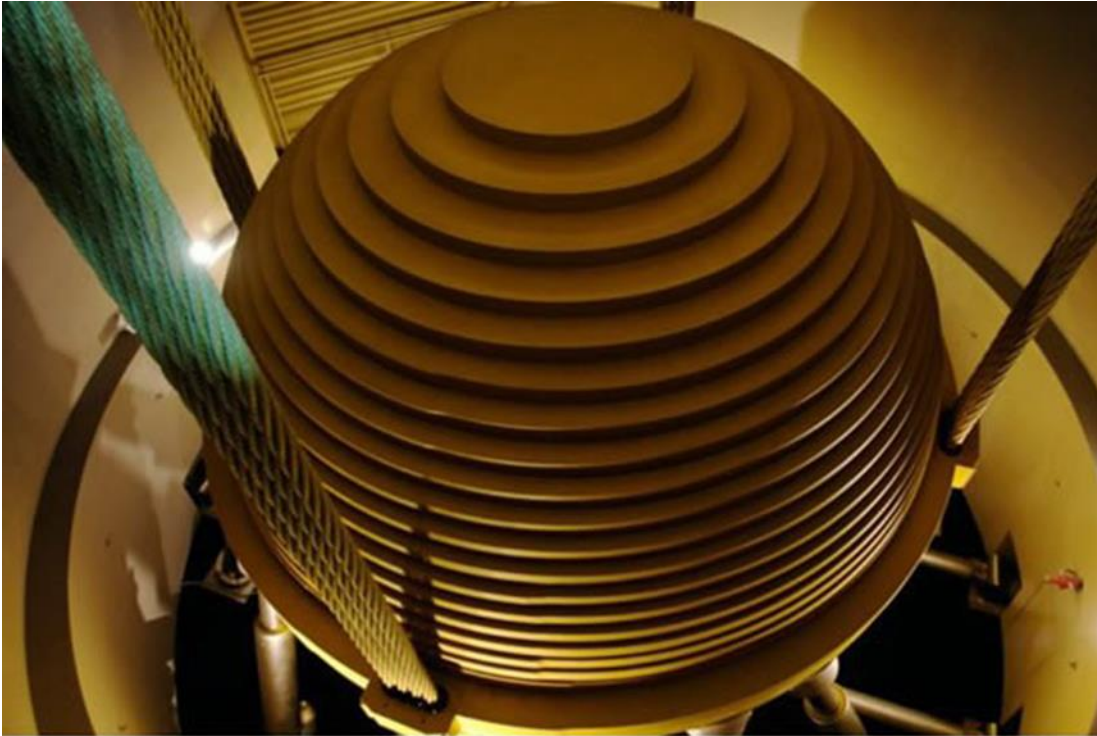


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΗΣ
ΜΑΖΑΣ



Αγγελόπουλος Ιωάννης 2002010041

Επιβλέπων καθηγητής: Καθηγητής Δρ. Πολιτικός
Μηχανικός Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Περιεχόμενα

Ενότητα	1	Εισαγωγή
Ενότητα	2	Αρχή λειτουργίας των Tuned Mass Dampers
Ενότητα	3	2.1 Απλό μοντέλο έδρασης μηχανής 2.2 Μείωση των Ευθύγραμμων Ταλαντώσεων με την Αύξηση των Βαθμών Ελευθερίας Οι μέθοδοι ελέγχου δονήσεων, οι διαφορετικοί τύποι των TMD και τα κριτήρια προσαρμογής για ένα TMD με βέλτιστη απόδοση 3.1 Ταξινόμηση των μεθόδων ελέγχου δονήσεων 3.2 Passive Control Systems - Παθητικά συστήματα ελέγχου 3.3 Active Control Systems - Ενεργά συστήματα ελέγχου 3.4 Semi-Active Control Systems - Ημι-ενεργά συστήματα ελέγχου 3.5 Tuned Liquid Damper-TLD Συντονισμένη υγρή διάταξη απόσβεσης 3.6 Hybrid Control Systems - υβριδικά συστήματα ελέγχου 3.7 Tuned Liquid Column Damper-TLCD) - Συντονισμένη υγρή διάταξη Απόσβεσης 3.8 Multiple Tuned Mass Damper (MTMD) 3.9 Πρακτικές παρατηρήσεις για τα TMD 3.10 TMDs μεταφορικής κίνησης 3.11 Pendulum Tuned Mass Damper 3.12 Viscoelastic Damper 3.13 Προηγμένα TMDs 3.14 Διάφοροι τύποι και εναλλακτικές λύσεις TMD 3.15 Κριτήρια προσαρμογής του TMD για βέλτιστη απόδοση 3.15.1 Επιτυχία βέλτιστης απόδοσης του TMD 3.15.2 Συνέπειες από λάθος επιλογή TMD ή κακή προσαρμογή του TMD. 3.15.3 Απόκλιση από τη βέλτιστη "εκτός τόνου" τιμή 3.15.4 Απόκλιση από τη βέλτιστη απόσβεση 3.15.5 Εκτίμηση των τριών βασικών κριτηρίων προσαρμογής των TMD 3.15.6 Απαραίτητα τεχνικά δεδομένα για την διαστασιολόγηση και το σχεδιασμό των TMD 3.15.7 Η βέλτιστη διαδικασία για την διαστασιολόγηση ενός TMD
Ενότητα	4	Εφαρμογές και παραδείγματα χρήσης των TMD 4.1 Εφαρμογές των TMD σε ψηλά κτήρια και επιδαπέδιες Κατασκευές 4.2 Εφαρμογές των TMD σε μικρότερες γέφυρες 4.3 Εφαρμογές των TMD σε Διάφορες κατασκευές μπορεί να έχουν μηχανήματα που προκαλούν δονήσεις
Ενότητα	5	Πηγές και βιβλιογραφία

1 εισαγωγή

Απόσβεση είναι ένα φαινόμενο που υπάρχει σε κάθε σύστημα. Μερικά συστήματα έχουν λίγη και κάποια περισσότερη, είναι σχετική με το ποιά είναι τα στοιχεία που το αποτελούν και το πώς αυτά συναρμολογούνται μεταξύ τους στο σύστημα. Τέτοια φαινόμενα διαχέουν την ενέργεια και μειώνουν την δόνηση που προκλήθηκε από εξωτερικές δυνάμεις στο σύστημα, όπως σεισμοί, ο άνεμος, τα κύματα της θάλασσας και βροντές. Οι διατάξεις αυτές μπορεί να είναι ενεργητικές, παθητικές και ημι-ενεργητικές, ανάλογα με το αν απαιτείται παροχή ενέργειας ή όχι για να λειτουργήσουν. Στον τομέα της παθητικής απόσβεσης έχουμε πολλούς τύπους: συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας TMD, συντονισμένους αποσβεστήρες υγρού TLD, αποσβεστήρες τριβής FD και βισκόζη αποσβεστήρες VD.

Οι υπερβολικές δονήσεις ήταν ένα κοινό πρόβλημα σε όλη την ιστορία της μηχανικής. Οι δονήσεις καταπονούν τις κατασκευές μειώνουν τη διάρκεια ζωής και προκαλούν δυσάρεστους θορύβους. Υψηλής ταχύτητας βιομηχανικά μηχανήματα, όπως μηχανές χαρτιού, υποφέρουν από κραδασμούς με συνέπεια να μειώνεται η ποιότητα του προϊόντος. Επιπλέον, χαμηλής συχνότητας δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν ναυτία και ζάλη, καθώς επίσης και δυσφορία. Σύνθετες δομές χάλυβα, έχουν συνήθως αρκετά ελαφρά απόσβεση. Τέτοιες δομές είναι επιρρεπείς σε ηχηρά προβλήματα κραδασμών. Όσο περισσότερο πολύπλοκη είναι η κατασκευή, τόσο πιο ακριβό είναι να βελτιωθεί μετά την αρχή της λειτουργίας του. Ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των ανεπιθύμητων κραδασμών είναι η καταστολή της πηγής της δόνησης. Ωστόσο, αυτό είναι σπάνια δυνατό για πρακτικούς λόγους. Η πηγή της δόνησης συνδέεται κατά κανόνα με την πρωταρχική λειτουργία του μηχανήματος όπως για παράδειγμα, οι περιστρεφόμενες ανισορροπίες στην λειτουργία του κινητήρα. Επιπλέον, η δόνηση μπορεί να προκληθεί από φυσικές πηγές όπως ανέμους και σεισμούς.

Ο σεισμός αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα στον τομέα των κατασκευών. Οι εικόνες κατεστραμένων δομημάτων είναι φυσικό επακόλουθο ενός σεισμικού γεγονότος και μας υπενθυμίζει πόσο τρωτοί είμαστε απέναντι στις δυνάμεις της φύσης. Οι σεισμικές δράσεις, των υπάρχοντων μαζών, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα των κατασκευών και τις απαιτήσεις μεγεθών της εποχής μας, καθιστούν το πρόβλημα πιο πολύπλοκο με μεγάλο όμως ενδιαφέρον.

Ένα από τα πιο συζητημένα συστήματα, που σταδιακά έχει αρχίσει να επικρατεί ανάμεσα στις καινοτόμες συσκευές αποσβέσεως, είναι το λεγόμενο σύστημα ρυθμιζόμενης μάζας. Η βασική ιδέα δεν είναι να παραμένει ανέπαφη η κατασκευή αλλά να αποφεύγεται η κατάρρευση της, αποδεχόμενοι ζημιές ενός ορίου. Σύμφωνα με τους παραδοσιακούς μεθόδους προσέγγισης, η πλαστικότητα και η ακαμψία της κατασκευής αποτελούν τη βάση στην προστασία των κατασκευών. Εισάγεται και η έννοια της απορρόφησης ενέργειας. Έτσι πιο αποτελεσματικός και οικονομικός τρόπος για τη μείωση των κραδασμών είναι να εφαρμοστεί ένα επιπλέον δυναμικό σύστημα, σε ένα διακριτό σημείο της υπάρχουσας δομής με αποτέλεσμα να αλλάξει η δυναμική του συστήματος με ένα επιθυμητό τρόπο. Οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (tuned mass dampers) (TMD) εμπίπτουν σε αυτή τη κατηγορία συσκευών. Είναι κατά βάση απλά συστήματα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα που συνδέονται σε ένα επιλεγμένο σημείο της δονούμενης κατασκευής. Τα tuned mass dampers χρησιμοποιούνται συχνά για μηχανές λειτουργίας με μια σταθερή ταχύτητα, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης σε παροδικό έλεγχο κραδασμών, καθώς και για κραδασμούς που προκαλούνται από τον άνεμο, όπως και για τον υγιή έλεγχο ακτινοβολίας.

Ένα παθητικό TMD είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό μόνο σε μια περιορισμένη περιοχή συχνοτήτων. Είναι πιθανό ότι ένα εσφαλμένα σχεδιασμένο, ελαττωματικό ή φθαρμένο TMD, μπορεί να αυξήσει το επίπεδο δονήσεων της αρχικής κατασκευής. Στην πράξη, το

πρόβλημα αυτό περιορίζει τη χρήση ενός TMD. Ένα πλήρως παθητικό TMD, επίσης, απαιτεί τακτικό service και παρακολούθηση της κατάστασης, καθώς τα κρίσιμα εξαρτήματα βρίσκονται συνεχώς κάτω από αντίξοες συνθήκες κραδασμών και ως εκ τούτου υπόκεινται σε μεταβολές.

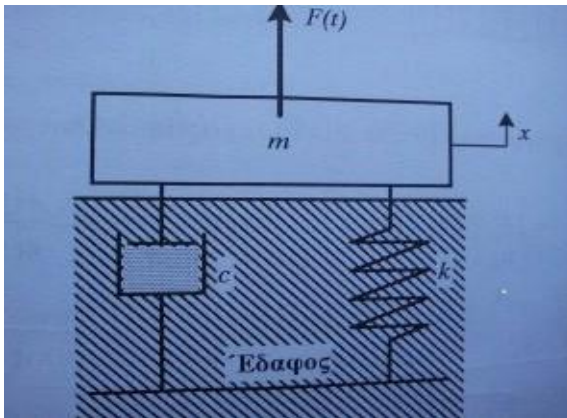
Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, σύγχρονες τεχνικές ελέγχου έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες TMD κατασκευές με σκοπό να βελτιωθεί το χρησιμοποιήσιμο φάσμα λειτουργίας και να κάνουν τα TMDs λιγότερο ευαίσθητα σε μεταβολές. Μία τυπική προσέγγιση ήταν να κάνουν τα TMD δυναμικής προσαρμογής μέσω ρυθμιζόμενης φυσικής συχνότητας ή απόσβεσης. Μία μεγάλη ποικιλία των θεωρητικών προσεγγίσεων για την προσαρμοστικότητα έχει προταθεί, αλλά πρακτικές εφαρμογές έχουν υποστεί συχνά την έλλειψη των κατάλληλων ενεργοποιητών. Ένα κοινό πρόβλημα είναι ότι τα προσαρμοστικά TMDs τείνουν να γίνουν περίπλοκες κατασκευές και μη πρακτικές. Κατά βάση, ένας συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας TMD αποτελεί ένα δονούμενο υποσύστημα που συνδέεται με μια μεγαλύτερης κλίμακας δομή που το υποδέχεται προκειμένου να μειωθεί η δυναμική απόκριση. Ο Frahm πρώτος κατασκεύασε ένα απλό αποσβεστήρα μάζας-ελατηρίου απορρόφησης κραδασμών το 1911. Ο βασικός στόχος ήταν να μειωθεί η κυλιόμενη κίνηση των πλοίων καθώς και οι δονήσεις του κύτους του πλοίου. Η θεωρητική προσέγγιση για ένα TMD παρουσιάστηκε μεταγενέστερα στις μελέτες από τους Ormondroyd και Den Hartog το 1928. Ο Den Hartog παρείχε στη συνέχεια μια λεπτομερή ανάλυση του βέλτιστου συντονισμού και των παραμέτρων απόσβεσης στο βιβλίο του Μηχανικές Δονήσεις (1940). Μέχρι εκείνη τη στιγμή, η συσκευή έχει αναπτυχθεί για πολλές διαφορετικές εφαρμογές, οι οποίες περιλαμβάνουν εμβολοφόρους κινητήρες, στηρίγματα κινητήρα τζετ, σταθεροποιητές πλοίων, γραμμές μεταφοράς ενέργειας, ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές, οδοστρωτήρες, ελικόπτερα, αυτοκίνητα, διεγείρομενα από σεισμούς και ανέμους κτίρια και γέφυρες. Εκτός από τα μηχανικά συστήματα, ένα TMD μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί στην καταστολή πιέσεων από δονήσεις στα υδραυλικά συστήματα.

Ένα TMD μπορεί να θεωρηθεί ως μια απλή τοπική προσθήκη σε ένα μεγαλύτερης κλίμακας δυναμικό σύστημα. Ο σκοπός του TMD είναι να μειώσει τις ανεπιθύμητες δονήσεις με ένα απλό και αξιόπιστο τρόπο, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την κύρια κατασκευή του συστήματος και να πιάνει πολύ χώρο. Η κατασκευή του TMD μπορεί να είναι τόσο απλή όσο ένα σύστημα αποσβεστήρα με ελατήριο και μάζα που συνδέεται σε ένα οποιοδήποτε σημείο της πρωτογενούς δομής. Το προστιθέμενο σύστημα βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο, αντί της τοποθέτησης πάνω από ένα τμήμα της κατασκευής. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν αυτή τη μέθοδο καταστολής κραδασμών ειδικά κατάλληλη για τη κατασκευή. Τα TMD μπορεί επίσης να αξιοποιηθούν στην καταστολή κυμάτων παρά την σφαιρική κίνηση. Σε γενικές γραμμές, το στοιχείο μάζας TMD αντιμετωπίζεται ως σημειακή μάζα, αλλά είναι επίσης δυνατό να σχεδιαστεί μια κατασκευή στην οποία η βοηθητική μάζα είναι μορφής μιας δοκού, έχοντας έτσι μια κατανεμημένη μάζα και πολλαπλές λειτουργίες.

2

Αρχή Λειτουργίας των Tuned Mass Dampers

2.1.Απλό μοντέλο έδρασης μηχανής



σχήμα α:Απλό μοντέλο έδρασης μηχανής[5]

Το πιο απλό μοντέλο έδρασης μηχανής αποτελείται από μία βάση μπετόν με μάζα m , η οποία εδράζεται στο έδαφος. Το έδαφος δρα στη μάζα m με δυνάμεις απόσβεσης (σταθερά c) και ελαστικές δυνάμεις (σταθερά k). Εάν η μηχανή δεν είναι απόλυτα ζυγοσταθμισμένη, φυγόκεντρες δυνάμεις δημιουργούν την αρμονική διέγερση

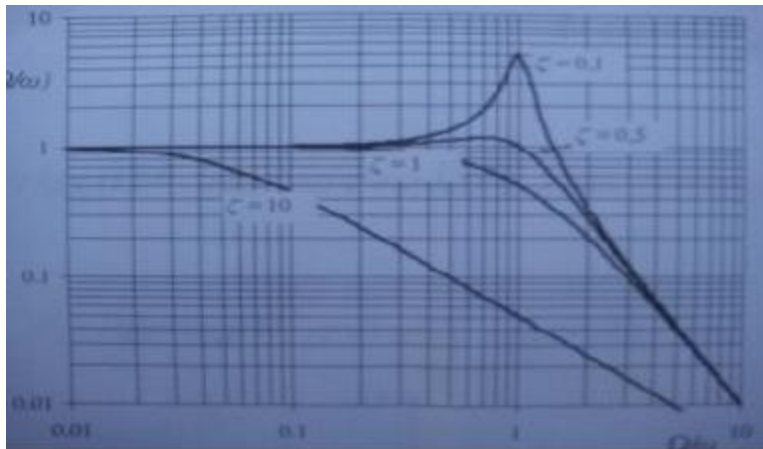
$$F(t) = F_e \cos \Omega t \quad (F_e = m_e e \Omega^2)$$

Η κίνηση της έδρασης m δίνεται από την εξίσωση

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2 x = (F_e/m) \cos \Omega t \quad (c/m = 2\zeta\omega, K/m = \omega^2)$$

είναι δε γνωστό στη μόνιμη κατάσταση (επίσης) αρμονική,

$$x_p(t) = P_c \cos \Omega t + P_s \sin \Omega t = P \cos(\Omega t + \varphi)$$



Σχήμα β: συνάρτηση μεταφοράς σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα $H(\Omega)$ για διάφορες τιμές του συντελεστή απόσβεσης ζ [5].

με εύρος

$$P = (F_e/k)H(\Omega) \quad \tan\phi = -P_s/P_c = -\frac{\lambda(\Omega)}{k(\omega)}$$

όπου $k(\Omega) = 1 - (\Omega/\omega)^2$ και $\lambda(\Omega) = 2\zeta(\Omega/\omega)$. Η συνάρτηση μεταφοράς $H(\Omega)$ εκφράζει τον λόγο των ελαστικών δυνάμεων F_k προς την διέγερση F :

$$P = \frac{F_e}{k} H(\Omega) \quad \tan\phi = -P_s/P_c = -\frac{\lambda(\Omega)}{k(\omega)}$$

Η δύναμη F_{ck} η οποία επιδρά στο έδαφος είναι ίση με:

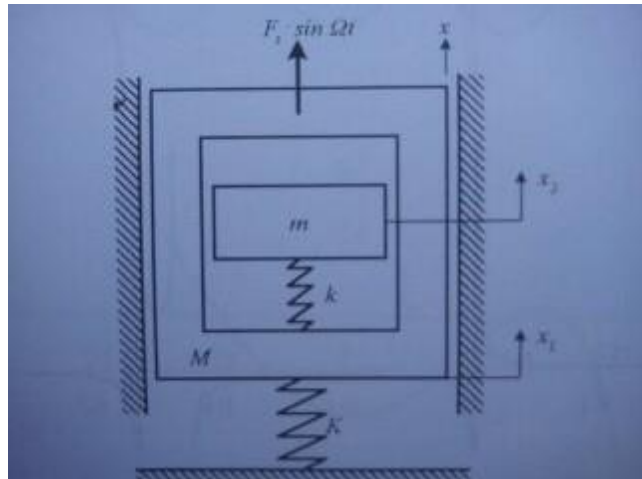
$$\begin{aligned} F_{ck} &= c \dot{x}_p + kx_p = 2\zeta\omega m \dot{x}_p + \omega^2 m x_p \\ &= \left[\frac{2\zeta\Omega}{\omega} \sin(\Omega t + \phi) + \cos(\Omega t + \phi) \right] \omega^2 m P \\ &= \left[\frac{2\zeta\Omega}{\omega} \sin(\Omega t + \phi) + \cos(\Omega t + \phi) \right] H(\Omega) F_e \end{aligned}$$

το εύρος F_{ck} της δύναμης F_{ck} είναι ίσο με

$$\begin{aligned} T_F &= \frac{\hat{F}_{ck}}{F_e} = H(\Omega) \sqrt{1 + \lambda(\Omega)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{1 + \lambda(\Omega)^2}}{\sqrt{(k(\Omega))^2 + \lambda(\Omega)^2}} \end{aligned}$$

όπου ο λόγος του εύρους των δυνάμεων $\frac{\hat{F}_{ck}}{F_e}$ που μεταφέρονται στο έδαφος σε σχέση με την διέγερση λέγεται " Συντελεστής Μετάδοσης T_F ".

2.2 .Μείωση των Ευθύγραμμων Ταλαντώσεων με την Αύξηση των Βαθμών Ελευθερίας



Σχήμα α:σύστημα έδρασης με δύο μάζες και ημιτονοειδή διέγερση[5]

Η μείωση των ταλαντώσεων μηχανών σε μια ορισμένη συχνότητα μπορεί γενικά να επιτευχθεί με την αύξηση βαθμών ελευθερίας στο ταλαντούμενο δυναμικό σύστημα. π.χ. Εάν όπου το ταλαντούμενο δυναμικό σύστημα στο οποίο επενεργεί η δύναμη $f(t)=F_s \sin \Omega t$ αποτελείται από τη μάζα M και το ελατήριο K , τότε το νέο δυναμικό σύστημα με αυξημένους βαθμούς ελευθερίας είναι το δυναμικό σύστημα του επόμενου σχήματος, που περιγράφεται από τις μάζες M - m και τα ελατήρια K - k : Στο αρχικό σύστημα M - K έχει προστεθεί το δυναμικό σύστημα m - k το οποίο εδράζεται στη μάζα M , οι δε βαθμοί ελευθερίας από x_1 έχουν αυξηθεί στους $x_1 + x_2$.

Εάν η μάζα M μετατοπίζεται στην κατεύθυνση x κατά x_1 και η μάζα m κατά x_2 , τότε η κινητική T και η δυναμική ενέργεια V δυναμικού συστήματος είναι:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}_2^2$$

$$U = \frac{1}{2} K x_1^2 + \frac{1}{2} k (x_2 - x_1)^2$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση lagrange για τις μεταβλητές $q_1=x_1$ και $q_2=x_2$ προκύπτουν οι εξής εξισώσεις κίνησης:

$$\begin{aligned} M \ddot{x}_1 + K x_1 - k (x_2 - x_1) &= \sin \Omega t \\ m \ddot{x}_2 + k (x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned}$$

Το ανωτέρω σύστημα γράφεται σε μητρική μορφή ως εξής :

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K+k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

Η μόνιμη απόκριση του δυναμικού συστήματος, επειδή δεν υπάρχουν δυνάμεις απόσβεσης, είναι ίση με:

$$x = \begin{bmatrix} P_{s1} \\ P_{s2} \end{bmatrix} \sin \Omega t$$

συνεπώς η λύση προκύπτει άμεσα από την επίλυση του παρακάτω συστήματος για τους αγνώστους P_{s1} και P_{s2} :

$$\begin{bmatrix} -M\Omega^2 + K+k & -k \\ -k & -m\Omega^2 + k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{s1} \\ P_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

Το αλγεβρικό σύστημα έχει με:

$$D = \det \begin{bmatrix} -M\Omega^2 + K+k & -k \\ -k & -m\Omega^2 + k \end{bmatrix} \\ = (-M\Omega^2 + K+k)(-m\Omega^2 + k) - k^2$$

$$D_{s1} = \det \begin{bmatrix} F_s & -k \\ 0 & -m\Omega^2 + k \end{bmatrix} = (-m\Omega^2 + k) F_s$$

$$D_{s2} = \det \begin{bmatrix} -M\Omega^2 + K+k & F_s \\ -k & 0 \end{bmatrix} = k F_s$$

την λύση :

$$P_{s1}(\Omega) = D_{s1}/D = \frac{(-m\Omega^2 + k) F_s}{(-M\Omega^2 + K+k)(-m\Omega^2 + k) - k^2}$$

$$P_{s2}(\Omega) = D_{s2}/D = \frac{k F_s}{(-M\Omega^2 + K+k)(-m\Omega^2 + k) - k^2}$$

Από την ανάλυση των παρακάτω σχέσεων προκύπτει πως για

$$\Omega^2 = \frac{k}{m}$$

η μόνιμη απόκριση του δυναμικού συστήματος είναι ίση με :

$$P_{s1}(\Omega) = \frac{F_0}{\sqrt{1 - \Omega^2}} = D_{s1}/D = 0$$

$$P_{s2}(\Omega) = \frac{F_0}{\sqrt{1 - \Omega^2}} = D_{s2}/D = F_0/k$$

δηλαδή το εύρος ταλάντωσης της μάζας M μηδενίζεται.

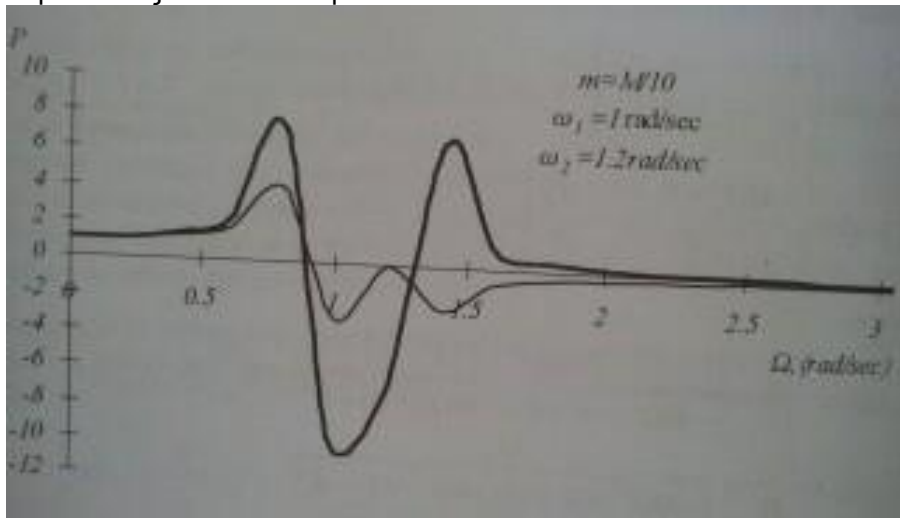
Το φαινόμενο αυτό εξηγείται ως εξής : Κατά τη μόνιμη απόκριση όλα τα στοιχεία ενός δυναμικού συστήματος ταλαντώνεται με την ίδια συχνότητα, την συχνότητα της αρμονικής διέγερσης Ω . Όταν η συχνότητα της αρμονικής διέγερσης Ω γίνει ίση με την

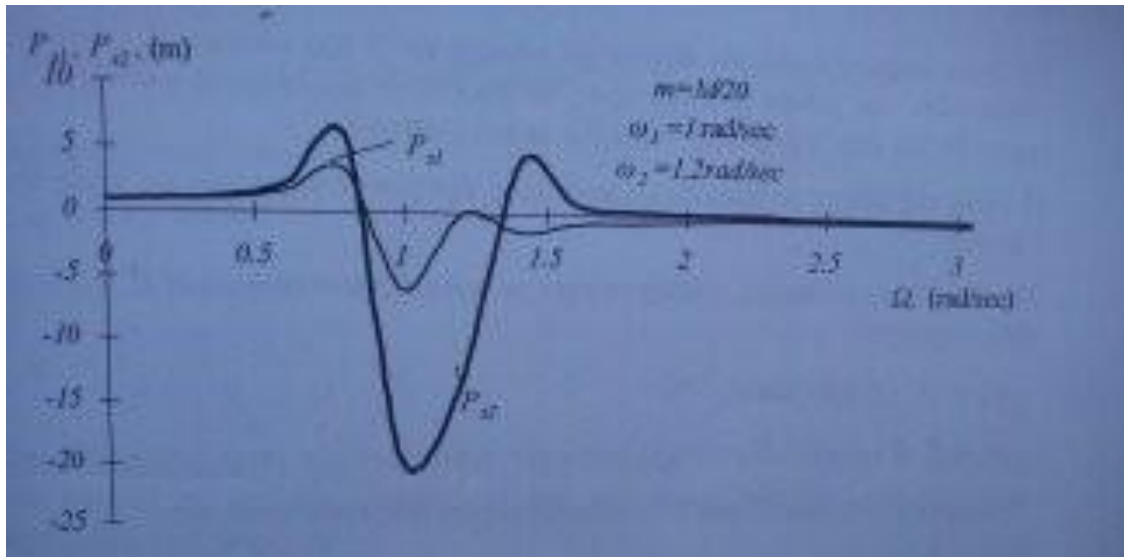
επιμέρους ιδιοσυχνότητα $\sqrt{\frac{k}{m}}$ της μάζας m έναντι της βάσης της (μάζα M), τότε σε αυτό το σημείο του επιμέρους συντονισμού, η μόνιμη απόκριση της μάζας m θα τείνει προς το άπειρο, η δε διαφορά φάσης της προς 180° διαφορά φάσης ως προς την M με αποτέλεσμα οι κινήσεις των δύο μαζών να αλληλοαναιρούνται.

Σε πρακτικό επίπεδο, αυτό σημαίνει πως όταν ένα δυναμικό σύστημα παρουσιάζει μια μεγάλη ταλάντωση σε μια συγκεκριμένη συχνότητα Ω_{crit} , η ταλάντωση αυτή μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά προσθέτοντας στην μάζα ένα νέο δυναμικό σύστημα, η ιδιοσυχνότητα

του οποίου $\sqrt{\frac{k}{m}}$ είναι ίση με την συχνότητα Ω_{crit} .

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η μόνιμη απόκριση των βαθμών ελευθερίας του συστήματος, από όπου διακρίνεται το σημείο αντισυντονισμού των μαζών M και m για δύο περιπτώσεις : $m=M/10$ και $m=M/20$.





Σχήματα γ, :Συνάρτηση μεταφοράς των μετατοπίσεων των δύο μαζών M και m για $m=M/20$. Εξάρτηση του πλάτους ταλάντωσης (P_{s1}, P_{s2}) από την συχνότητα διέγερσης Ω . [5]

3

Μέθοδοι ελέγχου δονήσεων, οι διαφορετικοί τύποι των TMD και τα κριτήρια προσαρμογής για ένα TMD με βέλτιστη απόδοση.

3.1 Ταξινόμηση των μεθόδων ελέγχου δονήσεων.

→ Παθητικός έλεγχος

- Απομόνωση βάσης: αλλαγή διεγέρσεων εισόδου
- Μέτρα διάχυσης Ενέργειας (διάφορα είδη αμορτισέρ και υλικά αποσβέσεως κραδασμών)
- Δυναμικός απορροφητής δόνησης: TMD, TLD, κ.λπ., (αλλαγή διαρθρωτικών δυναμικών χαρακτηριστικών)

→ Ενεργός έλεγχος

- Ενεργός τένοντας (αλλαγή εσωτερικών δυνάμεων)
- AMD, ATMD, HMD, κλπ., (εφαρμόζονται εξωτερικές δυνάμεις)

→ Ημι-ενεργός έλεγχος

- AVS (ενεργή μεταβλητή σκληρότητα)
 - VD (μεταβλητή σκληρότητα)

3.2 Passive Control Systems - Παθητικά συστήματα ελέγχου

Τα παθητικά συστήματα ελέγχου μειώνουν την διάχυση ενέργειας στην πρωτογενή δομή αντανakλώντας ή απορροφώντας μέρος της ενέργειας εισόδου, μειώνοντας έτσι πιθανή δομική ζημία (Housner et al. (1997)). Δεν απαιτούν ενέργεια για να λειτουργήσουν, οπότε είναι πολύ αξιόπιστα, δεδομένου ότι δεν επηρεάζονται από διακοπές ρεύματος οι οποίες είναι κοινές κατά τη διάρκεια των σεισμών. Διαχέουν την ενέργεια χρησιμοποιώντας την κίνηση της κατασκευής για να παράξουν σχετική κίνηση εντός της συσκευής ελέγχου (Symans et al. (1994)) ή με τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε θερμότητα. Από τη στιγμή που δεν εγχέουν ενέργεια στο σύστημα δεν είναι σε θέση να το αποσταθεροποιήσουν, οι απαιτήσεις συντήρησης τους είναι πολύ χαμηλές και είναι φθηνά σε κόστος και αποτελεσματικά για την υποστήριξη των κτιρίων σε περιοχές χαμηλού ρίσκου (Housner et al. (1997), Soong and Spencer (2002)). Είναι απλές συσκευές και γενικά χαμηλού κόστους, αλλά δεν είναι ικανές να προσαρμοστούν σε μεταβαλλόμενες ανάγκες. Τα παθητικά συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε νέα αλλά και σε είδη υπάρχοντα κτίρια τα οποία είναι σε σεισμικές περιοχές χαμηλού κινδύνου.

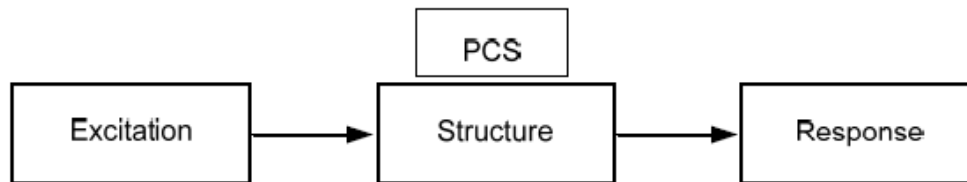
Υπήρξαν πολλές έρευνες, αριθμητικές και πειραματικές, στον τομέα του παθητικού ελέγχου για τα ψηλά κτίρια. Η βασική ιδέα των εν λόγω ερευνών ήταν να αυξηθούν αποτελεσματικά οι απόσβεσεις των κραδασμών της δομής κοντά στην κρίσιμη κατάσταση, λειτουργώντας η δομή σαν ένα σύστημα απορροφητήρα αυξάνοντας την έμφυτη ακαμψία και αντοχή της κατασκευής. Σε γενικές γραμμές αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να ενισχύουν την διάχυση ενέργειας στην δομή στην οποία πρόκειται να εγκατασταθούν.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την εγκατάσταση παθητικών συστημάτων ελέγχου σε κτίρια. Η ικανότητα τους να εγγυόνται ένα ορισμένο ποσό της απόσβεσης με βοηθητικές συσκευές απόσβεσης, βελτιώνει σημαντικά την αξιοπιστία του σχεδιασμού της κατασκευής. Κατά το σχεδιασμό κτιρίων, που ενδεχομένως χρησιμοποιούν βοηθητικές αποσβεστικές συσκευές, οι σχεδιαστές πρέπει να επιλέγουν την πλέον κατάλληλη συσκευή με βάση την κρίση τους την αποτελεσματικότητά της συσκευής και σχετικά με τις διάφορες συνθήκες σχεδίασης (Tamura (1998)). Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γίνουν οι ακόλουθες ενέργειες:

- ✓ Καθορισμός μιας βασικής πολιτικής για το διαρθρωτικό σχεδιασμό των κτιρίων που χρησιμοποιούν αποσβεστικές συσκευές.
- ✓ Αποσαφήνιση των σκοπών χρησιμοποίησης του ελέγχου των κραδασμών.
- ✓ Υπολογισμός των επιπέδων διέγερσης.
- ✓ Διαμορφωση των δυναμικών χαρακτηριστικών της δομής με τη δημιουργία ενός αναλυτικού μοντέλου.
- ✓ Επιλογή των μεθόδων πρόβλεψης απόκρισης σύμφωνα με τις διεγέρσεις και του αναλυτικού μοντέλου.
- ✓ Επιλογή της κατάλληλης συσκευής απόσβεσης.
- ✓ Επιβεβαίωση και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της απόσβεσης.
- ✓ Αξιολόγηση της αξιοπιστίας του συστήματος.
- ✓ Καθορισμός της συντήρησης του συστήματος και των μεθόδων διαχείρισης.

Ωστόσο, τα παθητικά συστήματα ελέγχου περιορίζονται στο το ότι δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τις διάφορες εξωτερικές αλλαγές. Αυτές οι συσκευές κατά κανόνα λειτουργούν βασιζόμενα σε αρχές όπως την τριβή ολίσθησης, την ελαστικότητα των μετάλλων, τον

μετασχηματισμό φάσης μετάλλων, την παραμόρφωση των στερεών ιξωδοελαστικών ή των υγρών .Η αποτελεσματικότητα ενός παθητικού συστήματος ελέγχου μετριέται συνήθως με βάση την διαρθρωτική ασφάλεια, την ανθρώπινη άνεση και το ελάχιστο δυνατό κόστος.Η διαρθρωτική ασφάλεια μπορεί να εξασφαλιστεί με την επιβολή περιορισμών για τη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση και / ή την επιτάχυνση σε ένα κρίσιμο σημείο της δομής.Επιπλέον, η ανθρώπινη απαίτηση για την άνεση υπαγορεύει ότι η επιτάχυνση δεν θα πρέπει να παραβιάζει κάποιο αποδεκτό κριτήριο.Το κόστος του παθητικού ελέγχου επιβάλλει ένα τρίτο περιορισμό και μπορεί συνήθως να εκφράζεται ως συνάρτηση του μεγέθους των δυνάμεων ελέγχου που εφαρμόζονται στη δομή.Ενώ είναι επιθυμητό να μεγιστοποιηθεί η ασφάλεια και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος,παρολαυτά και οι δύο απαιτήσεις είναι δύσκολο να επιτευχθούν ταυτόχρονα.



Σχήμα α: Σχηματικό διάγραμμα του Παθητικού Συστήματος Ελέγχου (Passive Control System-PCS)

Σε γενικές γραμμές, τα Παθητικά συστήματα ελέγχου περιλαμβάνουν συστήματα μόνωσης βάσης, συστήματα αντιστήριξης, αποσβεστήρες τριβής,μεταλλικά αμορτισέρ, αποσβεστήρες ιξωδοελαστικών, αποσβεστήρες με παχύρρευστο υγρό , συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας (TMD), συντονισμένους αποσβεστήρες υγρού (TLD) και συντονισμένους αποσβεστήρες υγρής στήλης (TLCD).

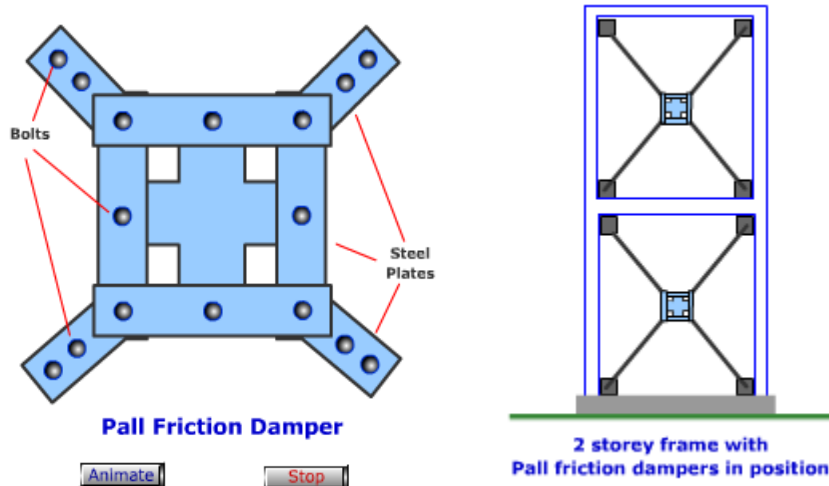
Από τη μια πλευρά υπάρχουν παθητικά συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούν παθητικές συμπληρωματικές συσκευές απόσβεσης.Οι συσκευές αυτές προστατεύουν μια δομή με αύξηση της χωρητικότητας της διάχεόμενης ενέργειας.Ένα συμπληρωματικό σύστημα απόσβεσης λειτουργεί απορροφώντας ένα τμήμα της εισερχόμενης ενέργειας σε μια δομή, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις απορρόφησης ενέργειας και προλαβαίνει την ζημιά στην πρωτοταγή δομή.Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε θερμότητα ή μέσω της μεταφοράς της ενέργειας διαμέσου της δόνησης.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί συσκευές που λειτουργούν με αρχές όπως την τριβή ολίσθησης,την ελαστικότητα των μετάλλων,τον μετασχηματισμό φάσης σε μέταλλα και την παραμόρφωση των στερεών ή υγρών ιξωδοελαστικών (Soong και Dargush (1997), Soong and Spencer (2002)).

Τα συστήματα απομόνωσης βάσης(Base isolation systems) συνήθως τοποθετούνται στα θεμέλια της δομής και το σύστημα απομόνωσης εισάγει την ευελιξία και τις δυνατότητες απορρόφησης της ενέργειας, με αποτέλεσμα την μείωση των επιπέδων ενέργειας και επιτάχυνσης δαπέδου το οποίο μπορεί να μεταδοθεί στη δομή.Οι πιο σημαντικές απαιτήσεις για ένα σύστημα απομόνωσης είναι η ευελιξία του να επιμηκύνει τη φυσική περίοδο και να παράγει αποτέλεσμα απομόνωσης,καθώς και την επαρκή ακαμψία κάτω από τα φορτία που δέχεται κατά τις δονήσεις του περιβάλλοντος και την δυνατότητα της ενέργειας να διαχέεται (Buckle και Mayes (1990)).

Τα συστήματα αντιστήριξης(Bracing systems) χρησιμοποιούνται για να σταθεροποιήσουν μόνιμα κτίρια από εξωτερικές δυνάμεις, όπως τα φορτία από τους ανέμους και τους σεισμούς.

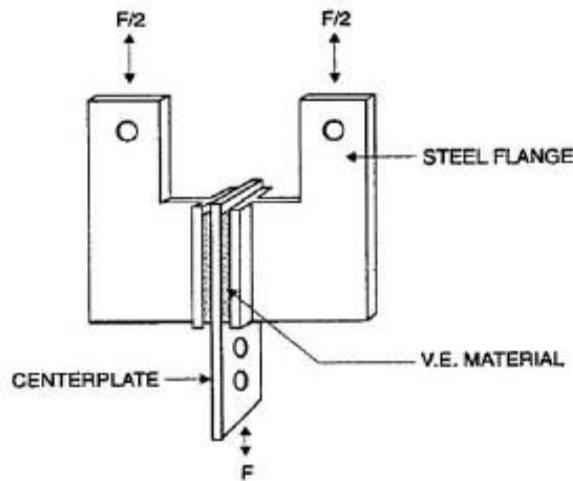
Οι αποσβεστήρες τριβής (Friction dampers) αποτελούνται από μια πλάκα από χάλυβα και δύο πλάκες συγκράτησης της πλάκας χάλυβα και από τις δύο πλευρές. Όλες οι πλάκες συνεργάζονται μεταξύ τους για να απορροφηθεί η ενέργεια από την τριβή, όπως το κτίριο παραμορφώνεται εξαιτίας της σεισμικής δραστηριότητας.



Σχήμα β: Αποσβεστήρας τριβής και πλαίσιο δύο ορόφων με τοποθετημένους αποσβεστήρες τριβής.[5]

Οι μεταλλικές διατάξεις διαρροής (Metallic yield dampers) βασίζονται στην ανελαστική παραμόρφωση των μετάλλων για να διαχέουν ενέργεια. Πολλές από αυτές τις συσκευές χρησιμοποιούν ήπιες χαλύβδινες πλάκες τριγωνικού σχήματος ή σχήματος Χ ώστε η διαρροή να εξαπλωθεί σχεδόν ομοιόμορφα σε όλο το υλικό. Μερικά ιδιαίτερα επιθυμητά χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών είναι η σταθερή συμπεριφορά τους, η αυξημένη αντοχή, η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία και η σχετική έλλειψη ευαισθησίας στην περιβαλλοντική θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, πολλές αναλυτικές και πειραματικές έρευνες έχουν διεξαχθεί για να καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των επιμέρους συσκευών. Αυτές οι συσκευές υλοποιήθηκαν για πρώτη φορά στη Νέα Ζηλανδία και την Ιαπωνία και αργότερα χρησιμοποιήθηκαν για τον εξοπλισμό παλαιότερων κατασκευών στο Μεξικό και τις Ηνωμένες Πολιτείες (Soong and Spencer jr (2002)).

Τα ιξωδοελαστικά συστήματα (Viscoelastic (VE) dampers) χρησιμοποιούνται σε δομικές εφαρμογές συνήθως κατασκευασμένα από υλικά όπως συμπολυμερή ή υαλώδεις ουσίες που διαχέουν την ενέργεια μέσω της διατμητικής παραμόρφωσης. Ένας τυπικός αποσβεστήρας Viscoelastic (VE), ο οποίος αποτελείται από στρώματα VE συνδεδεμένα με χαλύβδινες πλάκες δεικνύεται εις το παρακάτω σχήμα (Housner et al. (1997), Soong and Spencer (2002)). Επομένως η διάχυση της ενέργειας λαμβάνει χώρα όταν διαρθρωτικοί κραδασμοί προκαλούν σχετική κίνηση μεταξύ των εξωτερικών χαλύβδινων φλαντζών και των κεντρικών πλακών.



Σχήμα γ: Τυπική διάταξη απόσβεσης VE[3]

Ένας αποσβεστήρας παχύρευστου υγρού (viscous fluid (VF) damper) είναι πολύ παρόμοιος με έναν αποσβεστήρα ενός αμορτισέρ αυτοκινήτου, αποτελούμενο από έναν κύλινδρο που γεμίζεται με ένα υγρό, όπως σιλικόνη ή λάδι και ένα έμβολο με μικρά ανοίγματα μέσω των οποίων διέρχεται το ρευστό από τη μία πλευρά στην άλλη. Επομένως, ο VF αποσβεστήρας διαχέει την ενέργεια μέσω της κίνησης ενός εμβόλου σε ένα αποσβεστήρα VF.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν διάσημοι μέθοδοι διάχυσης ενέργειας που ενσωματώνουν δυναμικούς αποσβεστήρες κραδασμών, όπως αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (Tuned Mass damper -TMD). Μέσα από εντατική έρευνα κατά τα τελευταία έτη, το TMD έχει γίνει αποδεκτό ως ένα αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου κραδασμών. Χρησιμοποιείται τόσο για τις νέες δομές αλλά και για τις υπάρχουσες ενίσχυοντας της αξιοπιστία τους από τους ανέμους, τους σεισμούς και την ανθρωπίνη δραστηριότητα.

Η θεωρία των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας έχει υιοθετηθεί για τη μείωση των κραδασμών από ψηλά κτίρια, αλλά και άλλων κατασκευών. Οι συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας μπορούν να ενσωματωθούν σε μια υπάρχουσα δομή με μικρότερη παρέμβαση σε σύγκριση με άλλες συσκευές παθητικής διάχυσης ενέργειας.

3.3 Active Control Systems

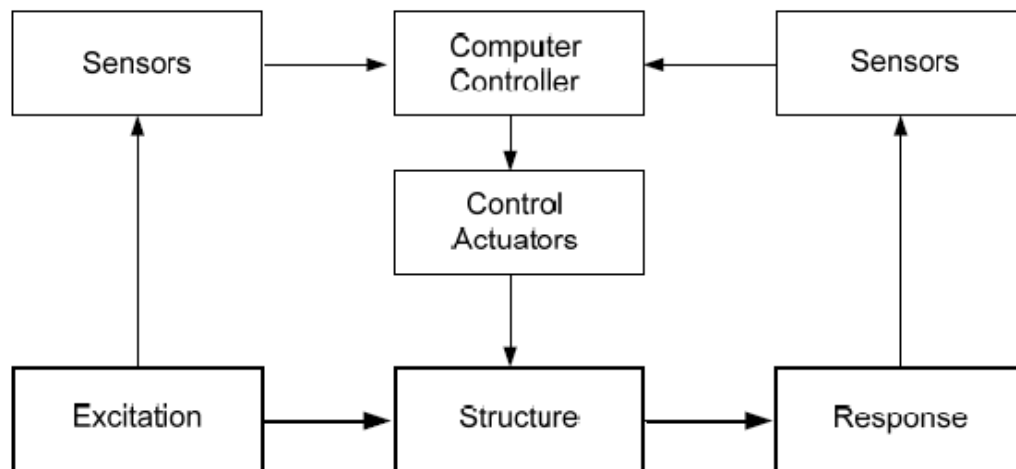
Για να αναπτυχθεί μια πιο ευέλικτη εναλλακτική λύση, η έννοια του ενεργού ελέγχου εισήχθη πριν από μερικά χρόνια (Yao (1972)). Ενεργά συστήματα ελέγχου λειτουργούν χρησιμοποιώντας εξωτερική τροφοδοσία της τάξης των δεκάδων κιλοβάτ [kW] (Symans . (1994)) που παρέχονται για να λειτουργούν ως ενεργοποιητές και να προσδώσουν δυνάμεις ελέγχου επί της δομής με ένα προδιαγεγραμμένο τρόπο. Έχουν την ικανότητα να προσαρμοστούν σε διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης και να ελέγχουν διαφορετικούς τρόπους δόνησης της δομής (Housner et al. (1997)).

Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για να προσθέσουν και να αποδώσουν ενέργεια στη δομή και διαθέτουν την δυνατότητα να αποσταθεροποιήσουν το συνολικό σύστημα. Είναι πιο αποτελεσματική από τις παθητικές συσκευές λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται σε διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης και να ελέγχουν διαφορετικούς τρόπους κραδασμών (Housner et al. (1997)).

Ωστόσο, δεδομένου ότι η μεγάλη ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία τους μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμη κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων, αυτό τα κάνει να μην είναι εξίσου αξιόπιστα. Κόστος και συντήρηση τέτοιων συστημάτων είναι επίσης σημαντικά υψηλότερο από αυτό των παθητικών συστημάτων ελέγχου. Επομένως, υπάρχει ένα σημαντικός αριθμός σοβαρών προκλήσεων που πρέπει να επιλυθούν, πριν η ενεργός τεχνολογία ελέγχου κερδίσει την γενική αποδοχή από την κοινότητα των μηχανικών και των κατασκευαστών. Οι προκλήσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- × μείωση του κόστους κεφαλαίου και συντήρησης
- × εξάλειψη της εξάρτησης από εξωτερική παροχή ενέργειας
- × αυξάνοντας την αξιοπιστία και την ευρωστία του συστήματος και
- × πρέπει να κερδίσει την αποδοχή των μη παραδοσιακών τεχνολογιών

Το κατάλληλα μέτρα ελέγχου συνήθως καθορίζονται με βάση τις μετρήσεις από τις διαρθρωτικές αποκρίσεις ή / και διαταραχές, προκειμένου να υπολογισθούν τα κατάλληλα σήματα έλεγχου και να αποσταλούν στους ενεργοποιητές, όπως φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα. Επειδή ο έλεγχος δυνάμεων δεν εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την τοπική κίνηση της δομής (αν και υπάρχει κάποια εξάρτηση από την τοπική αντίδραση λόγω των επιπτώσεων από τις αλληλεπιδράσεις του ελέγχου δομής), τα συστήματα ελέγχου είναι αισθητά πιο ευέλικτα στην ικανότητά τους να μειώνουν τις δομικές αποκρίσεις για μια ευρεία ποικιλία συνθηκών φορτώσεως (Soong και Spencer (2002)).



Σχήμα α: Σχηματικό διάγραμμα των ενεργών συστημάτων ελέγχου[3]

Σε αυτό το σύστημα, τα σήματα που αποστέλλονται στους ενεργοποιητές ελέγχου είναι μια λειτουργία των αποκρίσεων από τις συστήματος, που έχει μετρηθεί με φυσικούς αισθητήρες (Housner et al. (1997)).

Όταν μόνο οι δομικές μεταβλητές αποκρίσεις μετριοούνται, η διαμόρφωση ελέγχου είναι αναφερόμενη ως ανατροφοδοτούμενος έλεγχος δεδομένου ότι η δομική απάντηση ελέγχεται συνεχώς και αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να κάνουν τις συνεχείς διορθώσεις στις εφαρμοσμένες δυνάμεις ελέγχου. Ένας μεταδράστικός έλεγχος προκύπτει όταν οι δυνάμεις ελέγχου ρυθμίζονται μόνο από τη μετρηθείσα διέγερση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί, για τις εισόδους του σεισμού, μετρώντας τις επιταχύνσεις στη βάση της κατασκευής. Στην περίπτωση όπου οι πληροφορίες σχετικά με αμφότερες τις ποσότητες απόκρισης και διέγερσης χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του ελέγχου, ο όρος

ανατροφοδότηση-μεταδράσεως ελέγχου χρησιμοποιείται. Το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας έρευνας σχετικά με τον ενεργά δομικό έλεγχο για αντισεισμική προστασία έχει επικεντρωθεί στις στρατηγικές είτε με πλήρη ανάδραση καταστάσεων ή στρατηγικές ταχύτητες ανάδρασης. Ωστόσο, η ακριβή μέτρηση από τις μετατοπίσεις και τις αναγκαίες ταχύτητες της δομής είναι δύσκολο να επιτευχθεί άμεσα, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας. Οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες δεν είναι απόλυτες, αλλά εξαρτώνται από το αδρανειακό σύστημα αναφοράς στο οποίο λαμβάνονται και η άμεση μέτρηση τους στις αυθαίρετες θέσεις για μεγάλης κλίμακας δομές είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Κατά τη διάρκεια της σεισμικής δραστηριότητας, αυτή η δυσκολία επιτείνεται, επειδή το θεμέλιο στο οποίο η δομή συνδέεται κινείται με το έδαφος και δεν παρέχει ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Εναλλακτικά, επειδή τα επιταχυνσιόμετρα είναι φθηνά και μπορεί εύκολα να προσφέρουν αξιόπιστη μέτρηση των διαρθρωτικών επιταχύνσεων σε στρατηγικά σημεία για τη δομή, η ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου που βασίζεται στην επιτάχυνση της ανατροφοδότησης είναι μια ιδανική λύση στο πρόβλημα αυτό. Ο ενεργός έλεγχος λειτουργεί καλά με τη χρήση νέων υλικών και νέες μεθόδους κατασκευής. Παρέχει ασφάλεια σε δομές με υπερβολικές δονήσεις.

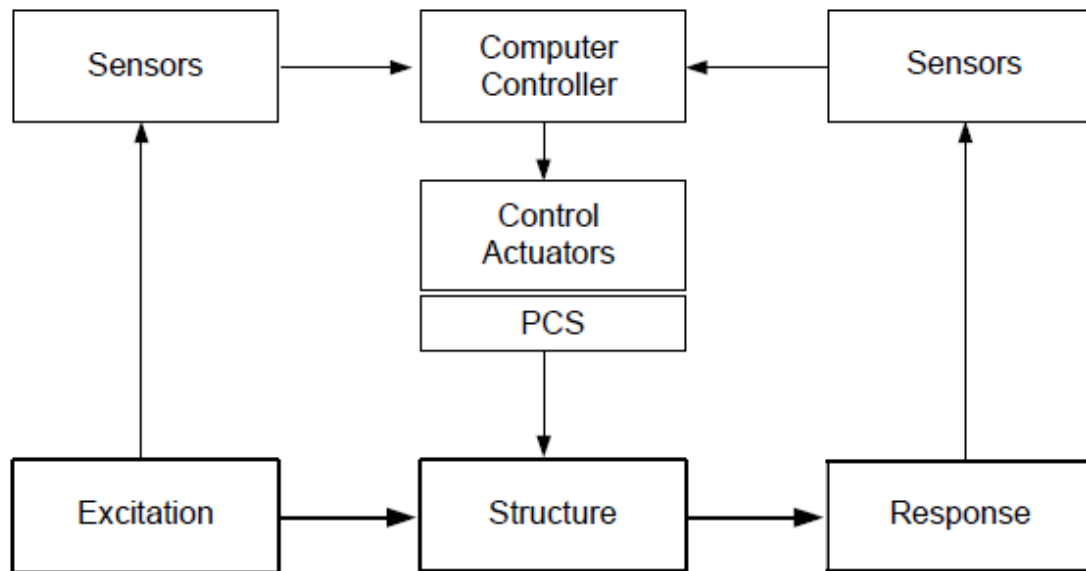
Ενεργά συστήματα ελέγχου περιλαμβάνουν ενεργούς αποσβεστήρες μάζας, ενεργούς οδηγούς μάζας, ενεργά συστήματα τένοντα, προωστήρες παλμού, ενεργή μεταβλητή δυσκαμψία και συστήματα που χρησιμοποιούν ενεργοποιητές που ελέγχονται από υπολογιστή για να παράγουν την καλύτερη απόδοση.

Η ενεργός μαζική διάταξη απόσβεσης (AMD), η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη ενεργός συσκευή ελέγχου, είναι παρόμοια με το TMD, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί επίσης ένα σύστημα ελατήριο-μάζας-αποσβεστήρα. Ωστόσο, περιλαμβάνει έναν ενεργοποιητή που χρησιμοποιείται για να οδηγεί την θέση της μάζας κάθε στιγμή, και για να αυξήσει την ποσότητα της απόσβεσης που επιτεύχθηκε καθώς και την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας της συσκευής. Η διάταξη αυτή καταστέλλει την ταλάντωση ενός κτιρίου με την ενεργοποίηση ενός βάρους για να ελέγξει τις αξονικές δυνάμεις. Η πρώτη εφαρμογή αυτής της μεθόδου ελέγχου και του ενεργού ελέγχου γενικότερα πραγματοποιήθηκε το 1989, στο κτίριο Kyobashi Seiwa στο Τόκιο, Ιαπωνία, από την Kajima Corporation (Korobi (1991), Spencer sr και Soong (1999), Soong and Spencer Jr (2002)).

Οι ενεργοί αποσβεστήρες μάζας είναι κυρίως πολύ αποτελεσματικοί στον έλεγχο ταλαντώσεων σε δυνατούς ανέμους και σε μεσαίου μεγέθους σεισμούς. Ερευνώντας κάθε σύστημα ελέγχου είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το κατάλληλο, το οποίο θα παράγει την απαιτούμενη απόδοση. Νέα σχέδια διαρθρωτικών συστημάτων ελέγχου δημιουργούνται και παράγουν ασφαλέστερα κτήρια, άνετα για τους ανθρώπους και προστατευμένα από τους σεισμούς.

3.4 Semi-Active Control Systems

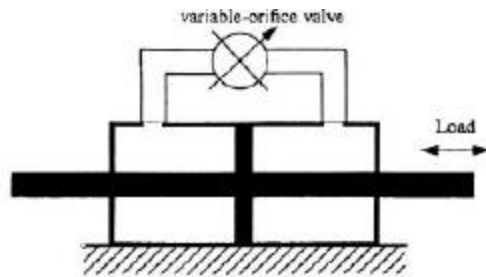
Ένας συμβιβασμός μεταξύ παθητικών και ενεργητικών συστημάτων ελέγχου έχει αναπτυχθεί στην μορφή του ημι-ενεργού συστήματος ελέγχου όπως απεικονίζεται στην εικόνα, ο οποίος βασίζεται στις ημι-ενεργές συσκευές. Μια ημι-ενεργή συσκευή ελέγχου έχει μηχανικές ιδιότητες, όπως απόσβεση ή δυσκαμψία που μπορεί να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο για να βελτιώσει την απόδοση της, αλλά δεν μπορεί να εισφέρει ενέργεια εντός του ελεγχόμενου συστήματος (Housner et al. (1997), Spencer Jr και Sain (1997)). Τυπικά, μία ημι-ενεργή συσκευή ελέγχου δεν μπορεί να αυξήσει την μηχανική ενέργεια στο ελεγχόμενο σύστημα, αλλά έχει ιδιότητες που μπορεί να είναι δυναμικά μεταβαλλόμενες, έτσι ώστε να μην έχουν τη δυνατότητα να αποσταθεροποιήσουν το σύστημα. Δεδομένου ότι η εξωτερική δύναμη χρησιμοποιείται μόνο για να αλλάξει τις ιδιότητες της συσκευής και όχι να δημιουργήσει μια δύναμη ελέγχου, οι απαιτήσεις ισχύος είναι πολύ χαμηλές, της τάξης των δεκάδων W (Symans (1994), Symans και Κωνσταντίνου (1997)).



Σχήμα α: Σχηματικό διάγραμμα των ημιενεργών συστημάτων ελέγχου[3]

Έτσι τα ημι-ενεργά συστήματα, μπορούν να λειτουργούν με μπαταρία από μόνα τους καθιστώντας τα αρκετά συμφέρουσα κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων, όταν η κύρια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να μην λειτουργεί. Τα ημι-ενεργά συστήματα ελέγχου προσφέρουν μια άλλη εναλλακτική λύση στον τομέα του διαρθρωτικού ελέγχου. Μια ποικιλία από ημι-ενεργές συσκευές ελέγχου έχουν προταθεί, περιλαμβανομένων συσκευών μεταβλητού στομίου, μεταβλητής δυσκαμψίας, συσκευές μεταβλητής τριβής, ημι-ενεργά TMDs, ρυθμιζόμενα TLCDs, ελεγχόμενοι αποσβεστήρες ρευστού, όπως μαγνητοροολογικοί αποσβεστήρες (MR) και Ηλεκτροροολογικοί (ER) αποσβεστήρες. Τα συστήματα αυτά έχουν προσελκύσει πολλή προσοχή πρόσφατα επειδή διαθέτουν την ικανότητα προσαρμογής των ενεργών συστημάτων ελέγχου, αλλά είναι από τη φύση τους σταθερά και λειτουργούν με τη χρήση πολύ χαμηλής ισχύος. Επειδή αυτές οι συσκευές είναι προσαρμόσιμες, αναμένεται να είναι αρκετά αποτελεσματικές για την διαρθρωτική μείωση της απόκρισης σε ένα ευρύ φάσμα των συνθηκών φόρτωσης. Η στρατηγική ελέγχου ενός ημι-ενεργού συστήματος ελέγχου βασίζεται στην ανατροφοδότηση των διαρθρωτικών κινήσεων. Διαφορετικοί αλγόριθμοι ελέγχου μπορεί να υιοθετηθούν άμεσα από ενεργά συστήματα ελέγχου. Εντούτοις, τα ημι-ενεργά συστήματα ελέγχου είναι τυπικά μη γραμμικά εξαιτίας της εγγενούς μη γραμμικότητας των ημι-ενεργών διατάξεων.

Οι μεταβλητού στομίου αποσβεστήρες μπορούν να επιτύχουν μεταβλητή απόσβεση αλλάζοντας την αντίσταση ροής του υδραυλικού ρευστού ενός συμβατικού υδραυλικού αποσβεστήρα ρευστού χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρομηχανικό μεταβλητό στόμιο που μεταβάλλει το ποσό της απόσβεσης που μεταδίδεται στη δομή (Symans (1994), Spencer Jr και Soong (1999)). Μία σχηματική αναπαράσταση μιας τέτοιας συσκευής δίνεται στο σχήμα β. (Spencer και Nagarajaiah (2003)).



Σχήμα β: Σχηματική αναπαράσταση του μεταβλητού στομίου αποσβεστήρα[3]

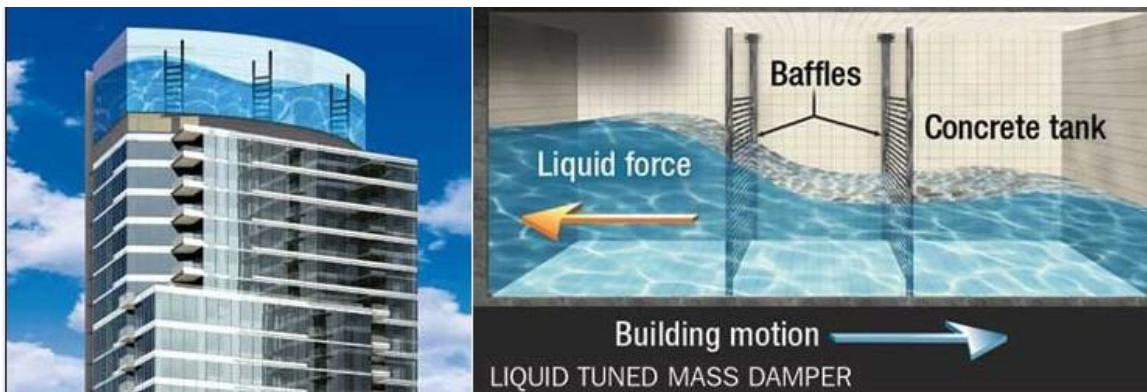
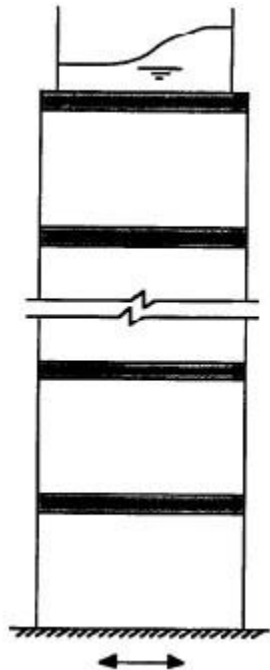
3.5 Συντονισμένη υγρή διάταξη απόσβεσης (Tuned Liquid Damper-TLD)

Τα tuned liquid damper (TLD) είναι ένας άλλος τύπος παθητικής διάταξης ελέγχου που χρησιμοποιεί την κίνηση ενός ρευστού για να μειώσει τους κραδασμούς μιας δομής. Είναι διατάξεις απόσβεσης που έχουν μηχανισμό παρόμοιο με ένα TMD αλλά που χρησιμοποιούν την υγρή κίνηση. Προτάθηκαν για τον έλεγχο δόνησεων των δομών από πολιτικούς μηχανικούς έργων πριν από αρκετά χρόνια. Η συντονισμένη υγρή διάταξη απόσβεσης αποτελείται από μια ή μια ομάδα άκαμπτων δεξαμενών που μπορούν να έχουν μια ευρεία ποικιλία σχημάτων της γεωμετρίας από σπειροειδές δακτύλιο σε ορθογώνιο ή κυκλικό σχήμα, εν μέρει γεμάτο με υγρό, συνήθως νερό. Στηρίζεται επάνω στην κίνηση των υγρών και στις δυνάμεις που προκαλούνται από αυτά για να αλλάξει τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας δομής και για να απελευθερώσει την ενέργεια δόνησης μέσω του πλάτους του ρευστού κίνησης και το κύμα που σταματάει αποτόμα στην ελεύθερη επιφάνεια η οποία μιμείται την κίνηση των TMD. Το TLD είναι μια ειδική κατηγορία των TMD όπου η μάζα αντικαθίσταται από υγρό, το οποίο τις περισσότερες φορές είναι το νερό. Σε ένα TLD το υγρό τοποθετείται σε μια δεξαμενή της κίνησης υγρών με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για να προσθέσει απόσβεση στο δομικό σύστημα.

Με κατάλληλο σχεδιασμό του μεγέθους των δεξαμενών TLD καθώς και το βάθος του νερού στο εσωτερικό, η φυσική συχνότητα της κίνησης των υγρών του TLD μπορεί να συντονίζεται με εκείνη της δομής. Στην πράξη, μια ομάδα δεξαμενών με το ίδιο μέγεθος και το ίδιο βάθος του νερού χρησιμοποιείται συχνά, προκειμένου η συνολική μάζα του υγρού μπορεί να ανέλθει σε περίπου ένα ή αρκετά τοις εκατό της δομικής μάζας, η οποία είναι η τιμή της αναλογίας μάζας που συνήθως χρησιμοποιείται για ένα TMD. Σε ορισμένα σχέδια TLD, μπορούν να φέρουν επιπλέον εσωτερικές συσκευές, για παράδειγμα δίχτυα, διαφράγματα και κινούμενες σφαίρες, τα οποία είναι εγκατεστημένα στο υγρό για να αυξηθεί η απόσβεση της κίνησης των υγρών και το TLD να μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά. Δεδομένου ότι το TLD έχει ορισμένα πλεονεκτήματα περισσότερα από το TMD, όπως χαμηλό κόστος, εύκολα ρυθμιζόμενη φυσική συχνότητα, την καταλληλότητα για προσωρινή χρήση, χαμηλό επίπεδο ενεργοποίησης, εύκολη εγκατάσταση σε υπάρχουσες δομές, κλπ., έχει γίνει μια δημοφιλής συσκευή ελέγχου καταπολεμησης των δονήσεων. Ωστόσο, η έρευνα για τα TLD είναι περίπλοκη, διότι σε αντίθεση με τα TMDs, τα οποία έχουν μία γραμμική απόκριση, η απόκριση των TLD είναι εξαιρετικά μη γραμμική που οφείλεται στην κίνηση του ρευστού. Το νερό σε ένα δοχείο απορροφά την ενέργεια της δόνησης της κύριας δομής ως κινητική ενέργεια του κινόμενου υγρού, και αυτό την διαχέει μέσω της διάτμησης του νερού, την τριβή μεταξύ νερού και τοίχου, την σύγκρουση αιωρούμενων σωματιδίων και ούτω καθεξής. Η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα βασίζομενη στην αρχή της διάχυσης της ενέργειας μέσω του κινόμενου υγρού. Εάν η διαμόρφωση του υγρού, δηλαδή το βάθος του υγρού μέγεθος της δεξαμενής του TLD, έχει σχεδιαστεί κατάλληλα, μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικά ακόμη και με μία μικρή μάζα

υγρού. Οι μεγάλης κλίμακας δομές όπως τα ψηλά κτίρια, οι πύργοι και οι γέφυρες είναι συνήθως εύκαμπτες και έχουν σχετικά χαμηλή φυσική συχνότητα, έτσι ένα TLD έχει συνήθως ρηχό υγρό για να συντονίσει την συχνότητα του κινόμενου υγρού με την συχνότητα της κατασκευής. Η απόσβεση του κινόμενου υγρού είναι μία σημαντική παράμετρος για τη μελέτη ενός TLD καθώς επηρεάζει την αποτελεσματικότητα του TLD.

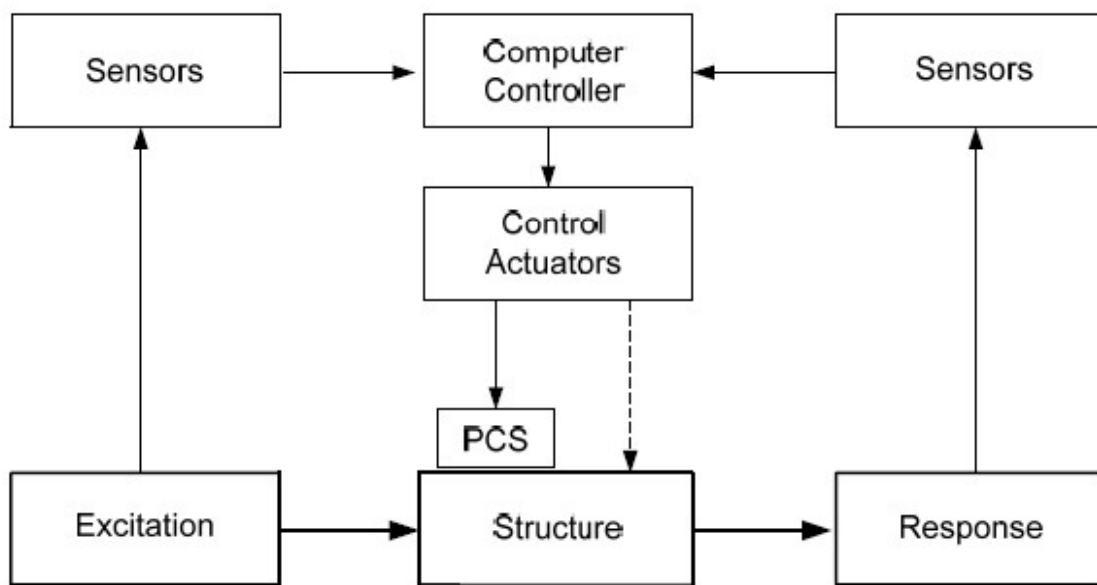
Οι εν λόγω συσκευές εφαρμόστηκαν κυρίως στην Ιαπωνία για τον έλεγχο των δονήσεων που προκαλούνται από τον άνεμο σε πύργους αεροδρομίων και ψηλών κτηρίων. Αν και τα TLDs είναι αποτελεσματικότερα στη μείωση των αποκρίσεων παραγόμενων από τον άνεμο έως και 70% (Wakahara (1992)), τα TLDs βρέθηκαν να είναι λιγότερο αποτελεσματικά από τα TMDs.



Σχήμα α: Εικόνες κτιρίων με συντονισμένη υγρή διάταξη απόσβεσης (Tuned Liquid Damper-TLD)[3],[21]

3.6 Hybrid Control Systems - Υβριδικά συστήματα ελέγχου

Ενεργητικά και παθητικά συστήματα ελέγχου μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν υβριδικά συστήματα ελέγχου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα α. Επειδή ένα μέρος του ελέγχου επιτυγχάνεται με το παθητικό σύστημα, συνεπάγεται να χρειάζεται λιγότερο ενεργή προσπάθεια ελέγχου με αποτέλεσμα λιγότεροι πόροι ενέργειας να είναι απαραίτητοι. Με το να λειτουργούν δύο συστήματα μαζί ενισχύει την ευρωστία του συστήματος και η παθητική λειτουργία μειώνει τις απαιτήσεις ενέργειας του ενεργού συστήματος. Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για την εφαρμογή των υβριδικών συστημάτων: το υβριδικό σύστημα μάζας αποσβεστήρα (HMD) και το υβριδικό σύστημα σεισμικής απομόνωσης. Τα HMD συστήματα έχουν πρόσφατα εισήχθη για να εκμεταλλευτούν τα οφέλη τόσο του συμβατικού συστήματος TMD όσο και του συστήματος AMD. Το HMD είναι προγραμματισμένο να λειτουργεί είτε ως ένα συμβατικό TMD σύστημα ή ως ένα σύστημα AMD ανάλογα με τις συνθήκες ανέμου, το προκύπτον κτίριο και τα χαρακτηριστικά κραδασμών. Αυτό περιορίζει τη λειτουργία της ενεργής λειτουργίας του ελέγχου μόνο όταν χρειάζεται να επιτευχθεί η βέλτιστη αύξηση της απόσβεσης και μια μεγάλη μείωση της απόκρισης που προκαλείται από τον άνεμο. Σε άλλες περιπτώσεις, όταν μέτρια αύξηση της απόσβεσης και μείωση στην άνεμο-διεγερόμενη απόκριση είναι επαρκής, το σύστημα λειτουργεί σαν μια παθητική λειτουργία.



Σχήμα α: Σχηματικό διάγραμμα του Υβριδικού Συστήματος Ελέγχου[3]

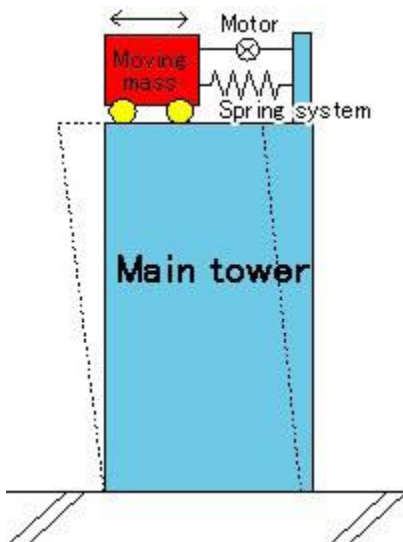
Ενώ το αρχικό κόστος κεφαλαίου παραμένει υψηλό, λόγω του επιπλέον κόστους της ενεργής ικανότητας, υπάρχει μια σημαντική εξοικονόμηση στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Ένα υβριδικό σύστημα αποσβεστήρα μάζας συνδυάζει ένα συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας με ενεργό ενεργοποιητή για την ενίσχυση της ευρωστίας και την μείωση των διαρθρωτικών δονήσεων κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Συνήθως, η ενέργεια που απαιτείται από ένα σύστημα HMD είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που απαιτείται από ένα AMD με συγκρίσιμη απόδοση.

Στην πραγματικότητα, τα HMDs είναι η πιο κοινή εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα των συσκευών ελέγχου σε αστικές δομές και βασίζονται κυρίως στην φυσική κίνηση του TMD. Η

δύναμη του ενεργοποιητή χρησιμοποιείται μόνο για να αυξήσει την αποτελεσματικότητα και την ευρωστία σε μεταβολές στα δομικά δυναμικά χαρακτηριστικά. Δομές με τέτοια στρατηγική ελέγχου είναι, μεταξύ άλλων, το Διεθνές Αεροδρόμιο Kansai στην Οσάκα, Ιαπωνία, η Mitsubishi Heavy Industry στη Γιοκοχάμα της Ιαπωνίας, και το RIHGA Royal Hotel στη Hiroshima, Ιαπωνία (Spencer Jr. and Soong (1999)).



Σχήμα β: Hybrid Mass Damper System για τον πύργο Bridge Main Towers1 [16]



Σχήμα γ: Hybrid Mass Damper System για τον πύργο Bridge Main Towers 2 [16]

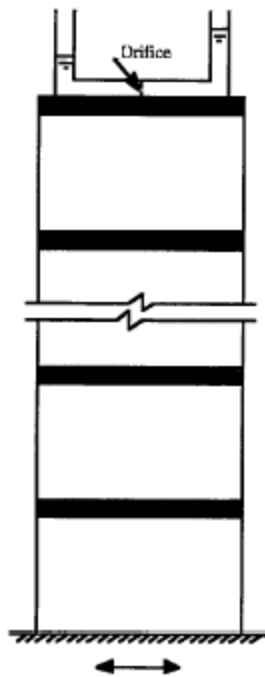
3.7 Συντονισμένη υγρή διάταξη απόσβεσης στηλών (Tuned Liquid Column Damper-TLCD).

Ένα Tuned Liquid Column Damper (TLCD) είναι ένας ειδικός τύπος του TLD το οποίο βασίζεται στην αδράνεια μιας στήλης υγρού σε ένα σωλήνα σχήματος U για να εξουδετερώσει τις δυνάμεις που ενεργούν στη δομή. Ένα παθητικό TLCD είναι μια μάζα από υγρό (συνήθως νερό) που τοποθετείται σε μια προσαρμοσμένη δεξαμενή σχήματος U, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να μειώσει τις κινήσεις του κτιρίου με την εφαρμογή αδράνειας και απόσβεσης δυνάμεων αντίθετα προς την κατεύθυνση των κινήσεων του κτιρίου. Η σχήματος U δεξαμενή έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει στο υγρό να ταλαντεύεται ελεύθερα σε μια συχνότητα που ταιριάζει άριστα με μία ή περισσότερες από τις φυσικές συχνότητες της δομής. Γενικώς, ένα μονό TLCD είναι ικανό να παρέχει απόσβεση κατά μήκος ενός ενιαίου άξονα του κτιρίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η απόσταση που το υγρό είναι σε θέση να μετακινηθεί.

Η απόσβεση στο TLCD εισάγεται ως αποτέλεσμα της απώλειας ύψους που βιώνεται από την στήλη του υγρού που κινείται μέσω ενός στομίου. Βασίζεται στη κίνηση των υγρών του υγρού στήλης σε ένα σωλήνα σχήματος U για την αντιμετώπιση των δυνάμεων που δρουν για τη δομή, με την απόσβεση να εισάγεται στο ταλαντούμενο υγρό στήλης μέσω ενός στομίου. Η αποτελεσματική απόσβεση στο TLCD επιτυγχάνεται με την αλλαγή του ανοίγματος στομίου της βαλβίδας. Στην πλήρως κλειστή θέση δεν λαμβάνουν χώρα οι ταλαντώσεις του υγρού και το σύστημα γίνεται ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF). (Gao et al. (1999), Adeli (2004), Adeli and Kim (2006)).

Η δυνατότητα των υγρών διατάξεων απόσβεσης στην παθητική κατάσταση τους δεν πραγματοποιείται πλήρως λόγω εξάρτησης της απόσβεσής στα εύρη κινήσεων (ή το επίπεδο διέγερσης), και αδυναμία τους να ανταποκριθούν γρήγορα σε αιφνίδια εφαρμοζόμενα φορτία, όπως σεισμούς και ριπή ανέμου. Έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλότερες εντάσεις διέγερσης, υψηλότερες απόσβεσεις επιτυγχάνονταν κατασκευάζοντας τη ροή του υγρού διαμέσου του στομίου και σε υψηλότερα πλάτη διέγερσης άνοιγοντας το στομίο και η υψηλότερη ταχύτητα του υγρού συμβάλει στο κατάλληλο επίπεδο της απόσβεσης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των TLD / TLCDs είναι το χαμηλό αρχικό κόστος και το χαμηλό κόστος συντήρησης. Επίσης το γεγονός ότι τα περισσότερα ψηλά κτίρια χρειάζονται δεξαμενές νερού, για πολλούς σκοπούς όπως για την ύδρευση του κτιρίου, για χρήση των κατοίκων, για πυροσβεστικούς σκοπούς, έτσι καθιστά τα TLCD μια βιώσιμη και ελκυστική επιλογή έναντι των άλλων μηχανικών συσκευών ελέγχου.

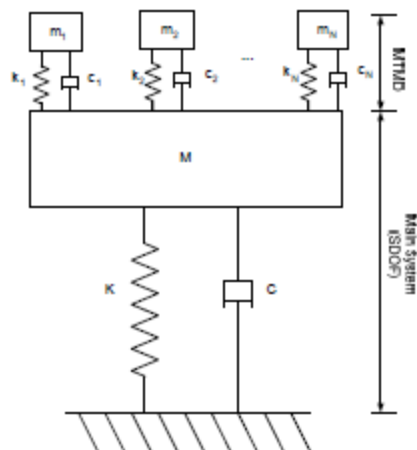


Σχήμα α:Εικόνα με ένα κτήριο που χρησιμοποιεί Συντονισμένη υγρή διάταξη απόσβεσης στηλών (Tuned Liquid Column Damper-TLCD).[3]

3.8 Multiple Tuned Mass Damper (MTMD)

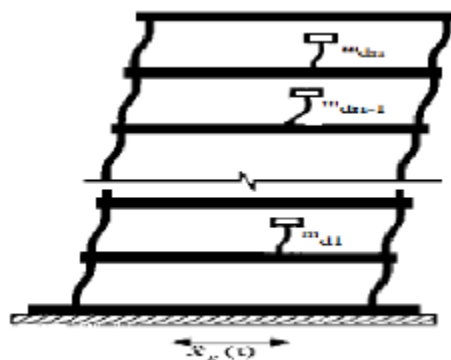
Οι ερευνητές (Igusa και Xu (1991)) απέδειξαν ότι μια σειρά από ελαφρούς ταλαντωτές αποσβεστήρες, των οποίων οι συχνότητες κατανέμονται σε ένα μικρό εύρος γύρω από τη φυσική συχνότητα του μονοβάθμιου συστήματος, μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικοί ή και πιο ισχυροί από ό, τι ένα ενιαίο TMD σύστημα με την ίδια συνολική μάζα, όταν το σύστημα διεγείρεται από μια ευρείας ζώνης τυχαία διαταραχή. Διαπιστώθηκε ότι οι πολλαπλοί ταλαντωτές είναι ισοδύναμοι με ένα TMD.

Τα MTMDs αποτελούνται από N TMDs και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ενός συγκεκριμένου τρόπου δόνησης μιας ενιαίας κατασκευής. Το αναλυτικό μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα α στο οποίο το κύριο σύστημα μοντελοποιείται ως ένα μονοβάθμιο σύστημα και είναι ρυθμισμένο να έχει διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά. Ειδικά οι φυσικές συχνότητες των MTMDs πρόκειται να διανεμηθούν γύρω από τη φυσική συχνότητα της ταλάντωσης της δομής που πρόκειται να κατασταλεί.



Σχήμα α: Αναλυτικό μοντέλο του κύριου συστήματος με MTMD[3]

Στις ταλανώσεις που δημιουργούνται λόγω ενός σεισμού, αρκετοί ερευνητές (Chowdhury και Inwuchukwu (1987), Clark (1988), Xu και Igusa (1994)) έχουν δείξει ότι ένα μονό TMD δεν είναι τόσο αποτελεσματικό στην μείωση σεισμικών αντιδράσεων. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό. Κατ' αρχάς, οι σεισμικές φορτίσεις κατά κανόνα είναι παρορμητικές και φτάνουν τις μέγιστες τιμές γρήγορα. Ένα TMD, που υποβάλλεται σε ένα δυναμικό φορτίο που φιλτράρεται από την δομή του κτιρίου, συνήθως δεν υποβάλλεται σε σημαντική κίνηση σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα. Ως αποτέλεσμα, η απορρόφηση ενέργειας δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη όταν την χρειάζεται περισσότερο. Όσο βαρύτερο είναι το TMD, τόσο πιο αργά φτάνει στο πλήρες δυναμικό του. Επιπλέον, οι εδαφικές κινήσεις του σεισμού περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων που συχνά προκαλούν σημαντικές δονήσεις στα θεμέλια ενός ψηλού κτιρίου.



Σχήμα β: Πολλαπλά TMD- MTMD[3]

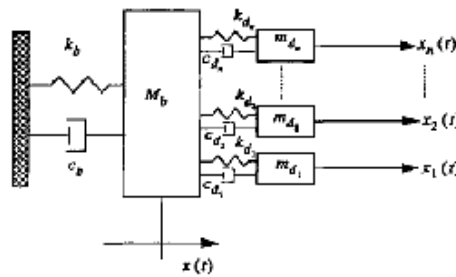


FIG. 1. Building-MMD System

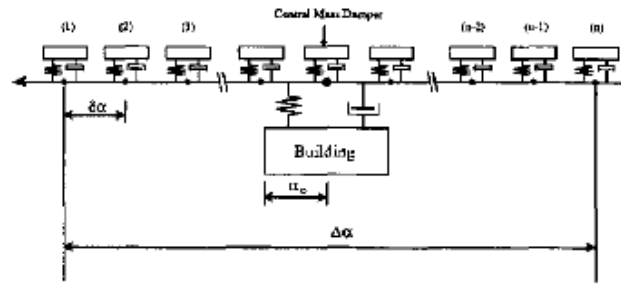
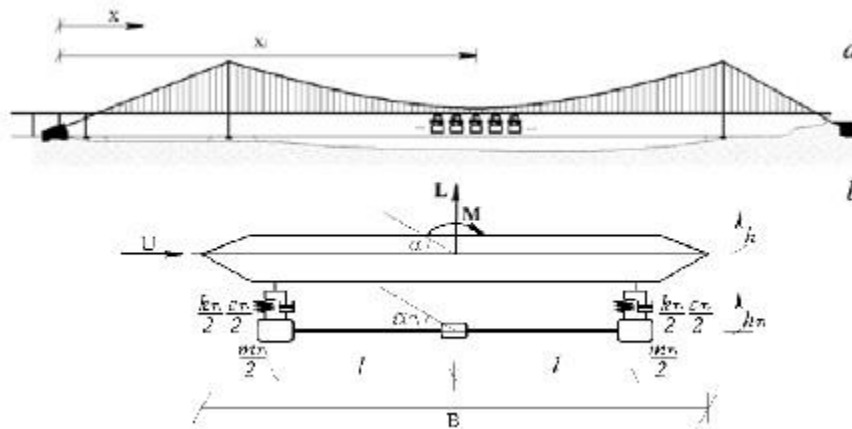


FIG. 2. Frequency Distribution of MMDs

JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING :

Σχήμα γ: Σύστημα MTMD για κτίρια και διανομή συχνοτήτων των MTMDs (Journal of structural Engineering)



Σχήμα δ: Σχηματική διάταξη γέφυρας που χρησιμοποιεί σύστημα M-TMD [3]

3.9 Πρακτικές παρατηρήσεις για τα TMD

Υπάρχει ένας αριθμός από παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του συστήματος ελέγχου δονήσεων για ψηλά κτίρια και κατασκευές, και συγκεκριμένα:

- Απόδοση
- Μέγεθος και πυκνότητα
- Κόστος κεφαλαίου
- Κόστος λειτουργίας
- Συντήρηση και Ασφάλεια

Κατά το μηχανολογικό σχεδιασμό ενός TMD, το ποσό της δυναμικής μείωσης της απόκρισης που μπορεί να επιτευχθεί υπαγορεύεται από αρκετούς παραμέτρους. Πρώτο και κύριο είναι η ποσότητα της επιπλέον μάζας, συνήθως όχι περισσότερο από περίπου 2% της τυπικής μάζα του βασικού συστήματος, το οποίο μπορεί πρακτικά να τοποθετηθεί στην κορυφή ενός κτιρίου (Παπαδημητρίου (2006)). Είναι συνηθισμένο η μάζα του αποσβεστήρα να ζυγίζει μέχρι 400t. Η μάζα του αποσβεστήρα συνήθως αποτελείται από χάλυβα ή από σκυρόδεμα και το TMD πρέπει να είναι τοποθετημένο σε ένα ειδικό χώρο που πρέπει να σχεδιαστεί για να φιλοξενήσει

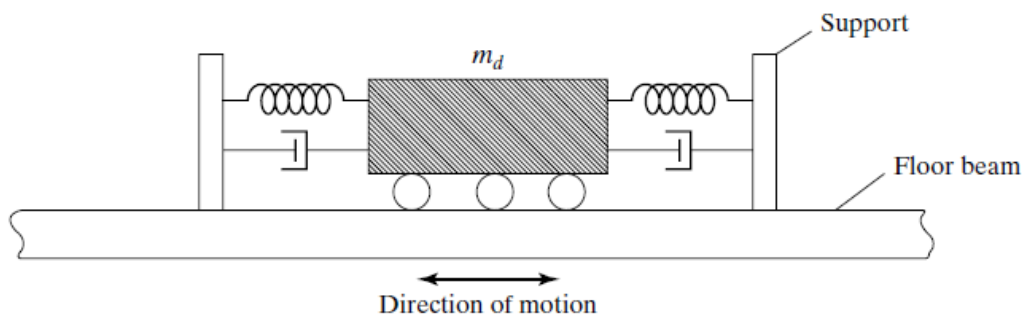
το επιπλέον βάρος. Δεξαμενές αποθήκευσης νερού, οι οποίες είναι απαραίτητες για τις υπηρεσίες κτηρίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και συγχρόνως ως συντονισμένοι αποσβεστήρες νερού (TLD) .

Ένα άλλο σημαντικό τεχνικό πρόβλημα είναι η αναγκαιότητα να καταστεί δυνατή η κίνηση της μάζας του TMD σε σχέση με το κτίριο, ακόμη και σε μικρές κινήσεις κτιρίου με χαμηλά επίπεδα διέγερσης, ώστε να επιτρέψει το συντονισμό. Η απλούστερη διάταξη που αναστελεί τις κινήσεις της μάζας είναι ένας αποσβεστήρας με τη μορφή εκκρεμούς, όπου η συχνότητα ταλάντωσης του είναι απλά μία συνάρτηση του μήκους της ανάρτησης. Για κτίρια με χαμηλή φυσική συχνότητα, το μήκος της ανάρτησης του εκκρεμούς μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, οπότε επιπλέον ελεύθερο ύψος απαιτείται για το TMD να κρεμαστεί. Τα ανεστραμμένα εκκρεμή χρησιμοποιούνται για να παρέχουν σταθερότητα και ακαμψία. Οι φυσικές συχνότητες ενός κτιρίου είναι ευαίσθητες σε αλλαγές και συχνά είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια στο σχεδιασμό. Η απαιτούμενη συχνότητα συντονισμού συνήθως καθορίζεται από την πλήρη κλίμακα μέτρησης και η διαδικασία αυτή γίνεται αφού το κτίριο έχει ολοκληρωθεί.

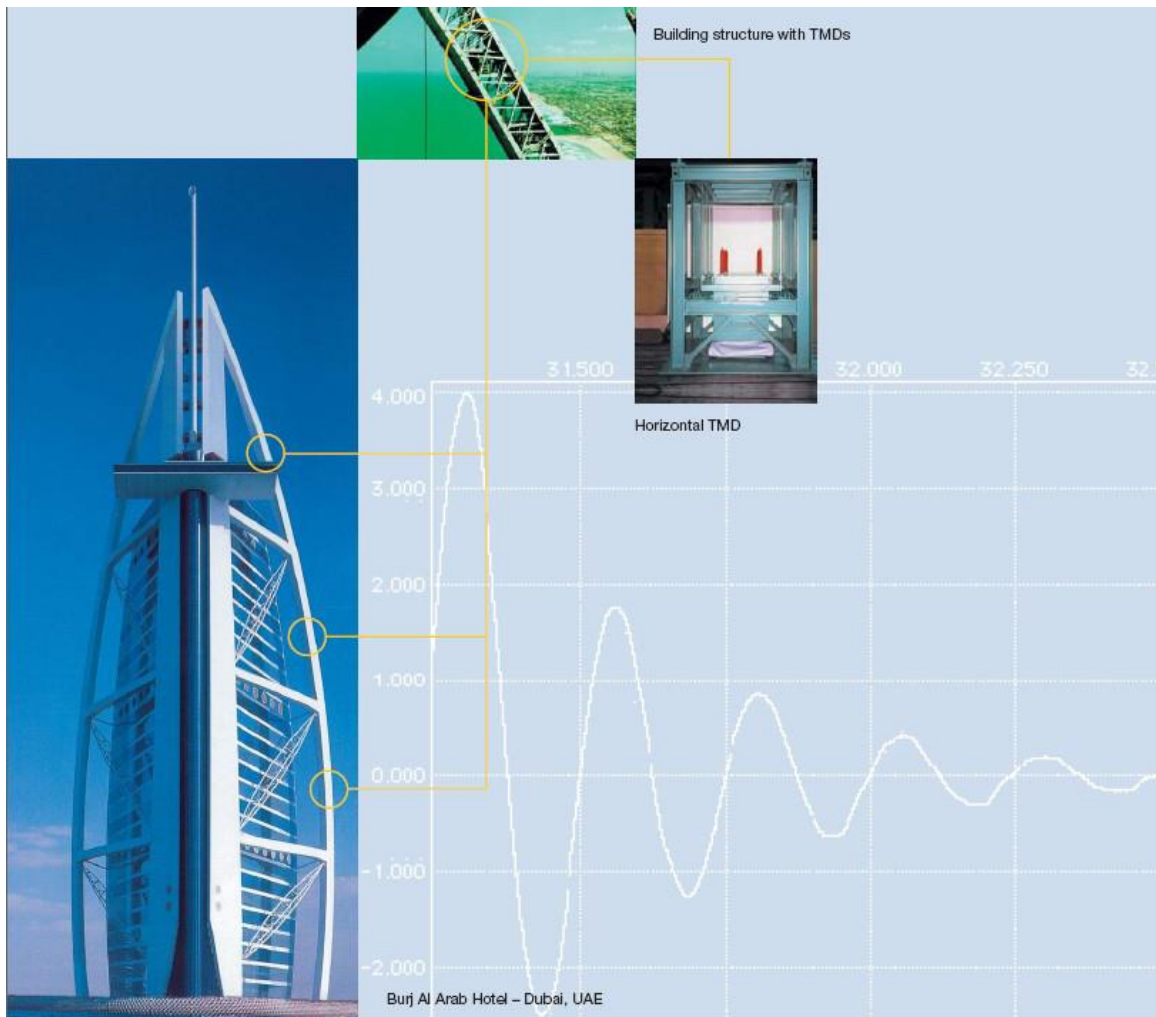
Τα σύγχρονα τύπου εκκρεμούς TMD ως επί το πλείστον έχουν σχεδιαστεί για να είναι ρυθμιζόμενα στο χώρο. Το μήκος εναιωρήματος ρυθμίζεται σύροντάς τους σφιγκτήρες για να επιτρέψει το λεπτομερή συντονισμό στην επιθυμητή συχνότητα βραχυχρόνιων διακυμάνσεων. Τα εκκρεμούς τύπου TMDS περιστασιακά εμπλουτίζονται με ελατήρια για λεπτομερή ρύθμιση. Μηχανικά καθοδηγούμενοι πίνακες διαφανειών, υδροστατικά έδρανα και έδρανα με απανωτές στρώσεις από καουτσούκ έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για να παρέχουν μια χαμηλή πλατφόρμα τριβής ώστε η μάζα αποσβεστήρα να ανταποκρίνεται στην κίνηση του κτιρίου. Ελατήρια ή μεταβλητής ακαμψίας ελατήρια παρέχουν ακαμψία για το συντονισμό των TMDS. Για τα TMDS που είναι εξοπλισμένα με ρουλεμαν απο καουτσούκ, τα έδρανα ενεργούν σαν οριζόντια ελατήρια. Αυτοί οι τύποι των TMDS είναι γενικά πιο συμπαγείς, χωρίς ειδικές απαιτήσεις για ένα μεγάλο περιθώριο, σε σύγκριση με ένα συμβατικό TMD εκκρεμούς τύπου, αλλά είναι πιο πολύπλοκες συσκευές και επομένως πιο ακριβές.

3.10 TMDs μεταφορικής κίνησης

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την τυπική διαμόρφωση μιας μονοκατευθυντικής διάταξης ενός μεταφορικού συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας. Η μάζα στηρίζεται στα ρουλεμάν που λειτουργούν ως κύλινδροι και επιτρέπουν στη μάζα να μεταφέρετε πλευρικά σχετικά με το πάτωμα. Τα ελατήρια και οι διατάξεις απόσβεσης παρεμβάλλονται μεταξύ της μάζας και των παρακείμενων κάθετων μελών υποστήριξης, τα οποία μεταδίδουν την πλευρική "εκτός φάσεως" δύναμη στο επίπεδο του δαπέδου και εν συνεχεία εντός του σκελετού. Οι διπλής κατεύθυνσης μεταφορικοί αποσβεστήρες έχουν διαμορφωθεί με ελατήρια/αποσβεστήρες σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις και παρέχουν τη δυνατότητα για τον έλεγχο της δομικής κίνησης σε δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα.



Σχήμα α: Σχηματικό διάγραμμα ενός συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας μεταφορικής κίνησης.[2]

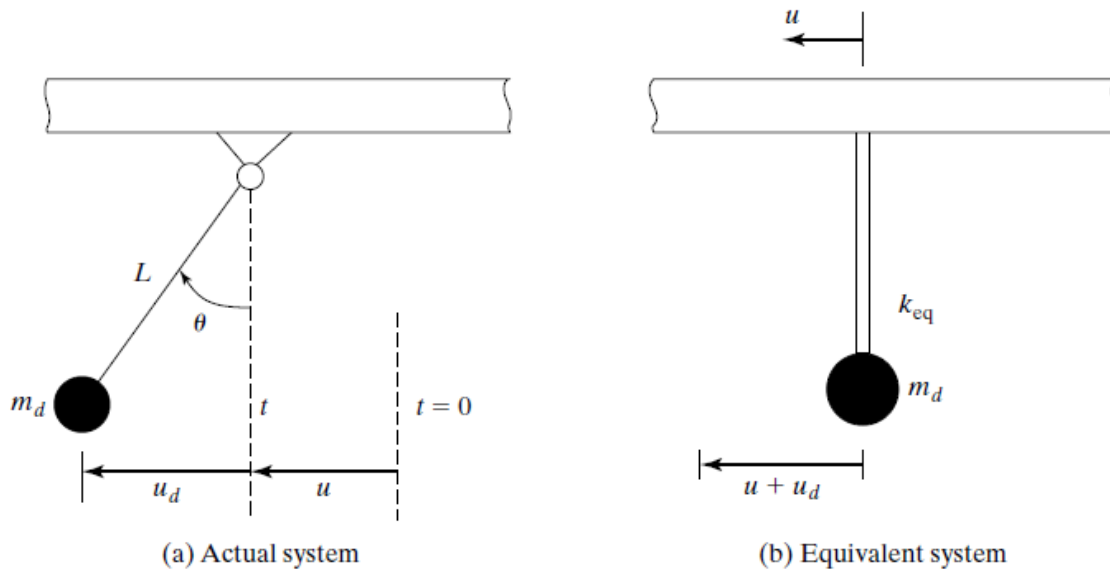


Σχήμα β:Οριζόντια TMD ,στο Burj Al Arab hotel στο Dubai[1]

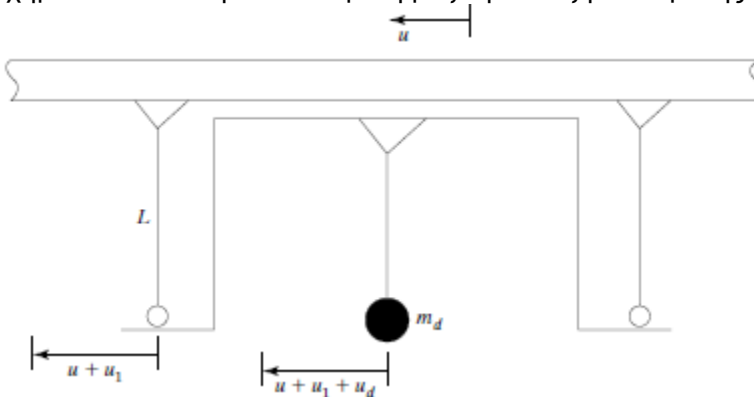
3.11 Pendulum Tuned Mass Damper

Τα προβλήματα που συνδέονται με τα έδρανα μπορούν να εξαλειφθούν με την υποστήριξη της μάζας με καλώδια τα οποία επιτρέπουν στο σύστημα να συμπεριφέρεται σαν ένα εκκρεμές. Το σχήμα α.α δείχνει ένα απλό εκκρεμές που συνδέεται στο δάπεδο. Η κίνηση του δαπέδου διεγείρει το εκκρεμές. Η σχετική κίνηση του εκκρεμούς παράγει μια οριζόντια δύναμη που αντιστασεται την κίνηση του δαπέδου και η δράση αυτή μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα που είναι στερεωμένο στο δάπεδο, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα α. Μια απλή συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης εκκρεμούς έχει ένα σοβαρό περιορισμό, δεδομένου ότι η περίοδος εξαρτάται από την απόσταση L , το απαιτούμενο μήκος για μεγάλες φυσικές περιόδους του εκκρεμούς TMD μπορεί να είναι μεγαλύτερο από ό, τι το τυπικό ύψος του ορόφου. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να εξαλειφθεί καταφεύγοντας στο σχήμα που απεικονίζεται στο Σχήμα β. Η εσωτερική άκαμπτη σύνδεση ενισχύει την υποστηρικτική κίνηση του εκκρεμούς. Ο άκαμπτος σύνδεσμος κινείται στην ίδια φάση με τον αποσβεστήρα και έχει την ίδια μετατόπιση πλάτους. Ένα παράδειγμα ενός αποσβεστήρα εκκρεμούς περιγράφεται στη συνέχεια. Μια τροποποιημένη έκδοση του αποσβεστήρα εκκρεμούς δείχνεται στο σχήμα γ.α. Η δύναμη επαναφοράς που παρέχεται από τα καλώδια

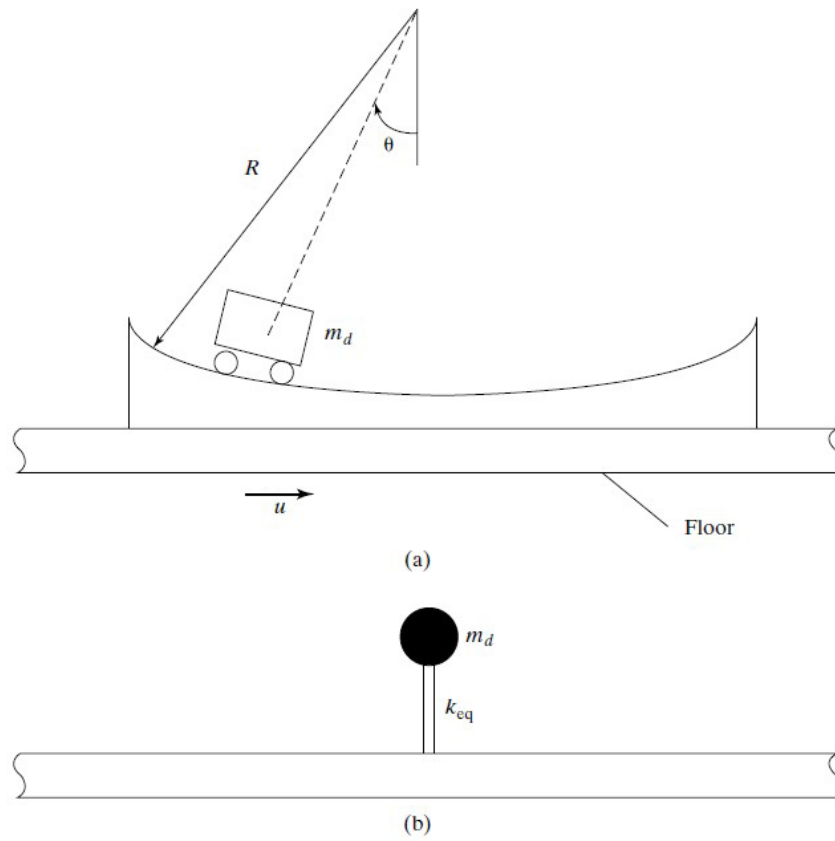
δημιουργείται με την εισαγωγή καμπυλότητας στην επιφάνεια στήριξης και επιτρέπει στη μάζα να κυλήσει επάνω στην επιφάνεια αυτή. Η κατακόρυφος κίνηση του βάρους απαιτεί μια ενεργειακή εισαγωγή.



Σχήμα α: Μια απλή συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης εκκρεμούς.[2]



Σχήμα β Σύνθετο εκκρεμές.[2]

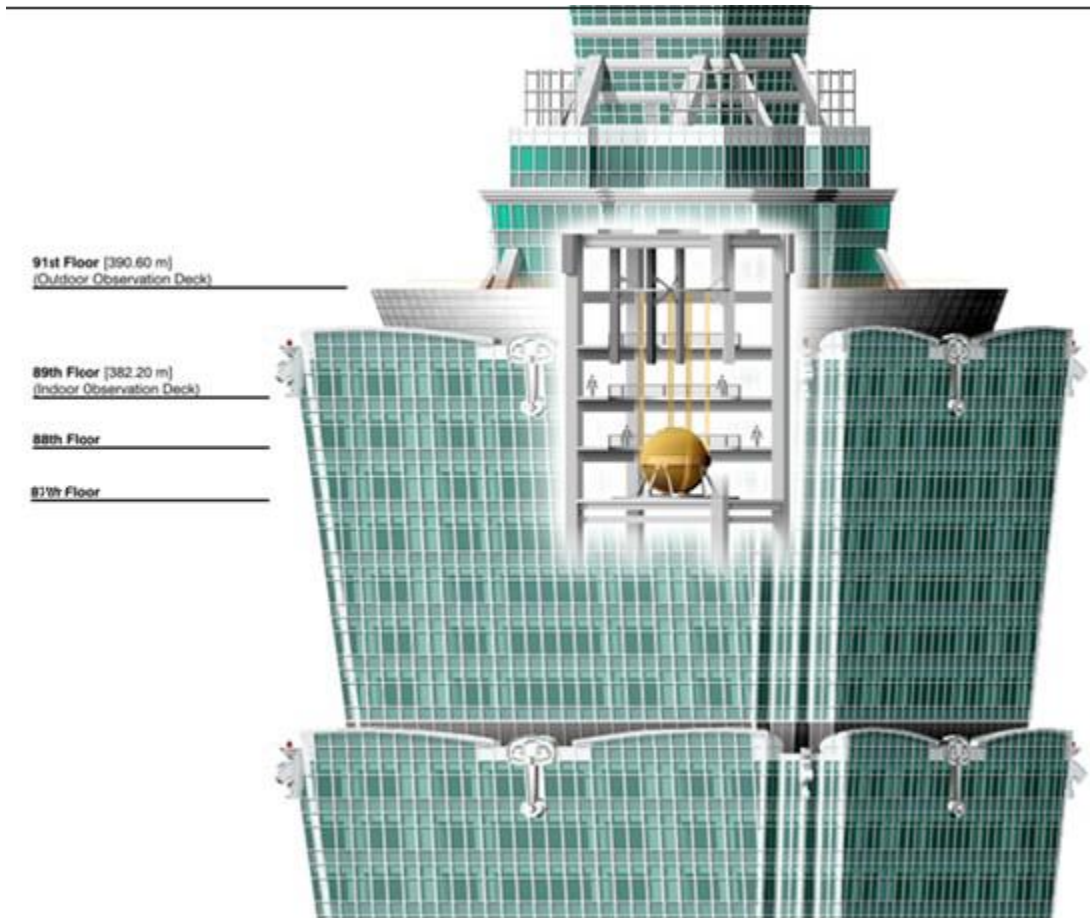


Σχήμα γ : εκκρεμές Rocker.[2]



Σχήμα δ: Στο Ταιpei Financial Center έχει χρησιμοποιηθεί ένας αποσβεστήρας

συντονισμένης μάζας σε μορφή εκκρεμούς. Ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις οι αποσβεστήρες τοποθετούνται σε θέσεις όπου δεν είναι ορατοί, στο Ταιρεί Financial Center η σφαιρικά διαμορφωμένη μάζα είναι ορατή από δύο πατώματα: στο επίπεδο παρατήρησης και στο εστιατόριο, [πηγή: διαδικτυακός τόπος: Ταιρεί 101]



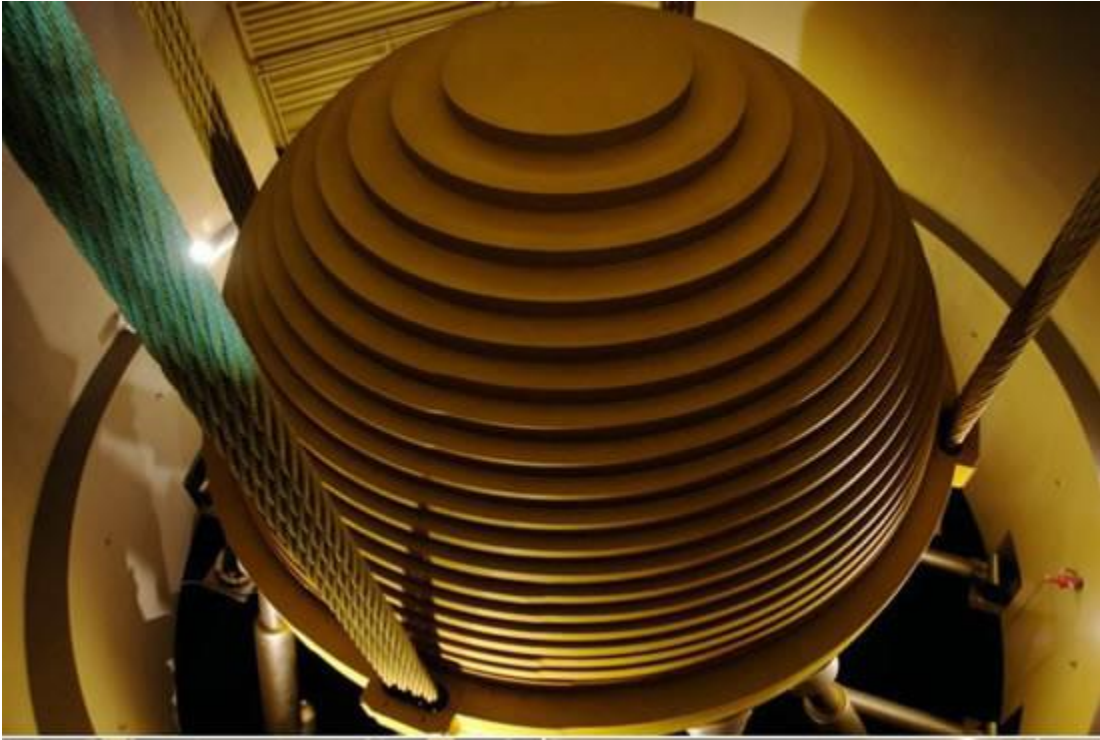
Σχήμα ε [25]



Σχήμα στ [24]



Σχήμα ζ [24]



Σχήμα η [24]



Σχήμα θ[24]

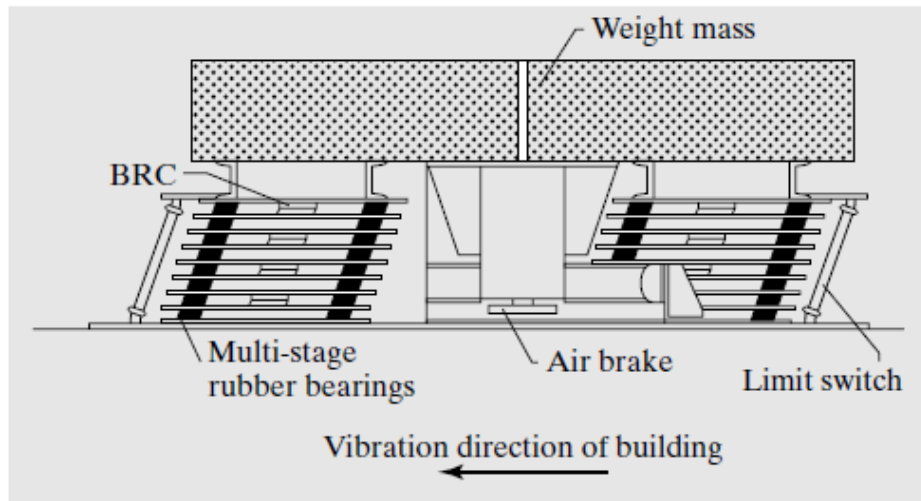
Το εκκρεμές που φαίνεται στις εικόνες(στ,ζ,η,θ) αποσβένει ταλαντώσεις σε ένα από τα ψηλότερα κτίρια του κόσμου, το Ταιρεί 101,ζυγίζει 730 τόνους και καταλαμβάνει 4 ορόφους.Το TMD αυτό γίνει αξιοθέατο για τους τουρίστες.

3.12 Viscoelastic Damper

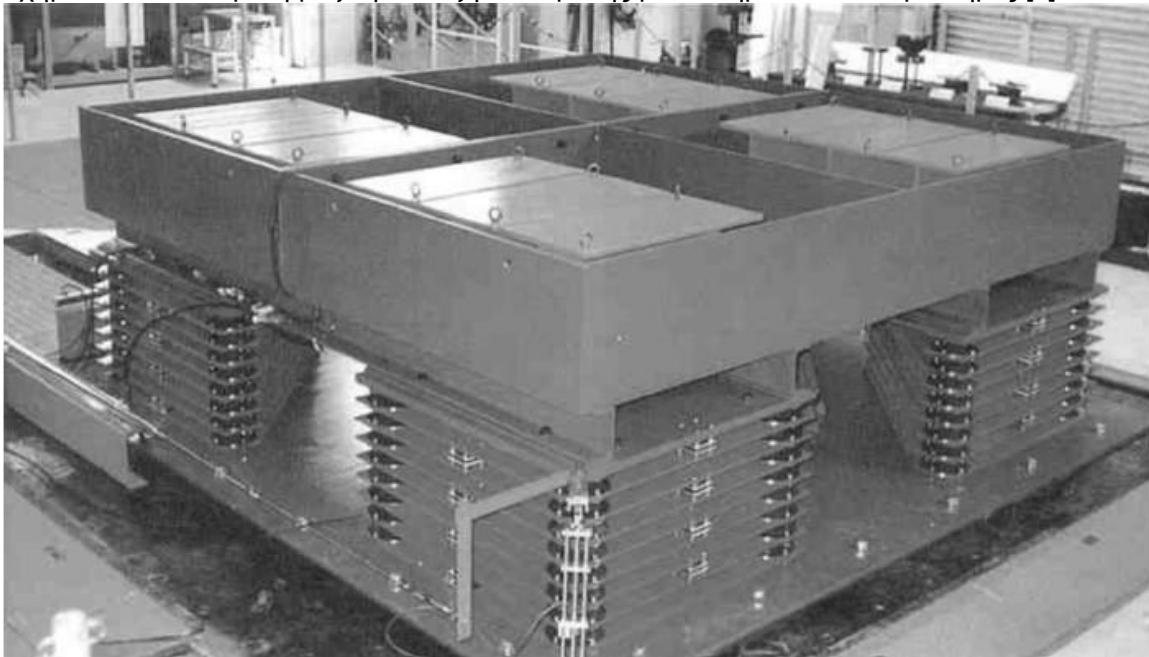
Ένας κοινός και αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί η παροδική και η συνεχής δόνηση είναι να προστεθεί ένα στρώμα ιξωδοελαστικού υλικού, όπως το καουτσούκ, σε μια υπάρχουσα δομή.Το συνδυασμένο σύστημα έχει συχνά ένα υψηλότερο επίπεδο απόσβεσης και έτσι μειώνει την ανεπιθύμητη δόνηση(Inman 1996). Η απλούστερη μορφή ενός ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα είναι μια περιορισμένη στρώση υλικού σε μία δοκό. Αυτό θα μπορούσε να γίνει από δύο μεταλλικές πλάκες συνδεδεμένες μεταξύ τους,καταφέροντας υψηλή απόσβεση.

Οι πρώτες εκδόσεις των TMDs χρησιμοποιούν πολύπλοκους μηχανισμούς για τα εδράνα και για τα διάφορα στοιχεία των απόσβεστήρων, έχοντας σχετικώς μεγάλες μάζες,με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο και να είναι αρκετά ακριβά.Οι πρόσφατες εκδόσεις, όπως στο σχέδιο που παρουσιάζεται στο σχήμα α, έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιήσουν αυτούς τους περιορισμούς.Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί μια συλλογή εδράνων από ελαστομερή, φτιαγμένα από καουτσούκ ,που λειτουργούν ως ελατήρια διάτμησης και ελαστικές ενώσεις ασφάλτου (bitumen rubber compound 'BRC').Αυτά τα εδράνα παρέχουν δυνατότητα απόσβεσης λόγω των ελαστικων στοιχείων.Η συσκευή τέτοιου τύπου είναι συμπαγής σε μέγεθος,απαιτεί απλούς ελέγχους,λειτουργεί σε πολλαπλές

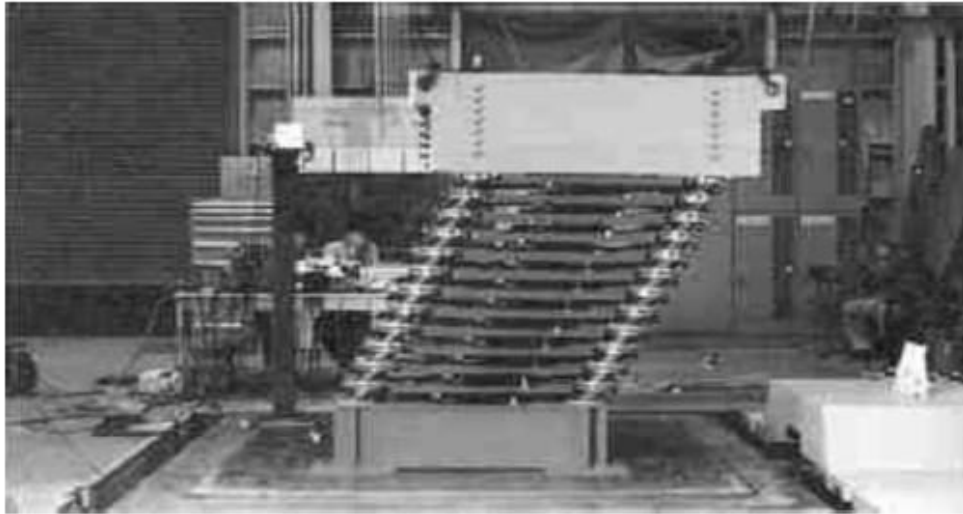
κατευθύνσεις ,συναρμολογείται και τροποποιείται εύκολα.Το σχήμα γ παρουσιάζει μια πραγματικού μεγέθους διάταξη απόσβεσης που υποβάλλεται σε δυναμική διέγερση από ένα δονούμενο τραπέζι.Μια πραγματική εγκατάσταση περιέχεται στο σχήμα β.



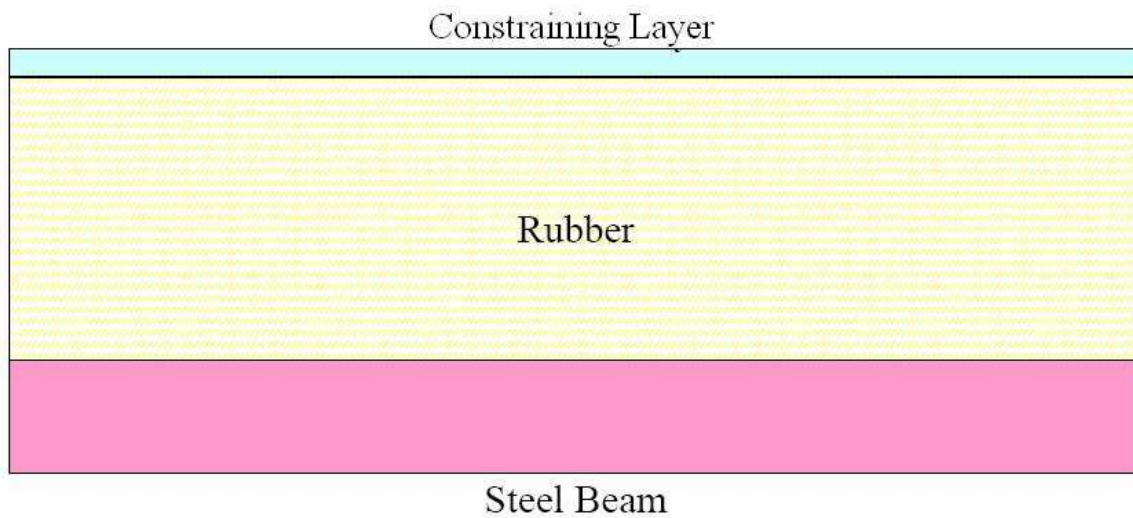
Σχήμα α: Συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης με ελατήρια και αποσβεστήρες [2]



Σχήμα β: Συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης με ελατήρια και αποσβεστήρες[2]



Σχήμα γ: Παραμορφωμένη θέση συντονισμένης μαζικής διάταξης απόσβεσης.[2]



Σχήμα δ: Σχηματική διάταξη, όπου παρατηρούμαι τη ατσάλενια δοκό το στρώμα καουτσούκ και μια στρώση που περιορίζει το καουτσούκ.[2]

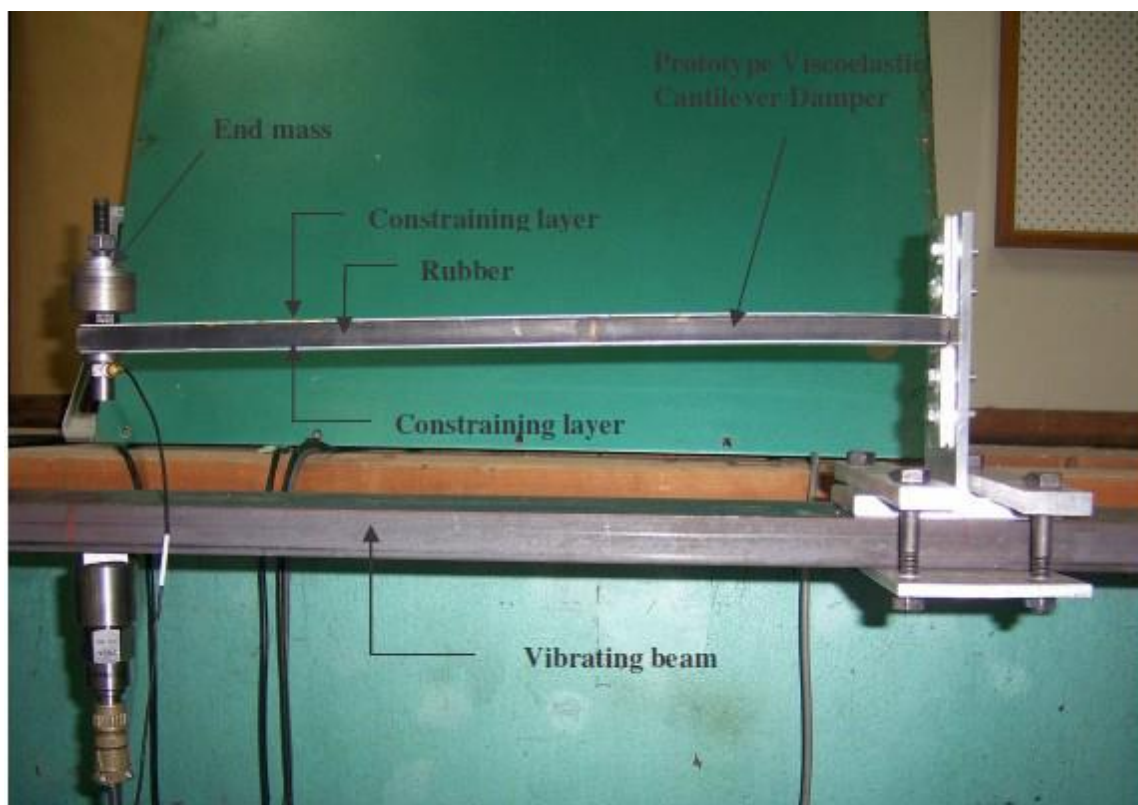


Fig. 5 Viscoelastic Damper, Attached to a Vibrating Beam

Σχήμα ε : Viscoelastic damper.Επικολημμένο σε μια δονούμενη δοκό.[2]

3.13 Προηγμένα TMDs

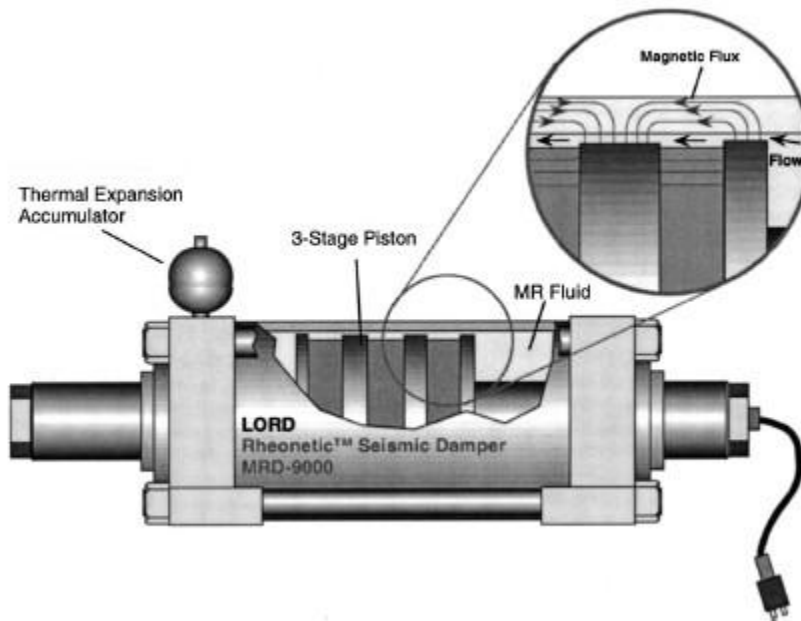
Η ικανότητα προσαρμογής μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους.Ο όρος «προσαρμοστικός» είναι περισσότερο γενικός από το «ρυθμιζόμενος», καθώς προσαρμοστικός δεν καθορίζει τι χαρακτηριστικό μεταβάλλεται ή ελέγχεται.Όλα τα TMD συστήματα που εμπλέκουν ρυθμιζόμενες παραμέτρους θεωρούνται προσαρμοστικά εν προκειμένω.Ένα σημαντικό θέμα είναι η ταχύτητα της αλλαγής των παραμέτρων.Το εύρος ζώνης ενός χαρακτηριστικού προσαρμοστικού ελέγχου είναι σημαντικά στενότερο από το εύρος ζώνης συστημάτων δόνησης. Αυτό σημαίνει ότι η αλλαγή της παραμέτρου ή των παραμέτρων είναι αργή σε σύγκριση με την περίοδο του κυρίαρχου κύκλου δόνησης.

Εάν η ρύθμιση παραμέτρου είναι σημαντικά γρήγορη, δηλαδή η αλλαγή μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές κατά τη διάρκεια ενός κυρίαρχου κύκλου δόνησης, το σύστημα λέγεται ότι είναι ημιενεργό(semiactive).Είναι χαρακτηριστικό για τα ημι-ενεργά συστήματα, ότι δεν εισάγουν επιπρόσθετη ενέργεια στο παλλόμενο σύστημα.Φυσιολογικά, η διακύμανση των παραμέτρων απαιτεί κάποια ενέργεια, αλλά η ενέργεια δεν εφαρμόζεται απ' ευθείας στο σύστημα δόνησης. Σε αντίθεση με τα ημι-ενεργά συστήματα,τα πλήρως ενεργά συστήματα εφαρμόζουν ένα σημαντικό ποσό ενέργειας στο σύστημα δόνησης.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, μια ευρεία ποικιλία προσαρμοστικών και ημι-ενεργών TMD έχουν προταθεί.Το μεγαλύτερο μέρος της προσπάθειας της έρευνας έχει κατευθυνθεί στις προσαρμοστικές δομές,αλλά και η έρευνα γύρω από τα ημι-ενεργά συστήματα είναι ενεργή.Ο πλέον δημοφιλής τρόπος για να συνειδητοποιήσουμε την προσαρμοστικότητα ενός TMD είναι να εισαχθεί η μεταβλητή δυσκαμψία.Στο πλαίσιο αυτό ,

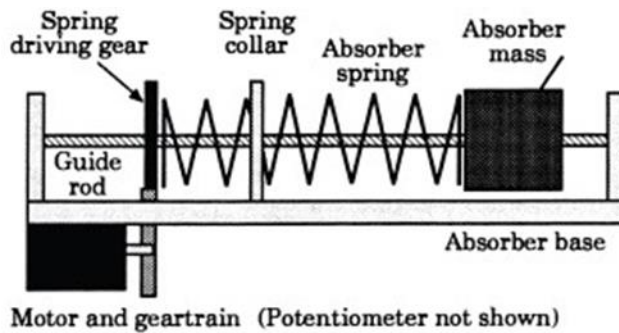
η μεταβλητή δυσκαμψία σημαίνει ότι η δυσκαμψία μπορεί να αντιμετωπίζεται ως σταθερή κατά τη διάρκεια ενός κύκλου δόνησης, αλλά και που μπορεί να μεταβάλλεται αργά στην διάρκεια του χρόνου. Υπάρχουν επίσης συστήματα που αξιοποιούν παθητικά τα στοιχεία μη γραμμικής δυσκαμψίας. Η δυναμική τέτοιων συστημάτων είναι εξαρτώμενα από το μέγεθος της διέγερσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα τέτοιου συστήματος έχει συζητηθεί από τους (Gerges & Vickery 2003). Προτείνουν ένα παθητικού τύπου εκκρεμές TMD με ένα ελατήριο συρματόσχοινο. Ωστόσο, το σύστημα είναι καθαρά παθητικό και δεν μπορεί να θεωρηθεί ως προσαρμοστικό.

Το συμβατικό, και ίσως το πιο δημοφιλές, μέσο για την παροχή μιας μεταβλητής δυσκαμψίας είναι μέσω ενός μεταβλητού μήκους δοκού. Ωστόσο, η πρόοδος στην τεχνολογία υλικών έχει καταστήσει τις συμπαγέστερες και ενσωματωμένες δομές εφικτές. Ειδικότερα, τα κράματα με μνήμη σχήματος (shape memory alloys-SMA), τα μαγνητορεολογικά υγρά (magnetorheological fluid (MR fluid)), και τα ελαστομερή φαίνεται να παρέχουν απλό και αποτελεσματικό μέσο για να πραγματοποιηθεί μεταβλητή σκληρότητα μέσω των ενεργοποιητών υλικού. Ένα μαγνητορεολογικό ρευστό (magnetorheological fluid (MR fluid)) είναι ένας τύπος έξυπνου ρευστού σε ένα ρευστό φορέα και συνήθως είναι ένα είδος ελαίου. Όταν υποβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο, το υγρό αυξάνει σημαντικά το φαινομενικό ιξώδες του, μέχρι το σημείο να γίνει στερεό ιξωδοελαστικό.



Σχημα α: Σχηματική αναπαράσταση της μεγάλης κλίμακας, αποσβεστήρα υγρού 20-t MR[18]

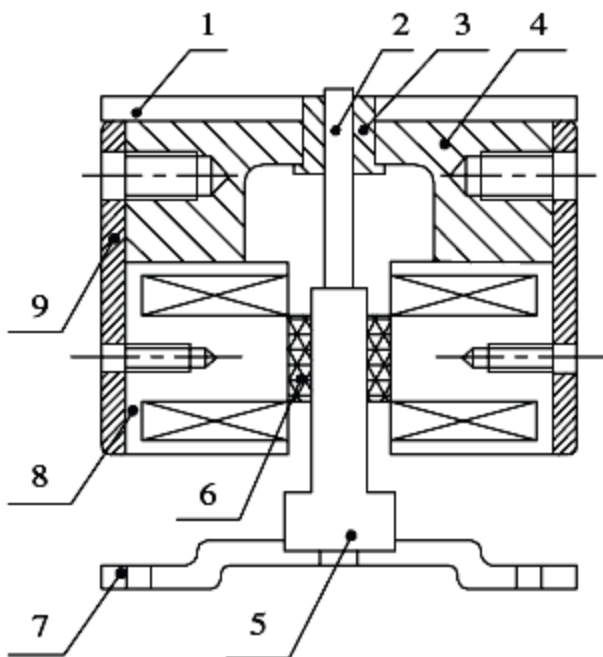
Ο Franchek (1995) χρησιμοποίησε ένα μεταβλητής δυσκαμψίας TMD χρησιμοποιώντας ένα ρυθμιζόμενο ελικοειδές ελατήριο. Η μηχανική κατασκευή απεικονίζεται σχηματικά στο Σχ.γ. Το TMD πλαίσιο αποτελείται από μία πλάκα βάσης και δύο ακραίες πλάκες. Μια ράβδος οδηγός επισυνάπτεται στις ακραίες πλάκες και χρησιμεύει ως οδηγός για την κυλινδρική μάζα. Το ελικοειδές ελατήριο προσαρμόζεται μεταξύ της κινούμενης μάζας και του πλαισίου, έτσι ώστε ο αποτελεσματικός αριθμός των σπειρών μπορεί να αλλάξει περιστρέφοντας το ελικοειδές ελατήριο. Η περιστροφή επιτυγχάνεται μέσω ενός DC-κινητήρα και ταχυτήτων. Αυτή η ρύθμιση οδήγησε σε μια σειρά συντονισμού μεταξύ 5.9 και 7.7 Hz, η οποία μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρή. Επίσης, η μηχανική δομή είναι μάλλον δύσκολη.



Σχήμα.γ. Μεταβλητής δυσκαμψίας TMD που προτάθηκε από Franchek et al. (1995).[18]

Ο Deng (2006, 2008) πρότεινε μια κατασκευή όπου τα στοιχεία ακαμψίας του TMD είναι κατασκευασμένα από ελαστομερές μαγνητοροολογικό υλικό (magnetorheological elastomer-MRE). Τα MRE υλικά ανήκουν στην ομάδα των λεγόμενων έξυπνων υλικών, τα οποία ανταποκρίνονται σε ένα εξωτερικό ερέθισμα αλλάζοντας τις ιδιοελαστικές ιδιότητες τους. Τα MREs συνήθως αποτελούνται από πολώσιμα σωματίδια σε ένα μη μαγνητικό στερεό ή gel σαν το Κάλλιο 2005. Τα σωματίδια στο εσωτερικό του ελαστομερούς μπορεί να είναι ομοιογενώς κατανομημένα ή μπορούν να ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν αλυσίδα όπως δομές με μορφή στήλης. Τόσο η σκληρότητα όσο και η απόσβεση των MREs αλλάζει όταν υποβάλλονται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η αλλαγή της σκληρότητας μπορεί μέχρι και να πενταπλασιαστεί. Ο χρόνος απόκρισης για την μεταβολή της σκληρότητας είναι στην τάξη των δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου. Τέτοιες ιδιότητες είναι πολύ χρήσιμες κατά το σχεδιασμό προσαρμοστικών TMDs. Ο χρόνος απόκρισης είναι ικανοποιητικός ακόμα και για κάποια ημι-ενεργά συστήματα (semi-active systems).

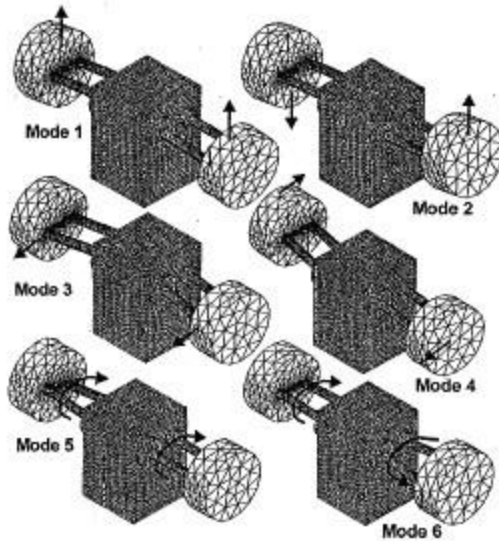
Η σχηματική εικόνα του TMD του Deng φαίνεται στο σχήμα β. Η δυναμική μάζα αποτελείται από ένα περίβλημα στήριξης, το κάλυμμα, ένα μαγνητικό αγωγό και ένα ηλεκτρομαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τα δύο πηνία των ηλεκτρομαγνητών και η αντοχή του πεδίου ρυθμίζεται από το ρεύμα του πηνίου. Καθώς ο συντελεστής διάτμησης του MRE εξαρτάται από την ένταση πεδίου, η ισοδύναμη δυσκαμψία του TMD αλλάζει με την ένταση του πεδίου. Κατά συνέπεια, η φυσική συχνότητα του TMD μπορεί να ρυθμίζεται από το ρεύμα του πηνίου. Έτσι, η φυσική συχνότητα του TMD μπορεί να αλλάξει συντονίζοντας το ρεύμα του πηνίου έτσι ώστε να εντοπίσει την εξωτερική συχνότητα διέγερσης. (Deng 2008).



Σχήμα.β: Μεταβλητής σκληρότητας TMD όπως προτείνεται από τον Deng (2007). 1. κάλυμμα 2. ράβδος οδήγησης 3. Γραμμικό έδρανο 4. μαγνητικός αγωγός 5. διατμητική πλάκα 6. MRE 7. βάση 8. ηλεκτρομαγνήτης 9. περίβλημα στήριξης.[18]

Ο Μίλερ (2003) έχει προτείνει ένα TMD με μη γραμμικά ελαστομερή. Το ελαστομερές στοιχείο συμπεριφέρεται γραμμικά υπό συμπίεση. Η μη γραμμικότητα μπορεί να αξιοποιηθεί στη φυσική διακύμανση της συχνότητας. Ο Μίλερ πρότείνει μια δομή, όπου η δυναμική μάζα είναι στερεωμένη ανάμεσα σε δύο ελαστομερές δακτυλίους. Η πραγματική δυσκαμψία των δακτυλίων μπορεί να μεταβληθεί. Το TMD αποδείχθηκε συντονίσσιμο σε ένα μάλλον ευρύ φάσμα. Το εύρος ρύθμισης επιτυγχάνεται περίπου από 40 Hz σε 210 Hz. Αυτό αντιστοιχεί σε σχεδόν τριάντα φορές αλλαγή δυσκαμψίας. Ωστόσο, ένα τέτοιο σύστημα είναι εξαιρετικά γραμμικό, το οποίο είναι προβληματικό ειδικά σε διέγερση μεγάλων μεγεθών. Ο Μίλερ δεν συζητά την αυτο-ρύθμιση καθόλου.

Οι Hill και Snyder (2002) έχουν προτείνει ένα λεγόμενο διπλής μάζας TMD με πολλαπλές λειτουργίες (multi-mode). Η μηχανική δομή της συσκευής που απεικονίζεται στο Σχήμα δ.

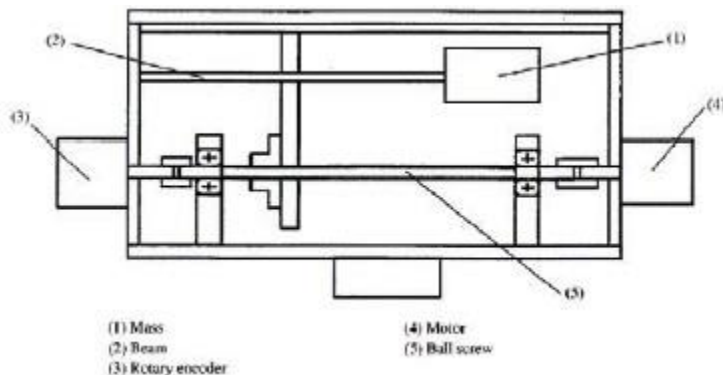


Σχήμα. δ. Δομή του multi-mode TMD με μεταβλητό μήκος δοκό, που στα άκρα του έχει δύο μάζες. (Hill & Snyder 2002).[18]

Ο διπλής μάζας αποσβεστήρας αποτελείται από δύο ράβδους στήριξης δύο ίσων μάζων. Το πραγματικό μήκος των δοκών είναι μεταβλητό, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για το συντονισμό των φυσικών συχνοτήτων της συσκευής. Ο στόχος της έρευνας ήταν να καταφέρει τον έλεγχο πολλαπλών αντηχήσεων από τον αρχικό κραδασμό την ίδια στιγμή με μία μόνο συσκευή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συσκευή λειτουργεί πραγματικά ως ένα συντονιζόμενος αποσβεστήρας κραδασμών (TMD) αλλά η διαχείριση των πολλαπλών λειτουργιών την ίδια στιγμή δεν φάνηκε ξεκάθαρα.

Οι Hill και Snyder επίσης παρουσίασαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον αυτοσυντονισμό. Η μία βασίζεται στην παγκόσμια αναζήτηση ελάχιστης δόνησης και η άλλη βασίστηκε σε έναν τύπο σταδιακής αναζήτησης. Τα αποτελέσματα όσον αφορά την αυτο-ρύθμιση της απόδοσης δεν έχουν αναφερθεί.

Ο Nagaya (1999) πρότεινε ένα μεταβλητής δυσκαμψίας TMD στο οποίο η μεταβλητή δυσκαμψία πραγματοποιείται μέσω ενός μεταβλητού μήκους πρόβολου δοκού (βλ. Σχ. ε).



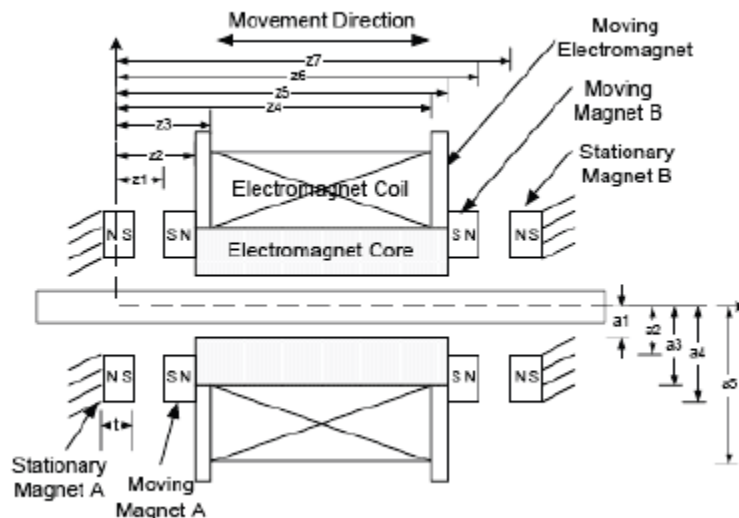
Σχήμα. ε. Γεωμετρία της μεταβλητής δυσκαμψίας TMD, μέσω ενός μεταβλητού μήκους δοκού.

(O Nagaya et al. 1999).[18]

Στο TMD, ο συντελεστής ελατηρίου στην μάζα (1) μεταβάλλεται με τη μετακίνηση του μεσαίου στηρίγματος (2). Η κίνηση ελέγχεται μέσω ενός ηλεκτρικού κινητήρα (4) και έναν ένσφαιρο κοχλία (5). Η ανατροφοδότηση μετατόπισης προέρχεται από τον περιστροφικό κωδικοποιητή (3) που συνδέεται απ' ευθείας στον κοχλία σφαιρών. Το εύρος συντονισμού της συσκευής που παρουσιάζεται είναι 13-29 Hz και η συνολική μάζα του αποσβεστήρα είναι 4,23 kg, ενώ η μάζα της συνημμένης μάζας είναι μόνον 0,6 kg.

Οι Liu Liu & (2006) πρότειναν μια κάπως διαφορετική προσέγγιση στη μεταβλητή δυσκαμψία των TMD, και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας μεταβαλλόμενα μαγνητικά ελατήρια. Η αναπτυγμένη δομή είναι μάλλον περίπλοκη, αλλά η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με το παραδοσιακό TMD. Η δυσκαμψία ενός τέτοιου μαγνητικού ελατηρίου είναι γραμμική μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος μετατόπισης. Έξω από το γραμμικό εύρος η δυσκαμψία αυξάνεται εκθετικά. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί σε μια μη γραμμική απόκριση και μετριάξει τη δυνατότητα εξασθένησης δόνησης στην μια συχνότητα. Η εργασία των Liu δείχνει ότι τα μαγνητικά ελατήρια μπορούν να εφαρμοστούν στα TMD, αλλά η μηχανική κατασκευή μπορεί να γίνει μη πρακτική. Το φάσμα συντονισμού που επιτεύχθηκε ήταν επίσης, πολύ περιορισμένη από 13,5 Hz έως 18,5 Hz. Ένα από τα οφέλη είναι ότι ένα μαγνητικό ελατήριο ρυθμίζει την ακαμψία του ακαριαία. Μια ξαφνική αλλαγή στην ακαμψία προκαλεί παροδικές δονήσεις, αλλά δεν δημιουργούν προβλήματα στις περισσότερες περιπτώσεις.

Ο Tentor (2001) επίσης πρότεινε την ηλεκτρομαγνητική TMD απόσβεση στη διατριβή του. Η μηχανική δομή του TMD είναι απλή με ένα σύρμα ηλεκτρομαγνήτη ως πηνίο και ο πυρήνας σε μορφή δυναμικής μάζας (βλέπε σχήμα. στ)

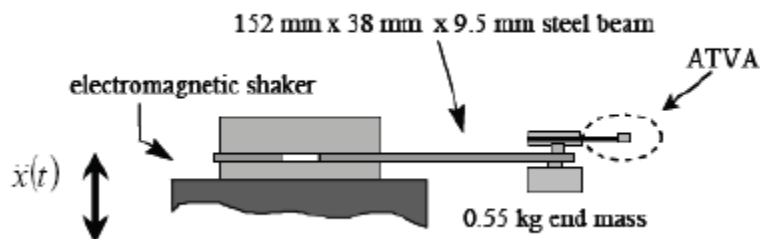


Σχήμα.στ. Σχηματική αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού TMD, με ένα κινούμενο ηλεκτρομαγνήτη που είναι τοποθετημένος μεταξύ δύο σταθερών μόνιμων μαγνητών. (Tentor 2001).[18]

Ένας κινούμενος ηλεκτρομαγνήτης είναι τοποθετημένος μεταξύ δύο σταθερών μόνιμων μαγνητών. Οι μόνιμοι μαγνήτες παρέχουν μια παθητική δύναμη επαναφοράς στο κέντρο

του απορροφητή. Το επίπεδο ισχύος μπορεί να μεταβάλλεται τροφοδοτώντας τον ηλεκτρομαγνήτη με ρεύμα ή μεταβάλλοντας τη στατική θέση του μαγνήτη. Η δύναμη του ελατηρίου επηρεάζεται από τις παραμέτρους σχεδιασμού, την τρέχουσα εισαγωγή ρεύματος και τη διακύμανση του κενού. Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι η πιο σημαντική παράμετρος είναι η απόσταση μεταξύ των στατικών και κινούμενων μαγνητών. Η φυσική διακύμανση της συχνότητας ήταν 50% πάνω από την περιοχή που εξετάστηκε. Η επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πηνίου ήταν σημαντικά μικρότερη. Ο Tentor στο έργο του δεν μελετά καθόλου τον έλεγχο του TMD σε πραγματικό χρόνο. Η προσαρμοστική συσκευή καλύπτεται σε βάθος, αλλά η συσκευή δεν είναι έτοιμη για προσαρμοστική λειτουργία χωρίς ένα σύστημα ελέγχου.

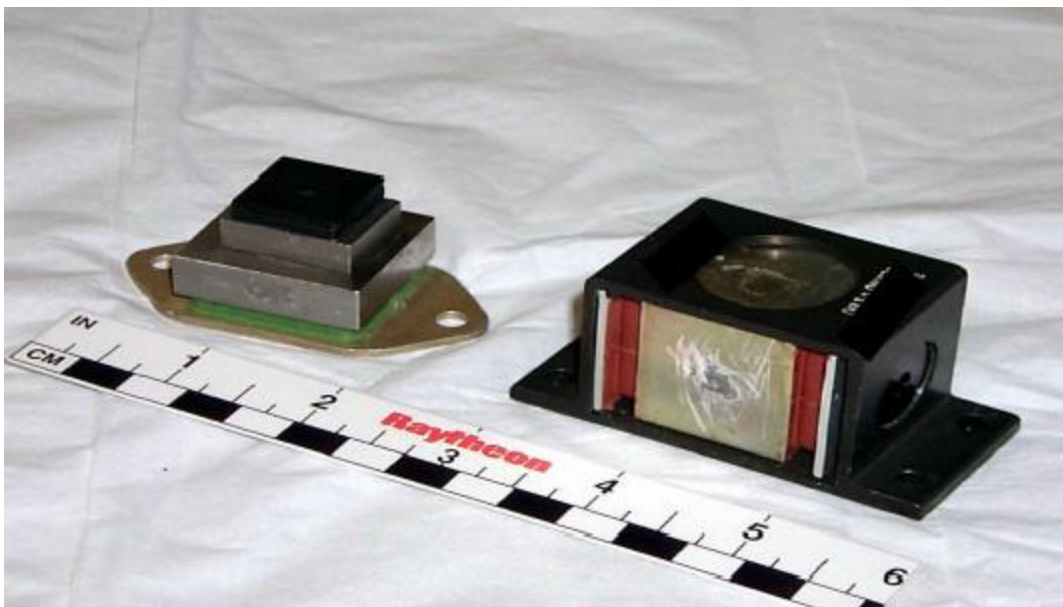
Ο Williams (2005) έχει προσαρμόσει ένα κράμα μνήμη σχήματος (shape memory alloy-SMA) σε μια προσαρμοστική TMD κατασκευή. Χρησιμοποίησε μια προεξέχουσα δοκό που έχει στο τέλος της μια μάζα (βλέπε Σχήμα.ζ.).



Σχήμα.ζ. Σχηματική αναπαράσταση ενός προσαρμοστικού TMD με το στοιχείο του SMA, μια προεξέχουσα δοκό που έχει στο τέλος της μια μάζα. (Williams 2005a). [18]

Η δοκός αποτελείται από τέσσερα SMA και δύο κυκλικούς δοκούς χάλυβα στερεωμένους σε μια μάζα στα άκρα. Η κλίμακα του πρωτοτύπου ήταν μάλλον μικρή και η δραστική μάζα του TMD ήταν μικρότερη από 200 gr. Η θέρμανση του στοιχείου SMA του ελατηρίου αλλάζει το μέτρο ελαστικότητας του SMA, το οποίο καταλήγει σε ποικίλες φυσικές συχνότητες. Ο συνεχής συντονισμός της συσκευής πραγματοποιήθηκε μέσω ρύθμισης της θερμοκρασίας των στοιχείων ελατηρίου SMA με την οδήγηση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα στοιχεία SMA. Τα στοιχεία SMA συμπεριφέρονται ηλεκτρικά όπως τις αντιστάσεις και το ρεύμα οδηγείται μέσω αυτών παράγοντας θερμική ενέργεια.

Ο Williams μελετάει μόνο τη δυναμική μοντελοποίηση του προσαρμοστικού TMD. Έχει δημοσιεύσει επίσης άλλη μια μελέτη η οποία επικεντρώνεται σε θέματα ελέγχου. Τα SMA στοιχεία είναι εγγενώς πολύ μη γραμμικά, έτσι ώστε το έργο του ελέγχου είναι μάλλον απαιτητικό. Η στρατηγική ελέγχου βασίστηκε στην ανίχνευση της γωνίας φάσης και ο στόχος ελέγχου ήταν να διατηρεί μια σταθερή φάση υστέρησης ανάμεσα στην συντονισμένη και την πρωτογενή μάζα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο έλεγχος είναι δυνατόν να το κάνει σταθερό, αλλά απαιτεί ένα μη γραμμικό ελεγκτή. Ο Rustighi. (2005a, 2005b) έχει μελετήσει επίσης τον έλεγχο ενός προσαρμοστικού TMD με SMA στοιχεία. Συνέκριναν διάφορους αλγόριθμους ελέγχου συμπεριλαμβανομένης της P- PD και του fuzzy control (ασαφής έλεγχος). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση των διαφόρων ελεγκτών είναι μάλλον παρόμοια και ακόμα και μια βιομηχανική εφαρμογή είναι εφικτή.

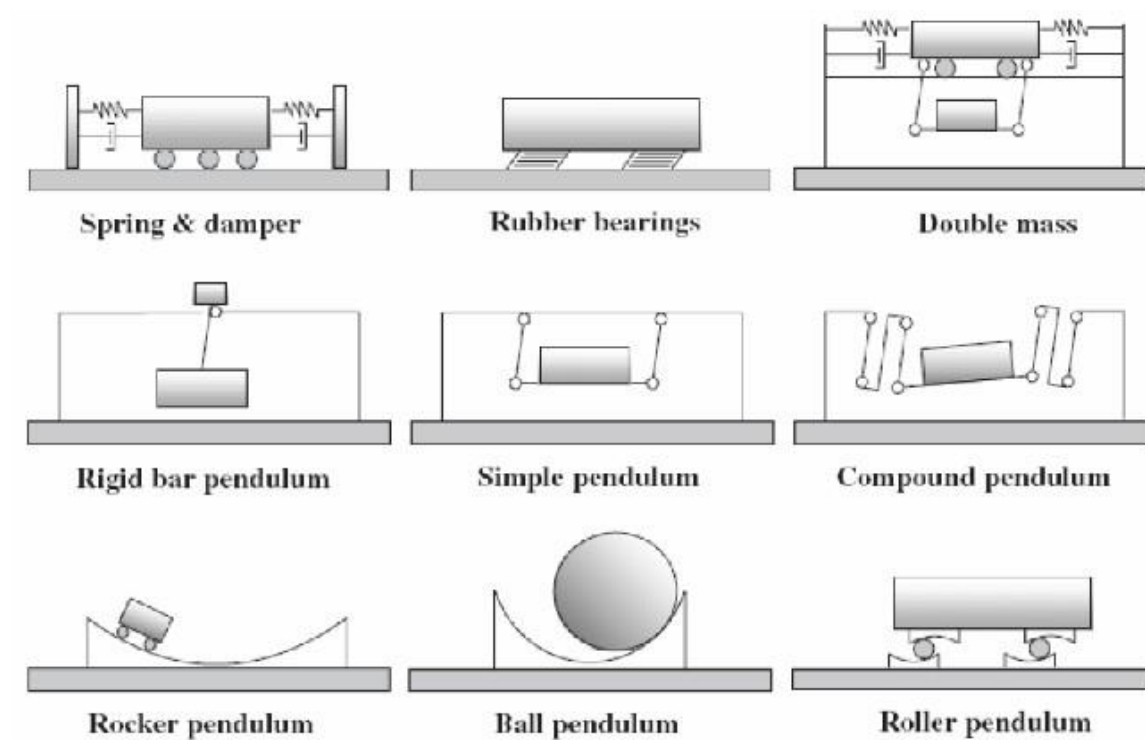


Σχήμα η: Ρυθμιζόμενης μάζας (αριστερά) και ρυθμιζόμενου ελατηρίου (δεξιά) TMD.[14]

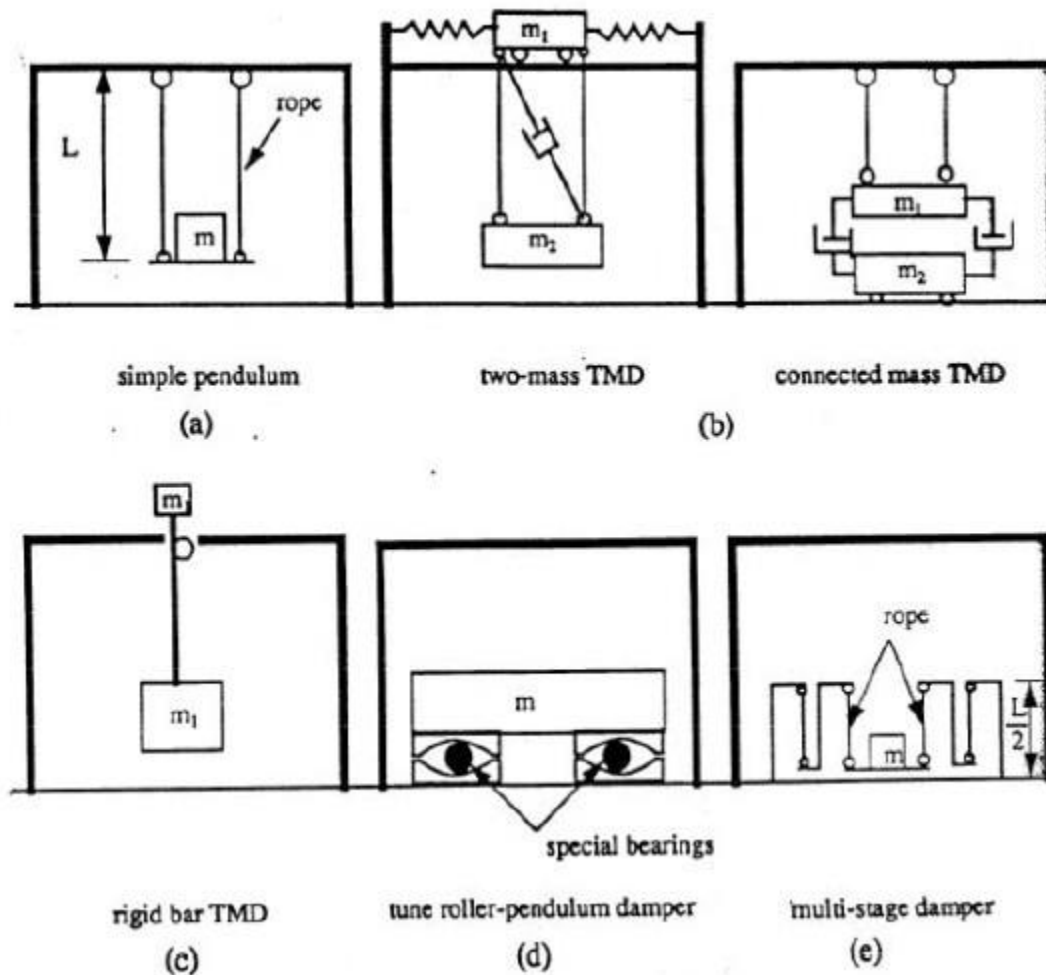


Σχήμα θ: Ρυθμιζόμενης μάζας TMD[14]

3.14 Διάφοροι τύποι και εναλλακτικές λύσεις TMD



Σχήμα α: Διάφοροι τύποι tmd για κτίρια[M



atta

and De Stefano (2009)][26]

Σχήμα β: Έναλλακτικοί τύποι εκρεμούς tmd[18]

3.15 Κριτήρια προσαρμογής του TMD για βέλτιστη απόδοση

3.15.1 Για να πετύχουμε την βέλτιστη απόδοση ενός TMD, πρέπει να προσαρμόσουμε σωστά το TMD σε σχέση με τα ακόλουθα ζητήματα:

- **Μάζα:** Η αναλογία μάζας (μ) του TMD(m_d) προς τη ισοδύναμη μάζα της κατασκευής(m_n) που κινείται πρέπει να είναι η κατάλληλη. Οι μικρές αναλογίες μάζας ($\mu < 0,025$) έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλα εύρη συχνοτήτων των δονήσεων της μάζας του TMD προς την μάζα της κατασκευής. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα χώρου για τη σωστή ενσωμάτωση του TMD μέσα στο διαθέσιμο κατασκευαστικό διάκενο. Αλλά και το TMD γίνεται συνήθως πολύ πιο ακριβό, λόγω της χρησιμοποίησης ολοένα περισσότερων και μεγαλύτερων ελατηρίων. Επιπλέον, μια μικρή αναλογία μάζας ελατώνει την αποτελεσματική περιοχή του TMD (σχ α). Οι κινήσεις της μάζας του TMD είναι σημαντικά μικρότερες για μεγαλύτερες αναλογίες

μάζας ($\mu > 0,025$) και η αποτελεσματική περιοχή για ένα 100% αποδοτικό TMD γύρω από τη συχνότητα συντονισμού είναι μεγαλύτερη, επίσης.

- Συχνότητα: Για να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός μετριασμός της δόνησης του κύριου συστήματος, η φυσική συχνότητα του TMD πρέπει να υπολογιστεί σε μια ορισμένη αναλογία με την φυσική συχνότητα του κύριου συστήματος, που αυτό σημαίνει ότι οι συχνότητες δεν πρέπει να είναι ταυτόσημες. Ο λόγος μεταξύ τους ονομάζεται απόκλιση k

$$k_{opt} = F_D / F_h$$

με

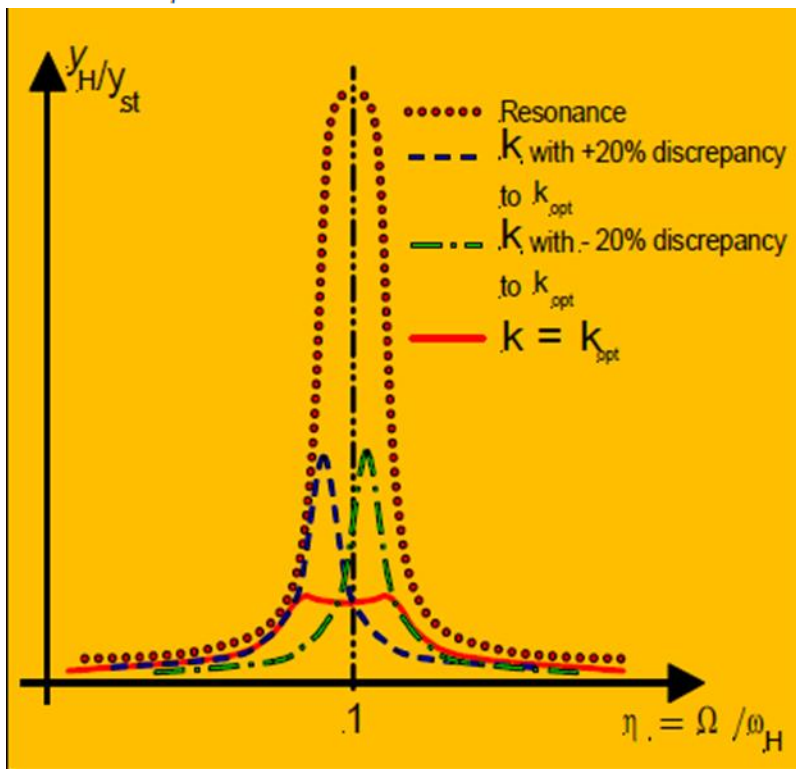
k_{opt} = βέλτιστη απόκλιση

F_D = φυσική συχνότητα του TMD

F_h = φυσική συχνότητα του κύριου συστήματος

και σύμφωνα με τον DEN Hartog είναι ικανό για αρμονική διέγερση αν η βέλτιστη απόκλιση είναι μικρότερη του 1:

$$k_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} < 1$$



- καμπύλη στην συχνότητα συντονισμού Ω
- - - - - καμπύλη όταν το k έχει απόκλιση +20% από το K_{opt}
- - - - - καμπύλη όταν το k έχει απόκλιση -20% από το K_{opt}
- καμπύλη όταν το k είναι ίσο με το K_{opt}

Σχήμα στ: Η συμπεριφορά του κύριου συστήματος σε περίπτωση που η απόκλιση k ποικίλλει (Ω =συχνότητα συντονισμού, ω_H =ιδιοσυχνότητα του κύριου συστήματος).[1]

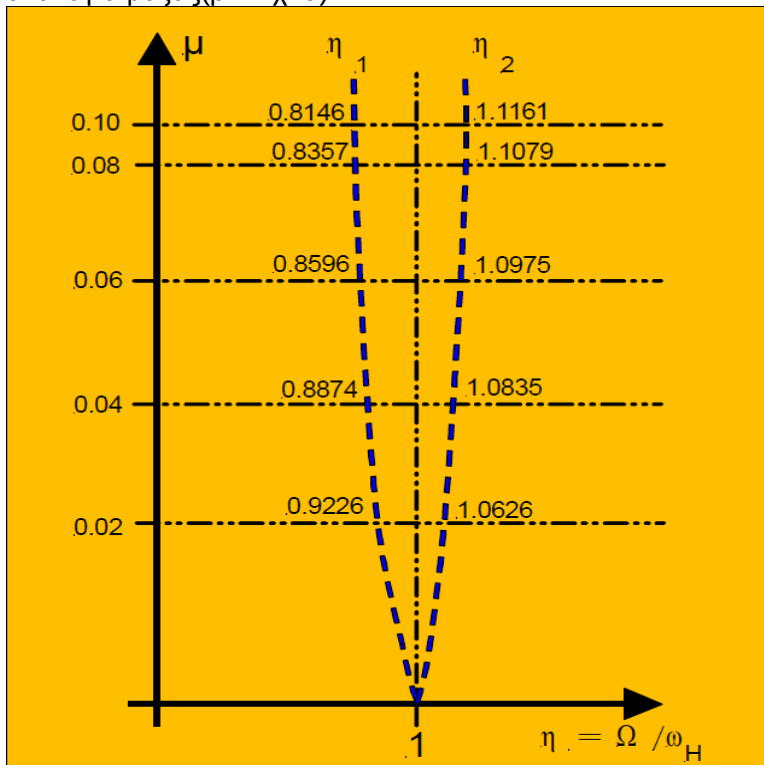
- Απόσβεση: Η βέλτιστη απόσβεση $\zeta_{D,opt}$ του TMD πρέπει να προσαρμοστεί με βάση τον επιλεγέν λόγο μάζας μ , ενώ η ακολουθούσα εξίσωση πρέπει να ισχύει:

$$\zeta_{D,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}}$$

3.15.2 Συνέπειες από λάθος επιλογή TMD ή κακή προσαρμογή του TMD.

Για πάρα πολύ μικρή αναλογία μάζας μ έχουμε:

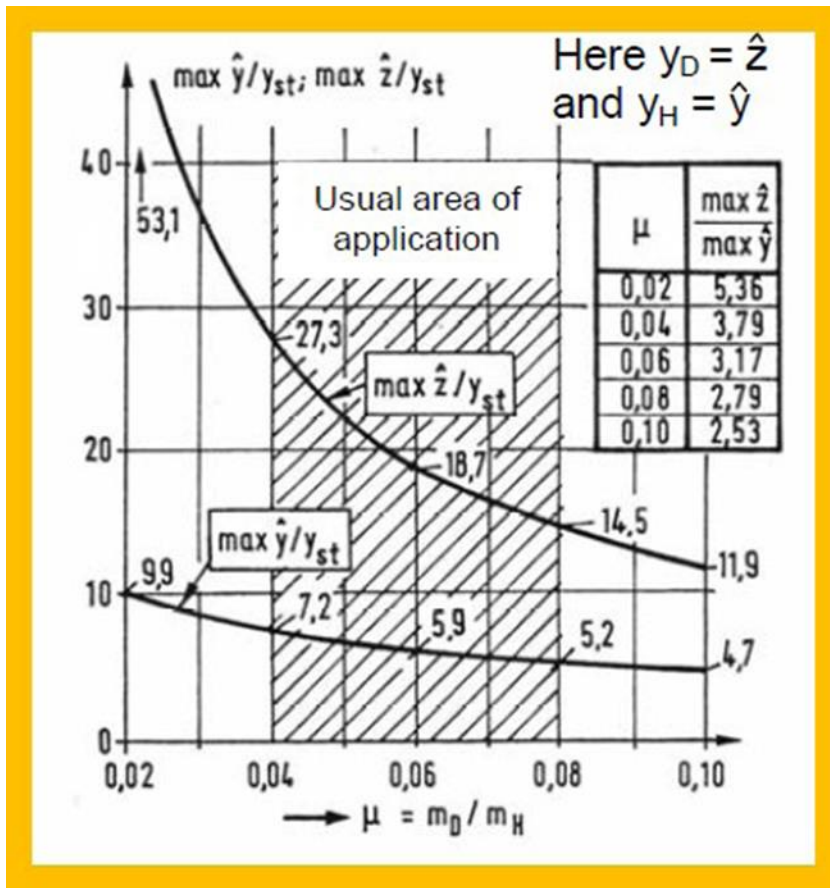
Για τις μικρές αναλογίες μάζας (περίπου $\mu < 0,04$) το αποτελεσματικό εύρος χρήσης του TMD είναι περιορισμένο. Αυτό σημαίνει, ότι σε περίπτωση περιβαλλοντικών αλλαγών, αλλαγών θερμοκρασίας, κόπωση της κατασκευής, κλπ.. η φυσική συχνότητα της δομής μεταβάλλεται, έτσι με αναλογία μάζας μικρότερη από 4% επηρεάζεται και η αποτελεσματικότητα του TMD που μειώνεται περισσότερο από ό, τι για μεγαλύτερες τιμές αναλογία μάζας (βλ. Σχ. α).



Σχήμα α: Το σχήμα μας δείχνει τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος (Ω) προς την ιδιοσυχνότητα των δονήσεων της κατασκευής (ω_H) σε σχέση με την αναλογία μάζας μ και έτσι καταλαβαίνουμε την αποτελεσματική περιοχή του TMD.

Επιπλέον μικρές τιμές της αναλογίας μάζας μ οδηγούν σε μεγαλύτερες μάζες για το TMD (Σχήμα β) οι οποίες συχνά δεν μπορούν να χωρέσουν στην κατασκευή λόγω έλλειψης διαθέσιμου χώρου.

Παράδειγμα[1]: Ο μέγιστος χώρος που καταλαμβάνει η συντονισμένη μάζα για $\mu = 0,02$ είναι σύμφωνα με τον συντελεστή 5,36, μεγαλύτερο από το χώρο που διαθέτει η ίδια η δομή. Για $\mu = 0,1$ αυτός ο παράγοντας είναι μόνο 2,53.



Σχήμα β : Ο χώρος που καταλαμβάνει το TMD σε σύγκριση με την ίδια την κατασκευή και η περιοχή με τις συνήθεις αναλογίες μάζας TMD(y_d =διάσταση TMD, y_h =διάσταση κατασκευής , y_{st} = στατική κατακόρυφη μετατόπιση λόγω του περιορισμένου φορτίου της δομής, $\max \hat{y} / y_{st}$ =μέγιστο σχετικό πλάτος[1])

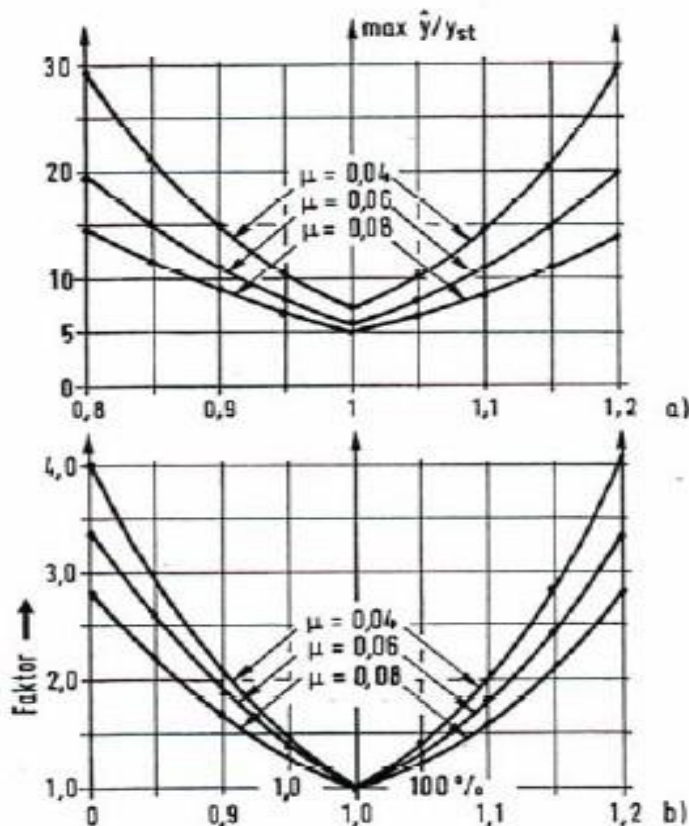
μ	$\frac{\max \hat{z}}{\max \hat{y}}$
0,02	5,36
0,04	3,79
0,06	3,17
0,08	2,79
0,10	2,53

Σχημα β.1 Ο χώρος που καταλαμβάνει η μάζα του TMD για διάφορες αναλογίες μάζας. Για μικρότερες αναλογίες μ έχουμε μεγαλύτερες μάζες του TMD.

3.15.3 Απόκλιση από τη βέλτιστη "εκτός τόνου" τιμή

Η βέλτιστη φυσική συχνότητα του TMD δεν είναι ταυτόσημη με την φυσική συχνότητα της κατασκευής. Η συχνότητα του TMD πρέπει να είναι εκτός τόνου από τη συχνότητα της κατασκευής, η απόκλιση αυτή έχει μεγάλη επίδραση στην τελική απόδοση του TMD. Συνεπώς, η φυσική συχνότητα της κατασκευής και το κινητικό ισοδύναμο της δομικής μάζας πρέπει να είναι γνωστό. Λόγω της πολυπλοκότητας των δομών και την έλλειψη πληροφοριών για τις τιμές ακαμψίας (έδαφος, έδρανα κλπ.), είναι συνήθως δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια η φυσική συχνότητα της δομής που πρέπει να αποσβένεται. Αυτό ισχύει επίσης για την κινητική ισοδύναμη μάζα. Στο άνω μέρος α) του σχήματος γ η μέγιστη τιμή y / Y_{st} για τις τρεις διαφορετικές αναλογίες μάζας 0,04, 0,06 και 0,08 δεικνύεται κατά μήκος της σχέσης k / k_{opt} (στον οριζόντιο άξονα).

Παράδειγμα[1]: Σε περίπτωση που η τιμή για τη σχέση k / k_{opt} είναι 0,8 (δηλαδή το k έχει απόκλιση 20% μικρότερη από τη βέλτιστη τιμή) το μέγιστο σχετικό πλάτος για $\mu = 0,04$ είναι 29 (= 29/7, 2=4, για $\mu=0,04$ από το σχήμα β προκύπτει πως το $\max y/y_{st}=7.2$), και είναι 4 φορές μεγαλύτερο σε μέγεθος σε σύγκριση με το πλάτος στη βέλτιστη απόκλιση που είναι 7.2.

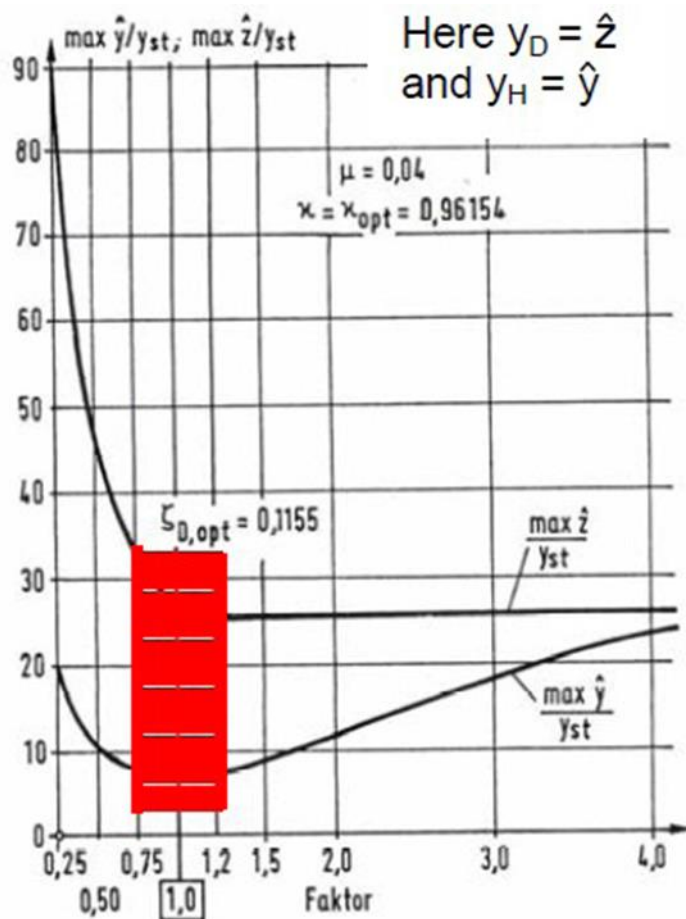


Σχήμα γ. Εύρος του παράγοντα ενίσχυσης σε περίπτωση που η βέλτιστη απόκλιση δεν ταιριάζει.[1]

3.15.4 Απόκλιση από τη βέλτιστη απόσβεση:

Η σωστά προσαρμοσμένη απόσβεση για την μάζα του TMD έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή απόδοση ολόκληρης της μονάδας. Η απόκλιση για τη βέλτιστη απόσβεση είναι λιγότερο σημαντική και έχει μικρότερη επιρροή από την απόκλιση στη βέλτιστη συχνότητα του TMD.

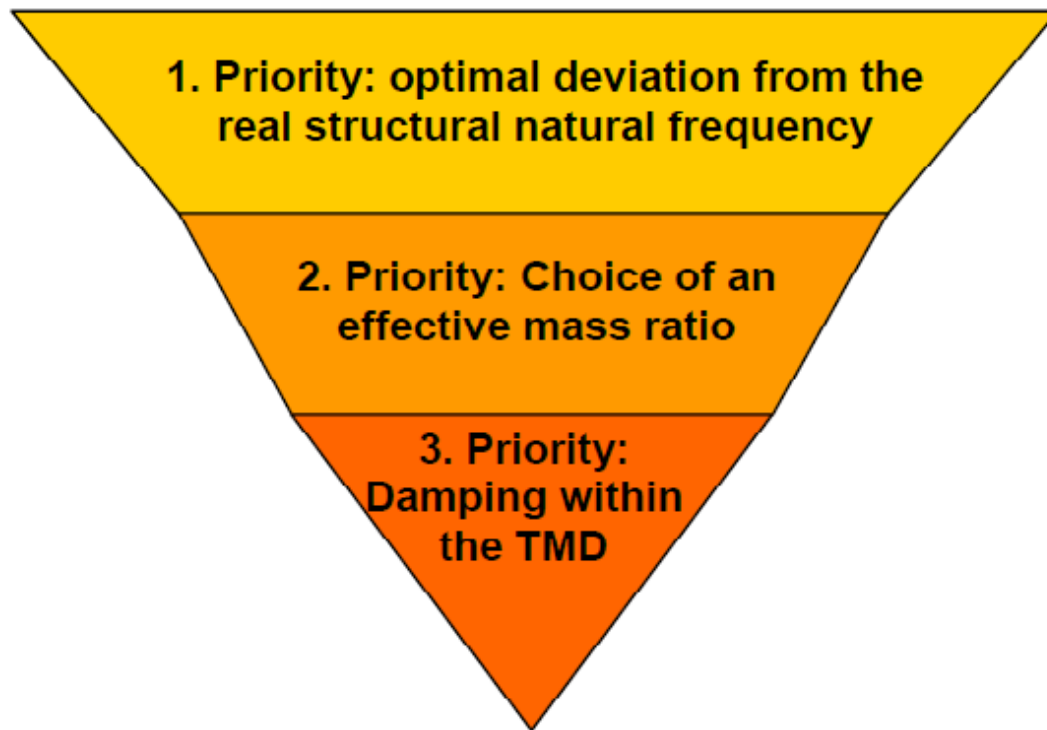
Παράδειγμα[1]: Σε περίπτωση που η απόκλιση της απόσβεσης είναι μεταξύ του -25% και του 25% για τις βέλτιστες τιμές (βλ. Περιοχή σημειώνονται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα δ), υπάρχει μικρή επίδραση στην συνολική απόδοση του TMD. Στο σχήμα. δ παρουσιάζονται οι συνέπειες της απόκλισης του παράγοντα απόσβεσης στον οριζόντιο άξονα επί το εύρος των κραδασμών της κατασκευής (δείκτης y ; κάτω καμπύλη) και για το TMD (δείκτης z ; ανώτερη καμπύλη).



Σχήμα. δ: Απόκλισεις της απόσβεσης που προκύπτουν από αλλαγές στη δομή και το εύρος του TMD για $\mu = 0,04$ [1]

Σε γενικές γραμμές σημαντικές αλλαγές στα πλάτη της κύριας κατασκευής θα προκύψουν λόγω των αποκλίσεων που υπερβαίνουν το 50%. Επομένως η απόσβεση είναι σημαντική, αλλά η κατασκευή δεν θα αντιδράσει με τέτοια ευαισθησία σε αποκλίσεις στις βέλτιστες τιμές απόσβεσης.

3.15.5 Εκτίμηση των τριών βασικών κριτηρίων προσαρμογής των TMD



Σχήμα. ε: Τα τρία βασικά κριτήρια προσαρμογής[1]

1η . Προτεραιότητα: η βέλτιστη απόκλιση από την πραγματική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.

2η. Προτεραιότητα: επιλογή της κατάλληλης αναλογίας μάζας.

3η. Προτεραιότητα: απόσβεση εντός του TMD

1) Το πιο σημαντικό κριτήριο προσαρμογής του TMD είναι η βέλτιστη απόκλιση (σχ. ε) από τη φυσική συχνότητα της κατασκευής. Σε περίπτωση που η συχνότητα του TMD, συμπεριλαμβανομένης της καθορισμένης τιμής της απόκλισης δεν ταιράζει απόλυτα στη κατασκευή, μικρές αποκλίσεις συχνότητας μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική απώλεια της αποτελεσματικότητας του TMD (σχήμα γ).

2) Ένα σημαντικό κριτήριο είναι η πραγματική αξία αναλογία μάζας παρέχοντας ένα ευρύ κλιμακωτό φάσμα της βέλτιστης λειτουργίας (σχ. β).

3) Η απόσβεση είναι λιγότερο σημαντική από ό, τι τα δύο παραπάνω κριτήρια, καθώς μεγάλες αποκλίσεις δεν δημιουργούν σημαντική απώλεια στην απόδοση του TMD (σχ. δ).

3.15.6 Απαραίτητα τεχνικά δεδομένα για την διαστασιολόγηση και το σχεδιασμό των TMD.

Απαιτούνται τα κάτωθεν δεδομένα εισόδου για την διαστασιολόγηση και το σχεδιασμό ενός TMD :

- Η αναλογία μάζας πρέπει να είναι γνωστή.
- Και η φυσική συχνότητα της δομής.
- Προαιρετικά: Απαιτήσεις χώρου για το TMD.
- Προαιρετικά: Βαθμολογηση της απόσβεσης για το στοιχείο απόσβεσης του TMD.

Τα δεδομένα από τα πρώτα δύο ζητήματα πρέπει να είναι γνωστά,αντιθέτα ένα TMD δεν μπορεί να σχεδιαστεί.Τα δύο τελευταία δεδομένα δεν είναι απαραίτητα.Σε περίπτωση που δεν καθορίζονται τα δεδομένα αυτά,ο σχεδιασμός γίνεται σύμφωνα με βάση οικονομικά κριτήρια.

3.15.7 Η βέλτιστη διαδικασία για την διαστασιολόγηση ενός TMD είναι:

- Προσδιορισμός των κρίσιμων φυσικών συχνοτήτων .
- Αξιολόγηση του τύπου του TMD και του σχεδίου του TMD (αριθμός, μάζα, θέση, κλπ.)
 - Δοκιμές δόνησης από ένα πανεπιστήμιο ή άλλους ειδικούς, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του έργου και την καταγραφή των πραγματικών συχνοτήτων.
- Τελικός σχεδιασμός του TMD με βάση τις δοκιμές δόνησης .
- Εγκατάσταση του TMD.
- Ενδεχομένως μια δεύτερη δοκιμή δόνησης για να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητα του TMD.

4

Εφαρμογές, παραδείγματα χρήσης, και διατάξεις

Γενικά είναι τρεις τύποι εφαρμογών που απαιτούν συχνά τη χρήση των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας:

4.1 Ψηλά κτήρια, επιδαπέδιες κατασκευές (γέφυρες,πυλώνες, καμινάδες, κεραίες και πύργοι τηλεόρασης) που μπορούν να διεγερθούν από τις δυνάμεις του ανέμου, με επικίνδυνα πλάτη Eigenform.

Stockbridge dampers

Μια διάταξη απόσβεσης Stockbridge είναι μια συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης που χρησιμοποιείται για να καταστείλει τις προκληθείσες από τον αέρα δονήσεις στα τεντωμένα καλώδια, όπως τα εναέρια ηλεκτροφόρα καλώδια.Ο αποσβεστήρας Stockbridge επινοήθηκε το 1920 από τον George H. Stockbridge, ο οποίος ήταν ένας μηχανικός που δούλευε για την Southern California Edison.Η σχήματος αλτήρα συσκευή αποτελείται από δύο μάζες στα άκρα ενός μικρού μήκους καλωδίου ή μια εύκαμπτη ράβδο, η οποία συσφίγγεται στην μέση της προς το κύριο καλώδιο. η διάταξη απόσβεσης σχεδιάζεται για να απελευθερώσει την ενέργεια των ταλαντώσεων στο κύριο καλώδιο σε ένα αποδεκτό

επίπεδο. Η χαρακτηριστική μορφή της του δίνει το προσωνύμιο "dog-bone damper" «διάταξη απόσβεσης σκυλί- κόκκαλων».

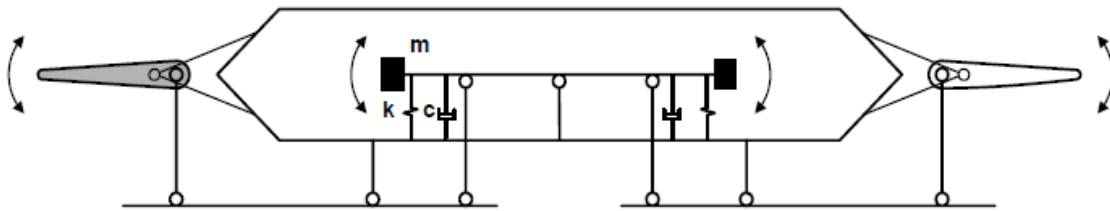
Η διάταξη απόσβεσης Stockbridge χρησιμοποιείται πχ για τη μείωση ταλαντώσεων που προκαλεί ο άνεμος, και ρίχνει τους αγωγούς των εναέριων γραμμών. Σε αυτές τις διατάξεις απόσβεσης, η μηχανική ενέργεια απελευθερώνεται στα καλώδια αποσβεστήρες. Ο μηχανισμός απόσβεσης οφείλεται στη στατική υστέρηση ως αποτέλεσμα της ξηράς τριβής Coulomb μεταξύ των μεμονωμένων συρμάτων του καλωδίου που υποβάλλονται στην παραμόρφωση λόγω της κάμψης. Τα συστήματα με τη στατική υστέρηση μπορούν να διαμορφωθούν με τη βοήθεια των στοιχείων Jenkin που τακτοποιούνται παράλληλα και αποτελούνται από γραμμικά ελατήρια και στοιχεία τριβής Coulomb. Το καλώδιο αποσβεστήρας είναι ένα συνεχές σύστημα και η απόσβεση πραγματοποιείται σε όλο το μήκος του καλωδίου, έτσι ώστε τα διανεμημένα στοιχεία Jenkin να χρησιμοποιούνται. Οι τοπικές μηχανικές ιδιότητες του καλωδίου σύρματος προσδιορίζονται πειραματικά στο πεδίο του χρόνου. Ειδικότερα, η σχέση στιγμής- κυρτότητας καθορίζεται πειραματικά σε κάθε θέση του καλωδίου σύρματος που υποβάλλεται στις δυναμικές κάμψεις παραμορφώσης. Χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο μοντέλο για τα καλώδια αποσβεστήρες, οι εξισώσεις της κίνησης μπορεί να μορφοποιηθούν για ένα αποσβεστήρα Stockbridge, και η διακριτοποίηση του καλωδίου αποσβεστήρα οδηγεί σε ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων.



Σχήμα α: Οριζόντια tmd στην κεραία και τους ανεμιστήρες του emirates towers στο Dubai.
[1]

Aero-Elastic damper-Αεροελαστική διαταξη απόσβεσης

Ο αερό-ελαστικός αποσβεστήρας απεικονίζεται στο σχήμα β. Το σύστημα αποτελείται, από επιφάνειες ελέγχου στις πλευρές του τμήματος της γέφυρας, με σχετικά ελαφρά TMDs και μία μετάδοση η οποία συνδέει τα TMDs με τις επιφάνειες ελέγχου. Ο σκοπός του συστήματος είναι να παρέχει αερο-δυναμική απόσβεση στη δομή τροποποιώντας το πεδίο ροής γύρω από το σώμα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι δυνάμεις να έχουν αποτελεσματική απόσβεση. Αυτό επιτυγχάνεται με τις περιστρεφόμενες επιφάνειες ελέγχου οι οποίες είναι εκτεθειμένες στα ρεύματα του αέρα. Η περιστροφή των επιφανειών ελέγχου ελέγχεται από την κίνηση των TMDs καθώς τα TMDs δεν χρησιμοποιούνται για την απόσβεση στη δομή και έτσι μπορεί να είναι μικρά και συνεπώς δεν εμφανίζουν το συμβατικό πρόβλημα των TMDs την επιπλέον προσθήκη φορτίου στο νεκρό φορτίο της δομής. Δεδομένου ότι η κίνηση των TMDs οδηγείται από δυνάμεις αδρανείας μόνο, δεν χρειάζεται εξωτερική ενέργεια για την λειτουργία του συστήματος. Συνεπώς, το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως παθητικό.



σχήμα β. Απεικόνιση του aerelastic αποσβεστήρα.

Η κύρια ιδέα του συστήματος είναι να μεταφέρει την κίνηση των TMDs στις επιφάνειες ελέγχου. Τα TMDs έχουν χρησιμοποιηθεί σε γέφυρες, κυρίως για τη μείωση της δίνης που προκαλείται από δονήσεις ή σε πεζογέφυρες ως μέσο απόσβεσης για τις δονήσεις που προκαλούνται από πεζούς. Χρησιμοποιημένα με συμβατικούς τρόπους, τα TMDs είναι αξιόπιστα και αποτελεσματικά. Αυτές οι βοηθητικές συσκευές είναι δυναμικοί ενεργειακοί απορροφητές οι οποίοι παρέχουν την πρόσθετη τροπική απόσβεση στη δομή με έναν συγκεκριμένο τρόπο για τον οποίο οι μαζικές διατάξεις απόσβεσης είναι συντονισμένες. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων βασίζεται γενικά στο έργο του Den Hartog [2].



Σχήμα γ:Οριζόντια και κάθετα TMD , στην Millenium Bridge στο Λονδίνο[1]



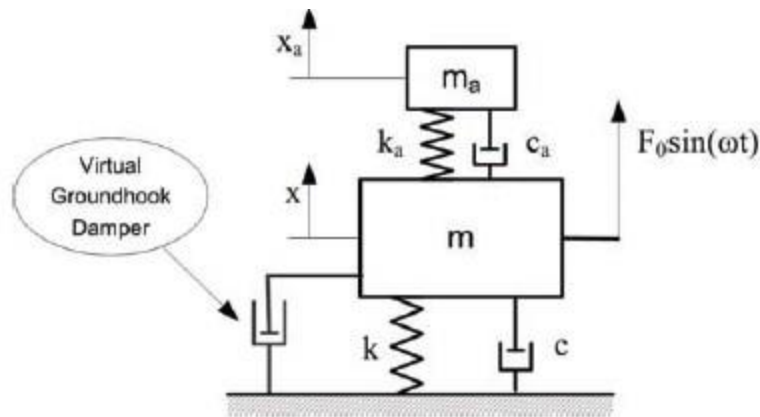
Σχήμα δ:Οριζόντιο Tmd στη Schwedt Bridge στο Βερολίνο και στους ανεμιστήρες στον πύργο ψύξης στο Scholven της Γερμανίας[1].

4.2 Μικρότερες γέφυρες, π.χ. Πεζοδρομημένες γέφυρες, και Κερκίδες που μπορούν να διεγερθούν από οχήματα ή κυκλοφορία πεζών. Αν και συνήθως δεν είναι επικίνδυνα στην ίδια τη δομή, οι δονήσεις μπορούν να γίνουν πολύ δυσάρεστες για τους ανθρώπους πάνω στη γέφυρα που περπατάνε ή κάθονται.

Για τη μείωση των δονήσεων των πατωμάτων λόγω των ανθρώπινων μετακινήσεων χρησιμοποιείται συχνά και αποτελεσματικά μια νέα κατηγορία ημι-ενεργών συντονισμένων μαζικών διατάξεων απόσβεσης που καλούνται ground-hook tuned mass dampers (GHTMD). Το TMD αυτό χρησιμοποιεί μια συνεχώς μεταβλητή ημι-ενεργή διάταξη απόσβεσης (ground-hook damper) για να επιτύχει τη μείωση της επιτάχυνσης της δόνησης των πατωμάτων. Οι παράμετροι σχεδίου του GHTMD καθορίζονται από αδιάστατες τιμές. Οι βέλτιστες τιμές αυτών των παραμέτρων βρίσκονται υπολογισμένες με βάση την ελαχιστοποίηση της απόκρισης της επιτάχυνσης του πατώματος για τις διαφορετικές μαζικές GHTMD αναλογίες και τις αναλογίες απόσβεσης του πατώματος. Η απόδοση του GHTMD συγκρίνεται με αυτήν του ισοδύναμου παθητικού TMD.

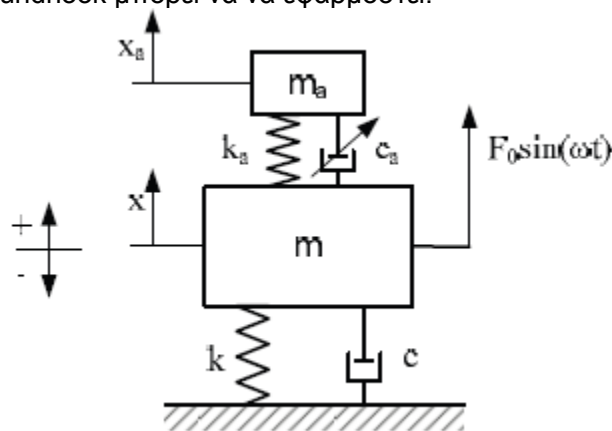
Groundhook based control

Ένα από τα πιο απλά, αλλά αποτελεσματικά, για τον έλεγχο συστημάτων για τα SATMD είναι τα λεγόμενα groundhook control. Η μέθοδος groundhook έχει χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα στην αυτοκινητοβιομηχανία και στις αναρτήσεις (Valasek 1997), αλλά έχει αποδειχθεί ότι εφαρμόζονται επίσης σε SATMD εφαρμογές. Το σχήμα α απεικονίζει την βασική ιδέα του προγράμματος groundhook. Ένας εικονικός αποσβεστήρας προστίθεται μεταξύ της πρωτοταγής δομής και τη σταθερή βάση.



Σχήμα. α. Αρχή της θεωρητικής απόσβεσης groundhook.[18]

Ο αποσβεστήρας γάντζωνει(hook) το κύριο σύστημα στην σταθερή βάση (έδαφος), εξ ου και το όνομα "groundhook". Μια άλλη παραλλαγή του groundhook συστήματος είναι το σύστημα Skyhook, στο οποίο ο εικονικός αποσβεστήρας θεωρείται συνδεδεμένος μεταξύ της πρωτοταγούς δομής και τον σταθερό ουρανό(sky). Το Skyhook σύστημα έχει ευρέως μελετηθεί, ιδίως στον τομέα των αυτοκινήτων και στις αναρτήσεις τους. Στη θεωρία, με την προσθήκη ενός εικονικού αποσβεστήρα, η δόνηση του πρωτογενούς συστήματος μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Στην πραγματικότητα, εάν ο λόγος απόσβεσης του εικονικού αποσβεστήρα ήταν άπειρος, η δόνηση της κύριας μάζας θα είναι τελείως εξασθενημένη. Ωστόσο, ένας τέτοιος αποσβεστήρας είναι καθαρά εικονικός και η τοποθέτηση ενός αποσβεστήρα μεταξύ του πρωτεύοντος συστήματος και της καθορισμένης βάσης είναι πρακτικά αδύνατη. Το σχήμα. β δείχνει πώς ένα πρακτικό σύστημα groundhook μπορεί να εφαρμοστεί.



Σχήμα. β. Αρχή της πρακτικής groundhook απόσβεσης.[18]

Ένα ρυθμιζόμενο αμορτισέρ συνδέεται μεταξύ του πρωτεύοντος συστήματος και η συντονισμένη μάζα αντικαθιστά τον πρωτότυπο παθητικό αποσβεστήρα. Στην πράξη, υπάρχει πάντα ένας παθητικός αποσβεστήρας παράλληλα με το ρυθμιζόμενο αμορτισέρ. Τα ρυθμιζόμενα αμορτισέρ έχουν πάντα ένα περιορισμένο εύρος ρύθμισης.

4.3 .Διάφορες κατασκευές μπορεί να έχουν μηχανήματα που προκαλούν δονήσεις. Για αυτό κάθετα ή οριζόντια TMDS είναι συντονισμένα στην συχνότητα της διατάραξης του μηχανήματος (π.χ. διέγερση από έλλειψη ισορροπίας δυνάμεων). Η δόνηση που

προκαλείται από τα βαριά βιομηχανικά μηχανήματα, τις γεννήτριες και τις μηχανές ντίζελ μπορεί επίσης να δημιουργήσει προβλήματα στη δομική ακεραιότητα, ειδικά εάν τοποθετείται σε μια δομή από χάλυβα ή ένα πάτωμα.

Οι συντονισμένες μαζικές διατάξεις απόσβεσης (TMD) είναι ένα από αυτά τα κατασκευασμένα προϊόντα που αυτήν την περίοδο βγαίνουν στην παραγωγή μέσα από τις εφαρμογές στα μηχανοκίνητα οχήματα και τα καταναλωτικά προϊόντα όπως:

- Αμορτισέρ τιμονιού
- Powertrain Bending Dampers (Αποσβεστήρες κάμψης στα συστήματα μετάδοσης κίνησης)
- Αποσβεστήρες στον άξονα κίνησης των μπροστινών ροδών σε ένα όχημα
- Αποσβεστήρες στις εξατμίσεις
- Διατάξεις απόσβεσης των πλαισίων και στο σώμα του οχήματος
- Αποσβεστήρες στους άξονες
- Αποσβεστήρες σε αθλητικά προϊόντα

Αυτοκίνητα παραγωγής

Οι συντονισμένες μαζικές διατάξεις απόσβεσης χρησιμοποιούνται ευρέως στα αυτοκίνητα παραγωγής, συνήθως για την τροχαλία του στροφαλοφόρου αξόνα για τον έλεγχο των στρεπτικών κραδασμών, καθώς επίσης και στην μετάδοση ταχυτήτων για μείωση διαφόρων θορύβων. Χρησιμοποιούνται επίσης στην εξάτμιση, στο σώμα και τις αναρτήσεις. Σχεδόν όλα τα αυτοκίνητα θα έχουν τουλάχιστον ένα αποσβεστήρα μάζας ενώ μερικά μπορούν να έχουν 10 ή περισσότερους.

Μοτοσυκλέτα

Η τεχνολογία των tuned mass dampers χρησιμοποιείται και στις μοτοσυκλέτες και συγκεκριμένα στις χειρολαβές του τιμονιού για να απορρόφει τους κραδασμούς που μεταφέρονται στον αναβάτη. Το tuned mass damper επίσης μειώνει ριζικά ή εξαλείφει το μούδιασμα και τους πόνους στα χέρια που προκαλούνται από δόνησεις εξαιτίας των ακούσιων μυϊκών συσπάσεων. Λειτουργεί με την απάντηση στην ενέργεια υψηλής συχνότητας (buzz) με την ταλάντωση εκτός φάσης (αποθήκευση της ενέργειας και την αποδέσμευση της πίσω στη ράβδο, τη κατάλληλη χρονική στιγμή), έτσι ακυρώνει τη δόνηση / buzz. Αυτό είναι διαφορετικό και πολύ πιο αποτελεσματικό από όλες τις άλλες μεθόδους που επιχειρούν να αποσβέσουν και να απορροφήσουν την ενέργεια. Επιτρέποντας έτσι λιγότερη κόπωση, ξεκούραση του βραχίονα και αυξημένη άνεση για τον αναβάτη.



Σχήμα α: Εικόνες από tuned mass damper που χρησιμοποιούνται σε χειρολαβή μοτοσυκλέτας [22][23]

Αποσβεστήρες μάζας σε διαστημόπλοια.

Μια πρόταση για να μειωθούν οι δονήσεις στον ενισχυτή στερεών καυσίμων "Άρη" της NASA είναι να χρησιμοποιηθούν 16 αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας ως τμήμα ενός στρατηγικού σχεδίου για να μειώσει τα μέγιστα φορτία από 6gr σε 0,25 gr. Τα TMDS είναι υπεύθυνα για τη μείωση από 1 gr έως 0,25 gr. Η υπόλοιπη δουλειά γίνεται από τους συμβατικούς μονωτές δόνησης που τοποθετούνται μεταξύ των ανώτερων περιοχών και τον ενισχυτή. Αυτοί οι αποσβεστήρες χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές που χρησιμοποιούν ορισμένα ελικόπτερα, για να μειώσουν ή να εξαλείψουν τις δευτερεύουσες δονήσεις.

Χρήση Multiple Tuned Mass Dampers σε μεγάφωνο

Το μεγάφωνο έχει ένα σύστημα ανάρτησης και αποσύνδεσης των ηχείων δαπέδου, τα οποία, σε συνδυασμό με το καινοτόμο "Tuned Mass Damper" του συστήματος, επιτρέπει την αποφυγή των κραδασμών που δημιουργούνται από κάθε μεγάφωνο, επιτρέποντας τη

διάχυση τους μέσα σε στο εσωτερικό της συσκευής. Το περίβλημα είναι αποσυνδεδεμένο από το πάτωμα με ένα καινοτόμο σύστημα ανάρτησης, εξαλείφοντας κάθε μετάδοση κραδασμών και ακουστική ανάδραση. Το σύστημα βασίζεται σε δύο μερικώς συναρμολογημένους, "μεταφορείς" (στο πάνω και στο κάτω μέρος του ερμαρίου) και "συλλέγει" τις δονήσεις που προέρχονται από τα τοιχώματα του ερμαρίου και τους μετατροπείς, όπως η παραβολή μιας κεραίας. Τα δύο μερικώς συναρμολογημένα μέρη είναι σταθερά συνδεδεμένα με μια ειδική ράβδο χάλυβα, μιας υψηλής ταχύτητας μηχανική διασύνδεση, το "Soul Pole", που συγκεντρώνει τις δονήσεις στο «Multiple Tuned Mass Damper»,

Motorsport

Η συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης εισήχθη ως τμήμα του συστήματος ανάρτησης από τη Renault, στο αυτοκίνητο του 2005 στους αγώνες μηχανοκίνητου αθλητισμού της Formula 1 (R25), το 2005 στο Grand Prix της Βραζιλίας. Κρίθηκε να είναι νόμιμο σε πρώτη φάση, και ήταν σε λειτουργία μέχρι το 2006 στο Γερμανικό Grand Prix. Στο Hockenheim, ο αποσβεστήρας μάζας κρίθηκε παράνομος από τη Διεθνή ομοσπονδία του αυτοκινήτου FIA (Fédération Internationale de l'Automobile), δεδομένου ότι η μάζα δεν είναι σταθερά προσαρτημένη στο πλαίσιο και, λόγω της επιρροής που είχε στην συμπεριφορά του αυτοκινήτου, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει σημαντικά την απόσταση του αυτοκινήτου από το έδαφος και κατά συνέπεια επιρεάζονται οι επιδράσεις του εδάφους στο αυτοκίνητο, με αποτέλεσμα να είναι μια κινητή αεροδυναμική συσκευή και να επηρεάζει παράνομα την απόδοση της αεροδυναμικής. Οι διαχειριστές της συνεδρίασης το έκριναν νόμιμο, αλλά η FIA άσκησε έφεση ενάντια σε εκείνη την απόφαση. Δύο εβδομάδες αργότερα, το διεθνές Εφετείο της FIA έκρινε τη μαζική διάταξη απόσβεσης παράνομη.

TMD στα Superyacht

Η πρώτη και κύρια πηγή ενέργειας είναι από τον ήλιο που τροφοδοτεί τα φωτοβολταϊκά (που καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια του σκάφους). Η δεύτερη πηγή είναι η ενέργεια από τον άνεμο που τροφοδοτεί τα ένα βοηθητικό αυτοματοποιημένο ιστίο που οδηγεί το σκάφος στον Ωκεανό με ταχύτητα έως 18 κόμβους, ενώ φορτίζει τις μπαταρίες + GM ESS2 μέσω της ενέργειας που παράγεται από την ιστιοπλοΐα. Η τρίτη πηγή είναι ενέργεια από τα κύματα που συλλαμβάνονται μέσω της αναγέννησης των κραδασμών μέσω της κίνησης (MDR). Μια νέα μορφή του ATMD (ρυθμιζόμενη συντονισμένη μαζική διάταξη απόσβεσης) αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την εταιρία Maurer Sohnes GmbH. Χρησιμοποιώντας αυτές τις 3 πηγές ενέργειας, αυτό το γιοτ μειώνει την ανάγκη του στις εκπομπές κατανάλωσης καυσίμων και του CO₂ δραστικά.

Παραδείγματα υφιστάμενων συστημάτων συντονισμένης μαζικής απόσβεσης[4]. Παρά το γεγονός ότι η πλειονότητα της ζήτησης ήταν για μηχανικά συστήματα, οι συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόκρισης των δομών κτιρίων υπό διάφορες διέγερσεις.

• John Hancock Tower (Engineering News Record, Oct. 1975)

Δύο αποσβεστήρες προστέθηκαν στον 60-ορόφων πύργο John Hancock Tower στη Βοστώνη για τη μείωση της απόκρισης του κτιρίου από τις ταλαντώσεις λόγω της αιολικής φόρτισης. Οι αποσβεστήρες τοποθετούνται στα απέναντι άκρα του πεντηκοστού όγδοου όροφου, με απόσταση 67 μέτρων μεταξύ τους, και μετακινούνται για την εξουδετέρωση των ταλαντώσεων καθώς και τη συστροφή λόγω του σχήματος του κτιρίου. Κάθε αποσβεστήρας ζυγίζει 2700 kN και αποτελείται από ένα κιβώτιο με ενίσχυση μολύβδου από χάλυβα ύψους περίπου 5.2 τετραγωνικών μέτρων και 1 μέτρου βάθος που μετακινείται επάνω σε μια

9-μέτρων πλάκα από χάλυβα. Το βάρος με ενίσχυση μολύβδου, συγκρατείται από πλευρικά δύσκαμπτα ελατήρια συνδεδεμένα με τις εσωτερικές στήλες του κτιρίου που ελέγχονται από σερβο-υδραυλικούς κυλίνδρους, που ολισθαίνουν πίσω και μπροστά πάνω σε ένα υδροστατικό έδρανο που αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα λαδιού, έτσι το βάρος αναγκάζεται να μετακινηθεί διαμέσου των οπών στην χάλυβδινη πλάκα. Όταν η οριζόντια επιτάχυνση υπερβαίνει τα 0.003g για δύο συνεχόμενους κύκλους και το σύστημα ενεργοποιείται αυτόματα. Αυτό το σύστημα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την LeMessurier Associates / SCI σε συνδυασμό με το System MTS Corp, με κόστος περίπου 3 εκατομμυρίων δολαρίων, και αναμένεται να μειώσει την ταλάντωση του κτιρίου από 40 έως 50%.

- Chiba Port Tower (Kitamura et al., 1988)

Ο Chiba Port Tower (ολοκληρώθηκε το 1986) ήταν ο πρώτος πύργος στην Ιαπωνία που ήταν εξοπλισμένος με TMD. Ο Chiba Port Tower είναι μια δομή από χάλυβα 125 μέτρα ύψους, ζυγίζει 1950 μετρικούς τόνους και έχει σχήμα ρόμβου σύμφωνα με το σχέδιο με μήκος πλευράς 15 μέτρων. Η πρώτη και δεύτερη περίοδος λειτουργίας είναι 2,25 sec και 0,51 sec, αντίστοιχα, για την κατεύθυνση x και 2,7 sec και 0,57 sec για την κατεύθυνση y . Η απόσβεση για τη θεμελιώδη λειτουργία εκτιμάται σε 0,5%. Αποσβεστικές αναλογίες ανάλογα με τις συχνότητες χρησιμοποιήθηκαν για τις υψηλότερες λειτουργίες στην ανάλυση. Ο σκοπός της TMD είναι να αυξήσει την απόσβεση της πρώτης λειτουργίας τόσο για την x και όσο και για την y κατεύθυνση. Το σχήμα β δείχνει το σύστημα απόσβεσης για τον πύργο Chiba-Port Tower.



Σχήμα β: Tuned mass damper για τον πύργο Chiba-Port Tower στην Ιαπωνία . [2]

Κατασκευάστηκε από τη Mitsubishi Steel Manufacturing Co, Ltd, έχει μάζα αναλογίας σε σχέση με την μάζα του τρόπου εκτέλεσης του πρώτου τρόπου λειτουργίας από περίπου 1/120 κατά τη διεύθυνση x και 1/80 κατά τη διεύθυνση y , οι περίοδοι κατά τις διευθύνσεις x και y είναι της τάξης των 2,24 sec και 2,72 sec, αντιστοίχως και ο λόγος απόσβεσης ενός αποσβεστήρα είναι 15%. Η μέγιστη σχετική μετατόπιση του αποσβεστήρα σε σχέση με τον πύργο απέχει περίπου την ίδια απόσταση σε κάθε κατεύθυνση. Μειώσεις των περίπου 30 έως 40% παρατηρούνται στην μετατόπιση του ψηλότερου ορόφου και 30% μειώσεις αναμένονται στις μέγιστες ροπές κάμψης.

- Citicorp Center (Engineering News Record, Aug. 1975, McNamara 1977, Petersen 1980)

Το TMD του Citicorp Center (Μανχάταν), έχει επίσης, σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την LeMessurier Associates / SCI σε συνεργασία με την MTS System Corp. Αυτό το κτίριο είναι 279 m υψηλό και έχει μια θεμελιώδη περίοδο περίπου 6,5 sec με μια εγγενή αναλογία απόσβεσης από 1% κατά μήκος κάθε άξονα. Το TMD του Citicorp Center, που βρίσκεται στον εξηκοστό τρίτο όροφο στη κορυφή της δομής, έχει μάζα 366 Mg, περίπου 2% της αποτελεσματικής λειτουργικής μάζας της πρώτης λειτουργίας, και ήταν 250 φορές μεγαλύτερη από οποιοδήποτε υπάρχον συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας την στιγμή της εγκατάστασης. Σχεδιασμένο για να είναι διαξονικά συντονιζόμενο κατά την κατασκευή του κτιρίου με μια μεταβλητή περίοδο λειτουργίας, ρυθμιζόμενη γραμμική απόσβεση από τις 8 έως 14%, και μια μέγιστη σχετική μετατόπιση, ο αποσβεστήρας αναμένεται μια μείωση του πλάτους ταλάντωσης κτιρίου κατά περίπου 50%. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί αύξηση της βασικής δομικής απόσβεσης κατά 4%. Η μάζα του όγκου σκυροδέματος είναι περίπου 2,6 μέτρα ύψος με διατομή σχεδιασμένη στα 9,1 μέτρα και συνοδεύεται από την υποστήριξη με ένα σύνολο από δώδεκα ισορροπημένα έδρανα υδραυλικής πίεσης διαμέτρου 60-cm. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας τα έδρανα τροφοδοτούνται με λάδι από μια ξεχωριστή υδραυλική αντλία, η οποία είναι ικανή να αυξήσει το μπλοκ της μάζας περίπου 2 cm στην θέση λειτουργίας του μέσα σε περίπου 3 λεπτά. Το σύστημα απόσβεσης ενεργοποιείται αυτόματα κάθε φορά που η οριζόντια επιτάχυνση υπερβαίνει τα 0,003 g για δύο διαδοχικούς κύκλους και θα κλείσει αυτόματα όταν η επιτάχυνση του κτιρίου δεν υπερβαίνει τα 0.00075g σε κάθε άξονα με διακοπή 30- λεπτών. Η LeMessurier εκτιμά ότι το TMD του Citicorp Center, το οποίο κόστισε περίπου 1,5 εκατομμύρια δολάρια, γλύτωσε 3,5 - 4.000.000 δολάρια. Το ποσό αυτό αντιπροσωπεύει το κόστος 2800 τόνων δομικού χάλυβα που θα έπρεπε να αποφύγουν την εκτροπή από τους περιορισμούς.

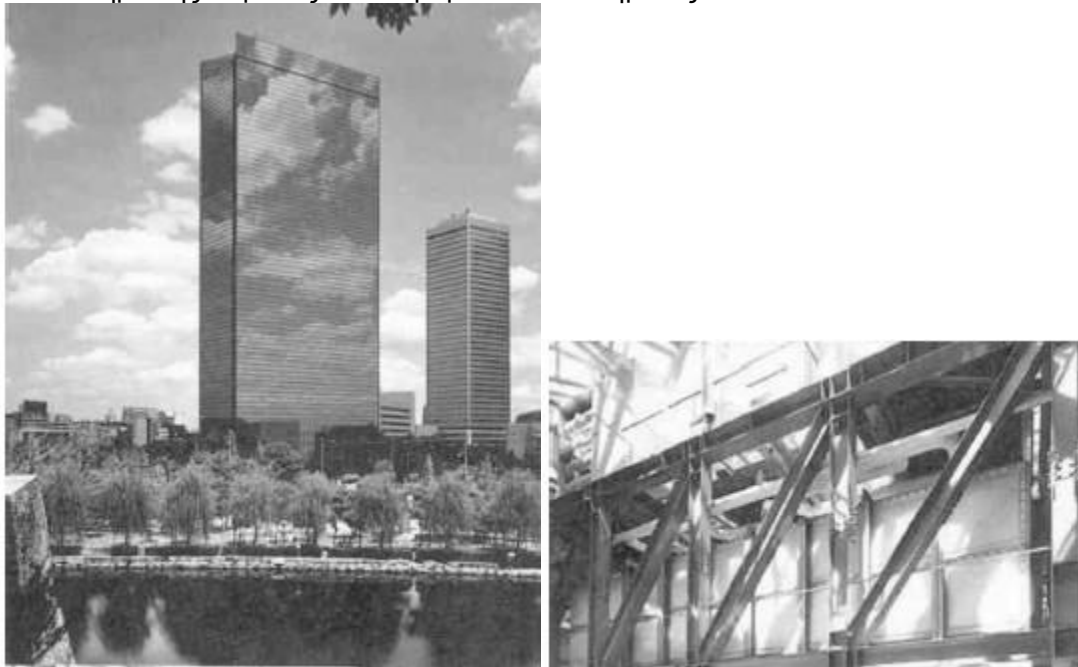
- Canadian National Tower (Engineering News Record, 1976)

Στον 102-μέτρων ιστό κεραίας από χάλυβα στην κορυφή του καναδικού National Tower στο Τορόντο (553 μέτρα ύψος συμπεριλαμβανομένης της κεραίας) απαιτούνται δύο αποσβεστήρες μολύβδου για την πρόληψη της κεραίας από υπερβολική εκτροπή όταν υποβάλλονται σε διέγερση λόγω του αέρα. Το σύστημα του αποσβεστήρα αποτελείται από δύο δακτύλιους σε σχήμα ντόνατ από χάλυβα, 35 cm πλάτος, 30 cm βάθος και 2,4 m και 3 m σε διάμετρο, το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 488 m και 503 m. Κάθε δακτύλιος κρατά περίπου 9 μετρικούς τόνους μολύβδου και υποστηρίζεται από τρεις χαλύβδινες δοκούς που προσκολούνται στις πλευρές του ιστού της κεραίας. Τέσσερα ρουλεμάν στις αρθρώσεις που περιστρέφονται προς όλες τις κατευθύνσεις συνδέουν τα δακτυλίδια με τα δοκάρια. Επιπλέον, τέσσερις ξεχωριστοί, υδραυλικά ενεργοποιούμενοι αποσβεστήρες υγρού προσαρμοσμένοι στην πλευρά του ιστού, επισυνάπτονται στο κέντρο της κάθεμιας άρθρωσης και διαχέουν την ενέργεια. Δεδομένου ότι τα δακτυλίδια μολύβδου είναι σταθμισμένα και κινούνται τέρα δώθε, και το υδραυλικό σύστημα απόσβεσης διαχέουν την ενέργεια εισόδου και μειώνουν την απόκριση στον πύργο. Το σύστημα απόσβεσης σχεδιάστηκε από τους Nicolet, Carrier, Dressel και Associates, Ltd, σε συνεργασία με την Vibron Acoustics, Ltd. Οι αποσβεστήρες είναι συντονισμένοι με το δεύτερο και τέταρτο τρόπο δόνησης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα φορτία κάμψης της κεραίας πρώτο και τρίτο τρόπους έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με το προεντεταμένο σκυρόδεμα δομή που υποστηρίζει την κεραία και δεν απαιτούν πρόσθετη απόσβεση.

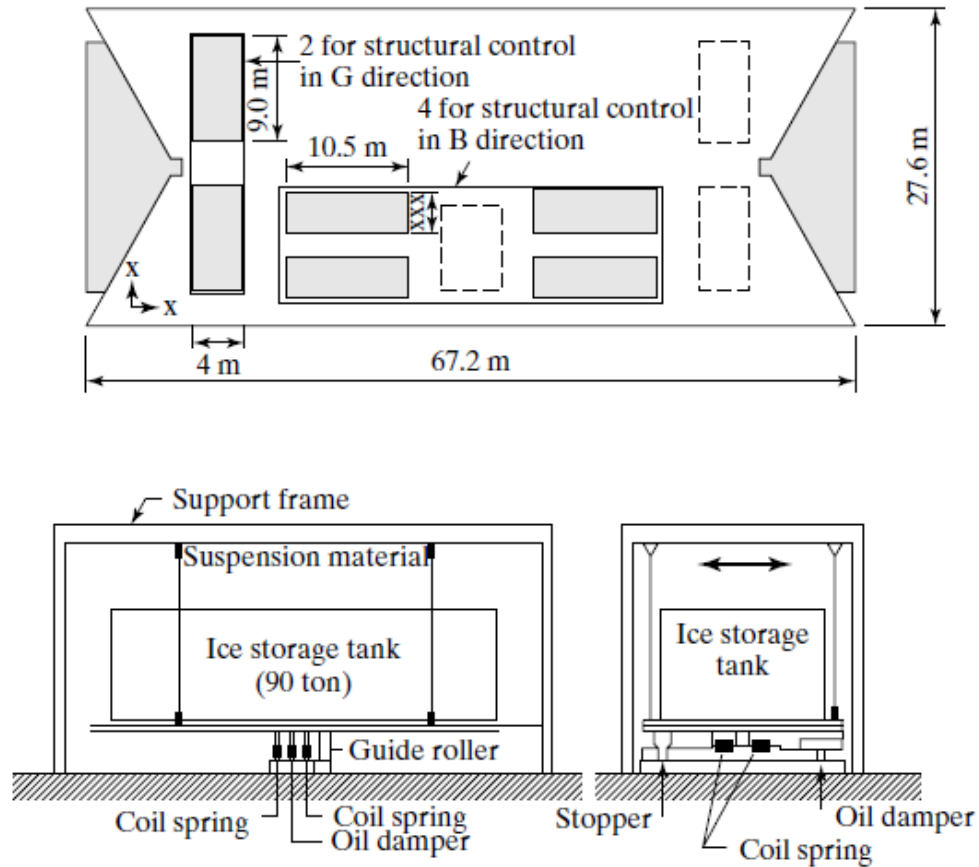
- To Crystal Tower (Nagase και Hisatoku, 1990)

Ο πύργος, που βρίσκεται στην Οσάκα της Ιαπωνίας, είναι 157 μέτρα ύψος και 28 μ. με 67 τ.μ. σύμφωνα με το σχέδιο, ζυγίζει 44.000 μετρικούς τόνους, και έχει μια θεμελιώδη περίοδο περίπου 4 s στην βοριοδυτική κατεύθυνση και 3 s στην κατεύθυνση ανατολής-δύσης. Ένας συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας εκκρεμούς περιλήφθηκε κατά την πρώιμη φάση του σχεδιασμού για τη μείωση της επαγόμενης από αιολική κίνηση του

κτιρίου κατά περίπου 50%. Έξι από τις εννέα δεξαμενές αποθήκευσης ψύξεως του αέρα και θέρμανσης και πάγο θερμικής (ζυγίζει η καθεμία 90 τόνους) είναι κρεμασμένες από τα δοκάρια της στέγης και χρησιμοποιείται ως μια μάζα εκκρεμούς. Τέσσερις δεξαμενές έχουν μήκος εκκρεμούς 4 m και φορά στην κατεύθυνση βορρά-νότου, οι άλλες δύο δεξαμενές έχουν μήκος εκκρεμούς περίπου 3 m και φορά στην κατεύθυνση ανατολής-δύσης. Αποσβεστήρες λαδιού που συνδέονται με τα εκκρεμή διαχέουν την ενέργεια εκκρεμούς. Το σχήμα α δείχνει τη διάταξη των δεξαμενών αποθήκευσης πάγου που χρησιμοποιήθηκαν ως μάζες αποσβεστήρα. Απόψεις του πραγματικού κτιρίου και μία από τις δεξαμενές παρουσιάζονται στο σχήμα β στη σελίδα 230. Το κόστος αυτού του συντονισμένου συστήματος αποσβεστήρας μάζας ήταν περίπου 350.000 δολάρια, λιγότερο από το 0,2% του κόστους κατασκευής. Μετατόπιση της αναγεννητικής δεξαμενών χρησιμοποιείται στον τομέα του διαρθρωτικού ελέγχου (σχέδιο στέγης). Αύξηση της αναγεννητικής δεξαμενής TMD πλήρωσης κλίμακας του πειραματικού συστήματος



Σχήμα γ: Διάταξη εκκρεμούς αποσβεστήρα-Crystal Tower. Takemaka Corporation.[2]



Σχήμα δ: Δεξαμενή αποθήκευσης πάγου-Crystal Tower. (Ευγενική παραχώρηση του Takemaka Corporation).[2]

5 Βιβλιογραφία

[1]www.maurer-soehne.com,Technical Information and Products

[2] Intro to Structural Motion Control ,Chapter 4 tuned mass systems by jerome Connor

[3]PASSIVE CONTROL OF STRUCTURES: EXPERIMENTAL VERIFICATION USING TUNED MASS DAMPERS By KARAIKOS K. GRIGORIOS
Diploma in Mechanical & Aeronautical Engineering University of Patras 2005 A Thesis

[4]www.rwdi.com

[5]Δυναμική μηχανών από τους Α.Καναράχο και Ι.Αντωνιάδη,κεφάλαια 4.1 απλό μοντέλο έδρασης μηχανής και 4.4.1 μείωση των ευθύγραμων ταλαντώσεων με την αύξηση των βαθμών ελευθερίας.

[6]wikipedia.org/,http://en.wikipedia.org/wiki/Stockbridge_damper

- [7]<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=13772262>
- [10]<http://www.newscientist.com/article/mg19626273.000>
- [11]<http://rparticle.web-p.cisti.nrc.ca/rparticle/AbstractTemplateServlet?calyLang=eng&journal=cjce&volume=29&year=2002&issue=1&msno=l01-063>
- [12]http://www.ihl.co.jp/iis/english/products/damper_mass.html
- [13] absabs.harvard.edu/abs/2010Smas...19k5002H Re-tuning tuned mass dampers using ambient vibration measurements Hazra, B. Sadhu, A. Narasimhan, S Smart Materials and Structures, Volume 19, Issue 11, pp. 115002 (2010).
- [14]sem.org-IMAC-XXI-Conf-s08p02-Using-Tuned-Mass-Dampers-Optical-Assembly
- [15]GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co.KG
- [16]http://www.ihl.co.jp/iis/english/products/damper_mass.html
- [17]Theory of Control II: Passive Control of Structures Dr. Hongwei Huang
Department of Bridge Engineering Tongji University
- [18] IMPROVING THE PERFORMANCE OF THE SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPER
FACULTY OF TECHNOLOGY, DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING,
UNIVERSITY OF OULU ,]Toni Liedes
- [19]<http://www.tuvie.com/search/power+consumption+of+a+car>
- [20]<http://oceanshaker.com/2011/02/01/sauter-carbon-offset-design-presents-the-ocean-empire-life-support-superyacht/> .Sauter Carbon Offset Design Presents The Ocean Empire Life Support Superyacht
- [21]<http://neuerdings.com/2008/08/26/hochhaus-erdbebenschutz-378-541-liter-gegen-die-schwerkraft/>
- [22]www.vibranator.com
- [23]www.motorcyclistonline.com
- [24]www.zeably.com/tuned_mass_dampers
- [25]<http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/185022>
- [26] SD_LectureNote_13_tuned Dynamics Fall 2008 mass damper systems,Prof. T-Y Yu,Structural
- [27]roush Tuned Mass Damper Products
- [28]passive-control-using-tuned-mass-damper-and-control-surfaces,Uwe Starossek Hasan Aslan Hamburg University of Technology