



**ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :  
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της  
Σχολής Μηχ/γων  
Μηχ/κών

**ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ**

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. **ΣΧΟΙΝΑ Παναγιώτη**, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού και Αεροναυπηγού της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών . Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη Παρασκευή 15 Απριλίου , ώρα 10:00π.μ διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«Αεροελαστική ανάλυση και πιστοποίηση  
πτερυγίων ανεμογεννητριών»

Και ο Αγγλικός ο εξής:

«Aeroelastic stability analysis and certification of wind turbine blades»

Όποιος ενδιαφέρεται να την παρακολουθήσει παρακαλείται να στείλει email ([spyros@fluid.mech.ntua.gr](mailto:spyros@fluid.mech.ntua.gr)) ώστε να του δοθεί πρόσβαση.

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

N. Μαρμαράς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

# Αεροελαστική ανάλυση και πιστοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών

Παναγιώτης Νικολάου. Σχοινιάς

## Περίληψη

Το παρόν διδακτορικό πραγματεύεται θέματα αεροελαστικής ανάλυσης ανεμογεννητριών αλλά και θέματα πιστοποίησης βάσει του κώδικα IEC και των σύγχρονων ερευνητικών τάσεων.

Τα πρώτα κεφάλαια, ασχολούνται με την πιστοποίηση ανεμογεννητριών και πιο συγκεκριμένα με την έρευνα για τον ακριβή προσδιορισμό των ακραίων φορτίων 50ετίας. Πρόκειται για ένα στοιχείο της διαδικασίας πιστοποίησης που παραμένει ανοικτό στην βιβλιογραφία.

Τα πτερύγια των μηχανών είναι μεγάλες κατασκευές από σύνθετα υλικά τα οποία λειτουργούν σε ένα τελείως στοχαστικό περιβάλλον. Εξαιτίας της τυχαιότητας της ταχύτητας του αέρα, τα φορτία που ασκούνται στο πτερύγιο και κατ'επέκταση οι αναπτυσσόμενες εσωτερικές αντιδράσεις σε οποιαδήποτε διατομή κατά μήκος του πτερυγίου είναι στοχαστικά μεγέθη. Επιπλέον, στοχαστική συμπεριφορά παρατηρείται και στις μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών. Η ποσοτικοποίηση της μεταβλητότητας που παρουσιάζουν οι βασικές μεταβλητές (φορτία, μηχανικές ιδιότητες υλικών κ.τ.λ.) καθώς και η θεώρησή τους στον τελικό σχεδιασμό του πτερυγίου επιτυγχάνεται μονάχα με την χρήση στατιστικών μεθοδολογιών.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου της στοχαστικής μεθοδολογίας μία γνωστή βάση δεδομένων με πειράματα και στατιστικά δεδομένα για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου υλικού. Τα στοχαστικά μοντέλα των ιδιοτήτων του υλικού αναπαριστούν τόσο την φυσική όσο και τη στατιστική αβεβαιότητα η οποία προκύπτει από την ανομοιόγενεια των συνθέτων υλικών.

Επίσης η στοχαστικότητα του ανέμου προσεγγίζεται με 10-λεπτές αεροελαστικές χρονοσειρές. Οι προσομοιώσεις αυτές αντιστοιχούν στην αναπαραγωγή της φόρτισης της όλης κατασκευής με είσοδο χρονοσειρές ανέμου που αντιστοιχούν σε φάσμα ανέμου Kaimal και που δημιουργούνται με κατάλληλο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του ΕΜΠ.

Όσον αφορά στην ακραία στατική φόρτιση, η 10-λεπτη μακροπρόθεσμη κατανομή συμπληρωματικής πιθανότητας ακραίας φόρτισης, δηλαδή των εσωτερικών αντιδράσεων σε οποιαδήποτε διατομή κατά μήκος του πτερυγίου, εκτιμάται υλοποιώντας την τεχνική προεκβολής φορτίου εφαρμόζοντας τον κανονισμό IEC 61400-1 ed. 3. Με βάσει τον κανονισμό, οι σχεδιαστές υποχρεούνται σε μία από τις περιπτώσεις φορτίων, να κάνουν χρήση μεθόδων στατιστικής προβολής, που να ορίζουν τα φορτία σχεδιασμού.

Οι απαραίτητοι αεροελαστικοί υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για το 65 m πτερύγιο κατασκευασμένο από ίνες γυαλιού σε εποξειδική μήτρα, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος UPWIND για την μηχανή NREL των 5MW.

Δύο μέθοδοι εξαγωγής μεγίστων εξετάστηκαν και 3 κατανομές προσαρμόστηκαν στα διάφορα δείγματα των εξαγόμενων μεγίστων. Έγινε έλεγχος για το ποιά είναι η σωστή επιλογή συνάρτησης και ποια η σωστή μέθοδος συλλογής. Υλοποιήθηκε μελέτη σύγκλισης της μεθόδου προεκβολής για τον καθορισμό του απαραίτητου αριθμού αεροελαστικών χρονοσειρών. Η

μελέτη αυτή έγινε απευθείας στην παραγόμενη μακροπρόθεσμη κατανομή συμπληρωματικής πιθανότητας ακραίας φόρτισης. Στην τελική κατανομή της ακραίας φόρτισης συμπεριλήφθηκε υπόψη η στατιστική αβεβαιότητα εξ' αιτίας του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων αεροελαστικών χρονοσειρών. Επίσης έγινε σύγκριση της απόδοσης μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών τεχνικών για την συλλογή σημείων και εν συνεχεία την στατιστική προεκβολή των φορτίων του δρομέα. Αυτές οι μέθοδοι ήταν η μέθοδος του ενός μεγίστου σημείου και η μέθοδος της συλλογής επάνω από ένα όριο. Το ζητούμενο φορτίο υπολογισμού ήταν το φορτίο σχεδιασμού των 50 ετών.

Σύμφωνα με την σειρά των προσομοιώσεων, αρχικά παρουσιάζεται η πρόβλεψη των ακραίων φορτίων υπό την επιρροή στοχαστικού ανέμου. Το επόμενο βήμα είναι η πρόβλεψη του φορτίου σχεδιασμού και της αβεβαιότητας των προβλέψεων μας σαν συνάρτηση των ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πτερυγίου. Έτσι η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι ο υπολογισμός του μεγίστου φορτίου που προκύπτει από τον στοχαστικό άνεμο με σταθερές τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού και μετά οι αντίστοιχες προβλέψεις με χρήση lognormal κατανομημένων ιδιοτήτων για το σύνθετο υλικό. Οι ιδιότητες που θεωρούνται στοχαστικές για το υλικό είναι το E1 μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος των ινών του συνθέτου υλικού, το κάθετα στις ίνες E2 μέτρο ελαστικότητας, το G12 μέτρο διάτμησης και τέλος το  $\nu_{12}$ , ο λόγος Poisson. Ενώ ο άνεμος παραμένει πάντα στοχαστικός εξ' ορισμού. Από αυτές τις δύο ξεχωριστές προβλέψεις, συμπεράσματα προκύπτουν αναφορικά με το αποτέλεσμα στο φορτίο σχεδιασμού αλλά και για την ανάλυση τάσεων διατομής του πτερυγίου με στατιστική προεκβολή.

Επίσης αναπτύχθηκε κώδικας στατιστικής επεξεργασίας στο εμπορικό πακέτο Matlab βάσει του κώδικα πιστοποίησης ανεμογεννητριών IEC και ειδικότερα του παραρτήματος, annex F, που αναφέρεται στην πρόβλεψη του μεγίστου φορτίου σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εκτιμήθηκαν τα ακραία φορτία σχεδιασμού. Επίσης προέκυψαν συμπεράσματα για τα ακραία φορτία σχεδιασμού, τις μεθόδους στατιστικής ανάλυσης και τις στοχαστικότητες που υπεισέρχονται στους αεροελαστικούς υπολογισμούς.

Επειδή η μελέτη κάνει χρήση των αεροελαστικών προσομοιώσεων στην πρόβλεψη στατιστικών φορτίων προεκβολής, τα συμπεράσματα θα είναι χρήσιμα και σε άλλες περιπτώσεις. Δηλαδή σε περιπτώσεις πρωσομοιώσεων, όπου για την πρόβλεψη των φορτίων σχεδιασμού και την ανάλυση τάσεων διατομής του πτερυγίου αντίστοιχα ερωτήματα αναδεικνύονται αναφορικά με τις τεχνικές προεκβολής, την επιλογή κατανομών και το μέγεθος των δεδομένων που χρειάζονται.

Σε κάθε περίπτωση για τις ανάγκες της διαδικασίας πιστοποίησης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη κώδικα γρήγορου και ακριβή ώστε να υπάρχει δυνατότητα πολλών αεροελαστικών υπολογισμών, σε ρεαλιστικό υπολογιστικό χρόνο. Για αυτό τον λόγο αναπτύχθηκε ένα απλοποιημένο πρότυπο για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς ανεμογεννήτριας, στη βάση περιορισμένου αριθμού βαθμών ελευθερίας (είκοσι δύο (22) συνολικά). Η διατύπωση των δυναμικών εξισώσεων του προβλήματος βασίστηκε στο θεώρημα Hamilton. Στην συνέχεια προγραμματίστηκε υπολογιστικός κώδικας για την δυναμική ανάλυση πλωτής ανεμογεννήτριας, βασισμένος στο προαναφερθέν πρότυπο. Ακολούθως πιστοποιήθηκε η ορθότητά του προτύπου σε σύγκριση με αποτελέσματα που δίνει η πλήρης και λεπτομερής προσομοίωση.

Επίσης αναπτύχθηκε κώδικας που προσομοιώνει την αεροελαστική συμπεριφορά λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ελαστικών παραμορφώσεων στα αεροδυναμικά φορτία του δρομέα. Για το σύστημα αυτό πραγματοποιήθηκε ανάλυση αεροελαστικής ευστάθειας βασισμένη στη μέθοδο μετασχηματισμού Coleman, για την άρση των περιοδικών όρων.

Ο μετασχηματισμός Coleman χρησιμοποιείται για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων, της απόσβεσης και των περιοδικών ιδιομορφών μιας περιστρεφόμενης ανεμογεννήτριας από την περιγραφή των βαθμών ελευθερίας στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων. Η προσέγγιση Coleman εφαρμόζεται μονάχα σε ισότροπα συστήματα.

Σε ανισότροπα συστήματα, για παράδειγμα σε δρομείς με ανισοκατανομή βάρους, η διαχείριση γίνεται με την γενική προσέγγιση της ανάλυσης Floquet, που ορίζει ένα μοναδικό σύστημα αναφοράς για την εποπτεία των ιδιοσυχνοτήτων, στις οποίες προστίθεται κάθε πολλαπλάσιο της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα. Η εν λόγω ασάφεια, επιλύεται με την απαίτηση η περιοδική ιδιομορφή να είναι τόσο σταθερή όσο στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων. Η ιδιοσυχνότητα αναγνωρίζεται ως η κυρίαρχη συχνότητα στην απόκριση μίας απλής διέγερσης της ιδιομορφής που παρατηρείται στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων.

Έτσι αναπτύχθηκε κώδικας και εφαρμόστηκε η μέθοδος Floquet για την ανάλυση ευστάθειας συστήματος με περιοδικούς συντελεστές και αναπτύχθηκε υπορουτίνα για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος. Έγινε διερεύνηση της επίδρασης των περιοδικών φορτίσεων στην ευστάθεια ανεμογεννήτριας, όπως η διαφορά μάζας στις πτέρυγες και η περίπτωση ανέμου υπό γωνία απόκλισης (yaw error) σφάλματος 20 μοίρες, με χρήση του υπολογιστικού εργαλείου. Το εργαλείο διασταυρώθηκε ως προς την ακρίβεια και την ορθότητά του σε σύγκριση με τον κώδικα 'hGAST' για την ανεμογεννήτρια NREL 5MW.

Αναφορικά με την διαδικασία αναγνώρισης ιδιοσυχνοτήτων, σε ισοτροπικές συνθήκες οι περιοδικές ιδιομορφές περιέχουν όσα τα πτερύγια αρμονικές, ενώ σε ανισότροπες συνθήκες περιέχουν άπειρο αριθμό αρμονικών με ιδιοσυχνότητες που είναι πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής. Αυτές οι αρμονικές εμφανίζονται σε υπολογισμένες συχνότητες απόκρισης της μηχανής. Με στόχο την αναγνώριση των σωστών ιδιοσυχνοτήτων από όλα τα πολλαπλάσια της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής, χρησιμοποιείται κατάλληλη μέθοδος αναγνώρισης.

# **Aeroelastic stability analysis and certification of wind turbine blades**

Panagiotis Schinas

## **Summary**

The present thesis is related with the key issue of wind turbines aeroelastic stability and the modern research developments of the certification processes analyzed to IEC certification code.

The first chapters deal with certification issues of wind turbines. The certification process is essential for the designers, especially the evaluation of fifty years design load base target.

W/T rotor blades are large composite structures operating in a completely stochastic environment. Hence, the applied wind loads and further the developed stress resultants in the rotor blade sections are stochastic themselves. Moreover, stochastic behaviour is also exhibited by composite materials showing great scatter both in their fatigue and static mechanical properties. A rational way to quantify the variability in the basic variables and take into account these uncertainties in the final design of the structure is provided by probabilistic methods.

Towards this, it was used as data input for the stochastic methodology an already known database of experimental data for the evaluation of composite mechanical properties. The stochastic models of composite material properties reproduce the statistical uncertainty of the blade beam properties, which resulted from the heterogeneity of composite materials.

In terms of wind inflow, its stochasticness is reproduced with 10 minute aeroelastic simulations. The simulations represent the loading over the whole structure with Kaimal wind spectrum. This spectrum is calculated with the relevant simulation software INWIND which was developed in the laboratory of aerodynamics.

Concerning the extreme loading, the long-term probability distribution for the extreme load is evaluated using load extrapolation technics according to IEC 61400-1 certification code. After the introduction of the 3rd edition of the IEC Standard 61400-1, designers of wind turbines are now required, in one of the prescribed load cases, to use statistical extrapolation techniques to determine nominal design loads.

For the present thesis, a simulation data made for the NREL 5MW turbine is used in order to compare the performance of several alternative techniques for statistical extrapolation of rotor loads. The methods are the GM and the POT method. Using each one of those, fifty-year return loads are estimated for the selected wind turbine.

Two methods for extracting maximum values from time series and three cumulative distribution functions CDFs to these maxima data are analysed and compared between each other, in order to find out which is the correct choice for collecting data and which CDFs is the appropriate to extrapolate data gathered. Also, a convergence analysis has been made for the evaluation of the extrapolation method and the necessary number of aeroelastic time series in particular. This study was made directly to the long term distribution of the extreme values. To the final CDF of the extreme values, the statistical uncertainty due to the limited number of aeroelastic simulations was accounted for. Also, the different alternative technics of data collection and statistical extrapolation methods for the rotor loads prediction were compared. These methods are the method of collecting one maximum value from the whole time simulation and the method of

selecting all values above a threshold. Finally at the end of the process, the 50 year design load value is estimated.

Also, the selection of parametric distribution used for fitting is analyzed. Firstly, the prediction of extreme loads under turbulent wind input is presented. Then the uncertainty for the composite material properties used in the blade construction is introduced. So, initially the extreme loads are calculated for the case of fixed composite material properties, and then similar estimates are obtained for lognormally distributed material properties. The properties considered are: the E1, the E2, the G12 and the  $\nu_{12}$ . The E1 is the tensile modulus of elasticity along the fibers of the composite. The E2 is the tensile modulus of elasticity vertical to the fibers. The G12 is the shear modulus and finally the  $\nu_{12}$  is the Poisson ratio. In both sets of estimated extreme loading the wind is turbulent. From these separate estimates, conclusions are made regarding what is the effect of the material properties on the design load estimations and the stress analysis of a blade section with statistical extrapolations.

A statistical code has been also developed with the commercial software Matlab, for the IEC code of W/T certification and especially for Annex F. Annex F refers to the extreme design load forecast. While this study makes use of aero-elastic simulations data in addressing statistical load extrapolation issues, the findings should also be useful in other ways. For example, the results are useful in similar questions regarding extrapolation techniques, distribution choices, and the amount of data that are needed.

In any case for the needs of the certification process, it is important to have a fast and precise code in order to have as many as possible aeroelastic calculations under realistic computation cost. For these needs a reduced order model has been developed for the simulation of the dynamic response of a W/T with twenty-two (22) DOFs in total. The formulation of the dynamic equations of the problem is based on the Hamilton's theorem. A simulation code was also programmed for the dynamic response and the analysis of a floating wind turbine, based on the aforementioned model, which was verified with the results from the finite element analysis code hGAST.

Similarly, a code was developed to simulate the aeroelastic behavior and taking into account the aeroelastic deflections to the aerodynamic loads of the rotor. For the system of equations, aeroelastic stability analysis was made with Coleman's transformation, in order to eliminate the periodic terms. Coleman's transformation is used to enable extraction of modal frequencies, damping, and periodic mode shapes of a rotating W/T by describing the rotor DOFs in the inertial frame. The Coleman approach is valid only for a homogeneous system. Disparate systems, e.g. an unbalanced rotor, are treated with the general approach of Floquet analysis. Floquet does not provide a unique reference frame for observing the modal frequencies, to which any multiple of the rotor speed can be added. This indeterminacy is resolved by requiring the periodic mode shape to be as constant as possible in the inertial frame. The modal frequency is thus identified as the dominant frequency in the response of a pure excitation of the mode is observed in the inertial frame. The corresponding code and the Floquet method were developed for the stability analysis of balanced and unbalanced W/T systems. A separate routine was programmed for the eigenvalue identification of the system. The effect of the periodic terms on the stability of the wind turbine was examined assuming mass difference for the blades, wind yaw etc. The tool was validated

against system identification with results from the hGAST FEM tool for the NREL 5MW wind turbine.

Concerning the eigenvalue identification process, in homogeneous conditions the periodic mode shape contains up to three harmonic components, but in disparate conditions it can contain an infinite number of harmonic components with frequencies that are multiples of the rotor speed. These harmonics appear in calculated frequency responses of the turbine. In order to identify the right eigenvalues from all multiples of the rotor speed, the appropriate identification method has been implemented.

So, the specific ROM can be used for fast aeroelastic calculations in order the design – certification process to be as fast as possible for the cases that the model is accurate and covers important part of the aeroelastic calculations.