

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta informačních technologií

ISS – SIGNÁLY A SYSTÉMY

Projekt

(A.R. 2022/2023)

OBSAH

1. Základy
2. Určení základní frekvence
3. Zpřesnění odhadu základní frekvence
4. Syntéza tónů

1. Základy

UPOZORNĚNÍ: 1) svůj kód budu odělovat od textu protokolu symbolem „>>“; 2) kód v pythonnotebook může dlouho vypracovovat výsledky kvůli osobnostem jazyku Python.

Pro návrh projektu od začátku vybral Python, prostředí JupyterNotebook. Pro načtení signal použil kód už napsaný a přiložený v popisu projektu.

Dál zobrazil 3 perioda svých tonů (měl tony 34, 63, 105). Spočítal periody pro každý ton, přes frekvence, který my už měli v souboru.

$$T = 1/F \quad (T - \text{period}[s], F - \text{frekvence}[Hz])$$

V kodu vypadá takhle:

```
>> period34 = 1/58.27
>> period63 = 1/311.13
>> period105 = 1/3520.00
```

Dal té hodnoty plotnul(př. Pro ton 34):

```
>>plt.figure(figsize=(10, 5))
>>plt.plot(np.arange(xall[34].size)/Fs, xall[34])
>>plt.xlim(0, period34*3)
```

Ve grafu uložil na OX v čas v secundech(dostal přes počet vzorku tona dělení Fs) a ohraničil v rozsahu 3 periodu; na OY uložil amplitudu hodnot tonu.

Dál spočítal DFT celého 0.5 s dlouhého úseku a vykreslil ho (pro každý ton).

Spočítal module DFT tonu přes funkce `np.fft.fft()`, udělal výpočet frekvence přes dělení pulky modulu DFT(DFT pracuje jenom na půlce Fs, že od 0 do 24 kHz) počtem vzorku a nasobením vzorkovací frekvence.

```
>>moduleDFT34 = np.abs(np.fft.fft(xall[34]))
>>F34 = np.arange(moduleDFT34[:moduleDFT34.size//2].size)*(Fs/xall[34].size)
```

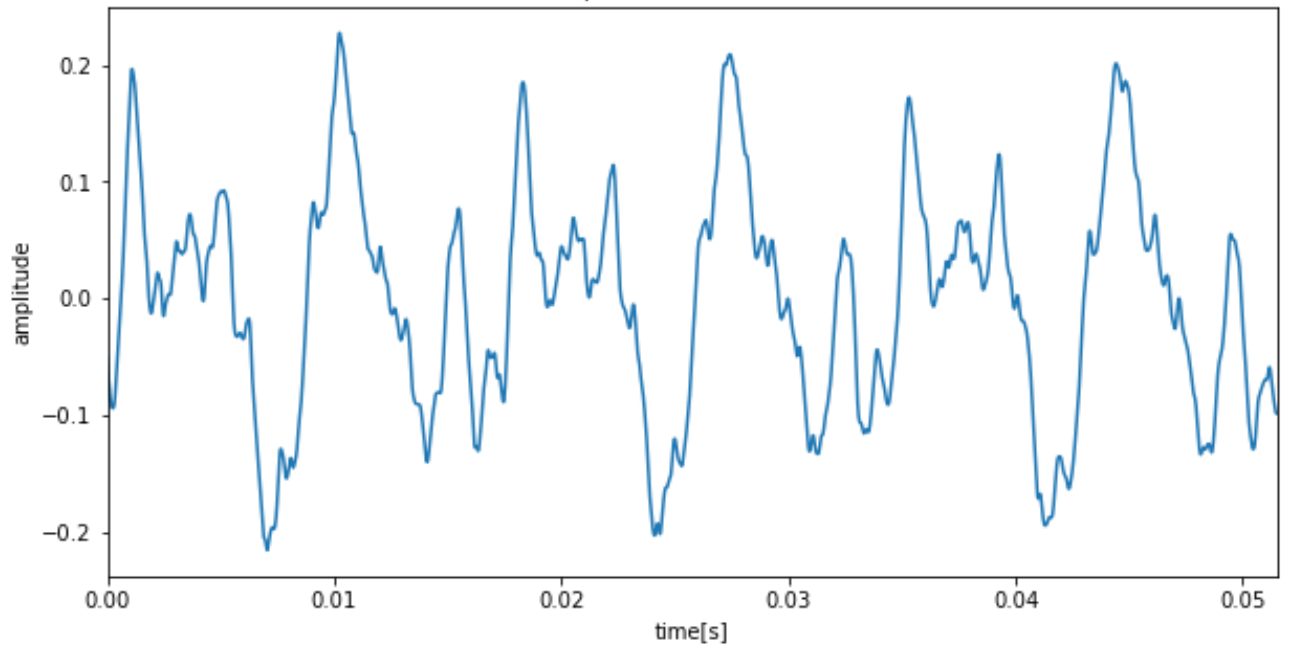
Zatím plotnul v graf hodnoty DFT. OX: frekvence; OY: log PSD plus moc malá hodnota pro spřesnění (PSD – Power Spectral Density = pulka modula DFT ** 2 + malá konstanta)

```
>>plt.plot(F34, np.log((moduleDFT34[:moduleDFT34.size//2])**2 + 10**(-5)))
```

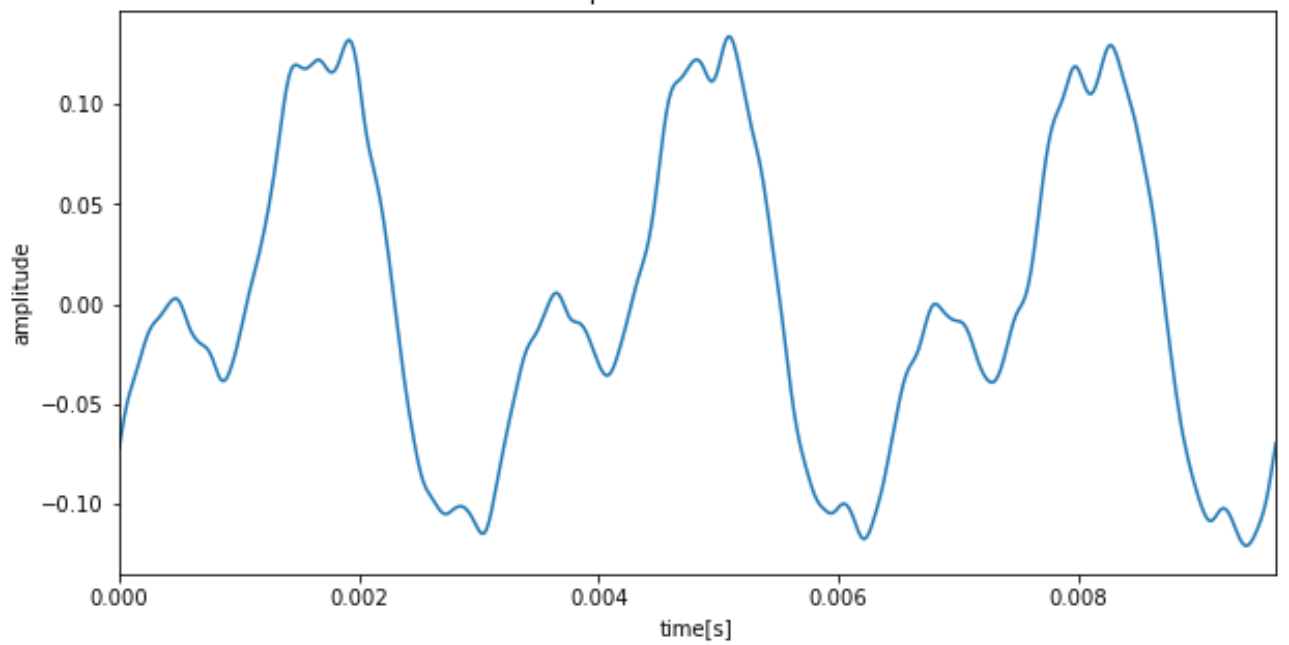
Na konci své tony uložil jako audio přes funkce `sf.write()`, kde argumenty byly jméno audio, data audio a vzorkovací frekvence:

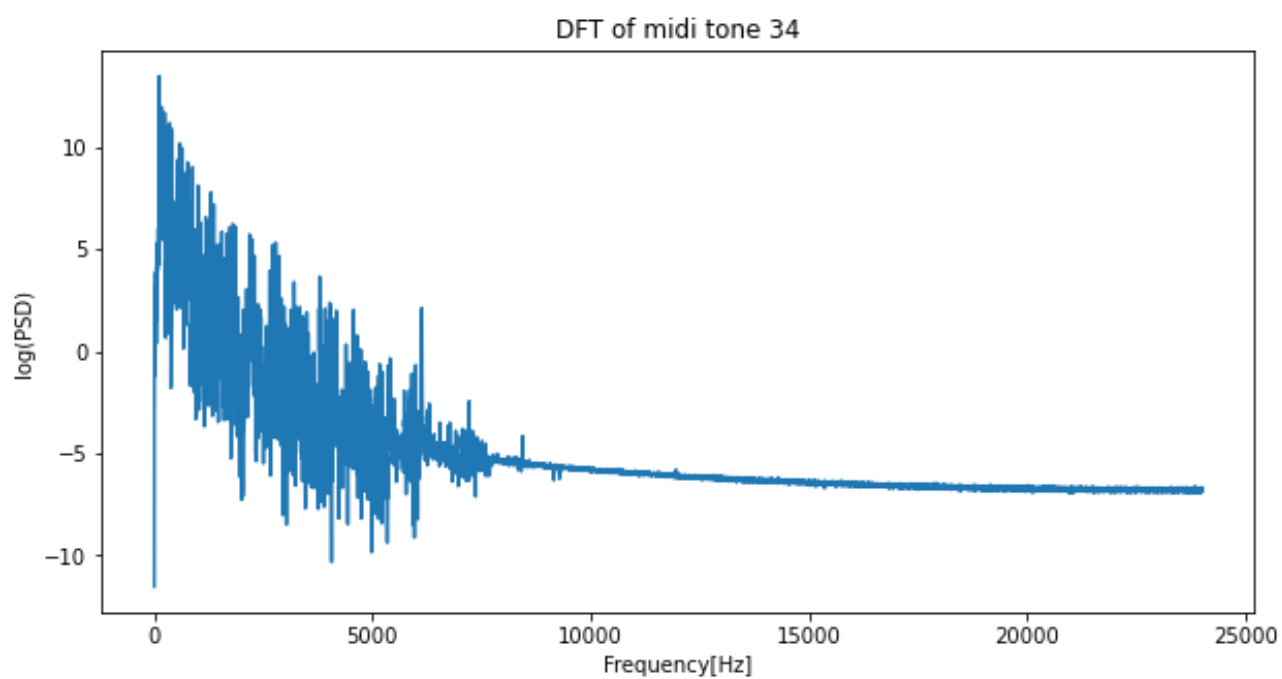
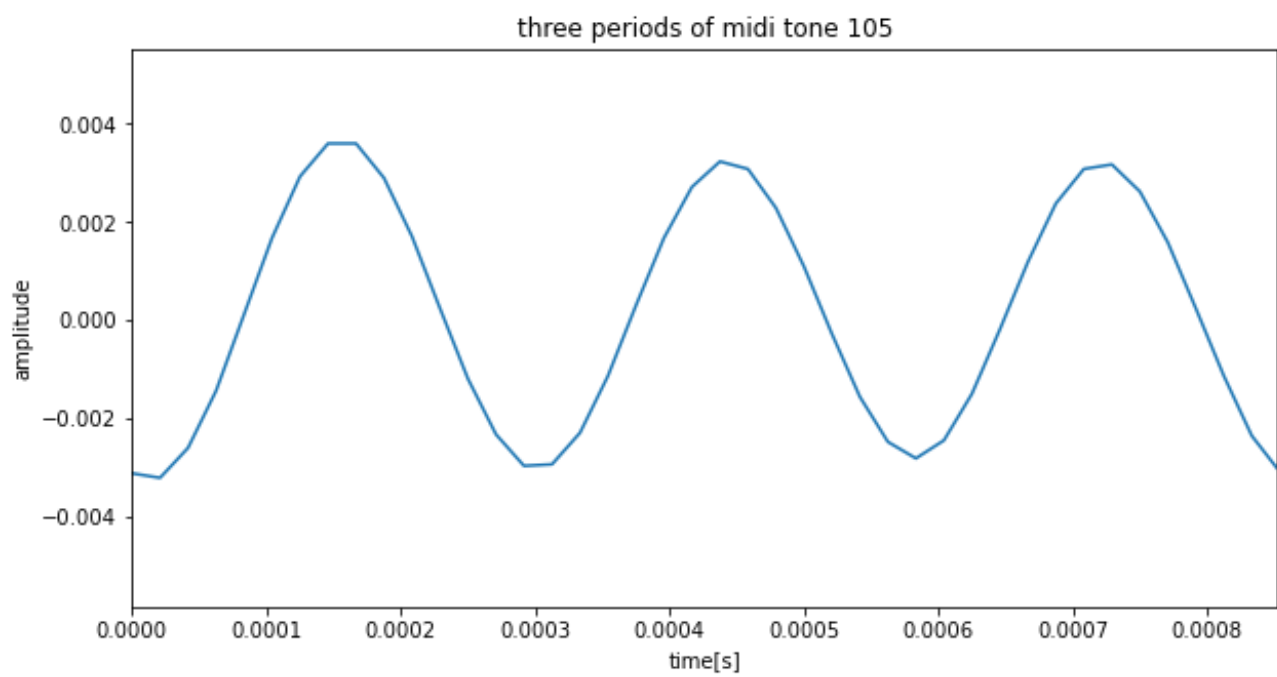
```
>>sf.write("audio/a_orig.wav", xall[34], Fs)
```

three periods of midi tone 34

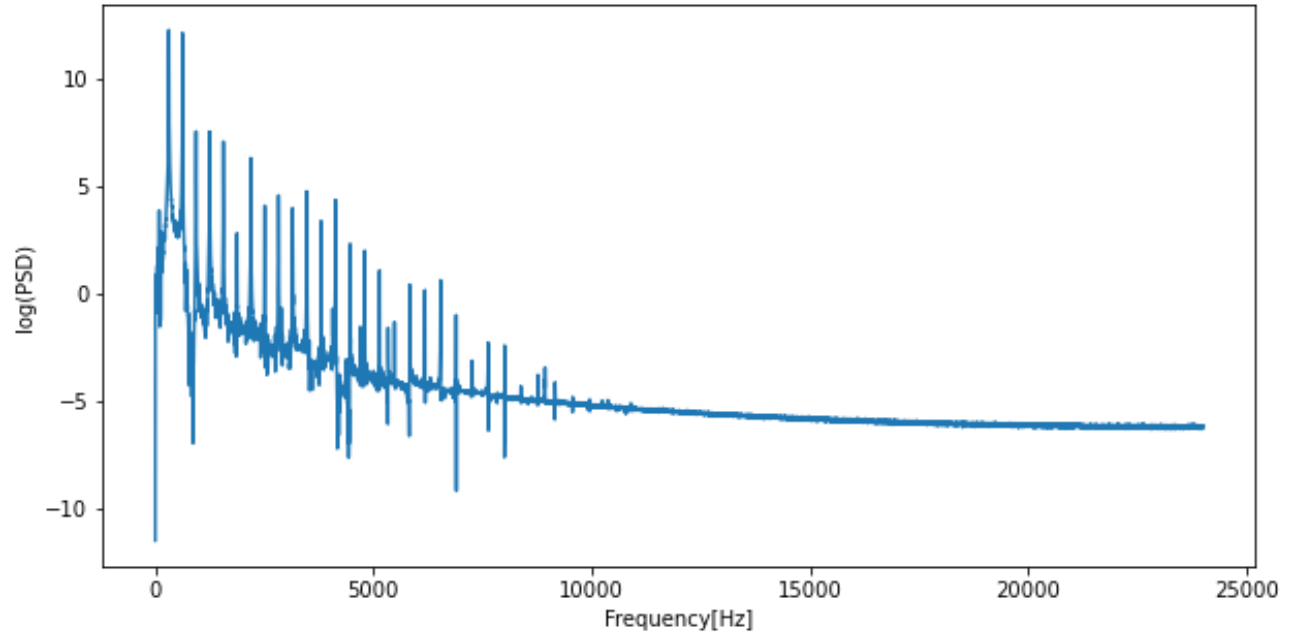


three periods of midi tone 63

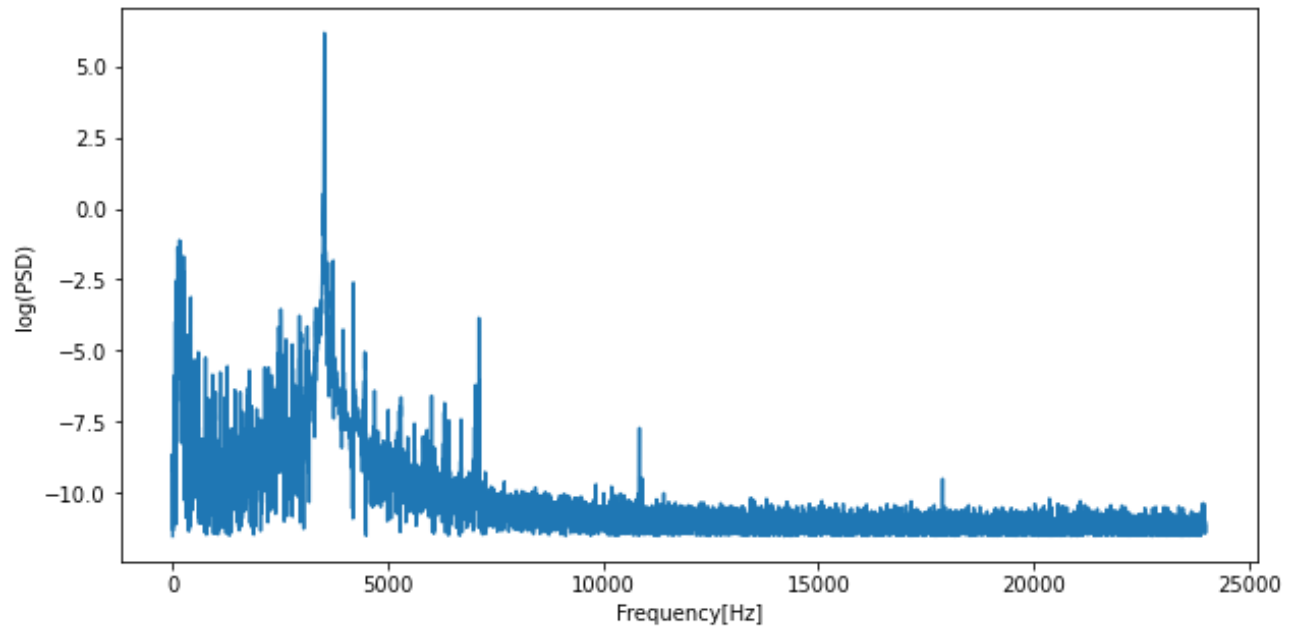




DFT of midi tone 63



DFT of midi tone 105



2 Určení základní frekvence

Pro spočítání základní frekvence (f_0) jsem použil spolu dva metoda: přes DFT a autokorelace. Proč potřeboval oba? Ják víme z teorii a budeme vidět to na hodnotach mého výsledku, pro tony z nižší frekvence lepší použít autokorelace, protože DFT bude tam selhávat, opačně bude pracovat z tony vyšší frekvence. Za správné hodnoty na který orientoval se byla frekvence z souboru.

1. základní frekvence přes DFT:

Jsem vytvořil funkce `my_find_peaks()`, která přijímá index tonu(od 24 do 108), vypočítala DFT pro ten ton, a procházela po nemu cyklem, snaží se najít největší peak(největší hodnotu po $\log(\text{PSD})$, hodnota po OY) a když nachází, vrátí odpovídající frekvence(hodnota na ose OX), a její index v DFT(pro další lehší kreslení peaku)). Smysl v tom, je-li my pracujeme přes DFT, základnou frekvencí budou frekvencí největšího peaku ve DFT.

```
>>def my_find_peaks(number_ton): #found fundamental frequency by DFT
>>
>>     oy = -1000 # the highest peak
>>     index = 0 # his index
>>
>>     moduleDFTactual = np.abs(np.fft.fft(xall[number_ton])) #the module of the actual
DFT ton
>>
>>     FActual=np.arange(moduleDFTactual[:moduleDFTactual.size//2].size)*(Fs/xall[number_t
on].size)
>>
>>     for i in range(0, FActual.size):
>>         if(np.log((moduleDFTactual[i])**2 + 10**(-5)) > oy):
>>             oy = np.log((moduleDFTactual[i])**2 + 10**(-5))
>>             index = i
>>     return FActual[index], index #fundamental frequency, index of fundamental frequency
```

Pak vypočítal základní frekvence pro každý ton, uložil do `array_fr_by_DFT`, jejich indexy do `array_index_fr_by_DFT` a vypsál.

```
Fundamental frequency by DFT

fundamental frequency of 24 ton : 66.0
fundamental frequency of 25 ton : 70.0
fundamental frequency of 26 ton : 74.0
fundamental frequency of 27 ton : 78.0
fundamental frequency of 28 ton : 82.0
fundamental frequency of 29 ton : 88.0
fundamental frequency of 30 ton : 92.0
```

fundamental frequency of 31 ton : 98.0
fundamental frequency of 32 ton : 104.0
fundamental frequency of 33 ton : 110.0
fundamental frequency of 34 ton : 116.0
fundamental frequency of 35 ton : 124.0
fundamental frequency of 36 ton : 130.0
fundamental frequency of 37 ton : 138.0
fundamental frequency of 38 ton : 220.0
fundamental frequency of 39 ton : 234.0
fundamental frequency of 40 ton : 248.0
fundamental frequency of 41 ton : 88.0
fundamental frequency of 42 ton : 92.0
fundamental frequency of 43 ton : 98.0
fundamental frequency of 44 ton : 104.0
fundamental frequency of 45 ton : 110.0
fundamental frequency of 46 ton : 118.0
fundamental frequency of 47 ton : 124.0
fundamental frequency of 48 ton : 130.0
fundamental frequency of 49 ton : 138.0
fundamental frequency of 50 ton : 146.0
fundamental frequency of 51 ton : 156.0
fundamental frequency of 52 ton : 164.0
fundamental frequency of 53 ton : 350.0
fundamental frequency of 54 ton : 370.0
fundamental frequency of 55 ton : 392.0
fundamental frequency of 56 ton : 208.0
fundamental frequency of 57 ton : 220.0
fundamental frequency of 58 ton : 234.0
fundamental frequency of 59 ton : 248.0
fundamental frequency of 60 ton : 262.0
fundamental frequency of 61 ton : 278.0
fundamental frequency of 62 ton : 294.0
fundamental frequency of 63 ton : 312.0
fundamental frequency of 64 ton : 330.0
fundamental frequency of 65 ton : 350.0
fundamental frequency of 66 ton : 370.0
fundamental frequency of 67 ton : 392.0
fundamental frequency of 68 ton : 416.0
fundamental frequency of 69 ton : 440.0
fundamental frequency of 70 ton : 466.0
fundamental frequency of 71 ton : 494.0
fundamental frequency of 72 ton : 524.0
fundamental frequency of 73 ton : 554.0
fundamental frequency of 74 ton : 588.0
fundamental frequency of 75 ton : 622.0
fundamental frequency of 76 ton : 660.0
fundamental frequency of 77 ton : 698.0
fundamental frequency of 78 ton : 740.0
fundamental frequency of 79 ton : 784.0
fundamental frequency of 80 ton : 830.0
fundamental frequency of 81 ton : 882.0
fundamental frequency of 82 ton : 932.0
fundamental frequency of 83 ton : 988.0
fundamental frequency of 84 ton : 1046.0
fundamental frequency of 85 ton : 1108.0
fundamental frequency of 86 ton : 1174.0
fundamental frequency of 87 ton : 1244.0


```

fundamental frequency of 88 ton : 1318.0
fundamental frequency of 89 ton : 1396.0
fundamental frequency of 90 ton : 1478.0
fundamental frequency of 91 ton : 1566.0
fundamental frequency of 92 ton : 1660.0
fundamental frequency of 93 ton : 1758.0
fundamental frequency of 94 ton : 1864.0
fundamental frequency of 95 ton : 1976.0
fundamental frequency of 96 ton : 2094.0
fundamental frequency of 97 ton : 2218.0
fundamental frequency of 98 ton : 2350.0
fundamental frequency of 99 ton : 2490.0
fundamental frequency of 100 ton : 2638.0
fundamental frequency of 101 ton : 2796.0
fundamental frequency of 102 ton : 2962.0
fundamental frequency of 103 ton : 3138.0
fundamental frequency of 104 ton : 3324.0
fundamental frequency of 105 ton : 3522.0
fundamental frequency of 106 ton : 3732.0
fundamental frequency of 107 ton : 3954.0
fundamental frequency of 108 ton : 4188.0

```

Porovnáváme hodnoty s hodnotami z souboru a vidíme, jak stejně jako jsem předpokládal, máme selhání v tónech z nižší frekvence. Po druhé hodnoty ne taký přesný jak bych chtěli. Můžeme to řešit vypočtem přes autokorelace.

2. základní frekvence přes autokorelace:

Jsem vytvořil funkci `autocorrelation()` která spočítala autokorelace, a přes její nacházela základní frekvence. Ona přijme index tonu, vypočítala korelace přes funkci `np.correlate()` (udělá posun pro OX a vynásobila svůj ton sama na sebe) a uložila výslední hodnoty do `correlate_ton`. Pak jsem rozdělil ten `correlate_ton` na pol, protože víme že autokorelace udělá symetricky signál, pro naše pohodlí můžeme to skrátit. Dál nejdůležitější část, našou základní frekvenci my najdeme přes vzdálenost mezi dvěma největšími peaky, tohle bude hodnota N (vzorky), nacházíme ji, přes funkci `max()`, `min()`, porovnávání hodnot atd. Dál přes formulu můžeme najít základní frekvenci.

$$F = (1/N) * F_s \quad (F - \text{základní frekvence [Hz]}, N - \text{vzorky}, F_s - \text{vzorkovací frekvence})$$

Kod:

```

>>def autocorrelation(number_ton):
>>    correlate_ton = np.correlate(xall[number_ton], xall[number_ton], "full")
>>    correlate_tonHalf = correlate_ton[(correlate_ton.size-1)//2:]
>>
>>    max_peak_col = max(correlate_tonHalf)
>>    index_max_peak_col = np.where(correlate_tonHalf == max_peak_col)

```

```

>> index_max_peak_col = index_max_peak_col[0][0]
>>
>> min_peak_col = min(correlate_tonHalf)
>> index_min_peak_col = np.where(correlate_tonHalf == min_peak_col)
>> index_min_peak_col = index_min_peak_col[0][0]
>>
>> second_max_peak_col = max(correlate_tonHalf[index_min_peak_col+1:])
>> second_index_max_peak_col = np.where(correlate_tonHalf == second_max_peak_col)
>> second_index_max_peak_col = second_index_max_peak_col[0][0]
>>
>> fundamental_frequency = ((1/second_index_max_peak_col)*Fs)
>> return fundamental_frequency

```

Vypíšu výsledek, abych uviděl rozdíl mezi hodnotami frekvence přes autokorelace, DFT a hodnotami z souboru.

Fundamental frequency by autocorrelation

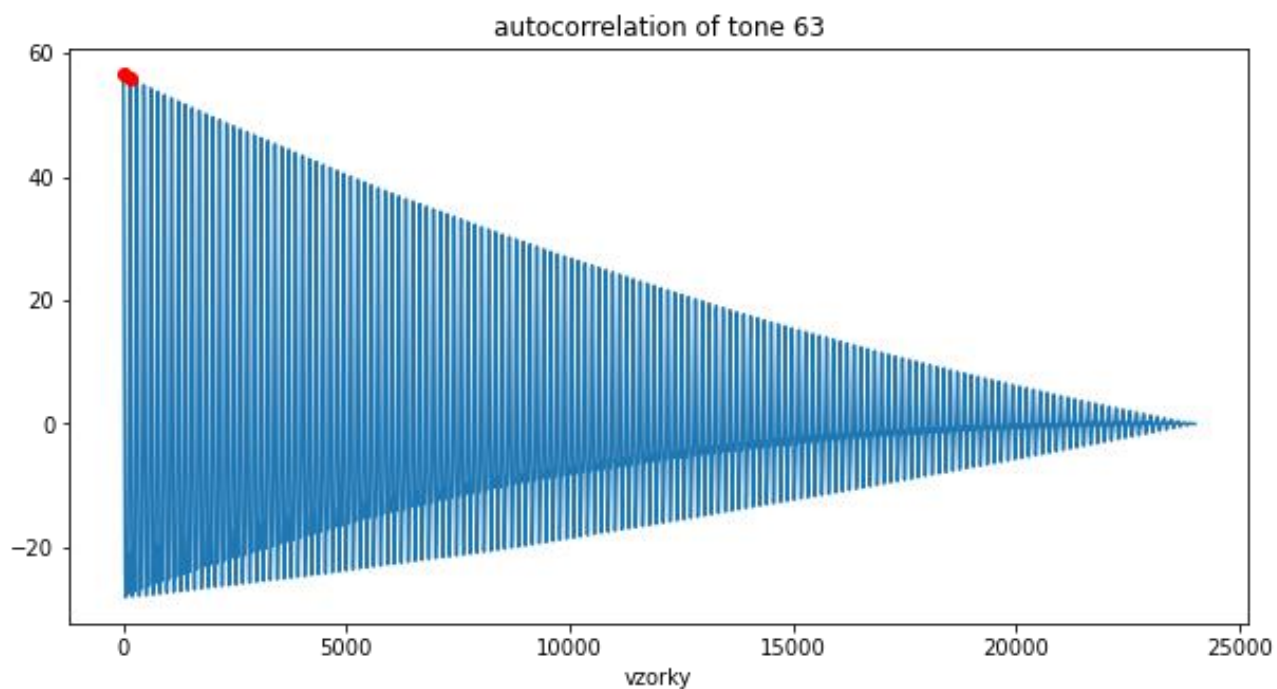
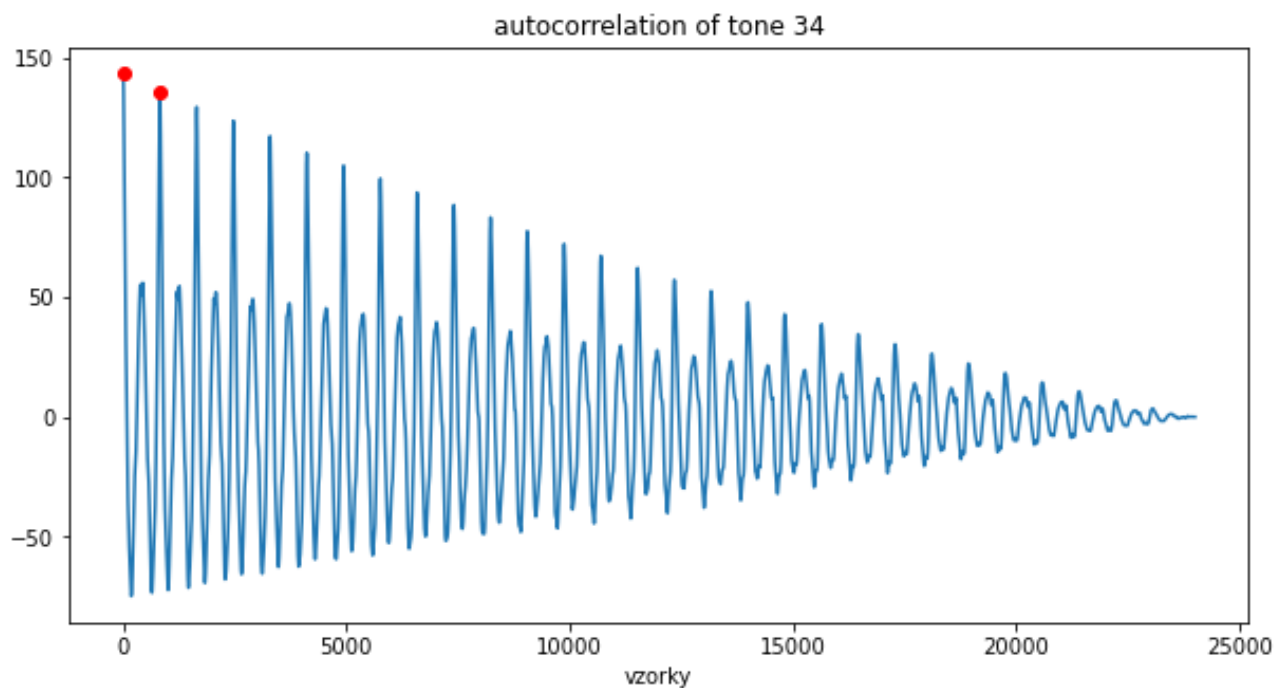
```

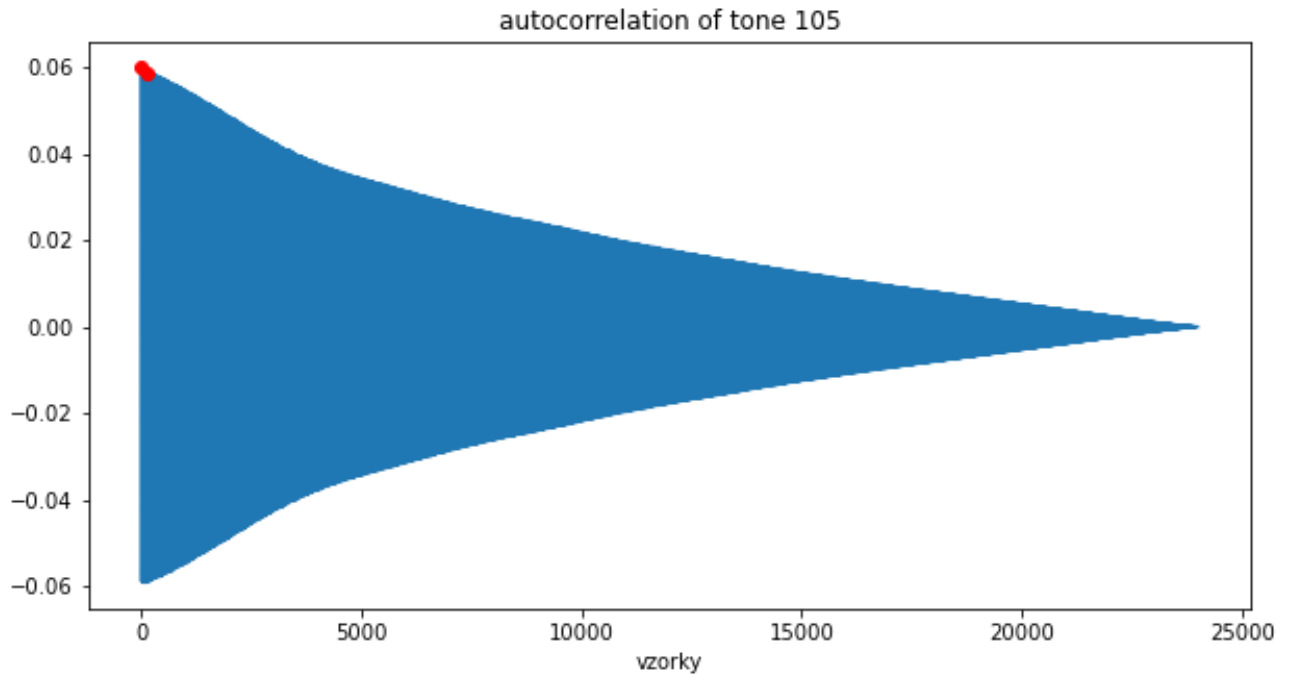
fundamental frequency of 24 ton : 32.80929596719071
fundamental frequency of 25 ton : 34.757422157856624
fundamental frequency of 26 ton : 36.83806600153492
fundamental frequency of 27 ton : 39.02439024390244
fundamental frequency of 28 ton : 41.343669250645995
fundamental frequency of 29 ton : 43.7956204379562
fundamental frequency of 30 ton : 46.42166344294004
fundamental frequency of 31 ton : 49.18032786885246
fundamental frequency of 32 ton : 52.11726384364821
fundamental frequency of 33 ton : 55.172413793103445
fundamental frequency of 34 ton : 58.465286236297196
fundamental frequency of 35 ton : 61.935483870967744
fundamental frequency of 36 ton : 65.57377049180327
fundamental frequency of 37 ton : 69.46454413892909
fundamental frequency of 38 ton : 73.61963190184049
fundamental frequency of 39 ton : 77.92207792207793
fundamental frequency of 40 ton : 82.61617900172118
fundamental frequency of 41 ton : 87.75137111517367
fundamental frequency of 42 ton : 92.84332688588007
fundamental frequency of 43 ton : 98.36065573770492
fundamental frequency of 44 ton : 104.34782608695652
fundamental frequency of 45 ton : 110.59907834101382
fundamental frequency of 46 ton : 117.07317073170732
fundamental frequency of 47 ton : 123.71134020618557
fundamental frequency of 48 ton : 131.14754098360655
fundamental frequency of 49 ton : 138.72832369942196
fundamental frequency of 50 ton : 147.23926380368098
fundamental frequency of 51 ton : 155.84415584415586
fundamental frequency of 52 ton : 164.94845360824743
fundamental frequency of 53 ton : 175.1824817518248
fundamental frequency of 54 ton : 185.32818532818533

```

fundamental frequency of 55 ton : 196.72131147540983
fundamental frequency of 56 ton : 207.7922077922078
fundamental frequency of 57 ton : 220.1834862385321
fundamental frequency of 58 ton : 77.79578606158833
fundamental frequency of 59 ton : 35.34609720176731
fundamental frequency of 60 ton : 32.76450511945392
fundamental frequency of 61 ton : 34.70715835140998
fundamental frequency of 62 ton : 294.47852760736197
fundamental frequency of 63 ton : 311.6883116883117
fundamental frequency of 64 ton : 328.7671232876712
fundamental frequency of 65 ton : 350.3649635036496
fundamental frequency of 66 ton : 369.2307692307692
fundamental frequency of 67 ton : 393.44262295081967
fundamental frequency of 68 ton : 417.39130434782606
fundamental frequency of 69 ton : 440.3669724770642
fundamental frequency of 70 ton : 466.0194174757281
fundamental frequency of 71 ton : 494.8453608247423
fundamental frequency of 72 ton : 521.7391304347826
fundamental frequency of 73 ton : 551.7241379310344
fundamental frequency of 74 ton : 585.3658536585366
fundamental frequency of 75 ton : 623.3766233766235
fundamental frequency of 76 ton : 657.5342465753424
fundamental frequency of 77 ton : 350.3649635036496
fundamental frequency of 78 ton : 247.42268041237114
fundamental frequency of 79 ton : 156.86274509803923
fundamental frequency of 80 ton : 827.5862068965517
fundamental frequency of 81 ton : 888.8888888888888
fundamental frequency of 82 ton : 941.1764705882352
fundamental frequency of 83 ton : 109.83981693363845
fundamental frequency of 84 ton : 116.50485436893203
fundamental frequency of 85 ton : 123.39331619537275
fundamental frequency of 86 ton : 130.7901907356948
fundamental frequency of 87 ton : 138.32853025936598
fundamental frequency of 88 ton : 146.78899082568807
fundamental frequency of 89 ton : 126.98412698412697
fundamental frequency of 90 ton : 134.45378151260505
fundamental frequency of 91 ton : 142.433234421365
fundamental frequency of 92 ton : 150.9433962264151
fundamental frequency of 93 ton : 160.0
fundamental frequency of 94 ton : 155.33980582524273
fundamental frequency of 95 ton : 179.77528089887642
fundamental frequency of 96 ton : 233.00970873786406
fundamental frequency of 97 ton : 201.68067226890756
fundamental frequency of 98 ton : 235.2941176470588
fundamental frequency of 99 ton : 226.41509433962264
fundamental frequency of 100 ton : 240.0
fundamental frequency of 101 ton : 253.96825396825395
fundamental frequency of 102 ton : 155.84415584415586
fundamental frequency of 103 ton : 156.86274509803923
fundamental frequency of 104 ton : 475.2475247524753
fundamental frequency of 105 ton : 440.3669724770642
fundamental frequency of 106 ton : 533.3333333333334
fundamental frequency of 107 ton : 4000.0
fundamental frequency of 108 ton : 695.6521739130435

Na mých hodnotách přesně vidím, jak lepší vychází základní frekvence pro nižší tony, než přes DFT. Ale také je selhání pro vyšší tony. Můžeme podívat proč tak stalo přes graf (nejvyšší peaky je červené kruhy





Porovnává všechny své hodnoty jsem řešil že nejlepší pro tony od 0 do 42 základní frekvence lepší vypočítat přes autokorelace, ostatní přes DFT. Konečné hodnoty uložil do `f_f`. Vidíme že plus mínus moje hodnoty mohou mít nějaký malý rozdíl od frekvence v souboru. Jsem předpokládám, že porbely může být kvůli odchylkám ve výpočtech a také tomu, že klavír s velkou pravděpodobností rozladění (vidíme to na největších tónech, kde odchylka dosahuje 1 nebo 2 body).

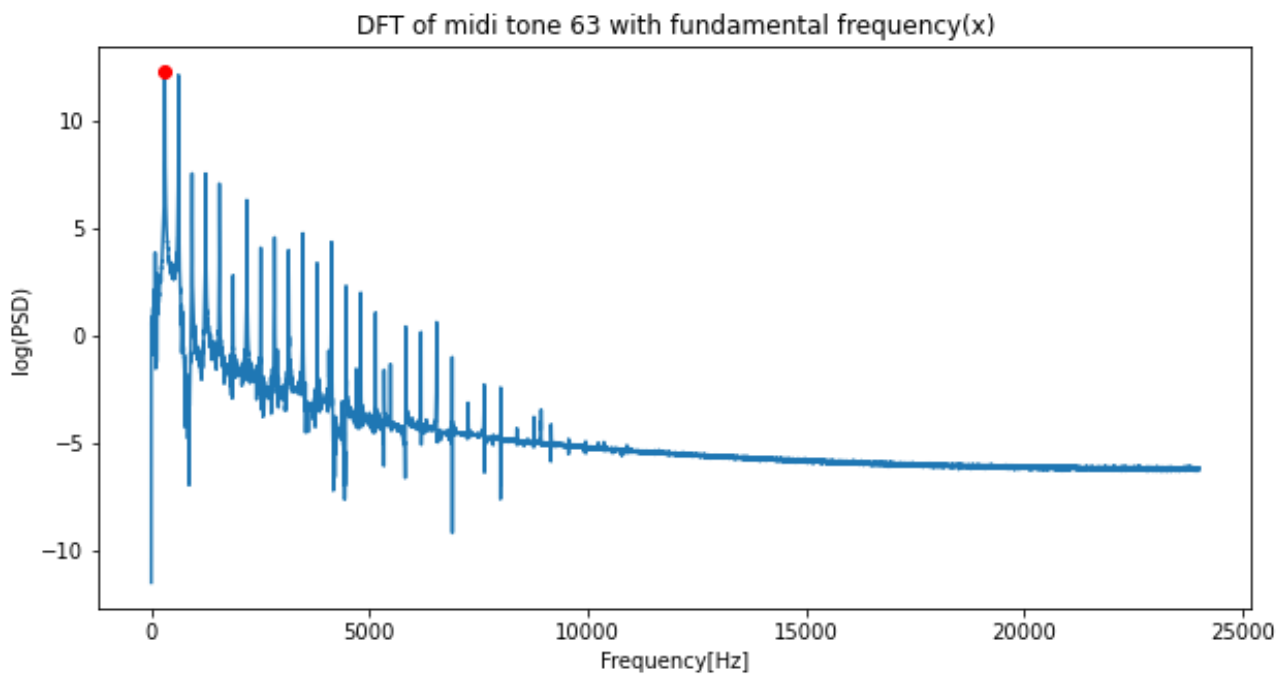
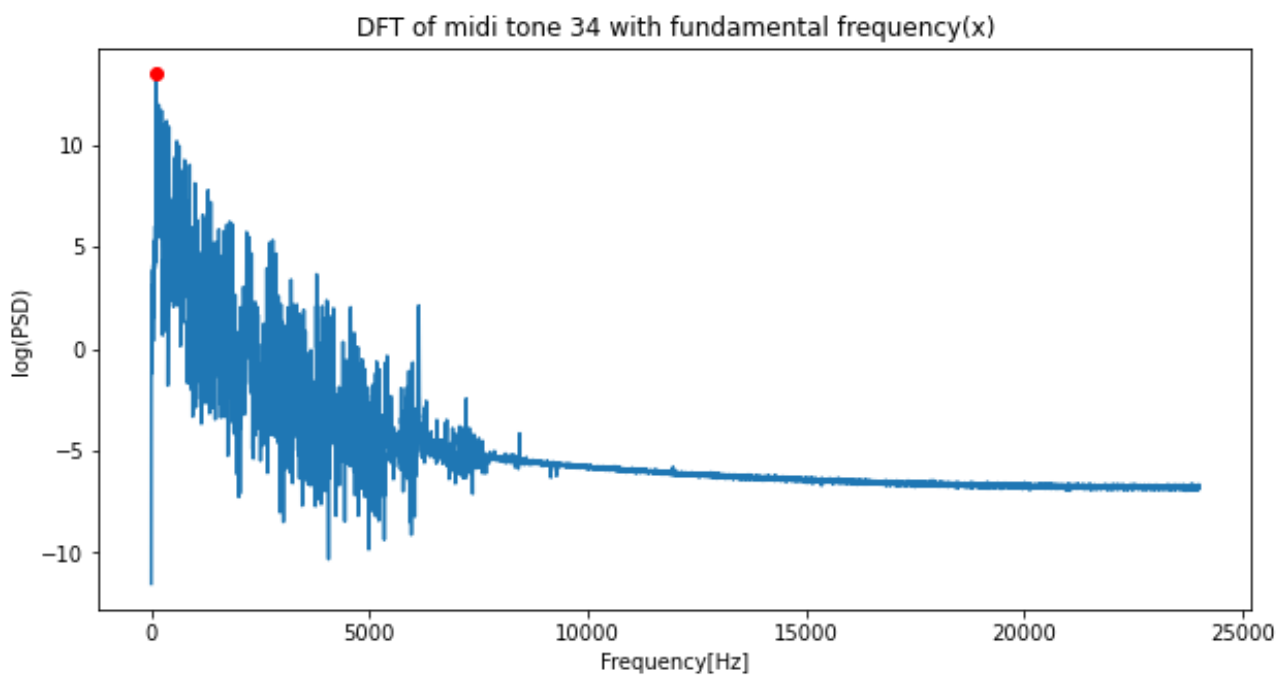
Fundamental frequency

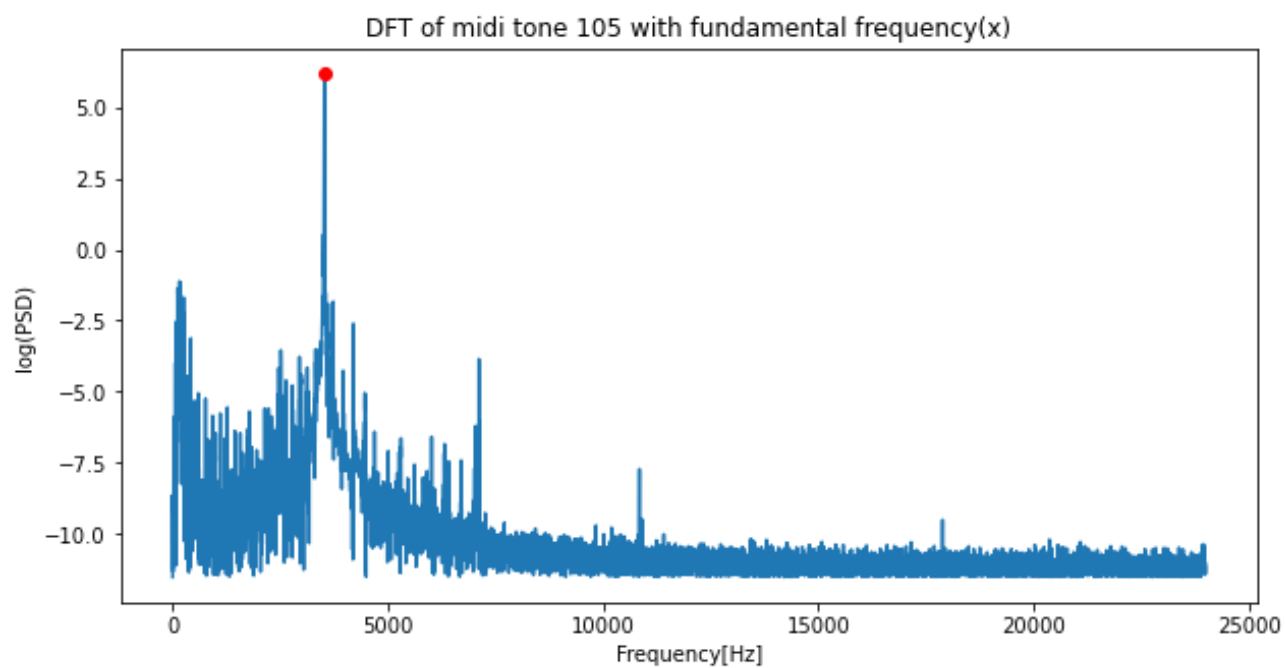
```
Fundamental frequency of 24 ton : 32.80929596719071
Fundamental frequency of 25 ton : 34.757422157856624
Fundamental frequency of 26 ton : 36.83806600153492
Fundamental frequency of 27 ton : 39.02439024390244
Fundamental frequency of 28 ton : 41.343669250645995
Fundamental frequency of 29 ton : 43.7956204379562
Fundamental frequency of 30 ton : 46.42166344294004
Fundamental frequency of 31 ton : 49.18032786885246
Fundamental frequency of 32 ton : 52.11726384364821
Fundamental frequency of 33 ton : 55.172413793103445
Fundamental frequency of 34 ton : 58.465286236297196
Fundamental frequency of 35 ton : 61.935483870967744
Fundamental frequency of 36 ton : 65.57377049180327
Fundamental frequency of 37 ton : 69.46454413892909
Fundamental frequency of 38 ton : 73.61963190184049
Fundamental frequency of 39 ton : 77.92207792207793
Fundamental frequency of 40 ton : 82.61617900172118
Fundamental frequency of 41 ton : 87.75137111517367
Fundamental frequency of 42 ton : 92.0
Fundamental frequency of 43 ton : 98.0
Fundamental frequency of 44 ton : 104.0
```

Fundamental	frequency of 45 ton	: 110.0
Fundamental	frequency of 46 ton	: 118.0
Fundamental	frequency of 47 ton	: 124.0
Fundamental	frequency of 48 ton	: 130.0
Fundamental	frequency of 49 ton	: 138.0
Fundamental	frequency of 50 ton	: 146.0
Fundamental	frequency of 51 ton	: 156.0
Fundamental	frequency of 52 ton	: 164.0
Fundamental	frequency of 53 ton	: 350.0
Fundamental	frequency of 54 ton	: 370.0
Fundamental	frequency of 55 ton	: 392.0
Fundamental	frequency of 56 ton	: 208.0
Fundamental	frequency of 57 ton	: 220.0
Fundamental	frequency of 58 ton	: 234.0
Fundamental	frequency of 59 ton	: 248.0
Fundamental	frequency of 60 ton	: 262.0
Fundamental	frequency of 61 ton	: 278.0
Fundamental	frequency of 62 ton	: 294.0
Fundamental	frequency of 63 ton	: 312.0
Fundamental	frequency of 64 ton	: 330.0
Fundamental	frequency of 65 ton	: 350.0
Fundamental	frequency of 66 ton	: 370.0
Fundamental	frequency of 67 ton	: 392.0
Fundamental	frequency of 68 ton	: 416.0
Fundamental	frequency of 69 ton	: 440.0
Fundamental	frequency of 70 ton	: 466.0
Fundamental	frequency of 71 ton	: 494.0
Fundamental	frequency of 72 ton	: 524.0
Fundamental	frequency of 73 ton	: 554.0
Fundamental	frequency of 74 ton	: 588.0
Fundamental	frequency of 75 ton	: 622.0
Fundamental	frequency of 76 ton	: 660.0
Fundamental	frequency of 77 ton	: 698.0
Fundamental	frequency of 78 ton	: 740.0
Fundamental	frequency of 79 ton	: 784.0
Fundamental	frequency of 80 ton	: 830.0
Fundamental	frequency of 81 ton	: 882.0
Fundamental	frequency of 82 ton	: 932.0
Fundamental	frequency of 83 ton	: 988.0
Fundamental	frequency of 84 ton	: 1046.0
Fundamental	frequency of 85 ton	: 1108.0
Fundamental	frequency of 86 ton	: 1174.0
Fundamental	frequency of 87 ton	: 1244.0
Fundamental	frequency of 88 ton	: 1318.0
Fundamental	frequency of 89 ton	: 1396.0
Fundamental	frequency of 90 ton	: 1478.0
Fundamental	frequency of 91 ton	: 1566.0
Fundamental	frequency of 92 ton	: 1660.0
Fundamental	frequency of 93 ton	: 1758.0
Fundamental	frequency of 94 ton	: 1864.0
Fundamental	frequency of 95 ton	: 1976.0
Fundamental	frequency of 96 ton	: 2094.0
Fundamental	frequency of 97 ton	: 2218.0
Fundamental	frequency of 98 ton	: 2350.0
Fundamental	frequency of 99 ton	: 2490.0
Fundamental	frequency of 100 ton	: 2638.0
Fundamental	frequency of 101 ton	: 2796.0

Fundamental frequency of 102 ton : 2962.0
Fundamental frequency of 103 ton : 3138.0
Fundamental frequency of 104 ton : 3324.0
Fundamental frequency of 105 ton : 3522.0
Fundamental frequency of 106 ton : 3732.0
Fundamental frequency of 107 ton : 3954.0
Fundamental frequency of 108 ton : 4188.0

Taky v zádání potřeboval ukázat základní frekvence(červené kruhy) pro své tři tony na obrázku:





3. Zpřesnění odhadu základní frekvence f_0

Pro návrh DTFT použil kod pana Černockého z pythonotebook pro 2 přednášku a předělal pod svůj názor na řešení projektu. Funkce jmenuje `found_f0_by_dtft(index_ton)`.

```
>>def found_f0_by_dtft(index_ton):  
  
>>    if(index_ton<41):                # work with 24-40 tons with small frequency  
>>        freq_interval = 92          # diaposon for found approximate fundamental frequency  
>>        freq_points = 300           # point for found in interval  
>>    elif(index_ton>80):              # work with 41-80 tons with middle frequency  
>>        freq_interval = 3  
>>        freq_points = 1000  
>>    else:                            #work with 80-108 tons with big frequency  
>>        freq_interval = 4  
>>        freq_points = 600  
  
>>    N = 24000                        # frekquency of my ton  
>>  
  
>>    n = np.arange(0, Fs/2)          # range 0...24  
>>  
  
>>    freq_from = f_f[index_ton-24]-freq_interval  
>>    freq_to = f_f[index_ton-24]+freq_interval  
>>    freq_distribution = np.linspace(freq_from, freq_to, freq_points)  
  
  
>>    A = np.zeros([freq_points, N],dtype=complex)  
>>    for k in np.arange(0,freq_points):  
>>        A[k,:] = np.exp(-1j * 2 * np.pi * freq_distribution[k] / Fs * n)  
>>    dtft_out = np.matmul(A,xall[index_ton].T)  
>>    f0 = freq_distribution[np.argmax(np.abs(dtft_out))]  
>>  
  
>>    if(index_ton<41 or (index_ton>=53 and index_ton<56)):  
>>        return f0/2  
>>    return f0
```

Zakladni princip funkce v tom ze vybírám nejaký interval pro vyhledání f_0 . ten interval bude rovnat (`freq_interval`) a číslo bodu na kterých rozdělím ten interval(`freq_points`) zaleží na tom jakou frekvence má ton. Experementalním metodem jsem vyřešil, že pro malý frekvence(<41 ton) lepší `freq_interval = 92, freq_points = 300`; pro střední frekvence(41...79 ton): `freq_interval = 4, freq_points = 600`; a pro velký(>=80 ton): `freq_interval = 3, freq_points = 1000`.

Dál přesně popíšu interval své frekvence přidáním a odebráním od už nalezené v minulé uloze základní frekvence mého tonu (`freq_from, freq_to`). Rozdělím ten interval po bodech, který žádal v `freq_points` přes funkce `np.linspace` a uložíme do `freq_distribution`. Dál budu pracovat přes základní formulu DTFT, kde vynasobím transponované zodpovědné hodnoty svého tonu a exponencial v stupnu s určitou omegou.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n}$$

Pro exponencialu vytvořím prazdnu maticu `A[]` a načtem hodnoty.

```
>> for k in np.arange(0, freq_points):
>>     A[k, :] = np.exp(-1j * 2 * np.pi * freq_distribution[k] / Fs * n)
Jak vídíme na každou položku matice načteme  $e^{-(j \cdot \omega \cdot n)}$ .
```

$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \text{freq_distribution}[k] / F_s$.

Vynasobíme transponované zodpovědné hodnoty svého tonu a exponencial v stupnu s určitou omegou a uložíme hodnoty do `dtft_out`. Tohlé budou DTFT mého tonu. Základnou frekvence bude maximalná hodnota DTFTF. Uložil ji do `f0` a vrátíme(kdy vrátíme hodnoty tonu 0...40 musíme ji rozdělit dvema, kvůli zvláštnosti práce z tony malých frekvencí.).

Můj metod vypočtu může mít nějaký malý odchylku kvůli výbrané metody vyhledávání hodnot `f0`, a taký můžeme vídět chybu +- 1 nebo 2 Hz na vyšších tonu kvůli tomu, o čem už psal, že klavír s velkou pravděpodoností rozladi.

Hodnoty zachovám v `f0_dtft`.

Finaly fundamental frequency by DTFT

```
Fundamental frequency of 24 ton : 32.558494137441514
Fundamental frequency of 25 ton : 34.7633264635437
Fundamental frequency of 26 ton : 36.72672530845976
Fundamental frequency of 27 ton : 38.74296435272046
Fundamental frequency of 28 ton : 41.13337308686147
Fundamental frequency of 29 ton : 43.590117911285795
Fundamental frequency of 30 ton : 46.13390864454695
Fundamental frequency of 31 ton : 49.051702395964696
Fundamental frequency of 32 ton : 51.750939614131795
Fundamental frequency of 33 ton : 54.81697612732096
Fundamental frequency of 34 ton : 58.30956619507168
Fundamental frequency of 35 ton : 61.583126550868485
Fundamental frequency of 36 ton : 65.24842370744011
Fundamental frequency of 37 ton : 69.03996437715685
Fundamental frequency of 38 ton : 73.57904672015101
Fundamental frequency of 39 ton : 77.8841158841159
Fundamental frequency of 40 ton : 82.38501257778367
Fundamental frequency of 41 ton : 87.70462654088318
Fundamental frequency of 42 ton : 92.92821368948248
Fundamental frequency of 43 ton : 98.46076794657763
Fundamental frequency of 44 ton : 104.30050083472455
Fundamental frequency of 45 ton : 110.51419031719533
```

Fundamental frequency of 46 ton : 117.07178631051752
Fundamental frequency of 47 ton : 123.17863105175292
Fundamental frequency of 48 ton : 130.51419031719533
Fundamental frequency of 49 ton : 138.2737896494157
Fundamental frequency of 50 ton : 146.6744574290484
Fundamental frequency of 51 ton : 155.37896494156928
Fundamental frequency of 52 ton : 164.6076794657763
Fundamental frequency of 53 ton : 174.7696160267112
Fundamental frequency of 54 ton : 185.15692821368947
Fundamental frequency of 55 ton : 196.17028380634392
Fundamental frequency of 56 ton : 207.80634390651085
Fundamental frequency of 57 ton : 220.15358931552586
Fundamental frequency of 58 ton : 233.24540901502505
Fundamental frequency of 59 ton : 247.07178631051752
Fundamental frequency of 60 ton : 261.7662771285476
Fundamental frequency of 61 ton : 277.338898163606
Fundamental frequency of 62 ton : 293.6193656093489
Fundamental frequency of 63 ton : 311.085141903172
Fundamental frequency of 64 ton : 329.59265442404006
Fundamental frequency of 65 ton : 349.13856427378965
Fundamental frequency of 66 ton : 369.88647746243737
Fundamental frequency of 67 ton : 391.87312186978295
Fundamental frequency of 68 ton : 415.4590984974958
Fundamental frequency of 69 ton : 440.12687813021705
Fundamental frequency of 70 ton : 466.2737896494157
Fundamental frequency of 71 ton : 493.8330550918197
Fundamental frequency of 72 ton : 523.1919866444074
Fundamental frequency of 73 ton : 554.3005008347245
Fundamental frequency of 74 ton : 587.1919866444074
Fundamental frequency of 75 ton : 622.1001669449082
Fundamental frequency of 76 ton : 659.0851419031719
Fundamental frequency of 77 ton : 697.5525876460767
Fundamental frequency of 78 ton : 739.0851419031719
Fundamental frequency of 79 ton : 783.0984974958263
Fundamental frequency of 80 ton : 829.6060100166945
Fundamental frequency of 81 ton : 879.0
Fundamental frequency of 82 ton : 931.3483483483484
Fundamental frequency of 83 ton : 987.6126126126126
Fundamental frequency of 84 ton : 1046.1531531531532
Fundamental frequency of 85 ton : 1108.3213213213214
Fundamental frequency of 86 ton : 1174.2192192192192
Fundamental frequency of 87 ton : 1244.099099099099
Fundamental frequency of 88 ton : 1318.1711711711712
Fundamental frequency of 89 ton : 1395.930930930931
Fundamental frequency of 90 ton : 1478.93993993994
Fundamental frequency of 91 ton : 1566.903903903904
Fundamental frequency of 92 ton : 1660.051051051051
Fundamental frequency of 93 ton : 1758.945945945946
Fundamental frequency of 94 ton : 1863.6006006006005
Fundamental frequency of 95 ton : 1976.4714714714714
Fundamental frequency of 96 ton : 2093.990990990991
Fundamental frequency of 97 ton : 2218.5015015015015
Fundamental frequency of 98 ton : 2350.6516516516517
Fundamental frequency of 99 ton : 2490.4174174174173
Fundamental frequency of 100 ton : 2638.5195195195197
Fundamental frequency of 101 ton : 2795.066066066066
Fundamental frequency of 102 ton : 2961.252252252252

Fundamental frequency of 103 ton : 3137.39039039039
Fundamental frequency of 104 ton : 3324.021021021021
Fundamental frequency of 105 ton : 3521.6906906906906
Fundamental frequency of 106 ton : 3731.1501501501502
Fundamental frequency of 107 ton : 3953.192192192192
Fundamental frequency of 108 ton : 4188.249249249249

4. Reprezentace klavíru

Abych spočítat koeficienty na násobcích základní frekvence ($1f_0 \dots 5f_0$), modulu a fáze trochu

perepracoval funkce z 3 ulohy `found_f0_by_dtft(index_ton)` na `found_f0_by_dtft_for_4(index_ton, f0_dtft_old)`.

```
>># the function found_f0_by_dtft() takes a VERY long time to process!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
>>def found_f0_by_dtft_for_4(index_ton, f0_dtft_old):
```

```
>>     if(index_ton<41):
```

```
>>         freq_interval = 92
```

```
>>         freq_points = 300
```

```
>>     elif(index_ton>80):
```

```
>>         freq_interval = 3
```

```
>>         freq_points = 1000
```

```
>>     else:
```

```
>>         freq_interval = 4
```

```
>>         freq_points = 600
```

```
>>     N = 24000
```

```
>>
```

```
>>     n = np.arange(0, Fs/2)
```

```
>>
```

```
>>     freq_from = f0_dtft_old-freq_interval
```

```
>>     freq_to = f0_dtft_old+freq_interval
```

```
>>     freq_distribution = np.linspace(freq_from, freq_to, freq_points)
```

```
>>
```

```
>>     A = np.zeros([freq_points, N],dtype=complex)
```

```
>>     for k in np.arange(0,freq_points):
```

```
>>         A[k,:] = np.exp(-1j * 2 * np.pi * freq_distribution[k] / Fs * n)
```

```
>>     dtft_out = np.matmul(A,xall[index_ton].T)
```

```
>>     f0 = freq_distribution[np.argmax(np.abs(dtft_out))]
```

```
>>
```

```
>>     if(index_ton<41):
```

```
>>         return f0/2, np.argmax(np.angle(dtft_out)), np.argmax(np.abs(dtft_out))
```

```
>>     return f0, np.argmax(np.angle(dtft_out)), np.argmax(np.abs(dtft_out))
```

Mám moc malý rozdíl. První, předávám argumentem f_0 a neberu ji z f_f . A spočítám

`module(np.abs(dtft_out))` a `fázi(np.angle(dtft_out))`.

Pro každým ton spočítám jeho koeficienty postupným násobením f_0 na 2, 3, 4, 5 a předáváním jich jak argument v funkce `found_f0_by_dtft_for_4(index_ton, f0_dtft_old)`. Uložím všechny hodnoty do `_f0_CISLOTONU_co` (koeficienty), `_f0_CISLOTONU_faze` (faze), `_f0_CISLOTONU_modul` (modul). UPOZORNENÍ: pro ton 34 z toho důvodu že on má malou frekvence vzhledem k jiné frekvenci vzorkování, je třeba zvážit ještě jednu dva, zodpovědné zvláštnosti práce s tony malých frekvencí. Pro příklad ton 64

```
>>_f0_63_co = np.zeros(5)
>>_f0_63_faze = np.zeros(5)
>>_f0_63_modul = np.zeros(5)
>>_f0_63_co[0], _f0_63_faze[0], _f0_63_modul[0] = found_f0_by_dtft_for_4(63, f_f[63-24])
>>_f0_63_co[1], _f0_63_faze[1], _f0_63_modul[1] = found_f0_by_dtft_for_4(63,
2*_f0_dtft[63-24])
>>_f0_63_co[2], _f0_63_faze[2], _f0_63_modul[2] = found_f0_by_dtft_for_4(63,
3*_f0_dtft[63-24])
>>_f0_63_co[3], _f0_63_faze[3], _f0_63_modul[3] = found_f0_by_dtft_for_4(63,
4*_f0_dtft[63-24])
>>_f0_63_co[4], _f0_63_faze[4], _f0_63_modul[4] = found_f0_by_dtft_for_4(63,
5*_f0_dtft[63-24])
```

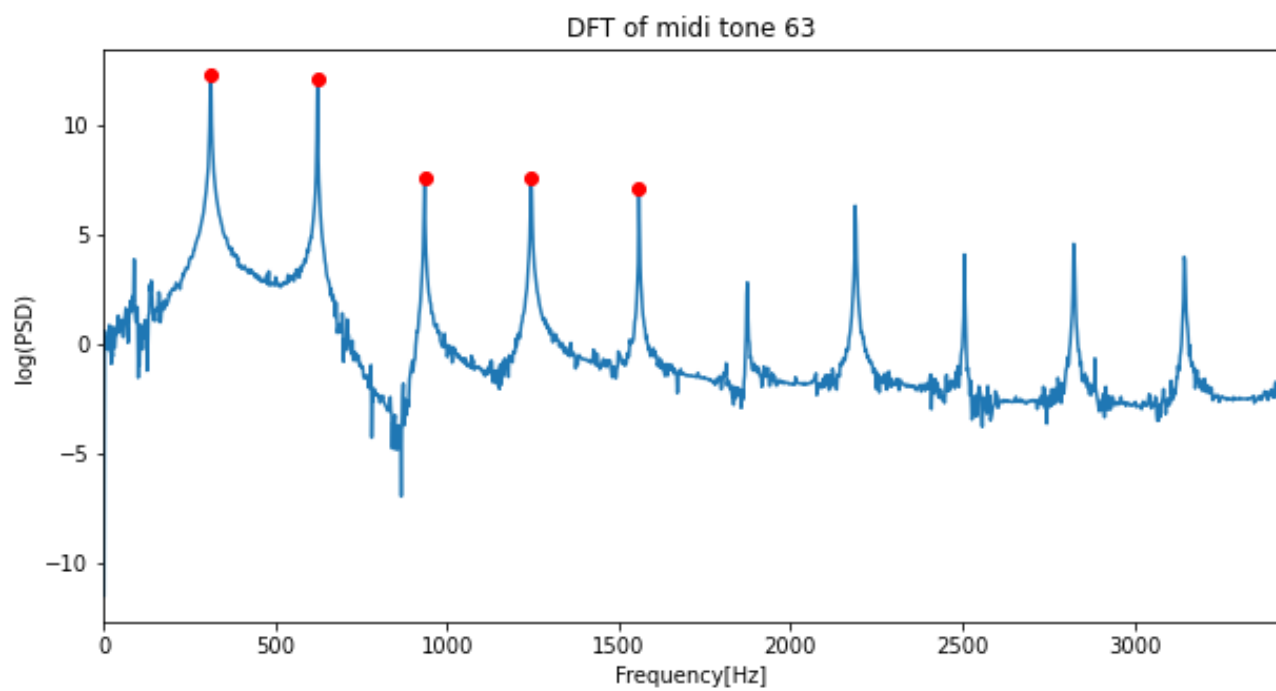
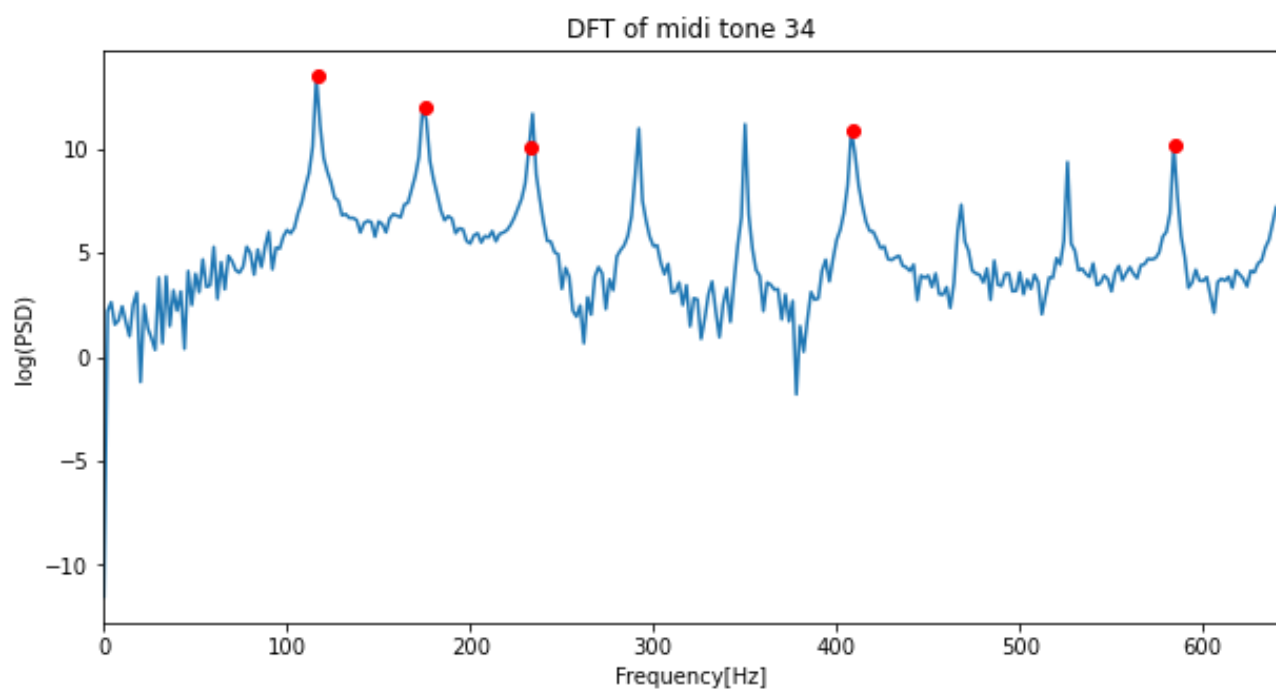
Hodnoty koeficientu:

```
f0...5f0 for tone 34
tone 34: 1*f0 = 58.30956619507168, faze = 257.0, modul = 244.0
tone 34: 2*f0 = 87.54220931322028, faze = 177.0, modul = 55.0
tone 34: 3*f0 = 204.3902370467535, faze = 104.0, modul = 242.0
tone 34: 4*f0 = 204.46903401105595, faze = 228.0, modul = 56.0
tone 34: 5*f0 = 292.3170617445892, faze = 139.0, modul = 152.0
```

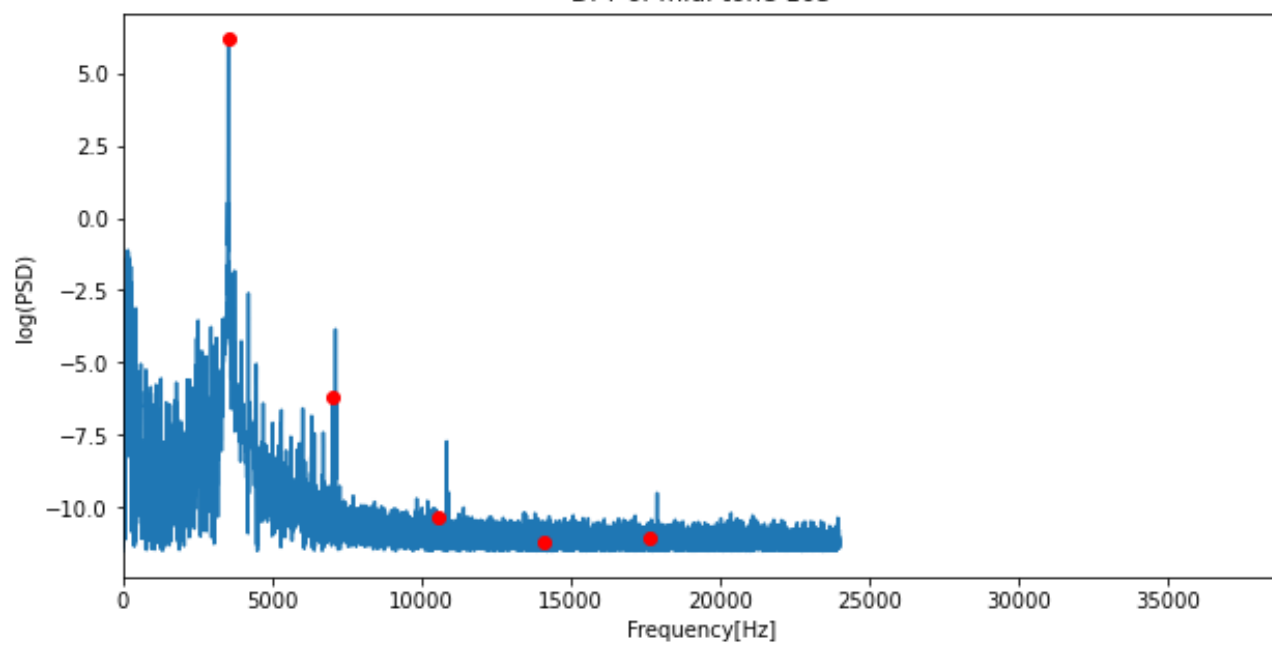
```
f0...5f0 for tone 64
tone 63: 1*f0 = 311.085141903172, faze = 241, modul = 231.0
tone 63: 2*f0 = 621.669449081803, faze = 0, modul = 262.0
tone 63: 3*f0 = 933.4223706176963, faze = 385, modul = 312.0
tone 63: 4*f0 = 1244.8547579298831, faze = 299, modul = 338.0
tone 63: 5*f0 = 1558.2771285475794, faze = 91, modul = 513.0
```

```
f0...5f0 for tone 105
tone 105: 1*f0 = 3521.6906906906906, faze = 356.0, modul = 448.0
tone 105: 2*f0 = 7044.54954954955, faze = 883.0, modul = 694.0
tone 105: 3*f0 = 10564.240240240239, faze = 179.0, modul = 361.0
tone 105: 4*f0 = 14084.60960960961, faze = 31.0, modul = 141.0
tone 105: 5*f0 = 17611.453453453454, faze = 840.0, modul = 999.0
```

Po vše vypočty ukažu své $f_0 \dots 5f_0$ na grafu spectra třech tonu(34, 63, 105). Pro každý koeficient nalezl odpovídající mu frekvence z F34/F63/F105 a přes něj spočítám odpovídající číslo na OY. Ale pro te nalezení musil zaokrehlit hodnoty koeficienty a jindy udělat +- 1, protože v F34/F63/F105 mám jenom celý sudí čísla a po zaokruhlení koeficienty mohou být lichí, ale je to velmi malá změna a nic nezkazí.



DFT of midi tone 105



5. Syntéza tónů

Pro syntezu nových tónů jsem použil metod přes cosinus. Jsem udělal array `time` ve kterém rozložil sekundu kterou musím zapsat na $F_s(48000)$. Pak pro každý ten vzorek času udělall součet cosinusu 5 krát, který vydal takhle:

$\text{modul} * \cos(2 * \pi * \text{time} * \text{frequency} - \text{faze})$, kde

`modul`, `frequency`, `faze` mám z minulou ulohy a čas bude aktuální čas mezi 0...48000

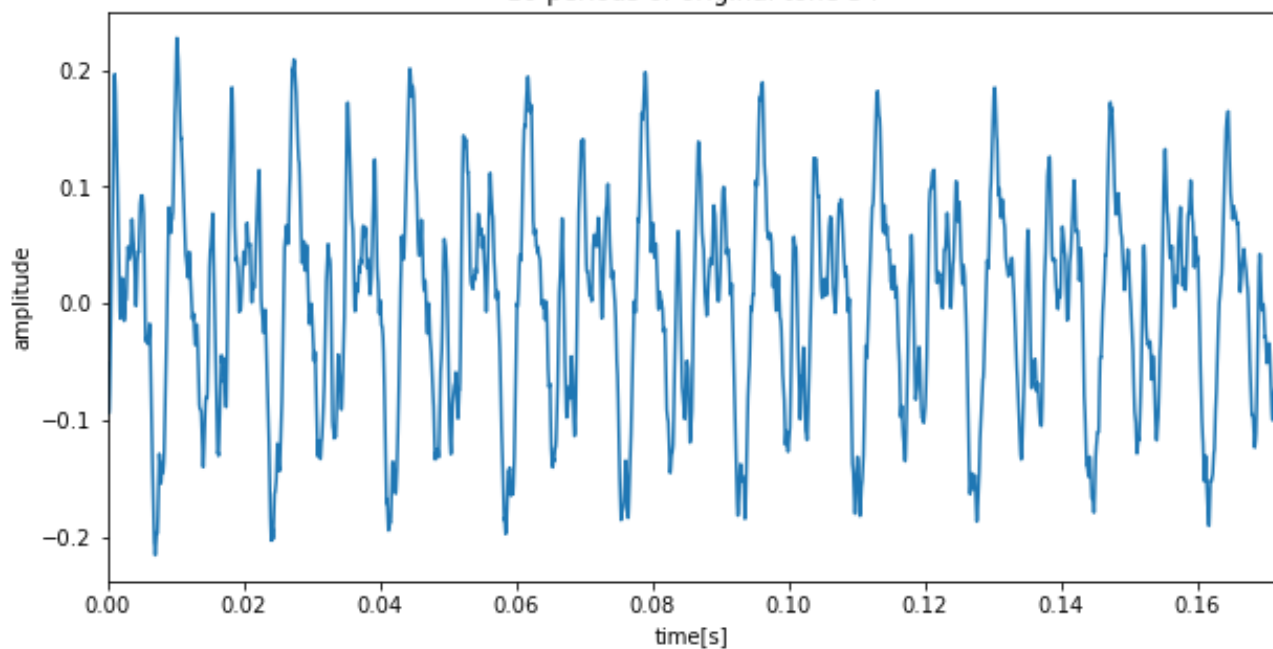
```
>>time = np.linspace(0, 1, Fs) #array for time 0-1s 48000 point in this interval
>>a_signal = np.zeros(48000) # array for signal
>>for t in range(0, time.size):
    a_signal[t] = _f0_34_modul[0]*np.cos(2*np.pi*time[t]*_f0_34_co[0] +
    _f0_34_faze[0])+_f0_34_modul[2]*np.cos(2*np.pi*time[t]*_f0_34_co[2] +
    _f0_34_faze[1])+_f0_34_modul[3]*np.cos(2*np.pi*time[t]*_f0_34_co[3] +
    _f0_34_faze[3])+_f0_34_modul[4]*np.cos(2*np.pi*time[t]*_f0_34_co[4] + _f0_34_faze[4])
```

Dál rozdělím ten nový signal na jeho dloužku abych zbavít se velkou amplitude.

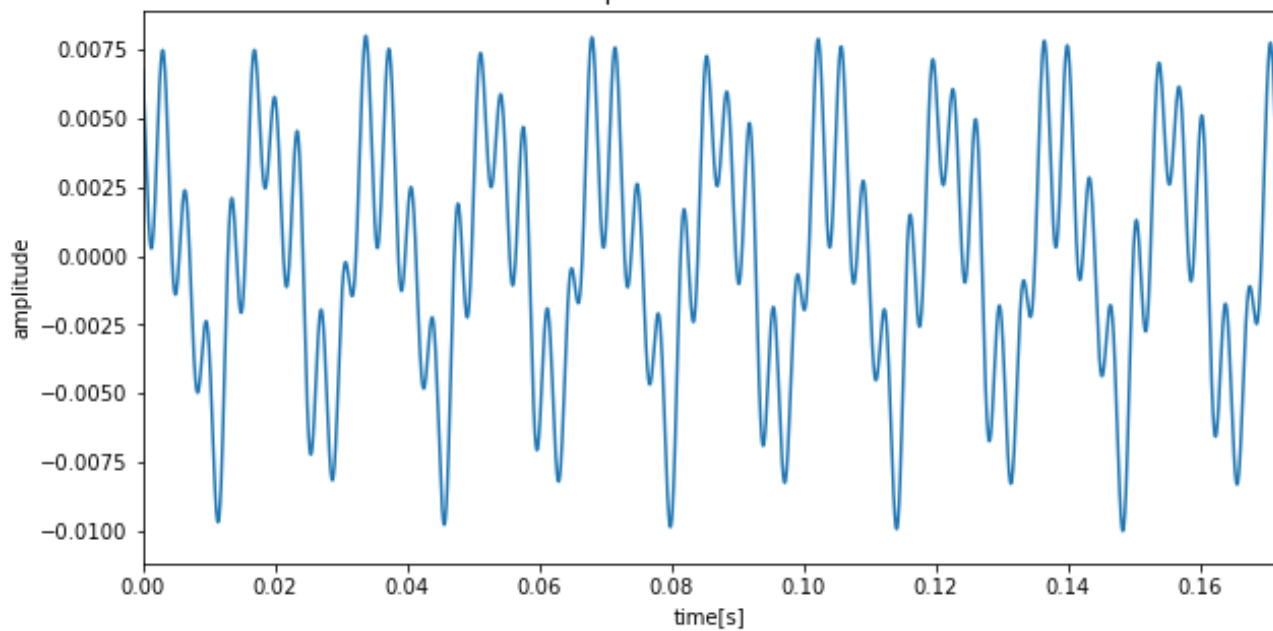
```
>>a_signal = a_signal/a_signal.size
```

Na konce prostě zapíšem ten nový signal do audio failu a vykreslim 10 periodu original a nového signalu.

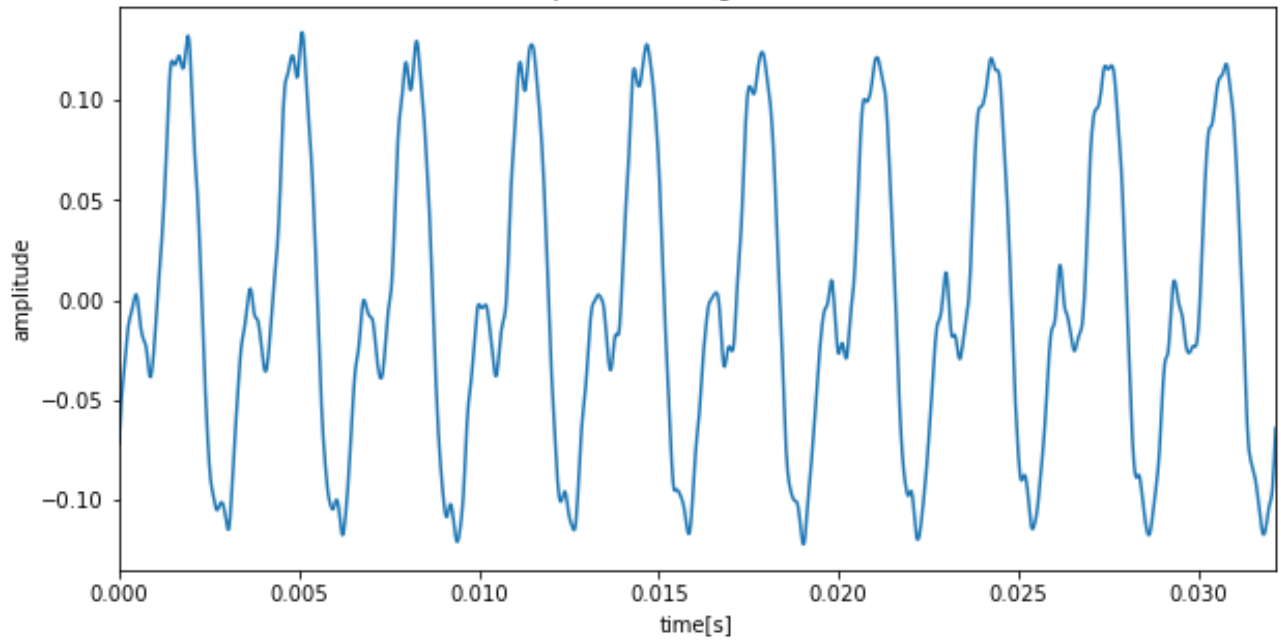
10 periods of original tone 34



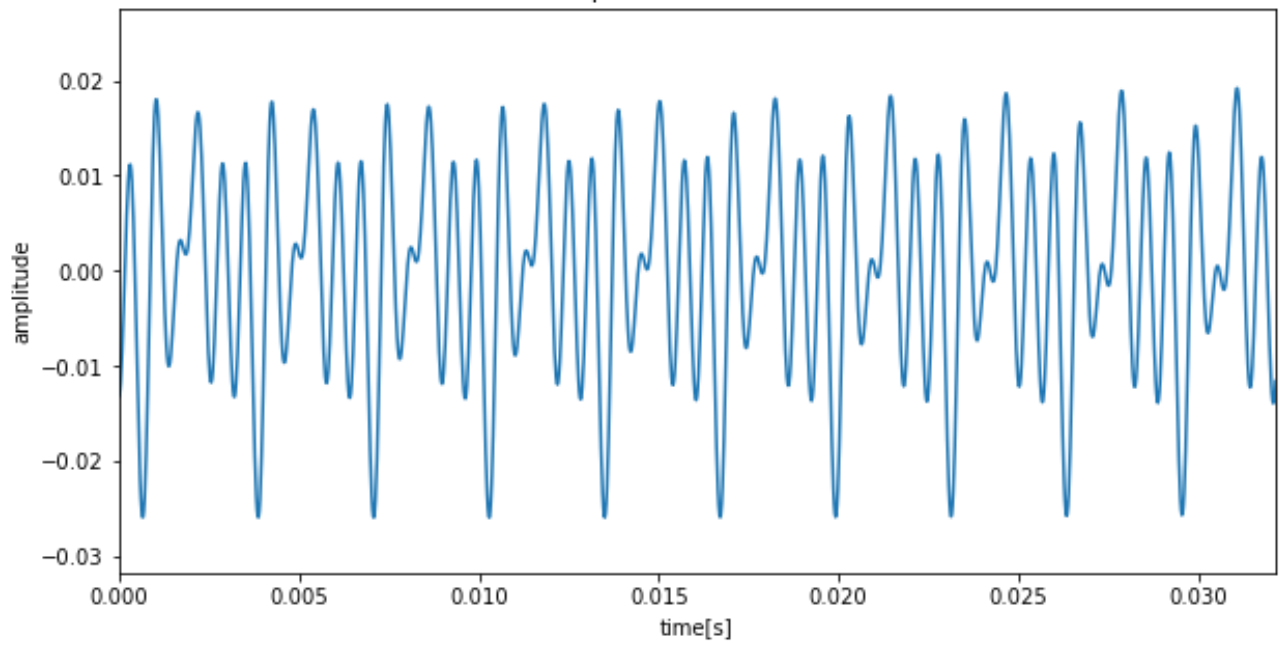
three periods of new tone 34



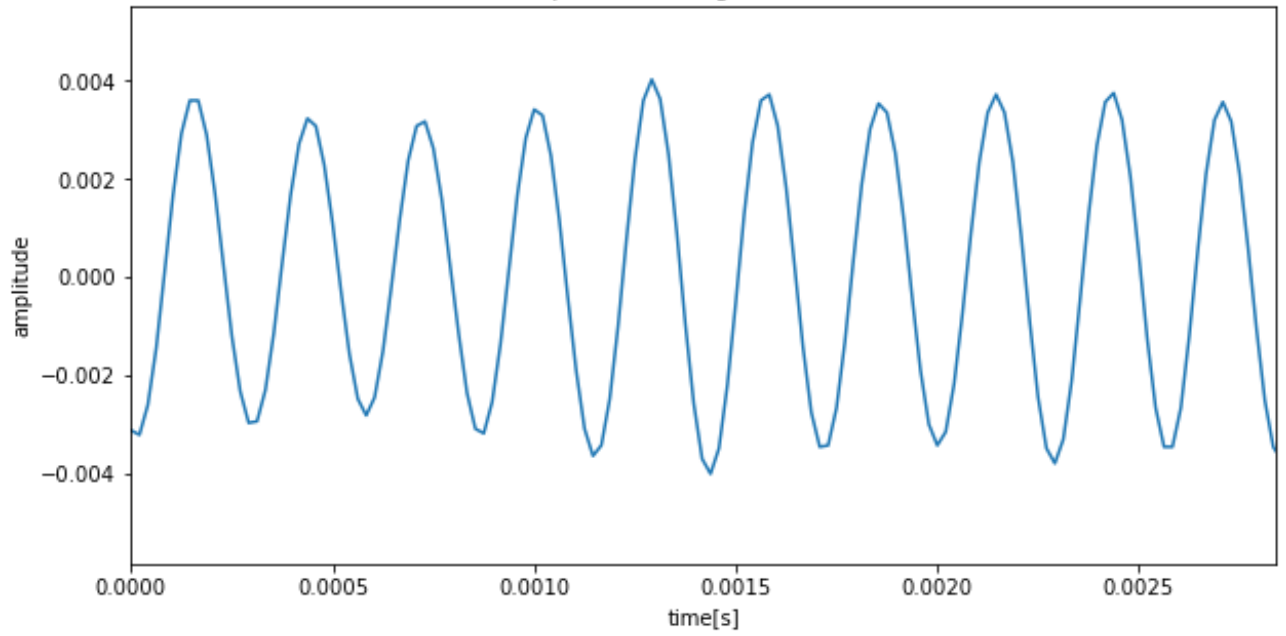
10 periods of original tone 63



three periods of new tone 63



10 periods of original tone 105



10 periods of new tone 105

