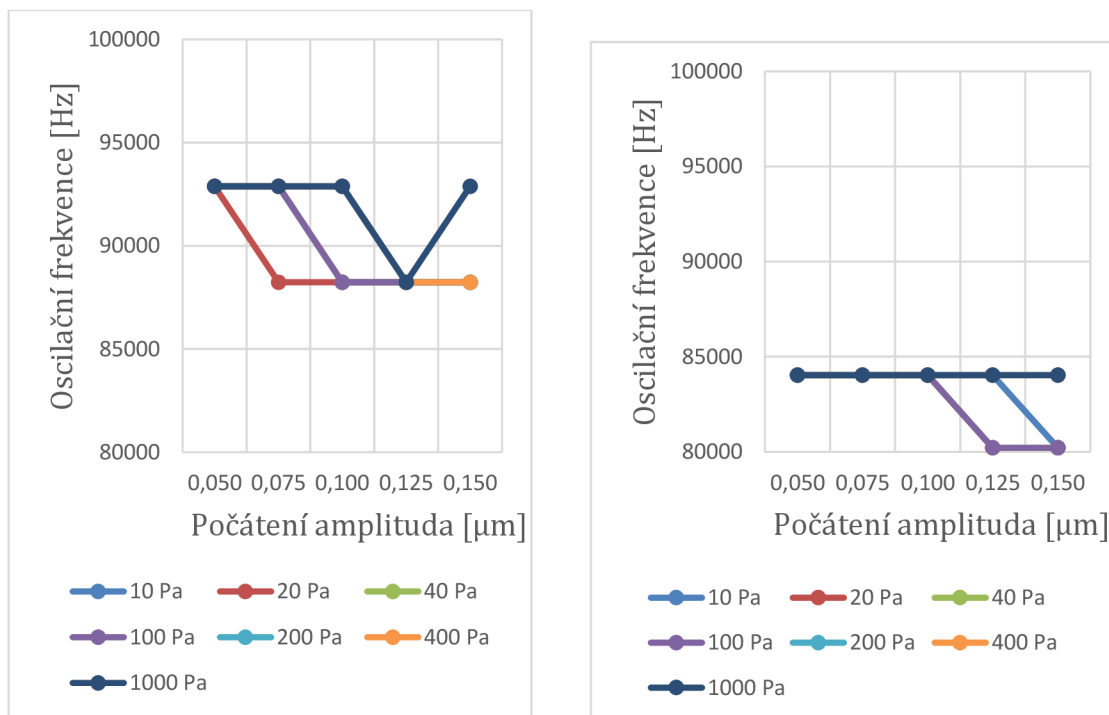
Posledním parametrem oscilátoru je *činitel jakosti* (q-faktor) vypočítaný pomocí funkce *cinitel*. Vstupem je vlastní závislá frekvence oscilátoru a frekvence *gama* (koeficient tlumení). Koeficient se vypočítá pomocí vzorce (1.4) a je zobrazen na obrázcích 4.13, 14.

Tab. 4-2 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] před filtrací. Osa X.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
20	92,879	88,235	88,235	88,235	88,235
40	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
100	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
200	92,879	92,879	92,879	88,235	88,235
400	92,879	92,879	92,879	88,235	88,235
1000	92,879	92,879	92,879	88,235	92,879

Tab. 4-3 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] před filtrací. Osa Y.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	84,034	84,034	84,034	84,034	80,214
20	84,034	84,034	84,034	80,214	80,214
40	84,034	84,034	84,034	80,214	80,214
100	84,034	84,034	84,034	80,214	80,214
200	84,034	84,034	84,034	84,034	84,034
400	84,034	84,034	84,034	84,034	84,034
1000	84,034	84,034	84,034	84,034	84,034



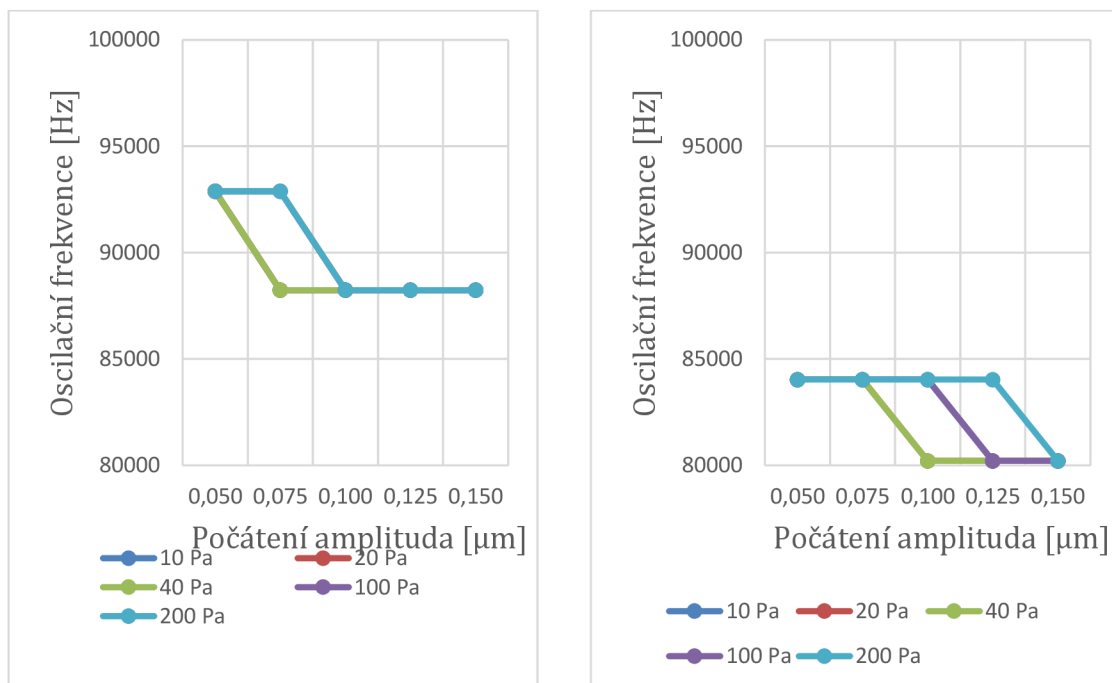
Obr. 4.9 Hodnoty oscilační frekvence před filtrací. Osa X (vlevo) a osa Y (vpravo)

Tab. 4-4 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] po filtraci. Osa X.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	92,879	88,235	88,235	88,235	88,235
20	92,879	88,235	88,235	88,235	88,235
40	92,879	88,235	88,235	88,235	88,235
100	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
200	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
400	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-

Tab. 4-5 Hodnoty oscilační frekvence [kHz] po filtraci. Osa Y.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	84,034	84,034	84,034	80,214	80,214
20	84,034	84,034	80,214	80,214	80,214
40	84,034	84,034	80,214	80,214	80,214
100	84,034	84,034	84,034	80,214	80,214
200	84,034	84,034	84,034	84,034	80,214
400	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-



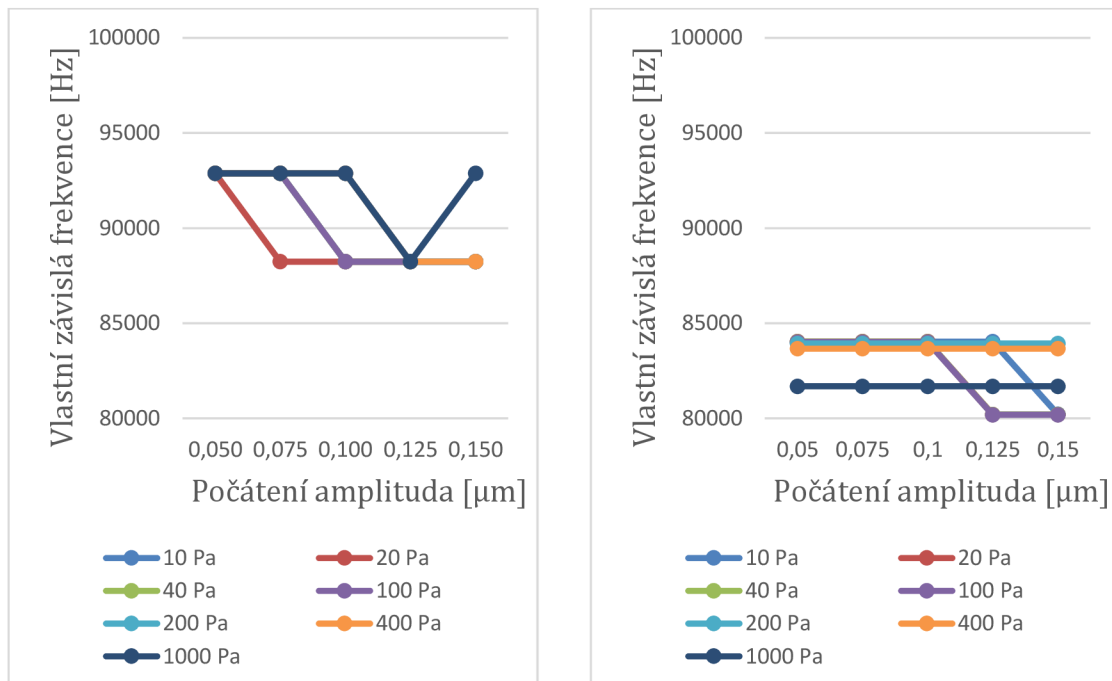
Obr. 4.10 Hodnoty oscilační frekvence po filtraci. Osa X (vlevo) a osa Y (vpravo)

Tab. 4-6 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] před filtrací. Osa X.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
20	92,879	88,235	88,235	88,235	88,235
40	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
100	92,879	92,879	88,235	88,235	88,235
200	92,879	92,879	92,879	88,235	88,235
400	92,879	92,879	92,879	88,235	88,235
1000	92,879	92,879	92,879	88,235	92,879

Tab. 4-7 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] před filtrací. Osa Y.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	84,033	84,033	84,033	84,033	80,214
20	84,033	84,033	84,033	80,213	80,213
40	84,030	84,030	84,030	80,210	80,210
100	84,010	84,010	84,010	80,190	80,190
200	83,941	83,941	83,941	83,941	83,941
400	83,661	83,661	83,661	83,661	83,661
1000	81,689	81,689	81,689	81,689	81,689



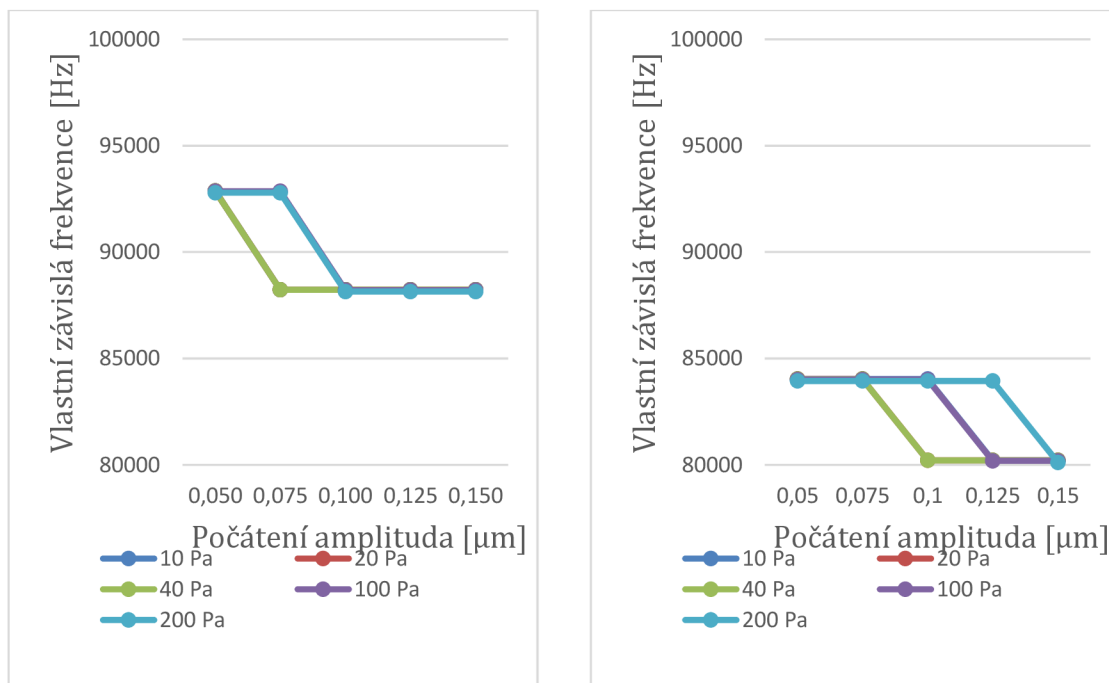
Obr. 4.11 Hodnoty vlastní závislé frekvence před filtrací. Osa X a osa Y.

Tab. 4-8 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] po filtraci. Osa X.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	92,879	88,235	88,235	88,235	88,235
20	92,878	88,234	88,234	88,234	88,234
40	92,876	88,232	88,232	88,232	88,232
100	92,858	92,858	88,213	88,213	88,213
200	92,795	92,795	88,147	88,147	88,147
400	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-

Tab. 4-9 Hodnoty vlastní závislé frekvence [kHz] po filtraci. Osa Y.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	84,033	84,033	84,033	80,214	80,214
20	84,033	84,033	80,213	80,213	80,213
40	84,030	84,030	80,210	80,210	80,210
100	84,010	84,010	84,010	80,190	80,190
200	83,941	83,941	83,941	83,941	80,116
400	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-



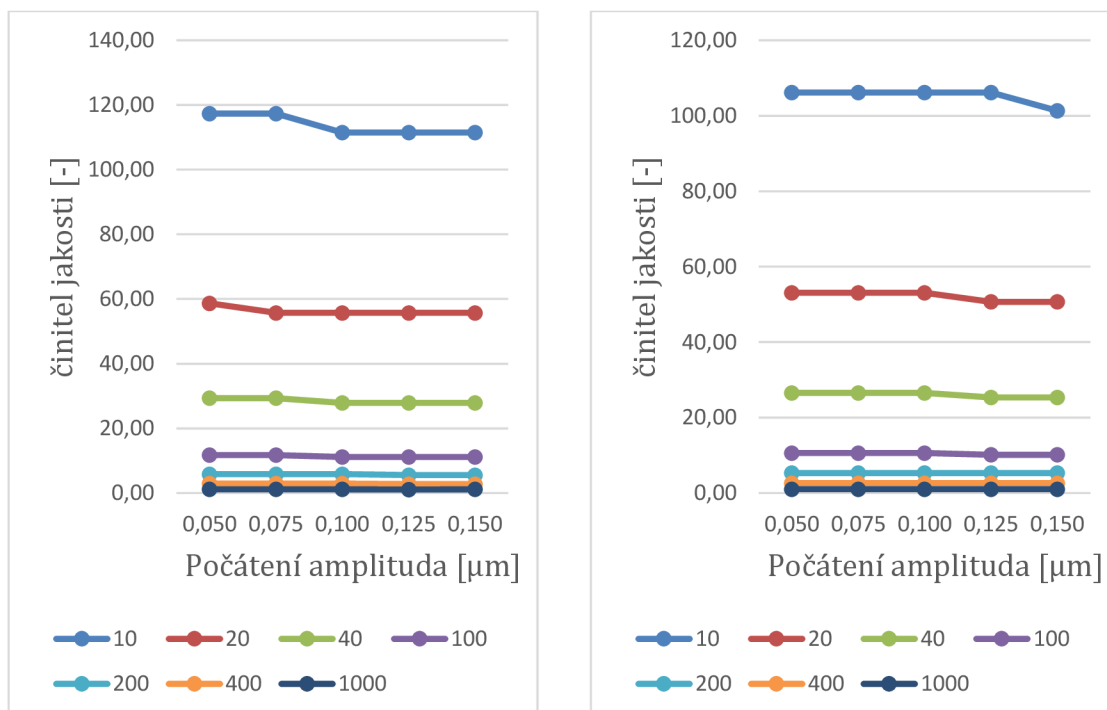
Obr. 4.12 Hodnoty vlastní závislé frekvence po filtraci. Osa X a osa Y.

Tab. 4-10 Hodnoty činitele jakosti. Osa X.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	117,35	117,35	111,48	111,48	111,48
20	58,68	55,74	55,74	55,74	55,74
40	29,34	29,34	27,87	27,87	27,87
100	11,74	11,74	11,15	11,15	11,15
200	5,87	5,87	5,87	5,57	5,57
400	2,93	2,93	2,93	2,78	2,78
1000	1,15	1,15	1,15	1,09	1,15

Tab. 4-11 Hodnoty činitele jakosti. Osa Y.

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	106,17	106,17	106,17	106,17	101,35
20	53,09	53,09	53,09	50,68	50,68
40	26,55	26,55	26,55	25,34	25,34
100	10,62	10,62	10,62	10,14	10,14
200	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
400	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
1000	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04



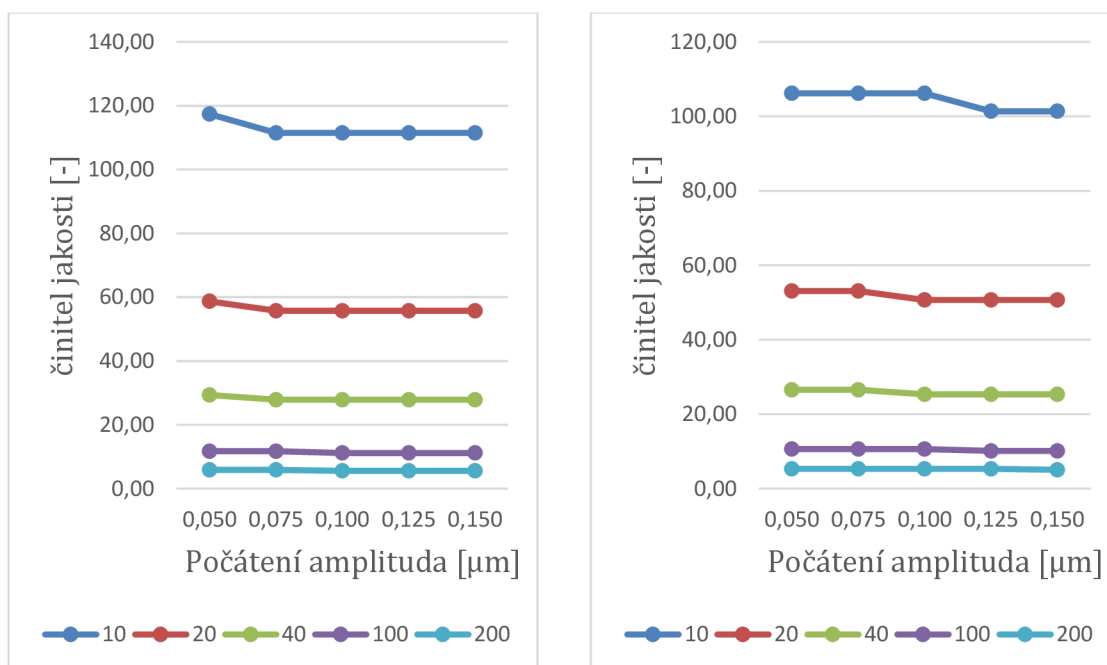
Obr. 4.13 Hodnoty Q-faktoru osy před filtrací. Osa x (vlevo), osa y (vpravo)

Tab. 4-12 Hodnoty Q-faktoru osy X po filtraci

Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	117,35	111,48	111,48	111,48	111,48
20	58,68	55,74	55,74	55,74	55,74
40	29,34	27,87	27,87	27,87	27,87
100	11,74	11,74	11,15	11,15	11,15
200	5,87	5,87	5,57	5,57	5,57
400					
1000					

Tab. 4-13 Hodnoty Q-faktoru osy Y po filtraci

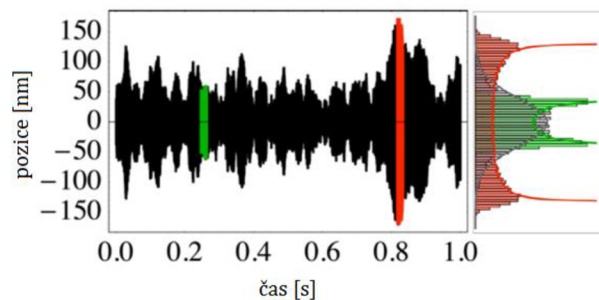
Tlak [Pa]	Počáteční amplitudy [μm]				
	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
10	106,17	106,17	106,17	101,35	101,35
20	53,09	53,09	50,68	50,68	50,68
40	26,55	26,55	25,34	25,34	25,34
100	10,62	10,62	10,62	10,14	10,14
200	5,31	5,31	5,31	5,31	5,06
400					
1000					



Obr. 4.14 Hodnoty Q-faktoru po filtraci. Osa X (vlevo) a osa Y (vpravo)

4.3.3 Histogramy

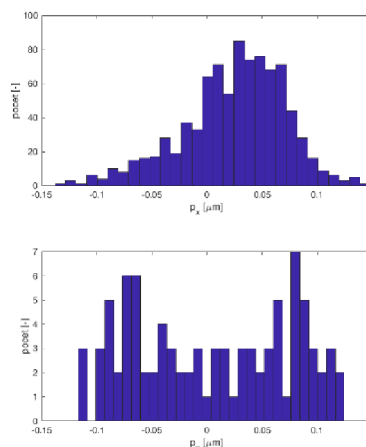
Nyní, když byly získány hodnoty charakteristického času pro každou podmínku tlaku, je možné ověřit, zda analyzované měření odpovídá sinusoidálnímu průběhu s relativně konstantní oscilační amplitudou po mnoho cyklů a má poziční distribuci charakterizovanou dvěma výběžky v krátkém čase (7). Po uplynutí charakteristického času by mělo dojít k „zapomenutí“ vlivu počáteční amplitudy a distribuce pozic v dlouhém čase by měla opět nabývat distribuce Gaussovské.



(6)

Obr. 4.15 Znárodnění distribuce pozic

Pro účely zisku histogramů zobrazujících distribuci pozičních dat slouží funkce *histdist.m*, která ze souřadnicových hodnot trajektorií odpovídajícím žadaným počátečním podmínkám uchovaných ve struktuře *zaznamy* a signálových dat odpovídajícího měření získává hodnoty v čase τ pro dané počáteční podmínky. Na obrázku 5.16 nahoře je příklad vyobrazení distribuce pozičních dat v čase τ pro tlak 40 Pa, osu X a počáteční podmínky 0,125 μm , zatímco dole je distribuce zastoupení pro prvních devadesát vzorků.



Obr. 4.16 Příklad vykreslení histogramů

Přehled histogramů pro osu X je v příloze 27

5 DISKUZE

*“Perfection is achieved, not when there is nothing more to add,
but when there is nothing left to take away.”*

– Antoine de Saint-Exupéry

Po získání hodnot přechodových dějů pro pět počátečních pozičních dat a sedm tlaků byly vypočteny také jejich okamžité rychlosti. Pro následné vyobrazení reprezentativních trajektorií byly získány jejich průměrné hodnoty. Přílohy 3-26 zobrazují tyto průměrné trajektorie, rychlosti a jejich variance společně s fázovými portréty, přičemž pro tlaky 10 – 200 Pa dochází k porovnání těchto momentů pro originální data s daty filtrovanými podle systému vysvětleném v kapitole 4.2.

Porovnání druhu F: Přílohy 15, 17, 19, 21 a 23 ukazují pro různé tlaky vývoj mimo jiné fázových portrétů. Vzhledem k tomu, že měřítka obou porovnávaných grafů v těchto přílohách jsou stejná, je zde pozorovatelný vliv filtrace, který se projevuje poklesem počátečních amplitud. Pro příklad vezmeme trajektorii s počáteční amplitudou $0,150 \mu\text{m}$ (žlutá) a tlakem 10 Pa (Příloha 13), která byla správně detekována podle pokynů programu PocatecniPodminky.m, přičemž průběh odpovídá průběhu předpokládanému (grafy vlevo). Stejně úseky byly vygenerovány i pro signál filtrovaný, jehož průběhy jsou vyobrazeny vpravo od trajektorií dat originálních. Zde pro trajektorii s počáteční podmínkou $0,150 \mu\text{m}$ (žlutá) vidíme ale průběh s amplitudou nižší $0,100 \mu\text{m}$. Trajektorie pro všechny ostatní počáteční amplitudy mají obdobný pokles – pro tento tlak na zhruba $2/3$ původní amplitudy. Tento poměr závisí na tlaku a s rostoucími hodnotami se rozdíl amplitud vyrovnává, přičemž pro hodnotu 100 Pa již amplitudy nabývají srovnatelných hodnot. Data osy X tento fenomén nevykazují – přinejmenším ani zdaleka ne tak znatelně. Nicméně i zde se fázové portréty na první pohled liší (Přílohy 3, 5, 7, 9 a 11). V tomto případě se na fázovém portrétu vzdálenosti mezi průběhy signálu tolik neliší jako u o signálu originálního. Toto je také dobře znázorněno narůstající variancí opět hlavně pro nižší tlaky. Oproti tomu originální signál má varianci volatilní ve svém průběhu.

Porovnání druhu FF: Přílohy 15, 16, 18, 20 a 22 porovnávají vyhledané úseky podle určených podmínek programem PocatecniPodminky.m. Pravý sloupec v tomto případě opět odpovídá datům signálu filtrovaného, nicméně zde vyobrazené trajektorie nejsou stejných intervalů jako z dat originálních, ale vlastní vyhledané trajektorie pro shodné podmínky. V tomto případě u osy Y i zde je možné pozorovat změnu v charakteru signálu. Pro stejné časové úseky zde vidíme frekvenční posun, který je nejvíce znatelný pro nízké tlaky. Na fázových portrétech se to jeví jako zúžené působíště jednotlivých průběhů. Plynulé stoupání variance je

i zde zachováno. Data osy X mají i zde plynulejší charakter z důvodu stoupající variance.

Po vyčtení hodnot oscilačních frekvencí z průměrovaných trajektorií a vypočtení koeficientu tlumení je možné začít s výpočtem dalších parametrů důležitých pro popis oscilátoru. Porovnáním hodnot rezonanční frekvence (místo největšího maxima ve výkonovém spektru) s hodnotami z tabulek 4-2 až 4-9 je potvrzeno správné získání frekvenčních hodnot pomocí přístupu analýzy přechodového děje. Následně byly získány vlastní závislé frekvence, které jsou pro obě osy a obě měření (originální a filtrovaná) vyobrazeny na obrázcích 4.11 a 4.12. Aproximací těchto hodnot a vyčtením hodnoty, kde křivka protíná osu y, je dále možné získat vlastní frekvenci oscilátoru. Konečně ze závislosti vlastních závislých frekvencí oscilátoru a koeficientu tlumení byly získány hodnoty činitele jakosti oscilátoru (Q-faktoru), které jsou vyobrazeny na Obr. 4.13 a 4.14 a tabulkách Tab. 4-10,11,12,13.

V závislosti na tlaku byly vypočteny hodnoty koeficientu tlumení a jeho obrácenou hodnotou i charakteristický čas. Tyto hodnoty jsou vyobrazeny na grafech Obr 4.8. Charakteristický čas je důležitý parametr pro získání histogramových dat vyobrazených v příloze 27, která porovnávají distribuční hodnoty pozic v krátkých časech (dolní vyobrazení – očekávané s dvěma extrémy u hodnot odpovídající počátečním amplitudám) a v dlouhých časech určených hodnotou τ . Histogramová data odpovídají předpokládaným Gaussovským distribucím v časech τ . Současně je také možné pozorovat zhoršení v kvalitě této distribuce pro větší počáteční amplitudy. To může znamenat, že charakteristický čas pro tyto podmínky je nedostačující. Mnohem pravděpodobněji má na slabé vyobrazení distribuce vliv spíše nízký počet trajektorií pro vyšší hodnoty počátečních podmínek, jejichž počty jsou zobrazeny na obrázku 4.1.

Provedená analýza pohybu opticky zachycené částice metody přechodových dějů by mohla být vylepšena zvýšením počtu detekovaných pozic svolením z přísných počátečních podmínek. Dále by se mohla zaměřit na větší počet tlaků a počátečních amplitud. Z filtračních dat jsou patrné nepříznivé vlivy nadbytečných maxim ve výkonovém spektru. Rušení v signálu mohou mít různé zdroje, přičemž k běžným vnějším vlivům patří vzduchové fluktuace, vibrace podlahy či akustické rušení. Další rušení mohou být svým původem vnitřní, tedy systémové. Například dalším zkoumáním vlivů jednotlivých nadbytečných maxim může být systém charakterizován a tím eliminován například přeslechy os, které jsou dalším pravděpodobným faktorem.

ZÁVĚR

*"It is always during a passing state of mind
that we make lasting resolutions."*

— Marcel Proust

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou optického zachycování, které v dnešní době jen narůstá na počtu aplikací a s jistotou se této technologii dá předpovědět bohaté užití jak ve výzkumu, tak v průmyslu.

Teoretická část této bakalářské práce čtenáře seznamuje s mechanismy a aplikacemi spojenými s optickou pinzetou, přibližuje možnosti její aplikace v biologii a nakonec se zaměřuje na optomechanická zachycování nanočástic za nízkých tlaků a přináší seznámení s principy nejběžněji používaných analytických metod.

Praktickou částí práce byla frekvenční filtrace dat za různých tlaků, která tak rozdělila analyzovaná data do tří subsetů. Následoval zisk úseků odpovídající pouze přechodovému ději a jeho okamžitých rychlostí a následná analýza za pomoci fázových portrétů, parametrů tlumeného oscilátoru pro různé počáteční amplitudy a ověření jejich správnosti hodnotou rezonanční frekvence získanou z výkonového spektra. Jeden z parametrů také poskytuje časový údaj, za který by měl proces „zapomenout“ vliv počátečních podmínek. Platnost pro tato data byla ověřena pomocí histogramů distribuce pozičních dat.

CITOVANÁ LITERATURA

1. **ASHKIN, A.** Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Phys. Rev.* 24, 1970, 156.
2. **ASHKIN, A a J. DZIEDZIC.** Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria. *Science*. 235, 1987, Sv. 4795, 1517-1520.
3. **CHU, Steven, J. E. BJORKHOLM, A. ASHKIN a A. CABLE.** Experimental Observation of Optically Trapped Atoms. *Physical Review Letters*. 57, 1986, Sv. 3, 314-317.
4. **BERGERON, J., ZEHTABI-OSKUIE, A., GHAFARI, S., PANG, Y., GORDON, R.** Optical Trapping of Nanoparticles. *Journal of Visualized Experiments*. 2013, Sv. 71.
5. **M, ROUKES.** Plenty of room, indeed. *Scientific American*. 285, 2001, Sv. 3, 42-49.
6. **GIESELER, J.** *Dynamics of optically levitated nanoparticles in high vacuum*. Munich : GRIN Publishing, 2015. ISBN: 978-3656973614.
7. **GIESELER, J., NOVOTNY, L., QUIDANT, R.** Thermal nonlinearities in a nanomechanical oscillator. *Nature Physics*. 9, 2013, Sv. 12, 806-810.
8. **JONES, P., MARAGÓ, O., VOLPE, G.** *Optical tweezers : principles and applications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. ISBN: 9781107279711.
9. **LEBEDEV, P., N.** Investigations on the pressure forces of light. *Ann. Phys.* 1901, Sv. 6, 433-458.
10. **MAXWELL, J., C.** *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford : Clarendon press, 1873.
11. **NICHOLS, E., F., HULL, G., F.** The Pressure Due to Radiation. *Physical Review*. 17, 1903, Sv. 1, 26-50.
12. **RIGLER, R., ORRIT, M., BASCHE, T.** *Single Molecule Spectroscopy*; Nobel Conference Lectures. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2001. 978-3-642-56544-1.
13. **ENGST, P., HORÁK, M.** *Aplikace laserů*. Praha : SNTL, 1989.
14. **ASHKIN, A., DZIEDZIC, J. M., BJORKHOLM, J. E., CHU, S.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*. 1986, Sv. 11, 288-290.
15. **JÁKL, P.** *Mikroskop s opticky drženou lokální sondou*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005.
16. **SELVIN, P., R., HA T.** *Single-Molecule Techniques*. New York : Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2008. ISBN 978-0-7969-7766-1.
17. **HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., DUB, P., ed.** *Fyzika*. Brno : VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
18. **FEYNMAN, R., P., LEIGHTON, R., B., SANDS, M.** *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady 1/3*. Havlíčkův Brod : Fragment, 2000. ISBN 80-7200-405-0.

19. **BAJER, J.** *Mechanika 3*. Olomouc: RNDr. Vladimír Chlup, 2012. ISBN: 9788090395855.
20. **NORRELYKKE, S., F., FLYVBJERG, H.** Harmonic Oscillator in Heat Bath: Exact simulation of time-lapse-recorded data, exact analytical benchmark statistics. *Physical review*. 83, 2011, Sv. 041103.
21. **BRETENAKER, F., TREPS, n.** *Laser: 50 years of discoveries*. Hackensack, N.J: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4612-40-1.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- ACF - Autokorelační funkce (autocorrelation function)
- MSD - Střední kvadratický posuv (mean squared displacement)
- PSD - Výkonová spektrální hustota (power spectral density)
- NA - Numerická apertura

SEZNAM PŘÍLOH

Výkonová spektra před a po filtraci pro 10 Pa, 20 Pa, 40 Pa, 100 Pa a 200 Pa

Příloha 01. Osa x.

Příloha 02. Osa y.

Fázové portréty, průběhy průměrných poloh, průběhy průměrných rychlostí:

Příloha 03. Osa x. 10 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 04. Osa x. 10 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 05. Osa x. 20 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 06. Osa x. 20 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 07. Osa x. 40 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 08. Osa x. 40 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 09. Osa x. 100 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 10. Osa x. 100 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 11. Osa x. 200 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 12. Osa x. 200 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 13. Osa x. 400 Pa. Originální data.

Příloha 14. Osa x. 1000 Pa. Originální data.

Příloha 15. Osa y. 10 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 16. Osa y. 10 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 17. Osa y. 20 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 18. Osa y. 20 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 19. Osa y. 40 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 20. Osa y. 40 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 21. Osa y. 100 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 22. Osa y. 100 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 23. Osa y. 200 Pa. Porovnání druhu F.

Příloha 24. Osa y. 200 Pa. Porovnání druhu FF.

Příloha 25. Osa y. 400 Pa. Originální data.

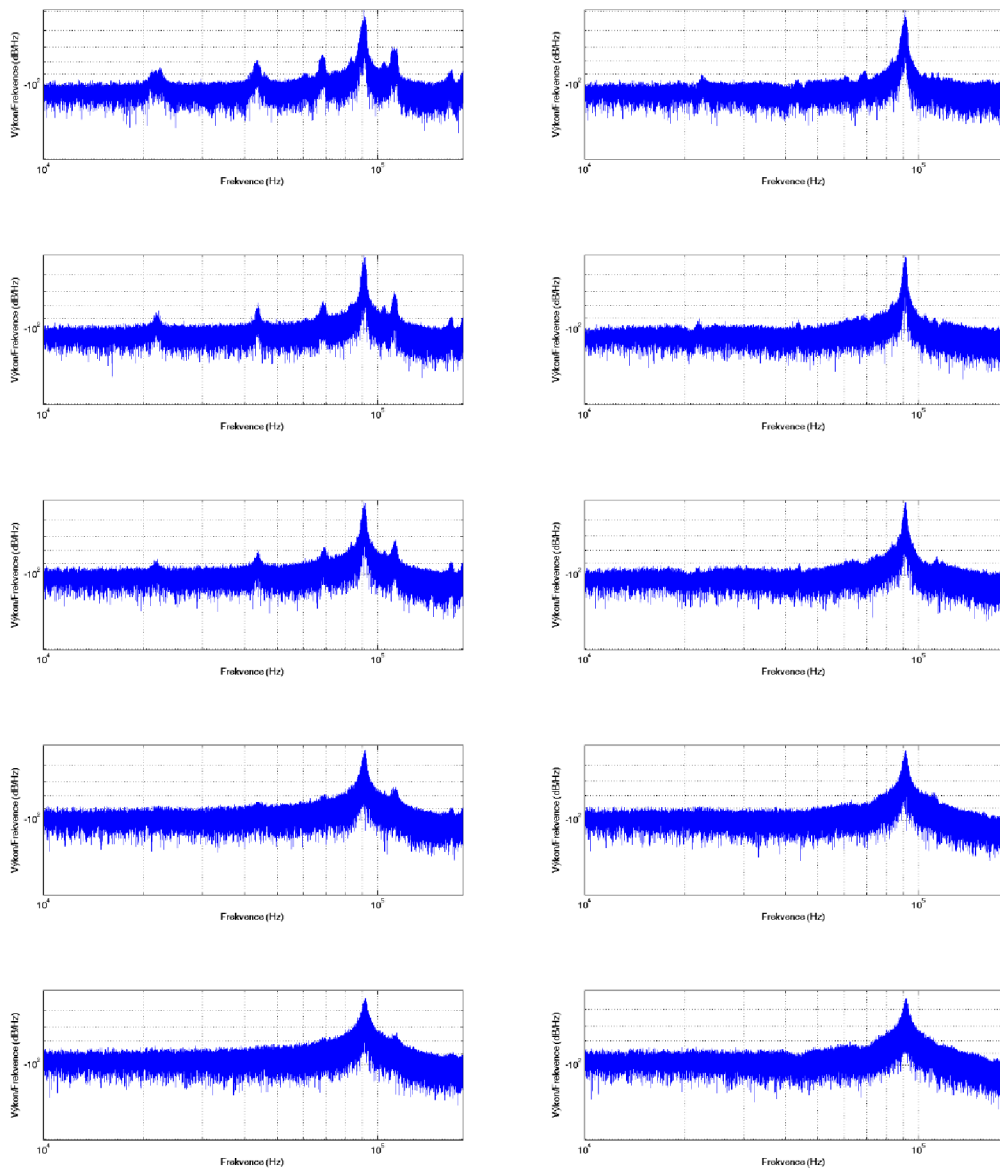
Příloha 26. Osa y. 1000 Pa. Originální data.

Histogramy:

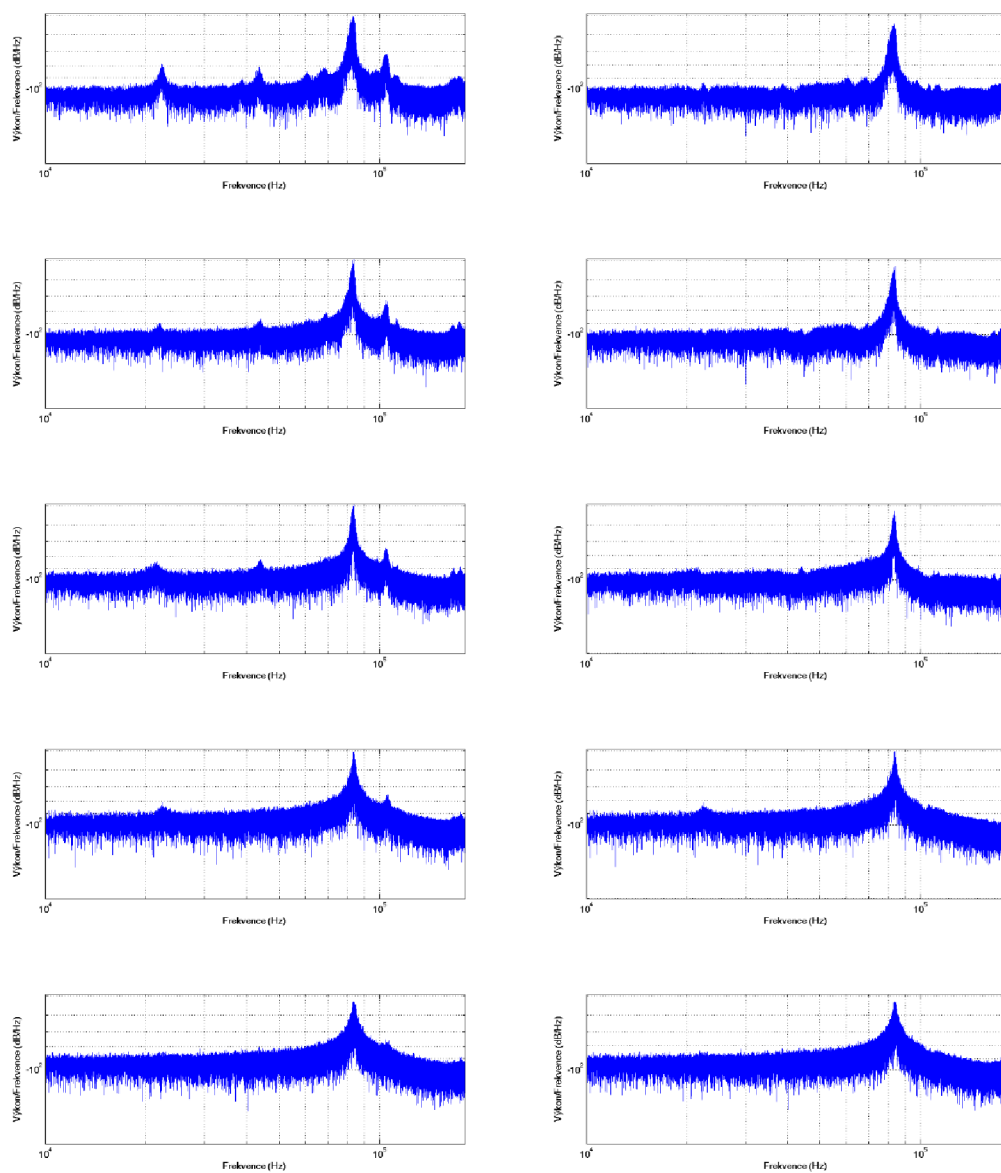
Příloha 27. Přehled histogramů. Osa X. Originální data.

MATLAB skripty, funkce a data:

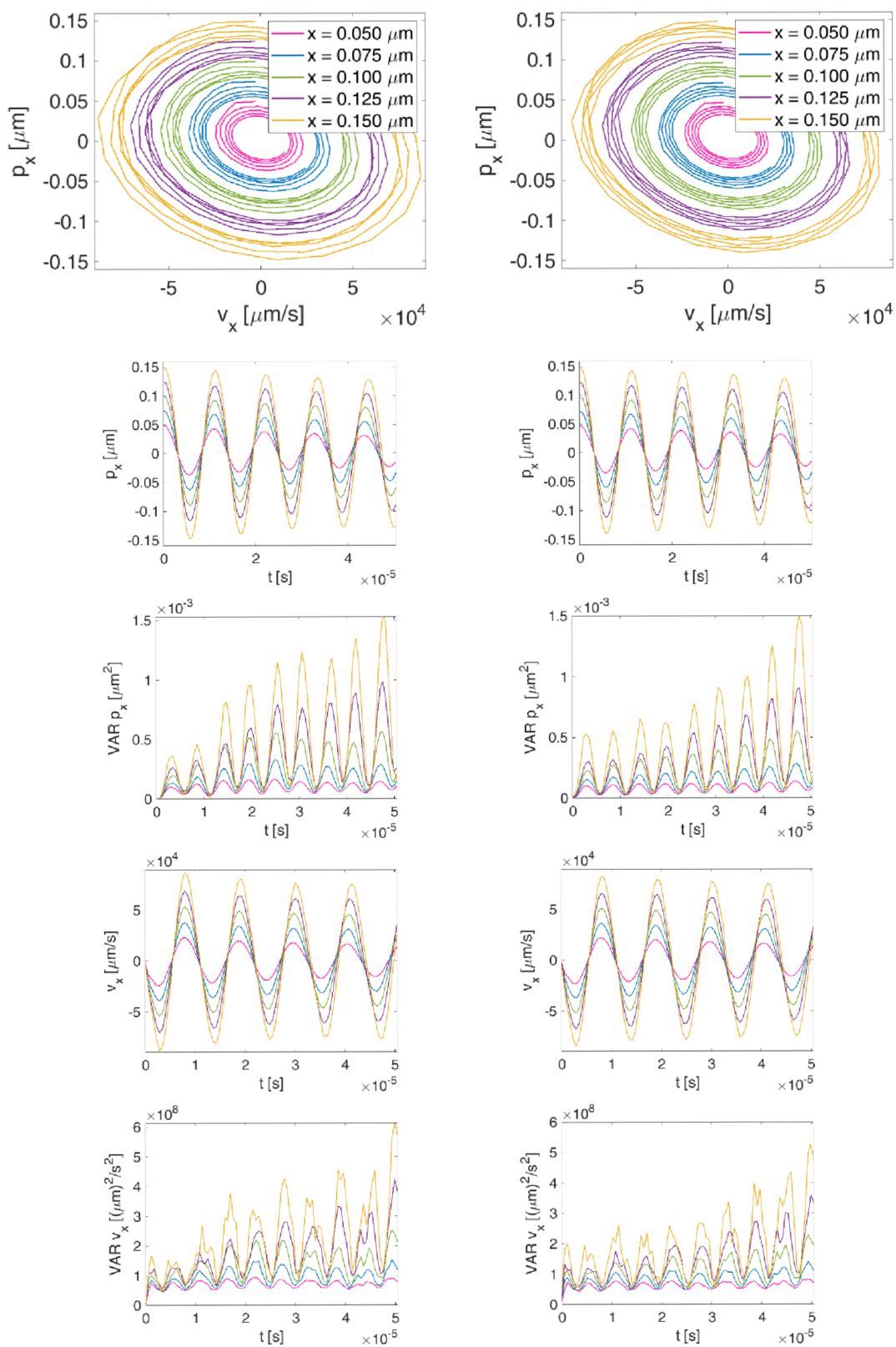
Příloha 28. cinitel.m
Příloha 29. data.mat
Příloha 30. FazovePortrety.m
Příloha 31. gammaGeis.m
Příloha 32. kodfil.m
Příloha 33. natural.m
Příloha 34. oscilFreq.m
Příloha 35. Parametry.m
Příloha 36. PocatecniPodminky.m
Příloha 37. Portrety.m
Příloha 38. prumery.m
Příloha 39. reader.m
Příloha 40. rozdel.m
Příloha 41. saver.m
Příloha 42. spektVYK.m
Příloha 43. variance.m



Příloha 01: **Výkonová spektra osy x.** Nalevo: spektra originálního signálu. Napravo spektra po filtraci. Postupně: 10 Pa, 20 Pa, 40 Pa, 100 Pa a 200 Pa

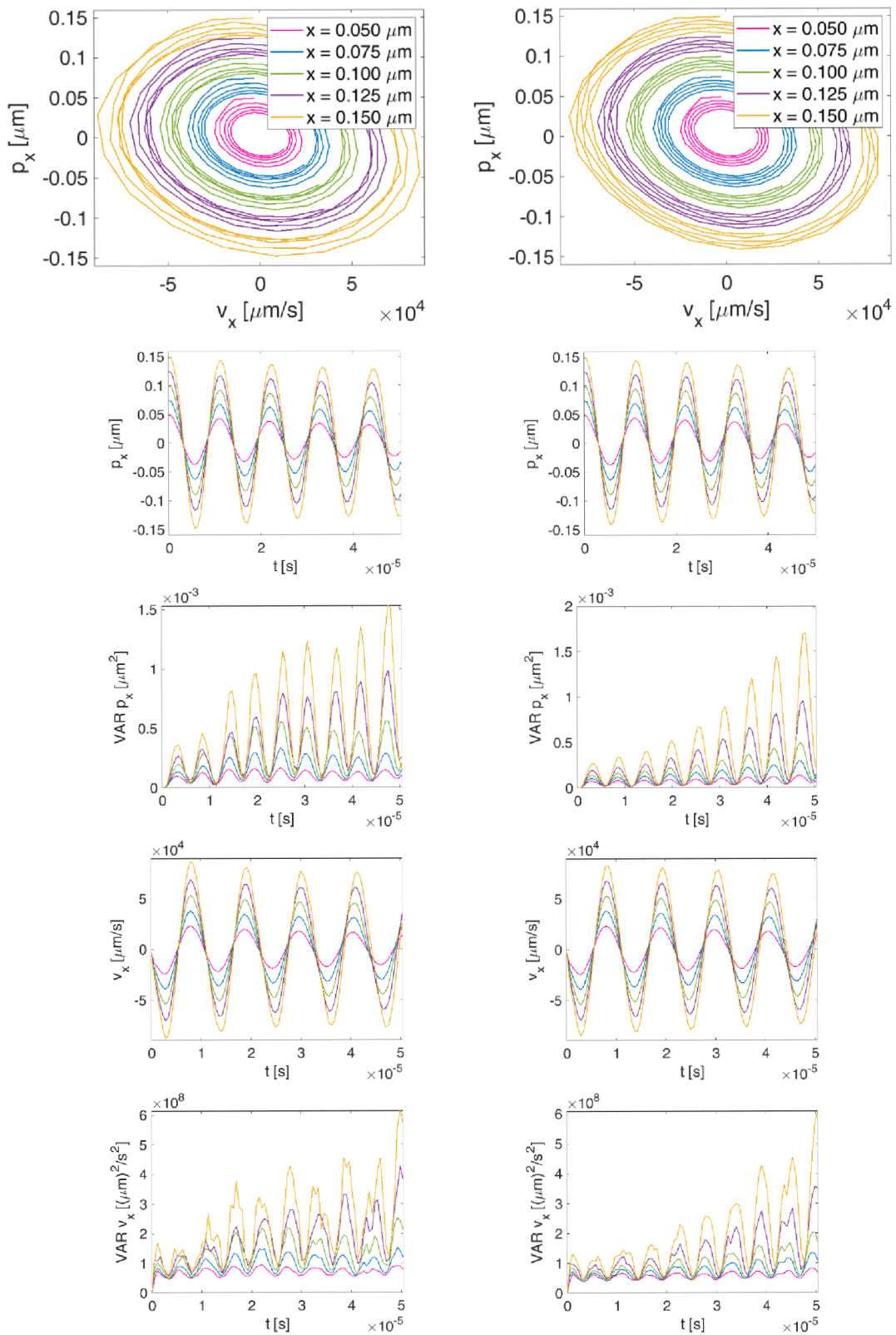


Příloha 02: **Výkonová spektra osy y.** Nalevo: spektra originálního signálu. Napravo spektra po filtraci. Postupně: 10 Pa, 20 Pa, 40 Pa, 100 Pa a 200 Pa



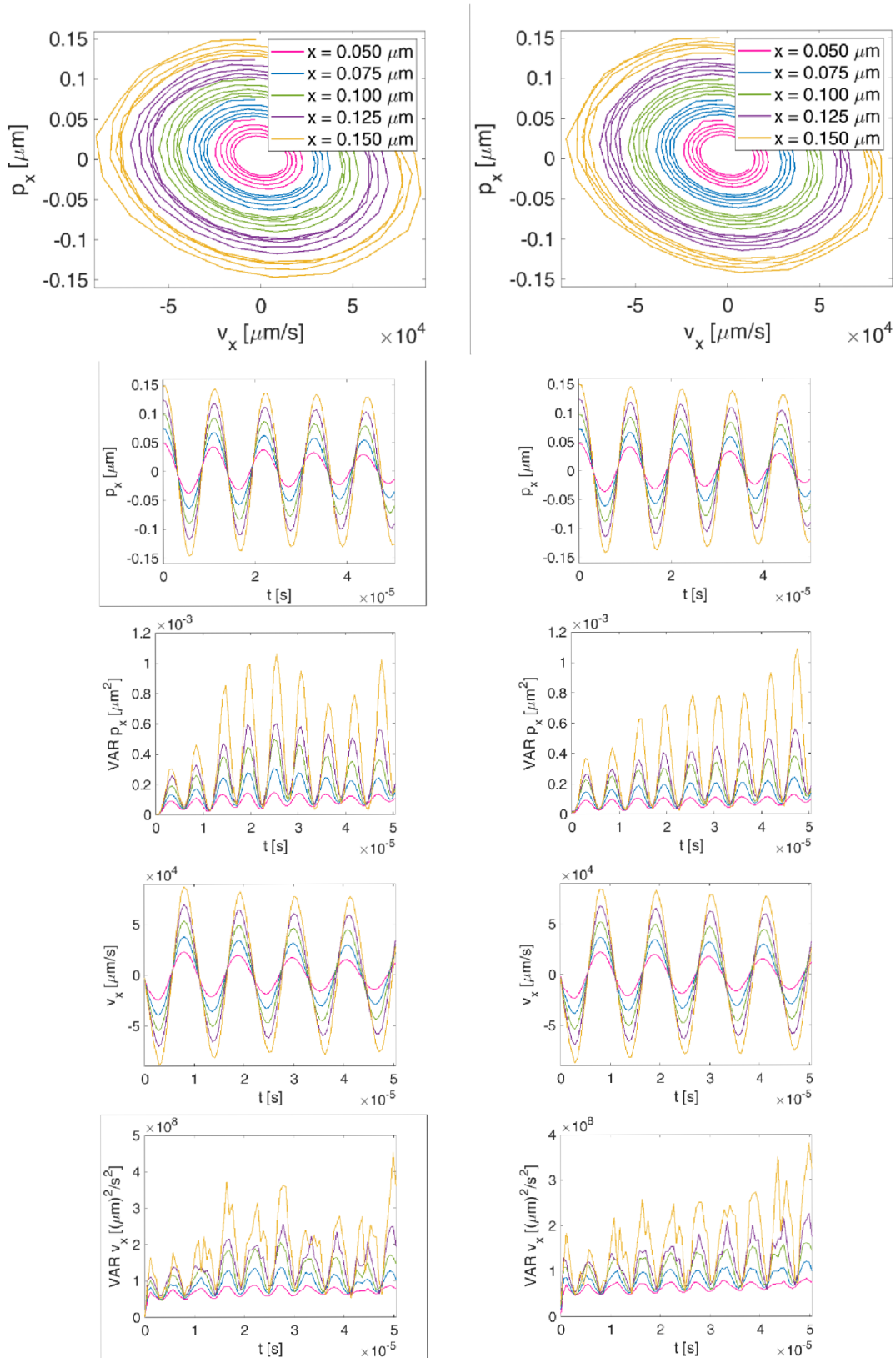
Příloha 03: Fázové portréty a další momenty – osa x, 10 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



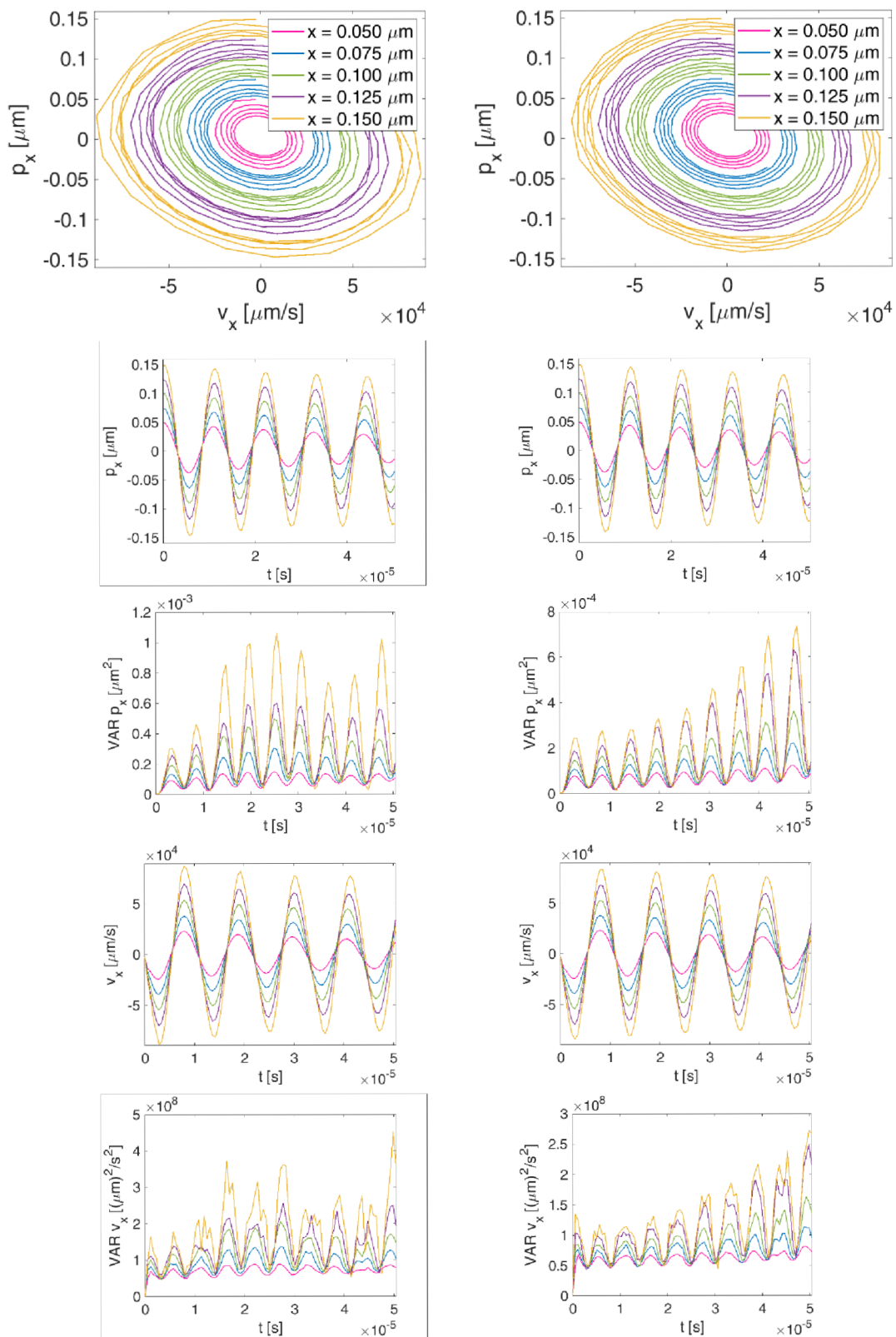
Příloha 04: Fázové portréty a další momenty – osa x, 10 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



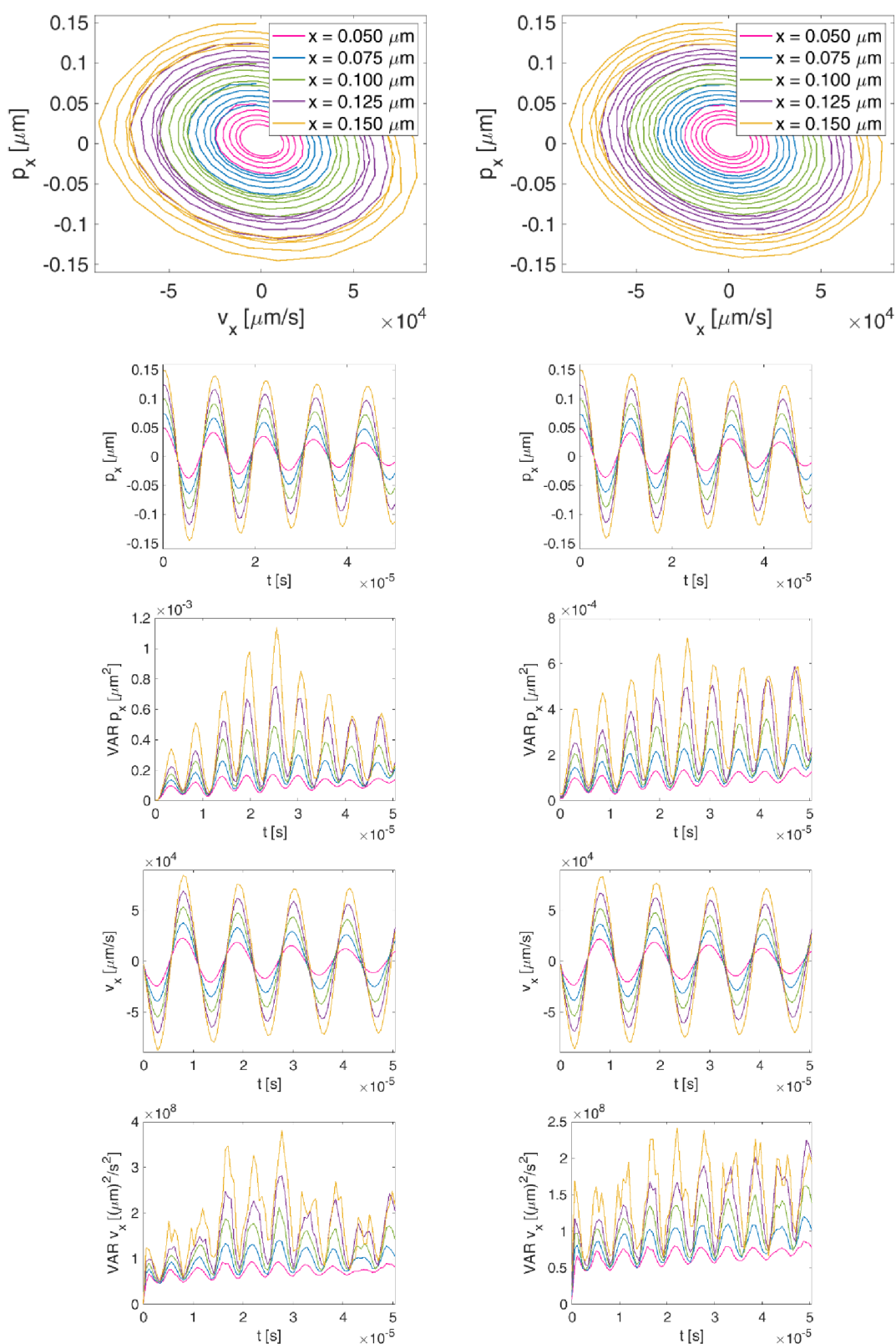
Příloha 05: Fázové portréty a další momenty – osa x, 20 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



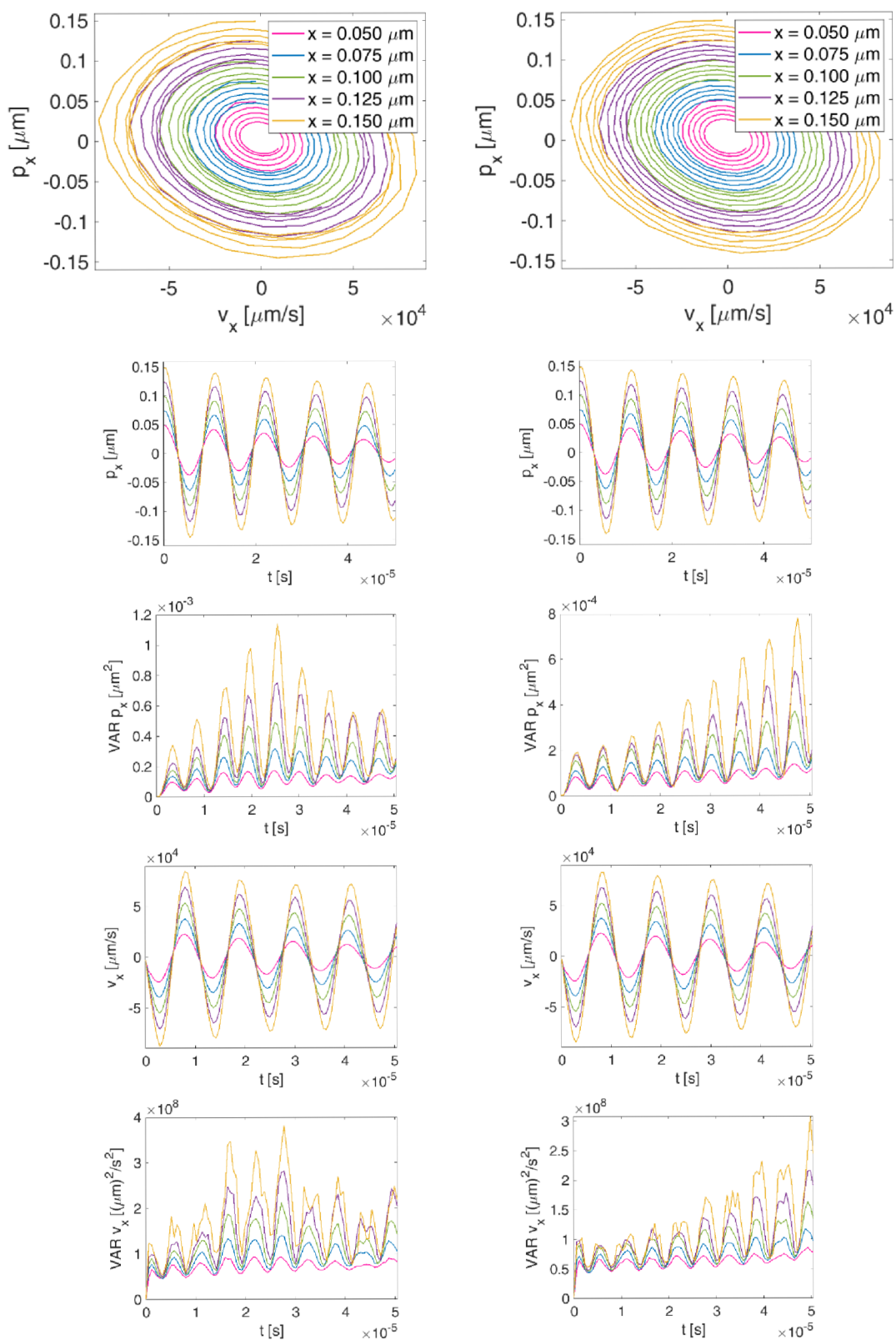
Příloha 06: **Fázové portréty a další momenty – osa x, 20 Pa.**

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



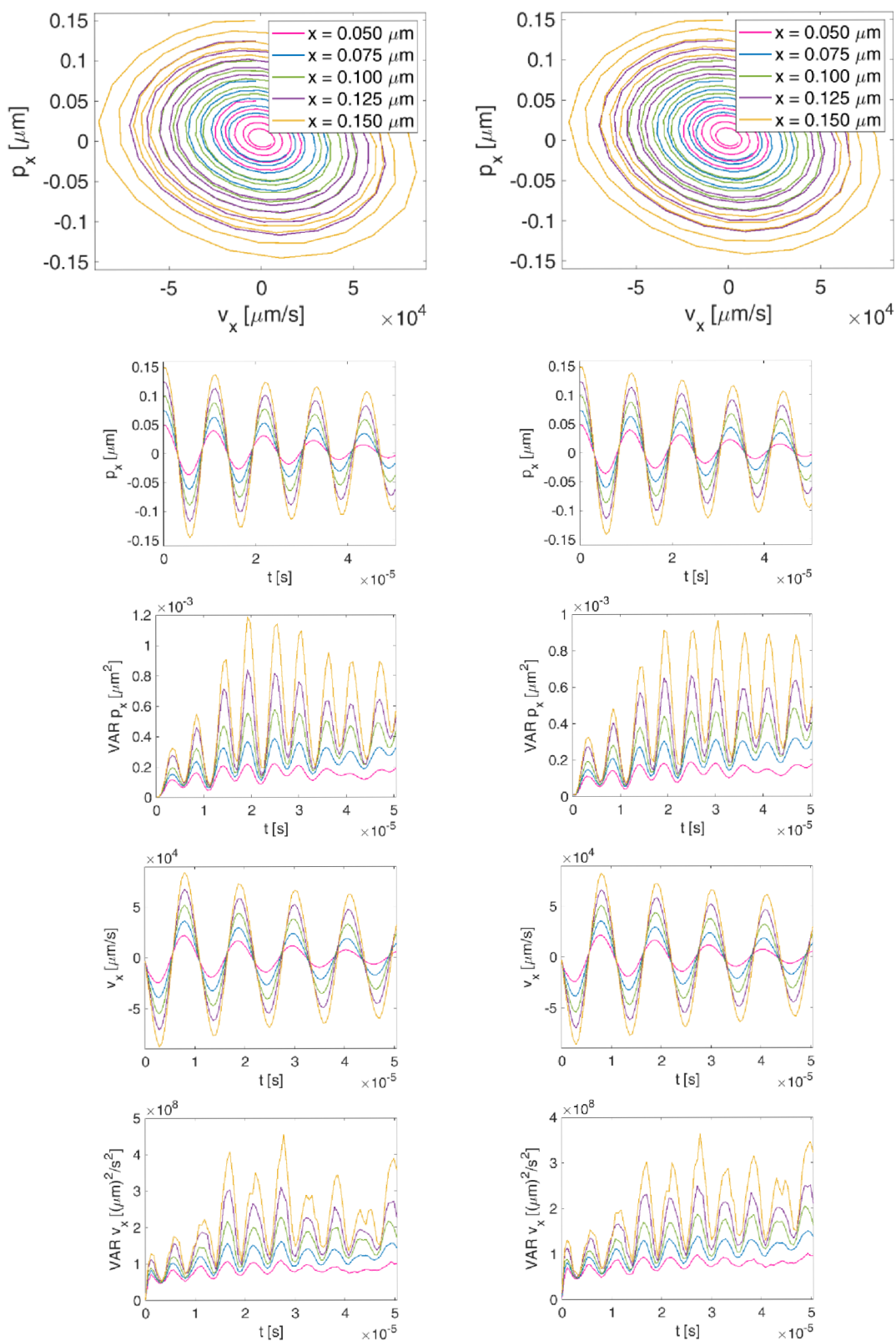
Příloha 07: Fázové portréty a další momenty – osa x, 40 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



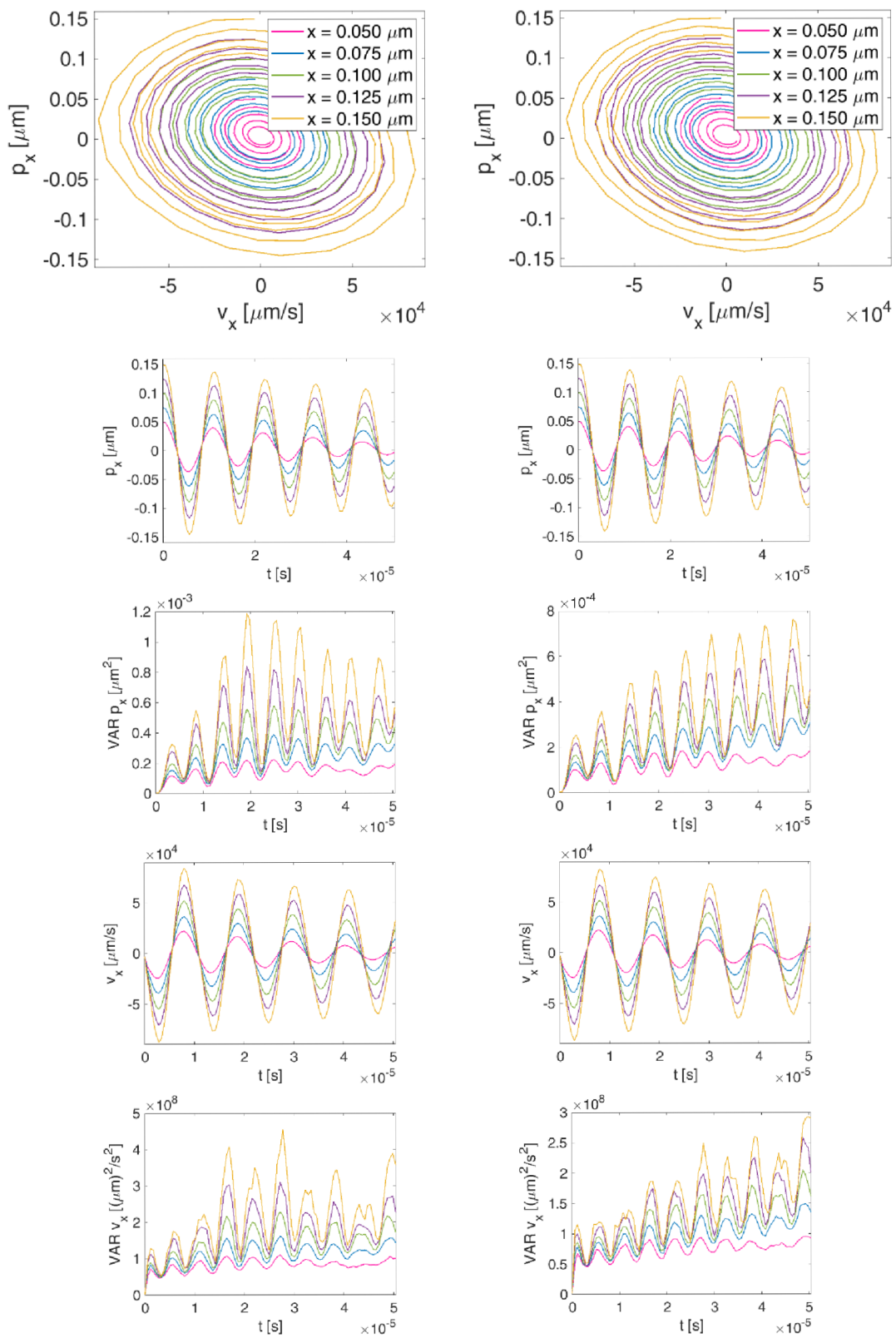
Příloha 08: Fázové portréty a další momenty – osa x, 40 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



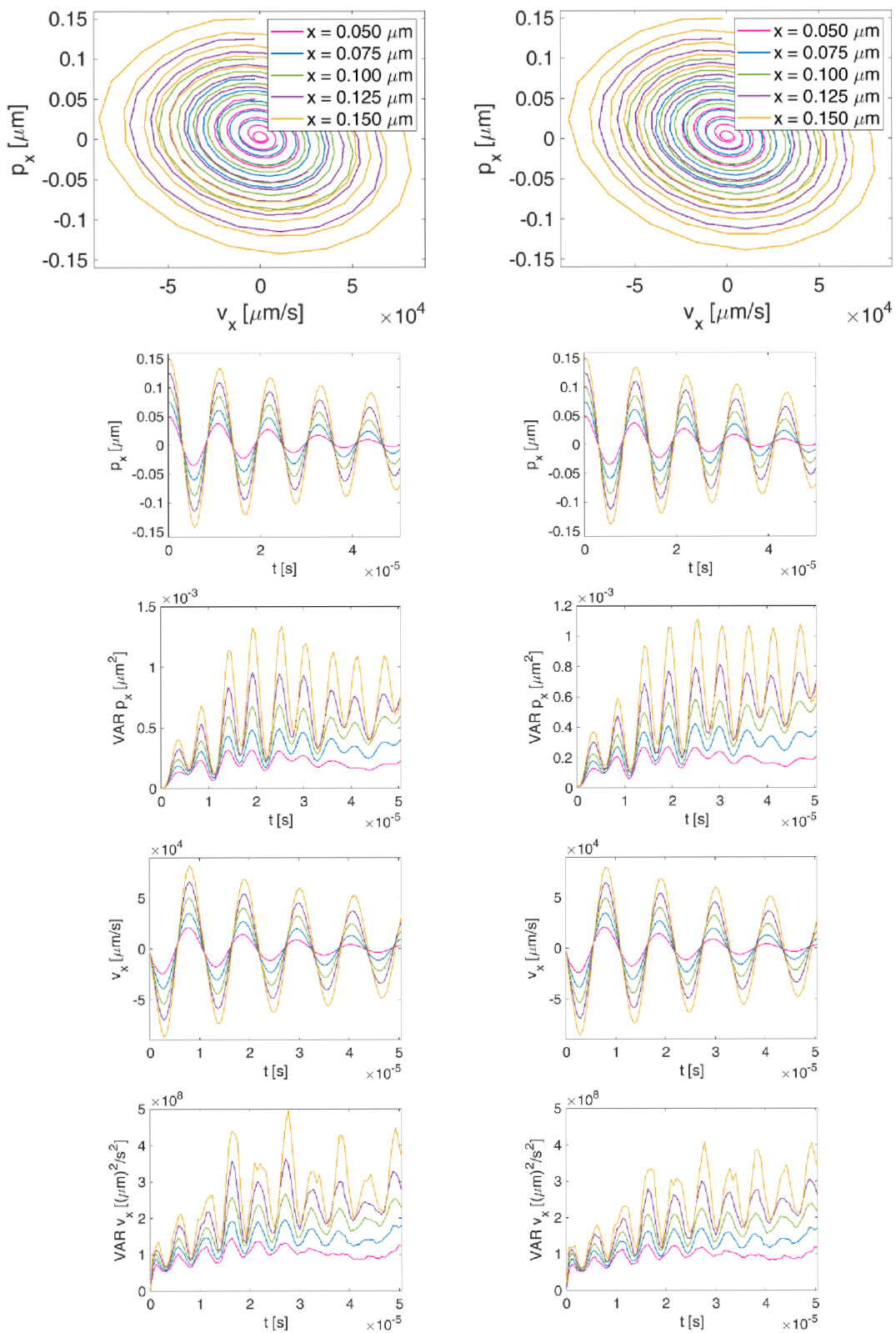
Příloha 09: Fázové portréty a další momenty – osa x, 100 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



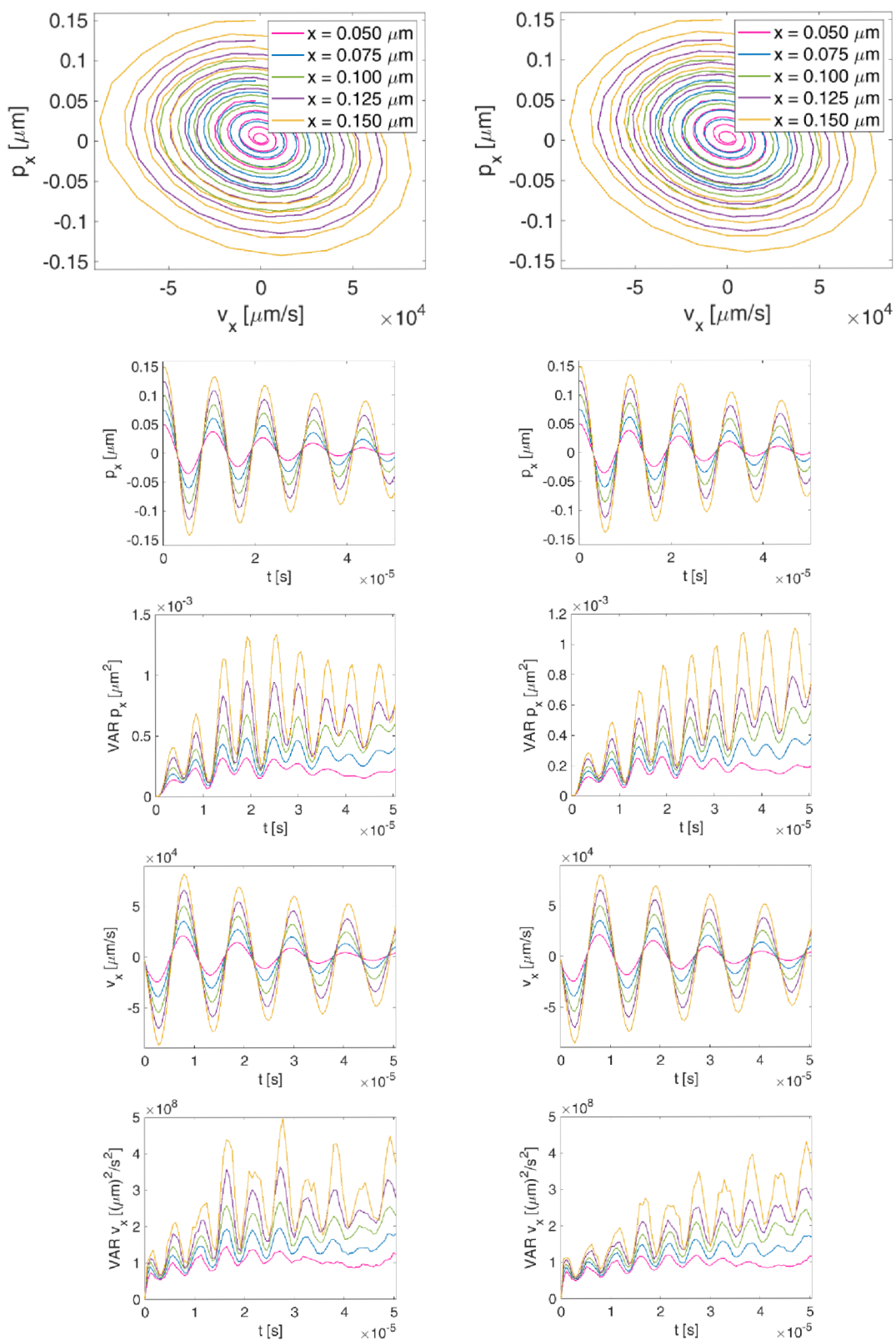
Příloha 10: Fázové portréty a další momenty – osa x, 100 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



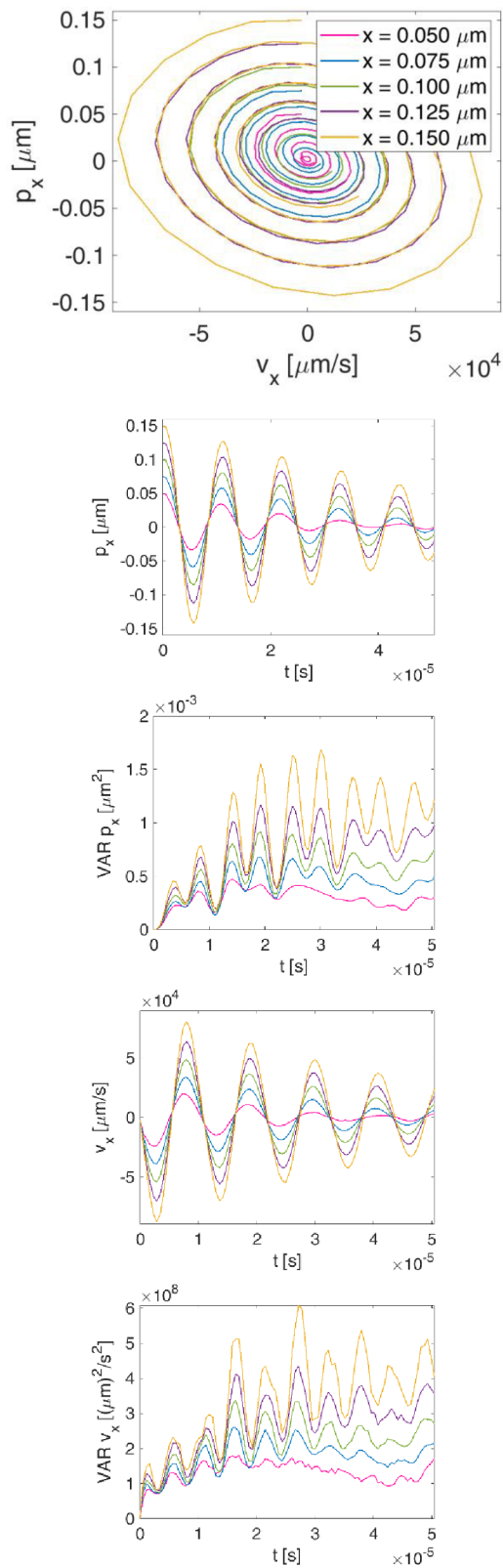
Příloha 11: Fázové portréty a další momenty – osa x, 200 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlosti.



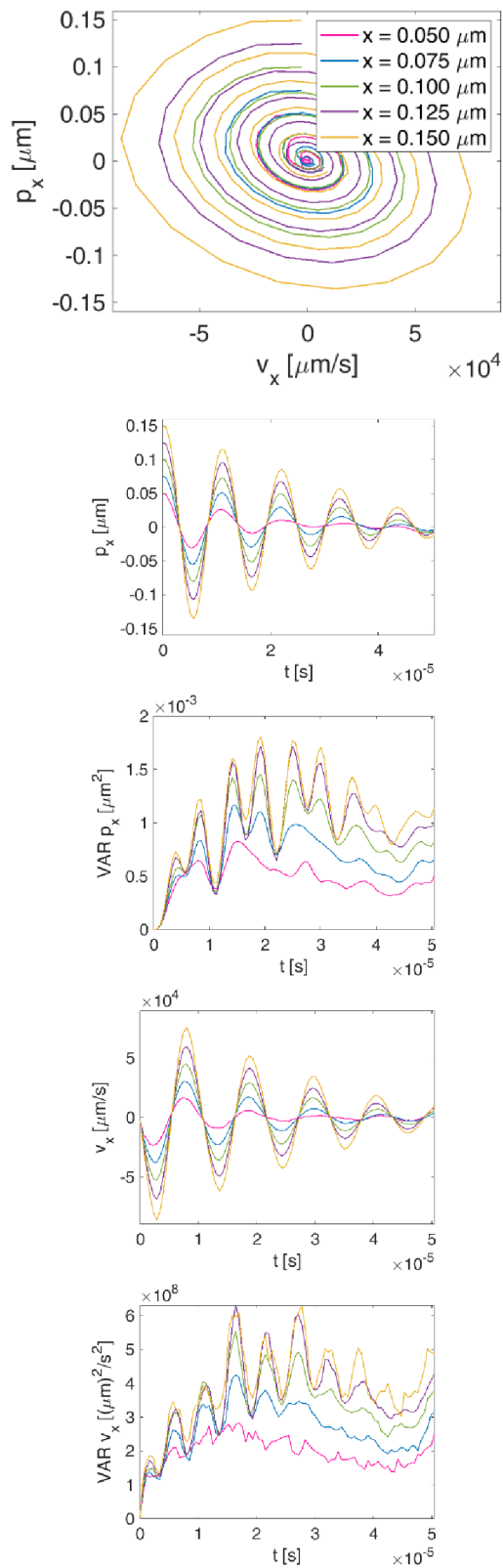
Příloha 12: Fázové portréty a další momenty – osa x, 200 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



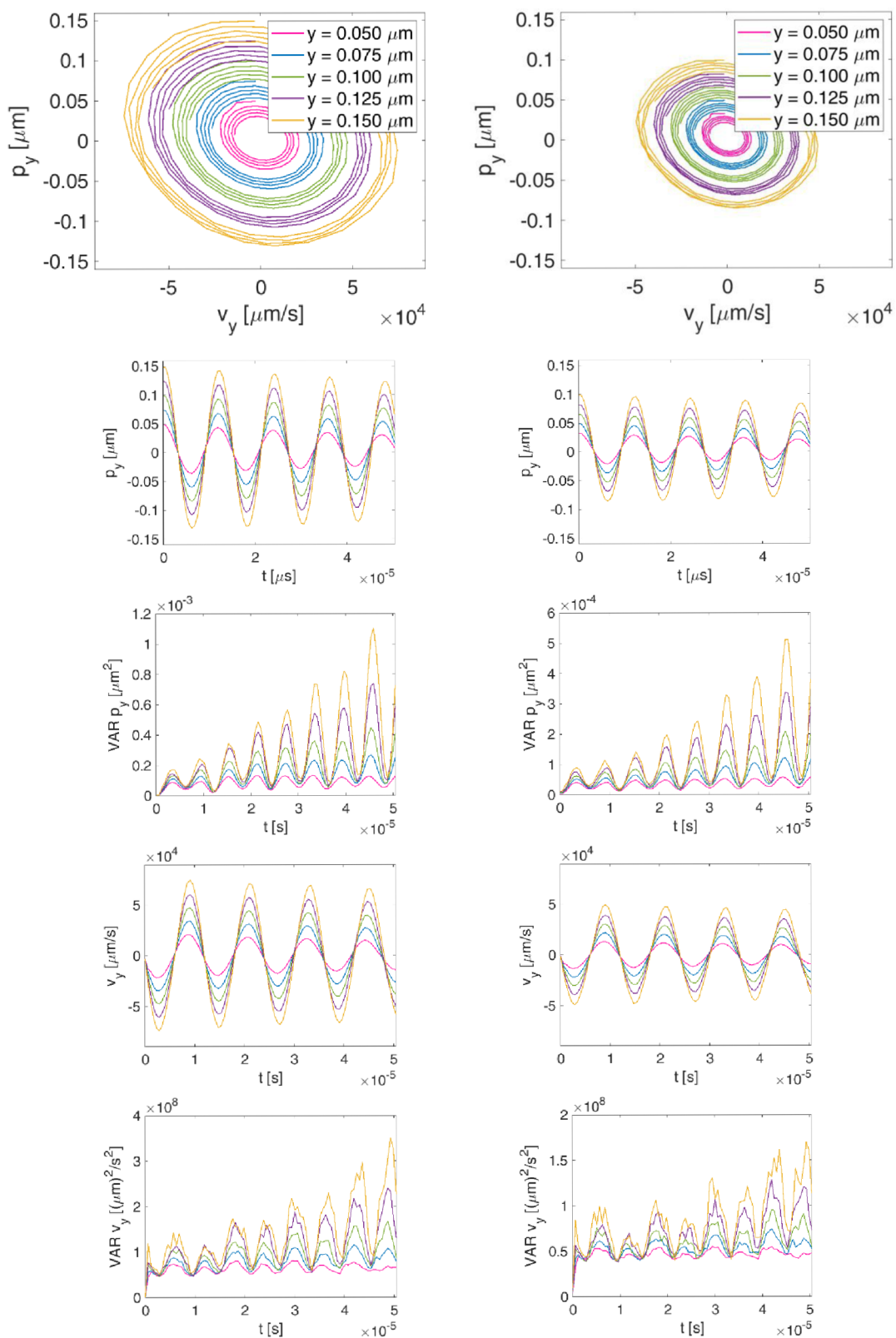
Příloha 13: **Fázové portréty a další momenty – osa x, 400 Pa.**

Originální data.. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



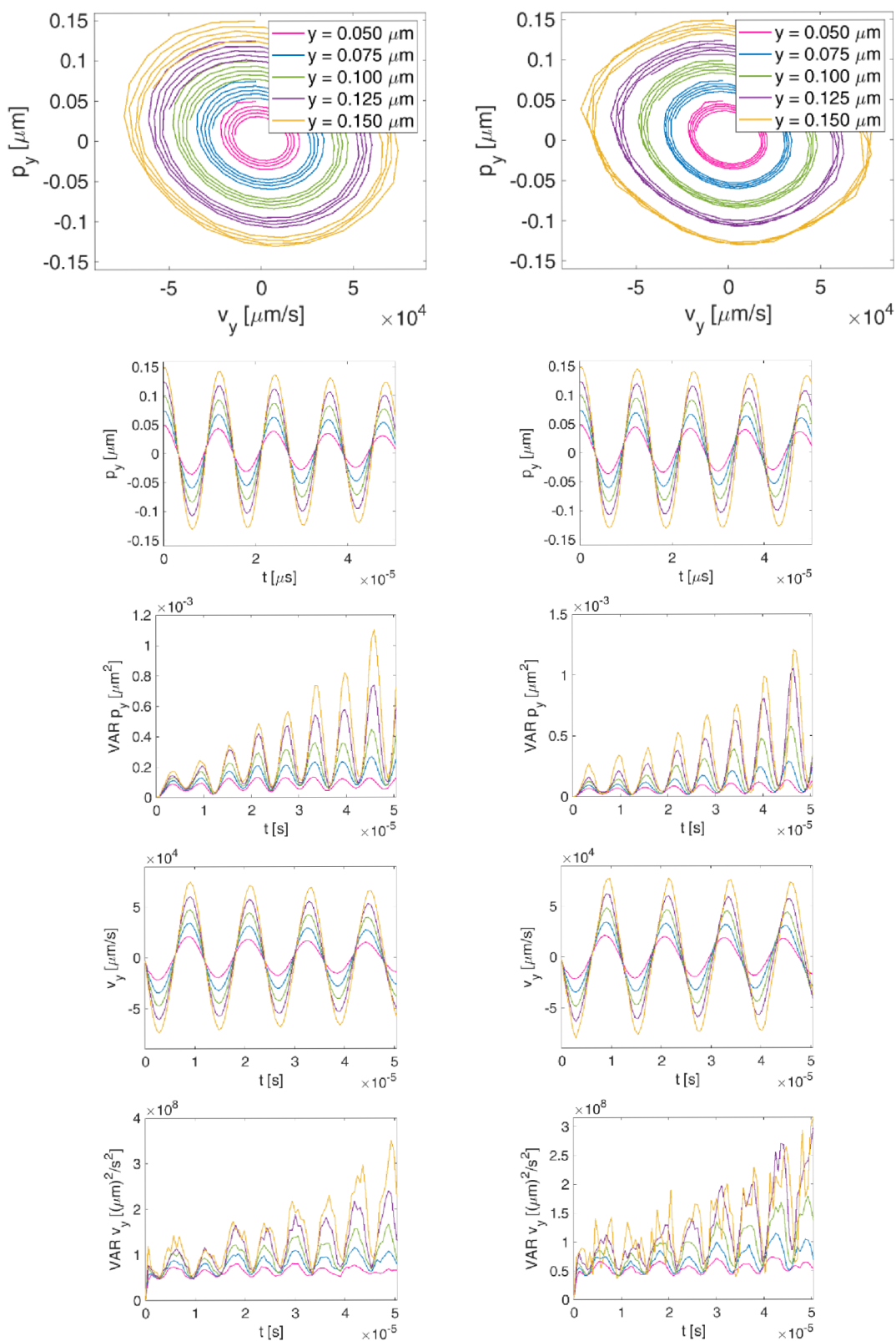
Příloha 14: **Fázové portréty a další momenty – osa x, 1000 Pa.**

Originální data. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



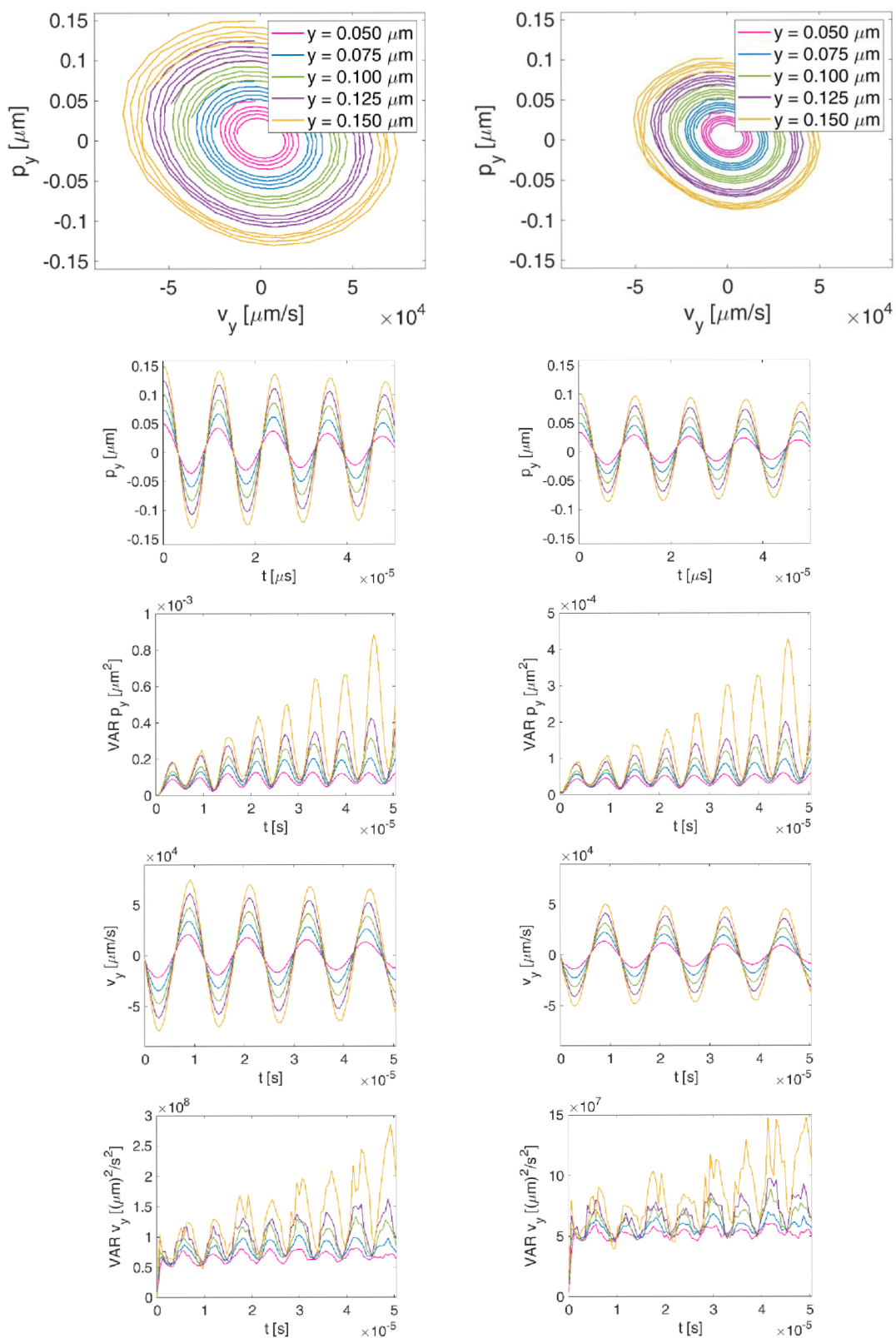
Příloha 15: Fázové portréty a další momenty – osa y, 10 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



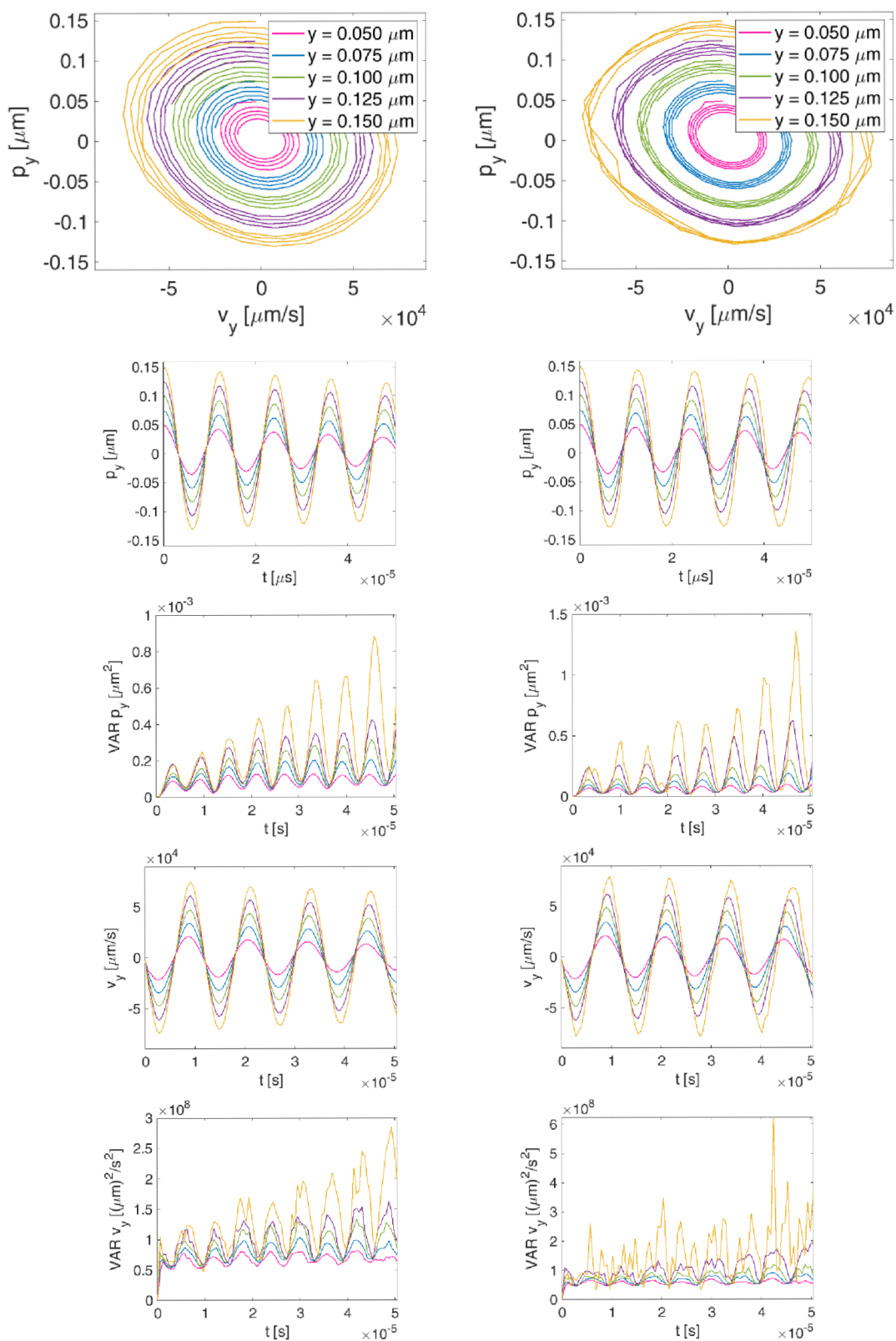
Příloha 16: Fázové portréty a další momenty – osa y , 10 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



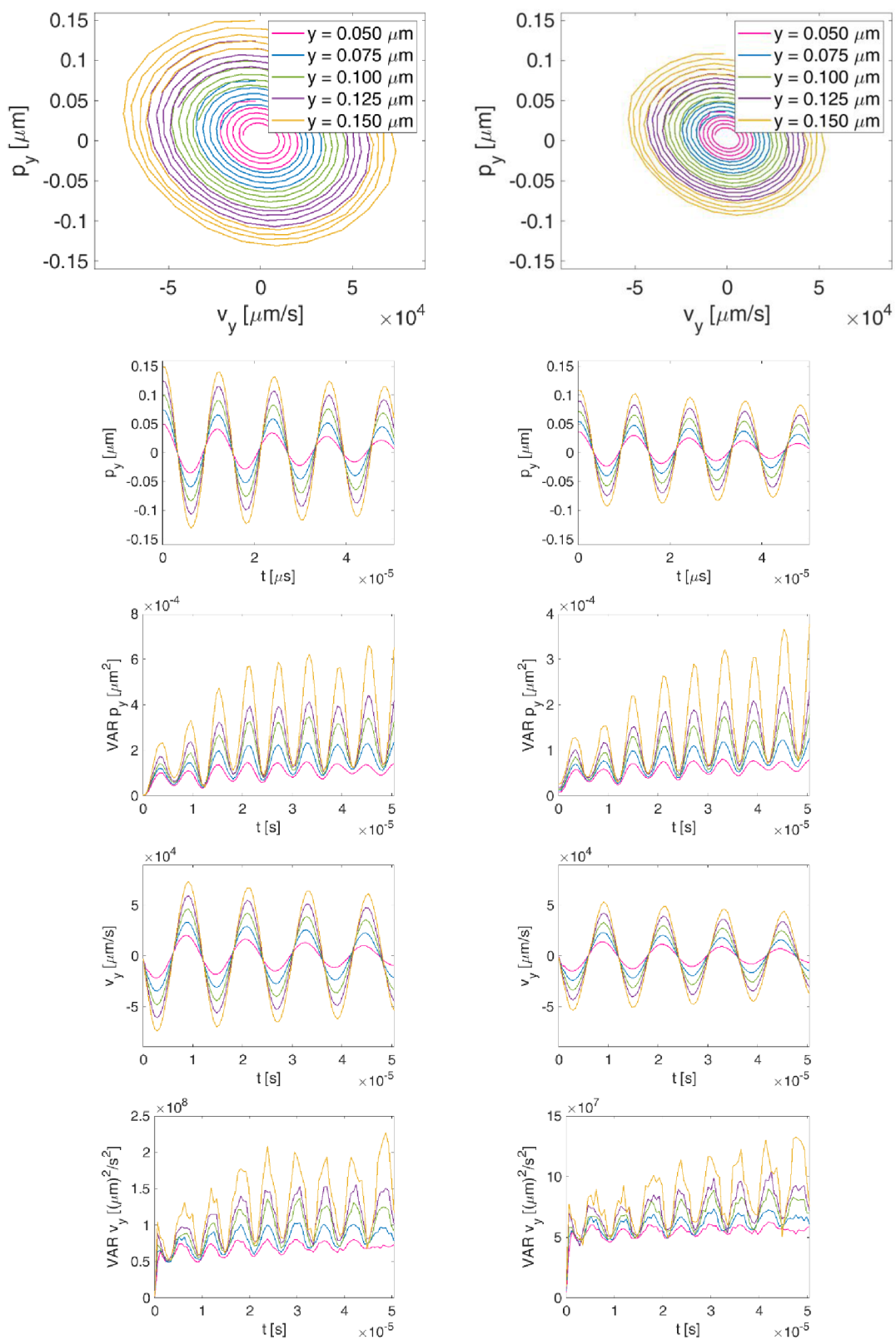
Příloha 17: Fázové portréty a další momenty – osa y, 20 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



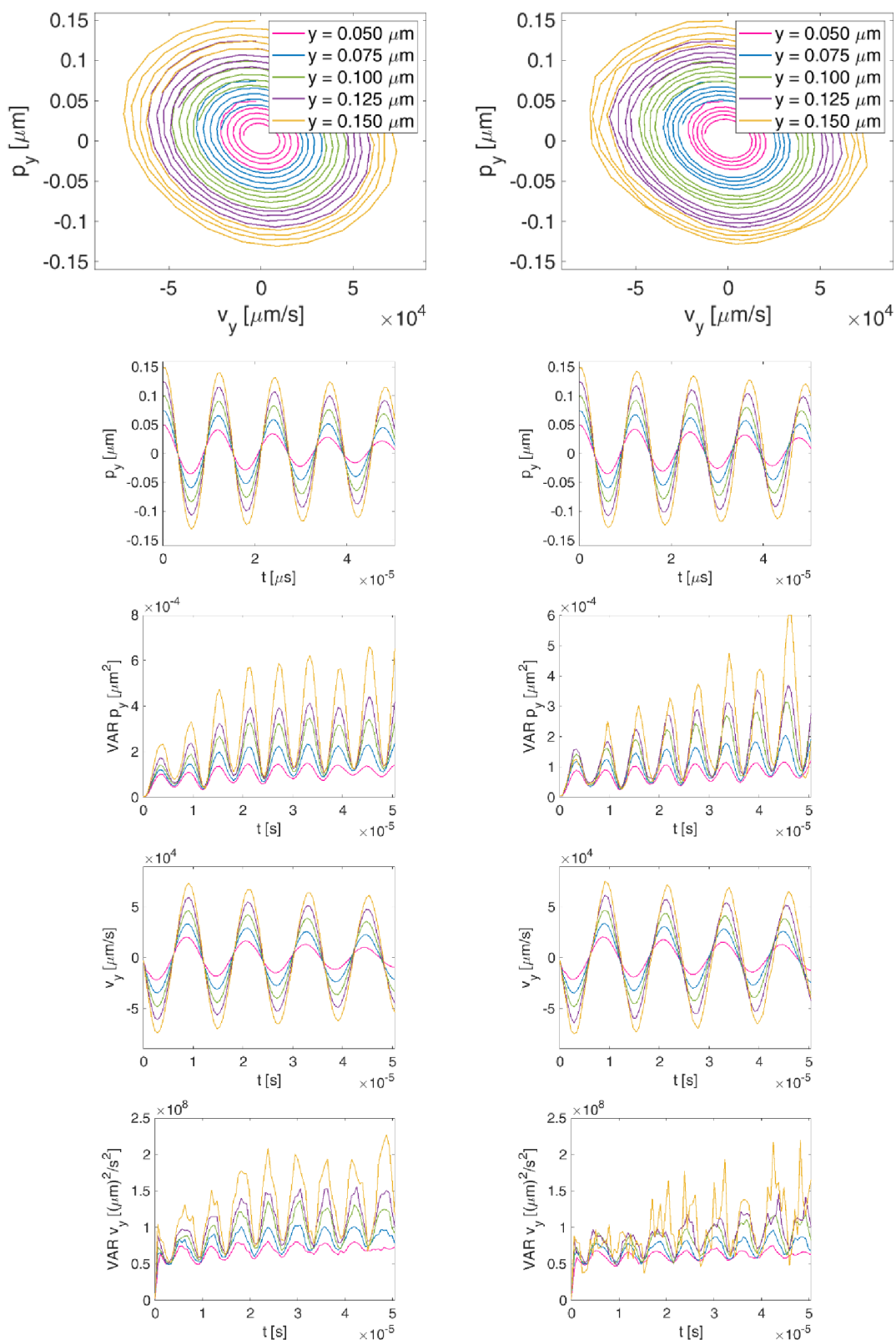
Příloha 18: Fázové portréty a další momenty – osa y, 20 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



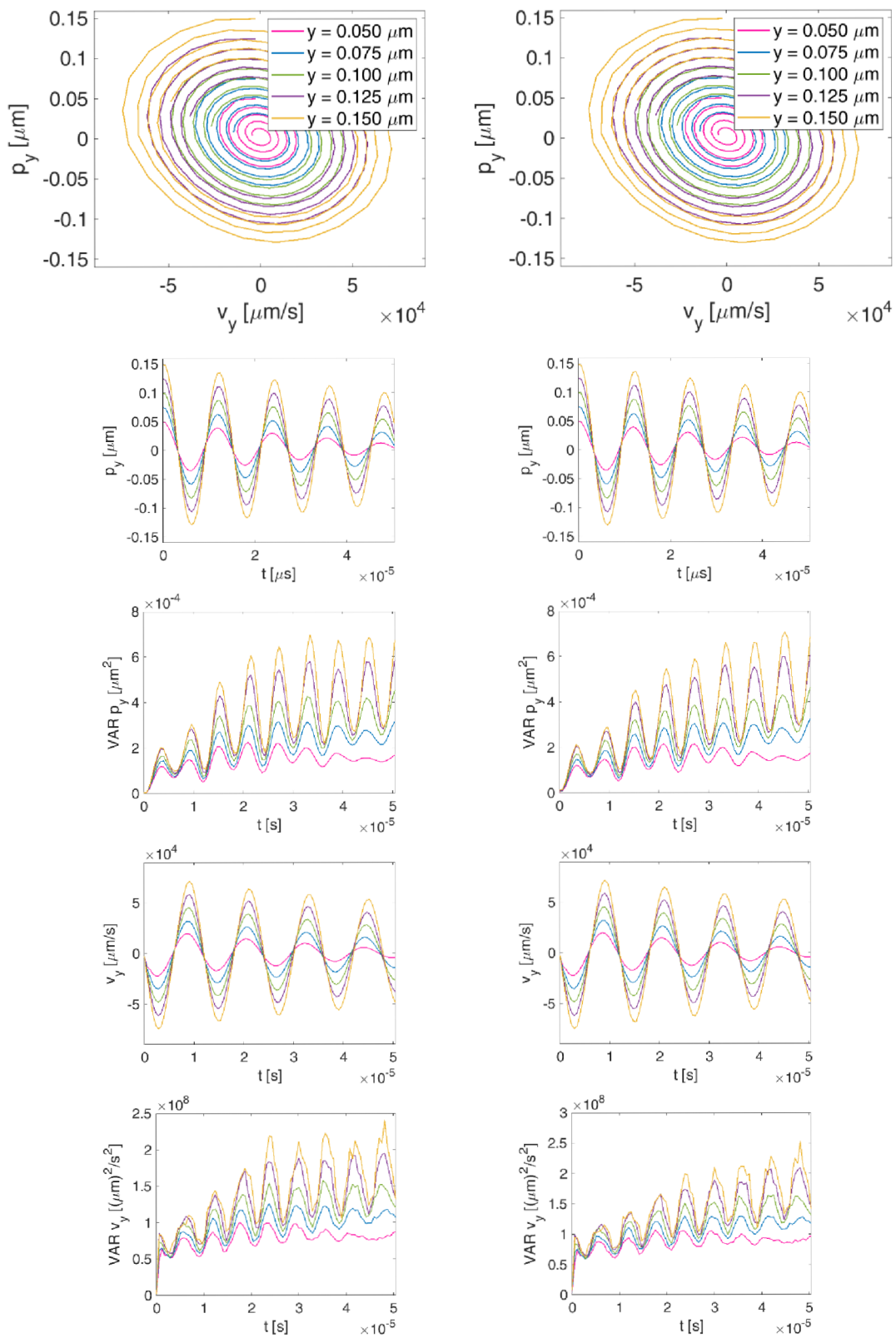
Příloha 19: Fázové portréty a další momenty – osa y 40 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



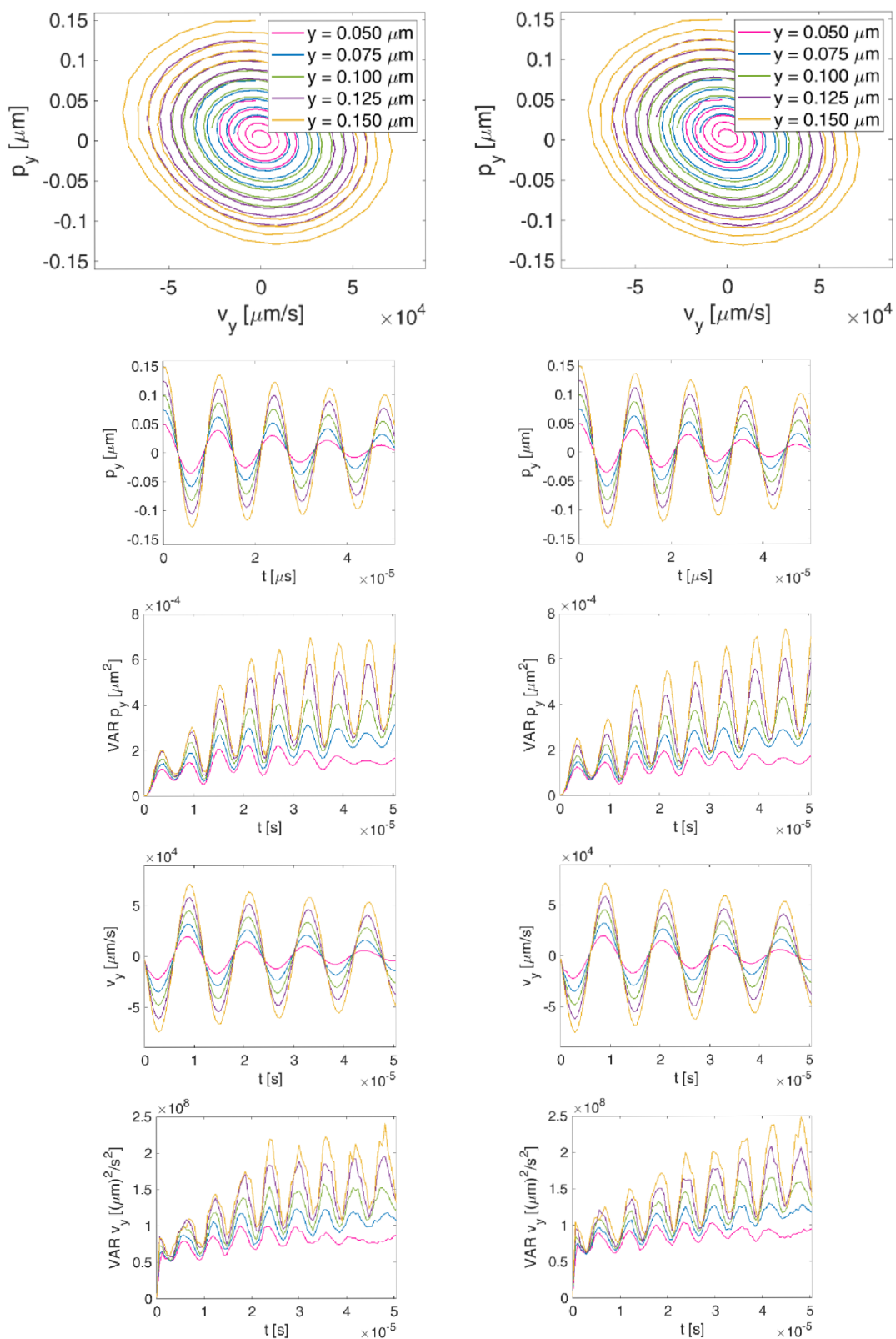
Příloha 20: **Fázové portréty a další momenty – osa y, 40 Pa.**

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



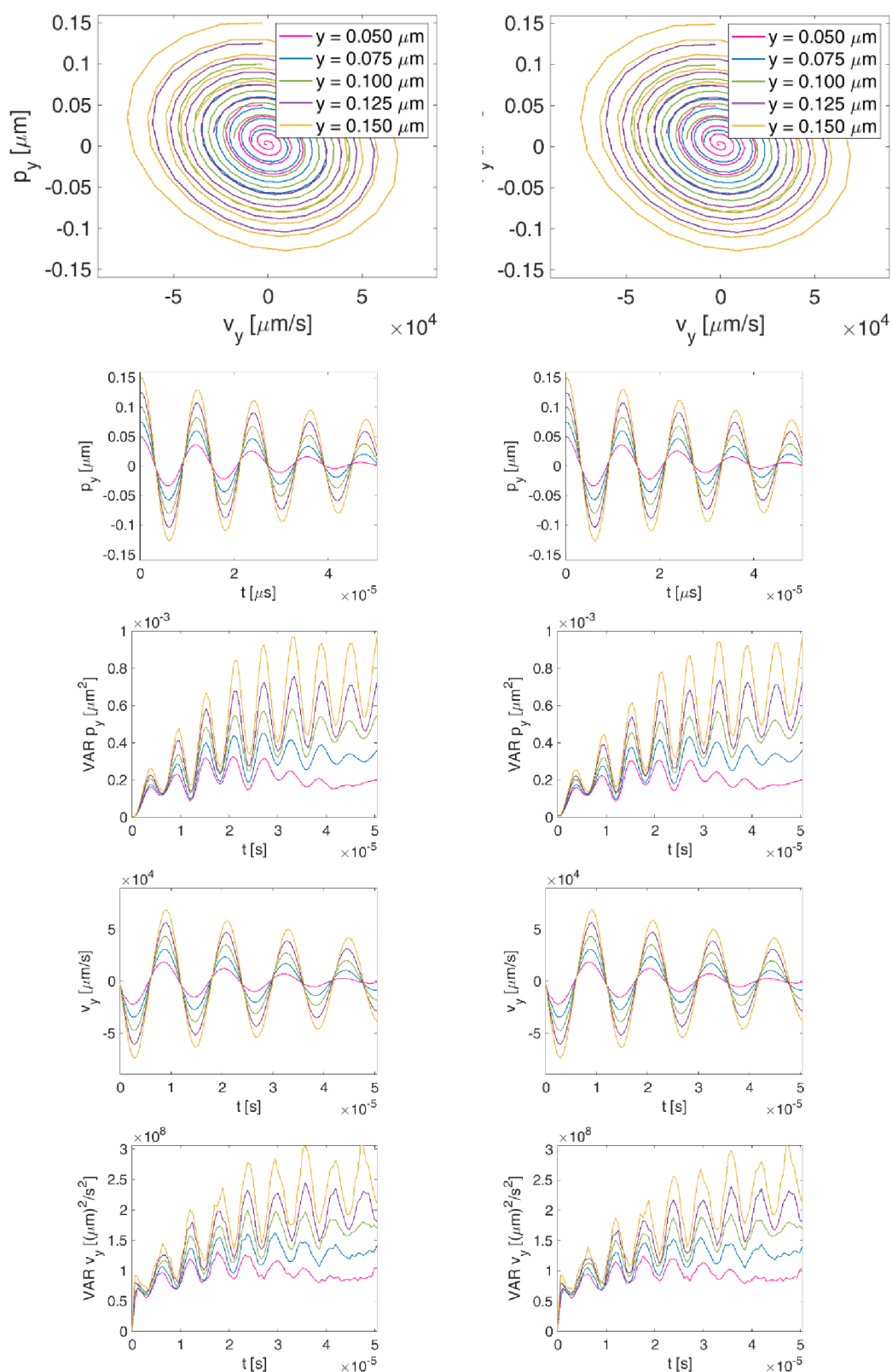
Příloha 21: Fázové portréty a další momenty – osa y, 100 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



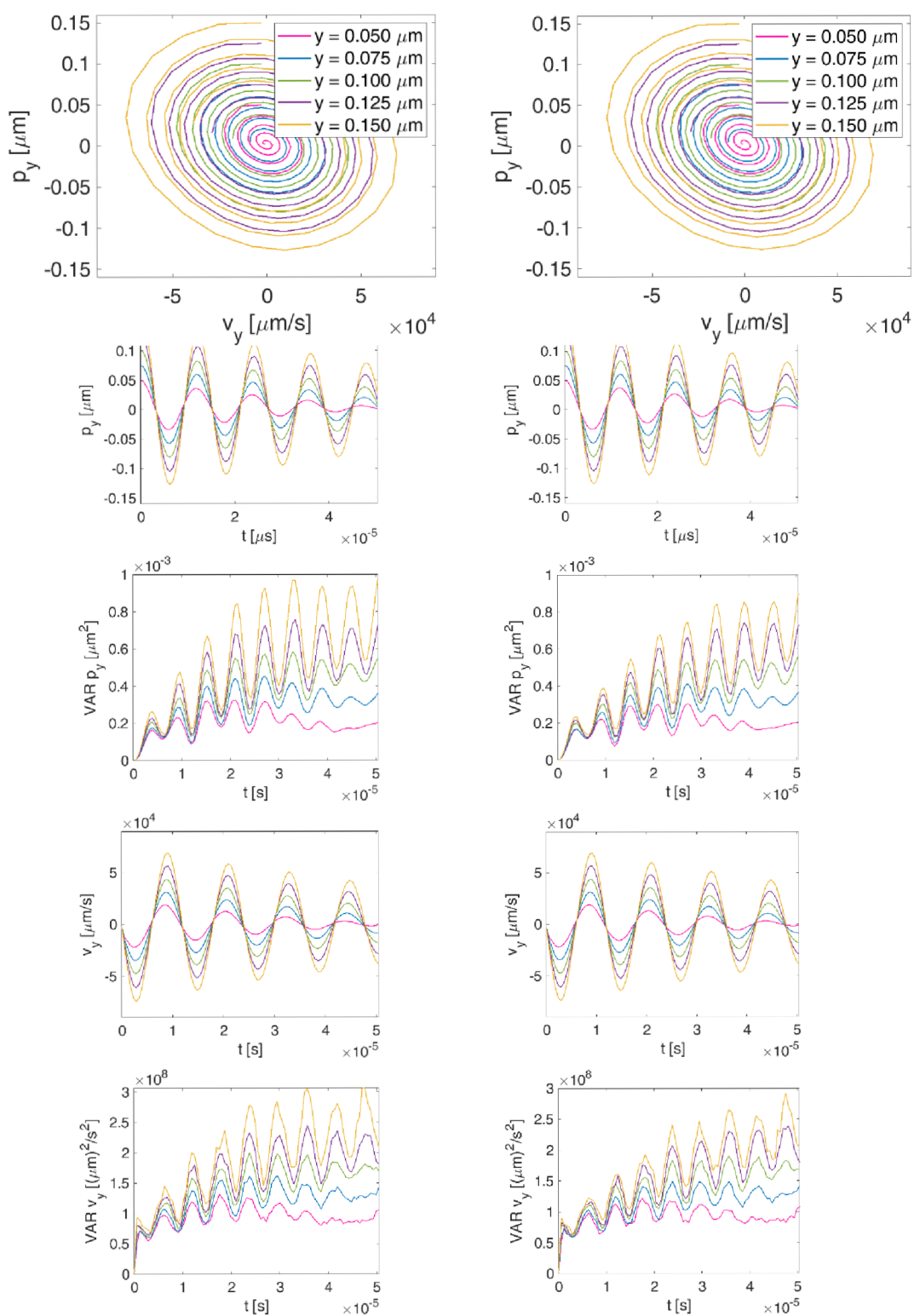
Příloha 22: Fázové portréty a další momenty – osa y, 100 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



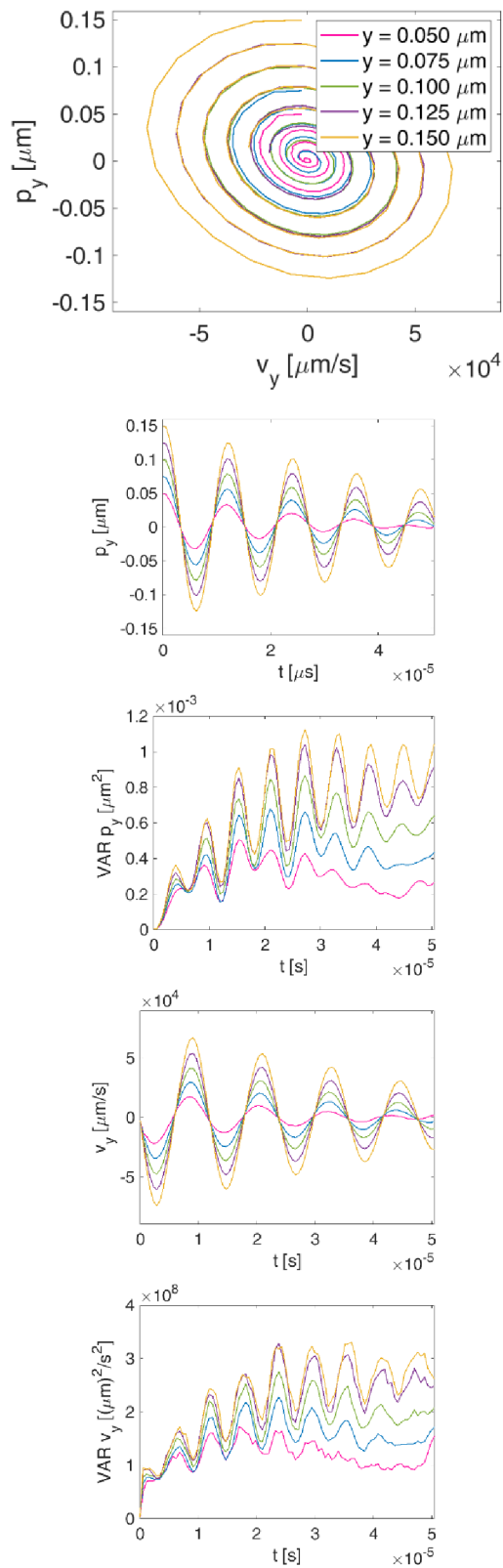
Příloha 23: **Fázové portréty a další momenty – osa y, 200 Pa.**

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



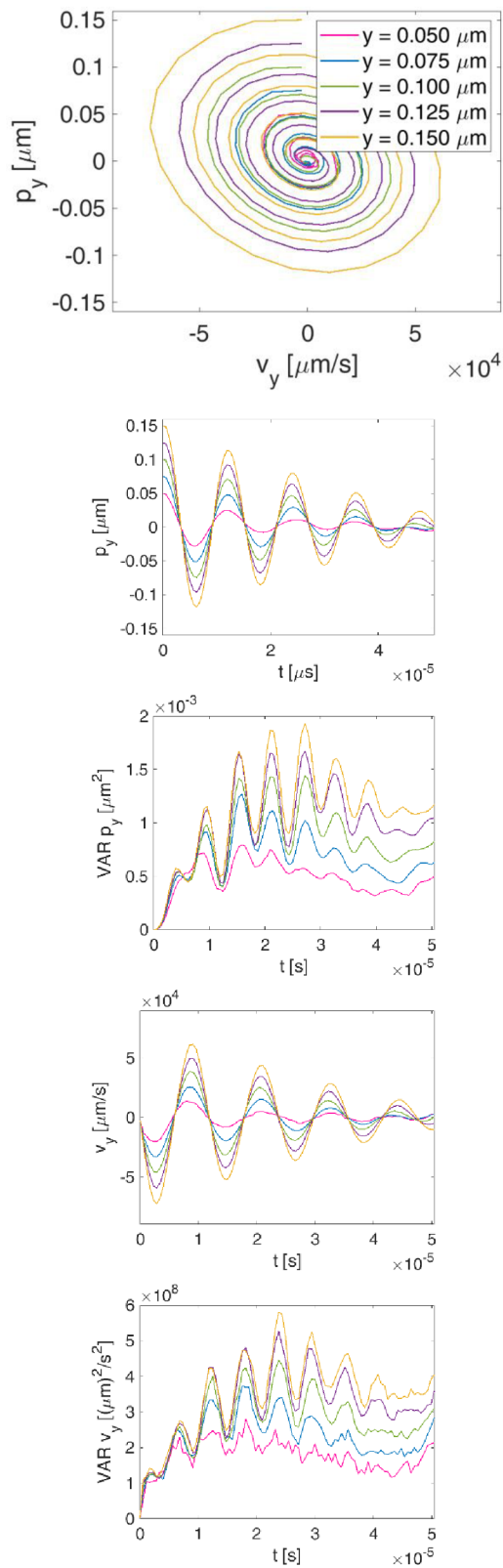
Příloha 24: Fázové portréty a další momenty – osa y, 200 Pa.

Porovnání druhu FF. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



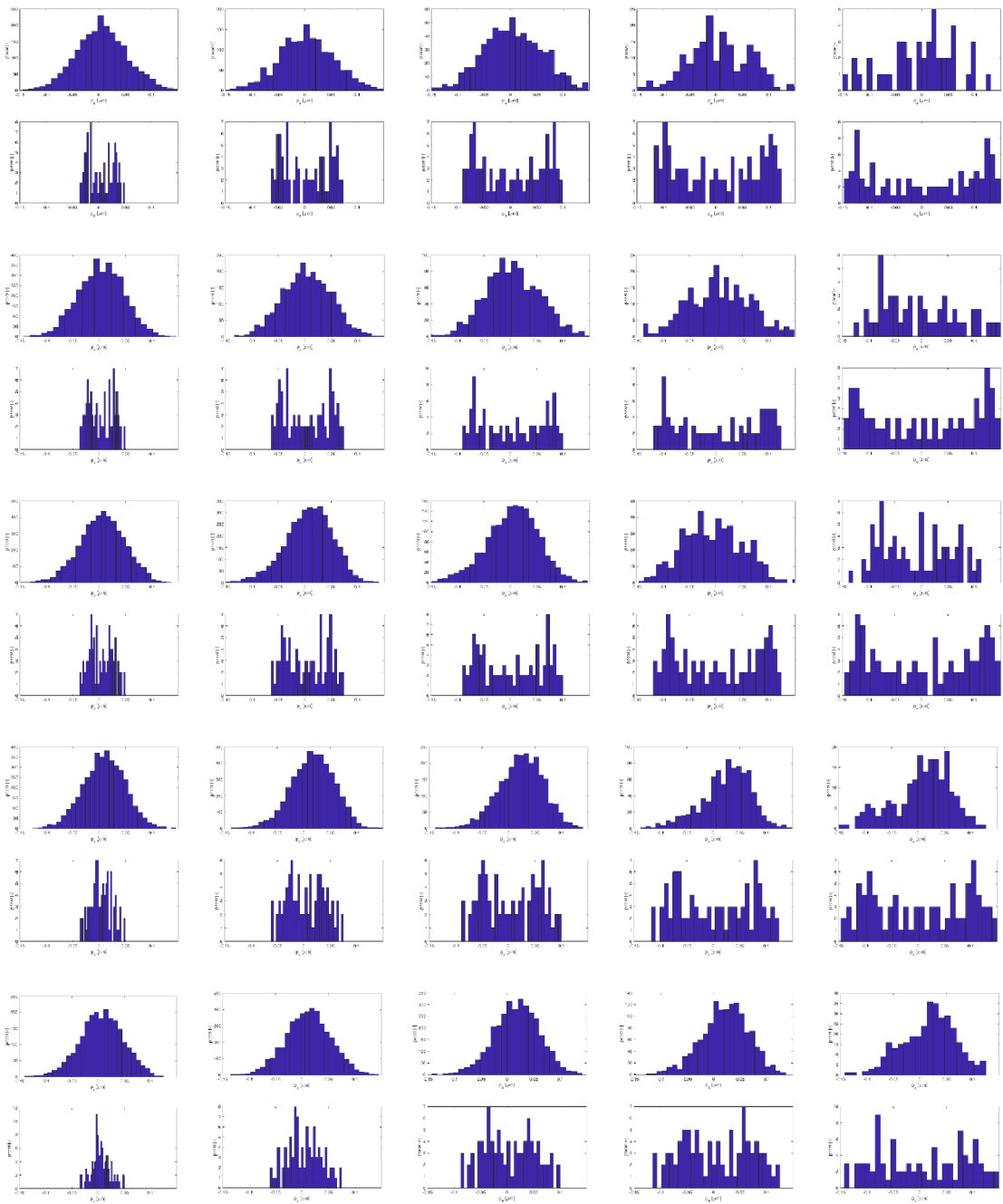
Příloha 25: Fázové portréty a další momenty – osa x, 10 Pa.

Porovnání druhu F. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.



Příloha 26: **Fázové portréty a další momenty – osa y, 1000 Pa.**

Originální data. Odshora: Fázové portréty, Průměrné trajektorie, variance trajektorií, průměrné rychlosti, variance rychlostí.)



Příloha 27: Histogramy – osa x, 10 Pa, 20 Pa, 40 Pa, 100 Pa a 200 Pa.

Originální data. Řádky odpovídají tlakovým hodnotám, sloupce počátečním amplitudám. Jednotlivě: nahoře – distribuce v čase τ , dole - distribuce v čase $50 \mu\text{s}$ (90 vzorků)

τ