Ứng dụng sự kết hợp của Taguchi và PSI để tối ưu hóa đa mục tiêu các thông số công nghệ trong xung định hình thép SKD11

Application of Taguchi - PSI combined to multi-response optimization of process parameters in die- sinking electrical discharge machining for SKD11 steel

Nguyễn Văn Đức, Phạm Văn Bổng, Nguyễn Hữu Phấn*
Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
**Email: phanktcn@gmail.com*
Mobile. 0983.783.844

Từ khóa:

EDM; R_a; MRR; PSI; Taguchi.

Tóm tắt

Gia công bằng tia lửa điện (EDM) là phương pháp được sử dụng rất phổ biến trong ngành khuôn mẫu và dụng cụ. Tối ưu hóa đa mục tiêu các thông số công nghệ và việc lựa chọn trọng số cho từng chỉ tiêu chất lượng trong EDM là vấn đề rất phức tạp. Nó vẫn đã và đang tạo ra sự quan tâm lớn của các chuyên gia kỹ thuật trong lĩnh vực này. Bài báo này trình bày việc tối ưu hóa đa mục tiêu trong EDM bằng Taguchi - PSI (Preference selection index). Các thông số cường độ dòng điện (I), điện áp (V), thời gian phát xung (T_{on}) và thời gian ngừng phát xung (T_{of}) được sử dụng để khảo sát. Các chỉ tiêu năng suất bóc tách vật liệu (MRR) và nhám bề mặt (R_a) được lựa chọn là các chỉ tiêu tối ưu. Ma trận trực giao L25 trong phương pháp Taguchi được sử dụng để thiết kế thực và kỹ thuật PSI được sử dụng để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu. Kết quả chỉ ra rằng, bộ thông số tối ưu của bài toán đa mục tiêu trong EDM gia công thép SKD11 là U = 70V, T_{on} = 50µs, I = 5A, T_{of} = 18µs. Và sự kết hợp PSI-Taguchi đã làm giảm đáng kể thời gian và chi phí thực nghiệm.

Keywords:

EDM; R_a; MRR; PSI; Taguchi.

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is a widely used method in the industry of molds and tools. The multi-objective optimization of technology parameters and the selection of weight for each quality indicator in the EDM is a very complex issue. It has been attracting great interest from technical specialists in this field. This paper presents multi-objective optimization in EDM using Taguchi - PSI (Preference selection index). Parameters of current (I), voltage (V), pulse on time (T_{on}) and pulse off time (T_{of}) are used for the survey. The quality indicators such as material removal rate (MRR) and surface roughness (R_a) were chosen as optimal indicators. The orthogonal Matrix L25 in the Taguchi method was used for actual design, and PSI techniques were used to solve multi-objective optimization problems. The results indicated that, the optimal parameters of the multi-objective of EDM for SKD11 steel are U = 70V, T_{on} = 50µs, I = 5A, T_{of} = 18µs. And the combination of PSI-Taguchi greatly reduced the time and cost of experimentation.

Ngày nhận bài: 10/07/2018
Ngày nhận bài sửa: 06/9/2018
Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gia công tia lửa điện (EDM) là phương pháp gia công không truyền thống, nó được sử dụng rất phổ biến trong ngành chế tạo các khuôn mẫu và dụng cụ. Phương pháp này có thể gia công các bề mặt định hình phức tạp bằng vật liệu thuộc nhóm vật liệu khó gia công. Hạn chế của phương pháp này là năng suất gia công và chất lượng bề mặt gia công là thấp. Số lượng các thông số công nghệ là lớn và trị số của chúng là rất rộng, và điều này đã dẫn đến quá trình tối ưu hóa các thông số công nghệ của EDM là rất khó khăn. Vì vây, Tối ưu hóa đồng thời nâng cao năng suất gia công và chất lượng bề mặt gia công trong EDM vẫn đang thu hút sự quan tâm của nhiều công trình nghiên cứu.

Một số kết quả nghiên cứu gần đây đã cho thấy rằng kết hợp Taguchi với một số phương pháp (GRA (Grey Relational Analysis), Topsis, PSO (Particle Swarm Optimization),…) có thể tối ưu hóa đòng thời nhiều mục tiêu trong EDM. Taguchi - GRA đã được sử dụng để tối ưu hóa đồng thời các chi tiêu MRR, TWR và lượng quá cắt trong μ-EDM [1-3]. Tuy nhiên, Nghiên cứu tối ưu hóa đồng thời các chỉ tiêu MRR và R_a trong EDM bằng Taguchi - Topsis cho hiệu quả cao hơn so với nó bằng Taguchi - GRA [4]. Một số chỉ tiêu đặc trưng chất lượng trong EDM bằng Taguchi - Topsis [5]. Các chỉ tiêu chất lượng được tối ưu gồm: MRR, R_a, độ chính xác kích thước. Kết quả đã cho thấy rằng trong 3 thông số công nghệ được khảo sát (I, V, Ton) thì V là ảnh hưởng mạnh nhất (42,42%) và ton là ảnh hưởng ít nhất (11,13%). Trong tối ưu hóa nhiều mục tiêu, Topsis là phương pháp đơn giản, dễ hiểu và mạnh [6]. Đồng thời phương pháp này cho phép xét đến các yếu tố dịnh lượng và định tính. Nên nó là giải pháp cho phép tiếp cận giải bài toán tối ưu đa mục tiêu là khách quan hơn. 7 chỉ tiêu chất lượng trong μ-EDM đã được tối ưu hóa đồng thời bằng Topsis. Mức ảnh hưởng của các thông số công nghệ đã được chỉ ra [7]. Kết quả tối ưu của các chỉ tiêu năng suất, chất lượng bề mặt và độ chính xác gia công của AISI - 304 trong μ-EDM đã được xác định bằng Topsis method [8]. Và kết quả tối ưu bằng phương pháp này tốt hơn so với một số phương pháp khác như Taguchi, GRA,… Các kết nghiên cứu trên đã cho thấy, các giải pháp đưa ra trong bài toán tối ưu đa mục tiêu trong EDM đã đạt được những kết quả nhất định. Tuy nhiên, giá trị của các trọng số của các trị tiêu xác định là khá khó khăn. Gần đây, phương pháp PSI (Performance Selection Index) đã được giới thiệu để tối ưu hóa đa mục tiêu trong các phương pháp gia công. Đây là phương pháp không yêu cầu xác định trọng số của các chỉ tiêu, bởi vậy bài toán tối ưu sẽ được giải đơn giản hơn rất nhiều.

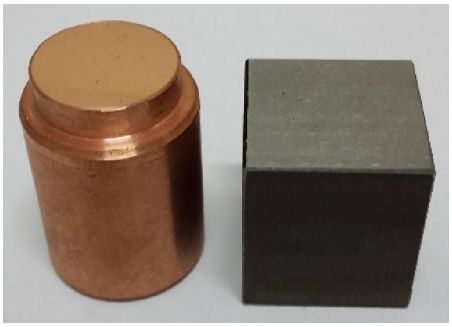
Bài báo này, nghiên cứu sử dụng chỉ tiêu chất lượng gồm MRR và R_a trong EDM. Các thông số công nghệ gồm U, I, T_{on}, T_{of} đã được tối ưu hóa. Phương pháp Taguchi - PSI được sử dụng để thiết kế thí nghiệm và tối ưu hóa đa mục tiêu chất lượng trong EDM để gia công thép SKD11.

2. THIẾT BỊ THỰC NGHIỆM

Máy xung định hình CM323C của CHMER EDM (Đài Loan) được sử dụng để thực hiện thí nghiệm. Thép làm khuôn SKD11 với kích thước mẫu 25x25x20mm được lựa chọn để nghiên cứu, Hình 1. Cu là loại vật liệu điện cực được sử dụng phổ biến nhất và được quan tâm trong rất nhiều nghiên cứu. Điện cực có dạng trụ tròn và có kích thước đường kính ϕ20mm với chiều dài 35mm, Hình 1. Dung dịch điện môi của thí nghiệm là dầu xung điện HD-1. Đây là loại dầu được sử dụng khá phổ biến trong các lĩnh vực gia công xung hiện nay tại Việt Nam.

Đo khối lượng của phôi trước và sau khi gia công bằng cân điện tử AJ 203 (Hãng Shinko Denshi Co. LTD - Japan), khối lượng lớn nhất mà cân có thể cân được là 200g, độ chính xác

0,001g. Nhám bề mặt gia công (R_a) được xác định bằng máy SJ-210 (Hãng Mitutoyo - Japan). Thực hiện 3 lần đo trên mỗi mẫu thí nghiệm và kết quả là giá trị trung bình của mỗi lần đo.



Hình 1. Điện cực và phôi trong thực nghiệm

3. PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ THÍ NGHIỆM VÀ TỐI ƯU

Xây dựng ma trận thực nghiệm trong nghiên cứu thực nghiệm có mối quan hệ trực tiếp đến kinh phí vật tư thực nghiệm, thời gian thực nghiệm và độ chính xác kết quả nghiên cứu. Số lượng thí nghiệm là ít nhất, số lượng tham số được khảo sát là lớn nhất và giải quyết được đồng thời nhiều chỉ tiêu chất lượng với độ chính xác cao sẽ là mục tiêu trong các nghiên cứu thực nghiệm. Ngoài ra, phân tích quyết định đa mục tiêu là một phần quan trọng trong các nghiên cứu toàn diện hoặc các bài toán tối ưu đa mục tiêu. Nó là quá trình thiết kế các công thức toán học và tính toán để hỗ trợ người thực hiện đưa ra các quyết định thích hợp với mức độ quan trọng của từng chỉ tiêu được lựa chọn trong nghiên cứu. Sự phân tích quyết định đa mục tiêu sẽ xem xét việc lựa chọn sàng lọc, sắp xếp mức độ ưu tiên, xếp thứ tự ưu tiên để từ đó lựa chọn được các giải pháp phù hợp với đối tượng được nghiên cứu.Việc lựa chọn được các mức ưu tiên trong các mức của thông số được khảo sát là rất quan trọng trong việc đưa ra quyết định. Đã có nhiều phương pháp được giới thiệu để giải quyết các vấn đề này, tuy nhiên các kỹ thuật khác nhau lại cho các kết quả khác nhau trong cùng một vấn đề nghiên cứu. Vì vậy, Việc tạo ra sự cân bằng giữa các chỉ tiêu xung đột để từ đó đưa ra quyết định là một vấn đề rất phức tạp. Trong bài bào này, nhóm tác giả giới thiệu quy trình bao gồm các bước như:

Bước 1: Xây dựng ma trận thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi.

Bước 2: Xác định các chỉ tiêu chất lượng trong nghiên cứu.

Bước 3: Tiến hành phương pháp PSI để đạt được kết quả xếp hạng cuối cùng. Cụ thể các phần được giới thiệu như sau:

3.1. Xây dựng ma trân thí nghiệm bằng Taguchi

Phương pháp Taguchi là phương pháp thiết kế thí nghiệm mạnh. Phương pháp này có ưu điểm là số lượng của các thông số công nghệ và các mức của chúng đưa vào ma trân thiết kế thực nghiệm là lớn nhưng số lượng thí nghiệm là nhỏ nhất. Điều này dẫn đến chi phí vật tư thí nghiệm và thời gian của thực nghiệm là giảm. Ngoài ra, các thông số đưa vào ma trận thiết kế thực nghiệmcó thể là yếu tố định lượng hoặc yếu tố định tính, và các mức của các thông số này có thể lựa chọn tùy ý. Điều này sẽ là không thể thực hiện được trong một số thiết kế thí nghiệm truyền thống. Mặt khác, các ma trận thiết kế thực nghiệm đã được thiết kế sẵn nên nó rất thuận lợi cho việc ứng dụng. Những ưu điểm của phương pháp này đã dẫn đến sự ứng dụng của phương pháp này trong thực tiễn là rất rộng rãi.

Việc lựa chọn ma trận thiết kế thí nghiệm trong Taguchi phụ thuộc vào số lượng thông số công nghệ và các mức của nó được khảo sát. Trong nghiên cứu này, 4 thông số công nghệ (U, I, T_{on} và T_{of}) và các mức của mỗi thông số công nghệ là 5 đã được lựa chọn để nghiên cứu, Bảng 1. Các thông số công nghệ và các mức khảo sát trong nghiên cứu được lựa chọn theo kin nghiệm để phù hợp với điều kiện gia công tinh. Và bậc tự do của ma trận thí nghiệm là 16 (bảng). Như vậy, bảng thiết kế thí nghiệm của Taguchi phù hợp với nghiên cứu này lad L25. Với ma trận thực nghiệm như bảng 2.

Bảng 1. Thông số công nghệ trong thực nghiệm

TT	Thông số công nghệ	Đơn vị	Kí hiệu	Mức của các thông số					Bậc tự do
				1	2	3	4	5	
1	Cường độ dòng điện	A	I	1	2	3	4	5	4
2	Điện áp	V	U	30	40	50	60	70	4
3	Thời gian phát xung	µs	T_{on}	18	25	37	50	75	4
4	Thời gian ngừng phát xung	µs	T_{of}	9	12	18	25	37	4
5	Tổng								16

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm

Exp	I	U	T_{on}	T_{of}	MRR (mg/phút)	R_a (µm)
1	1	30	18	9	1,45	0,71
2	1	40	25	12	0,98	0,59
3	1	50	37	18	1,02	0,67
4	1	60	50	25	0,72	0,64
5	1	70	75	37	0,74	0,80
6	2	30	25	18	9,08	1,32
7	2	40	37	25	6,42	1,24
8	2	50	50	37	5,37	1,24
9	2	60	75	9	3,50	1,07
10	2	70	18	12	6,75	1,26
11	3	30	37	37	12,23	1,54
12	3	40	50	9	4,38	0,98
13	3	50	75	12	3,80	1,08
14	3	60	18	18	14,48	1,48
15	3	70	25	25	12,73	1,57
16	4	30	50	12	9,13	1,08
17	4	40	75	18	9,50	1,36
18	4	50	18	25	34,74	2,27
19	4	60	25	37	31,25	2,70
20	4	70	37	9	16,30	1,66
21	5	30	75	25	17,60	1,55
22	5	40	18	37	51,70	2,70
23	5	50	25	9	25,90	1,81
24	5	60	37	12	25,30	1,70
25	5	70	50	18	26,30	1,86

3.2. Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu bằng PSI

Các bước chính của phương pháp PSI để giải quyết các vấn đề MCDM bao gồm một vài bước:

Bước1: Xác định mục tiêu của bài toán và lựa chọn các tiêu chí được đánh giá để đảm bảo mục tiêu, và lựa chọn ma trân thực nghiệm liên quan đến vấn đề ra quyết định đang được xem xét.

Bước 2: Xây dựng ma trận quyết định ban đầu từ các chỉ tiêu được lựa chọn ban đầu. Nếu số lượng thí nghiệm là m và số chỉ tiêu là n, thì ma trận quyết định là m x n có thể được biểu diễn theo công thức (1):

$$X=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & . & x_{1j} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & . & x_{2j} & x_{2n} \\ . & . & . & . & . \\ x_{i1} & x_{i2} & . & x_{ij} & x_{in} \\ . & . & . & . & . \\ x_{m1} & x_{m2} & . & x_{mj} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bước 3: Trong giải các bài toán đa mục tiêu, nó được yêu cầu để làm cho giá trị của các chỉ tiêu phải không thứ nguyên. Để đảm bảo được mục đích này, các giá trị của các chỉ tiêu sẽ được chuyển thành 0 và 1, và quá trình chuyển đổi này được gọi là chuẩn hóa.

Nếu chỉ tiêu là loại lớn hơn thì tốt hơn, nó sẽ được chuẩn hóa theo công thức (2a):

$$x_{ij}^{'}=\frac{x_{ij}}{x_{ij}^{max}}, \quad i=1,...,m \quad (2a)$$

Nếu chỉ tiêu là loại nhỏ hơn thì tốt hơn, nó sẽ được chuẩn hóa theo công thức (2b):

$$x_{ij}^{'}=\frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}}, \quad i=1,...,m \quad (2b)$$

Trong đó x_{ij} là giá trị của các chỉ tiêu tại hàng thứ i và cột thứ j (i = 1, 2, 3,… .., m và j = 1, 2…., n). Ma trận quyết định được chuẩn hóa bằng phương trình (1) và (3) tùy thuộc vào mục tiêu bài toán.

Bước 4: Trong bước này, giá trị trung bình của các chỉ tiêu được chuẩn hóa được tính bằng công thức (3):

$$N=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}x_{ij}^{'} \quad (3)$$

Bước 5: Giá trị biến thể tùy chọn giữa các giá trị của mỗi chỉ tiêu được tính bằng cách sử dụng công thức (4):

$$\phi_j=\sum_{i=1}^{m}(x_{ij}^{'}-\mathrm{N})^2 \quad (4)$$

Bước 6: Xác định độ lệch của giá trị của mức độ ưu tiên liên quan đến từng tiêu chí sử dụng công thức (5):

$$\Omega_j = 1 - \phi_j \quad (5)$$

Bước 7: Trong bước này của phương pháp PSI, giá trị ưu tiên tổng thể được xác định cho mỗi tiêu chí sử dụng công thức (6):

$$W_j = \frac{\Omega_j}{\sum_{j=1}^{n} \Omega_j} \quad (6)$$

Ngoài ra, tổng giá trị ưu tiên tổng thể của tất cả các tiêu chí phải thỏa mãn công thức (7):

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1 \quad (7)$$

Bước 8: Chỉ số lựa chọn ưu tiên được tính cho mỗi thí nghiệm sử dụng công thức (8):

$$\theta_j = \sum_{j=1}^{n} x'_{ij} . w_j \quad (8)$$

Bước 9: Căn cứ vào giá trị chỉ số ưu tiên để xếp hạng. Việc xếp hạng phải được thực hiện theo giá trị giảm dần của θ_j. Thí nghiệm có giá trị lớn nhất là θ_j là tốt lớn nhất, nó sẽ là giải pháp tốt nhất (giải pháp tối ưu).

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bước 1: Với mục tiêu đồng thời nâng cao năng suất và chất lượng bề mặt, hai chỉ tiêu MRR và R_a sẽ được lựa chọn để nghiên cứu (MRR sẽ được tăng; R_a bị giảm). Kết quả thực nghiệm của 3 chỉ tiêu được khảo sát theo ma trận L25 của Taguchi (Bảng 2).

Bước 2: Xây dựng ma trận của các chỉ tiêu được nghiên cứu, theo công thức (1) ta có:

$$X = \begin{bmatrix} MRR_1 & SR_1 \\ MRR_2 & SR_2 \\ . & . \\ . & . \\ . & . \\ MRR_{27} & SR_{27} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Bước 3: Chuẩn hóa các chỉ tiêu: MRR được chuẩn hóa theo công thức (2a) và R_a được chuẩn hóa theo công thức (2b), kết quả được cho trong bảng 3.

Bảng 3. Kết quả chuẩn hóa

TNo	I	U	T_{on}	T_{of}	x'_{ij}(MRR)	$x'_{ij}(R_a)$
1	1	30	18	9	0,03	0,83
2	1	40	25	12	0,02	1,00
3	1	50	37	18	0,02	0,88
4	1	60	50	25	0,01	0,92
5	1	70	75	37	0,01	0,73
6	2	30	25	18	0,18	0,45
7	2	40	37	25	0,12	0,47

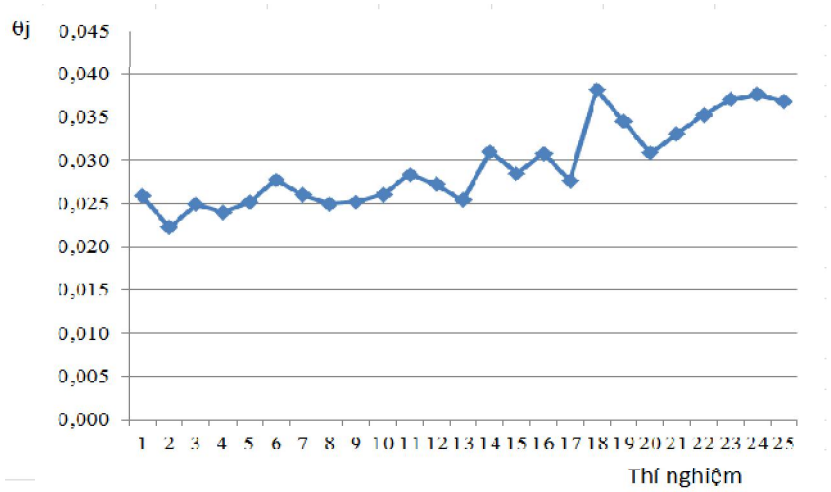
8	2	50	50	37	0,10	0,47
9	2	60	75	9	0,07	0,55
10	2	70	18	12	0,13	0,47
11	3	30	37	37	0,24	0,38
12	3	40	50	9	0,08	0,60
13	3	50	75	12	0,07	0,54
14	3	60	18	18	0,28	0,40
15	3	70	25	25	0,25	0,37
16	4	30	50	12	0,18	0,54
17	4	40	75	18	0,18	0,43
18	4	50	18	25	0,67	0,26
19	4	60	25	37	0,60	0,22
20	4	70	37	9	0,32	0,35
21	5	30	75	25	0,34	0,38
22	5	40	18	37	1,00	0,22
23	5	50	25	9	0,50	0,33
24	5	60	37	12	0,49	0,35
25	5	70	50	18	0,51	0,32

Bước 4 đến bước 8: Các kết quả tính toán được tính theo các công thức (3-8). Giá trị của các kết quả tính toán được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. Các giá trị của tham số chuyển đổi và chỉ số ưu tiên

TNo	**N**	**ϕMRR**	**ϕR_a**	**ϕj**	**Ωj**	**Wj**	**θj**	**Xếp hạng**
1	0,287	-0,259	0,547	0,366	0,634	0,030	0,0259	18
2	0,340	-0,321	0,660	0,539	0,461	0,022	0,0223	25
3	0,300	-0,280	0,580	0,415	0,585	0,028	0,0249	23
4	0,310	-0,296	0,607	0,456	0,544	0,026	0,0240	24
5	0,249	-0,235	0,485	0,290	0,710	0,034	0,0252	21
6	0,207	-0,032	0,239	0,058	0,942	0,045	0,0278	13
7	0,199	-0,075	0,275	0,081	0,919	0,044	0,0260	17
8	0,192	-0,088	0,281	0,087	0,913	0,043	0,0250	22
9	0,206	-0,138	0,344	0,138	0,862	0,041	0,0252	20
10	0,199	-0,068	0,267	0,076	0,924	0,044	0,0261	16
11	0,206	0,030	0,176	0,032	0,968	0,046	0,0284	12
12	0,228	-0,143	0,371	0,158	0,842	0,040	0,0272	15
13	0,206	-0,132	0,338	0,132	0,868	0,041	0,0254	19
14	0,226	0,054	0,172	0,032	0,968	0,046	0,0310	8
15	0,207	0,039	0,168	0,030	0,970	0,046	0,0285	11
16	0,240	-0,064	0,304	0,096	0,904	0,043	0,0308	10
17	0,205	-0,021	0,226	0,052	0,948	0,045	0,0276	14
18	0,310	0,362	-0,051	0,133	0,867	0,041	0,0382	**1**
19	0,274	0,330	-0,056	0,112	0,888	0,042	0,0346	6
20	0,223	0,092	0,131	0,026	0,974	0,046	0,0309	9
21	0,240	0,100	0,140	0,030	0,970	0,046	0,0331	7
22	0,406	0,594	-0,188	0,388	0,612	0,029	0,0353	5
23	0,276	0,225	0,050	0,053	0,947	0,045	0,0371	3
24	0,279	0,211	0,068	0,049	0,951	0,045	0,0377	2
25	0,275	0,233	0,042	0,056	0,944	0,045	0,0369	4

Bước 9: Căn cứ vào kết quả tính toán chỉ số của PSI cho thấy, thí nghiệm số 18 sẽ cho giá trị của chỉ số này là lớn nhất, Hình 2. Đây sẽ là thí nghiệm cho kết quả hợp lý nhất với bộ thông số công nghệ tối ưu: U = 50V, T_{on} = 18µs, I = 4A, T_{of} = 25µs.



Hình 2. Xếp hạng chỉ số PSI

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, các thông số công nghệ của quá trình xung định hình thép SKD11 đã được tối ưu hóa đa mục tiêu. Bộ thông số công nghệ tối ưu là U = 50V, T_{on} = 18µs, I = 4A, T_{of} = 25µs. Trị số tối ưu của các chỉ tiêu là MRR= 34,74mm^3/phút và R_a = 2,27µm. Sự kết hợp Taguchi - PSI để giải bài toán đa mục tiêu sẽ giúp quá trình giải ngắn gọn, dễ dàng đồng thời tiết kiệm được thời gian và chi phí thực hiện. Kết quả trên đã chứng tỏ PSI là giải pháp có thể rất hữu hiệu để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu trong lĩnh vực EDM nói riêng và công nghệ gia công khác nói chung.

LỜI CẢM ƠN: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (Nafosted) của Việt Nam theo số tài trợ "107.01-2017.303".

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Vijay, K.M., Man, S.A., 2017. Micro-EDM multiple parameter optimization for Cp titanium. *Int J Adv Manuf Technol,* 89, 897–904.

[2]. Durairaj, M., Sudharsun, D., Swamynathan, N., 2013. Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade. *Procedia Engineering*, 64, 868 – 877.

[3] Pragadish, N., Pradeep, K.M., 2016. Optimization of Dry EDM Process Parameters Using Grey Relational Analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*.

[4]. .Dastagiri, M., Srinivasa, R.P., Valli, P.M., 2016. TOPSIS, GRA Methods for Parametric Optimization on Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process. *Design and Research Conference (AIMTDR–2016) College of Engineering*.

[5]. Prabhu, S., Vinayagam, B.K., 2016. Multiresponse optimization of EDM process with nanofluids using TOPSIS method and Genetic Algorithm. *Archive of Mechanical Engineering*, 63 (1), 45–71.

[6]. Gadakh, V. S., 2012. Parametric Optimization of Wire Electrical Discharge Machining Using Topsis Method. *Advances in Production Engineering & Management*, 7 (3), 157-164.

[10] Manivannan, R., Pradeep, K.M., 2017. Multi-attribute decision-making of cryogenically cooled micro-EDM drilling process parameters using TOPSIS method. *Journal Materials and Manufacturing Processes*, 32(2), 209-215.

[7]. Manivannan, R., Pradeep, K.M., 2017. Multi-attribute decision making of cryogenically cooled Micro-EDM drilling process parameters using TOPSIS method. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(2).

[8]. Manivannan, R., Pradeep, K.M., 2016. Multi-response optimization of Micro-EDM process parameters on AISI 304 steel using TOPSIS. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 137-144.

[9]. Dušan, P., Miloš, M., Miroslav, R., Valentina, G., (2017). Application of the performance selection index method for solving machining mcdm problems. *Mechanical Engineering*, 15, 97-106.