NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG MOSFET CÔNG SUẤT ĐỂ THIẾT KẾ MÔ ĐUN CHUYỂN MẠCH CAO ÁP TRONG MÁY PHÁT RA ĐA

Nguyễn Văn Hùng*, Nguyễn Trung Thành, Nguyễn Phi Điều,
Kim Đức Hiệp, Giang Văn Thế

Tóm tắt: *Bài báo trình bày giải pháp kỹ thuật sử dụng MOSFET công suất, thiết kế mô đun chuyển mạch để điều chế xung cao áp cho các bộ khuếch đại siêu cao tần công suất lớn trong máy phát đài ra đa. Trên cơ sở phân tích mô hình chuyển mạch và thông số kỹ thuật đặc trưng của MOSFET ảnh hưởng trực tiếp đến các tham số xung điều chế, các nghiên cứu, tính toán đã thực hiện cho phép ghép nối tiếp các MOSFET công suất để làm việc với nguồn điện thế cao đến hàng ki lô vôn tạo ra các xung cao áp có biên độ ổn định, độ rộng xung nhỏ. Kết quả đưa ra sơ đồ thực nghiệm, lựa chọn linh kiện, mô phỏng và đánh giá chất lượng.*

Từ khóa: Cao áp; MOSFET công suất; Xung điều chế máy phát, ra đa.

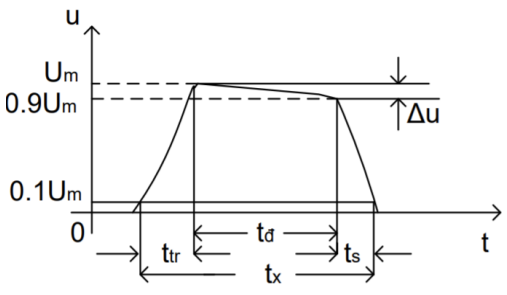
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bộ khuếch đại siêu cao tần trong máy phát đài ra đa công suất lớn thường sử dụng đèn Klistron, đèn sóng chạy (TWT) hoặc các đèn dao động magnetron [5-8]. Các bộ khuếch đại công suất này cần có xung cao áp độ rộng nhỏ, biên độ lớn để điều khiển. Khối điều chế thường được thiết kế sử dụng các đèn điện tử chân không cho phép làm việc ổn định trong điều kiện điện áp cao. Tuy nhiên, các thiết kế này yêu cầu nhiều nguồn nuôi cho các mạch phụ trợ, mạch tiền điều chế phức tạp, kích thước cồng kềnh và tiêu tốn công suất lớn. Mặt khác, các đèn điện tử hiện nay không được cung cấp phổ biến nữa.

Để khắc phục các nhược điểm đã chỉ ra, đã có một số nghiên cứu ứng dụng bán dẫn để thiết kế khối điều chế [1, 3, 12, 13]. Trong đó, [1, 3] đã phân tích giải pháp và sử dụng MOSFET tạo ra các xung rất hẹp, có biên độ lớn hơn 1 kV, nhưng dòng xung khá nhỏ không đáp ứng được các yêu cầu xung điều chế cao áp cho các đèn khuếch đại Klistron, TWT. Ở nghiên cứu khác, [12, 13] sử dụng các mô đun IGBT tích hợp cho phép làm việc được trong điều kiện điện áp cao lên đến vài kV, dòng xung đến hàng trăm ampe. Song, sử dụng mô đun IGBT cho phép làm việc với điện áp cao lên đến 6,5kV [9] nhưng độ rộng các sườn xung và độ trễ quá lớn không phù hợp với tham số các bộ điều chế có rộng rộng xung nhỏ.

2. CHUYỂN MẠCH CAO ÁP DÙNG MOSFET

Yêu cầu cần thiết kế các mô đun chuyển mạch cao áp sử dụng cho các bài toán đặt ra của [5,6,7,8], có dạng xung đầu ra với các tham số chính cho trên hình 1.

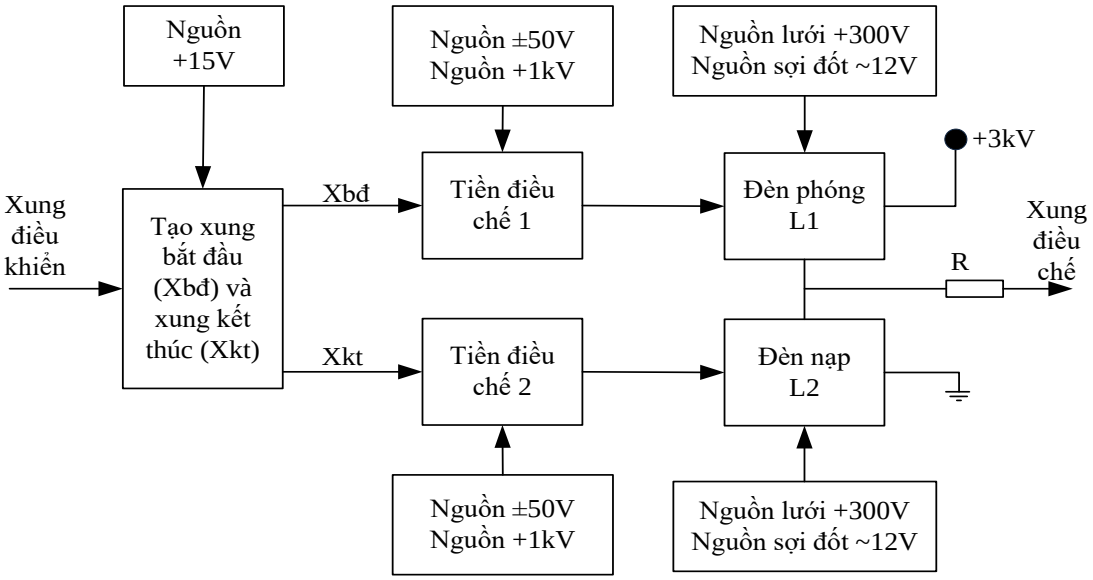


Tham số chính:
- Um: (2,5 – 3,0)kV;
- Δu < 200V;
- Sườn trước t_{tr} < 100ns;
- Sườn sau t_s < 500ns;
- Chu kỳ lặp: Thay đổi được
- Dòng xung I_P: 15A

Hình 1*. Dạng xung điều chế.*

Sơ đồ khối của bộ tạo xung điều chế sử dụng đèn điện tử [5-8] trên hình 2, cho thấy cần nhiều mạch phụ trợ và nguồn nuôi cho 2 đèn điều chế L1, L2 làm cho khối điều chế trở lên cồng kềnh,

giảm hiệu suất. Dưới đây bài báo phân tích mô hình làm việc ở chế độ chuyển mạch của MOSFET và thiết kế mô đun chuyển mạch cao áp làm nền tảng xây dựng bộ điều chế bán dẫn dùng MOSFET.



***Hình 2**. Sơ đồ khối bộ điều chế dùng đèn điện tử.*

2.1. Mô hình chuyển mạch của MOSFET

Mô hình làm việc ở chế độ chuyển mạch của MOSFET được thể hiện trên hình 3 [14]. Các tụ ký sinh giữa các cực được tính toán thông qua các tham số điện dung đầu vào C_{ISS}, điện dụng đầu ra C_{OSS} và điện dung chuyển đổi ngược C_{RSS}. Các giá trị này được các nhà sản xuất công bố trong các tài liệu của linh kiện. Theo đó:

$$C_{GD} = C_{RSS} \quad (1)$$

$$C_{GS} = C_{ISS} - C_{RSS} \quad (2)$$

$$C_{DS} = C_{OSS} - C_{RSS} \quad (3)$$

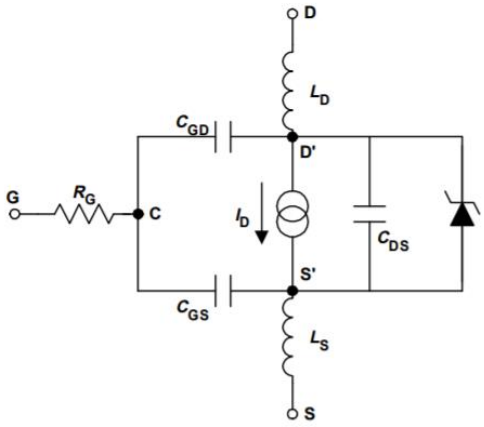
Giới hạn độ dốc xung điều khiển của MOSFET [14]:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{Limit} = \frac{V_{TH} - 0,007.(T_J - 25)}{R_{G(\text{int})}.C_{GD}} \quad (4)$$

Vì giá trị của $0,007.(T_J - 25)$ rất nhỏ, ta có thể tính xấp xỉ:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{Limit} = \frac{V_{TH}}{R_{G(\text{int})}.C_{GD}} \quad (5)$$

Trong đó: V_{TH} là điện áp ngưỡng mở; T_J là nhiệt độ tiếp giáp khi làm việc; $R_{G(int)}$ là điện trở nội ngõ vào cực cửa, giá trị này một số hãng cung cấp vào khoảng 1,5 Ω. Khi xem xét mô hình chuyển mạch của MOSFET, mục tiêu là thời gian chuyển trạng thái của van diễn ra trong thời gian ngắn nhất. Điện dung các tụ ký sinh nối giữa các cực của MOSFET tác động trực tiếp đến các quá trình phóng nạp ảnh hưởng thời gian chuyển mức điện áp trên các tụ ký sinh.

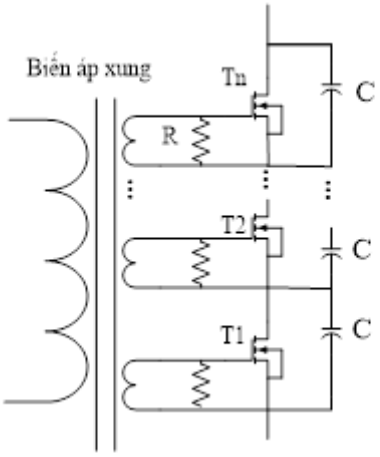


***Hình 3**. Mô hình chuyển mạch của MOSFET.*

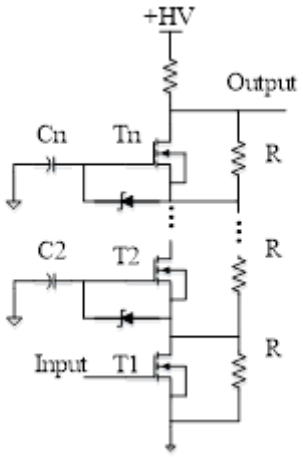
2.2. Thiết kế mô đun chuyển mạch cao áp dùng MOSFET

Các MOSFET đơn làm việc ở chế độ chuyển mạch thường có các tham số độ rộng sườn trước, sườn sau rất nhỏ [1] nhưng bị hạn chế dải điện áp làm việc, thường đến vài trăm vôn. Do đó, để thiết kế các mô đun chuyển mạch có thể làm việc ở điện áp cao, theo [1, 2] có thể ghép nối tiếp các MOSFET với nhau để tạo ra một mô đun chuyển mạch cao áp. Điện áp làm việc tối đa của mỗi MOSFET là U0, mắc nối tiếp n van và cân bằng điện áp trên mỗi van theo sơ đồ hình 4, thì điện áp làm việc tối đa của mô đun là:

$$U_{max} = n.U_0 \text{ (V)} \quad (6)$$



a. Điều khiển bằng biến áp xung



b. Điều khiển không sử dụng biến áp xung

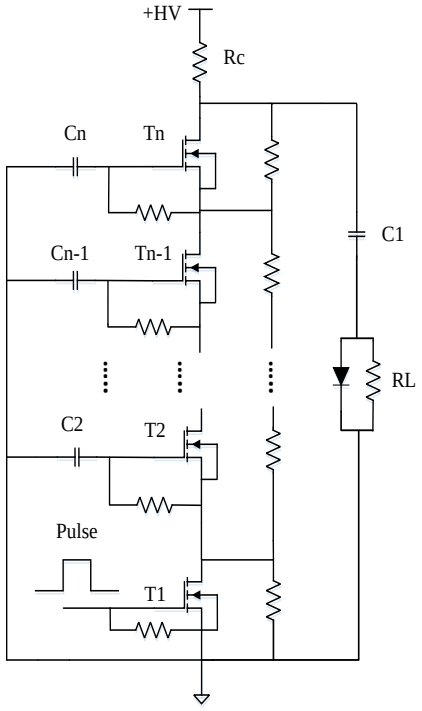
***Hình 4.** Sơ đồ điều khiển các MOSFET mắc nối tiếp.*

Việc điều khiển các MOSFET mắc nối tiếp đồng thời, có thể sử dụng sơ đồ ghép cách ly quang hoặc dùng biến áp xung có nhiều cuộn thứ cấp cách ly cao áp với nhau như trên hình 4a [2, 3]. Ở hình 4b, sơ đồ mắc nối tiếp các van bán dẫn cho phép điều khiển chỉ với một đầu vào, do vậy bộ điều khiển được thiết kế đơn giản hơn rất nhiều, không đòi hỏi ghép cách ly [3, 4].

Khi mắc nối tiếp nhiều MOSFET thì ta được mô đun làm việc ở điện áp cao hơn, tuy nhiên độ rộng sườn trước và sườn sau của xung đầu ra cũng tăng theo số lượng MOSFET mắc nối tiếp và biên độ điện áp cũng giảm do rơi trên các van tăng [2]. Trong thực tế, ta cần hài hoà cả yếu tố an toàn khi làm việc ở điện áp cao và chất lượng xung đầu ra.

Trên hình 5 biểu diễn sơ đồ thực nghiệm với chuỗi nối tiếp n transistor IRF840 với các tham số chính gồm [10]: (Điện áp U_{DSMAX} = 500 V; dòng cực máng $I_{D\text{-}Pulse}$ = 32 A; trở dẫn r_{DSOn} = 0,85 Ω; điện áp ngưỡng mở cực tiểu: V_{TH} = 2 V; độ rộng sườn trước: 23 ns; sườn sau: 20 ns (Khi V_D = 250 V và I_D = 8 A); điện dung chuyển đổi ngược C_{RSS} = 120 pF). Như vậy, với yêu cầu làm việc ở 3 kV, thay vào (6) ta cần mắc nối tiếp ít nhất n = 6 van và thay các giá trị vào biểu thức (5) ta được: Trên hình 5 biểu diễn sơ đồ thực nghiệm với chuỗi nối tiếp n transistor IRF840 với các tham số chính gồm [10]: (Điện áp U_{DSMAX} = 500 V; dòng cực máng $I_{D\text{-}Pulse}$ = 32 A; trở dẫn r_{DSOn} = 0,85 Ω; điện áp ngưỡng mở cực tiểu: V_{TH} = 2 V; độ rộng sườn trước: 23 ns; sườn sau: 20 ns (Khi V_D = 250 V và I_D = 8 A); điện dung chuyển đổi ngược C_{RSS} = 120 pF). Như vậy, với yêu cầu làm việc ở 3 kV, thay vào (6) ta cần mắc nối tiếp ít nhất n = 6 van và thay các giá trị vào biểu thức (5) ta được:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{MAX} \approx 11{,}1 \text{ (V/ns)} \qquad (7)$$



Hình 5. *Sơ đồ mắc nối tiếp các MOSFET.*

Với xung điều khiển có biên độ 15 V, tốc độ tăng trưởng của xung điều khiển không vượt quá (7), ta tính được độ rộng sườn trước không được nhỏ hơn 1,35 ns. Điều này hoàn toàn phù hợp với điều kiện kỹ thuật của các bộ tạo xung điều khiển thông thường, do vậy việc chọn mắc nối tiếp từ 6 van IRF840 trở lên có thể xây dựng mô đun chuyển mạch cao áp đáp ứng được điều kiện điện áp 3 kV của bài toán đặt ra.

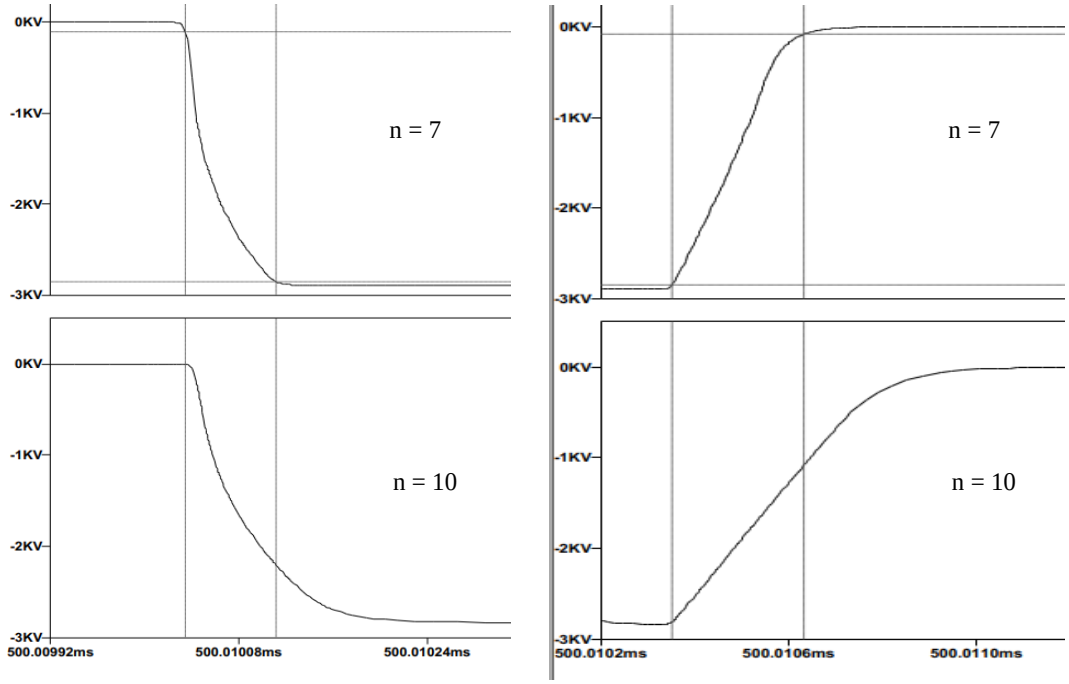
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng theo sơ đồ hình 5 với số lượng MOSFET (n) thay đổi, xung đầu ra nhận được trên tải được thể hiện trên hình 6. Với dòng xung trên tải 15A tương đương với đầu vào cực điều chế của đèn Klistron trong nghiên cứu. Hình ảnh xung ngược cực tính là do thực hiện trên phần mềm mô phỏng không hỗ trợ phương pháp đo dùng 2 chân đo độc lập, trong thực tế đo ngược lại giữa 2 cực của tải, ta sẽ có dạng xung như trên hình 1.

Khi số lượng MOSFET n = 7 (hình trên) độ rộng xung sườn trước 69 ns và sườn sau 289 ns, khi chọn n = 10 (hình dưới) độ rộng xung sườn trước 96 ns và sườn sau 480 ns. Biên độ xung đầu ra khi số lượng MOSFET khi n = 10 đạt được là 2,78 kV trong khi n = 7 đạt được 2,92 kV. Ta có nhận xét rằng, khi tăng số MOSFET thì mỗi van chịu một điện áp nhỏ hơn làm tăng mức độ an toàn của các van nhưng chất lượng của xung đầu ra giảm. Song, với số lượng đã chọn để mô phỏng, đáp ứng được yêu cầu của bài toán đặt ra.

Như vậy, phương pháp ghép nối tiếp nhiều MOSFET để thiết kế mô đun chuyển mạch cao áp đáp ứng được các yêu cầu của bộ điều chế cho các đèn khuếch đại trong máy phát đài ra đa làm giảm kích thước và công suất tiêu tán so với các sản phẩm hiện có sử dụng các đèn điện tử.

Kết quả nhận được cho thấy nội dung nghiên cứu cho phép thiết kế các bộ điều chế cao áp dùng bán dẫn có nhiều ưu điểm so với phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, vấn đề đặt ra hướng nghiên cứu cần tính toán xác định giới hạn số lượng MOSFET có thể ghép nối được, ngưỡng điện áp làm việc tối đa và tối ưu theo các yêu cầu cụ thể.



a. Giản đồ sườn trước. *b. Giản đồ sườn sau.*

***Hình 6**. Kết quả mô phỏng xung điều chế sử dụng các MOSFET.*

4. KẾT LUẬN

Giải pháp ghép nối tiếp các MOSFET để chế tạo mô đun chuyển mạch làm việc trong điều kiện điện áp cao, với một xung điều khiển duy nhất phù hợp với yêu cầu bài toán thiết kế bộ điều chế máy phát của đài ra đa dùng công nghệ bán dẫn. Giải pháp này làm tăng tính linh hoạt, giảm kích thước và các mạch phụ trợ, linh kiện phổ biến giúp công tác bảo trì bảo dưỡng được dễ dàng và thuận lợi.

Kết quả nghiên cứu làm cơ sở để thiết kế bộ điều chế cao áp và các khối chức năng khác trong hệ thống máy phát đài ra đa trên nền tảng bán dẫn nói chung và MOSFET công suất nói riêng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sung-Roc Jang, Hong-Je Ryoo, Gennadi Goussev, Geun Hie Rim, *"Comparative Study of MOSFET and IGBT for High Repetitive Pulsed Power Modulators"*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 40, NO. 10, OCTOBER 2012.

[2]. Herbert L.Hess *"Transformerless Capacitive Coupling of Gate Signals for Series Operation of Power MOS Devices"* 0885–8993/00$10.00 © 2000 IEEE (2000).

[3]. R.Jacob Baker *"Applying Power MOSFETs to the Design of Electronic and Electro-Optic Instrumentation "* Thesis, Las Vegas 333 PUBLICATIONS 3,808 CITATIONS (1993).

[4]. Muhammad H.Rashid, *"Power Electronics Handbook" Academic Press* – 1999.

[5]. Cục Kỹ thuật PKKQ "*Thuyết minh kỹ thuật đài ra đa chỉ thị cho hoả lực*", 2005.

[6]. Cục Kỹ thuật HQ "*Thuyết minh kỹ thuật đài ra đa cảnh giới biển*", 2000.

[7]. Cục Kỹ thuật PKKQ "*Thuyết minh kỹ thuật đài ra đa cảnh giới phòng không*", 2012.

[8]. Cục Kỹ thuật HQ "*Thuyết minh kỹ thuật đài ra đa chỉ thị cho hoả lực*", 2015.

[9]. Nguyễn Văn Hùng *"Thiết kế, chế tạo khối ổn định biên độ xung điều chế cho máy phát đài ra đa"* TC. Nghiên cứu KHCNQS, số 62 (2019), tr.211-216.

[10]. https://www.vishay.com/docs/91070/sihf840.pdf

[11]. https://eandc.ru/pdf/lampa/gmi-42b.pdf

[12]. Shan Yin, King Jet Tseng, "*Design of High-Speed Gate Driver to Reduce Switching Loss and Mitigate Parasitic Effects for SiC MOSFET*", IET Power Electronics, April 2017.
[13]. Shan Yin, King Jet Tseng, "*Experimental Comparison of High-Speed Gate Driver Design for 1.2-kV/120-A Si IGBT and SiC MOSFET Modules*" IET Power Electronics, July 2017.
[14]. Laszlo Balogh, "*Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits*" Application Report, SLUA618A–March 2017–Revised October 2018.

ABSTRACT

APPLYING POWER MOSFETS TO DESIGN
HIGH VOLTAGE SWITCH MODULE IN RADAR TRANSMITTER

This paper presents technical solutions using power MOSFETs to design switching modules for high-voltage modulator for high-power microwave amplifiers in radar transmitters. On the basis of analysis of switching model and characteristic specifications of MOSFETs that directly affect modulation pulse parameters, studies and calculations have been performed to allow serial coupling of power MOSFETs to make a high-voltage power MOSFETs module. The results give experimental diagrams, component selection, simulation and quality assessment.

Keywords: High voltage; Power MOSFET; Transmitter modulation pulse; Military radar.

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: Viện Ra đa, Viện KH – CN quân sự.
*Email: hungnv0401@gmail.com.