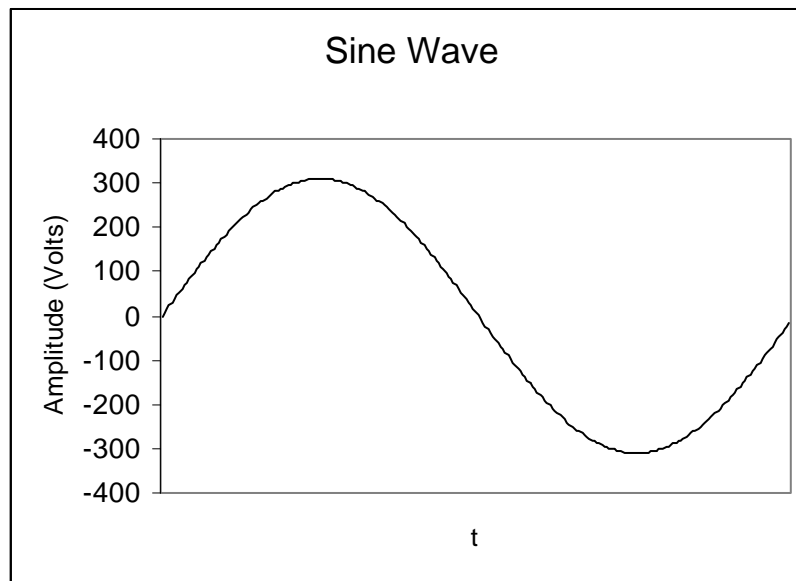


Lab 8 Total Harmonic Distortion Measurement

การทดลองนี้นักเรียนจะได้ศึกษาการใช้ Discrete Fourier Transform, DFT เพื่อใช้วิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นกับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และคำนวณค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (Total Harmonic Distortion, THD) ของรูปคลื่นต่างๆ

AC Voltage Supply

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการหมุนแม่เหล็กถาวรที่มีเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านขดลวด โดยพลังงานที่ใช้หมุนอาจได้จากเครื่องยนต์ดีเซลหรือพลังงานน้ำไหลจากเขื่อน แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมีรูปคลื่นเป็นคลื่นไซน์ ประเทศไทยเราใช้ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ 50Hz หนึ่งรอบคลื่นจะกินเวลา 20ms แรงดันไฟฟ้าที่ต้นกำเนิดจะได้รับการแปลงระดับไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีแรงดันที่สูงขึ้น เพื่อต่อเข้ากับสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าระยะไกล เมื่อมาถึงที่ผู้ใช้ไฟฟ้า ระดับแรงดันก็จะได้รับการแปลงให้ต่ำลง ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำจะป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 220V_{RMS} ให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อยังไม่ได้จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดหรือตัวดึงกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับก็จะไม่ถูกรบกวน รูปร่างของคลื่นก็จะคงเดิม เป็นคลื่นรูปไซน์ความถี่เดียว 50Hz

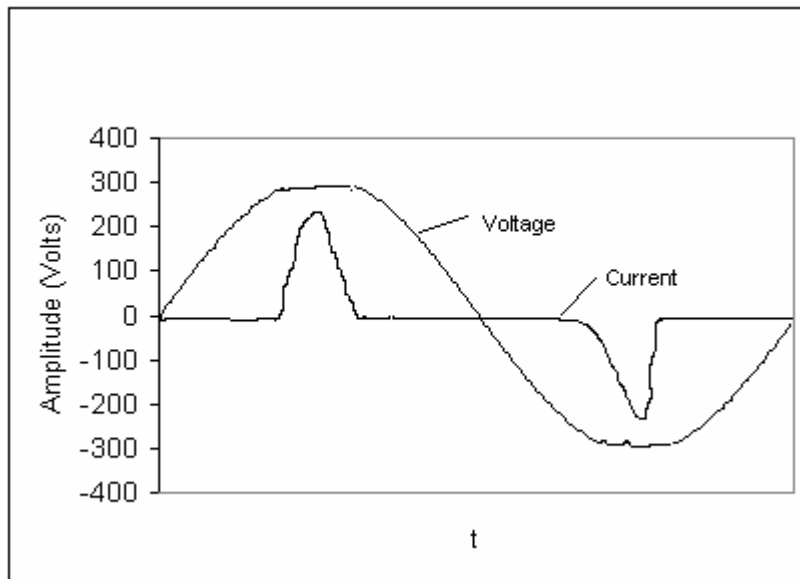


รูปที่ 8.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นคลื่นรูปไซน์ความถี่ 50Hz

Nonlinear Load

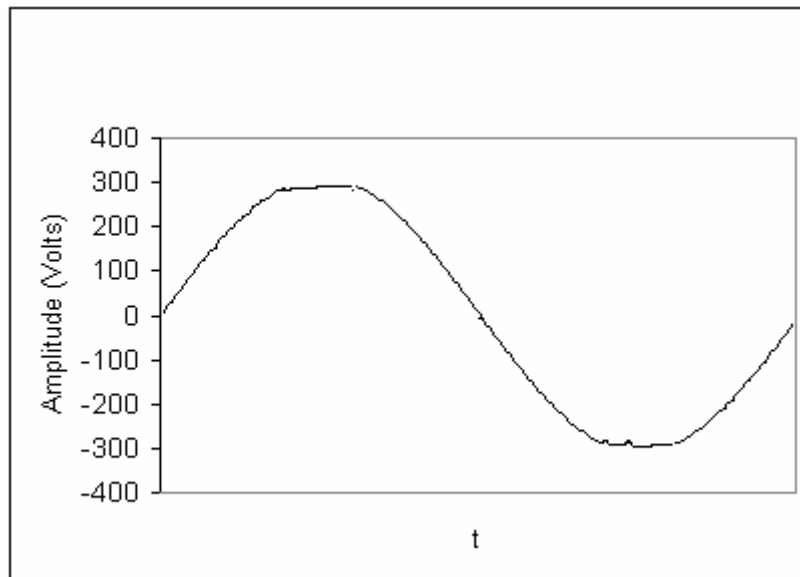
เมื่อต่อโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) เข้ากับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ตัวอย่างของโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้นได้แก่จอร์เรคตีไฟเออร์ที่ใช้ในแหล่งจ่ายไฟตรงแบบสวิตชิ่ง (switch mode power supply) เราจะพบได้ง่ายคือแหล่งจ่ายไฟของเครื่องพีซีแบบตั้งโต๊ะ วงจรเรียงกระแสดังกล่าวใช้ไดโอดประจุไฟให้กับตัวเก็บประจุ จากรูปที่ 8.2 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จะเกิดความเพี้ยนขึ้น เนื่องรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสไฟฟ้าจะถูกดึงเฉพาะช่วงพีกของแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีโหลดจำพวกนี้เป็นจำนวนมากต่อเข้า

กับสายจ่ายไฟฟ้าที่จำกัดอิมพีแดนซ์ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูญเสียไปบริเวณยอดของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ส่วนยอดจะกลายเป็นหัวตัดเรียบ เนื่องจากโหลดต่างๆที่ต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าจะต่อขนานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีความเพี้ยนดังกล่าวป้อนให้กับโหลดเหล่านั้นด้วย



รูปที่ 8.2 ยอดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูญเสียจากโหลดที่ดึงกระแสไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้น

ความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าทำให้โหลดต่างๆได้รับความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับต่างไปจากความถี่มาตรฐาน 50Hz เราจะวัดปริมาณความเพี้ยนดังกล่าวได้อย่างไร



รูปที่ 8.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่เพี้ยนไปจากรูปที่ 8.1

Fourier analysis

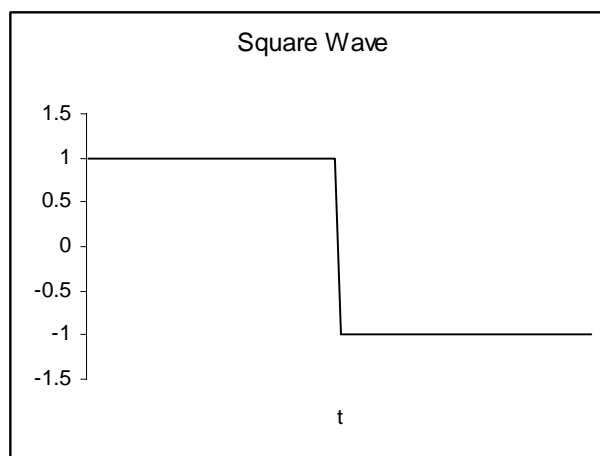
ในปี 2365 รัชชกว่าปีมาแล้ว J.B.J Fourier ได้เสนอวิธีการเพื่อช่วยแก้ปัญหาคณิตศาสตร์โดยอาศัยการแปลงฟังก์ชันจากโดเมนเวลา (Time Domain) มาเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เมื่อหาคำตอบในโดเมนความถี่ได้ก็สามารถแปลงกลับมาเป็นโดเมนเวลาได้

Fourier ได้เสนอว่าฟังก์ชันใดๆที่เป็นรายคาบในช่วงเวลาหนึ่งสามารถเขียนแทนด้วยผลรวมของคลื่นรูปไซน์ ความถี่มูลฐานและคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่สูงขึ้น โดยมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่าที่เป็นเลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน คลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่สูงขึ้นนี้เราเรียกสั้นๆว่า ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) การแปลงดังกล่าวเรียกว่า Fourier Transform

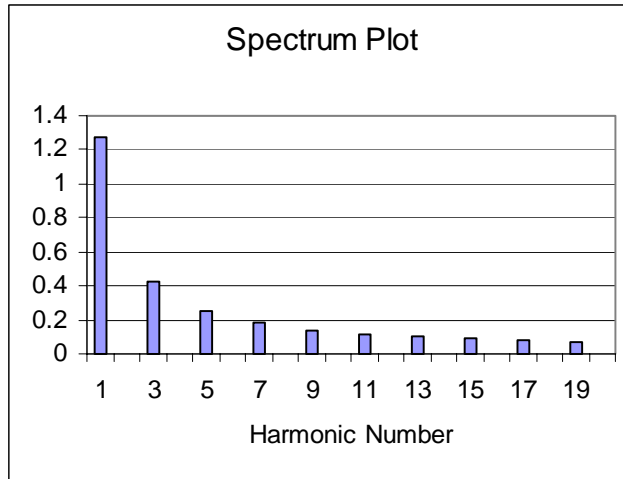
Discrete Fourier Transform

ในทางปฏิบัติเราอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ เราสามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเครื่องดิจิทัล ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่ปรากฏบนจอสโคปจะได้ออกการสุ่มข้อมูล เป็นจำนวนจุดในช่วงเวลาหนึ่ง การที่ข้อมูลของรูปคลื่นเป็นจุดๆโดยมีเวลาสุ่มที่เท่ากัน ทำให้เราสามารถทำการแปลงแบบไม่ต่อเนื่องได้โดยง่าย วิธีดังกล่าวเรียกว่า Discrete Fourier Transform หรือเรียกสั้นๆว่า DFT

เรามาดูตัวอย่างรูปคลื่นรายคาบสี่เหลี่ยมมีแอมพลิจูด $\pm 1V$



เมื่อใช้ DFT ทำการแปลง จะได้ขนาดของแอมพลิจูดแต่ละฮาร์โมนิก เนื่องจากรูปร่างคลื่นซิกนัลและลบเหมือนกันจะทำให้ฮาร์โมนิกลำดับคู่ไม่ปรากฏ



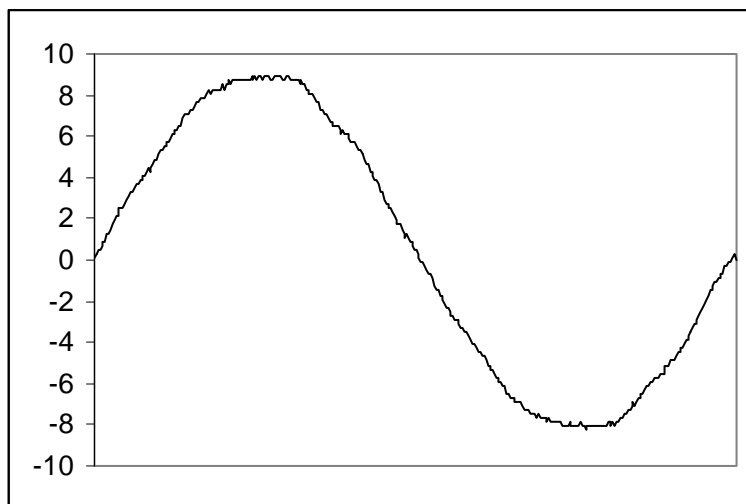
Total Harmonic Distortion, THD

ในการบ่งถึงปริมาณความเพี้ยนของรูปคลื่นที่ต่างไปจากความถี่มูลฐาน จึงกระทำโดยรวมขนาดของฮาร์โมนิก ตั้งแต่ลำดับที่สองขึ้นไป แล้วนำมาหารด้วยขนาดของความถี่มูลฐาน หน่วยวัดที่ใช้โดยทั่วไปจะบอกเป็น เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ ดังสมการ

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2} (V_n)^2}{(V_1)^2}} \times 100$$

ในทางปฏิบัติจะรวมขนาดของฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 25 ก็เพียงพอ สำหรับมาตรฐานส่วนใหญ่จะรวม ลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 50

ย้อนกลับมาดูตัวอย่างการวัดค่า THD ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เรามาดูรูปคลื่นของแรงดัน ไฟฟ้าที่วัดจาก หม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับเพื่อความปลอดภัย ขนาด +/-9V นักเรียนจะเห็นว่ารูปคลื่นจะเพี้ยน ไปจากคลื่นรูป ซายน์ความถี่บริสุทธิ์ 50Hz



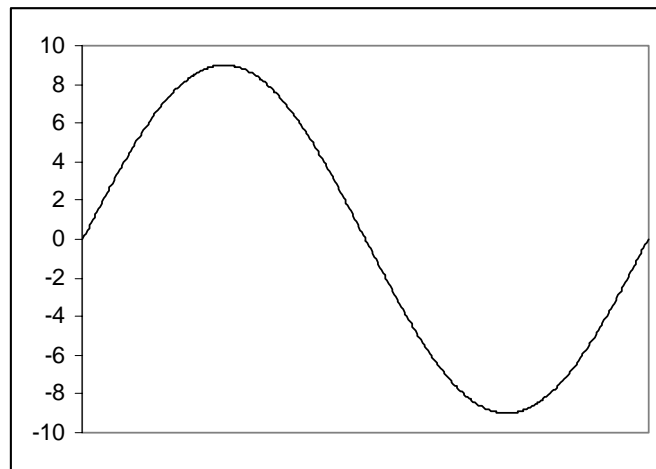
เมื่อเราใช้ DFT ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงค่าความถี่และขนาดของแต่ละความถี่ จะเห็นว่าความถี่มูลฐานคือ 50Hz จะมีขนาด 8.63V เราสามารถคำนวณค่า THD ได้โดยง่ายโดยใช้โปรแกรมกระดานคำนวณ ตัวอย่างที่คำนวณได้คือ THD= 2.56%

DFT in progress, please wait...

Frequency	Amplitude
0.00000000	0.7586077835
50.00000000	8.632140618
100.00000000	0.0380132679
150.00000000	0.0919255457
200.00000000	0.0160103954
250.00000000	0.0793711546
300.00000000	0.0146480310
350.00000000	0.0931878932
400.00000000	0.0134319412
450.00000000	0.0929860549
500.00000000	0.0069165682
550.00000000	0.1054964801
600.00000000	0.0051842853
650.00000000	0.0245343778
700.00000000	0.0131038091
750.00000000	0.0010611972
800.00000000	0.0050458750
850.00000000	0.0129662391
900.00000000	0.0086086091
950.00000000	0.0014097140
1000.00000000	0.0036837376
1050.00000000	0.0097976019
1100.00000000	0.0145007886
1150.00000000	0.0090619252
1200.00000000	0.0053845250
1250.00000000	0.0175768774
1300.00000000	0.0089334314
1350.00000000	0.0092237010
1400.00000000	0.0067927804
1450.00000000	0.0079944149
1500.00000000	0.0097615178
1550.00000000	0.0088722287
1600.00000000	0.0036122786
1650.00000000	0.0033403945
1700.00000000	0.0140652008
1750.00000000	0.0103323300
1800.00000000	0.0073783334
1850.00000000	0.0029082180
1900.00000000	0.0024216615
1950.00000000	0.0049072983
2000.00000000	0.0100676607

2050.000000	0.0040954934
2100.000000	0.0100226213
2150.000000	0.0045732203
2200.000000	0.0047438817
2250.000000	0.0095029917
2300.000000	0.0048904829
2350.000000	0.0110470799
2400.000000	0.0083959491
2450.000000	0.0088705948
2500.000000	0.0136098118

เราสามารถสร้างคลื่นรูปไซน์ได้โดยง่ายด้วยโปรแกรมกระดานคำนวณ ตัวอย่างที่เห็นข้างล่างนี้เป็นคลื่นรูปไซน์



ความถี่บริสุทธิ์ 50Hz คาบเวลาหนึ่งรอบเท่ากับ 20ms เราใช้โปรแกรม DFT กำหนดขนาดของแต่ละฮาร์โมนิกส์ได้ดังนี้

DFT in progress, please wait...

Frequency	Amplitude
0.000000000	0.0000004913
50.00000000	9.000002168
100.0000000	0.0000009627
150.0000000	0.0000007425
200.0000000	0.0000002437
250.0000000	0.0000000519
300.0000000	0.0000001841
350.0000000	0.0000001046
400.0000000	0.0000003243
450.0000000	0.0000002267
500.0000000	0.0000001609
550.0000000	0.0000002139
600.0000000	0.0000005773
650.0000000	0.0000003221
700.0000000	0.0000001989
750.0000000	0.0000002101

800.000000	0.0000005874		
850.000000	0.0000003930	1700.000000	0.0000004248
900.000000	0.0000007799	1750.000000	0.0000007336
950.000000	0.0000004356	1800.000000	0.0000004470
1000.000000	0.0000002035	1850.000000	0.0000000292
1050.000000	0.0000002195	1900.000000	0.0000019600
1100.000000	0.0000002450	1950.000000	0.0000004581
1150.000000	0.0000006692	2000.000000	0.0000002765
1200.000000	0.0000001705	2050.000000	0.0000005360
1250.000000	0.0000002694	2100.000000	0.0000016986
1300.000000	0.0000007085	2150.000000	0.0000005452
1350.000000	0.0000011868	2200.000000	0.0000007959
1400.000000	0.0000018819	2250.000000	0.0000008545
1450.000000	0.0000005629	2300.000000	0.0000007371
1500.000000	0.0000010234	2350.000000	0.0000009823
1550.000000	0.0000011945	2400.000000	0.0000052906
1600.000000	0.0000003415	2450.000000	0.0000024328
1650.000000	0.0000003281	2500.000000	0.0000011133

ผลจากการคำนวณแสดงขนาดของความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 9.00000216V สังเกตขนาดของฮาร์มอนิกลำดับถัดไปจะมีขนาดต่ำมากเมื่อเทียบกับขนาดของความถี่มูลฐาน เราคำนวณค่า THD= 0.00139% เปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่วัดจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่ผ่านมา จะเห็นว่าค่า THD สามารถใช้เป็นตัวเลขบ่งถึงความเพี้ยนของรูปคลื่นได้โดยง่าย เรามาดูตัวอย่างค่า THD ที่ใช้กำหนดให้เป็นมาตรฐานของระบบจ่ายไฟฟ้าตามข้อแนะนำ IEEE STD 519-1992

Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69kV and below	3.0	5.0 ^[1]
69.001kV through 161kV	1.5	2.5
161.001kV and above	1.0	1.5

[1] ที่สำหรับโรงพยาบาลและสนามบินค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าจะจำกัดที่ 3%

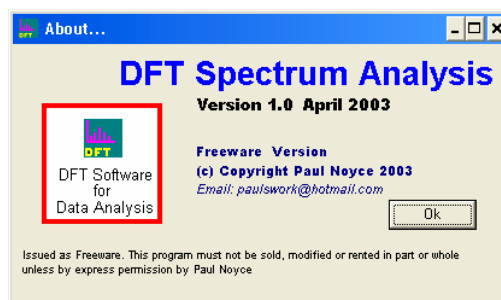
จะสังเกตว่าที่ระดับแรงดันสูงขึ้น ค่าที่จำกัดก็จะต่ำลง ในช่องแรกจะแสดงค่าจำกัดของแต่ละฮาร์มอนิก ส่วนช่องที่สองเป็นค่าผลรวมตั้งแต่ฮาร์มอนิกลำดับที่สองขึ้นไปเทียบกับขนาดของความถี่มูลฐาน

PCC (Point of Common Coupling) เป็นจุดร่วมเชื่อมต่อโหลดหลายๆตัวที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

Lab 8 Total Harmonic Distortion Measurement

Equipment

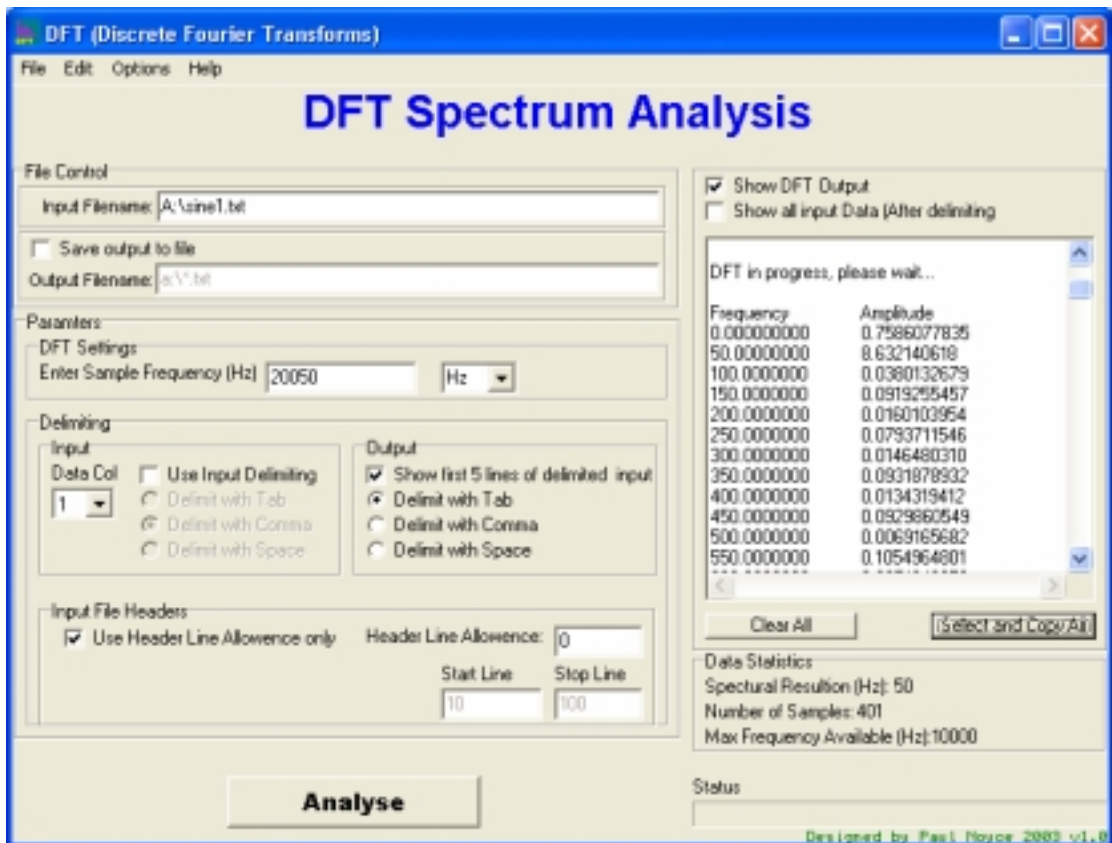
1. Digital Storage Oscilloscope
2. Floppy Disk
3. AC Transformer
4. Microcomputer PC
5. DFT Spectrum Analysis Version 1.0, free software by Paul Noyce, URL: <http://www.time4god.com>



6. Microsoft Excel 2002

Lab 8-1 Compute THD of square wave signal

1. Generate square wave data with amplitude $\pm 1V$. The number of data for one period is 128 points. The method is done by entering value +1 from cell 0 to 63 and value -1 from cell 64 to 127.
2. Copy the 128 points data and paste to new file in Notepad, save it to new file name as square.txt.
3. Open DFT program, load the file, square.txt as the input file.



- Our waveform data has 128 points. We will let period of this waveform to be 20ms or frequency of 50Hz. This makes us to enter the correct sampling frequency. The sampling frequency can be computed by

$$\text{Sampling Frequency (Hz)} = \frac{N}{T}$$

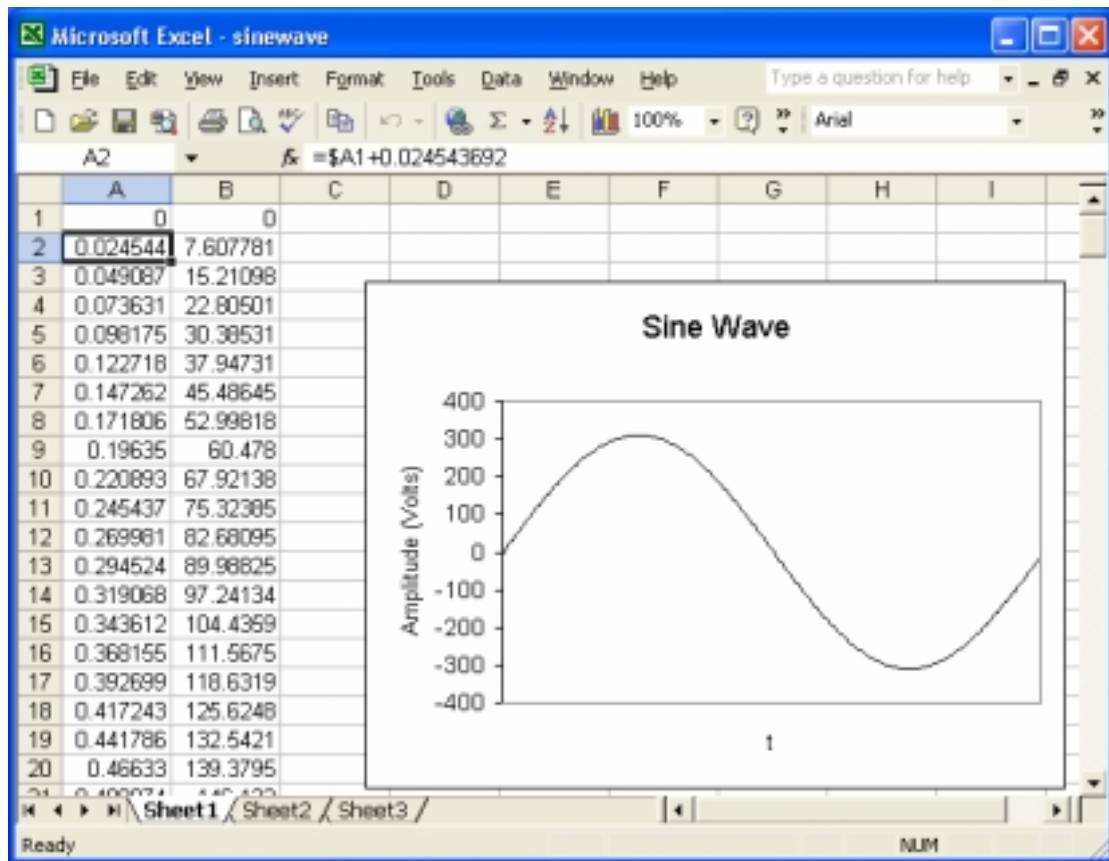
Where N is number of sample, T is period.

- Click Analyse Button, the DFT output will show in right window.
- Click Select and Copy All, it will copy the output to clipboard.
- Paste it to a given cell in Excel. Sample below shows column A for Frequency and column B for Amplitude.
- Plot the spectrum for 20 harmonics from fundamental frequency 50Hz to 1000Hz.
- To compute THD, we will need to provide power of two of the amplitude for each frequency. This is done by entering formula, e.g. cell \$C1099 will be = \$B1099^2. We can copy the cell having such formula to below cells, thus producing power of two for each frequency easily.
- Then provide sum of 2nd harmonic to 50th harmonic in cell \$D1100, as =SUM(\$C1100:\$C1148).
- Now we can compute THD in cell \$E1099 by equation =SQRT(\$D1100/\$C1099)*100.

	A	B	C	D	E	F
1095	DFT in progress, please wait...					
1096						
1097	Frequency	Amplitude				
1098	0	4.91E-07				
1099	50	9.000002	81.00004		0.000139	
1100	100	9.63E-07	9.27E-13	1.56E-10		
1101	150	7.43E-07	5.51E-13			
1102	200	2.44E-07	5.94E-14			
1103	250	5.19E-08	2.69E-15			
1104	300	1.84E-07	3.39E-14			
1105	350	1.05E-07	1.09E-14			
1106	400	3.24E-07	1.05E-13			
1107	450	2.27E-07	5.14E-14			
1108	500	1.61E-07	2.59E-14			
1109	550	2.14E-07	4.58E-14			
1110	600	5.77E-07	3.33E-13			
1111	650	3.22E-07	1.04E-13			
1112	700	1.99E-07	3.96E-14			
1113	750	2.1E-07	4.41E-14			
1114	800	5.87E-07	3.45E-13			
1115	850	3.93E-07	1.54E-13			
1116	900	7.8E-07	6.08E-13			

Lab 8-2 Compute THD of sine wave signal

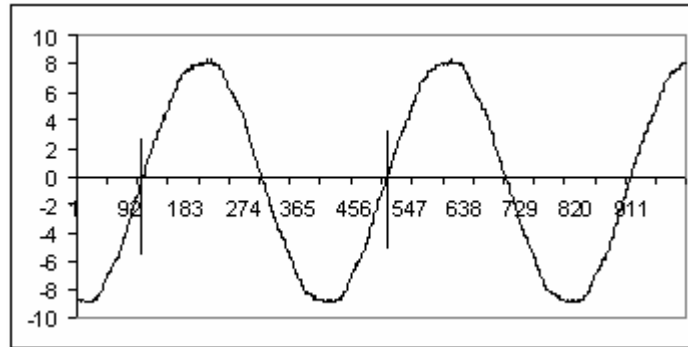
1. Generate sine wave data with peak amplitude +/-310V. The number of data for one period is 256 points.
2. Excel has function $\sin(\text{number})$ with number shown in Radian Unit.
3. Generate 256 numbers from 0 to 2π with step value equal to $2\pi/256$. The example below uses cell \$A1 to \$A256. Step value is 0.024543692.
4. Provide column B for computing $\sin(\text{number})$ with formula $=310*\text{SIN}(\$A1)$



5. Plot graph sine wave using data from column B.
6. Copy the sine wave data from column to clipboard and paste it in new text file, sinewave.txt.
7. Plot spectrum from fundamental frequency to 25th harmonic.
8. Compute THD, the method is the same as Lab 8-1 from step 3 to 11.

Lab 8-3 Compute THD of AC voltage

1. Insert floppy disk to the digital storage oscilloscope.
2. Connect probe of channel 1 to the secondary turn of the step down transformer.
3. Capture the AC voltage to channel 1. You can press AUTOSET, the signal will be triggered correctly.
4. Select format CSV for data saving. Save file to floppy disk. Transfer floppy disk to PC.
5. Load such data file to Excel and plot graph using line mode.



6. Select range of data waveform for one period. Copy the data for one period and paste it to new text file. We will get text file for DFT program.
7. Compute THD, the method is the same as Lab 8-1 from step 3 to 11.

Report

1. Summary: the method of measuring THD.
2. Six graphs; two for each Lab, time domain and spectrum plot.
3. DFT output and THD for each waveform.

Further Reading:

1. Jos Arrillaga and Neville R. Watson, **Power System Harmonic**, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2003.
2. E Oran Brigham, **The Fast Fourier Transform and Its Applications**, Prentice Hall 1988.