

## PHẦN 5: PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI

Applying the Taguchi Method on an EDM Machine

*Chirag Kishor Kolambe, Sambhaji.V.Sagare*

*Chirag Kishor Kolambe, Mechanical Department & Matoshri College of Engineering; Research Center, Nashik, India*

*<sup>2</sup>Sambhaji.V.Sagare Mechanical Department & Sarvepalli Radhakrishnan University Bhopal India*

### 5.1 Tóm tắt nội dung bài báo khoa học

Ứng dụng phương pháp Taguchi vào việc thực hiện gia công thép nhẹ (Mild Steel – loại thép có hàm lượng cacbon thấp) trên máy cắt dây EDM (Electrical Discharge Machine – phương pháp gia công bằng tia lửa điện được phát triển vào năm 1943 bởi Liên Xô), từ đó, có thể điều chỉnh các thông số trong quá trình gia công đến mức tối ưu để sản phẩm ổn định ở mức chất lượng tốt nhất

Ta tiến hành khảo sát các thông số như dòng điện cực đại (peak current), thời gian đánh lửa (spark on time), thời gian duy trì (spark off time), áp suất dòng chảy (flushing pressure), những yếu tố trên có ảnh hưởng trực tiếp đến lượng gia công thép tấm (MRR – Metal Removal Rate) và tỷ lệ hao mòn dụng cụ cắt (TWR – Tool Wear Rate)

Ngày nay, công nghệ này càng phát triển, việc ứng dụng hệ thống máy móc tự động trong ngành công nghiệp chế tạo ngày càng phổ biến, giúp nâng cao năng suất công việc cũng như chất lượng sản phẩm. Song đi kèm theo đó, máy móc thường phát sinh lỗi ngoài mong muốn mà chúng ta phải tìm giải pháp. Trong bài báo này, ta tiến hành cứu khả năng gia công thép (MRR) và tỷ lệ hao mòn dao cắt (TWR) trên máy cắt dây EDM nhằm làm giảm chi phí chế tạo và nâng cao chất lượng sản phẩm

### 5.2 Các nhân tố đầu vào, đầu ra, miền giá trị

No	Ip (A)	Ton (us)	Toff (us)	Fp (kg/cm <sup>2</sup> )
1	10	5	3	0.2
2	10	10	5	0.3
3	10	15	7	0.5
4	12	5	5	0.5
5	12	10	7	0.2
6	12	15	3	0.3
7	14	5	7	0.3
8	14	10	3	0.5
9	14	15	5	0.2

Giá trị các nhân tố trong thực nghiệm

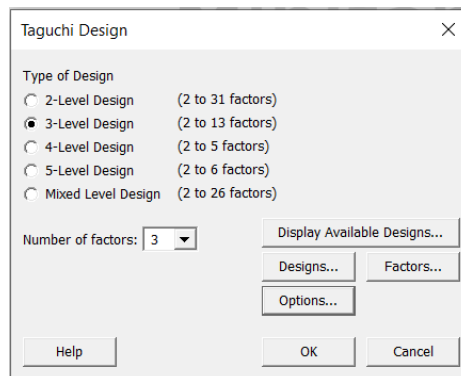
Thông số	Ký hiệu nhân tố		Mức độ nhân tố			Khoảng thay đổi
	Tự nhiên	Mã hóa	Thấp	Trung bình	Cao	
Peak current	Ip	x <sub>1</sub>	10	12	14	4
Spark on time	Ton	x <sub>2</sub>	5	10	15	10
Spark off time	Toff	x <sub>3</sub>	3	5	7	4

### 5.3 Dạng ma trận quy hoạch thực nghiệm, số thí nghiệm lặp và kết quả thực nghiệm

Ip (A)	Ton (us)	Toff (us)	Fp (kg/cm <sup>2</sup> )	Machine time (Min)	MRR (gm/min)	TWR (gm/min)	SNRA1	STDE1	MEAN1
10	5	3	0.2	27	0.000037	0.01458	- 22.6069	13.4645	6.80365
10	10	5	0.3	20	0.00005	0.0176	-20.001	9.948	5.07941
10	15	7	0.5	22	0.0000454	0.01589	- 20.8301	10.9165	5.62898
12	5	5	0.5	32	0.0000312	0.01745	- 24.0835	15.9154	8.12937
12	10	7	0.2	26	0.0000384	0.01925	- 22.2791	12.9638	6.55482
12	15	3	0.3	9	0.000111	0.03958	- 13.0692	4.4454	2.33492
14	5	7	0.3	35	0.0000285	0.01576	- 24.8611	17.4479	8.82895
14	10	3	0.5	12	0.0000833	0.04625	- 15.5706	5.9132	3.13658
14	15	5	0.2	11	0.0000909	0.04163	- 14.8088	5.4604	2.81043

## 5.4 Xử lý kết quả thực nghiệm trên Minitab

Trên thẻ Stat -> DOE -> Taguchi -> Create Taguchi Design (để tạo ma trận quy hoạch trực giao)



Taguchi Design

Type of Design

- ☐ 2-Level Design (2 to 31 factors)
- ☒ 3-Level Design (2 to 13 factors)
- ☐ 4-Level Design (2 to 5 factors)
- ☐ 5-Level Design (2 to 6 factors)
- ☐ Mixed Level Design (2 to 26 factors)

Number of factors: 3

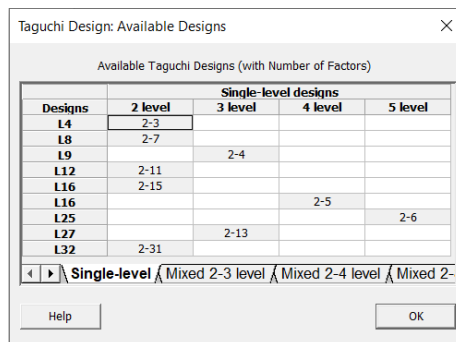
Display Available Designs...

Designs... Factors...

Options...

Help OK Cancel

Chọn thẻ 'Display Available Design'



Taguchi Design: Available Designs

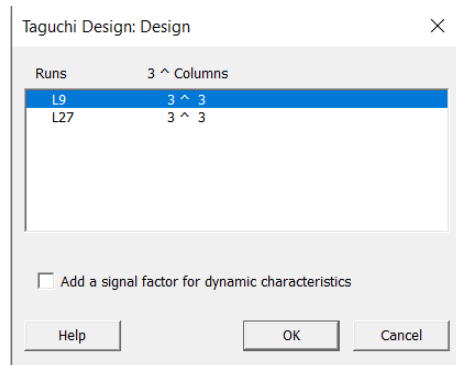
Available Taguchi Designs (with Number of Factors)

Designs	Single-level designs			
	2 level	3 level	4 level	5 level
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			
L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

Single-level Mixed 2-3 level Mixed 2-4 level Mixed 2-

Help OK

Chọn thẻ 'Design'



Taguchi Design: Design

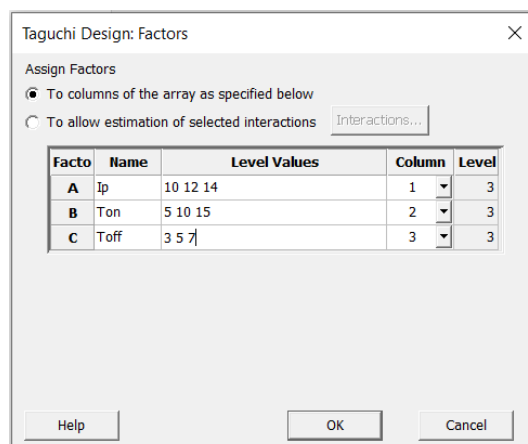
Runs 3 ^ 3 Columns

L9	3 ^ 3
L27	3 ^ 3

☐ Add a signal factor for dynamic characteristics

Help OK Cancel

Chọn thẻ 'Factors'



Taguchi Design: Factors

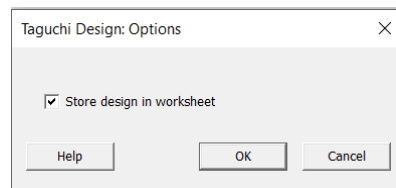
Assign Factors

- ☒ To columns of the array as specified below
- ☐ To allow estimation of selected interactions Interactions...

Facto	Name	Level Values	Column	Level
A	Ip	10 12 14	1	3
B	Ton	5 10 15	2	3
C	Toff	3 5 7	3	3

Help OK Cancel

Chọn thẻ 'Option'



Kết quả thu được

**Taguchi Design**

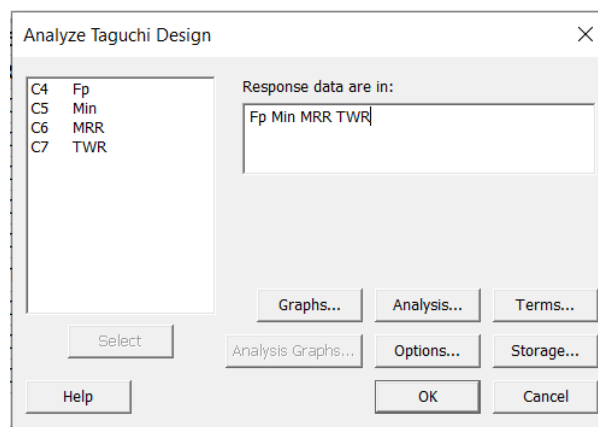
**Design Summary**

Taguchi Array L9(3<sup>4</sup>)  
 Factors: 3  
 Runs: 9

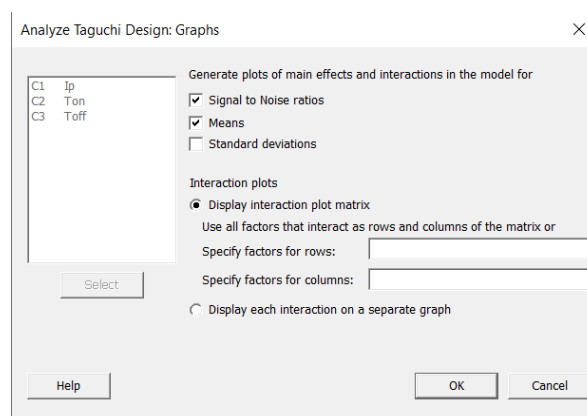
Columns of L9(3<sup>4</sup>) array: 1 2 3

#	C1 Ip	C2 Ton	C3 Toff	C4 Fp	C5 Min	C6 MRR	C7 TWR
1	10	5	3	0.2	27	0.0000370	0.01458
2	10	10	5	0.3	20	0.0000500	0.01760
3	10	15	7	0.5	22	0.0000454	0.01589
4	12	5	5	0.5	32	0.0000312	0.01745
5	12	10	7	0.2	26	0.0000384	0.01925
6	12	15	3	0.3	9	0.0001110	0.03958
7	14	5	7	0.3	35	0.0000285	0.01576
8	14	10	3	0.5	12	0.0000833	0.04625
9	14	15	5	0.2	11	0.0000909	0.04163

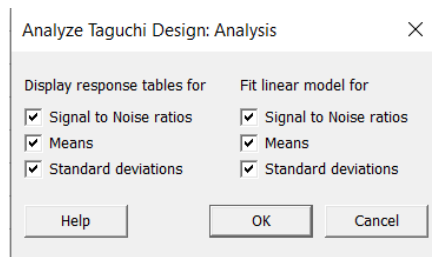
Trên Stat -> DOE -> Taguchi -> Analyze Taguchi Design (để phân tích kết quả thực nghiệm)



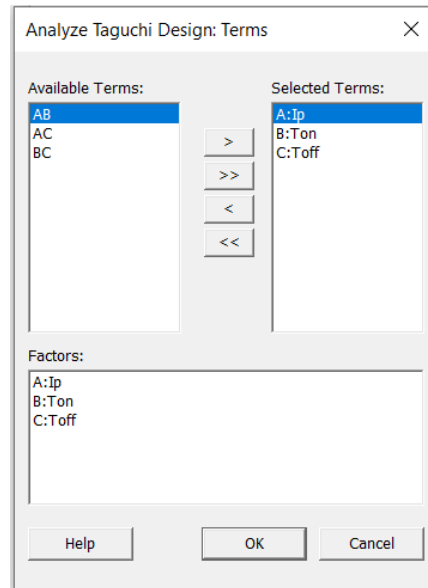
Trên thẻ 'Graphs' chọn



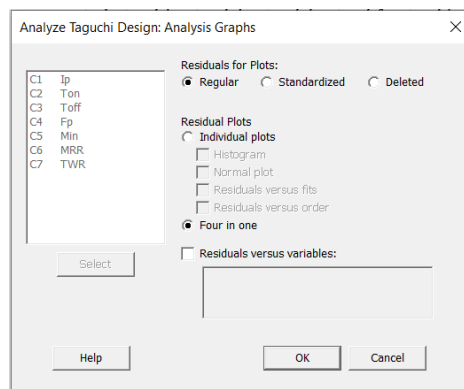
Trên thẻ 'Analysis' chọn



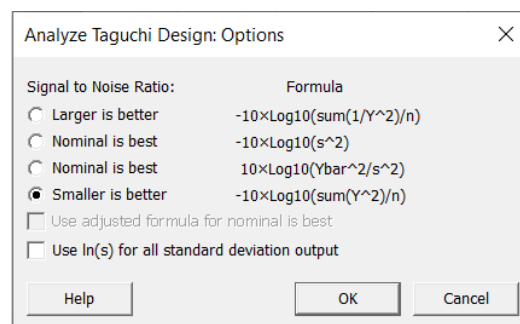
Trên thẻ 'Terms', chọn



Trên thẻ 'Analysis Graphs'



Trên thẻ 'Options', chọn



Trên thẻ 'Storage', chọn

Analyze Taguchi Design: Storage

Store the following items:

- ☒ Signal to Noise ratios
- ☒ Means
- ☒ Standard deviations
- ☒ Coefficients of variation
- ☐ Ln of standard deviations

Fits and residuals      Model information      Other diagnostics

- ☒ Fits
- ☒ Residuals
- ☒ Standardized residuals
- ☐ Deleted residuals
- ☐ Coefficients
- ☐ Design matrix
- ☐ Hi (leverage)
- ☐ Cook's distance
- ☐ DFITS

Help      OK      Cancel

Kết quả thu được

*	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	SNRA1	STDE1	MEAN1	CV1	FITS_MEANS1	FITS_STDEV1	FITS_SN1	RESI_MEANS1	RESI_STDEV1	RESI_SN1	SRES_MEANS1	SRES_STDEV1	SRES_SN1
1	-22.6069	13.4645	6.80365	1.97902	6.89259	13.5544	-22.4987	-0.088934	-0.089897	-0.108243	-0.81806	-0.64928	-0.30427
2	-20.0010	9.9480	5.07941	1.95850	5.14355	10.0537	-20.4806	-0.064142	-0.105696	0.479615	-0.59001	-0.76340	1.34820
3	-20.8301	10.9165	5.62898	1.93933	5.47591	10.7209	-20.4587	0.153076	0.195593	-0.371373	1.40807	1.41268	-1.04393
4	-24.0835	15.9154	8.12937	1.95777	7.97629	15.7198	-23.7121	0.153076	0.195593	-0.371373	1.40807	1.41268	-1.04393
5	-22.2791	12.9638	6.55482	1.97774	6.64376	13.0537	-22.1709	-0.088934	-0.089897	-0.108243	-0.81806	-0.64928	-0.30427
6	-13.0692	4.4454	2.33492	1.90386	2.39906	4.5511	-13.5488	-0.064142	-0.105696	0.479615	-0.59001	-0.76340	1.34820
7	-24.8611	17.4479	8.82895	1.97622	8.89309	17.5536	-25.3407	-0.064142	-0.105696	0.479615	-0.59001	-0.76340	1.34820
8	-15.5706	5.9132	3.13658	1.88525	2.98351	5.7177	-15.1993	0.153076	0.195593	-0.371373	1.40807	1.41268	-1.04393
9	-14.8088	5.4604	2.81043	1.94290	2.89936	5.5503	-14.7005	-0.088934	-0.089897	-0.108243	-0.81806	-0.64928	-0.30427

## Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

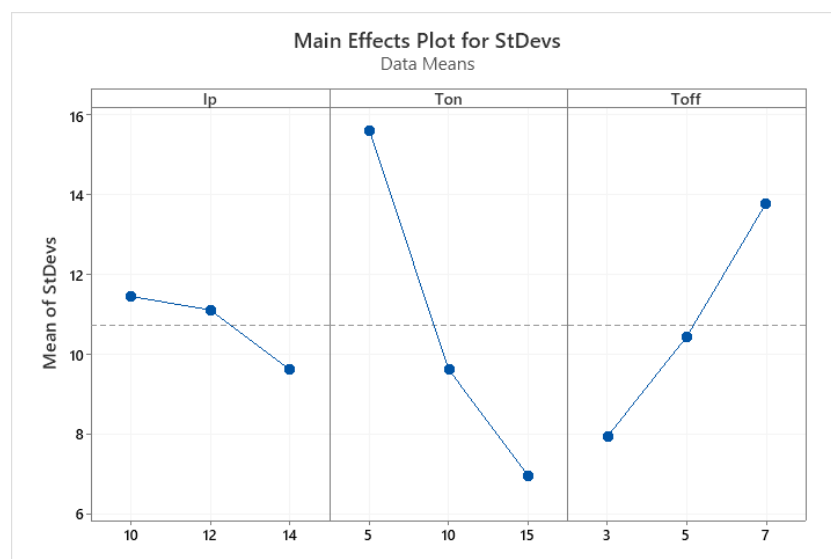
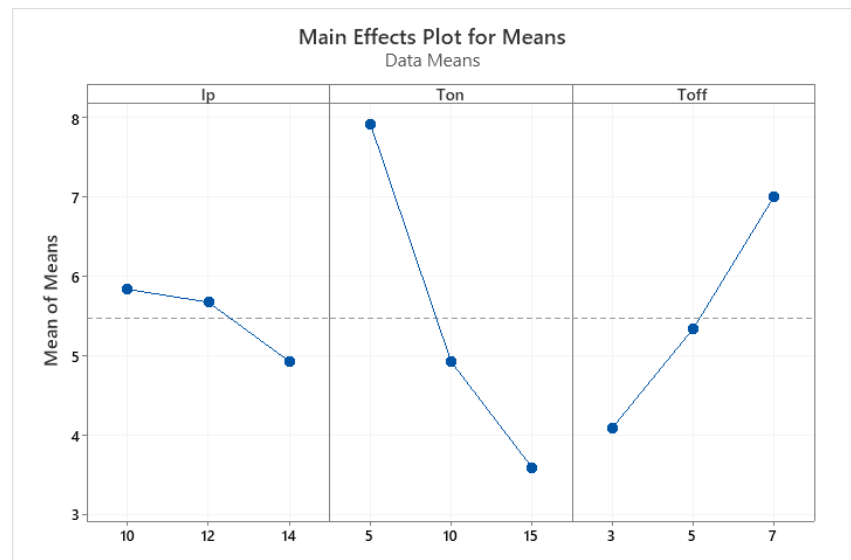
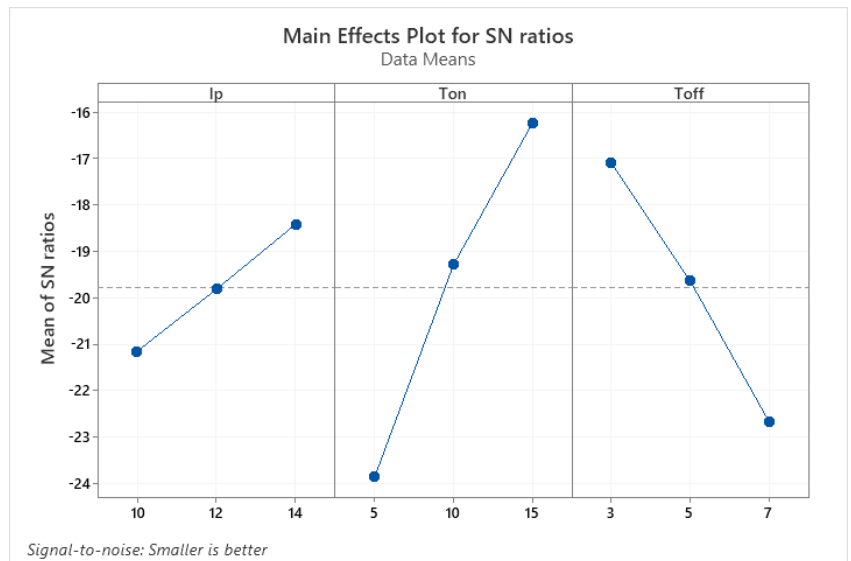
Level	Ip	Ton	Toff
1	-21.15	-23.85	-17.08
2	-19.81	-19.28	-19.63
3	-18.41	-16.24	-22.66
Delta	2.73	7.61	5.57
Rank	3	1	2

## Response Table for Means

Level	Ip	Ton	Toff
1	5.837	7.921	4.092
2	5.673	4.924	5.340
3	4.925	3.591	7.004
Delta	0.912	4.329	2.913
Rank	3	1	2

## Response Table for Standard Deviations

Level	Ip	Ton	Toff
1	11.443	15.609	7.941
2	11.108	9.608	10.441
3	9.607	6.941	13.776
Delta	1.836	8.669	5.835
Rank	3	1	2



## + Phân tích hồi quy bậc nhất (SN Ratios vs Ip, Ton, Toff)

### Linear Model Analysis: SN ratios versus Ip, Ton, Toff

#### Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-19.7900	0.2516	-78.672	0.000
Ip 10	-1.3560	0.3557	-3.812	0.062
Ip 12	-0.0206	0.3557	-0.058	0.959
Ton 5	-4.0605	0.3557	-11.414	0.008
Ton 10	0.5064	0.3557	1.424	0.291
Toff 3	2.7078	0.3557	7.612	0.017
Toff 5	0.1590	0.3557	0.447	0.699

#### Model Summary

S	R-Sq	R-Sq(adj)
0.7547	99.23%	96.90%

#### Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Ip	2	11.202	11.202	5.6009	9.83	0.092
Ton	2	88.125	88.125	44.0624	77.37	0.013
Toff	2	46.727	46.727	23.3634	41.02	0.024
Residual Error	2	1.139	1.139	0.5695		
Total	8	147.192				

## + Phân tích hồi quy bậc nhất (Means vs Ip, Ton, Toff)

### Linear Model Analysis: Means versus Ip, Ton, Toff

#### Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5.4786	0.07687	71.269	0.000
Ip 10	0.3588	0.10871	3.300	0.081
Ip 12	0.1945	0.10871	1.789	0.216
Ton 5	2.4421	0.10871	22.464	0.002
Ton 10	-0.5550	0.10871	-5.105	0.036
Toff 3	-1.3868	0.10871	-12.757	0.006
Toff 5	-0.1388	0.10871	-1.277	0.330

#### Model Summary

S	R-Sq	R-Sq(adj)
0.2306	99.76%	99.03%

#### Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Ip	2	1.4179	1.4179	0.7089	13.33	0.070
Ton	2	29.4990	29.4990	14.7495	277.33	0.004
Toff	2	12.8110	12.8110	6.4055	120.44	0.008
Residual Error	2	0.1064	0.1064	0.0532		
Total	8	43.8343				

## + Phân tích hồi quy bậc nhất (StDevs vs Ip, Ton, Toff)

### Linear Model Analysis: StDevs versus Ip, Ton, Toff

#### Estimated Model Coefficients for StDevs

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	10.7195	0.09790	109.491	0.000
Ip 10	0.7235	0.13846	5.226	0.035
Ip 12	0.3887	0.13846	2.808	0.107
Ton 5	4.8898	0.13846	35.317	0.001



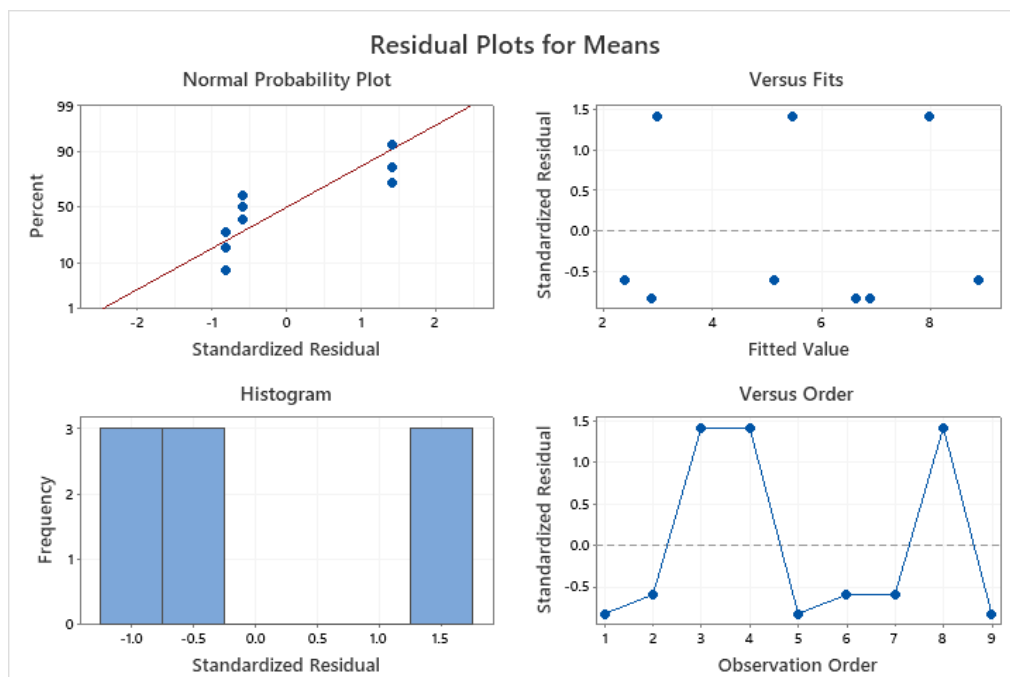
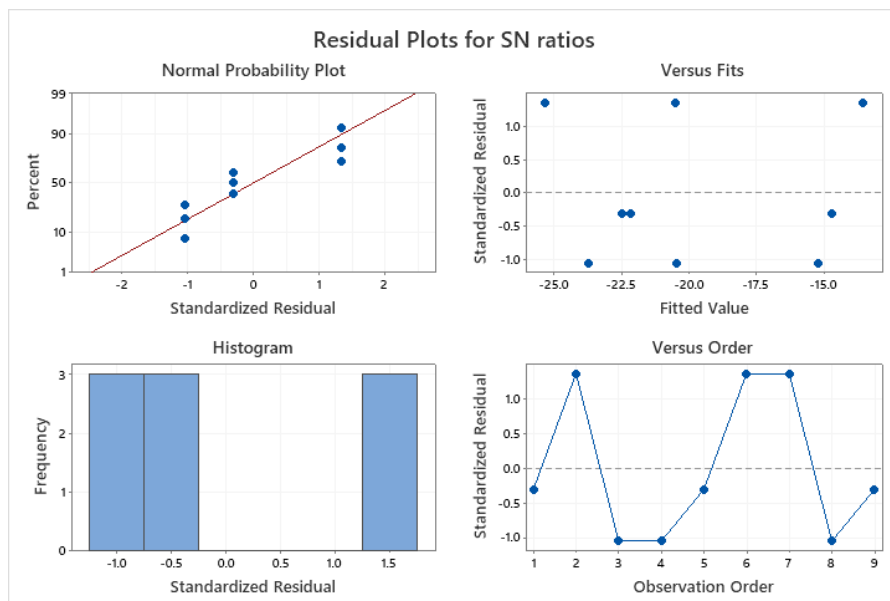
Ton 10 -1.1111 0.13846 -8.025 0.015  
 Toff 3 -2.7784 0.13846 -20.067 0.002  
 Toff 5 -0.2782 0.13846 -2.009 0.182

## Model Summary

S	R-Sq	R-Sq(adj)
0.2937	99.90%	99.61%

## Analysis of Variance for StDevs

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Ip	2	5.735	5.735	2.8677	33.24	0.029
Ton	2	118.271	118.271	59.1356	685.51	0.001
Toff	2	51.419	51.419	25.7095	298.03	0.003
Residual	2	0.173	0.173	0.0863		
Error						
Total	8	175.598				



## + General Linear Model: MRR (gm/min) versus Ip (A), Ton (us), Toff (us)

### Method

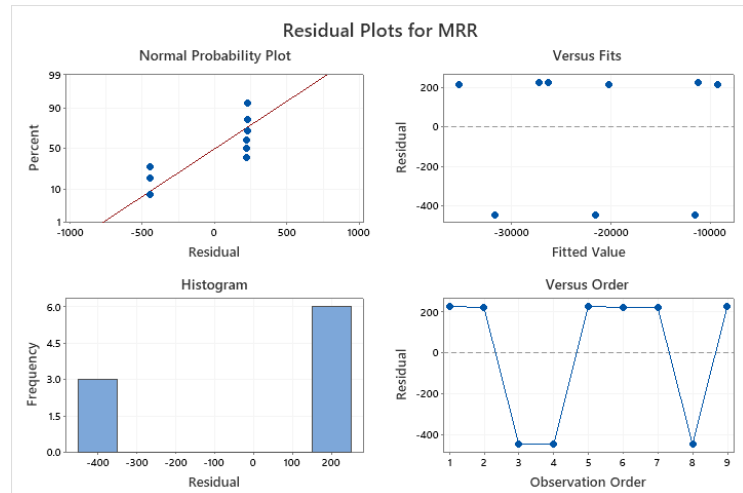
Factor coding (-1, 0, +1)  
Box-Cox  $\lambda = -1$   
transformation

### Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Ip	Fixed	3	10, 12, 14
Ton	Fixed	3	5, 10, 15
Toff	Fixed	3	3, 5, 7

### Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ip	2	22786280	11393140	25.65	0.038
Ton	2	475380429	237690214	535.13	0.002
Toff	2	206950709	103475354	232.96	0.004
Error	2	888347	444174		
Total	8	706005765			



### Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
666.464	99.87%	99.50%	97.45%

### Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-21583	222	-97.15	0.000	
Ip					
10	-1435	314	-4.57	0.045	1.33
12	-784	314	-2.50	0.130	1.33
Ton					
5	-9805	314	-31.21	0.001	1.33
10	2234	314	7.11	0.019	1.33
Toff					
3	5570	314	17.73	0.003	1.33
5	566	314	1.80	0.214	1.33

### Regression Equation

-MRR<sup>1</sup> = -21583 - 1435 Ip\_10 - 784 Ip\_12 + 2219 Ip\_14 - 9805 Ton\_5  
+ 2234 Ton\_10  
+ 7571 Ton\_15 + 5570 Toff\_3 + 566 Toff\_5 - 6135 Toff\_7

## + General Linear Model: TWR (gm/min) versus Ip (A), Ton (us), Toff (us)

### Method

Factor coding (-1, 0, +1)  
Box-Cox  $\lambda = -2$   
transformation

### Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Ip	Fixed	3	10, 12, 14
Ton	Fixed	3	5, 10, 15

Toff Fixed 3 3, 5, 7

### Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
lp	2	8526977	4263488	685.70	0.001
Ton	2	8870424	4435212	713.32	0.001
Toff	2	4259438	2129719	342.52	0.003
Error	2	12435	6218		
Total	8	21669274			

### Model Summary for Transformed Response

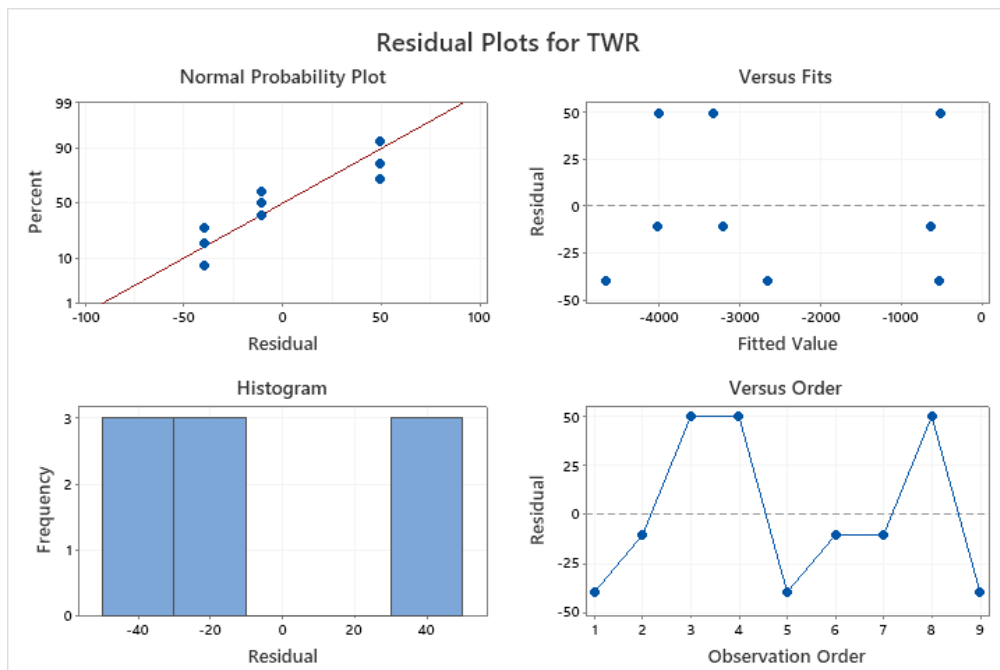
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
78.8527	99.94%	99.77%	98.84%

### Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-2620.5	26.3	-99.70	0.000	
lp					
10	-1343.8	37.2	-36.15	0.001	1.33
12	413.5	37.2	11.12	0.008	1.33
Ton					
5	-1384.3	37.2	-37.24	0.001	1.33
10	489.0	37.2	13.16	0.006	1.33
Toff					
3	683.8	37.2	18.40	0.003	1.33
5	257.4	37.2	6.92	0.020	1.33

### Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{TWR}^{\wedge}2 = & -2620.5 - 1343.8 \text{lp}_{10} + 413.5 \text{lp}_{12} + 930.3 \text{lp}_{14} - 1384.3 \text{Ton}_5 \\ & + 489.0 \text{Ton}_{10} \\ & + 895.2 \text{Ton}_{15} + 683.8 \text{Toff}_3 + 257.4 \text{Toff}_5 - 941.2 \text{Toff}_7 \end{aligned}$$



## 5.5 So sánh kết quả bài báo với Minitab

Kết quả bài báo với Minitab là hoàn toàn trùng khớp

## 5.6 Nhận xét chung

Ta có phương trình hồi quy bậc nhất cho:

+ MRR

$$\begin{aligned} -MRR^{-1} &= -21583 - 1435 \text{ Ip}_{10} - 784 \text{ Ip}_{12} + 2219 \text{ Ip}_{14} - 9805 \text{ Ton}_5 \\ &+ 2234 \text{ Ton}_{10} + 7571 \text{ Ton}_{15} + 5570 \text{ Toff}_3 + 566 \text{ Toff}_5 - 6135 \text{ Toff}_7 \end{aligned}$$

+ TWR

$$\begin{aligned} TWR^{-2} &= -2620.5 - 1343.8 \text{ Ip}_{10} + 413.5 \text{ Ip}_{12} + 930.3 \text{ Ip}_{14} - 1384.3 \text{ Ton}_5 \\ &+ 489.0 \text{ Ton}_{10} + 895.2 \text{ Ton}_{15} + 683.8 \text{ Toff}_3 + 257.4 \text{ Toff}_5 - 941.2 \text{ Toff}_7 \end{aligned}$$

Vì vậy, ứng dụng phương pháp Taguchi trên máy cắt dây EDM có thể tối ưu các thông số MRR và TWR nhằm giảm chi phí sản xuất và tăng chất lượng sản phẩm