

MÔ HÌNH HÓA CÁC BỘ NGUỒN XUNG FLYBACK TRONG PSPICE TRÊN CƠ SỞ MẠNG BỐN CỰC HAI CỬA CÁCH LY

Nguyễn Thị Thu Thảo*

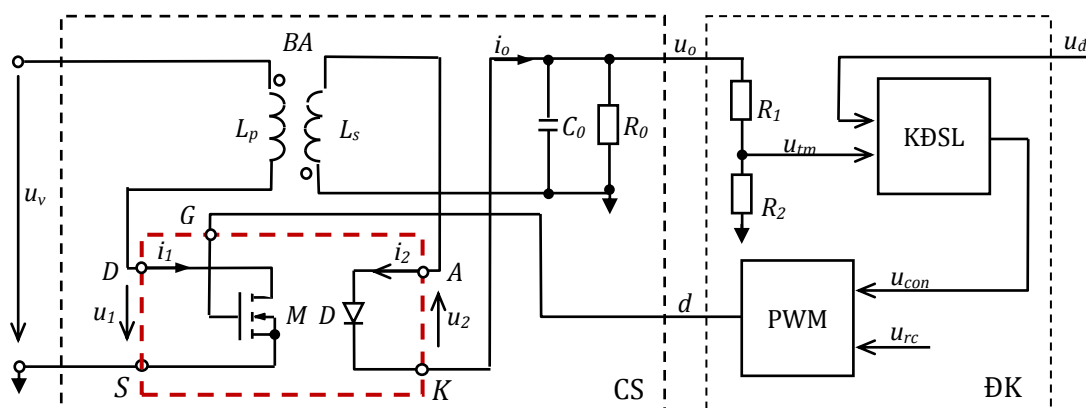
Tóm tắt: Bài báo trình bày một phương pháp mô hình hóa các bộ nguồn xung Flyback dưới dạng mạch điện tuyến tính hóa tương đương, trong đó khâu xung được tuyến tính hóa bằng mạng bốn cực hai cửa cách ly. Dựa trên mô hình đã xây dựng, đặc tính động học cơ bản của đối tượng được khảo sát trong PSPICE, tạo cơ sở để tổng hợp bộ điều khiển cho bộ nguồn.

Từ khóa: Mạng bốn cực; Bộ nguồn xung Flyback; PSPICE.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, các bộ nguồn xung kiểu Flyback được dùng ngày càng phổ biến. Việc nghiên cứu thiết kế và chế tạo chúng đang được nhiều tổ chức khoa học và doanh nghiệp về nguồn điện thứ cấp quan tâm. Cấu trúc chung của các bộ nguồn Flyback gồm hai khối chức năng: khối công suất (CS) và khối điều khiển (ĐK) [1, 2]. Các bộ nguồn này làm việc theo nguyên lý điều chế độ rộng xung PWM. Vì bộ nguồn Flyback là các hệ thống điều khiển phi tuyến, do đó, việc phân tích và tổng hợp chúng thường gặp không ít khó khăn. Mặc dù đều làm việc theo nguyên lý điều chế độ rộng xung, song các bộ nguồn Flyback khác hẳn các bộ nguồn xung phổ biến khác về cấu tạo. Sự khác biệt này làm cho việc ứng dụng trực tiếp các phương pháp mô hình hóa quen dùng gặp nhiều trở ngại, trong đó có việc mô hình hóa khâu xung. Trong các nghiên cứu [3, 4], các tác giả đều sử dụng phương pháp mạch điện tuyến tính hóa tương đương để tuyến tính hóa khâu xung ở quanh điểm làm việc. Nghiên cứu [5] sử dụng mô hình phần tử chuyển mạch trung bình khi mô hình hóa chip điều khiển TOP258YN của TOPSwitch [6]. Trong quá trình nghiên cứu, tác giả nhận thấy rằng, các chuyển mạch của các bộ nguồn Flyback tuy không liên hệ tĩnh điện với nhau nhưng có các trạng thái không tách rời nhau, do quá trình làm việc dẫn đến; vì thế có thể mô tả chúng như những phần tử của một mạng bốn cực hai cửa, trong đó, hai cực cách ly liên hệ với nhau bằng biến áp. Với cách tiếp cận như vậy, bài báo trình bày việc xây dựng mạch điện tuyến tính hóa tương đương của bộ nguồn Flyback trên quan điểm thay thế khâu xung bằng một mạng bốn cực hai cửa cách ly và khảo sát động học của nó bằng phần mềm mô phỏng PSPICE.

2. CẤU TRÚC VẬT LÝ CỦA BỘ NGUỒN FLYBACK



Hình 1. Sơ đồ khối chức năng của bộ nguồn Flyback.

Cấu trúc chung hay sơ đồ mạch điện nguyên lý đơn giản hóa của các bộ nguồn Flyback như hình 1 [1, 2], trong đó gồm hai khối chức năng: khối công suất CS và khối điều khiển ĐK. Khối CS còn được gọi là khối điều chế và được dùng để biến đổi điện áp nguồn vào một chiều u_v

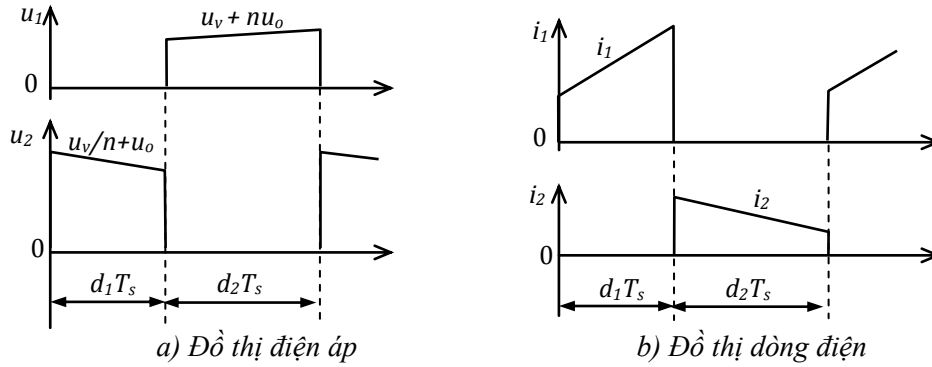
thành điện áp ra một chiều u_o có giá trị tỷ lệ với độ rộng hay hệ số điền d của dãy xung cấp vào cực của G của transistor trường M . Khối ĐK liên tục điều chỉnh độ rộng xung thông qua tham số d để ổn định điện áp ra u_o với các tính chất động học mong muốn.

Trên hình 1, diốt D và MOSFET M , sau đây được gọi là các chuyển mạch, cách ly tĩnh điện với nhau. Trong quá trình làm việc, các chuyển mạch của các bộ nguồn Flyback tuy không liên hệ tĩnh điện với nhau nhưng có các trạng thái không tách rời nhau. Vì thế có thể mô tả chúng như những phần tử của một mạng bốn cực hai cửa, trong đó, hai cực cách ly liên hệ với nhau bằng biến áp. Việc sắp xếp các phần tử của sơ đồ mạch điện nguyên lý như trong hình 1 cho thấy điều này.

3. XÂY DỰNG MẠNG BỐN CỰC HAI CỬA CÁCH LY

3.1. Mô hình hóa khâu xung bằng mạng bốn cực hai cửa cách ly

Các bộ nguồn Flyback thường được thiết kế để làm việc ở chế độ dòng điện liên tục, trong đó, dòng điện tải i_o luôn khác không. Trong trường hợp này, điện áp và dòng điện, tương ứng với các trạng thái của các chuyển mạch có dạng được biểu diễn bằng các đồ thị trong hình 2. Để tiện trình bày, độ rộng xung tức thời d được thay bằng d_1 và n là hệ số biến áp của máy biến áp BA.



Hình 2. Đồ thị điện áp và dòng điện của các chuyển mạch.

Để có mô hình tuyến tính hóa cần xác định trị trung bình của các điện áp này và tương quan giữa chúng. Trị trung bình trong mỗi chu kỳ làm việc T_s của các điện áp đó, tương ứng là $u_1(t)_{T_s}$ và $u_2(t)_{T_s}$ có thể được xác định theo các đồ thị trong hình 2a và được biểu diễn bằng các biểu thức sau:

$$u_1(t)_{T_s} = d_2(u_v + nu_o) \quad (1)$$

$$u_2(t)_{T_s} = d_1 \left(\frac{u_v}{n} + u_o \right) \quad (2)$$

Chia biểu thức (1) cho (2) nhận được (3):

$$\frac{u_1(t)_{T_s}}{u_2(t)_{T_s}} = n \frac{d_2(t)}{d_1(t)} \quad (3)$$

Từ đó có quan hệ:

$$u_1(t)_{T_s} = n \frac{d_2(t)}{d_1(t)} u_2(t)_{T_s} \quad (4)$$

Ở xung quanh điểm làm việc, tương ứng với các độ rộng xung D_1 , các điện áp trung bình U_1 , U_2 và đối với một biến thiên nhỏ của độ rộng xung $\hat{d}$, sẽ có các biến thiên nhỏ của điện áp trung bình $\hat{u}_1$ và $\hat{u}_2$. Khi đó ta có các biểu thức sau:

$$d_1(t) = D_1 + \hat{d} \quad (5)$$

$$u_1(t)_{Ts} = U_1 + \hat{u}_1 \quad (6)$$

$$u_2(t)_{Ts} = U_2 + \hat{u}_2 \quad (7)$$

Gán các giá trị này vào (4) nhận được:

$$U_1 + \hat{u}_1 = n \frac{D_2 - \hat{d}}{D_1 + \hat{d}} (U_2 + \hat{u}_2) \quad (8)$$

Khai triển biểu thức trên và bỏ qua các thành nhỏ bậc hai $\hat{u}_1 \hat{d}$ và $\hat{u}_2 \hat{d}$, nhận được:

$$(U_1 + \hat{u}_1) D_1 + U_1 \hat{d} = n \left[(U_2 + \hat{u}_2) D_2 - U_2 \hat{d} \right] \quad (9)$$

Ở chế độ xác lập, các biến thiên nhỏ đều bằng 0, do đó theo (9) có:

$$U_1 D_1 = n U_2 D_2 \quad (10)$$

Thế U_2 theo U_1 từ biểu thức (10) vào (9) và sắp xếp lại, nhận được:

$$(U_1 + \hat{u}_1) = \frac{n}{D_1} \left[(U_2 + \hat{u}_2) D_2 - \hat{d} \left(\frac{D_1}{n D_2} U_1 + \frac{U_1}{n} \right) \right] \quad (11)$$

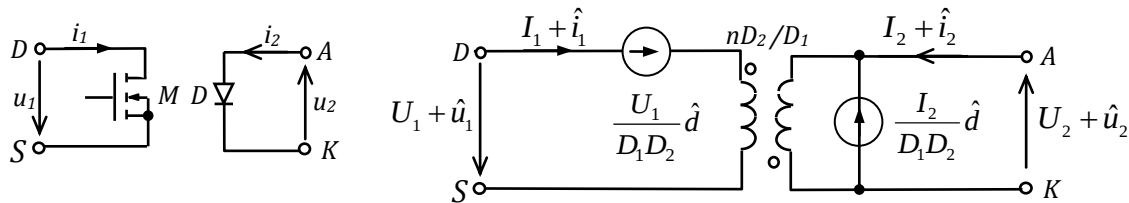
Rút U_1 trong biểu thức (11) ra ngoài ngoặc và có $D_1 + D_2 = 1$, tương ứng với chế độ dòng liên tục, nhận được:

$$U_1 + \hat{u}_1 = \frac{n D_2}{D_1} (U_2 + \hat{u}_2) - \frac{\hat{d}}{D_1 D_2} U_1 \quad (12)$$

Thực hiện các bước tương tự như trên đối với đồ thị dòng điện trong hình 2b ta nhận được:

$$I_2 + \hat{i}_2 = \frac{n D_2}{D_1} (I_1 + \hat{i}_1) - \frac{\hat{d}}{D_1 D_2} I_2 \quad (13)$$

Hai biểu thức (12) và (13) biểu diễn các điện áp và dòng điện của một mạng bốn cực có hai cửa liên hệ với nhau bằng biến áp với hệ số biến áp bằng $\frac{n D_2}{D_1}$. Sơ đồ mạch điện tương đương của bộ nguồn Flyback thể hiện trong hình 3.



a) Khâu xung phi tuyến

b) Mạch điện tuyến tính hóa tương đương

Hình 3. Sơ đồ mạch điện tương đương của bộ nguồn Flyback.

3.2. Hàm truyền đạt của khối công suất bộ nguồn Flyback

Thay cặp $M-D$ trong hình 1 bằng phần mạch trong hình 3b nhận được sơ đồ mạch điện tuyến tính tương đương của khối công suất của bộ nguồn Flyback trong hình 4.

Theo đó, có thể dễ dàng rút ra hàm truyền của khối công suất dạng (14).

$$W(s) = \frac{U_o(s)}{D(s)} \quad (14)$$

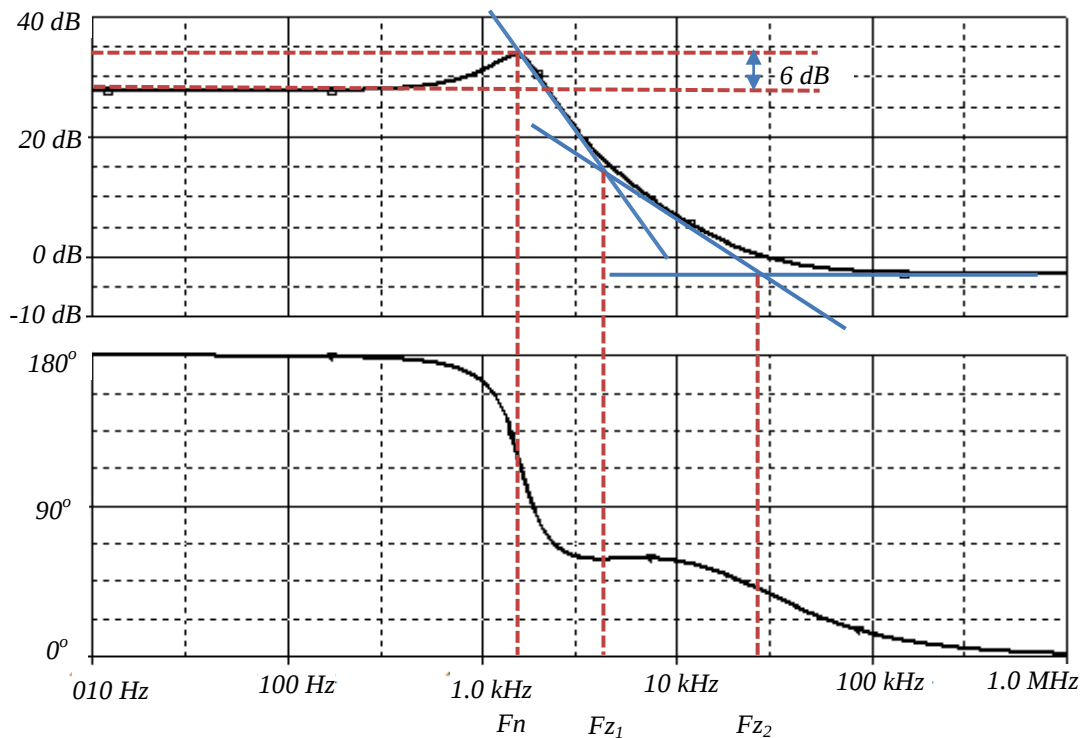
trong đó, hệ số biến áp $n = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} = 2$, và coi $U_1 = U_v = 24 \text{ V}$, vì điện áp trung bình trên điện cảm L_p bằng không và bỏ qua sụt áp trên R_{in} .

Hệ số truyền k_U và k_I của nguồn điện áp E_{dd} và dòng điện G_{dd} , có thể được xác định theo sơ đồ tương đương, với $I_2 = I_o$ ở chế độ xác lập và tương ứng bằng:

$$k_U = \frac{U_1}{nD_1D_2} = \frac{24}{2 \times 0,5 \times 0,5} = 48, \text{ và } k_I = \frac{I_2}{D_1D_2} = \frac{2}{0,5 \times 0,5} = 8 \quad (16)$$

Thế các giá trị này vào mô hình và thực hiện mô phỏng, ở chế độ quét tần số đối với nguồn xoay chiều AC, nhận được các đồ thị Bode của đặc tính biên-tần và pha-tần trong hình 6. Các đặc tính này có thể được dùng trực tiếp để tổng hợp bộ điều khiển trong PSPICE, hoặc rút ra hàm truyền của khối công suất (14).

Đồ thị biên - tần và pha - tần cho thấy hàm truyền của bộ biến đổi Flyback có một cực kép, ở tần số $F_n = 1500 \text{ Hz}$; nghiệm thứ nhất ở tần số $Fz_1 = 3300 \text{ Hz}$ và nghiệm thứ hai ở tần số $Fz_2 = 24500 \text{ Hz}$.



Hình 6. Đặc tính biên - tần và pha - tần của bộ biến đổi Flyback.

Như vậy, bộ biến đổi gồm 3 khâu như sau:

- 1) Khâu dao động bậc 2 có hàm truyền H_1 :

$$H_1(s) = \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 + 2\xi\omega_n s + s^2} \quad (17)$$

Điểm dao động ở lân cận điểm Peak có tần số dao động tự nhiên $F_n = 1500 \text{ Hz}$ (hay $\omega_n = 2\pi F_n = 9400 \text{ rad/s}$). Khoảng chênh lệch biên độ tại điểm Peak và biên độ khi $f \rightarrow 0$ là 6 dB. Đặc tính của khâu dao động bậc 2 cho chúng ta biết hệ số suy giảm của khâu $\xi = 0,25$.

2) Khâu truyền thẳng, vì phân H_2 có điểm zero tại $F_{z1} = 3300 \text{ Hz}$

$$H_2(s) = \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) = \left(1 + \frac{s}{2\pi F_{z1}}\right) \quad (18)$$

3) Khâu truyền thẳng, vì phân H_3 có điểm zero tại $F_{z2} = 24500 \text{ Hz}$. Quan sát đặc tính biên - tần và pha - tần thấy rằng biên và pha tại điểm zero biến thiên nghịch nhau, do đó khâu vi phân mang dấu âm.

$$H_3(s) = \left(1 - \frac{s}{\omega_{z2}}\right) = \left(1 - \frac{s}{2\pi F_{z2}}\right) \quad (19)$$

4) Hệ số khuếch đại K của bộ biến đổi:

Hệ số K được xác định bằng cách quan sát đồ thị biên tần khi $\omega \rightarrow 0$. Đồ thị biên - tần cho thấy $\omega \rightarrow 0: L(\omega) = 28 \text{ dB} \Rightarrow 20 \log K = 28$ nên $K = 25,12$.

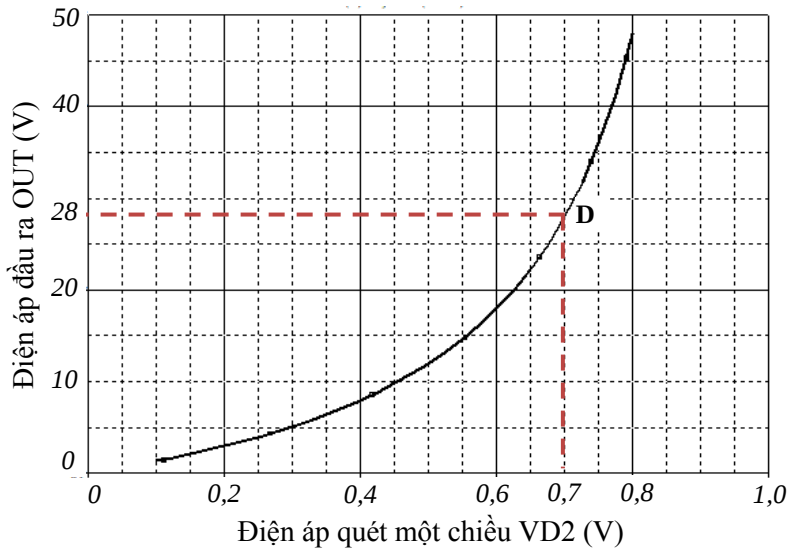
Vậy hàm truyền tổng quát của bộ biến đổi Flyback có dạng (20). Vì pha của bộ biến đổi bắt đầu từ 180° nên hàm truyền có dấu âm.

$$H(s) = -K * H_1(s)H_2(s)H_3(s) = -K * \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 + 2\xi\omega_n s + s^2} \left(1 + \frac{s}{2\pi F_{z1}}\right) \left(1 - \frac{s}{2\pi F_{z2}}\right) \quad (20)$$

Thay giá trị số nhận được hàm truyền dạng (21):

$$H(s) = \frac{0,699(s - 1,539 \times 10^{-5})(s + 2,073 \times 10^{-4})}{s^2 + 4722s + 8,883 \times 10^{-7}} \quad (21)$$

Ngoài ra, khi dùng mô hình mạch điện tương đương trong hình 5 ta còn có thể nhận được đồ thị của đặc tính điều khiển, là quan hệ giữa điện áp ra U_o với độ rộng xung D hay D_t , ở chế độ xác lập. Đặc tính này có dạng như trên hình 7 và nhận được bằng cách quét giá trị điện áp của nguồn VD2, là giá trị tương ứng với độ rộng xung xác lập D .



Hình 7. Đặc tính tĩnh của bộ biến đổi Flyback.

Để làm rõ tinh thần của phương pháp tuyến tính hóa, ta xem xét ở một số điểm làm việc như sau:

- Ở điểm làm việc tương ứng với $D = 0,5$ có: (1) Điện áp ra $U_o = 12\text{V}$; (2) hệ số truyền tĩnh bằng $K_o = U_o/D = 12/0,5 = 24$
- Ở điểm làm việc tương ứng với $D = 0,7$ có: (1) Điện áp ra $U_o = 28\text{V}$; (2) hệ số truyền tĩnh

$$\text{bằng } K_0 = U_0/D = 28/0,7 = 28/0,7 = 40$$

5. KẾT LUẬN

Ứng dụng mô hình mạng bốn cực hai cửa cách ly để tuyến tính hóa khâu xung cho phép xây dựng mạch điện tuyến tính tương đương và mô hình động học tuyến tính hóa của bộ nguồn Flyback; từ đó hoàn toàn xác định được hàm truyền của bộ nguồn trong môi trường PSPICE. Kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng nhận được là tiền đề cho việc nghiên cứu, thiết kế và thực thi bộ điều khiển nguồn Flyback dạng này. Việc khảo sát mô hình hóa bộ nguồn ở chế độ làm việc của dòng gián đoạn và tổng hợp bộ điều khiển sẽ được tác giả tiếp tục nghiên cứu và trình bày trong bài báo tiếp theo.

Lời cảm ơn: Tác giả cảm ơn Viện Tự động hóa KTQS đã hỗ trợ một phần cho nghiên cứu này. Tác giả chân thành cảm ơn những ý kiến đóng góp quý báu của TS. Nguyễn Văn Thuận, Học viện KTQS và TS. Vũ Quốc Huy, Viện Tự động hóa KTQS.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. П.Четти (1990), “Проектирование ключевых источников электропитания”, Пер. сангл. Издательство Энергоатомиздат, Москва.
- [2]. Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic (2020), “Fundamentals of Power Electronics”, 3rd Ed., Springer.
- [3]. C. Basso (2008), “Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs”, McGraw-Hill.
- [4]. Abraham I. Pressman, Keith Billings, and Taylor Morey (2009), “Switching Power Supply Design”, 3rd Ed., McGraw-Hill.
- [5]. Chen Y., Luo Q. (2012), “Modeling and Control Design of Flyback Power Supply System Based on Topswitch”, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 129. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [6]. Application Note, Power integrations, www.powerint.com.

ABSTRACT

MODELING OF FLYBACK SWITCHING POWER SUPPLIES IN PSPICE BASED ON ISOLATED 2-GATE QUADRUPLE NETWORKS

This paper presents a method of modeling Flyback switching power supplies as an equivalent linearized circuit, where the pulse block was linearized by an isolated 2-gate quadruple network. The basic dynamics of the object were investigated in PSPICE, creating the basis for synthesizing the controller for the power supply.

Keywords: Quadruple network; Flyback switching power supplies; PSPICE.

Nhận bài ngày 24 tháng 8 năm 2021

Hoàn thiện ngày 04 tháng 10 năm 2021

Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 10 năm 2021

Địa chỉ: Viện Tự động hóa KTQS/Viện KH-CN QS.

**Email:* thaocapit0@gmail.com.