

Ευφυή συστήματα με πιεζοηλεκτρικούς μεταλλάκτες

Τεχνικό άρθρο

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι μεταλλάκτες (transducers) μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Ο μετασχηματισμός της ενέργειας οφείλεται στη σύγευξη μηχανικού και ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει σε φυσικούς κρυστάλλους (όπως είναι ο χαλαζίας), ή επιβάλλεται μέσω τεχνικών πόλωσης σε τεχνητά κρύματα τιτανίου - πυριτίου ή σε πολυμερή υλικά. Τα παραπάνω φυσικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα να αναπτύσσουν ηλεκτρική τάση όταν υπόκεινται σε μηχανική παραμόρφωση (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) και το αντίστροφο, δηλαδή να παραμορφώνονται όταν ασκείται πάνω τους ηλεκτρική τάση (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εφαρμογές συστημάτων με χρήση πιεζοηλεκτρικών μεταλλάκτων που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) της Σχολής Μηχανικών Μηχανικών (ΣΜΜ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), και αφορούν το πεδίο των ελαφρών κατασκευών και της αεροναυπηγικής, καθώς βασίζονται σε μη-

ΓΡΑΦΟΥΝ οι κ. ΘΕΟΦΑΝΗΣ ΠΛΑΓΙΑΝΑΚΟΣ,
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΡΓΕΛΗΣ, ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΑΡΥΔΗΣ,
ΦΩΚΙΩΝΑΣ ΣΑΝΟΥΔΟΣ, ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΛΕΒΕΝΤΑΚΗΣ
ΚΑΙ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ*

Tα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι μεταλλάκτες (transducers) μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Ο μετασχηματισμός της ενέργειας οφείλεται στη σύγευξη μηχανικού και ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει σε φυσικούς κρυστάλλους (όπως είναι ο χαλαζίας), ή επιβάλλεται μέσω τεχνικών πόλωσης σε τεχνητά κρύματα τιτανίου - πυριτίου ή σε πολυμερή υλικά. Τα παραπάνω φυσικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα να αναπτύσσουν ηλεκτρική τάση όταν υπόκεινται σε μηχανική παραμόρφωση (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) και το αντίστροφο, δηλαδή να παραμορφώνονται όταν ασκείται πάνω τους ηλεκτρική τάση (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο).

Λόγω της παραπάνω ιδιότητας, χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες (sensors) ή/και ως επενεργητές (actuators) σε μετρητικά δργανα (δυναμοκυψέλες, επιταχυνσιόμετρα, πομπούς υπε-

ρήχων) και σε εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου σε ευρύτατα πεδία, όπως είναι η αεροναυπηγική, η αεροδιαστηματική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιοϊατρική τεχνολογία και η θρυλοτοπική. Συνεπώς, η προσθήκη πιεζοηλεκτρικών μεταλλάκτων επιτρέπει σε μια κατασκευή να «αντιλαμβάνεται» την παραμόρφωση (με αισθητήρες) και να αντιδρά ανάλογα (με επενεργητές) μέσω τεχνικών αυτομάτου ελέγχου. Γι' αυτό και το αντίστοιχο σύστημα χαρακτηρίζεται ως «ευφυές».

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εφαρμογές συστημάτων με χρήση πιεζοηλεκτρικών μεταλλάκτων που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) της Σχολής Μηχανικών Μηχανικών (ΣΜΜ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), και αφορούν το πεδίο των ελαφρών κατασκευών και της αεροναυπηγικής, καθώς βασίζονται σε μη-

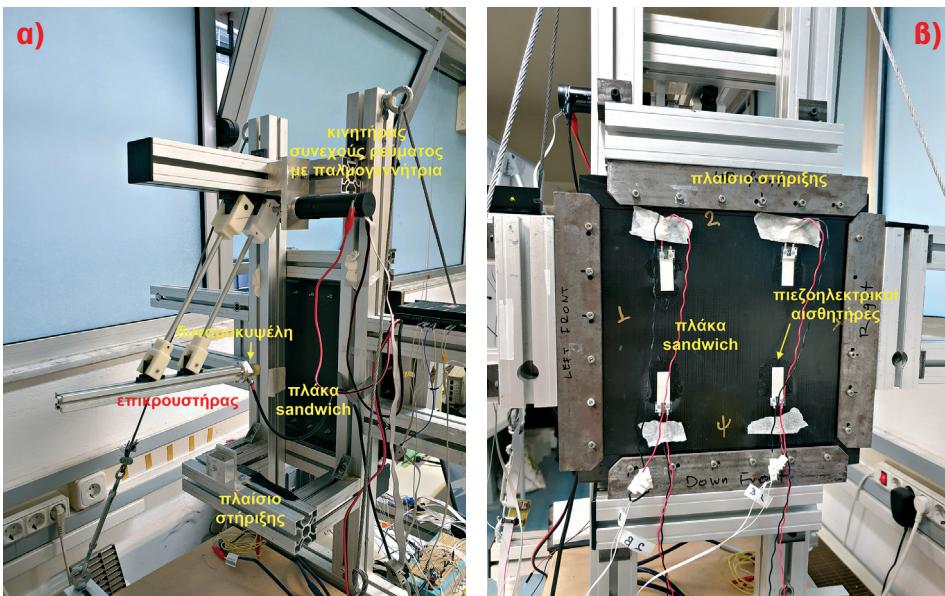


χανολογικό σχεδιασμό με σύνθετα υλικά και δομές τύπου sandwich.

Σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν μοντελοποίηση, κατασκευή πειραματικής διάταξης και πειραματική επιβεβαίωση των προβλέψεων της υπολογιστικής προσομοίωσης.

■ Αναγνώριση κρούσης σε αεροαυστηρικές κατασκευές

Κατά τη διάρκεια συναρμολόγησης, λειτουργίας ή επισκευής της, μια αεροαυστηρική κατασκευή είναι πιθανό να υποστεί κρούση χαμηλής ενέργειας (με ταχύτητα επικρουστήρα μικρότερη των 5m/s και μάζα επικρουστήρα μικρότερη του 1 kg). Η κρούση αυτή, που μπορεί να οφείλεται για παράδειγμα σε πτώση κάποιου εργαλείου κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης απαρτίων, επιφέρει σε δομές με σύνθετα υλικά (από τα οποία αποτελούνται



ΣΧΗΜΑ 1: Πειραματική διάταξη κρούσης χαμηλής ενέργειας σε πλάκα τύπου sandwich με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες: **α)** όψη πλευράς κρούσης, **β)** όψη επιφάνειας με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

πλέον τα περισσότερα δομικά στοιχεία αεροσκαφών) αιδιόδοτη βλάβη στο εσωτερικό της δομής με τη μορφή αποκόλλησης στρώσεων σύνθετου υλικού. Μια τέτοια βλάβη μπορεί να διαδοθεί γρήγορα λόγω των αεροδυναμικών φροτίων κατά τη λειτουργία της κατασκευής, και να οδηγήσει σε αυτοχάι της πριν τον προκαθορισμένο έλεγχο δομής ακεραιότητας.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ – και στο πλαίσιο ευρωπαϊκής υποτροφίας Marie Curie Intra-European Fellowship (IEF) – ένα σύστημα αναγνώρισης κρούσεων σε πλάκες από σύνθετο υλικό (ανθρακονήματα σε εποξική μήτρα) και σε πλάκες τύπου sandwich με εξωτερικές στρώσεις από σύνθετο υλικό και αφρώδη πυρογήνα από PVC^[1].

Οι δύο εφαρμογές συστημάτων με χρήση πιεζοηλεκτρικών μεταλλακτών που έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ

Η αρχή της λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στην ακριβή μοντελοποίηση της παραμόρφωσης της δομής με εξειδικευμένα αναλυτικά εργαλεία λογισμικού και αριθμητικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και στην τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων επί της κατασκευής.

Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος αναγνώρισης κρούσεων κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη (**σχήμα 1a**) που αποτελείται από στιβαρό πλαίσιο αλουμινίου, για τη συγκράτηση πλάκας με πιεζοη-

λεκτρικούς μεταλλάκτες (**σχήμα 1b**) και επικρουστήρα τύπου εκκρεμούς που κινείται με επιθυμητή ταχύτητα μέσω ηλεκτροκινητήρα με παλμογεννήτρια (encoder) και τεχνικής αυτομάτου ελέγχου^[2].

Στο σημείο που έρχεται σε επαφή με την πλάκα ο επικρουστήρας, έχει τοποθετηθεί δυναμοκυψέλη (load cell) σχεδιασμένη και κατασκευασμένη στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου^[3], ώστε να μετράται η δύναμη κρούσης. Τα σήματα των αισθητήρων και της παλμογεννήτριας λαμβάνονται και καταγράφονται σε ενσωματωμένο (embedded) λειτουργικό σύστημα προγραμματικού χρόνου (Real-TimeFPGA).

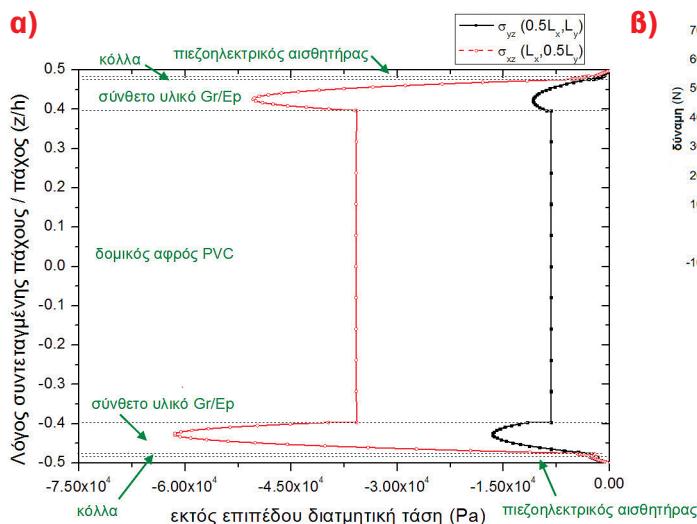
Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν προβλέπουν με ακρίβεια τις μηχανικές τάσεις που οδηγούν σε αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων σύνθετου υλικού, καθώς μπορούν να αναπαραστήσουν το ακριβές προφίλ της κατανομής τους κατά το πάχος της δομής (**σχήμα 2a**). Επιπλέον, μπορούν να προβλέψουν τα σήματα που παράγονται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με τη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής κατά την καταπόνησή της.

Έτσι, συγκρίνοντας τις προβλέψεις του μοντέλου για τα σήματα των αισθητήρων με τις αντίστοιχες μετρήσεις, και εφαρμόζοντας διαδικασία βελτιστοποίησης, είναι δυνατός ο εντοπισμός του σημείου όπου έγινε η κρούση, η ανακατασκευή του ιστορικού του συμβάντος (π.χ. ποιο ήταν το χρονικό προφίλ της δύναμης που αναπτύχθηκε κατά την κρούση) και τελικά η εκτίμηση για το αν η κρούση δημιουργήσε τοπική αστοχία στο εσωτερικό της δομής (**σχήμα 2b**).

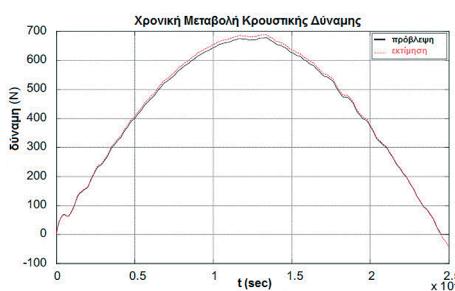
Με βάση την εκτίμηση αυτή μπορεί

Κατασκευές & υλικά

α)



β)



ΣΧΗΜΑ 2: Αναγνώριση κρούσης σε πλάκα τύπου sandwich με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες: **α)** Κατανομή διατμητικών τάσεων κατά το πάχος, **β)** ανακατασκευή κρουστικής δύναμης από σήματα αισθητήρων.

να αποφασιστεί αν χρειάζεται να γίνει μη καταστοφικός έλεγχος για ανίχνευση βλάβης μόνο στην περιοχή που υποδειχτηκε και όχι σε ολόκληρη την κατασκευή, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και σημαντικό κόστος λόγω της διακοπής της επιχειρησιακής λειτουργίας της κατασκευής (downtime cost).

Στην παρούσα φάση η αναγνώριση κρούσης γίνεται εκ των υστέρων (a posteriori), ενώ μελετάται η αναβάθμιση του συστήματος ώστε να μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο (realtime). Επίσης, το σύστημα επεκτείνεται ώστε με την ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικών επενεργητών να μπορεί να αποσβέσει ταλαντώσεις που δημιουργούνται λόγω της κρούσης με ενεργητικό τρόπο μέσω κατάλληλων τεχνικών αυτομάτου ελέγχου^[4].

Στο σχήμα 3β παρατίθεται η μείωση της μετατόπισης του κέντρου πλάκας από σύνθετο υλικό κατά την ταλάντωση που ακολουθεί την κρούση, μέσω της λειτουργίας κατάλληλα τοποθετημέ-

νων πιεζοηλεκτρικών επενεργητών (σχήμα 3α).

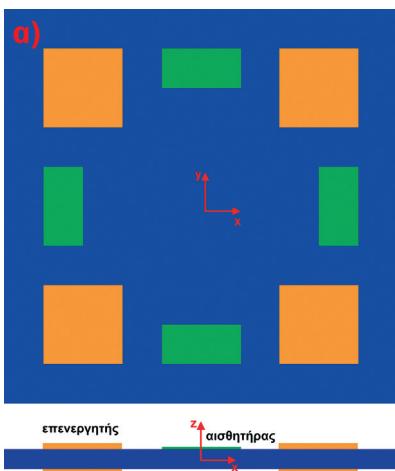
■ Συγκομιδή ενέργειας ταλάντωσης

Η τελευταία πενταετία χαρακτηρίζεται τεχνολογικά από τη θρησκεία εξέλιξη στον τομέα της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (IoT - Internet of Things). Σε αυτό το πλαίσιο, αισθητήρες με ασύρματη σύνδεση ενσωματώνονται σε κατασκευές και παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία τους. Όμως, οι αισθητήρες αυτοί, καθώς και τα υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται για την ασύρματη μετάδοση του μετρούμενου σήματος, απαιτούν παροχή ηλεκτρικής ισχύος μέσω μπαταριών. Οι μπαταρίες πρέπει να ανανεώνονται ή να επαναφορτίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, κάτιο το οποίο απαιτεί άμεση πρόσβαση σε αυτές.

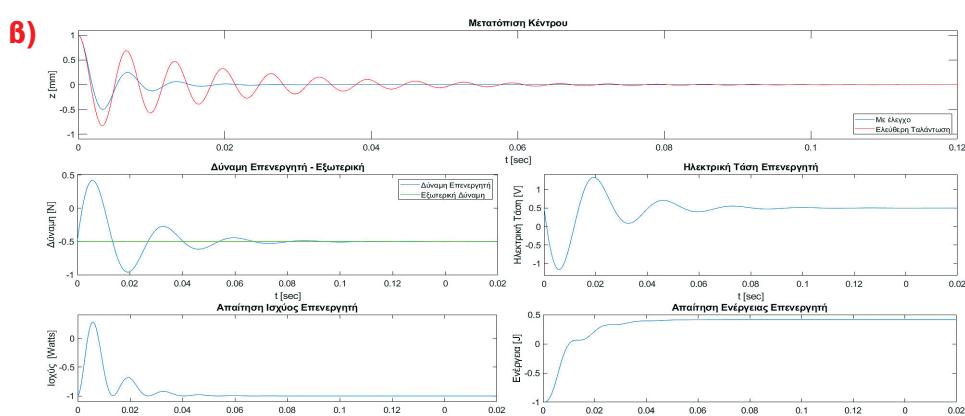
Στην περίπτωση κατασκευών που λειτουργούν στο εξωτερικό περιβάλλον, υπάρχει ενέργεια προερχόμενη από τον άνεμο ή τα θαλάσσια κύματα που

προκαλεί την ταλάντωσή τους, και η οπίσια μένει ανεκμετάλλευτη. Θα μπορούσε όμως να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, ειδικά στην περίπτωση απομακρυσμένων ή δυσπρόσιτων κατασκευών, όπου η επαναφόρτιση των μπαταριών είναι δύσκολη και συνεπώς ακριβή.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χαρακτηρίζονται ως μεταλλάκτες, καθώς μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Επομένως, η ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε μια κατασκευή που ταλαντώνεται λόγω περιβαλλοντικών διεργσεων μπορεί να οδηγήσει σε συγκομιδή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή μπορεί να αποθηκευτεί σε μπαταρία και να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ηλεκτρικές διατάξεις δύοτες είναι κεραίες, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένου ηλεκτρικού κυκλώματος. Στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας^[5] στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελεγχου μοντελοποιήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία και μελετήθηκε πειρα-



β)



ΣΧΗΜΑ 3: Ενεργητικός έλεγχος σε πλάκα με πιεζοηλεκτρικούς μεταπλάκτες:

α) Τοπολογία επενεργητών και αισθητήρων, **β)** Απόσβεση ταλάντωσης μέσω Βέλτιστου ελέγχου.



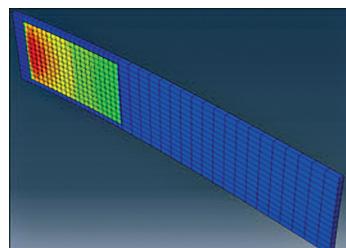
a)



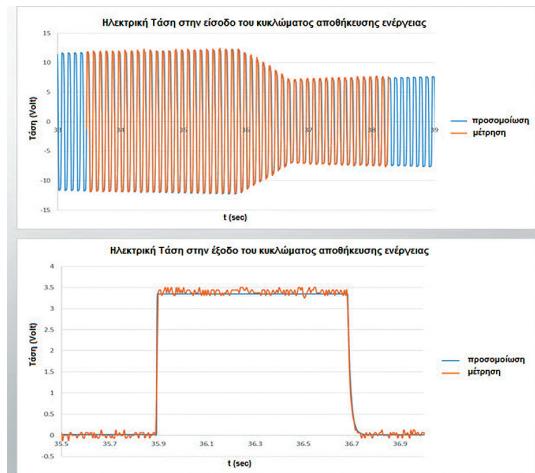
b)



γ)



ΣΧΗΜΑ 4: Συγκομιδή ενέργειας από ταλαντούμενη δοκό:
a) Πειραματική διάταξη, b) δοκίμιο με πιεζοπλεκτρικό
επίθεμα, γ) μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία.



ΣΧΗΜΑ 5: Χρονικό προφίλ πλεκτρικής τάσης που συλλέχθηκε από την παραμόρφωση ταλαντούμενης δοκού.

■ Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών (ΣΜΜ) του ΕΜΠ, με επικεφαλής τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, επικεντρώνει την ερευνητική του δραστηριότητα στην περιοχή του Αυτομάτου Ελέγχου, της Ρομποτικής και της Μηχανοτροπικής.

Το Εργαστήριο έχει ιδιαιτέρως δυναμική παρουσία διεθνώς, τόσο στην εκπόνηση ανταγωνιστικών ερευνητικών έργων, όσο και σε δημοσιεύσεις σε γέγκριτα διεθνή περιοδικά και συνέδρια. Είναι εξοπλισμένο με τηλερομποτικά, τετράποδα, σερβοϋδραυλικά και υπο-

ρυμάτων, με εξομοιωτή διαστημικών ρομπότ σε τροχιά, καθώς επίσης με εργαλειομηχανές, δίκιντα υπολογιστών, εργασίεια ανάπτυξης, εξειλιγμένα μετρητικά συστήματα και εειδικευμένο λογισμικό. Διαθέτει βασικό εργαστηριακό μηχανολογικό, πλεκτρικό και πλεκτρονικό εξοπλισμό και έχει μεταξύ άλλων ολοκληρώσει τα τελευταία δώδεκα χρόνια τον έλεγχο διαφόρων ρομπότ, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και διαφορετικούς στόχους.

Το Εργαστήριο στεγάζεται στο κτίριο «Μ» της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ αναπτύχθηκε ένα σύστημα αναγνώρισης κρούσεων σε πλάκες και σε πλάκες τύπου sandwich

χανικής και Ταλαντώσεων του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, με τις εταιρείες ήλεκτρονικών «Πρόσμα ΑΒΕΕ» και «SEEMS», και με την «Ελληνική Τεχνοδομική - Ανεμος» – να κατασκευαστεί αντίστοιχο ενεργειακά αυτόνομο σύστημα καταγραφής και αισθόματης μετάδοσης δεδομένων από αισθητήρες τοποθετημένους σε πτερύγια ανεμογεννητριών.

Εφόσον αποδειχτεί λειτουργικό, το σύστημα αυτό θα μπορούσε να έχει ευρύτατο πεδίο εφαρμογής σε δυσπρόσιτες κατασκευές που ταλαντώνονται υπό την επίδραση περιβαλλοντικών διεργσεων.

Βιβλιογραφία

1. Plagianakos T., Lika K. and Papadopoulos E., "Low-velocity impact response of smart sandwich composite plates with piezoelectric transducers: modeling and experiments," *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Vol. 27, No. 6, 2016, pp. 774-785.
2. Καρύδης Π., "Ενεργητικός έλεγχος τροχιάς επικρουστήρα για την πειραματική διερεύνηση κρούσεων σε πλάκες από αεροναυπηγικά υλικά", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, 2019.
3. Λίκα Κ., "Σχεδιασμός και κατασκευή αισθητήρα δύναμης / ροπής 5 αξόνων", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, 2013.
4. Σανούδος Φ., "Ενεργητικός έλεγχος ταλαντώσεων κατασκευών από σύνθετα υλικά με πιεζοπλεκτρικά επίθεμα", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, 2019.
5. Μαργέλης Ν., "Αναθητική και πειραματική μελέτη αποθήκευσης ενέργειας σε δοκό με πιεζοπλεκτρικό αισθητήρα", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, 2017.
6. Λεβεντάκης Ν., "Σχεδιασμός και ανάπτυξη συστήματος απορρόφησης κυματικής ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, 2012.
7. Λεβεντάκης Ν., "Σχεδιασμός και υλοποίηση πλεκτρονικού συστήματος για τη διαχείριση πλεκτρικής ισχύος με χρήση πλεκτρονικών ισχύος και αυτομάτου ελέγχου", Μεταπτυχιακή Εργασία, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, 2018.

ματικά (**σχήμα 4**) η εξαναγκασμένη ταλάντωση δοκού από σύνθετο υλικό, επί της οποίας τοποθετήθηκε πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch).

Επιπλέον, σε εξειδικευμένο λογισμικό προσσομοίωσης ήλεκτρικών κυκλώματων (Spice) σχεδιάστηκε κύκλωμα το οποίο αποτελείται κατά κύριο λόγο από πηνία και πυκνώτες και συνδέεται με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Μέσω του κυκλώματος συλλέγεται η μηχανική ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική λόγω της παραμόρφωσης του επιθέματος κατά την ταλάντωση. Όταν η συλλεχθείσα ενέργεια είναι αρκετή ώστε να παραχθεί ήλεκτρική τάση που ξεπερνά μία καθορισμένη τιμή, κλείνει ένας διακόπτης και το κύκλωμα αποδίδει την ενέργεια, συμπεριφορά που επιβεβαιώθηκε πειραματικά (**σχήμα 5**).

Στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου υπάρχει συσσωρευτές εμπειριώνα στο ευρύτερο πεδίο της συγκριδυίας ενέργειας από πειριβαλλοντικές διεγέρσεις, καθώς έχουν εκπονηθεί δύο διτλωματικές εργασίες^[6-7] που περιλαμβάνουν μηχανικής διατάξεις και εξειδικευμένα κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου για τη μεγιστοπότηση της ενέργειας που συλλέγεται.

Ειδικότερα στο πεδίο της συγκριδυίας δήλωσε ενέργειας από πιεζοηλεκτρικούς μετασχηματιστές, ο σχεδιασμός του συστήματος επεκτείνεται στο ερευνητικό έργο EN.AY.SY. της Δράσης «Ερευνώ - Δημιουργώ - Καινοτομώ» (ΕΣΠΑ - Επιχειρηματικό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα, Καινοτομία» 2014 - 2020), ώστε –σε συνεργασία με το Εργαστήριο Τεχνικής Μη-

*Οι συγγραφείς συνεργάζονται με το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, όπου ο κ. Θεοφάνης Πλαγιανάκης είναι δρ. μηχανολόγος μηχανικός, ο κ. Νικόλαος Μαργέλης, Παναγιώτης Καρύδης, Φωκιώνας Σανούδος και Νικόλαος Λεβεντάκης είναι μηχανολόγοι μηχανικοί, και ο κ. Ευάγγελος Παπαδόπουλος είναι καθηγητής.