ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Έλεγχος Απόκρισης Βιομηχανικής Καπνοδόχου με Χρήση Μαζών Καθησύχασης.»

Παναγιωτίδης Θεόδωρος

Α.Μ.:2006010025

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: *Σταυρουλάκης Γεώργιος.*

Χανιά, 2013

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία σχετίζεται με τον *έλεγχο της απόκρισης* μιας συγκεκριμένης καπνοδόχου όταν αυτή υπόκειται στην δυναμική επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως ο αέρας και οι σεισμοί. Λόγω της ιδιαίτερης ευαισθησίας αυτών των ψηλών κατασκευών σε αυτές τις επιδράσεις, και για την εξασφάλιση της ισορροπίας και σταθερότητάς τους, θα χρησιμοποιηθεί μια διάταξη απόσβεσης *Tuned Mass Damper*.

Ο σκοπός της χρήσης του Tuned Mass Damper και κατ' επέκταση ο στόχος της εργασίας, είναι *η μείωση του πλάτους των μηχανικών κραδασμών ή αρμονικών δονήσεών της κατασκευής, που προκαλούνται από περιβαλλοντικές δυνάμεις.*

Τους 4 κύριους άξονες του συγγράμματος αποτελούν:

Τα εισαγωγικά μέρη, όπου γίνεται αναφορά στο τι είναι η βιομηχανική καπνοδόχος και τι το σύστημα T.M.D.. Επίσης, αναφέρονται συγκεκριμένα παραδείγματα που εφαρμόστηκαν συστήματα T.M.D.καθώς και τα είδη αυτών των διατάξεων που σχεδιάζονται από βιομηχανίες του κλάδου.

Η εστίαση στο συγκεκριμένο θέμα, όπου γίνεται λόγος για μια συγκεκριμένη καπνοδόχο και έναν συγκεκριμένο τύπο Tuned Mass Damper που θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση αυτή.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος, στην οποία αρχικά μοντελοποιείται η καπνοδόχος ως ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, και στην συνέχεια η καπνοδόχος με την χρήση του αποσβεστήρα, ως ένα σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας. Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις, εξάγεται η εξίσωση κίνησης και δημιουργούνται τα μητρώα μάζας , δυσκαμψίας και απόσβεσης .

Τέλος, *το προγραμματιστικό μέρος της εργασίας* , όπου με την χρήση του προγράμματος Matlab καταλήγουμε στα τελικά αποτελέσματα της εργασίας, εξάγοντας διαγράμματα τόσο για την περίπτωση της καπνοδόχου χωρίς τον αποσβεστήρα, όσο και για την περίπτωση με αυτόν.

Καταληκτικά, ο επίλογος απαντάει στο ερώτημα που προκύπτει εάν η εφαρμογή του Tuned Mass Damper στην καπνοδόχο μείωσε το πλάτος των ταλαντώσεων της κατασκευής και εξασφάλισε την ισορροπία και την σταθερότητά του.

Περιεχόμενα

Περίληψη 2

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 4

1.1 Βιομηχανική Καπνοδόχος..... 4

1.2 TunedMassDampers..... 6

1.3 Είδη Tuned Mass Damper 11

2. ΘΕΜΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 14

2.1. Γενικά..... 14

2.2. Η Βιομηχανική Καπνοδόχος του Gdansk..... 14

2.3. Επιλογή συστήματος TMD για την καπνοδόχο 15

2.4 Σκοπός της εργασίας 16

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ 17

3.1 Γενική Εικόνα..... 17

3.2 Βασικές Σχέσεις 17

3.3 Μοντελοποίηση της Καπνοδόχου ΧΩΡΙΣ την χρήση TMD 19

3.4 Μοντελοποίηση της Καπνοδόχου ΜΕ την χρήση TMD 20

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... 21

4.1 Εισαγωγή στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB..... 21

4.2 Υπολογισμοί μέσω MATLAB..... 24

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 28

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 30

Βιβλιογραφία 31

Παράρτημα 1..... 32

Παράρτημα 2..... 45

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Βιομηχανική Καπνοδόχος

Εικόνα 1

Η Βιομηχανική Καπνοδόχος (Industrial Chimney) είναι η κατακόρυφη σήραγγα δια της οποίας τα καυσαέρια οδηγούνται στην ατμόσφαιρα. Η κατακόρυφη τοποθέτησή της, έχει ως στόχο την διασφάλιση της ομαλής κίνησης των αερίων έλκοντας ταυτόχρονα φρέσκο αέρα στον χώρο καύσης («φαινόμενο της καμινάδας»).

Οι Βιομηχανικές Καπνοδόχοι έχουν συνήθως μεγάλο ύψος (οι υψηλότερες φτάνουν σε ύψος κι άνω των 300m, Βλ. πίνακα 1.), ώστε αφενός να μην επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα και αφετέρου να αυξάνουν την ταχύτητα ροής των αερίων.Σήμερα, στις εγκαταστάσεις ξηράς, η καπνοδόχος συνήθως είναι είτε από σιδηροπαγές τσιμέντο, είτε μεταλλική και η τομή της κυκλική.

Ένα σύστημα απαγωγής καυσαερίων αποτελείται από το δίκτυο των αγωγών διαμέσου των οποίων το καυσαέριο οδηγείται στην ατμόσφαιρα, που στην ουσία αποτελεί αυτή καθεαυτή την καπνοδόχο. Στο ανώτερο σημείο της τοποθετείται το «καπέλο», που προστατεύει την σκεπή από αποτεφρωμένα σκουπίδια και την καμινάδα από πουλιά και από τα νερά της βροχής, και διευκολύνει την ομαλή ροή του αέρα. Στο σύστημα απαντάται και ο καπναγωγός που συνδέει τις συσκευές καύσης με την κυρίως (εξωτερική) καπνοδόχο. Εντός του συστήματος πέρα από αυτά τα βασικά μέρη απαντώνται και πλήθος άλλων προαιρετικών εξαρτημάτων όπως τα νταμπερ, οι ηχοπαγίδες, οι θυρίδες επίσκεψης, θερμόμετρα, πιεσόμετρα κ.α.

Για την ιστορία, οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν αγωγούς για να μεταφέρουν τους καπνούς εκτός του εσωτερικού του κτιρίου ήταν οι Ρωμαίοι αρτοποιοί. Ωστόσο, οι πρώτες πραγματικές καπνοδόχοι εμφανίστηκαν στην Βόρεια Ευρώπη τον 12ο αιώνα. Οι βιομηχανικές καπνοδόχοι εμφανίστηκαν στα τέλη του 18ου αιώνα, μαζί με την εμφάνιση της βιομηχανίας.

Πίνακας 1.	Καπνοδόχος	Έτος Κατασκευής	Χώρα	Ύψος	Παρατηρήσεις
1	***GRES-2 PowerStation*** ***(Εικόνα 1)***	1987	Καζακστάν	420 m	*Η υψηλότερη καπνοδόχος στον κόσμο*
2	***IncoSuperstack***	1971	Καναδάς	385 m	
3	***KennecottSmokestack***	1978	Η.Π.Α.	370 m	
4	***Berezovskaya GRES***	1985	Ρωσία	370 m	
5	***TrbovljeChimney***	1976	Σλοβενία	360 m	
6	***MaritsaIztokComplex***	1977	Βουλγαρία	325 m	*Το υψηλότερο οικοδόμημα της χώρας*
7	***ThermalPowerStationKakanj***	1988	Βοσνία	300 m	
8	***SagardighiThermalPowerStation***	2004	Ινδία	275 m	
9	***SimhadriThermalPowerPlant***	2002	Ινδία	275 m	
10	***DraxPowerStation***	1973	Ηνωμένο Βασίλειο	259 m	

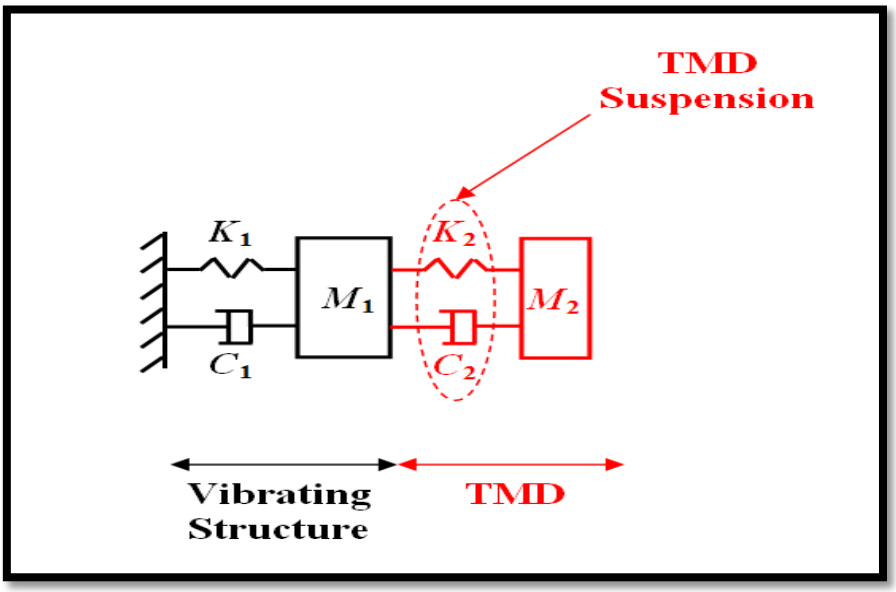
Οι Βιομηχανικές καπνοδόχοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες κατασκευές στην δυναμική επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων (σεισμοί, αέρας, κτλ.). Ιδιαίτερα εάν οι κατασκευές είναι από χάλυβα, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρές αποσβέσεις. Οι δονήσεις της κατασκευής, υπό την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων, τείνουν να την καταστήσουν ασταθή.

Λαμβάνοντας υπ’όψιν τα δεδομένα αυτά, είναι επιτακτική η ανάγκη μελέτης της σταθερότητας της κατασκευής και η εξασφάλιση της ισορροπίας της. Για τον λόγο αυτό, η χρήση διατάξεων απόσβεσης είναι μια αποτελεσματική μέθοδος.

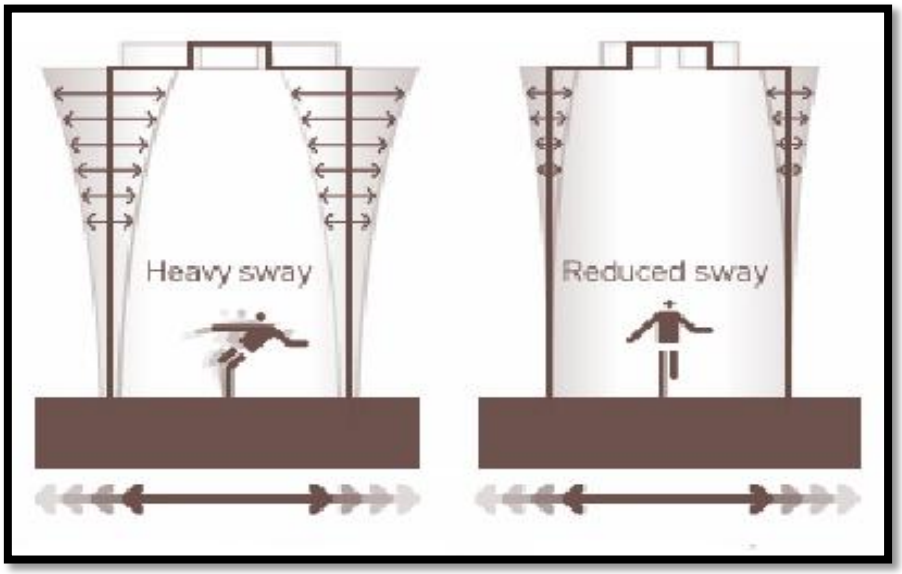
Μια ευρέως διαδεδομένη διάταξη απόσβεσης είναι τα Tuned Mass Dampers (Συντονισμένοι Αποσβεστήρες Μάζας).

1.2 TunedMassDampers

Ο Tuned Mass Damper (T.M.D.) είναι μια διάταξη απόσβεσης, της οποίας η λειτουργία βασίζεται στην αρχή της αδράνειας. Αποτελείται από μια μάζα που συνδέεται, μέσω ενός ελατηρίου και ενός ιξώδους αποσβεστήρα, στην κατασκευή (σχήμα 1). Σκοπός της είναι η μείωση του πλάτους των μηχανικών κραδασμών ή αρμονικών δονήσεών της κατασκευής, που προκαλούνται από περιβαλλοντικές δυνάμεις(σχήμα 2). Το σύστημα T.M.D. χρησιμοποιείται κυρίως σε ψηλές δομικές κατασκευές (όπως ουρανοξύστες, γέφυρες, κεραίες radar, καπνοδόχοι) για την εξασφάλιση της ισορροπίας-σταθερότητάς τους, υπό την διέγερση ενός σεισμού ή του αέρα.



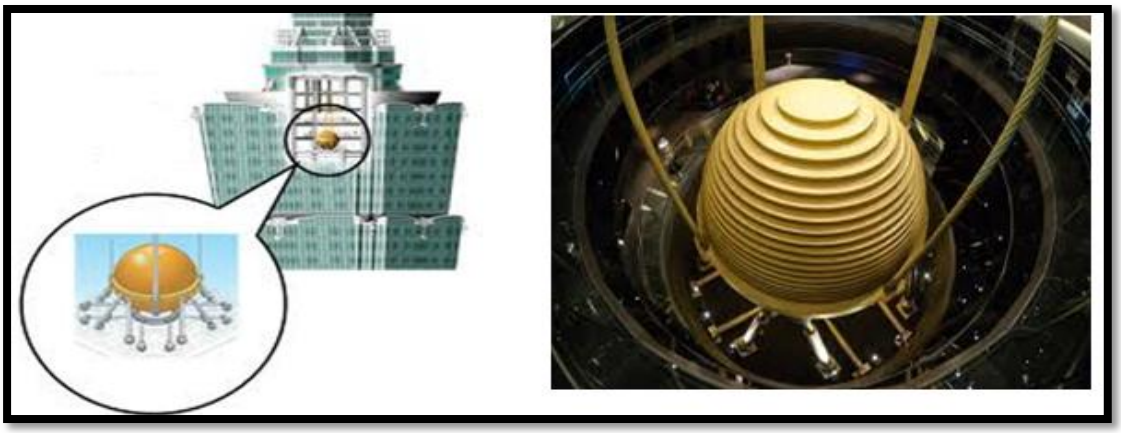
Σχήμα 1



Σχήμα 2

Η *γερμανική εταιρία* GERBS.A. αναφέρει στο επίσημο site της (www.gerb.com), ότι οι Tuned Mass Dampers που παρέχει αυτή αλλά και οι υπόλοιπες εταιρίες του κλάδου, χρησιμοποιούνται κυρίως για :

- *Ψηλές και λεπτές αυτοτελείς κατασκευές* (ουρανοξύστες, γέφυρες, καμινάδες, πύργοι TV) οι οποίες τείνουν να διεγερθούν επικίνδυνα από τον άνεμο.
- *Σκάλες, κερκίδες, πεζογέφυρες* οι οποίες διεγείρονται από τις δονήσεις που προκαλούν οι άνθρωποι (περπάτημα, τρέξιμο κτλ.). Αυτές οι δονήσεις είναι συνήθως ακίνδυνες για την ίδια τη δομή, αλλά μπορούν να γίνουν πολύ δυσάρεστες για τους ανθρώπους.
- *Μεταλλικές κατασκευές και δάπεδα εργοστασίων* τα οποία διεγείρονται από δονήσεις που προκαλούν μηχανές (όπως οθόνες, συσκευές φυγοκέντρησης, ανεμιστήρες, κλπ.).
- *Πλοία* τα οποία διεγείρονται από τις μηχανές ή και από την θάλασσα και τον άνεμο.



Εικόνα 2 (Εφαρμογή TMD στον ουρανοξύστη Taipei World Financial Center)

Εικόνα 3 (Τοποθέτηση TMD σε πεζογέφυρα στην Αγγλία.)

Εικόνα 4 (Εφαρμογή TMD στον ατσάλινο σκελετό του Burj al Arab.)

Εικόνα 5 (TMD σε γέφυρα.)

Εικόνα 6 (Εφαρμογή TMD σε χαλύβδινη καπνοδόχο.)

Εικόνα 7 (TMD στην κορυφή καπνοδόχου 183m, Αγγλία.)

1.3 Είδη Tuned Mass Damper

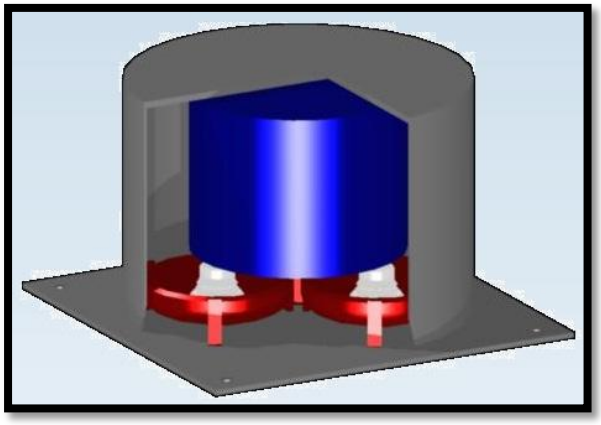
Υπάρχουν διάφορα είδη Tuned Mass Damper που κατασκευάζονται, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται σε κάθε κατάσταση με τον βέλτιστο τρόπο.

Σύμφωνα με την Ολλανδική εταιρία “Flow Engineering SA” , ο σχεδιασμός ενός TMD εξαρτάται από:

i) την συχνότητα ταλάντωσης,
ii) τη μάζα της δομής,
iii) την κατεύθυνση των κινήσεων (οριζόντια ή κάθετη),
iv) το διαθέσιμο χώρο.

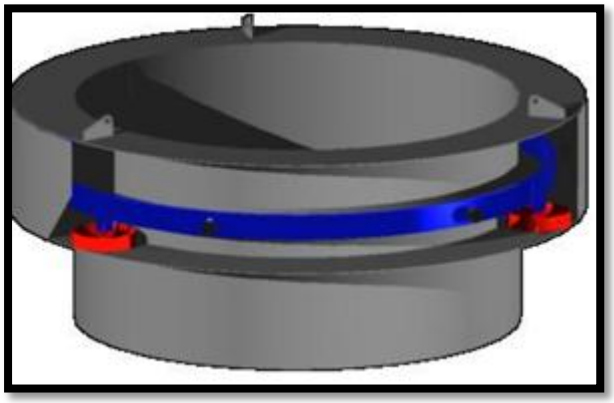
Έτσι, διακρίνουμε τα εξής βασικά είδη:

- **Roll-Box damper**



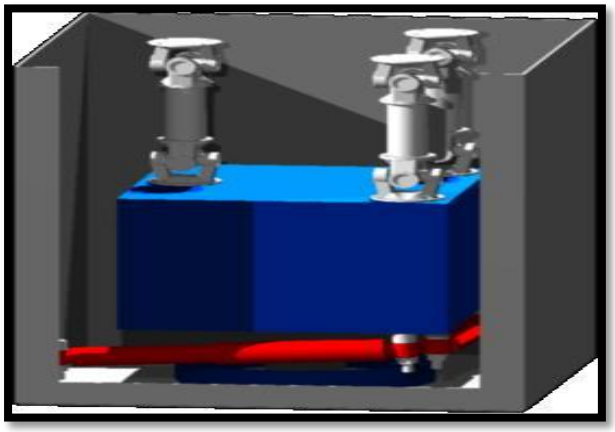
Το Roll-Box damper είναι ένα κυλινδρικό κουτί με διάμετρο περίπου 0,60 m και ύψος 0,50 m. Μέσα είναι μια κινούμενη μάζα (από 10 έως 40 kg). Το κουτί είναι στερεωμένο στην δονούμενη δομή. Το αποτέλεσμα θα είναι η αύξηση της απόσβεσης έως 10%. Γενικά, αυτό είναι επαρκές για την πρόληψη σοβαρών δονήσεων.

- **Roll-Ring damper**



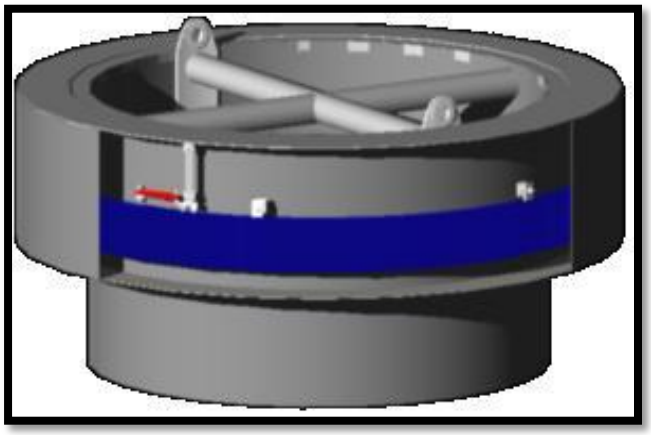
Το Roll-Ring damper είναι ένας αποσβεστήρας σε σχήμα δακτυλιδιού που εφαρμόζεται κυρίως γύρω από μια καπνοδόχο. Ο δακτύλιος κινείται πάνω σε, τουλάχιστον, τρία ρουλμάν. Το αποτέλεσμα αυτού του δακτυλίου είναι η αυξημένη απόσβεση της δόνησης. Είναι κατάλληλο για προστασία καπνοδόχων από την επίδραση του αέρα.

- **The Box-Damper**



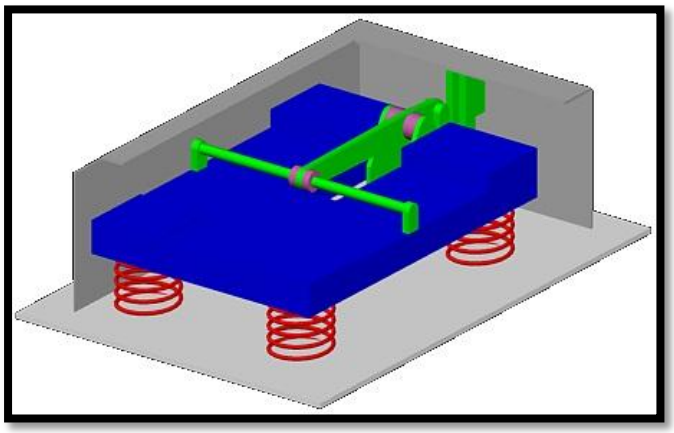
Το Box-Damper αποτελείται από μια κινούμενη μάζα (από 40 έως 30.000 κιλά) η οποία κρέμεται από ράβδους ανάρτησης. Η μάζα κινείται ανεξάρτητα από τη δομή. Η μάζα του αποσβεστήρα καθώς και οι ράβδοι ανάρτησης και τα υδραυλικά αμορτισέρ είναι εγκατεστημένα σε ένα κλειστό κουτί, ώστε να προστατεύονται από την βροχή.

- **Hydamp System**



Το Σύστημα Hydamp έχει μια κινούμενη μάζα που κρέμεται από ράβδους ανάρτησης. Μεταξύ της δομής και της μάζας του αποσβεστήρα είναι εγκατεστημένο ένα υδραυλικό αμορτισέρ, το οποίο απορροφά την ενέργεια . Κατά συνέπεια οι δονήσεις μειώνεται.

- **Spring damper system**



Το Spring damper system αποτελείται από μια κινούμενη μάζα, τοποθετημένη πάνω σε ελικοειδή ελατήρια. Η μάζα και τα υδραυλικά αμορτισέρ είναι συνδεδεμένα με ένα σύστημα ανάρτησης PROLINK. Το σύστημα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να βαθμονομήσουμε τις τιμές των αποσβέσεων με υψηλή ακρίβεια.

2. ΘΕΜΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1. Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει αναφορά σε μια, εν λειτουργία, χαλύβδινη Βιομηχανική Καπνοδόχο, στην οποία θα προσαρμόσουμε ένα σύστημα TMD. Η μελέτη θα γίνει πάνω σε πραγματικά αριθμητικά στοιχεία που αντλήσαμε από την συγκεκριμένη καπνοδόχο και τον συγκεκριμένο TMD. Συγκεκριμένα:

2.2. Η Βιομηχανική Καπνοδόχος του Gdansk

Η κατασκευή πάνω στην οποία θα εργαστούμε είναι μια χαλύβδινη, ανεξάρτητη καπνοδόχος, η οποία βρίσκεται στην περιοχή του Gdansk της Πολωνίας, σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 6). Η καπνοδόχος έχει ύψος 76.80 m, με εσωτερική διάμετρο 2.9 m. Η ολική μάζα της έχει υπολογιστεί m1=122039 kg. Ο συντελεστής δυσκαμψίας k1, καθώς και ο συντελεστής απόσβεσης c1, υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$k1= 4\pi^2 (m_1/T^2) ,$$

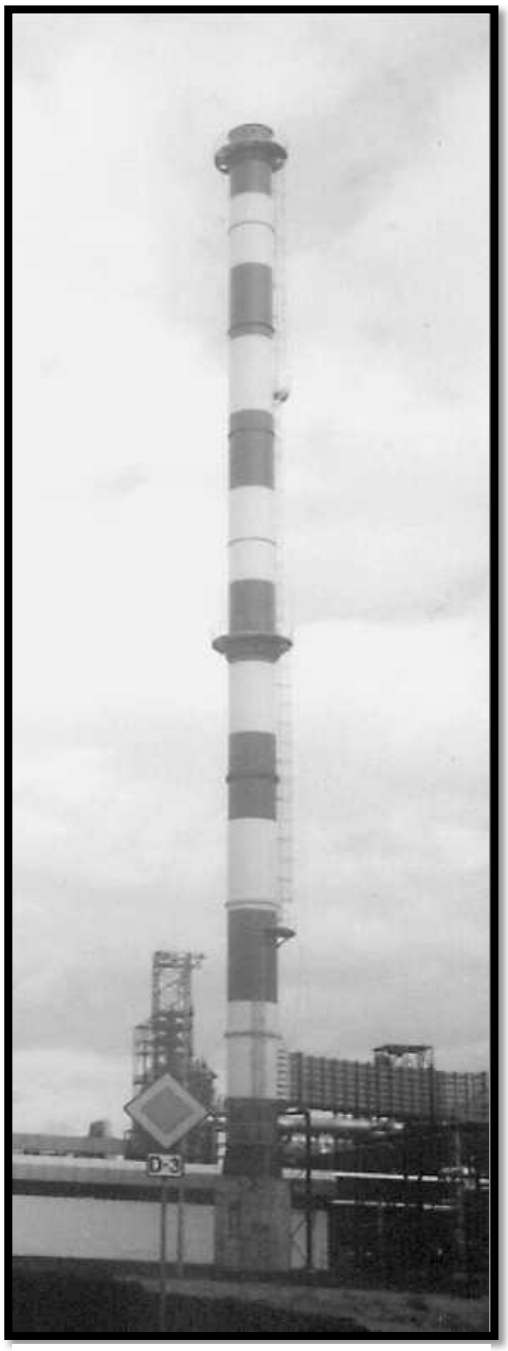
$$c1=2\xi (m_1k_1)^{1/2} ,$$

Όπου η *φυσική περίοδος T,ο λόγος απόσβεσης ξ* και η *φυσική συχνότητα wH* της καπνοδόχου,λαμβάνουν τις τιμές:

$$T=2.158s , \xi=0.0137 ,wH=2\pi/T$$

που προκύπτουν από τις επί τόπου μετρήσεις των μετατοπίσεων της καπνοδόχου λόγω της άσκησης εξωτερικής δύναμης σε αυτήν. Ως εκ τούτου, τα στοιχεία που προκύπτουν για την συγκεκριμένη καπνοδόχο είναι:

- m1=122039 kg ,
- k1= 1033544N/m ,
- c1=9731 kg/s .



Εικόνα 8

2.3. Επιλογή συστήματος TMD για την καπνοδόχο

Για την επιλογή του συστήματος απόσβεσης που θα εφαρμόσουμε στην καπνοδόχο, αντλήσαμε πληροφορίες από την γερμανική εταιρία κατασκευής χαλύβδινων δομών «Maurer Söhne». Τμήμα της εταιρίας αυτής ασχολείται με συστήματα προστασίας των κατασκευών και κυρίως με τα Tuned Mass Dampers. Οι πληροφορίες που αντλήσαμε από την εν λόγω εταιρία αφορούν κυρίως τα κριτήρια εφαρμογής ενός TMD πάνω στην βασική κατασκευή.

Εικόνα 9

Αρχικά, για τον αποσβεστήρα που θα εφαρμόσουμε στην καπνοδόχο, επιλέξαμε δείκτη αναλογίας μάζας (mass ratio)

$$\mu=(m_2/m_1)=0.025 \ .$$

Η τιμή του συγκεκριμένου δείκτη αναλογίας θεωρείται μεσαίου μεγέθους .

Λαμβάνοντας υπόψιν το mass ratio, η μάζα του αποσβεστήρα προκύπτει **m2=3.051 kg .**

Ο βέλτιστος λόγος φυσικών συχνοτήτων (kopt) καθώς και ο βέλτιστος λόγος απόσβεσης του TMD (ξopt), σχετίζονται άμεσα με τον δείκτη αναλογίας μάζας και υπολογίζονται ως εξής:

$$kopt= 1/(1+\mu)=wD/wH$$

$$\xi opt= [3\mu/[8(1+\mu)^3]]^{1/2}$$

όπου:

wD , η φυσική συχνότητα του TMD.

wH , η φυσική συχνότητα της καπνοδόχου.

- Ο αποσβεστήρας θα έχει μορφή δακτυλίου ο οποίος θα εφαρμόζεται περιμετρικά στο εξωτερικό της καπνοδόχου (Εικόνες 7,8). Η επιλογή αυτή σχετίζεται καθαρά με την λειτουργικότητα της καπνοδόχου.
- Ηταλάντωσή του θα περιορίζεται στον οριζόντιο άξονα, στην ίδια κατεύθυνση δηλαδή με την ταλάντωση της καπνοδόχου

Εικόνα 10

2.4 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι ο έλεγχος της απόκρισης της Βιομηχανικής Καπνοδόχου με την χρήση μαζών καθησύχασης (T.M.D.).

Ο Tuned Mass Damper που θα επιλεχθεί θα έχει ως στόχο την μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων της κατασκευής, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος κατάρρευσής της.

Συγκεκριμένα, θα γίνει παρουσίαση της μόνιμης απόκρισης των βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Η απόκριση κάθε βαθμού ελευθερίας θα απεικονίζεται σε γράφημα αρχικά χωρίς και στην συνέχεια με δυνάμεις απόσβεσης.

Με αυτόν τον τρόπο θα απεικονίσουμε την επίδραση που έχει ο συγκεκριμένος αποσβεστήρας TMD στο σύστημα.

Οι ***παραδοχές*** που θα δεχτούμε στην μελέτη θα είναι:

i. Τα δυναμικά συστήματα θα έχουν την μορφή μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα.
ii. Η κίνηση θα περιορίζεται στον οριζόντιο άξονα.
iii. Η όλη κατασκευή (η καπνοδόχος) θα εξομοιωθεί ως ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας (1 D.O.F).
iv. Ως εκ τούτου, η κατασκευή, με την προσθήκη του συστήματος TMD,θα αποτελεί σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας (2D.O.F.).

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 Γενική Εικόνα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μοντελοποιήσουμε το δυναμικό σύστημα αρχικά χωρίς την χρήση του αποσβεστήρα και στη συνέχεια με αυτόν.

Η καπνοδόχος, *χωρίς την χρήση αποσβεστήρα*, θα μοντελοποιηθεί ως ένα μονοβάθμιο σύστημα (1 βαθμός ελευθερίας).

Η καπνοδόχος, *με την χρήση αποσβεστήρα*, θα αποτελέσει ένα διβάθμιο σύστημα (2 βαθμοί ελευθερίας).

Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις, θα εξάγουμε την εξίσωση κίνησης και θα δημιουργούμε:

τα μητρώα Μάζας (M), τα μητρώα Δυσκαμψίας (K), και τα μητρώα απόσβεσης (C).

3.2 Βασικές Σχέσεις

Αν T η φυσική περίοδος ενός συστήματος και ξ ο λόγος απόσβεσης, τότε:

$w=2\pi/T$, η φυσική συχνότητα.

$k=w^2m$, ο συντελεστής δυσκαμψίας.

$c=2\xi(mk)^{1/2}$, ο συντελεστής απόσβεσης.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω, γνωρίζοντας και την μάζα m, η εξίσωση κίνησης του συστήματος '1 βαθμού ελευθερίας' δίνεται από την σχέση:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = F(t)$$

Γενικά, η εξίσωση κίνησης ενός συστήματος N βαθμών ελευθερίας μπορεί να περιγραφεί από το σύστημα:

$$Mx''(t) + Cx'(t) + Kx(t) = F(t)$$

Όπου M,C,K, τα μητρώα Μάζας , Απόσβεσης , και Δυσκαμψίας αντίστοιχα.

Θεωρώντας ότι η *εξωτερική δύναμη* που θα ασκείται στην καπνοδόχο είναι αρμονική, ο τύπος που την εκφράζει, συναρτήσει του χρόνου, είναι:

$$F(t) = F^* e^{j\omega t} + \overline{F^* e^{j\omega t}}$$

Έτσι το δυναμικό σύστημα, στο οποίο επιδρά αρμονική διέγερση, γράφεται, με την βοήθεια μιγαδικών αριθμών, στην μορφή:

$$Mx''(t) + Cx'(t) + Kx(t) = F^* e^{j\omega t} + \overline{F^* e^{j\omega t}}$$

Επιπλέον, η *απόκριση του συστήματος*, στην μόνιμη κατάσταση, θα εκφράζεται μέσω μιγαδικών αριθμών ως εξής:

$$x(t)=X^* e^{j\omega t} + \overline{X^* e^{j\omega t}}$$

**[Όπου υπάρχει αστερίσκος (*), εννοείται μιγαδικός αριθμός (X*= [Re]+j[Im]).]*

**[Όπου υπάρχει παύλα πάνω από τους μιγαδικούς, εννοείται συζυγής μιγαδικός.]*

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στην εξίσωση κίνησης ενός συστήματος N βαθμών ελευθερίας προκύπτει η συνάρτηση:

$$(-M\omega^2 + K + jC\omega)X^* = F^*$$

Θέτοντας $Z=(-M\omega^2 + K + jC\omega)$, καταλήγουμε στην σχέση :

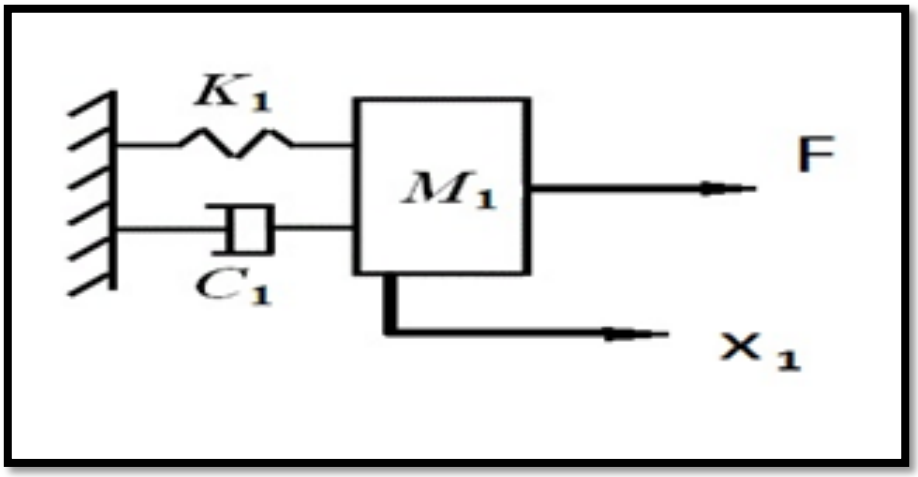
$$X^* = F/Z$$

Και κατ' επέκταση:

$$|X^*|=|F^*| /|Z|$$

Το μέτρο της παραπάνω μιγαδικής ποσότητας μας δίνει το πλάτος της ταλάντωσης για διαφορετικές συχνότητες.

3.3 Μοντελοποίηση της Καπνοδόχου ΧΩΡΙΣ την χρήση TMD



Σχήμα 3

Στο σχήμα 3, βλέπουμε την μοντελοποίηση της καπνοδόχου ως ένα δυναμικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας. Η δύναμη που ασκείται στο σώμα περιγράφεται από την σχέση F_w=ma ή αλλιώς F_w=mx'', ενώ η δύναμη του ελατηρίου είναι F_e=kx . Το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται στο δυναμικό σύστημα το συμβολίζουμε με F.

Έτσι, η εξίσωση κίνησης είναι:

$m_1x''_1 + c_1x'_1 + k_1x_1= F$

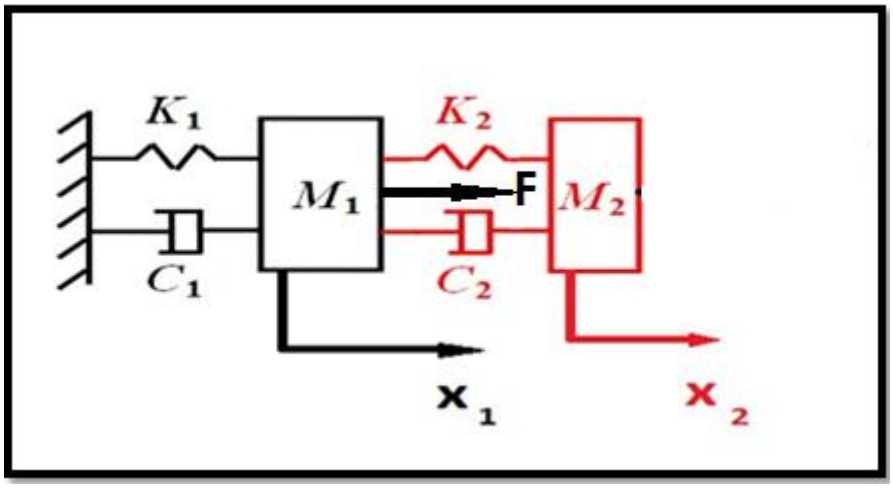
Τα μητρώα, οπότε, θα είναι οι εξής:

$M=[m_1]$

$C= [c_1]$

$K=[k_1]$

3.4 Μοντελοποίηση της Καπνοδόχου ΜΕ την χρήση TMD



Σχήμα 4

Στο σχήμα 4, βλέπουμε την μοντελοποίηση της καπνοδόχου με την προσθήκη του αποσβεστήρα TMD. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί δυναμικό σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας. Αποτελείται από της μάζες της καπνοδόχου και του αποσβεστήρα (m_1 , m_2 αντίστοιχα), από τα 2 ελατήρια τους διαφορετικής σταθεράς (k_1,k_2) καθώς και από τις αποσβέσεις τους (c_1 , c_2).

Με βάση τους νόμους του Newton για κάθε μάζα, οι εξισώσεις κίνησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$m_1 x_1'' + (c_1+c_2)x_1' + (k_1+k_2)x_1 - c_2 x_2' - k_2 x_2 = F$$

$$m_2 x_2'' + c_2 x_2' + k_2 x_2 - c_2 x_1' - k_2 x_1 = 0$$

Σε μητρωική μορφή οι εξισώσεις στους δύο κόμβους προκύπτουν :

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1'' \\ x_2'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1+c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ή πιο συνοπτικά:$\mathbf{Mx}'' + \mathbf{Cx}' + \mathbf{Kx} = \mathbf{F}$

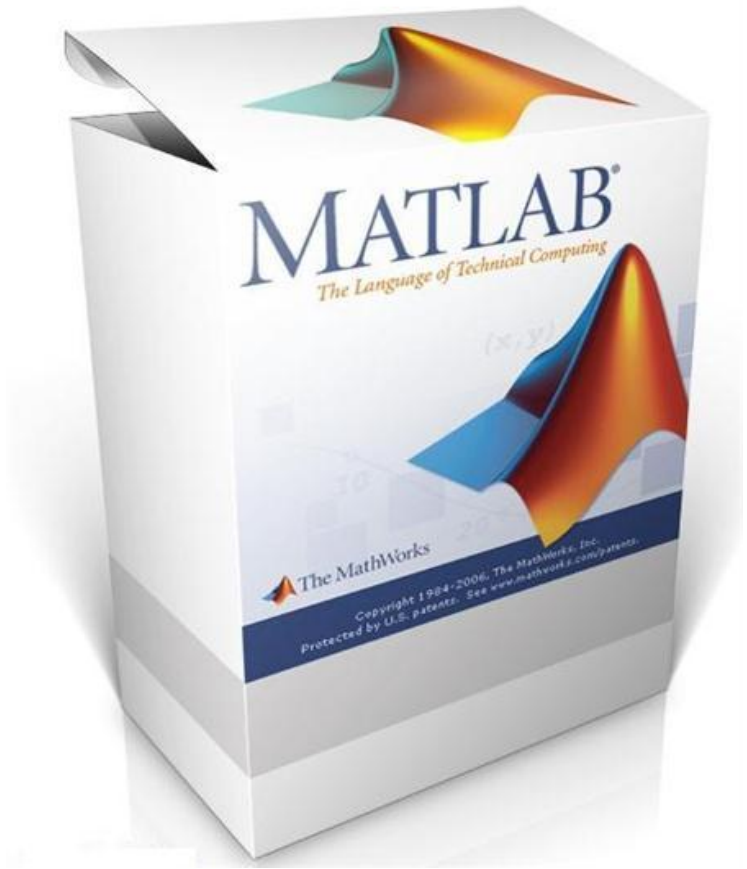
Όσον αφορά το πλάτος της εξωτερικής δύναμης που θα ασκηθεί στην καπνοδόχο, επιλέχθηκε κατάλληλο μέτρο δύναμης, ώστε η κορυφή της να υποστεί μια αρχική μετατόπιση των x_0=0.065m :f_0= 67180 N .

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Εισαγωγή στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Η γλώσσα προγραμματισμού που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των αποκρίσεων και των διαγραμμάτων, στην εργασία, θα είναι ***η «MATLAB».***

Η MATLAB αποτελεί ένα εμπορικό εργαλείο το οποίο προσφέρει ένα διαδραστικό προγραμματιστικό περιβάλλον στον χρήστη και χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ενσωματώνει μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού, κατάλληλη για τη μοντελοποίηση και επίλυση σύνθετων μαθηματικών, και όχι μόνο, προβλημάτων



.

Το όνομά της προέρχεται από τις λέξεις «MATrixLABoratory» (δηλαδή «εργαστήριο πινάκων») πράγμα που υποδηλώνει το γεγονός *ότι η λειτουργία του βασίζεται εξ ολοκλήρου στη χρήση πινάκων*, στοιχεία των οποίων μπορεί να είναι πραγματικοί ή μιγαδικοί αριθμοί, ακόμα και ένας μεμονωμένος αριθμός (όπως για παράδειγμα το 8, θεωρείται ως ένας πίνακας με ένα στοιχείο 1x1).

Ανάμεσα σε ένα πλήθος άλλων ευκολιών που προσφέρει, επιτρέπει :

- τον εύκολο χειρισμό πινάκων,
- τη γραφική απεικόνιση (plotting) συναρτήσεων και δεδομένων,
- την υλοποίηση αλγορίθμων,
- την δημιουργία γραφικών διεπαφών και
- τη συνεργασία με προγράμματα γραμμένα σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού.

Τα βασικά συστατικά του MATLAB είναι:

- *Το Περιβάλλον Ανάπτυξης και τα αντίστοιχα εργαλεία του:*

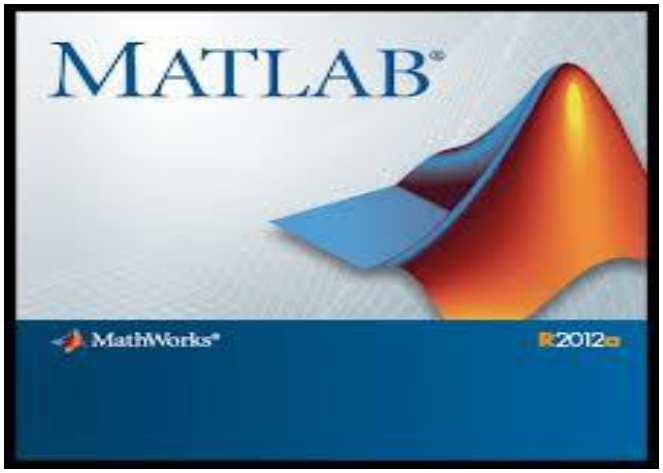
  Περιλαμβάνει διάφορα παράθυρα, όπως το Παράθυρο Εντολών (CommandWindow), το Workspaceκαι το Ιστορικό Εντολών (CommandHistory) και εργαλεία για αποσφαλμάτωση (debugging), ανάλυση κώδικα και πλοήγηση στο σύστημα αρχείων .
- *Η βιβλιοθήκη μαθηματικών συναρτήσεων:*

  Είναι το πιο σημαντικό συστατικό της MATLAB, με στοιχειώδεις αλλά και πολύπλοκες αριθμητικές συναρτήσεις.
- *Η γλώσσα προγραμματισμού:*

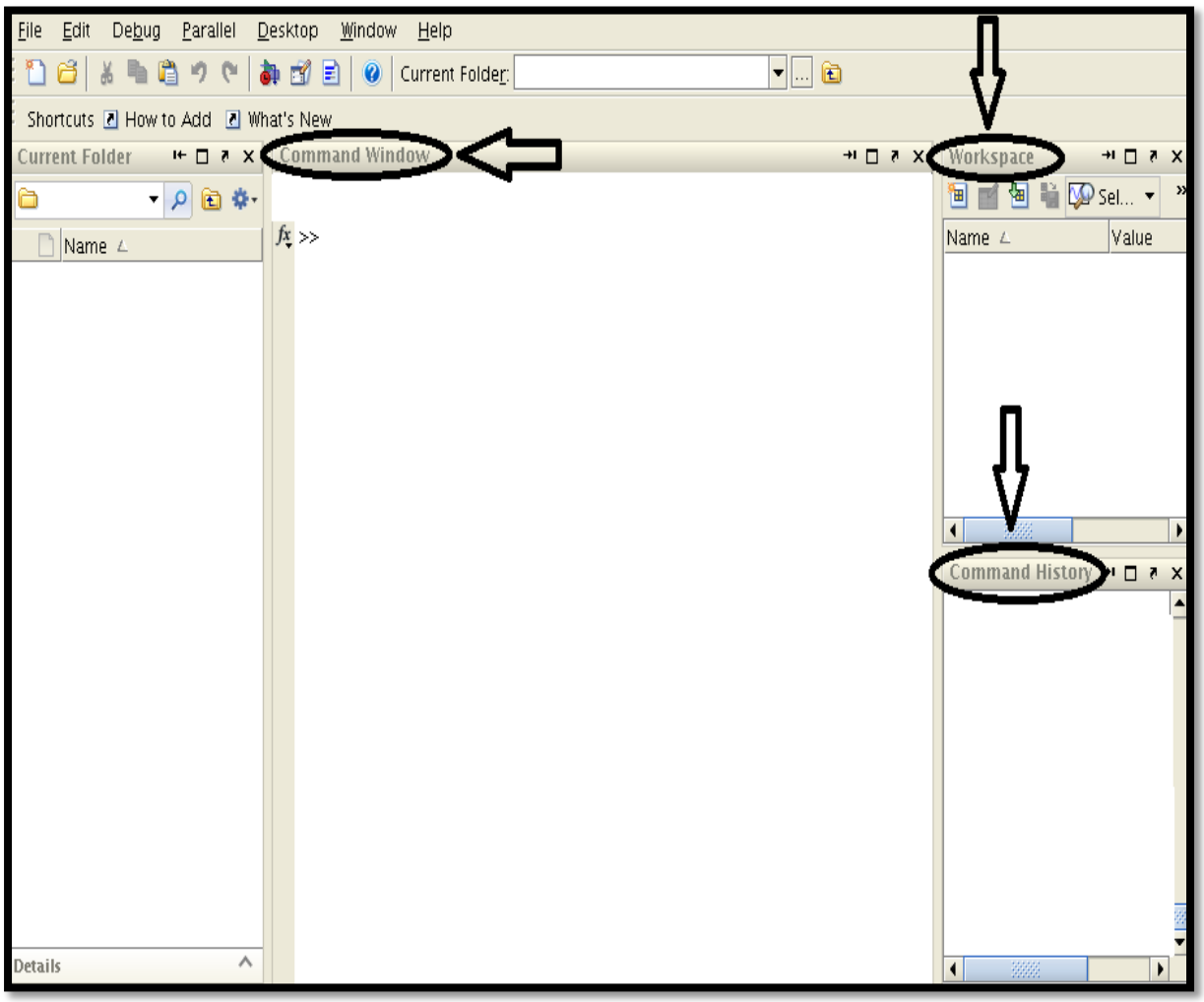
  Μια υψηλού επιπέδου προγραμματιστική γλώσσα, με δομές δεδομένων, συναρτήσεις, εντολές ελέγχου ροής, εντολές εισόδου/εξόδου και στοιχεία από αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού .
- *Τα γραφικά συστατικά:*

  η MATLAB παρέχει μια πληθώρα δυνατοτήτων απεικόνισης διανυσμάτων, πινάκων και γραφημάτων σε 2 αλλά και σε 3 διαστάσεις

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε την νεότερη έκδοση του προγράμματος: ***« MATLABR2012a ».***



Το περιβάλλον στο οποίο θα εργαστούμε θα φαίνεται ως εξής:



Εικόνα 11

Όπου:

- Στο κεντρικό παράθυρο *«Command Window»* πληκτρολογούμε τις εντολές που θέλουμε να δώσουμε στο πρόγραμμα (>>εντολή).
- Στο πάνω δεξιά παράθυρο *«Workspace»* αποθηκεύονται οι μεταβλητές σε μορφή πινάκων.
- Τέλος, το κάτω δεξιά παράθυρο *«Command History»*κρατάει ένα ιστορικό των εντολών που χρησιμοποιήθηκαν και των μεταβλητών που ορίσαμε.

4.2 Υπολογισμοί μέσω MATLAB.

Στο πρόγραμμα Matlab,ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία για την εύρεση των αποτελεσμάτων (ο κανονικός κώδικας βρίσκεται στο Παράρτημα 2).

- Αρχικά, γίνεται η δήλωση των μεταβλητών, για την καπνοδόχο, και τον TMD:

Μεταβλητές της Καπνοδόχου:

```
>>m1=122039;
>>T=2.158;
>>wH=2*pi/T;
>> z1=0.0137;
>> k1=wH^2*m1;
>>c1=2*z1*(m1*k1)^(1/2);
>>f=67180;
```

Μεταβλητές του T.M.D. :

```
>> a=0.025;
>> m2=a*m1;
>>kopt=1/(1+a);
>> z2=(3*a/(8*(1+a)^3))^(1/2);
>>wD=kopt*wH;
>> k2=wD^2*m2;
>>c2=2*z2*(m2*k2)^(1/2);
```

- Στην συνέχεια, ορίζουμε τα μητρώα Μάζας (M),Δυσκαμψίας (K), Απόσβεσης (C):

Για 1 βαθμό ελευθερίας:

```
>>M1=m1;
>>K1=k1;
>>C1=c1;
>>F1=f;
```

Για 2 βαθμούς ελευθερίας:

```
>> M2=[m1 0;0 m2];
>> K2=[k1+k2 -k2;-k2 k2];
>>C2=[c1+c2 -c2;-c2 c2];
>>F2=[f;0];
```

- Ακολουθούν οι συναρτήσεις για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων:

```
>> I1=sqrt(eig(K1,M1));
>> I2=sqrt(eig(K2,M2));
```

- Τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι:

```
I1 =

    2.9116

I2 =

    2.6575

    3.1122
```

- ✓ *Παρατηρείται ότι οι ιδιοσυχνότητες κυμαίνονται κοντά στα 3rad/s.*

- Για τον λόγο αυτό χωρίζουμε σε ίσα τμήματα έναν πίνακα ιδιοσυχνοτήτων “W”, με τιμές από το 0 έως το 6 και βήμα 0.01. Επιλέχτηκαν τα όρια [0 6] ώστε να φανεί έντονα που παρατηρείται μέγιστο, καθώς και για να προκύψει το διάγραμμα συμμετρικό. Το βήμα επιλέχτηκε 0.01 για μεγαλύτερη ακρίβεια :

```
>>W=0:0.01:6;

>>length(W)

        ans =

                601
```

- ✓ *Οπότε ο πίνακας W είναι ένας πίνακας 601 στοιχείων.*

- Στην συνέχεια δημιουργούμε έναν αλγόριθμο, ο οποίος επιλύει το σύστημα $X^*= F/Z$, όπου $Z=(-M\omega^2 + K + jC\omega)$. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε στο πλάτος της απόκρισης στην περίπτωση «Χωρίς TMD» και «Με TMD» :

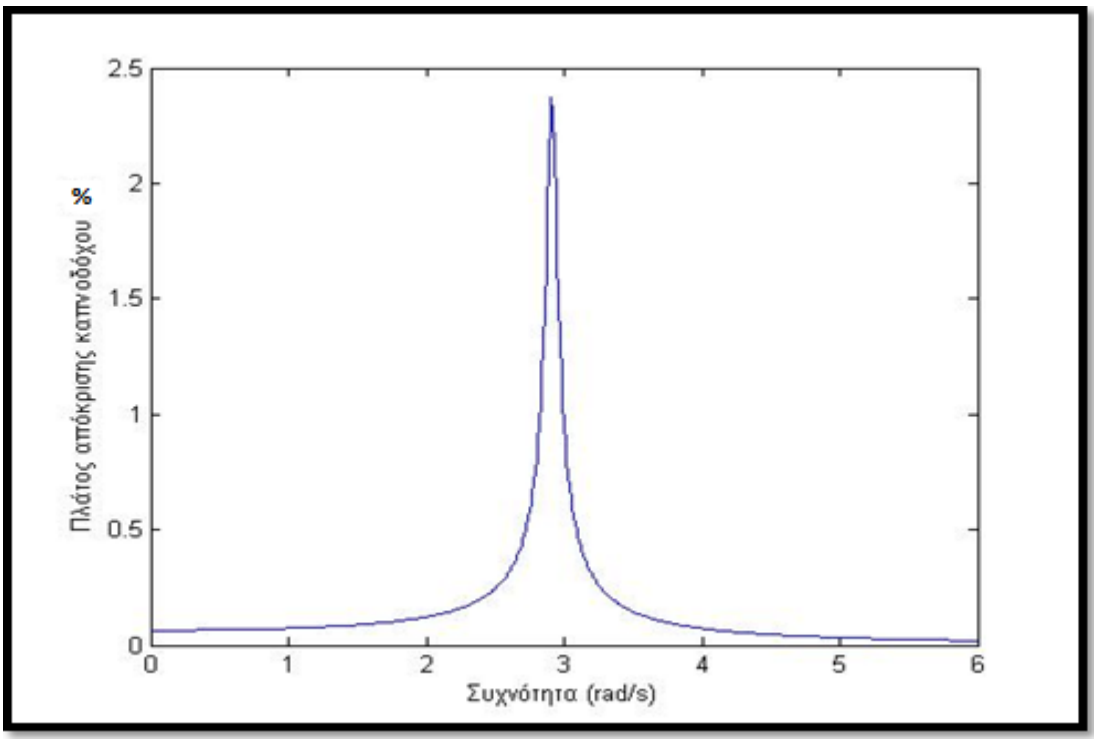
```
For i=1: length(W)

        Z1=(-M1*W(i)^2+K1+1j*C1*W(i));

        Z2=(-M2*W(i)^2+K2+1j*C2*W(i));

        X1(i,1)=abs(Z1\F1); %ΠλάτοςΑπόκρισηςΧωρίςTMD

        X2(i,:)=abs(Z2\F2);  %ΠλάτοςΑπόκρισηςΜΕTMD

End
```

- Έτσι προκύπτουν 2 πίνακες με τα πλάτη των αποκρίσεων. Ο **X1** [601x1] και ο **X2** [601x2] (**βλ. παράρτημα**).

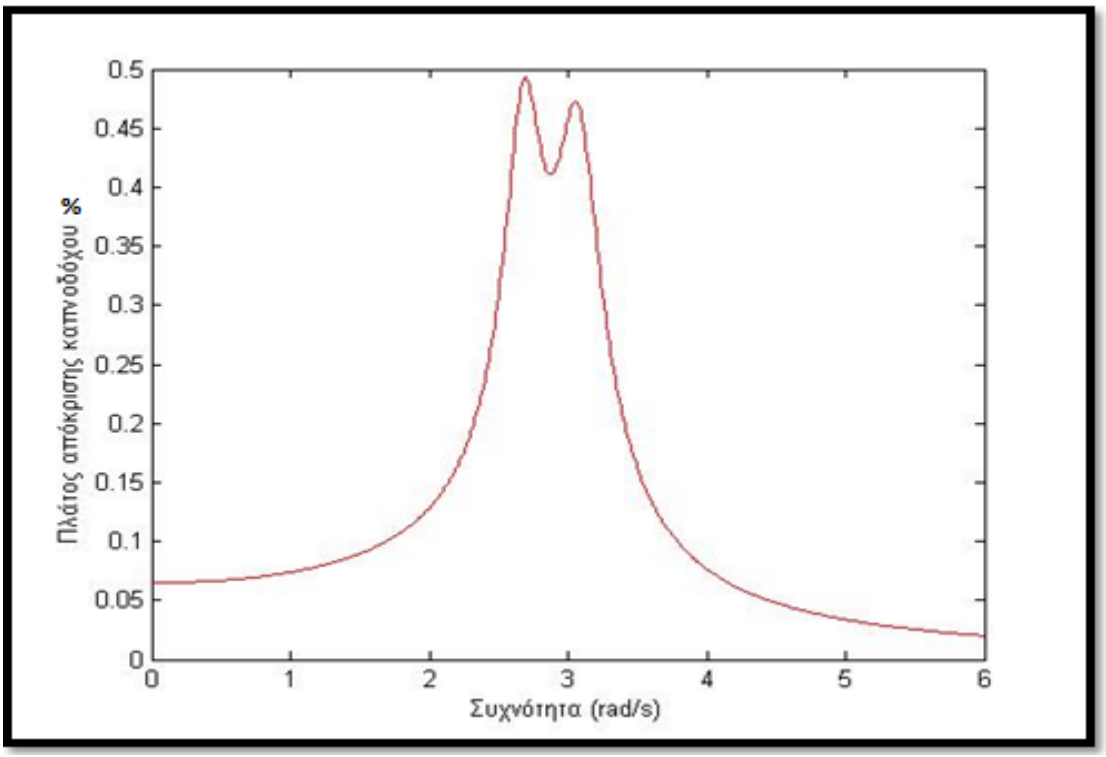
- Ο πίνακας X1 παρουσιάζει την απόκριση της καπνοδόχου χωρίς TMD.
- Ο πίνακας X2 παρουσιάζει την απόκριση της καπνοδόχου με TMD στην πρώτη στήλη καθώς την απόκριση του ίδιου του TMD.

- Τέλος, με την βοήθεια της εντολής **plot(a,b)** δημιουργήσαμε 2 γραφήματα για να αναπαραστήσουμε γραφικά το πλάτος της απόκρισης:

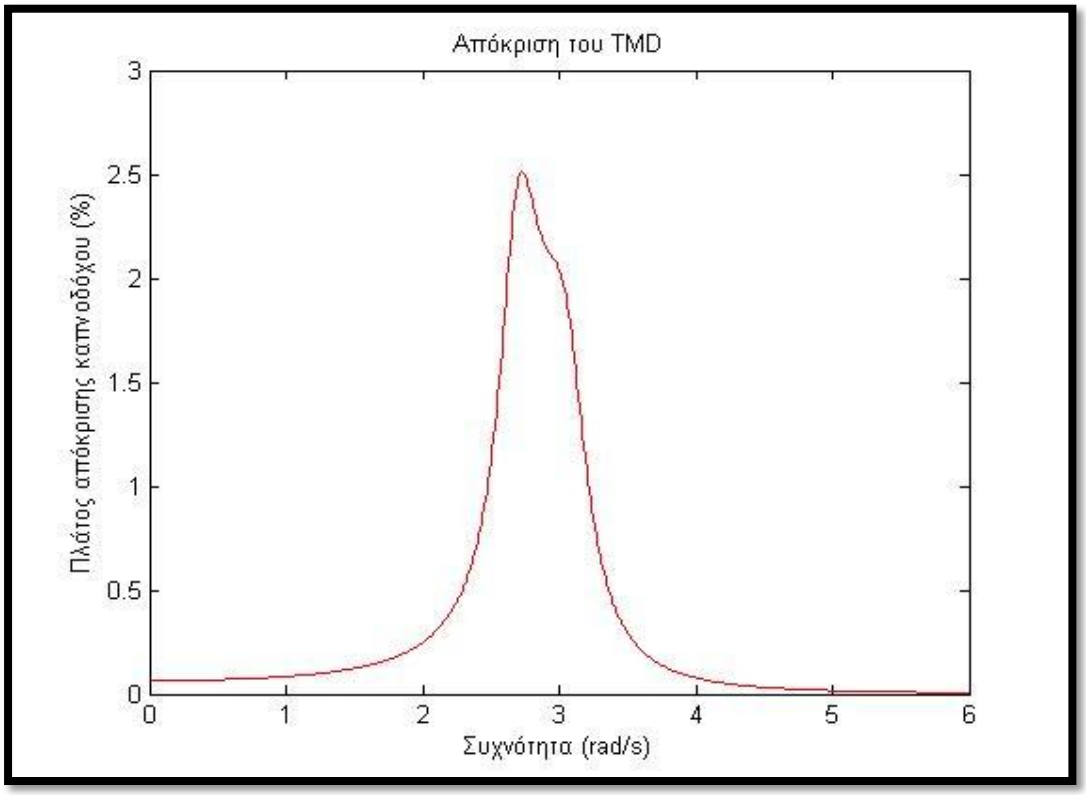
Χωρίς TMD:



Με TMD:



Ενδιαφέρον έχει και **η απόκριση του ίδιου του TMD:**

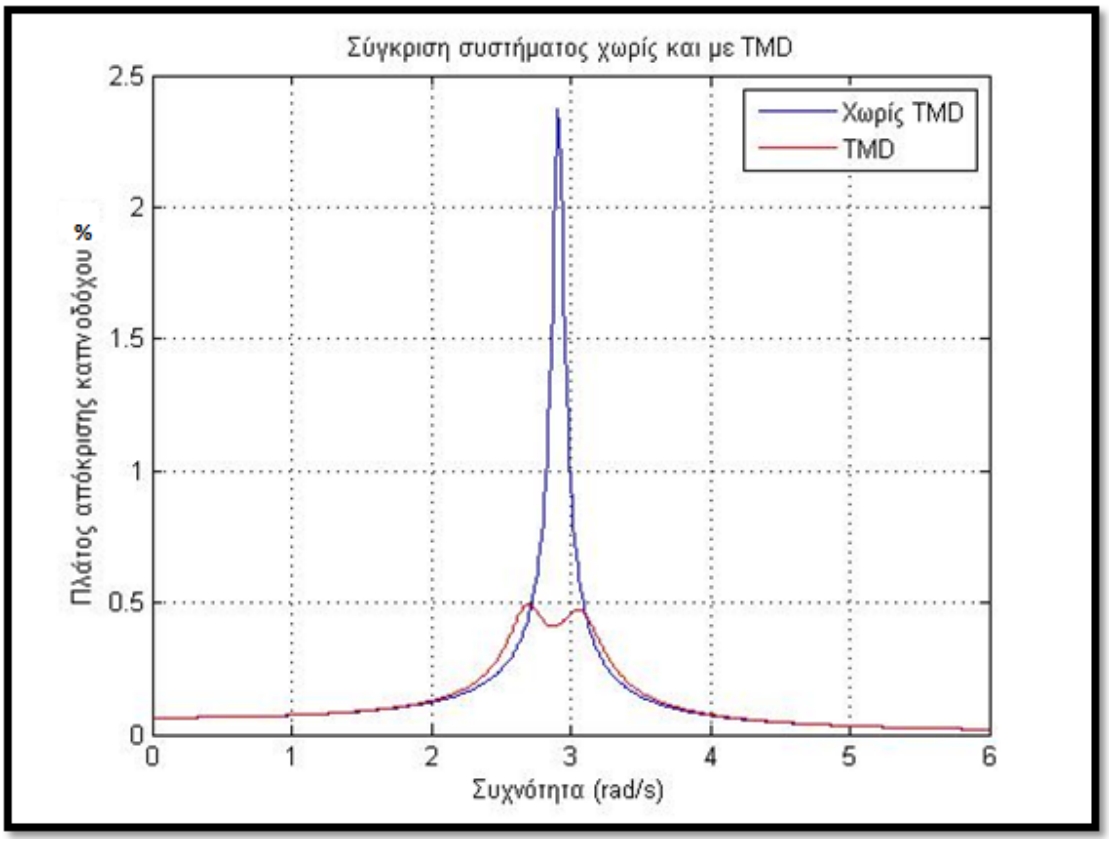


Παρατηρούμε πως ο TMD ταλαντώνεται στην ίδια κατεύθυνση με την καπνοδόχο και έχει μεγάλο πλάτος απόκρισης πλησιάζοντας στην ιδιοσυχνότητά του.

Αυτό είναι κάτι φυσιολογικό αφού με αυτήν του την ταλάντωση γίνεται η απόσβεση του πλάτους της ταλάντωσης της καπνοδόχου.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5) , αναπαρίσταται η δυναμική απόκριση που εμφανίζει η καπνοδόχος , *χωρίς τον αποσβεστήρα (μπλε χρώμα)* , καθώς *και με την προσθήκη αυτού στην κατασκευή (κόκκινο χρώμα)* , στους ίδιους άξονες, ώστε να γίνουν εύκολα συγκρίσιμα τα 2 διαγράμματα των αποκρίσεων της καπνοδόχου, που εξάγαμε μέσω της MATLAB στο προηγούμενο κεφάλαιο :



Σχήμα 5

- Όπως παρατηρούμε, το κόκκινο διάγραμμα (κατασκευή με αποσβεστήρα), έχει, στις ίδιες συχνότητες, χαμηλότερη μετατόπιση από το μπλε διάγραμμα (κατασκευή χωρίς αποσβεστήρα).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν να εξετάσουμε κατά πόσο η χρήση του αποσβεστήρα «Tuned Mass Damper» μειώνει την μετατόπιση μια ψηλής κατασκευής (Καπνοδόχος), κατά την εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης σε αυτήν (π.χ. αέρας, σεισμοί). Επί της ουσίας, δηλαδή, κατά πόσο η χρήση του T.M.D. εξασφαλίζει την ισορροπία και την σταθερότητα της κατασκευής.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αποδεικνύουν ότι η χρήση του Tuned Mass Damper οδηγεί σε σημαντική μείωση της απόκρισης (του πλάτους της απόκρισης) της κατασκευής.

Τα συμπεράσματα είναι σαφή. Η χρήση του T.M.D. επηρεάζει την σταθερότητα της βιομηχανικής καπνοδόχου και ενισχύει την αντοχή της σε φυσικά φαινόμενα.

Παναγιωτίδης Θεόδωρος

2006010025

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Βιβλιογραφία

[**1**] Α. ΚΑΝΑΡΧΟΣ, Ι. ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ, *«Δυναμική μηχανών»,* Αθήνα Παπασωτηρίου,(1998).

[**2**] Γ. ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ , Ν. ΣΚΑΡΟΣ , «*Εισαγωγή στη Μηχατρονική, Δυναμικά Συστήματα και Έλεγχος*», (Σημειώσεις Μαθήματος, 2007).

[**3**] R.JANKOWSKI, M. KUJAWA, C.SZYMCZAK, *«Reduction of Steel Chimney Vibrations with a Pendulum Damper»,* (2003).

[**4**] D. C. VOGT , S. KLOSTERMANN, M.GEHLKEN, *«Dynamic Simulation Of a Phased-Array Radar Cansidering Earthquake Loads»,* (2012)

[**5**] MAUER TUNED MASS DAMPERS, «*Technical Information and Products*».

[**6**] Γ. ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ, «*Σημειώσεις Σεμιναριακών Διαλέξεων Προγραμματισμού Η/Υ, σε Περιβάλλον MATLAB*», (2006)

Παράρτημα 1

Πίνακες Αποκρίσεων:

X1 → Απόκριση καπνοδόχου Χωρίς την προσθήκη TMD
X2i → Απόκριση καπνοδόχου Με την προσθήκη TMD
X2ii → Απόκριση του TMD

X1	X2	
	i	ii
0,0649	0,0649	0,0649
0,0649	0,0649	0,0649
0,0649	0,0649	0,0649
0,0649	0,0649	0,0650
0,0649	0,0649	0,0650
0,0650	0,0650	0,0650
0,0650	0,0650	0,0650
0,0650	0,0650	0,0650
0,0650	0,0650	0,0650
0,0650	0,0650	0,0651
0,0650	0,0650	0,0651
0,0650	0,0650	0,0651
0,0650	0,0650	0,0652
0,0651	0,0651	0,0652
0,0651	0,0651	0,0652
0,0651	0,0651	0,0653
0,0651	0,0651	0,0653
0,0652	0,0652	0,0654
0,0652	0,0652	0,0655
0,0652	0,0652	0,0655
0,0652	0,0653	0,0656
0,0653	0,0653	0,0656
0,0653	0,0653	0,0657
0,0653	0,0654	0,0658
0,0654	0,0654	0,0659
0,0654	0,0654	0,0659
0,0655	0,0655	0,0660
0,0655	0,0655	0,0661
0,0655	0,0656	0,0662
0,0656	0,0656	0,0663
0,0656	0,0657	0,0664
0,0657	0,0657	0,0665
0,0657	0,0657	0,0666
0,0658	0,0658	0,0667
0,0658	0,0659	0,0668

0,0659	0,0659	0,0669
0,0659	0,0660	0,0670
0,0660	0,0660	0,0672
0,0661	0,0661	0,0673
0,0661	0,0662	0,0674
0,0662	0,0662	0,0676
0,0662	0,0663	0,0677
0,0663	0,0664	0,0678
0,0664	0,0664	0,0680
0,0665	0,0665	0,0681
0,0665	0,0666	0,0683
0,0666	0,0666	0,0684
0,0667	0,0667	0,0686
0,0667	0,0668	0,0688
0,0668	0,0669	0,0689
0,0669	0,0670	0,0691
0,0670	0,0670	0,0693
0,0671	0,0671	0,0695
0,0672	0,0672	0,0696
0,0672	0,0673	0,0698
0,0673	0,0674	0,0700
0,0674	0,0675	0,0702
0,0675	0,0676	0,0704
0,0676	0,0677	0,0706
0,0677	0,0678	0,0708
0,0678	0,0679	0,0711
0,0679	0,0680	0,0713
0,0680	0,0681	0,0715
0,0681	0,0682	0,0717
0,0682	0,0683	0,0720
0,0683	0,0684	0,0722
0,0685	0,0685	0,0725
0,0686	0,0687	0,0727
0,0687	0,0688	0,0730
0,0688	0,0689	0,0732
0,0689	0,0690	0,0735
0,0690	0,0692	0,0738
0,0692	0,0693	0,0740
0,0693	0,0694	0,0743
0,0694	0,0695	0,0746
0,0695	0,0697	0,0749
0,0697	0,0698	0,0752
0,0698	0,0700	0,0755
0,0700	0,0701	0,0758
0,0701	0,0702	0,0761
0,0702	0,0704	0,0764
0,0704	0,0705	0,0768
0,0705	0,0707	0,0771
0,0707	0,0708	0,0774
0,0708	0,0710	0,0778

0,0710	0,0712	0,0781
0,0711	0,0713	0,0785
0,0713	0,0715	0,0789
0,0715	0,0717	0,0792
0,0716	0,0718	0,0796
0,0718	0,0720	0,0800
0,0720	0,0722	0,0804
0,0721	0,0724	0,0808
0,0723	0,0725	0,0812
0,0725	0,0727	0,0816
0,0727	0,0729	0,0821
0,0729	0,0731	0,0825
0,0730	0,0733	0,0829
0,0732	0,0735	0,0834
0,0734	0,0737	0,0838
0,0736	0,0739	0,0843
0,0738	0,0741	0,0848
0,0740	0,0743	0,0853
0,0742	0,0745	0,0857
0,0744	0,0747	0,0862
0,0746	0,0750	0,0868
0,0749	0,0752	0,0873
0,0751	0,0754	0,0878
0,0753	0,0756	0,0883
0,0755	0,0759	0,0889
0,0757	0,0761	0,0895
0,0760	0,0764	0,0900
0,0762	0,0766	0,0906
0,0764	0,0768	0,0912
0,0767	0,0771	0,0918
0,0769	0,0774	0,0924
0,0772	0,0776	0,0930
0,0774	0,0779	0,0937
0,0777	0,0782	0,0943
0,0780	0,0784	0,0950
0,0782	0,0787	0,0957
0,0785	0,0790	0,0963
0,0788	0,0793	0,0970
0,0790	0,0796	0,0978
0,0793	0,0799	0,0985
0,0796	0,0802	0,0992
0,0799	0,0805	0,1000
0,0802	0,0808	0,1008
0,0805	0,0811	0,1015
0,0808	0,0814	0,1024
0,0811	0,0817	0,1032
0,0814	0,0821	0,1040
0,0817	0,0824	0,1049
0,0820	0,0827	0,1057
0,0824	0,0831	0,1066

0,0827	0,0834	0,1075
0,0830	0,0838	0,1084
0,0834	0,0842	0,1094
0,0837	0,0845	0,1103
0,0841	0,0849	0,1113
0,0845	0,0853	0,1123
0,0848	0,0857	0,1133
0,0852	0,0861	0,1144
0,0856	0,0865	0,1154
0,0859	0,0869	0,1165
0,0863	0,0873	0,1176
0,0867	0,0877	0,1188
0,0871	0,0882	0,1199
0,0875	0,0886	0,1211
0,0880	0,0890	0,1223
0,0884	0,0895	0,1236
0,0888	0,0900	0,1248
0,0892	0,0904	0,1261
0,0897	0,0909	0,1274
0,0901	0,0914	0,1288
0,0906	0,0919	0,1302
0,0911	0,0924	0,1316
0,0915	0,0929	0,1330
0,0920	0,0934	0,1345
0,0925	0,0940	0,1360
0,0930	0,0945	0,1375
0,0935	0,0950	0,1391
0,0940	0,0956	0,1407
0,0946	0,0962	0,1424
0,0951	0,0968	0,1441
0,0956	0,0974	0,1458
0,0962	0,0980	0,1476
0,0967	0,0986	0,1495
0,0973	0,0992	0,1513
0,0979	0,0998	0,1532
0,0985	0,1005	0,1552
0,0991	0,1012	0,1572
0,0997	0,1018	0,1593
0,1003	0,1025	0,1614
0,1010	0,1032	0,1636
0,1016	0,1040	0,1658
0,1023	0,1047	0,1681
0,1030	0,1055	0,1705
0,1037	0,1062	0,1729
0,1044	0,1070	0,1754
0,1051	0,1078	0,1780
0,1058	0,1086	0,1806
0,1065	0,1095	0,1833
0,1073	0,1103	0,1861
0,1081	0,1112	0,1889

0,1089	0,1121	0,1918
0,1097	0,1130	0,1949
0,1105	0,1139	0,1980
0,1113	0,1149	0,2012
0,1122	0,1159	0,2045
0,1130	0,1169	0,2079
0,1139	0,1179	0,2114
0,1148	0,1189	0,2150
0,1158	0,1200	0,2187
0,1167	0,1211	0,2226
0,1177	0,1222	0,2265
0,1187	0,1234	0,2306
0,1197	0,1246	0,2349
0,1207	0,1258	0,2392
0,1218	0,1271	0,2437
0,1229	0,1283	0,2484
0,1240	0,1297	0,2532
0,1251	0,1310	0,2582
0,1263	0,1324	0,2634
0,1275	0,1338	0,2687
0,1287	0,1353	0,2743
0,1299	0,1368	0,2800
0,1312	0,1384	0,2860
0,1325	0,1400	0,2922
0,1339	0,1416	0,2986
0,1352	0,1433	0,3052
0,1366	0,1451	0,3122
0,1381	0,1469	0,3194
0,1396	0,1487	0,3268
0,1411	0,1507	0,3346
0,1427	0,1527	0,3427
0,1443	0,1547	0,3511
0,1459	0,1568	0,3599
0,1476	0,1590	0,3691
0,1494	0,1613	0,3786
0,1512	0,1636	0,3886
0,1530	0,1661	0,3990
0,1549	0,1686	0,4099
0,1569	0,1712	0,4213
0,1589	0,1739	0,4333
0,1610	0,1768	0,4458
0,1631	0,1797	0,4589
0,1653	0,1827	0,4726
0,1676	0,1859	0,4870
0,1700	0,1892	0,5022
0,1724	0,1927	0,5181
0,1749	0,1962	0,5349
0,1776	0,2000	0,5525
0,1802	0,2039	0,5711
0,1830	0,2080	0,5907

0,1859	0,2123	0,6114
0,1889	0,2168	0,6333
0,1920	0,2214	0,6564
0,1953	0,2264	0,6809
0,1986	0,2315	0,7068
0,2021	0,2369	0,7342
0,2057	0,2426	0,7634
0,2095	0,2486	0,7943
0,2134	0,2549	0,8271
0,2175	0,2615	0,8621
0,2217	0,2685	0,8992
0,2262	0,2759	0,9387
0,2309	0,2836	0,9808
0,2357	0,2918	1,0256
0,2408	0,3003	1,0733
0,2462	0,3094	1,1241
0,2518	0,3188	1,1781
0,2577	0,3288	1,2355
0,2639	0,3392	1,2964
0,2704	0,3501	1,3609
0,2773	0,3614	1,4290
0,2846	0,3731	1,5007
0,2923	0,3851	1,5759
0,3004	0,3974	1,6541
0,3090	0,4098	1,7351
0,3182	0,4221	1,8180
0,3280	0,4343	1,9021
0,3385	0,4459	1,9862
0,3496	0,4569	2,0689
0,3616	0,4669	2,1488
0,3745	0,4756	2,2240
0,3883	0,4828	2,2931
0,4033	0,4883	2,3543
0,4194	0,4918	2,4064
0,4370	0,4934	2,4484
0,4562	0,4931	2,4798
0,4772	0,4909	2,5006
0,5002	0,4872	2,5114
0,5256	0,4821	2,5130
0,5538	0,4760	2,5065
0,5852	0,4693	2,4934
0,6203	0,4621	2,4750
0,6599	0,4548	2,4527
0,7048	0,4476	2,4275
0,7561	0,4408	2,4007
0,8152	0,4344	2,3732
0,8837	0,4287	2,3456
0,9639	0,4236	2,3186
1,0587	0,4194	2,2927
1,1714	0,4160	2,2681

1,3063	0,4134	2,2451
1,4677	0,4118	2,2239
1,6582	0,4109	2,2045
1,8745	0,4110	2,1869
2,0983	0,4118	2,1710
2,2847	0,4135	2,1568
2,3694	0,4158	2,1440
2,3123	0,4189	2,1324
2,1392	0,4226	2,1219
1,9145	0,4269	2,1119
1,6899	0,4316	2,1023
1,4894	0,4366	2,0925
1,3189	0,4419	2,0821
1,1763	0,4472	2,0706
1,0573	0,4525	2,0574
0,9575	0,4576	2,0420
0,8733	0,4622	2,0237
0,8016	0,4662	2,0021
0,7399	0,4694	1,9767
0,6865	0,4716	1,9470
0,6398	0,4727	1,9128
0,5988	0,4726	1,8740
0,5624	0,4711	1,8306
0,5300	0,4683	1,7829
0,5010	0,4641	1,7312
0,4748	0,4586	1,6761
0,4511	0,4519	1,6182
0,4296	0,4441	1,5582
0,4099	0,4353	1,4969
0,3918	0,4258	1,4350
0,3753	0,4158	1,3732
0,3600	0,4052	1,3119
0,3458	0,3944	1,2518
0,3327	0,3835	1,1933
0,3205	0,3725	1,1366
0,3091	0,3616	1,0821
0,2984	0,3508	1,0298
0,2884	0,3403	0,9799
0,2791	0,3300	0,9325
0,2703	0,3200	0,8874
0,2620	0,3103	0,8447
0,2541	0,3010	0,8044
0,2468	0,2920	0,7662
0,2397	0,2833	0,7302
0,2331	0,2750	0,6963
0,2268	0,2671	0,6643
0,2208	0,2595	0,6342
0,2151	0,2522	0,6057
0,2097	0,2452	0,5790
0,2045	0,2385	0,5537

0,1996	0,2321	0,5299
0,1949	0,2260	0,5074
0,1903	0,2201	0,4862
0,1860	0,2145	0,4661
0,1819	0,2091	0,4472
0,1779	0,2040	0,4293
0,1741	0,1991	0,4123
0,1704	0,1943	0,3963
0,1669	0,1898	0,3811
0,1635	0,1854	0,3667
0,1602	0,1812	0,3530
0,1570	0,1772	0,3401
0,1540	0,1734	0,3278
0,1511	0,1696	0,3161
0,1482	0,1661	0,3049
0,1455	0,1626	0,2943
0,1429	0,1593	0,2843
0,1403	0,1561	0,2746
0,1378	0,1530	0,2655
0,1354	0,1500	0,2567
0,1331	0,1472	0,2484
0,1309	0,1444	0,2404
0,1287	0,1417	0,2328
0,1266	0,1391	0,2255
0,1245	0,1366	0,2186
0,1225	0,1342	0,2119
0,1206	0,1318	0,2055
0,1187	0,1296	0,1994
0,1169	0,1273	0,1935
0,1151	0,1252	0,1879
0,1134	0,1231	0,1825
0,1117	0,1211	0,1773
0,1101	0,1192	0,1723
0,1085	0,1173	0,1675
0,1069	0,1154	0,1629
0,1054	0,1136	0,1585
0,1040	0,1119	0,1543
0,1025	0,1102	0,1501
0,1011	0,1086	0,1462
0,0998	0,1070	0,1424
0,0984	0,1054	0,1387
0,0971	0,1039	0,1352
0,0958	0,1024	0,1318
0,0946	0,1010	0,1285
0,0934	0,0996	0,1253
0,0922	0,0982	0,1222
0,0910	0,0969	0,1193
0,0899	0,0956	0,1164
0,0888	0,0943	0,1136
0,0877	0,0930	0,1109

0,0867	0,0918	0,1083
0,0856	0,0907	0,1058
0,0846	0,0895	0,1034
0,0836	0,0884	0,1010
0,0826	0,0873	0,0988
0,0817	0,0862	0,0966
0,0807	0,0851	0,0944
0,0798	0,0841	0,0923
0,0789	0,0831	0,0903
0,0780	0,0821	0,0884
0,0772	0,0811	0,0865
0,0763	0,0802	0,0846
0,0755	0,0792	0,0829
0,0747	0,0783	0,0811
0,0739	0,0775	0,0795
0,0731	0,0766	0,0778
0,0723	0,0757	0,0762
0,0716	0,0749	0,0747
0,0708	0,0741	0,0732
0,0701	0,0733	0,0717
0,0694	0,0725	0,0703
0,0687	0,0717	0,0689
0,0680	0,0709	0,0676
0,0673	0,0702	0,0663
0,0667	0,0695	0,0650
0,0660	0,0687	0,0638
0,0654	0,0680	0,0626
0,0647	0,0673	0,0614
0,0641	0,0667	0,0602
0,0635	0,0660	0,0591
0,0629	0,0653	0,0580
0,0623	0,0647	0,0570
0,0617	0,0641	0,0559
0,0612	0,0634	0,0549
0,0606	0,0628	0,0540
0,0600	0,0622	0,0530
0,0595	0,0616	0,0521
0,0590	0,0610	0,0511
0,0584	0,0605	0,0503
0,0579	0,0599	0,0494
0,0574	0,0594	0,0485
0,0569	0,0588	0,0477
0,0564	0,0583	0,0469
0,0559	0,0577	0,0461
0,0554	0,0572	0,0453
0,0549	0,0567	0,0446
0,0545	0,0562	0,0438
0,0540	0,0557	0,0431
0,0536	0,0552	0,0424
0,0531	0,0547	0,0417

0,0527	0,0543	0,0410
0,0522	0,0538	0,0404
0,0518	0,0534	0,0397
0,0514	0,0529	0,0391
0,0510	0,0525	0,0385
0,0506	0,0520	0,0379
0,0502	0,0516	0,0373
0,0498	0,0512	0,0367
0,0494	0,0507	0,0362
0,0490	0,0503	0,0356
0,0486	0,0499	0,0351
0,0482	0,0495	0,0345
0,0478	0,0491	0,0340
0,0475	0,0487	0,0335
0,0471	0,0483	0,0330
0,0467	0,0480	0,0325
0,0464	0,0476	0,0320
0,0460	0,0472	0,0316
0,0457	0,0468	0,0311
0,0453	0,0465	0,0306
0,0450	0,0461	0,0302
0,0447	0,0458	0,0298
0,0443	0,0454	0,0293
0,0440	0,0451	0,0289
0,0437	0,0447	0,0285
0,0434	0,0444	0,0281
0,0431	0,0441	0,0277
0,0428	0,0438	0,0273
0,0425	0,0434	0,0269
0,0422	0,0431	0,0266
0,0419	0,0428	0,0262
0,0416	0,0425	0,0259
0,0413	0,0422	0,0255
0,0410	0,0419	0,0252
0,0407	0,0416	0,0248
0,0404	0,0413	0,0245
0,0401	0,0410	0,0242
0,0399	0,0407	0,0238
0,0396	0,0404	0,0235
0,0393	0,0401	0,0232
0,0391	0,0399	0,0229
0,0388	0,0396	0,0226
0,0385	0,0393	0,0223
0,0383	0,0391	0,0220
0,0380	0,0388	0,0217
0,0378	0,0385	0,0215
0,0375	0,0383	0,0212
0,0373	0,0380	0,0209
0,0371	0,0378	0,0207
0,0368	0,0375	0,0204

0,0366	0,0373	0,0201
0,0363	0,0370	0,0199
0,0361	0,0368	0,0196
0,0359	0,0365	0,0194
0,0357	0,0363	0,0192
0,0354	0,0361	0,0189
0,0352	0,0358	0,0187
0,0350	0,0356	0,0185
0,0348	0,0354	0,0182
0,0346	0,0352	0,0180
0,0343	0,0349	0,0178
0,0341	0,0347	0,0176
0,0339	0,0345	0,0174
0,0337	0,0343	0,0172
0,0335	0,0341	0,0170
0,0333	0,0339	0,0168
0,0331	0,0337	0,0166
0,0329	0,0334	0,0164
0,0327	0,0332	0,0162
0,0325	0,0330	0,0160
0,0323	0,0328	0,0158
0,0321	0,0326	0,0156
0,0319	0,0325	0,0155
0,0318	0,0323	0,0153
0,0316	0,0321	0,0151
0,0314	0,0319	0,0149
0,0312	0,0317	0,0148
0,0310	0,0315	0,0146
0,0308	0,0313	0,0145
0,0307	0,0311	0,0143
0,0305	0,0310	0,0141
0,0303	0,0308	0,0140
0,0302	0,0306	0,0138
0,0300	0,0304	0,0137
0,0298	0,0302	0,0135
0,0296	0,0301	0,0134
0,0295	0,0299	0,0132
0,0293	0,0297	0,0131
0,0292	0,0296	0,0129
0,0290	0,0294	0,0128
0,0288	0,0292	0,0127
0,0287	0,0291	0,0125
0,0285	0,0289	0,0124
0,0284	0,0288	0,0123
0,0282	0,0286	0,0121
0,0281	0,0284	0,0120
0,0279	0,0283	0,0119
0,0278	0,0281	0,0118
0,0276	0,0280	0,0116
0,0275	0,0278	0,0115

0,0273	0,0277	0,0114
0,0272	0,0275	0,0113
0,0270	0,0274	0,0112
0,0269	0,0272	0,0111
0,0267	0,0271	0,0109
0,0266	0,0269	0,0108
0,0265	0,0268	0,0107
0,0263	0,0267	0,0106
0,0262	0,0265	0,0105
0,0261	0,0264	0,0104
0,0259	0,0262	0,0103
0,0258	0,0261	0,0102
0,0257	0,0260	0,0101
0,0255	0,0258	0,0100
0,0254	0,0257	0,0099
0,0253	0,0256	0,0098
0,0252	0,0254	0,0097
0,0250	0,0253	0,0096
0,0249	0,0252	0,0095
0,0248	0,0251	0,0094
0,0247	0,0249	0,0093
0,0245	0,0248	0,0093
0,0244	0,0247	0,0092
0,0243	0,0246	0,0091
0,0242	0,0244	0,0090
0,0241	0,0243	0,0089
0,0239	0,0242	0,0088
0,0238	0,0241	0,0087
0,0237	0,0240	0,0087
0,0236	0,0238	0,0086
0,0235	0,0237	0,0085
0,0234	0,0236	0,0084
0,0233	0,0235	0,0083
0,0231	0,0234	0,0083
0,0230	0,0233	0,0082
0,0229	0,0232	0,0081
0,0228	0,0230	0,0080
0,0227	0,0229	0,0080
0,0226	0,0228	0,0079
0,0225	0,0227	0,0078
0,0224	0,0226	0,0077
0,0223	0,0225	0,0077
0,0222	0,0224	0,0076
0,0221	0,0223	0,0075
0,0220	0,0222	0,0075
0,0219	0,0221	0,0074
0,0218	0,0220	0,0073
0,0217	0,0219	0,0073
0,0216	0,0218	0,0072
0,0215	0,0217	0,0071

0,0214	0,0216	0,0071
0,0213	0,0215	0,0070
0,0212	0,0214	0,0070
0,0211	0,0213	0,0069
0,0210	0,0212	0,0068
0,0209	0,0211	0,0068
0,0208	0,0210	0,0067
0,0207	0,0209	0,0067
0,0206	0,0208	0,0066
0,0205	0,0207	0,0066
0,0204	0,0206	0,0065
0,0204	0,0205	0,0064
0,0203	0,0204	0,0064
0,0202	0,0204	0,0063
0,0201	0,0203	0,0063
0,0200	0,0202	0,0062

Παράρτημα 2

Προγραμματισμός στην Matlab:

```
m1=122039;
T=2.158;
wH=2*pi/T;
z1=0.0137;
k1=wH^2*m1;
c1=2*z1*(m1*k1)^(1/2);
f=67180;



a=0.025;
m2=a*m1;
kopt=1/(1+a);
z2=(3*a/(8*(1+a)^3))^(1/2);
wD=kopt*wH;
k2=wD^2*m2;
c2=2*z2*(m2*k2)^(1/2);



M1=m1;
K1=k1;
C1=c1;
F1=f;

M2=[m1 0;0 m2];
K2=[k1+k2 -k2;-k2 k2];
C2=[c1+c2 -c2;-c2 c2];
F2=[f;0];



I1=sqrt(eig(K1,M1));
I2=sqrt(eig(K2,M2));

W=0:0.01:6;

for i=1:length(W)
Z1=(-M1*W(i)^2+K1+1j*C1*W(i));
Z2=(-M2*W(i)^2+K2+1j*C2*W(i));
X1(i,1)=abs(Z1\F1);
X2(i,:)=abs(Z2\F2);
end



plot(W,X1)
hold on
plot(W,X2(:,1),'r')
grid on
xlabel('Συχνότητα (rad/s)')
ylabel('Πλάτος απόκρισης καπνοδόχου (%)')
title('Σύγκριση συστήματος χωρίς και με TMD')
legend('Χωρίς TMD','TMD')
```