

# XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ TUABIN ĐIỆN GIÓ SỬ DỤNG MÁY PHÁT ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

BUILDING A SLIDING MODE CONTROLLER FOR WIND GENERATOR TUABIN SYSTEM CONSIDERING DIFFERENT COMPONENTS

Nguyễn Ngọc Tuấn<sup>1</sup>, Trần Văn Tuyên<sup>1</sup>,  
Đào Sỹ Luật<sup>2</sup>, Trần Xuân Tinh<sup>3,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.35>

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt cho hệ máy phát điện tuabin gió khi tính đến nhiễu loạn gió. Các kết quả được khảo sát đánh giá bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển này đảm bảo được các yêu cầu chất lượng nguồn phát khi nối lưới, tối ưu hóa quá trình chuyển đổi năng lượng cho tuabin gió.

**Từ khóa:** Tuabin gió, điều khiển trượt, nối lưới.

## ABSTRACT

This paper presents the results of synthesizing the sliding mode controller for wind turbine generator system when taking into account wind disturbance. The survey results evaluated by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures the power quality requirements when connecting to the grid, optimizing the energy conversion process for wind turbines.

**Keywords:** Wind Turbine, sliding mode control, grid connection.

<sup>1</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự

<sup>2</sup>Trường Đại học Đồng Nai

<sup>3</sup>Học viện Phòng không Không quân

\*Email: tinhpk79@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/8/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/10/2022

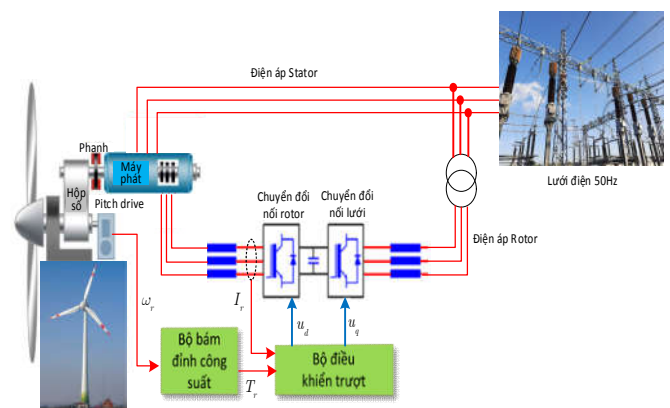
Ngày chấp nhận đăng: 27/10/2022

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Năng lượng gió là một trong những hướng nghiên cứu chính đang được các nhà khoa học quan tâm [1-6]. Đây là một trong những nguồn năng lượng tái tạo quan trọng có mặt khắp nơi trên trái đất; có thể cung cấp điện độc lập cho các khu vực xa xôi như hải đảo, biên giới. Máy phát điện gió hiện nay đang cung cấp một lượng công suất đáng kể bên cạnh các máy phát cơ bản như nhiệt điện và thủy điện... [6]. Trong đó máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu được các hãng sản xuất turbine gió sử dụng rộng rãi nhờ ưu thế: có độ tin cậy cao, tỉ lệ sản sinh năng lượng trên đơn vị trọng lượng lớn, hệ số công suất lớn hơn [2, 5].

## 2. MÔ HÌNH CƠ HỆ

Xét một mô hình hệ thống điện tổng quát như hình 1 [5].



Hình 1. Mô hình máy phát điện gió

### 2.1. Mô hình tuabin gió

Công suất gió tác động vào cánh quạt:

$$P_w = \frac{\rho S V^3}{2} \quad (1)$$

Sinh mô men xoắn làm quay tuabin:

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_Q(\lambda, \beta) \quad (2)$$

Công suất cơ chuyển đổi:

$$P_r = \omega_r \cdot T_r$$

$$P_r = \frac{\rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta)}{2} \quad (3)$$

Trong đó:

$C_Q(\lambda, \beta)$  là hệ số mô men

$C_p(\lambda, \beta)$  là hệ số công suất chuyển đổi

Cả mô men xoắn và công suất cơ chuyển đổi đều là hàm của tỉ số vận tốc rìa  $\lambda$  và góc chúc ngóc  $\beta$ . Tỉ số vận tốc rìa  $\lambda$  là tỉ số giữa vận tốc tại đỉnh rìa cánh quạt của tuabin gió và vận tốc gió, được tính như sau:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \quad (4)$$

Trong đó,  $\omega_r$  là vận tốc góc của rotor; R là bán kính cánh; V là vận tốc gió.

**2.2. Mô hình của máy phát đồng bộ**

Phương trình điện áp stato:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{p}{2} \omega_r \cdot \psi_q \\ u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\psi_q}{dt} - \frac{p}{2} \omega_r \cdot \psi_d \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:  $V_s, i_s, \psi$  lần lượt là điện áp, dòng điện và từ thông của stato trong hai mặt phẳng d, q;  $R_s$  là điện trở thuần của cuộn dây stato;  $p$  là số đôi cực;  $\omega_r$  là tốc độ quay của rotor.

Từ thông stato:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d \cdot i_{sd} + \phi_m \\ \psi_q = L_q \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó:  $\phi_m$  là từ thông tự cảm

Từ (5) và (6) có:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{p}{2} \omega_r \cdot L_q i_{sq} \\ u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{p}{2} \omega_r \cdot (L_d i_{sd} + \phi_m) \end{cases} \quad (7)$$

Có thể coi  $L = L_d = L_q$  khi đó (7) có thể viết lại như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_{sd} + \frac{p}{2} \omega_r i_{sq} + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_{sq} + \frac{1}{L} \phi_m \omega_r + \frac{p}{2} \omega_r i_{sd} + \frac{1}{L} u_q \end{cases} \quad (8)$$

Kết hợp với phương trình tốc độ quay của rotor có:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_{sd} + \frac{p}{2} \omega_r i_{sq} + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_{sq} + \frac{1}{L} \phi_m \omega_r + \frac{p}{2} \omega_r i_{sd} + \frac{1}{L} u_q \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_r}{J} - \frac{K_t i_q}{J} - \frac{B\omega_r}{J} \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó:  $K_t = \frac{3}{4} p \phi_m$

Đặt biến trạng thái:

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [i_{rd} \quad i_{rq} \quad \omega_r]^T$$

Có phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R_r}{L} x_1 + \frac{p}{2} x_2 x_3 + \frac{1}{L} u_d \\ \dot{x}_2 = -\frac{R_r}{L} x_2 + \frac{1}{L} \phi_m x_3 + \frac{p}{2} x_1 x_3 + \frac{1}{L} u_q \\ \dot{x}_3 = \frac{T_r}{J} - \frac{K_t}{J} x_2 - \frac{B}{J} x_3 \end{cases} \quad (10)$$

**3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT**

Chọn mặt phẳng trượt:

$$s_d = [x_1 - x_1^*] = 0; s_q = [x_2 - x_2^*] = 0$$

$$s_\omega = [x_3 - x_3^*] = 0$$

Trong đó:  $x_1^*, x_2^*, x_3^*$  là giá trị tham chiếu của biến trạng thái.

Để đảm bảo hệ thống ổn định thì mặt trượt phải thỏa mãn:

$$s_d \cdot \dot{s}_d < 0; s_q \cdot \dot{s}_q < 0; s_\omega \cdot \dot{s}_\omega < 0$$

Theo (10) có:

$$\frac{s_d}{L} \left[ -R_s x_1 + \frac{p}{2} x_2 x_3 - u_d - L \dot{x}_1^* \right] < 0 \quad (11)$$

Luật điều khiển theo trục d có dạng:

$$u_d = u_{d,eq} + u_{d,N} \quad (12)$$

Trong đó,  $u_{d,eq}$  là thành phần giữ cho biến trạng thái ở lại trên mặt trượt;  $u_{d,N}$  là thành phần tín hiệu làm cho biến trạng thái  $X$  tiến về mặt trượt.

$$u_{d,eq} = -\hat{R}_s x_1 + \frac{p}{2} \hat{L} x_2 x_3 - \hat{L} \dot{x}_1^* \quad (13)$$

$$u_{d,N} = -u_{d0} \operatorname{sgn}(s_d) \quad (14)$$

Theo (11) có:

$$\dot{s}_d = \frac{1}{\Delta L} \left[ -\Delta R_s x_1 - \Delta L \left( \dot{x}_1^* - \frac{p}{2} x_2 x_3 \right) \right] - \frac{1}{\Delta L} u_{d,N}$$

Như vậy để hệ ổn định thì:

$$u_{d0} > \left| -\Delta R_s x_1 + \Delta L \frac{p}{2} x_2 x_3 - \Delta L \dot{x}_1^* \right|$$

Tương tự với trục q:

$$u_{q,eq} = -\hat{R}_s x_2 + \frac{p}{2} (\hat{L} x_1 - \hat{\phi}_m) x_3 - \hat{L} \dot{x}_2^* \quad (15)$$

$$u_{q,N} = -u_{q0} \operatorname{sgn}(s_q) \quad (16)$$

Với

$$u_{q0} > \left| -\Delta R_s x_2 - \frac{p}{2} (\Delta L x_2 + \Delta \phi_m) x_3 - \Delta L \dot{x}_2^* \right|$$

Để điều khiển tốc độ quay, tiến hành thành lập luật điều khiển cho giá trị dòng tham chiếu  $i_q^*$

$$i_q^* = i_{q,eq}^* + i_{q,N}^* \quad (17)$$

Trong đó:

$$i_{q,eq}^* = \frac{1}{K_t} \left[ \hat{T}_r - \hat{B} x_3 - \hat{J} x_3^* \right] \quad (18)$$

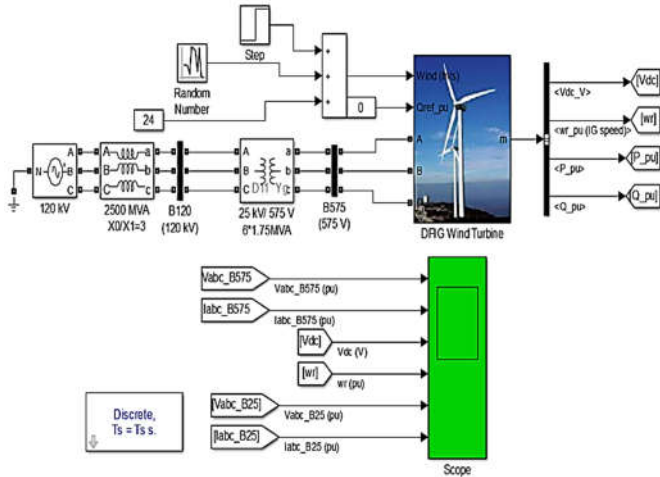
$$i_{q,N}^* = -i_{q0} \operatorname{sgn}(s_{\omega_r}) \quad (19)$$

Với

$$i_{q0} = \left| \frac{1}{K_t} [\Delta T_r - \Delta B - \Delta J \dot{x}_3^*] \right|$$

Dòng điện tham chiếu  $i_q^*$  chính là đầu vào cho bộ điều khiển dòng  $i_q$ .

**4. MÔ PHỎNG**



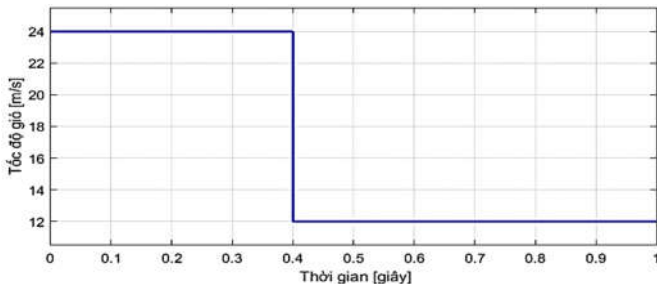
Hình 2. Mô hình mô phỏng hệ thống phát điện gió

Một máy phát điện gió 4KW được kết nối với hệ thống phân phối 25kV xuất điện cho lưới 120kV thông qua một trung chuyển 30km, 25kV. Turbine gió sử dụng máy phát điện đồng bộ. Cuộn dây stato được nối trực tiếp với lưới 50Hz. Bộ điều khiển trượt cho phép khai thác năng lượng tối đa từ gió khi tốc độ gió thấp bằng cách tối ưu hóa tốc độ turbine, đồng thời giảm thiểu ứng suất cơ học lên turbine khi gió giật. Trong mô phỏng, tốc độ gió được thay đổi từ 12m/s đến 24m/s. Thông số máy phát như sau:

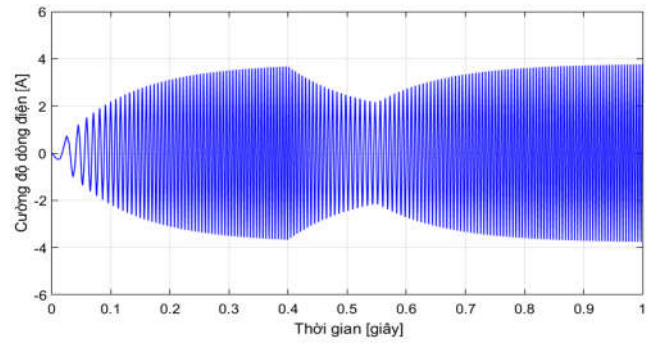
$R_s = 0,023\Omega$ ;  $R_r = 0,016\Omega$ ;  $L_s = 0,18H$ ;  $L_r = 0,16H$ ;  $p = 3$ ; công suất  $P = 14kW$ ; tần số  $f = 50Hz$ . Tiến hành mô phỏng cho các trường hợp sau:

**Trường hợp 1 :** Tốc độ gió đang từ 12m/s giảm xuống 8 m/s tại thời điểm 0,4 giây.

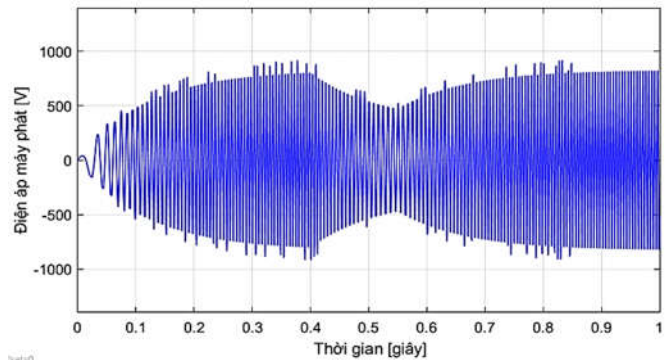
Khi tốc độ gió giảm, tốc độ turbine giảm theo làm cho công suất máy phát giảm 41%, lúc này góc nghiêng trục turbine thay đổi để ổn định công suất phát. Cường độ dòng điện, điện áp và công suất máy phát nhanh chóng ổn định trở lại sau khi có phản ứng với việc giảm tốc độ gió, thời gian quá độ nhỏ 0.4 giây.



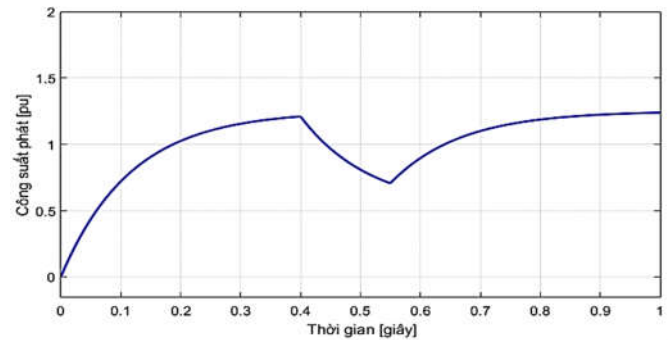
Hình 3. Tốc độ gió thay đổi



Hình 4. Cường độ dòng điện máy phát  $i_q$



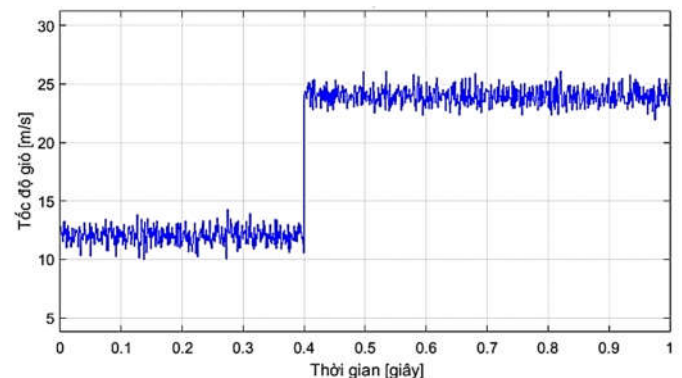
Hình 5. Điện áp máy phát



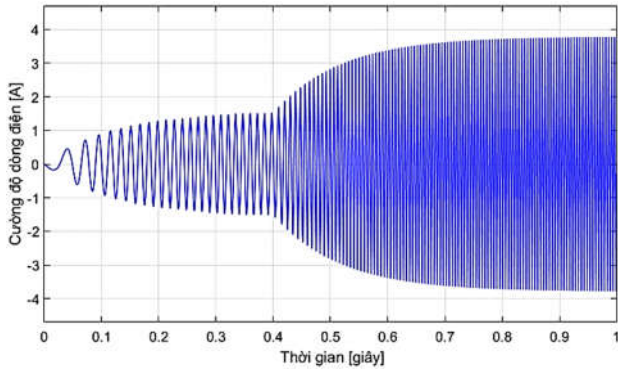
Hình 6. Công suất máy phát

**Trường hợp 2 :** Tốc độ gió tăng từ 12m/s lên 24m/s tại thời điểm 0,4 giây, kết hợp với nhiễu động gió ngẫu nhiên 0,5m/s.

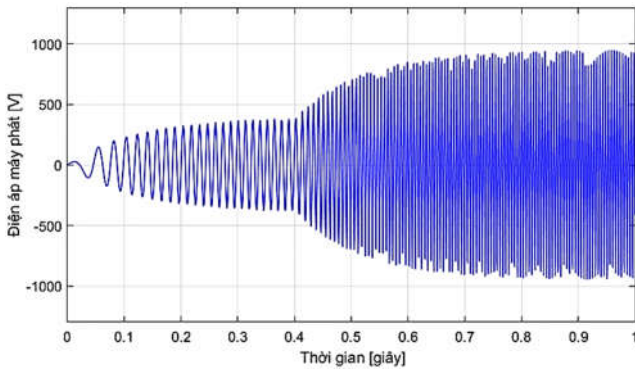
Khi có nhiễu động gió, điện áp máy phát có dao động. Tuy nhiên công suất máy phát không dao động, điện áp nối lưới có biên độ và tần số ổn định.



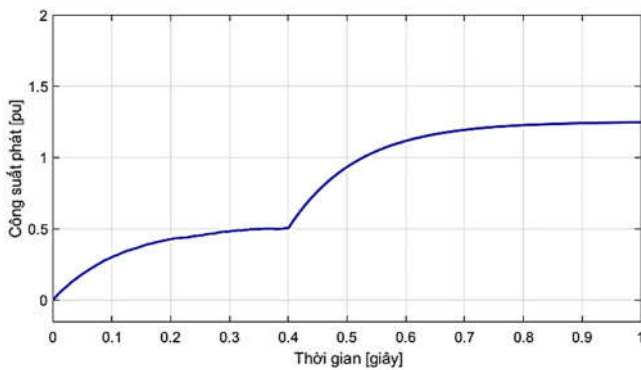
Hình 7. Tốc độ gió khi có nhiễu



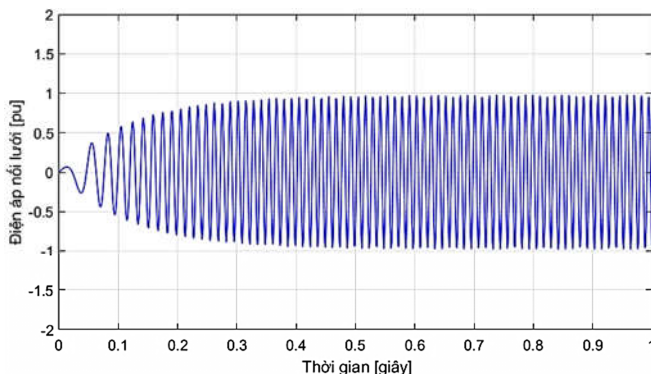
Hình 8. Cường độ dòng điện máy phát  $i_a$



Hình 9. Điện áp máy phát



Hình 10. Công suất máy phát



Hình 11. Điện áp nối lưới

**Nhận xét:**

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển trượt cho chất lượng điều khiển tốt. Trong điều kiện turbine gió chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến hệ

thống vẫn đảm bảo được độ ổn định điện áp và dòng điện khi nối lưới. Khi thay đổi tốc độ gió, công suất phát tăng nhưng nhanh chóng ổn định.

**5. KẾT LUẬN**

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp BDK trượt cho hệ máy phát điện turbine gió. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình cơ hệ, tìm luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua mô phỏng cho thấy khi tốc độ gió thay đổi, công suất và điện áp phát luôn giữ được ổn định, đảm bảo các yêu cầu khi nối lưới. So với các kết quả của các công bố trước đây [2, 5] cho thấy BDK đã nâng cao được chất lượng của hệ phát điện turbine gió thông qua các tiêu chí đánh giá, đó là: tính bền vững với nhiễu loạn của gió, đảm bảo khả năng ổn định tần số, điện áp, dòng điện khi nối lưới.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Ahmed G. Abo-Khalil, Saeed Alyami, Khairy Sayed, Ayman Alhejji, 2019. *Dynamic Modeling of Wind Turbines Based on Estimated Wind Speed under Turbulent Conditions*. Energies, 12, 1907; doi:10.3390/en12101907.

[2]. Nada Zine Laabidine, Afrae Errarhout, Chakib El Bakkali, Karim Mohammed, Badre Bossoufi, 2021. *Sliding mode control design of wind power generation system based on permanent magnet synchronous generator*. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 12, No. 1, pp. 393~403.

[3]. Yan Zhang, Zhengfan Liu, Zhong Yang, Haifei Si, 2016. *Robust Control of Wind Turbines by Using Singular Perturbation Method and Linear Parameter Varying Model*. Journal of Control Science and Engineering, Article ID 2830736.

[4]. M. A. Chowdhury, N. Hosseinzadeh, W. Shen, 2011. *Effects of wind speed variations and machine inertia constants on variable speed wind turbine dynamics*. Journal of Electrical Engineering..

[5]. Jacob Hostettler, Xin Wang, 2020. *Sliding mode control of a permanent magnet synchronous generator for variable speed wind energy conversion systems*. Systems Science & Control Engineering.

[6]. N V Zubova, V D Rudykh, 2019. *Optimization of power output for a wind turbine using methods of artificial intelligence*. International Scientific and Technical Conference Energy Systems..

**AUTHORS INFORMATION**

**Nguyen Ngoc Tuan<sup>1</sup>, Tran Van Tuyen<sup>1</sup>, Dao Sy Luat<sup>2</sup>, Tran Xuan Tinh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Military Technology Academy

<sup>2</sup>Dong Nai University

<sup>3</sup>Air Defense-Air Force Academy