

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
KHOA CƠ - ĐIỆN

**HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ
CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA**
*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation Engineering
(MEAE2025)*



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

KHOA CƠ – ĐIỆN

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ
CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA

*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation
Engineering*

(MEAE2025)

VỚI CHỦ ĐỀ :

“CÔNG NGHỆ VÀ NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO”

BAN TỔ CHỨC

1. GS.TS Trần Thanh Hải, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Trưởng ban
2. PGS.TS Nguyễn Thế Vinh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
3. PGS.TS Khổng Cao Phong, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
4. PGS.TS Triệu Hùng Trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
5. PGS.TS Nguyễn Ngọc Khánh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
6. TS Ngô Thanh Tuấn, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
7. PGS.TS Nguyễn Văn Xô, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
8. PGS.TS Đỗ Ngọc Anh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
9. PGS.TS Nguyễn Đức Khoát, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
10. PGS.TS Đỗ Như Ý, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
11. TS Nguyễn Thạc Khánh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
12. TS Phạm Thị Thủy, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
13. ThS Hà Văn Thủy, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
14. PGS.TS Trịnh Trọng Chương, Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội	Ủy viên
15. TS Lê Anh Tuấn, Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội	Ủy viên
16. PGS.TS Đỗ Anh Tuấn, Công ty CP Kỹ thuật Công nghiệp Á Châu	Ủy viên
17. GS.TS Đinh Văn Chiến, Hội khoa học và công nghệ mỏ Việt Nam	Ủy viên
18. TS Tạ Ngọc Hải, Hội khoa học và công nghệ mỏ Việt Nam	Ủy viên
19. PGS.TS Bùi Minh Định, Đại học Bách Khoa Hà Nội	Ủy viên
20. TS Trịnh Minh Hoàng, Đại học Bách Khoa Hà Nội	Ủy viên
21. PGS.TS Lê Thu Quý, Viện Nghiên cứu Cơ khí	Ủy viên
22. TS Nguyễn Lâm Khánh, Trường ĐH Giao thông vận tải	Ủy viên
23. TS Bùi Thanh Danh, Trường ĐH Giao thông vận tải	Ủy viên
24. TS Đỗ Trung Hiếu, Viện Cơ khí Năng lượng và Mỏ - TKV	Ủy viên
25. Ông Đoàn Việt Tuấn, Công ty than Mạo Khê – TKV	Ủy viên

BAN KHOA HỌC

1. GS.TS Trần Thanh Hải, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Trưởng ban
2. PGS.TS Nguyễn Thế Vinh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
3. PGS.TS Khổng Cao Phong, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
4. TS Ngô Thanh Tuấn, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
5. PGS.TS Đỗ Ngọc Anh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
6. PGS.TS Nguyễn Đức Khoát, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
7. PGS.TS Nguyễn Văn Xô, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
8. PGS.TS Đỗ Như Ý, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
9. TS Nguyễn Thạc Khánh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên

- | | |
|--|---------|
| 10. TS. Phạm Thị Thủy, Trường Đại học Mỏ - Địa chất | Ủy viên |
| 11. PGS.TS Trịnh Trọng Chương, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội | Ủy viên |
| 12. TS Nguyễn Lâm Khánh, Trường ĐH Giao thông vận tải | Ủy viên |
| 13. PGS.TS Đỗ Anh Tuấn, Công ty CP Kỹ thuật Công nghiệp Á Châu | Ủy viên |
| 14. GS.TS Đinh Văn Chiến, Hội khoa học và công nghệ mỏ Việt Nam | Ủy viên |

BAN BIÊN TẬP

- | | |
|-----------------------------|----------------|
| 1. PGS.TS Khổng Cao Phong | Trưởng ban |
| 2. TS Ngô Thanh Tuấn | Phó trưởng ban |
| 3. PGS.TS Nguyễn Viết Nghĩa | UV |
| 4. TS Nguyễn Thạc Khánh | Ủy viên |
| 5. PGS.TS Đặng Văn Chí | Ủy viên |
| 6. TS Phạm Thị Thủy | Ủy viên |
| 7. PGS.TS Đỗ Như Ý | Ủy viên |
| 8. PGS.TS Nguyễn Văn Xô | Ủy viên |
| 9. CV Trịnh Trọng An | Ủy viên |

BAN THƯ KÝ

- | | |
|---------------------------|----------------|
| 1. TS Ngô Thanh Tuấn | Trưởng ban |
| 2. TS Hồ Việt Bun | Phó Trưởng ban |
| 3. TS Phạm Thị Thanh Loan | Ủy viên |
| 4. ThS Nguyễn Tiến Sĩ | Ủy viên |
| 5. ThS Nguyễn Thanh Tùng | Ủy viên |
| 6. ThS Trần Viết Linh | Ủy viên |

BAN LỄ TÂN

- | | |
|-------------------------|----------------|
| 1. TS Đoàn Công Luận | Trưởng ban |
| 2. TS Đỗ Đức Thành | Phó Trưởng ban |
| 3. ThS Uông Quang Tuyến | Ủy viên |
| 4. CV Đào Thị Hiền | Ủy viên |
| 5. CV Nguyễn Thị Liên | Ủy viên |
| 6. ThS Đào Thị Thủy | Ủy viên |
| 7. KS Lê Thị Hồng Thắng | Ủy viên |

LỜI NÓI ĐẦU

Trong bối cảnh khoa học – công nghệ phát triển nhanh chóng và đóng vai trò trung tâm trong quá trình chuyển đổi công nghiệp, các lĩnh vực Cơ khí, Điện, Tự động hóa và Năng lượng tái tạo đang ngày càng khẳng định tầm quan trọng đối với sự phát triển bền vững của quốc gia. Những yêu cầu mới về tối ưu hóa năng lượng, tự động hóa hệ thống, ứng dụng trí tuệ nhân tạo và khai thác các nguồn năng lượng sạch đặt ra nhiệm vụ cấp thiết cho cộng đồng nghiên cứu trong nước phải không ngừng đổi mới tư duy và phương pháp tiếp cận.

Nhằm thúc đẩy trao đổi học thuật, công bố kết quả nghiên cứu và tăng cường liên kết giữa cơ sở đào tạo – viện nghiên cứu – doanh nghiệp, Trường Đại học Mở – Địa chất phối hợp với các đơn vị tổ chức Hội nghị khoa học toàn quốc về Cơ khí, Điện và Tự động hóa năm 2025 (MEAE2025) với chủ đề “Công nghệ và năng lượng tái tạo”. Hội nghị là diễn đàn khoa học uy tín, nơi tập hợp các công trình nghiên cứu mới, các giải pháp công nghệ tiên tiến và các hướng tiếp cận hiện đại trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng và phát triển xanh.

Ban Tổ chức tin rằng Tuyển tập công trình khoa học MEAE2025 sẽ là nguồn tư liệu có giá trị, phản ánh nỗ lực nghiên cứu nghiêm túc, mang tính học thuật và ứng dụng cao của đội ngũ các nhà khoa học Việt Nam. Các kết quả được công bố tại Hội nghị không chỉ đóng góp cho tri thức chung, mà còn gợi mở nhiều định hướng quan trọng phục vụ đào tạo, nghiên cứu và chuyển giao công nghệ.

Thay mặt Ban Tổ chức, chúng tôi xin trân trọng cảm ơn Đảng ủy, Hội đồng Trường, Ban Giám hiệu Trường Đại học Mở – Địa chất; các cơ quan, đơn vị phối hợp; các tác giả, nhà khoa học, nhà phản biện và doanh nghiệp đã đồng hành, hỗ trợ và đóng góp thiết thực cho sự thành công của Hội nghị.

Trân trọng.

TM. BAN TỔ CHỨC



PGS.TS Khổng Cao Phong

MỤC LỤC

1. Năng lượng tái tạo - Thực trạng và định hướng tương lai.....	1
2. Ứng dụng phương pháp số mô phỏng cogging torque của LSPMSM có xét đến ảnh hưởng của rãnh nghiêng Stato	5
3. Tối ưu hóa tham số bộ điều khiển lực khoan trên máy CNC bằng thuật toán di truyền.....	10
4. Tối ưu hóa tham số bộ điều khiển vị trí trên máy CNC bằng thuật toán di truyền	15
5. Giải pháp xử lý tự động quan trắc độ nghiêng lệch trụ điện gió trên bờ bằng máy toàn đạc không gương.....	20
6. Ảnh hưởng tổng trở sóng của cột tới quá điện áp sét trên đường dây truyền tải 220 kV ...	27
7. Tối ưu hoá tham số thiết kế trong Ansys Mechanical	35
8. Lắp đặt chống sét van kết hợp với cải thiện hệ thống nối đất nâng cao hiệu quả chống sét cho đường dây trung áp trên không tại Việt Nam	39
9. Tối ưu hóa thông số bộ lọc sóng hài của bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời công suất nhỏ kết nối với lưới điện hạ áp.....	46
10. Phân tích ứng suất, biến dạng của lõi rèn trong quá trình rèn biên dạng rãnh xoắn.....	52
11. Mạng nơ-ron tích hợp vật lý: tổng quan và ứng dụng trong công nghiệp năng lượng, quốc phòng và hàng không vũ trụ.....	55
12. Thiết kế bộ điều khiển lqr cho động cơ dc ứng dụng thuật toán tối ưu FA.....	61
13. Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp đệm và lớp hấp thụ của pin mặt trời màng mỏng $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$	68
14. Phát hiện vật thể lạ trên băng tải bằng mô hình học máy	74
15. Nghiên cứu ảnh hưởng độ nghiêng của tấm pin 2 mặt kính đến hiệu suất hệ thống điện mặt trời.....	81
16. Develop a LSTM model to forecast runoff flow in time series.....	85
17. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng cắt giảm công suất phát đến lcoe của dự án điện gió.....	91
18. Xây dựng phần mềm xây dựng kế hoạch phát điện bằng thuật toán quy hoạch động	97
19. Điều khiển tự động và nhận diện sản phẩm lỗi cho hệ thống chiết rót.....	104

20. Điều khiển Hybrid kết hợp Fuzzy Logic và PID ổn định mức nước bao hơi - công ty cổ phần nhiệt điện Quảng Ninh	111
21. Thiết kế xây dựng mô hình máy xét nghiệm sinh hóa ứng dụng quang phổ kế	119
22. Xây dựng hệ thống thu thập và phân tích dữ liệu động học của con lắc vật lý trong thời gian thực phục vụ giáo dục STEM	127
23. Đề xuất một dòng bộ biến đổi DC-DC mới cho các ứng dụng năng lượng tái tạo	131
24. Khử từ do nhiệt trong động cơ điện IPM: tổng quan nghiên cứu và mô phỏng điện – nhiệt	137
25. Thiết kế, chế tạo mạch đo và giám sát tự động điện trở cách điện mạng điện hỗn hợp mô hình lò	142
26. Công nghệ nén H264 và H265 trong hệ thống thông tin vô tuyến	147
27. Điều khiển phân bố công suất trong microgrid lai ghép DC/AC có tích hợp BESS	151
28. Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ xử lý từ nhiệt lên tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{max}$ của hợp kim từ cứng ALNICUC035TI5NB	161
29. Đánh giá độ chính xác hình học gia công bánh răng trụ răng thẳng bằng phương pháp cắt dây tia lửa điện EDM.....	170
30. Nghiên cứu lựa chọn thông số in và một số giải pháp nâng cao chất lượng sản phẩm trong máy in 3D FDM khổ rộng	175
31. Nghiên cứu các nguyên nhân gây ra rung động trong bơm ly tâm vận tải tro xỉ của nhà máy nhiệt điện và biện pháp khắc phục	180
32. Một số giải pháp cân bằng năng lượng cho tua bin gió có tốc độ gió phù hợp với tốc độ gió thấp tại Việt Nam.....	184
33. Nghiên cứu lực ma sát trong xy lanh khí nén không có cần piston	189
34. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của tải trọng động đến khả năng làm việc của chi tiết máy dạng trục và xác định tần số dao động riêng của các chi tiết này	192
35. Phương pháp xác định vận tốc dòng khí sau quạt hướng trục.....	196
36. Tính toán, mô phỏng dòng chảy trong phần dẫn dòng máy bơm ly tâm cột nước thấp chạy bằng sức gió, phục vụ bơm nước biển cho sản xuất muối.....	202

37. Thiết kế điều khiển chuyển động đa hướng cho robot tứ sử dụng bánh mecanum trong hệ robot song phương.....	208
38. Nghiên cứu thiết kế bộ bộ theo dõi sức khỏe dựa trên iot và kết hợp dự báo béo phì sử dụng mô hình ANN.....	217
39. Quản lý bãi đỗ xe thông minh ứng dụng trí tuệ nhân tạo.....	226
40. Tính toán thiết kế giàn chống vượt trước tại khu vực lò chợ cơ giới hóa trong mỏ than hầm lò vùng Quảng Ninh.....	233
41. Cơ sở lý thuyết và quy trình tính toán thiết kế rổ của máy tách nước ly tâm phục vụ cho dây chuyền sàng tuyển than.....	239
42. Ứng dụng bộ lọc Kalman Filter để nâng cao độ chính xác trong giám sát vật thể trên băng tải công nghiệp bằng thị giác máy tính.....	244
43. Lựa chọn thông số chế độ cắt hợp lý khi gia công rotor bơm roots bằng phương pháp cắt dây EDM.....	250
44. Ảnh hưởng của độ cứng đến ổn định hệ truyền động Servo thủy cơ trong hệ thống lái trợ lực thủy lực.....	257

GIẢI PHÁP XỬ LÝ TỰ ĐỘNG QUAN TRẮC ĐỘ NGHIÊNG LỆCH TRỤ ĐIỆN GIÓ TRÊN BỜ BẰNG MÁY TOÀN ĐẠC KHÔNG GƯƠNG

Trần Trung Anh^{*1,2}, Ngô Thanh Tuấn¹, Nguyễn Anh Tuấn^{1,2}, Nguyễn Thanh Tuấn¹, Tạ Minh Sơn³ Đỗ Văn Mão³

¹Trường Đại học Mở - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam, trantrunganh@humg.edu.vn

²Nhóm nghiên cứu Công nghệ Địa tin học trong Khoa học trái đất (GES), Trường Đại học Mở - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

³Công ty CP Tư vấn Khảo sát và Dịch vụ Trắc địa Bản đồ, Hà Nội, Việt Nam

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu một giải pháp xử lý tự động để quan trắc độ nghiêng và độ lệch của trụ điện gió ở trên bờ, nhằm nâng cao an toàn và hiệu quả vận hành các công trình năng lượng tái tạo. Quy trình bao gồm: (1) Thiết lập lưới khống chế mặt bằng độ cao với 3 điểm tham chiếu quanh trụ; (2) Đo tọa độ các điểm tại vành đai chân ($H=0m$), giữa ($H=60m$), và đỉnh ($H=117m$) bằng máy toàn đạc không gương; (3) Sử dụng phần mềm ApnetPro để tự động tính toán tâm vòng tròn, bán kính ($R=2,5014m, 2,4954m, 1,9338m$), độ lệch mặt bằng, véc tơ lệch tổng hợp, hướng lệch, và góc nghiêng. Kết quả thí nghiệm thực tế tại công trình HN MEAE cho thấy phương pháp đạt độ chính xác cao, với sai số trung phương tại đỉnh trụ khoảng $0,0361m$, giảm thời gian xử lý xuống dưới 1 phút. So với các phương pháp truyền thống như LiDAR hay cảm biến nghiêng, giải pháp này mang lại chi phí thấp, dễ triển khai, và hỗ trợ hiệu quả giám sát định kỳ. Hạn chế hiện tại bao gồm phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, địa hình và cần mở rộng dữ liệu từ nhiều trụ (ở địa hình trên biển). Nghiên cứu đề xuất tích hợp IoT và mô-đun dự báo để tăng cường tính ứng dụng, góp phần phát triển bền vững năng lượng gió.

Từ khóa: Trụ điện gió, độ nghiêng, độ lệch, trắc địa, ApnetPro

1. Giới thiệu

Trụ điện gió, còn được biết đến với tên gọi cột điện gió hoặc tháp điện gió, đóng vai trò quan trọng trong hệ thống năng lượng gió. Đây là một kết cấu cao và vững chắc, được thiết kế để nâng đỡ các cánh quạt gió (rotor) cùng các thiết bị khác như máy biến tần, hệ thống điều khiển, đường dây điện và máy phát điện. Nhiệm vụ cốt lõi của trụ là duy trì cánh quạt ở độ cao lý tưởng nhằm thu nhận năng lượng từ gió và chuyển đổi thành điện năng. Các thông số kỹ thuật của trụ điện gió được xây dựng với chiều cao dao động từ vài chục đến vài trăm mét, cùng đường kính và kiểu dáng đa dạng, phụ thuộc vào công suất cũng như đặc tính kỹ thuật của hệ thống năng lượng gió. Điện gió trên bờ (onshore) hiểu đơn giản là sử dụng các tuabin gió có trụ được xây dựng đặt trên đất liền (hoặc lục địa) [Duafat company, 2025]. Quan trắc độ nghiêng và độ lệch của trụ điện gió đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn, hiệu quả vận hành và tuổi thọ của các công trình năng lượng tái tạo này, đặc biệt trong bối cảnh ngành công nghiệp điện gió đang phát triển mạnh

mẽ trên toàn cầu [TCVN 10687-1:2015; TCVN 9398:2012; TCVN 9400:2024; IEC, 2019].

Một trong những yếu tố then chốt để đảm bảo an toàn và hiệu suất lâu dài của các công trình điện gió là quan trắc độ nghiêng và độ lệch của trụ. Trụ điện gió có cấu kiện cố, thường cao từ 80-150m, dạng hình trụ tròn, đường kính và độ dày của trụ thay đổi theo chiều cao (ví dụ, đường kính chân có thể từ 4-6 m, đỉnh khoảng 2-3 m), tùy thuộc vào công suất turbine (từ 1 MW đến 10 MW hoặc hơn). Trụ điện gió có khả năng chịu tải trọng động từ gió, sóng biển và rung động cơ học, có nguy cơ bị nghiêng lệch do nền móng lún, gió cực đoan hoặc lỗi lắp đặt. Theo tiêu chuẩn quốc tế IEC 61400-1 về yêu cầu thiết kế turbine gió, việc giám sát cấu trúc (structural health monitoring - SHM) là bắt buộc để tránh thất bại cấu trúc, đảm bảo an toàn với các lớp an toàn bình thường và đặc biệt. Giám sát độ nghiêng giúp phát hiện sớm các vấn đề có thể dẫn đến va chạm và hư hỏng nghiêm trọng. Nếu không được kiểm soát, độ nghiêng vượt ngưỡng an toàn (thường $<1-2^\circ$ tùy thiết kế) có thể gây sụp đổ trụ,

dẫn đến thiệt hại kinh tế hàng triệu USD và rủi ro an toàn cho nhân viên cũng như cộng đồng lân cận. Hơn nữa, giám sát liên tục không chỉ nâng cao độ tin cậy vận hành mà còn tối ưu hóa bảo trì, giảm chi phí và tăng tuổi thọ turbine [IEC,2015,2019], [Yang &etal 2024; Zhang &etal,2013].

Ngoài ra theo các yêu cầu thiết kế của tiêu chuẩn TCVN 10687-1:2015 (tương đương IEC 61400-1:2014), quy định các điều kiện tải trọng và phân tích biến dạng để đảm bảo an toàn cấu trúc của trụ điện gió. Cụ thể, tiêu chuẩn nhấn mạnh việc tính toán chuyển vị và biến dạng lớn dưới tác động của gió cực đoan và rung động cơ học, với hệ số an toàn nhằm ngăn ngừa mất ổn định cấu trúc [TCVN 10687-1:2015]. Giải pháp quan trắc độ nghiêng và lệch bằng máy toàn đạc không gương kết hợp phần mềm ApnetPro trong nghiên cứu này đã hỗ trợ kiểm tra thực tế các thông số này, đạt độ chính xác <0,036m (đỉnh trụ ở độ cao 117m) và độ nghiêng tổng $\approx 0.10^\circ$, phù hợp với ngưỡng an toàn được đề xuất. Điều này không chỉ bổ sung cho thiết kế theo tiêu chuẩn mà còn cung cấp dữ liệu định lượng để tối ưu hóa bảo trì dự đoán.

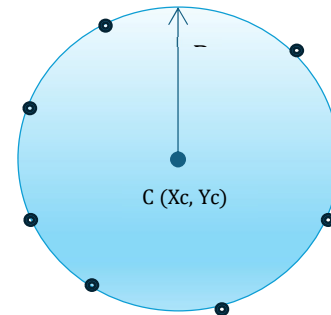
Mặc dù có nhiều phương pháp quan trắc như sử dụng GPS, laser scanner hoặc cảm biến gia tốc, các phương pháp truyền thống thường gặp hạn chế về độ chính xác, chi phí cao và thiếu tự động hóa, đặc biệt trong điều kiện địa hình khó khăn nơi thường xây dựng các nhà máy điện gió [Kartinen & etal, 2022; Kontrec & etal, 2024; Tamimi & etal, 2024]. Khoảng trống nghiên cứu hiện nay nằm ở việc tích hợp trắc địa truyền thống với công nghệ số để xử lý dữ liệu nhanh chóng và chính xác. Bài báo này nhằm đề xuất một phương pháp trắc địa quan trắc độ nghiêng trụ điện gió phù hợp với bối cảnh đó, bao gồm thành lập lưới khống chế mặt bằng độ cao với 3 điểm, đo tọa độ bằng máy toàn đạc điện tử không gương đến các vành đai chân, giữa và đỉnh trụ, và xử lý số liệu tự động bằng phần mềm ApnetPro để tính toán các tham số như tâm vòng tròn, bán kính, độ lệch mặt bằng, hướng lệch và độ nghiêng của vector tổng.

Đóng góp chính của nghiên cứu là phát triển một quy trình toàn diện, dễ triển khai với độ chính xác cao, minh họa qua dữ liệu thử nghiệm trên trụ điện gió trên bờ thực tế tại một nhà máy điện gió. Phương pháp này không chỉ hỗ trợ giám sát an toàn mà còn góp phần vào mục tiêu phát triển năng lượng tái tạo bền vững, phù hợp với TCVN và các tiêu chuẩn quốc tế như IEC 61400.

2. Cơ sở của phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở thuật toán tính độ lệch, độ nghiêng trụ điện gió

Vì trụ điện gió thường có dạng trụ tròn, các giá trị để tính độ nghiêng, độ lệch cần dựa vào tâm trụ ở các vòng đai khác nhau (các tâm trụ này không thể đo trực tiếp) nên nguyên lý cốt lõi là từ tọa độ các điểm trên bề mặt trụ tại các vòng đai ngang (được đo bằng máy toàn đạc điện tử không gương) khác nhau, sau đó sử dụng phương pháp số bình phương nhỏ nhất để tìm vòng tròn xác suất nhất nhằm xác định tọa độ tâm và bán kính của từng vành đai. Điều này giúp tính toán độ lệch mặt bằng hướng lệch, cùng với độ cao của vòng đo so với chân trụ, tính toán độ nghiêng của trụ. [TCVN 9400:3024].



Hình 1. Đo các điểm trên vòng đai trụ

$$R_v = \sqrt{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2} \quad (1)$$

Hàm (1) có 3 ẩn số là tọa độ tâm $c(X_c, Y_c)$ và bán kính R_v , để giải được cần đo tối thiểu 3 điểm trên vòng đo (X, Y) , khi số điểm đo lớn hơn 3 thì giải bằng phương pháp số bình phương nhỏ nhất gồm các bước cơ bản như: tính trị gần đúng; lập phương trình số hiệu chỉnh (với các điểm đo từ cùng 1 máy đo, có thể coi độ chính xác đạt được như nhau nên có thể quy trọng số về bằng nhau và bằng 1) cho từng trị đo; lập phương trình chuẩn; giải nghịch đảo ma trận hệ phương trình chuẩn để tính trị bình sai và đánh giá độ chính xác [Charles D. Ghilani, 2017; Coope, 1993] gồm:

Sai số trung phương trọng số đơn vị:

$$\mu = \sqrt{\frac{[vv]}{n - 3}} \quad (2)$$

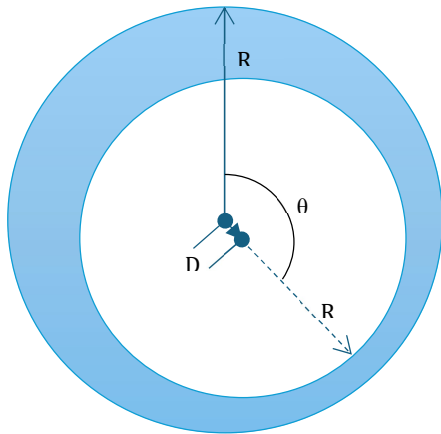
trong đó: v là số hiệu chỉnh của trị đo;
 n là số điểm đo.

Sai số trung phương của ẩn số thứ j là bán kính (mR) và tọa độ tâm (mX_c, mY_c) của vòng đai i được tính toán từ giá trị đường chéo của ma trận hiệp phương sai với công thức cơ bản là:

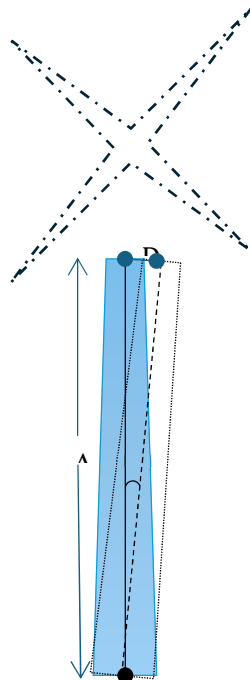
$$m_j = \mu \times \sqrt{Q_{jj}} \quad (3)$$

Quá trình này được lặp lại cho các vòng đai còn lại.

Sau khi giải được tọa độ tâm của các vòng đai ở các độ cao đo khác nhau (theo thiết kế quan trắc được duyệt, thông thường đo ở chân, giữa và đỉnh cột), độ lệch của trụ điện gió được tính toán dựa trên hình 2.



Hình 2. Tính độ lệch của trụ điện gió



Hình 3. Tính độ nghiêng của trụ

Độ lệch trục X, trục Y của vòng thứ i so với chân cột (vòng đo số 1) theo công thức:

$$\begin{cases} \Delta X = X_{c_i} - X_{c_1} \\ \Delta Y = Y_{c_i} - Y_{c_1} \end{cases} \quad (4)$$

Độ lệch tổng hợp DS và hướng lệch θ (so với hướng Bắc) được tính theo công thức:

$$\begin{cases} DS = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \\ \theta = \text{atan2}(\Delta Y / \Delta X) \end{cases} \quad (5)$$

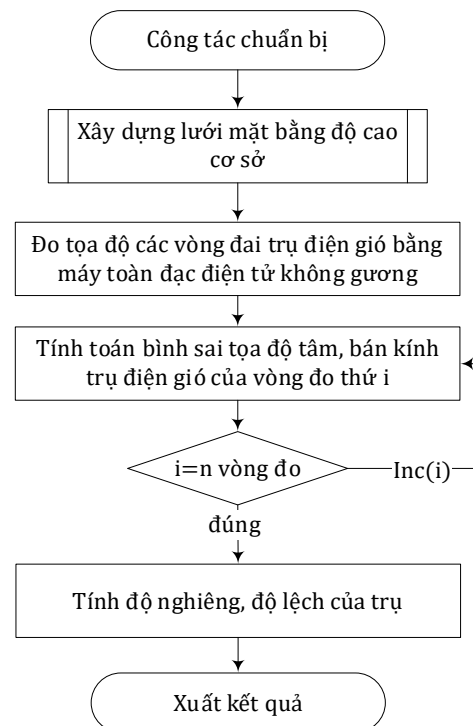
Tiếp theo là tính độ nghiêng của trụ điện gió trên cơ sở hình 3.

Độ nghiêng (góc nghiêng α), độ nghiêng tương đối (1/t) của trụ ở vòng đai thứ i có chênh cao ΔH so với chân cột được xác định theo công thức:

$$\begin{cases} 1/t = 1 / \left(\frac{\Delta H}{DS} \right) \\ \alpha = \arctan \left(\frac{DS}{\Delta H} \right) \end{cases} \quad (6)$$

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp được thiết kế dựa trên quy trình trắc địa kết hợp công nghệ xử lý số liệu, phù hợp với quan trắc độ nghiêng lệch trụ điện gió. Quy trình bao gồm các bước chính như hình 4.



Hình 4. Quy trình quan trắc độ nghiêng lệch trụ điện gió

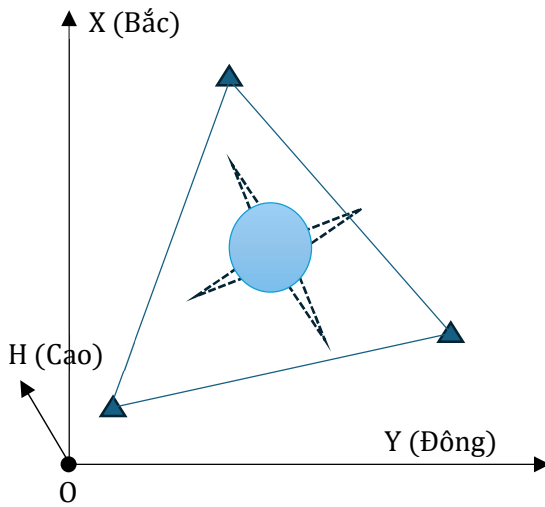
Công tác chuẩn bị bao gồm: xây dựng mốc (dạng định tâm bắt buộc tránh ảnh hưởng của sai số định tâm hoặc theo đề án thiết kế), tối thiểu 3 điểm xung quanh trụ điện gió (đảm bảo có thể đo các điểm phân bố đều trên vòng đai), cách trụ khoảng 50-100m (đảm bảo tránh rung động và đảm bảo độ ngóc của ống kính máy toàn đạc khi đo). Chuẩn bị về kiểm nghiệm hiệu chỉnh máy đo, và gương, đế gương (phục vụ đo lưới không chế

mặt đất) đảm bảo độ chính xác của thiết bị đo. Ngoài ra còn chuẩn bị các phụ kiện, sổ sách ghi chép, biên bản hiện trường...



Hình 5. Xây dựng mốc và chuẩn bị máy thiết bị đo
(ảnh Tạ Minh Sơn, Đỗ Văn Mão)

Xây dựng lưới khống chế mặt bằng độ cao cơ sở: các điểm mốc lưới được truyền tọa độ độ cao bằng công nghệ GNSS từ các điểm mốc quốc gia. Các điểm này được chính xác hóa bằng trị đo góc cạnh của máy toàn đạc điện tử với bình sai tự do (hoặc bình sai phụ thuộc khi lấy 1 điểm làm gốc và 1 phương vị gốc). Lưới khống chế đảm bảo hệ quy chiếu quốc gia [TCVN 9401:2012].



Hình 6. Lưới khống chế trắc địa quanh trụ điện gió

Đo tọa độ các điểm trên vòng đai trụ điện gió: Sử dụng máy toàn đạc điện tử không gương, nhập tọa độ điểm lưới cơ sở, tiến hành định hướng, đo theo chế độ đo không gương (vòng đai chân, giữa, đỉnh) theo hướng quan sát được của vị trí điểm đặt máy đến trụ; di chuyển máy sang điểm khống chế cơ sở khác để đo các điểm trên vòng đo (đảm bảo các điểm trên vòng đo được phân bố đều theo chu vi của trụ).

Xử lý số liệu bằng phần mềm ApnetPro: Dữ liệu đo được nhập vào ApnetPro để tự động hóa tính toán. Phần mềm áp dụng thuật toán số bình phương nhỏ nhất để xác định tâm (X_c , Y_c), bán

kính (R_v), đánh giá độ chính xác thông qua sai số trung phương trọng số đơn vị (μ), và sai số trung phương ẩn số (mR_v , mX_c , mY_c) của tất cả các vòng đo. Sau đó, tính vector độ lệch tổng hợp giữa các vành đai để xác định các thông số: độ lệch, hướng lệch, độ nghiêng (góc nghiêng, độ nghiêng tương đối). ApnetPro hỗ trợ xuất báo cáo tự động, với thời gian xử lý nhanh chóng, nâng cao hiệu quả so với xử lý thủ công [Trần Trung Anh, Nguyễn Quang Hà, 2023,2024].



Hình 7. Đo tọa độ trên các vòng đai trụ điện gió bằng máy toàn đạc điện tử không gương (ảnh Tạ Minh Sơn, Đỗ Văn Mão)

3. Thực nghiệm

3.1. Thiết kế thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện trên một trụ turbine gió mẫu thuộc dự án điện gió thực tế, với chiều cao 117m, trụ thu hẹp từ chân đến đỉnh (bán kính từ khoảng 2,5 m tại chân giảm dần đến 1,9 m tại đỉnh).

Thiết kế bao gồm ba vành đai đo lường chính: chân trụ ($H=0m$), giữa trụ ($H=60m$, vị trí trung gian để phát hiện lệch đoạn), và đỉnh trụ ($H=117m$, nơi chịu tải trọng gió lớn nhất). Mỗi vành đai đo ít nhất 9 điểm đặc trưng trên bề mặt trụ, phân bố đều theo chu vi để đảm bảo độ chính xác vòng đo. Số lượng điểm này giúp giảm ảnh hưởng của nhiễu đo lường và đảm bảo tính đại diện cho mặt cắt ngang trụ. Thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện thời tiết ổn định (tốc độ gió $<5m/s$, không mưa) để tránh rung động ảnh hưởng đến đo lường, với thời gian thực hiện

khoảng 2-4 giờ/trụ, bao gồm lắp đo 2-3 lần để kiểm tra độ lắp lại. Thiết kế cũng tích hợp lưới khống chế mặt bằng độ cao với 3 điểm cố định xung quanh trụ (cách 50-100 m), sử dụng làm tham chiếu để loại bỏ sai số hệ thống từ địa hình lún hoặc rung động.

Mục tiêu thí nghiệm là đạt độ chính xác đo lường tọa độ <0,01 m cho lưới khống chế và <0,03 m cho điểm trên trụ, phù hợp với tiêu chuẩn IEC 61400 về giám sát cấu trúc turbine gió, nơi giới hạn nghiêng an toàn thường <1-2°.

3.2. Thiết bị và đo đạc hiện trường

Thiết bị chính bao gồm máy toàn đạc điện tử là loại Leica TS30-R1000 kèm phụ kiện với các tham số độ chính xác 0,5" đo góc; đo cạnh đạt 0,6mm + 1ppm chế độ đo có gương, 2mm + 2 ppm với chế độ đo không gương.



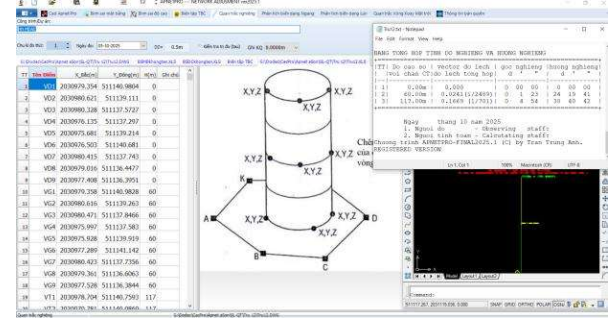
Hình 8. Máy toàn đạc điện tử Leica TM30-R1000 đo đạc trụ điện gió (ảnh Tạ Minh Sơn, Đỗ Văn Mão)

Chế độ đo có gương dùng để xây dựng lưới cơ sở, chế độ đo không gương để đo trực tiếp bề mặt trụ mà không cần gắn tiêu, giảm thời gian lắp đặt và phù hợp với chiều cao lớn. Cùng với các cảm biến nhiệt độ, áp suất, độ ẩm, tốc độ gió... để kiểm tra điều kiện môi trường trong quá trình đo và cải chính chính xác trị đo.

Trị đo hiện trường được thu thập từ trụ điện gió tại một dự án, sử dụng máy toàn đạc điện tử và lưới khống chế với 3 điểm tham chiếu (B1, B2, B3). Dữ liệu bao gồm tọa độ (X, Y, H) của 9 điểm đo tại mỗi vòng đai: chân trụ (H=0m), giữa trụ (H=60m), và đỉnh trụ (H=117 m).

3.3. Xử lý số liệu

Phần mềm ApnetPro xử lý tự động để tính toán tâm vòng tròn (Xc, Yc), bán kính (Rv), độ lệch mặt bằng trung bình (Mo), sai số bán kính (mRv), và sai số tọa độ tâm (mXc, mYc). Các tham số này được sử dụng để xác định vector lệch ngang và độ nghiêng tổng thể.



Hình 9. Phần mềm ApnetPro xử lý quan trắc nghiêng trụ điện gió (ảnh Trần Trung Anh)

Bảng 1 trình bày kết quả xử lý từ ApnetPro cho từng vòng đai:

Bảng 1. Kết quả xử lý các vòng đai của trụ điện gió

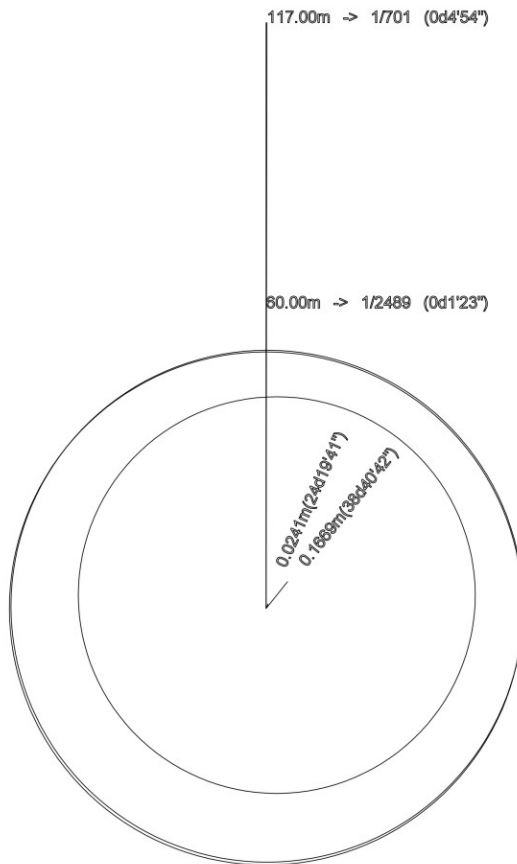
Thông số (m)	Vòng 1 (H=0m)	Vòng 2 (H=60m)	Vòng 3 (H=117m)
Rv	2,5014	2,4954	1,9338
Xc	978,1425	978,1645	978,2728
Yc	138,7897	138,7997	138,8941
μ	0,0025	0,0061	0,0361
mRv	0,0009	0,0021	0,0121
mXc	0,0011	0,0029	0,0179
mYc	0,0013	0,0030	0,0164

Từ dữ liệu này, các giá trị độ nghiêng và lệch ngang giữa các vành đai được ApnetPro tính toán trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính độ nghiêng lệch của trụ điện gió bằng ApnetPro

Thông số	Vòng 1 (H=0m)	Vòng 2 (H=60m)	Vòng 3 (H=117m)
DS	0,0000m	0,0241m	0,1669m
θ	0d00'00"	24d19'41"	38d40'42"
1/t	---	1/2489	1/701
α	0d00'00"	0d01'23"	0d04'54"

Từ kết quả tính độ nghiêng lệch của trụ với vector lệch, cho thấy độ lệch và độ nghiêng tăng dần từ chân lên đỉnh, phù hợp với hình dạng nón của trụ và tải trọng gió ở phần trên. Độ chính xác đo lường đạt sai số trung phương <0,036m; độ nghiêng <0,1° cho góc nghiêng.



Hình 10. Đồ hình về độ nghiêng lệch của trụ điện
gió vẽ bởi ApnetPro

4. Thảo luận

Giải pháp xử lý tự động quan trắc độ nghiêng và lệch lạc của trụ điện gió bằng máy toàn đạc không gương và phần mềm ApnetPro đã chứng minh hiệu quả qua thí nghiệm thực tế trên trụ turbine gió tại công trình HN MEAE. Kết quả đo lường cho thấy độ lệch tổng tại chiều cao 117 m là 0,1669 m (góc $0^{\circ}4'54''$, hướng $38^{\circ}40'42''$), với độ lệch đoạn giữa (60m) là 0.0241m (góc $0^{\circ}1'23''$, hướng $24^{\circ}19'41''$), phản ánh mức biến dạng nhỏ và ổn định, phù hợp với ngưỡng an toàn theo TCVN 10687-1:2015 (tương đương IEC 61400-1:2014), nơi yêu cầu phân tích tải trọng để tránh biến dạng lớn (large deformations) và mất ổn định cấu trúc (instability) dưới tác động gió cực đoan. Bán kính vòng tròn trụ giảm dần từ 2.5014m tại chân trụ đến 1,9338m tại đỉnh (đạt sai số trung phương $mRv < 0,0121m$), tọa độ tâm vòng đai tại đỉnh đạt sai số trung phương $mXc/mYc < 0,0179m$, chứng tỏ phương pháp phát hiện chính xác hình dạng nón của trụ và sai số trung phương tăng do rung động ở chiều cao lớn, độ góc ống kính lớn.

Ưu điểm chính là tính ứng dụng thực tiễn, với khả năng triển khai dễ dàng tại các dự án điện gió

trên bờ, hỗ trợ bảo trì dự đoán và kéo dài tuổi thọ turbine. ApnetPro không chỉ tính toán tâm vòng tròn (Xc/Yc) mà còn xuất báo cáo đầy đủ, chính xác về độ nghiêng lệch, đồ hình trụ điện gió trực quan... góp phần tối ưu hóa quản lý năng lượng gió bền vững.

Tuy nhiên, giải pháp tồn tại hạn chế như phụ thuộc vào điều kiện thời tiết (gió mạnh có thể tăng sai số đo tại đỉnh trụ lên 0,0361 m) và yêu cầu đo thủ công tại hiện trường, rủi ro an toàn cho nhân viên. Thí nghiệm chỉ trên trụ điện gió ở trên bờ (cụ thể là vùng núi cao), chưa thực hiện ở vùng biển (offshore), chưa tổng quát hóa cho nhiều loại trụ điện gió khác.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và kiểm chứng thành công một giải pháp xử lý tự động quan trắc độ nghiêng và lệch lạc của trụ điện gió bằng máy toàn đạc không gương kết hợp phần mềm ApnetPro, dựa trên cơ sở các yêu cầu thiết kế từ tiêu chuẩn TCVN 10687-1:2015 (tương đương IEC 61400-1:2014). Kết quả thí nghiệm thực tế tại công trình HN MEAE cho thấy độ lệch tổng tại chiều cao 117 m là 0,1669 m (góc nghiêng $0^{\circ}4'54''$, hướng nghiêng $38^{\circ}40'42''$), với độ lệch đoạn giữa (ở chiều cao 60m) là 0,0241 m (góc nghiêng $0^{\circ}1'23''$, hướng nghiêng $24^{\circ}19'41''$), và bán kính vòng đai trụ giảm dần từ 2,5014m tại chân đến 1,9338m tại đỉnh (đạt sai số trung phương $mRv < 0,0121m$). Các thông số này nằm trong ngưỡng an toàn theo tiêu chuẩn, với sai số trung phương $< 0,036$ m tại đỉnh trụ, chứng minh phương pháp phát hiện chính xác biến dạng do tải trọng gió và rung động, đồng thời giảm thời gian xử lý nhờ phần mềm ApnetPro.

Đóng góp chính của nghiên cứu là cung cấp một giải pháp toàn diện, dễ triển khai và có tính ứng dụng toàn cầu, hỗ trợ giám sát sức khỏe cấu trúc cho trụ điện gió trên bờ, tối ưu hóa bảo trì dự đoán và kéo dài tuổi thọ. Phương pháp không chỉ tuân thủ yêu cầu phân tích tải trọng và biến dạng lớn trong TCVN 10687-1:2015 mà còn vượt trội so với các kỹ thuật truyền thống bằng tính tự động hóa, chi phí thấp và độ chính xác cao.

Dựa trên kết quả, nghiên cứu kiến nghị áp dụng giải pháp này trong giám sát định kỳ tại các dự án năng lượng gió, tích hợp IoT để theo dõi thời gian thực và nâng cấp ApnetPro với mô-đun dự báo nghiêng lệch dựa trên học máy. Các nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển phương pháp đo hướng đối với những vị trí vành đai trên đỉnh cột (nơi khó đo được tọa độ từ máy không gương), tương lai nên mở rộng thí nghiệm đến

hiều loại trụ, trụ trên biển ngoài khơi và kết hợp dữ liệu thời tiết để tăng tính tổng quát, góp phần thúc đẩy phát triển bền vững ngành năng lượng tái tạo toàn cầu.

Đóng góp của các tác giả

Trong bài báo này, các tác giả có sự đóng góp như nhau về mặt ý tưởng, phương pháp và nội dung.

Tài liệu tham khảo

Alade K. Azeez (2018), Deformation monitoring using total stations: an evaluation of system performance, *Journal of Geomatics and Environmental Research*, Vol. 1, No. 1, December 2018

Charles D. Ghilani (2017), Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, 6th Edition, John Wiley & Sons.

Coope, I.D (1993). Circle fitting by linear and nonlinear least squares. *J Optim Theory Appl* 76, 381–388 (1993).

<https://doi.org/10.1007/BF00939613>

D. Xuping, S. Hongsheng and W. Dantong (2020), "State Maintenance Strategy of Wind Turbine Based on Stochastic Degradation Model," *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 2020, pp. 4537-4543, doi:10.1109/CCDC49329.2020.9164876

Duafat company (2025), Sự khác biệt giữa điện gió ngoài khơi và điện gió đất liền, web: <https://duafat.com.vn/su-khac-biet-giua-dien-gio-ngoai-khoi-va-dien-gio-dat-lien/> (truy cập 20/10/2025)

International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 61400-1:2019 Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements. Geneva: IEC.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2015). IEC 61400-13:2015 Measurement of Mechanical Loads. Geneva: IEC.

J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers (2009) Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, *John Wiley & Sons*, DOI:10.1002/9781119994367

Kaartinen, E., Dunphy, K., & Sadhu, A. (2022). LiDAR-Based Structural Health Monitoring: Applications in Civil Infrastructure Systems. *Sensors*, 22(12), 4610. <https://doi.org/10.3390/s22124610>

Kontrec, N., Panić, S., Vujaković, J., Stošović, D., & Khotnenok, S. (2024). Mathematical Optimization of Wind Turbine Maintenance

Using Repair Rate Thresholds. *Axioms*, 13(11), 809. <https://doi.org/10.3390/axioms13110809>

Leica Geosystems. (ver 3.0). TS30/TM30 Total Station User Manual. Heerbrugg: Leica Geosystems.

Tamimi, R. and Toth, C (2024): Accuracy Assessment of UAV LiDAR Compared to Traditional Total Station for Geospatial Data Collection in Land Surveying Contexts, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-2-2024, 421–426, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-421-2024>

Trần Trung Anh, Nguyễn Quang Hà (2023), Xây dựng lưới tam giác thủy công trên cơ sở kết hợp tính chuyển tọa độ công trình và bình sai tự do, *Hội nghị toàn quốc Trắc địa công trình và sự phát triển bền vững ESSD 2023*

Trần Trung Anh, Nguyễn Quang Hà (2024), XKiểm định giả thuyết thống kê trong bình sai lưới quan trắc chuyển dịch ngang đập công trình thủy điện, *Hội nghị khoa học quốc gia về Công nghệ địa không gian và sự phát triển bền vững NCGSD 2024*

TCVN 10687-1:2015 (IEC 61400-1:2014)-Tuabin gió - Phần 1: Yêu cầu thiết kế.

TCVN 9398:2012 (2012)- Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam, Công tác trắc địa trong xây dựng công trình - Yêu cầu chung.

TCVN 9400:2024 (2024) - Công trình dân dụng và công nghiệp có chiều cao lớn - xác định độ nghiêng bằng phương pháp trắc địa.

TCVN 9401:2012 (2012), Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam - Kỹ thuật đo và xử lý số liệu GPS trong trắc địa công trình.

Yang, Y., Liang, F., Zhu, Q., & Zhang, H. (2024). An Overview on Structural Health Monitoring and Fault Diagnosis of Offshore Wind Turbine Support Structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 377. <https://doi.org/10.3390/jmse12030377>

Zhang, T., Dwight, R. & El-Akruti, K. O. (2013). Condition based maintenance and operation of wind turbines. 8th World Congress on Engineering Asset Management & 3rd International Conference on Utility Management & Safety (PDF) *Condition based maintenance and operation of wind turbines*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/264672819_Condition_based_maintenance_and_operation_of_wind_turbines [accessed Oct 20 2025].

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

Số 8 Tầng Bạt Hổ, phường Cửa Nam, TP. Hà Nội
ĐT: 024.39424620 - 39423346 * Fax: 024.38224784
Website: www.nxbgtvt.vn * Email: nxbgtvt@fpt.vn

CHỊU TRÁCH NHIỆM XUẤT BẢN, NỘI DUNG:

Giám đốc - Tổng Biên tập: Nguyễn Minh Nhật

BIÊN TẬP: **Dương Hồng Hạnh**
THIẾT KẾ: **Phương Linh**

Đối tác liên kết: Trường Đại học Mỏ - Địa chất
Địa chỉ: Số 18 phố Viên, phường Đông Ngạc, TP. Hà Nội

In 500 cuốn khổ 19 x 27cm, tại Công ty cổ phần in và thương mại Ngọc Hưng
Địa chỉ: 296 đường Phúc Diễn, TDP số 1, phường Xuân Phương, TP. Hà Nội.
Số xác nhận đăng ký xuất bản: 5321-2025/CXBIPH/2-110/GTVT.
Mã số sách tiêu chuẩn quốc tế - ISBN: 978-604-76-3274-9.
Quyết định xuất bản số: 114 LK/QĐ-XBGT ngày 18/12/2025.
In xong và nộp lưu chiểu năm 2025.



978-604-76-3274