PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN XẤP XỈ CÁC ĐẶC TUYẾN PHI TUYẾN CỦA BỘ KHUẾCH ĐẠI SÓNG VIBA BẰNG ĐA THỨC HỒI QUY THEO HƯỚNG TIẾP CẬN ĐA TIÊU CHÍ

Lê Quang Cường[1*], Nguyễn Đức Thiết[2]

Tóm tắt: *Để đánh giá về lý thuyết công suất của các thành phần riêng lẻ ở đầu ra của bộ khuếch đại công suất sóng viba (PA), chúng ta thường xây dựng đặc tuyến xấp xỉ biên độ (AX) và pha (FAX) của các PA phi tuyến dựa trên các số liệu thực nghiệm. Trong bài viết này, một thuật toán xấp xỉ được đề xuất với cách tiếp cận đa tiêu chí. Các tiêu chí bao gồm: (1) Tổng bình phương của sai số tại các điểm thực nghiệm; (2) Độ lệch lớn nhất của đặc tuyến xấp xỉ so với đường thực nghiệm; (3) Tổng diện tích sai lệch giữa đặc tuyến xấp xỉ và đường thực nghiệm. Các tiêu chí này thường mâu thuẫn nhau, tiêu chí này tốt hơn thì tiêu chí khác xấu đi. Tác giả sử dụng tập tối ưu Pareto và phương pháp hội thoại để tìm ra phương án tốt hơn so với phương pháp hồi qui đa thức thông thường. Kết quả nghiên cứu là thuật toán và chương trình máy tính được lập trình trong môi trường Matlab. Khi chạy chương trình cho kết quả hồi qui tốt. Đặc tuyến xấp xỉ tìm được có thể sử dụng để ước tính gần đúng công suất của thành phần hữu ích và xuyên điều chế của PA.*

Từ khóa: Phi tuyến phức; Bộ khuếch đại công suất; Xấp xỉ đặc tuyến; Biến dạng xuyên điều chế.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các hệ thống thông tin vệ tinh, bộ khuếch đại cho tín hiệu đa tần có đặc tính phi tuyến, phổ của dao động đầu ra bị nhiễu đáng kể bởi các thành phần phổ xuyên điều chế, không có trong phổ của tín hiệu đầu vào. Các thành phần xuyên điều chế từ đầu ra của bộ phát đáp đi vào dải tần thu của trạm mặt đất, độ trung thực của việc truyền dữ liệu giảm, dẫn đến giảm thông lượng của hệ thống thông tin (số lượng thuê bao hoạt động). Do đó, khi phát triển thiết bị thông tin vô tuyến, nên thực hiện các tính toán sơ bộ để lựa chọn tần số tín hiệu hoạt động và đánh giá công suất của các thành phần xuyên điều chế ở đầu ra của bộ khuếch đại máy phát đáp trong băng tần thu của mỗi trạm mặt đất.

Để đánh giá về lý thuyết công suất của các thành phần riêng lẻ ở đầu ra của bộ khuếch đại công suất sóng viba (PA), sử dụng việc phân tích sự phụ thuộc khi xấp xỉ dữ liệu thực nghiệm cho các đặc tính biên độ (AX) và biên độ pha (FAX) của các PA phi tuyến. Thông thường, AX và FAX của PA thực nghiệm được thiết lập dưới dạng bảng. Trong bài viết này, một thuật toán xấp xỉ được đề xuất với cách tiếp cận đa tiêu chí và thực hiện xấp xỉ đặc tính truyền phi tuyến phức của PA.

Biểu thức các tín hiệu ở đầu vào của PA là một nhóm tín hiệu:

$$u_{in}(t) = \sum_{m=1}^{N} u_m(t) = \sum_{m=1}^{N} U_m(t).cos[2\pi f_m t + \varphi_m(t)] \quad (1)$$

Tín hiệu ở đầu ra của PA $u_{out}(t)$ có thể được viết dưới dạng tổng các tín hiệu hữu ích được khuếch đại $u_{out\,c}(t)$ [1,2].

$$u_{out\,c}(t) = \sum_{m=1}^{N} B(U_m)U_m(t) \times cos[2\pi f_m t + \varphi_m(t) + \Delta\varphi(U_m, t)] \quad (2)$$

Các thành phần kết hợp $u_{com}(t)$:

$$u_{com}(t) = \sum_{K_1,K_2,\ldots,K_N=-\infty}^{\infty} U_{K_1,K_2,\ldots,K_N}(t) \times cos \sum_{m=1}^{N} \{K_m[2\pi f_m t + \varphi_m(t)] + \Delta\varphi(U_m, t)\} \quad (3)$$

Trong đó: $B(U_m)$ là hệ số khuyếch đại của tín hiệu thứ m; $\Delta\varphi(U_m,t)$ là độ lệch pha của thành phần dao động đầu ra, được xác định bởi đặc tuyến đáp ứng pha biên độ của bộ khuếch đại;

$U_{K_1,K_2,\ldots,K_N}(t)$ là biên độ của thành phần đầu ra của PA ở tần số:

$$f_{K_1,K_2,\ldots,K_N} = K_1 f_1 + K_2 f_2 + \ldots + K_N f_N, \quad (4)$$

với K_m là sóng hài của tín hiệu thứ m bất kỳ.

Biểu thức phức tín hiệu và các thành phần xuyên điều chế ở đầu ra của PA phi tuyến được viết ở dạng tổng quát [3, 5, 6]:

$$\dot{U}_{out}(K_1, K_2, \ldots, K_N; \rho) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\prod_{m=1}^{N} \dot{U}_m J_{K_m}(r) \right] dr \cdot \int_0^{\infty} \rho g(\rho) e^{j\varphi(\rho)} J_1(\rho) d\rho, \quad (5)$$

Trong đó: $\dot{U}_m = \dot{U}_m(t)$ là tín hiệu đầu vào thứ m; J_{K_m} là hàm Bessel loại 1 bậc K_m; $\rho = \rho(t) = \sqrt{2 P_{in}}$; P_{in} là công suất của tín hiệu đầu vào của PA; $g(\rho), \varphi(\rho)$ là hàm truyền AX và FAX của PA được xem xét.

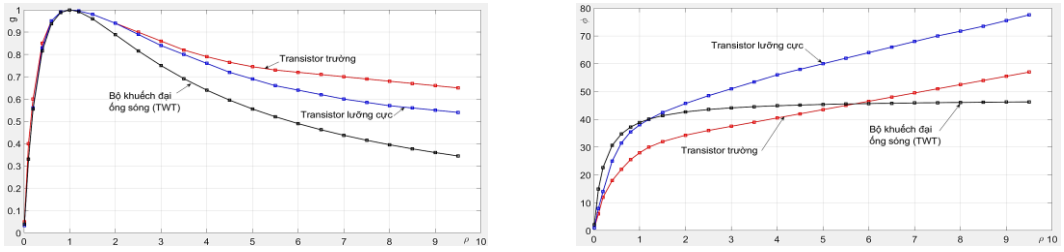
Biểu diễn hàm truyền đạt dưới dạng phức [1, 2]:

$$G^{\bullet}(\rho) = g(\rho) e^{j\varphi(\rho)} \quad (6)$$

Công thức (5) là biểu thức của tín hiệu đầu ra hữu ích ở tần số f_m, nếu chỉ một trong các hệ số K_m bằng một và các hệ số khác (N-1) bằng không. Sử dụng (5) cũng có thể phân tích và tính toán công suất của các thành phần xuyên điều chế trong băng tần của một nhóm tín hiệu hữu ích.

Khi thực hiện tính toán mô phỏng theo công thức (5), thông thường chúng ta phải xây dựng được biểu thức hàm truyền đạt phức (6) dựa trên các số liệu thực nghiệm của PA.

Tập hợp các giá trị thực nghiệm của AX $g_k = g(\rho_k)$ và FAX $\varphi_k = \varphi(\rho_k)$ cho z điểm quan sát ρ_k, $k = \overline{1,z}$ trên khoảng $(0, \rho_{max})$ của PA được xác định bằng thực nghiệm tại các điểm rời rạc (các điểm đánh dấu trong hình 1).



a) *b)*

Hình 1. *Đặc tính biên độ và pha của sóng ngắn PA1 (trên bóng bán dẫn hiệu ứng trường), PA2 (trên bóng bán dẫn lưỡng cực) và PA3 (trên TWT): a) AX; b) FAX.*

Xây dựng hàm toán học để xấp xỉ các giá trị thực nghiệm bằng hàm đa thức phức được biểu diễn dưới dạng (7), trong đó, hàm đa thức chỉ bao gồm các thành phần bậc lẻ, các hệ số của thành phần bậc chẵn bằng 0 [1, 2, 4].

$$\dot{G}(\rho) = g(\rho) e^{j\varphi(\rho)} = \sum_{m=1}^{L} \dot{C}_m \rho^{2m-1} \quad (7)$$

Trong đó: $\dot{C}_m = a_m + jb_m$ là hằng số, hệ số phức; L là số thành viên của chuỗi.

Phần thực và phần ảo của đặc tính truyền được viết lại một cách riêng biệt:

$$G_{Re}(\rho) = \sum_{m=1}^{L} a_m \rho^{2m-1} \quad (8)$$

$$G_{Im}(\rho) = \sum_{m=1}^{L} b_m \rho^{2m-1} \tag{9}$$

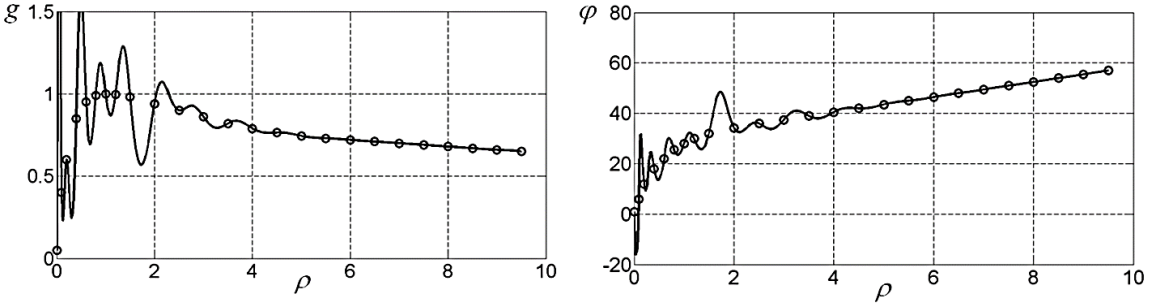
Hàm hồi quy được xây dựng trên cơ sở các giá trị thực nghiệm của AX $\{g_k\}$ và FAX $\{\varphi_k\}$ tại các điểm quan sát được thực hiện bằng phương pháp bình phương tối thiểu [4]. Vì vậy, một hệ phương trình (10) và (11) đã được viết cho phần thực và phần ảo của biểu thức (7):

$$d_{Re} = \sum_{k=1}^{z} \left[g_k cos\varphi_k - \sum_{m=1}^{L} a_m \rho_k^{2m-1} \right]^2 = min \tag{10}$$

$$d_{Im} = \sum_{k=1}^{z} \left[g_k sin\varphi_k - \sum_{m=1}^{L} b_m \rho_k^{2m-1} \right]^2 = min \tag{11}$$

Phương trình (10) và (11) được giải bằng phương pháp số. Giá trị của các hệ số a_m và b_m đối với một giá trị L được xác định bằng phương pháp Gaussian. Việc lựa trọn giá trị của L [4] theo kinh nghiệm và xác định theo phương pháp dò đến khi chấp nhận được.

Thực hiện xây dựng hàm toán học mô tả đặc tính phức đối với bộ khuếch đại sử dụng transistor hiệu ứng trường với các số liệu thực nghiệm bằng chuỗi hàm đa thức, ta được các đặc tuyến như hình 2. Ta thấy rằng: Tại các điểm thực nghiệm, hàm xấp xỉ bám tốt các giá trị thực nghiệm, nhưng chỉ tiêu tổng bình phương độ lệch nhỏ nhất phụ thuộc các giá trị L; Tại khoảng giữa các điểm thực nghiệm, tồn tại các dao động độ lệch lớn.



Hình 2. *Xấp xỉ đa thức đặc tuyến AX và FAX (Transistor hiệu ứng trường).*

2. THUẬT TOÁN XẤP XỈ CÁC ĐẶC TUYẾN PHI TUYẾN BẰNG ĐA THỨC HỒI QUY THEO HƯỚNG TIẾP CẬN ĐA MỤC TIÊU

Để khắc phục các các nhược điểm trên, tác giả xây dựng thuật toán xấp xỉ theo 3 tiêu chí sau:

1 - Tổng bình phương của sai số *Δ(L)* tại các điểm thực nghiệm

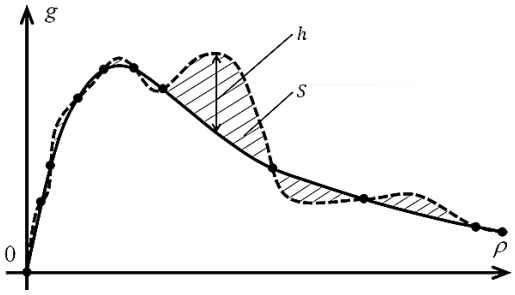
$$\Delta(L) = \sum_{k=1}^{z} \left| \dot{G}(\rho_k) - \sum_{m=1}^{L} \dot{C}_m \rho^{2m-1} \right|^2 \tag{12}$$

2 - Độ lệch lớn nhất *h* (hình 3);

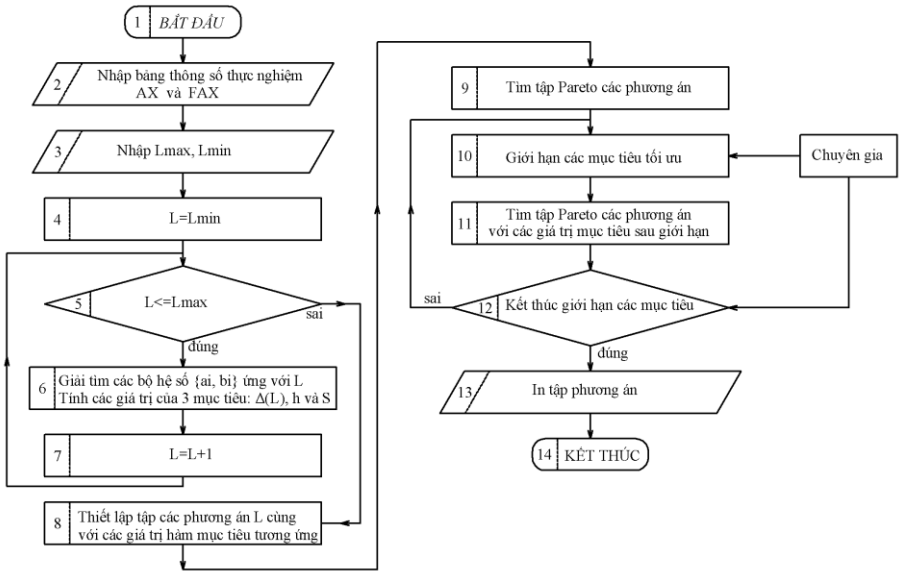
3 - Tổng diện tích sai lệch *S* (hình 3).

Trong hình 3, nét liền là AX mong muốn của PA; đường chấm là đặc tuyến xấp xỉ gần đúng. Trong đó, ρ là biên độ tín hiệu (V) và *g* là giá trị của hàm truyền đạt.

Ba tiêu chí trên đôi khi mâu thuẫn nhau, khi muốn 1 tiêu chí tốt thì 2 tiêu chí còn lại xấu đi. Trong bài báo này, tác giả đã thực hiện xấp xỉ gần đúng các đặc tính phi tuyến phức của PA bằng cách sử dụng ba chỉ tiêu chất lượng. Thuật toán xấp xỉ được đề xuất sử dụng tập tối ưu Pareto và phương pháp hội thoại với ý kiến của chuyên gia. Sơ đồ thuật toán thể hiện trên hình 4.



Hình 3. *Các tiêu chí h, S.*



Hình 4. *Sơ đồ thuật toán xấp xỉ đặc tuyến phức.*

Đầu vào của chương trình là bảng các giá trị thực nghiệm của bộ khuyếch đại cho 2 đặc tuyến AX và FAX (bước 2); chương trình sẽ lần chạy với các giá trị *L* từ *Lmin* đến *Lmax* (bước 3,4,5,6,7) và cho ra bảng tất cả các phương án cùng với giá trị của 3 hàm tiêu chí (bước 8); thiết lập tập phương án tối ưu Pareto (bước 9); kết hợp hội thoại với chuyên gia để được tập phương án tối ưu chấp nhận được (bước 10, 11, 12, 13).

Tập Pareto: Tập các phương án xấp xỉ {L} là tập các giá trị L để xây dựng đa thức hồi quy phức tối ưu theo Pareto, trong đó, không tồn tại phương án nào có tất cả các chỉ tiêu tối ưu xấu hơn phương án khác [3, 7].

Phương pháp hội thoại: Phương pháp hội thoại thường được sử dụng trong bài toán tối ưu đa tiêu chí, trong đó, các tiêu chí tối ưu thường mâu thuẫn nhau, được tiêu chí này tốt hơn thì tiêu chí khác sẽ xấu đi. Sau khi chúng ta đã tìm được tập phương án tối ưu theo Pereto, thông thường tập này sẽ có rất nhiều giá trị. Để lựa chọn phương án cuối cùng thì cần ý kiến của các chuyên gia tham gia. Các chuyên gia sẽ đưa ra ý kiến để giới hạn lại các giá trị của các tiêu chí tối ưu nhằm rút gọn tập Pareto đến khi được chuyên gia chấp thuận [7].

3. PHÁT TRIỂN MODULE PHẦN MỀM XẤP XỈ CÁC ĐẶC TUYẾN PHI TUYẾN BẰNG ĐA THỨC HỒI QUY THEO HƯỚNG TIẾP CẬN ĐA TIÊU CHÍ

Tận dụng thế mạnh của môi trường MATLAB trong mô phỏng và lập trình, tác giả đã tiến hành xây dựng module phần mềm, cho kết quả tốt. Kết quả của mô đun phần mềm là tập phương án tối ưu Pareto với các tiêu chí nằm trong giới hạn mà chuyên gia nhập vào.

Chạy chương trình với đặc tính đầu ra thực nghiệm trên bộ khuyếch đại sử dụng transitor hiệu ứng trường 2П913, với số liệu như sau:

Công suất suất đầu ra:

```
[0.05 0.4 0.6 0.85 0.95 0.99 1 0.995 0.98 0.94 0.9 0.86 0.82 0.79 0.765
0.745 0.73 0.72 0.71 0.7 0.69 0.68 0.67 0.66 0.65];
```

Pha tín hiệu đầu ra:

```
[1. 6. 12. 18. 22. 25.5 28. 30. 32. 34.3 36. 37.5 39. 40.5 42. 43.5 45.
46.5 48. 49.5 51. 52.5 54. 55.5 57.]
```

Kết quả cho tập các phương án tối ưu Pareto:

Nhap du lieu Gioi han gia tri ham muc tieu Tap cac phuong an

	Phuongan	L	Delta	h	S
1	1	12	0.0018	0.0274	0.0148
2	2	17	0.0013	0.0328	0.0149
3	3	24	0.0014	0.0300	0.0147
4	4	25	0.0014	0.0299	0.0149
5	5	33	0.0010	1.9636	0.1178

Sử dụng ý kiến chuyên gia để giới hạn các giá trị hàm tiêu chí $\Delta(L)$, h, và S như bảng sau:

Nhap du lieu Gioi han gia tri ham muc tieu Tap cac phuong an

	Delta	**	h	**	S	**
1	0.0010	1	0.0274	1	0.0147	1
2	0.0013	1	0.0299	1	0.0148	1
3	0.0014	1	0.0300	1	0.0149	1
4	0.0014	0	0.0328	0	0.0149	0
5	0.0018	0	1.9636	0	0.1178	0

Kết quả cuối cùng ta còn một phương án tối ưu như sau:

Nhap du lieu Gioi han gia tri ham muc tieu Tap cac phuong an

	Phuongan	L	Delta	h	S
1	3	24	0.0014	0.0300	0.0147

Từ kết quả chạy chương trình ta thấy rằng, đối với bảng dữ liệu thực nghiệm của bộ khuếch đại, khi chưa sử dụng ý kiến của chuyên gia để giới hạn các giá trị hàm tiêu chí thì ta có 5 phương án xây dựng hàm đa thức xấp xỉ đặc tính thực nghiệm, trong đó, không có phương án nào xấu hơn các phương án còn lại về cả 3 tiêu chí. Sau khi giới hạn lại các hàm tiêu chí, ta chỉ còn 1 phương án xấp xỉ sao cho tất cả các giá trị tiêu chí đều nằm trong giới hạn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất sử dụng cách tiếp cận theo hướng đa tiêu chí nhằm tìm được hàm đa thức phức xấp xỉ đặc tuyến của bộ khuếch đại bám sát các số liệu thực nghiệm. Tác giả đã phát triển thuật toán và xây dựng thành công module phần mềm trong môi trường Matlab. Kết quả này có thể được sử dụng để ước tính gần đúng công suất của các thành phần hữu ích và xuyên điều chế của bộ khuyếch đại nói chung và khuếch đại sóng vi ba nói riêng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Когновицкий Л. В., Мельников Б. С. *"Системы связи с нелинейным ретранслятором"*. – М.: Издательство МЭИ. 1993.

[2]. Касымов А. Ш., Когновицкий Л. В., Касымов Ш. И. *"Бесселевая и полиномиальная аппроксимации передаточных характеристик СВЧ-устройств с комплексной нелинейностью"*. Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. № 4. С. 27−30.
[3]. Когновицкии Л. В., Касымов Ш. И., Мельников Б. С. *"Оптимизация по пропускной способности систем связи с частотным разделением"*. Электросвязь. 1988. № 5. С. 13–17.
[4]. Когновицкии Л. В., Касымов Ш. И. *"Определение параметров аппроксимации комплексной нелинейности ретранслятора в системах связи с МДЧР"*. − Межвузовский сборник. − Пензенский политехнический институт. 1982. С. 67−71.
[5]. Shimbo O. *"Effects of intermodulation, AM−PM conversion, and additive noise in multicarrier TWT systems"*. //Proceedings of the IEEE. 1971. V. 59. № 2. P. 230−238.
[6]. Fuenzalida J. C., Shimbo O., Cook W. L. *"Time−domain analysis of intermodulation effects caused by nonlinear amplifiers"*. //Comsat technical review. 1973. V. 3. № 1.
[7]. Соболь И. М., Статников Р. Б. *"Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями"*. – М.: Наука. 1981.

ABSTRACT

DEVELOPING ALGORITHM FOR BUILDING REGRESSION POLYNOMIAL TO APPROXIMATE NONLINEAR CURVE OF TRANSMISSION FUNCTION OF VIBA POWER AMPLIFIER USING MULTI-PURPOSE OPTIMIZATION METHOD

This paper presents the algorithm for building regression polynomial to approximate the nonlinear curve of the transmission function of viba power amplifier using a multi-purpose optimization method based on the experimental data for amplitude characteristics (AX) and phase (FAX) of the nonlinear microwave power amplifier. The multi-purpose optimization method is solved by including the following criteria: (1) Sum of squares of error at experimental points; (2) The maximum deviation (h) of the regression characteristic from the experimental line; (3) The total area (S) is biased by the regression and experimental characteristics. These purposes are almost opposite to each other, achieving one purpose will lose another. The author uses the Pareto set and the conversation method to find a better solution than the conventional polynomial regression method. The found approximation regression polynomial is used to calculate the power of the useful and intermodulation components. The author has developed a software module in the MATLAB environment to maximize the automation of the steps.

Keywords: Complex nonlinearity; Power amplifier; Characteristic approximation; Intermodulation distortion.

Nhận bài ngày 30 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 30 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: [1]Bộ môn Kỹ thuật điện, điện tử, Khoa Điện – Điện tử, Đại học Thủy lợi.
[2]Viện Ra đa, Viện KHCNQS.
*Email: cuonglq@tlu.edu.vn.