



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΜΑΘΗΜΑ: ΦΥΣΙΚΗ Ι

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΟΛΟΓΙΑ - ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΙΣΤΟΡΙΑ – ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ



ΔΙΔΑΣΚΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΓΑΡΙΔΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΓΚΙΚΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

mm20070

ΓΟΥΔΕΛΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

mm20431

ΕΞΑΜΗΝΟ 1^ο

Ακαδημαϊκό έτος 2020-2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τον τρόπο λειτουργίας των μηχανικών ρολογιών. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη των μηχανισμών με κριτήριο το είδος της ενέργειας που αξιοποιούν για την λειτουργία τους. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναφορά για την αρχή της δημιουργίας των μηχανικών ρολογιών από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι θεωρίες και οι νόμοι που διέπουν την κίνηση των μηχανικών ρολογιών, η οποία βασίζεται στη λειτουργία του στροφικού εκκρεμούς, καθώς επίσης και τα λειτουργικά μέρη από τα οποία αποτελούνται. Τέλος, αναφέρεται η εξέλιξή τους.

Summary

The present project studies the design, the construction, and the way that mechanical clocks operate. It focuses on the energy that clockworks use for their function. Firstly, we present a sort of historical retrospect which focuses on the evolution of mechanical clocks from ancient times until our era. In addition, we develop the theories and the laws that rule the motion of mechanical clocks which is based on the function of rotary pendulum. The functional parts that constitute the mechanical clocks are presented too. Finally, there is a reference to their evolution.

Περιεχόμενα

ΤΑ ΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑΣ	5
Ηλιακό ρολόι	5
Κλεψύδρα	6
Υδραυλικό ρολόι	6
Υδραυλικό ρολόι Αγοράς των Αθηνών	8
Μηχανικά ρολόγια	9
Η λειτουργία του απλού εκκρεμούς.....	10
ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	11
Τα μέρη ενός σύγχρονου μηχανικού ρολογιού με ελατήριο:	13
Ρότορας.....	13
Ελατήριο και βαρελάκι	14
Μπαλανσιέ (balance wheel).....	15
Τρίχα (hairspring)	17
ΕΞΕΛΙΞΗ	17
Ηλεκτρικά ρολόγια (κρύσταλλοι χαλαζία)	17
Εξελίξεις με την βοήθεια κραμάτων.....	18
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:	19

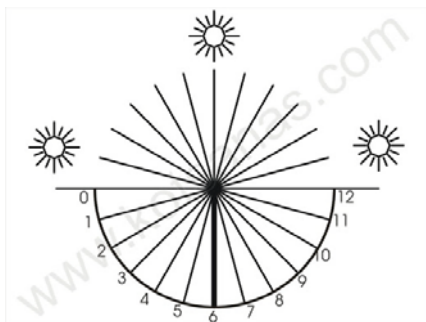
ΤΑ ΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στην προσπάθεια, ο άνθρωπος να ρυθμίσει και να οργανώσει τη ζωή του, χρησιμοποίησε την έννοια του χρόνου και εφηύρε τα πρώτα μέσα μέτρησης και προσδιορισμού του, παρατηρώντας τις μεταβολές των φαινομένων γύρω του. Από τις πρώτες παρατηρήσεις, όπως μπορούμε εύκολα να φανταστούμε, ήταν η σκιά των αντικειμένων που φωτίζονται από τον ήλιο και η αργή κίνησή της με το πέρασμα της ώρας. Η κλεψύδρα, το αμμόμετρο, το ηλιακό ρολόι ήταν μερικά από τα όργανα που κατασκευάστηκαν γι' αυτό το σκοπό, από τις πρώτες επινοήσεις των αρχαίων λαών. Με το πέρασμα του χρόνου, επινοήθηκαν άλλοι τρόποι μέτρησης του χρόνου και όργανα πιο περίπλοκα όπως τα μηχανικά ρολόγια. Παρακάτω, καταγράφονται μερικές πληροφορίες για τον τρόπο μέτρησης του χρόνου ανά τους αιώνες και αναφέρονται μερικά από τα σημαντικότερα σημεία της ιστορίας των ρολογιών.

Ηλιακό ρολόι

Οι ιστορικοί πιθανολογούν ότι πριν από χιλιάδες χρόνια κάποιος παρατήρησε πως όταν τοποθέτησε κατακόρυφα στο έδαφος μία ράβδο, η σκιά της κινούνταν στο έδαφος ακολουθώντας την κίνηση του ήλιου. Σύμφωνα με τους ιστορικούς, η αρχή του ρολογιού, συνέβη το 2679 π.Χ. στην Κίνα. Τα ηλιακά ρολόγια ήταν αρκετά διαδεδομένα από το 3500 π.Χ. και μετά. Έπειτα από αρκετά χρόνια, γύρω στο 550π.Χ. ο μαθητής του Θαλή Αναξίμανδρος κατασκεύαζε ποικιλία ηλιακών ρολογιών με το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών να είναι το ημισφαιρικό ηλιακό ωρολόγιο με κεντρικό γωνμονικό σημείο.

Το ηλιακό ρολόι του Αναξίμανδρου είχε χαραγμένες στην επιφάνεια ενός κοίλου ημισφαιρίου 11 ωριαίες γραμμές (σε διαστήματα 15 μοιρών), οι οποίες όριζαν τις 12 ημερήσιες ώρες ενώ τρεις καμπύλες όριζαν την πορεία του ήλιου κατά το θερινό ηλιοστάσιο (η κατώτερη), τις ισημερίες (η μεσαία) και το χειμερινό ηλιοστάσιο (η ανώτερη). Τις υπόλοιπες ημέρες η σκιά του ήλιου της ακμής του κατακόρυφου κεντρικού (στραμμένου προς τον νότο) γνώμονα διέγραφε τόξα παράλληλα ανάμεσα στις παραπάνω καμπύλες ανάλογα με την εποχή.



<http://kotsanas.com/exh.php?exhibit=0201001>



Ηλιακό ρολόι στον εθνικό κήπο

Κλεψύδρα

Η ιστορία του ρολογιού συνεχίζεται, στο έτος 1530 π.Χ. όταν εμφανίζονται στην Αίγυπτο οι πρώτες κλεψύδρες με νερό ή άμμο. Την χρήση αυτών έκαναν, πρωτίστως, οι Βαβυλώνιοι και μεταγενέστερα οι Έλληνες. Οι κλεψύδρες δεν σχετίζονταν από την εμφάνιση του ήλιου.

Ο Πλάτων με τη σειρά του συνέβαλε σημαντικά στην ιστορία του ρολογιού. Το 380 π.Χ. κατασκεύασε, με τη μορφή σύνθετης κλεψύδρας νερού, ένα ρολόι που, μέσω πίεσης του αέρα, προκαλεί συριγμό, σε καθορισμένη ώρα. Ένα ξυπνητήρι με άλλα λόγια.

Αναλυτικότερα, το ανώτερο κεραμικό δοχείο τροφοδοτεί μέσω (κατάλληλα υπολογισμένου για την κάθε περίπτωση) ακροφυσίου το επόμενο δοχείο. Όταν αυτό γεμίσει την προγραμματισμένη χρονική στιγμή (π.χ. μετά από 7 ώρες) αδειάζει με ταχύτητα μέσω του εσωτερικά τοποθετημένου αζονικού σιφωνίου στο επόμενο κλειστό δοχείο και αναγκάζει τον εμπεριεχόμενο αέρα να εξέλθει με πίεση σφυρίζοντας από μία σύριγγα στην κορυφή του. Μετά τη λειτουργία του το δοχείο αδειάζει σιγά σιγά μέσω μιας μικρής οπής που βρίσκεται στον πυθμένα του προς το κατώτερο αποθηκευτικό δοχείο προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί.

Αυτή η συσκευή τοποθετήθηκε στον κήπο της Ακαδημίας και μάλιστα με την κλεψύδρα μετρούσαν στα δικαστήρια της κλασικής Αθήνας το χρόνο ομιλίας των αντιδίκων και των μαρτύρων. Ένας ομιλητής είχε στη διάθεσή του περίπου 6 λεπτά.

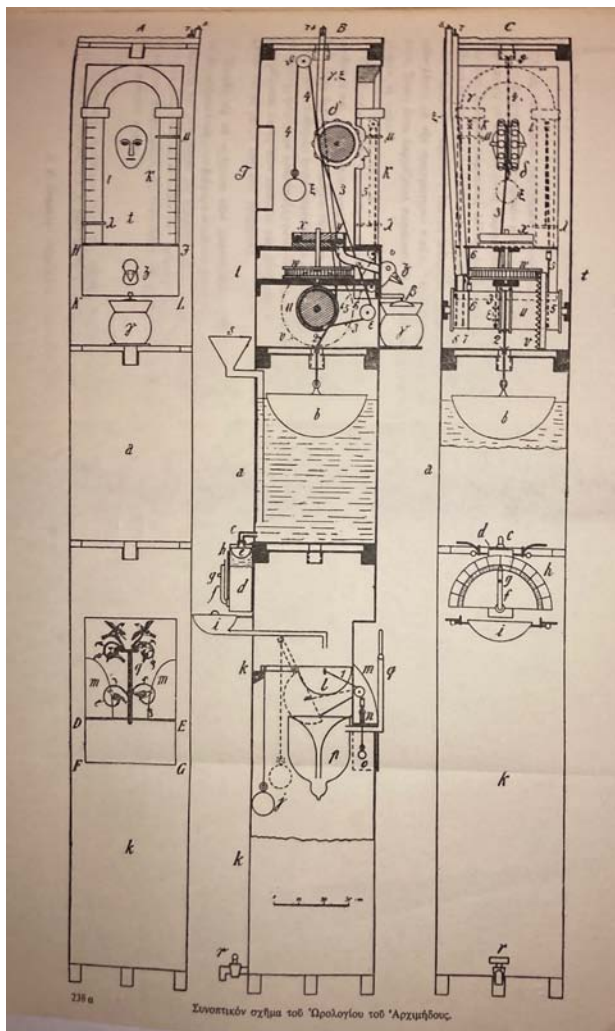
Μια παραλλαγή της κλεψύδρας είναι η αμμοκλεψύδρα, η οποία λειτουργεί με λεπτόκοκκη άμμο που κυλάει ανάμεσα σε δύο συγκοινωνούντα δοχεία μετρώντας το χρόνο και χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα.



Κλεψύδρα νερού- ξυπνητήρι του Πλάτωνα

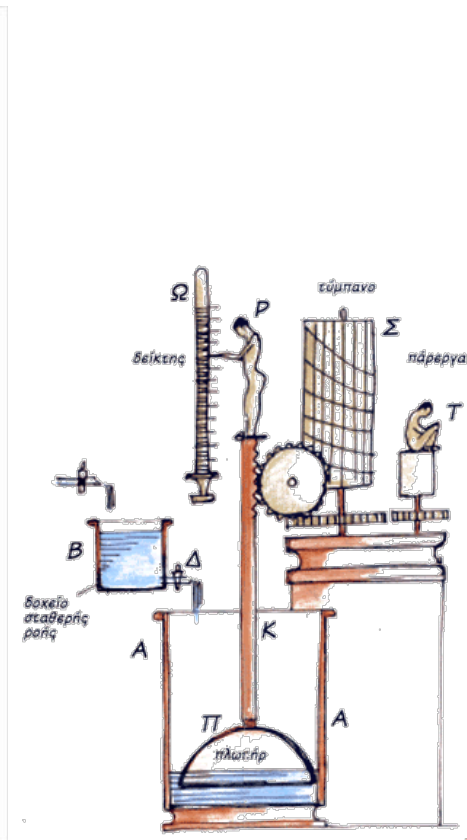
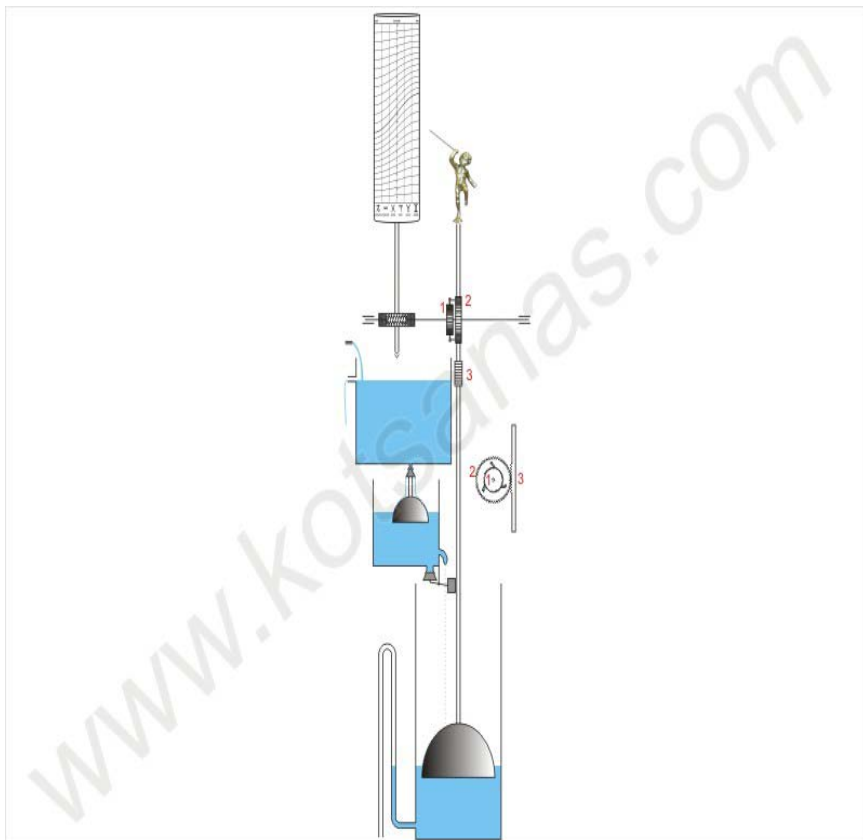
Υδραυλικό ρολόι

Αρκετά ενδιαφέρον και ιδιαίτερα για την εποχή του είναι και τα πρώτα ελληνικά ρολόγια που δούλευαν με νερό. Τόσο ο Αρχιμήδης, όσο και ο Κτησίβιος κατασκεύασαν αρκετά μοντέλα αυτού του ρολογιού. Το υδραυλικό ρολόι του Κτησίβιου είναι, ίσως, το αρχαιότερο στο είδος του. Χρησιμοποιεί οδοντωτό τροχό με τον οποίο συνδέονται τύμπανα και μηχανισμοί που προκαλούν πολύπλοκες κινήσεις και τελικά δίνει ενδείξεις για τις ώρες. Πρόκειται, για ένα αυτόματο υδραυλικό ρολόι που μπορούσε να λειτουργεί αδιάκοπα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Το ρολόι του Αρχιμήδη δεν είναι τύπος κλεψύδρας, αλλά μηχανισμός ρολογιού, όπου αντί του σημερινού ελατηρίου χρησιμοποιούσε τη ροή του νερού.



Υδραυλικό ρολόι του Αρχιμήδη

(ΑΡΧΙΜΗΔΟΥΣ ΑΠΑΝΤΑ - ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΣΤΑΜΑΤΗ)



Υδραυλικό ρολόι Κτησίβιου (<http://users.sch.gr/mfanarioti/MHXANES/mixanologia/ydraulikoroloi.html>)

(<http://kotsanas.com/exh.php?exhibit=0204006>)

Υδραυλικό ρολόι Αγοράς των Αθηνών

Η κλεψύδρα εξελίχθηκε σε πιο σύνθετα υδραυλικά ρολόγια, γνωστά και ως υδραυλίδες. Στην αρχαία Αγορά των Αθηνών, στο δρόμο που οδηγούσε στην Πνύκα, υπήρχε ένα τέτοιο υδραυλικό ρολόι, με το οποίο οι Αθηναίοι μπορούσαν να μετρούν το χρόνο όσο βρίσκονταν εκεί για εμπορικές συναλλαγές ή άλλες δραστηριότητες.

Το ρολόι αποτελούνταν από μία δεξαμενή νερού χωρητικότητας 1.000 λίτρων, την οποία γέμιζαν με νερό και έβαζαν σε λειτουργία. Το νερό άρχιζε να τρέχει από μια οπή με χάλκινη εκροή στον πυθμένα της δεξαμενής και καθώς κυλούσε η ώρα, η δεξαμενή άδειαζε σταδιακά και κατέβαινε ο πλωτήρας που επέπλεε στην επιφάνεια του νερού. Η κίνηση αυτή του πλωτήρα άλλαζε την ένδειξη της ώρας στο ρολόι.



Υδραυλικό ρολόι (Αγορά των Αθηνών)

Με το όνομα «Αέρηδες» καθιερώθηκε να λέγεται το αρχαίο μνημείο που βρίσκεται στους βόρειους πρόποδες της Ακρόπολης των Αθηνών. Το ρολόι αυτό, του οποίου το επίσημο όνομα είναι «Ωρολόγιο του Κυρρήστου» θεωρείται πως το ανήγειρε ο Ανδρόνικος ο Κυρρήσιος. Πρόκειται για το γνωστό οκταγωνικό κτίσμα που στην κορυφή του έφερε ανεμοδείκτη. Κάτω από κάθε ανάγλυφη προσωποποίηση των οκτώ ανέμων, εγχάρακτες ακτίνες κατά διάφορους σχηματισμούς αποτελούσαν ένα ηλιακό ωρολόγιο. Για τον υπολογισμό της ώρας σε ανήλιαγες ημέρες υπήρχε μέσα στο κτίσμα εγκατάσταση υδραυλικού ρολογιού. Ο κατασκευαστής του μνημείου συνδύασε τις εφευρέσεις προηγούμενων κατασκευών, όπως του Αρχιμήδη και του Κτησίβιου.



Οι αέρηδες της Πλάκας

([https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%AD%CF%81%CE%B7%CE%B4%CE%B5%CF%82_\(%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%AF%CE%B1\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%AD%CF%81%CE%B7%CE%B4%CE%B5%CF%82_(%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%AF%CE%B1)))

Μηχανικά ρολόγια

Η κλεψύδρα και το ηλιακό ρολόι χρησιμοποιήθηκαν για αρκετές χιλιετίες για τη μέτρηση του χρόνου. Επίσης το νερό και τα υδραυλικά ρολόγια χρησιμοποιήθηκαν έως τον 17^ο αιώνα.

Βαθιά τομή έγινε όταν οι άνθρωποι σταμάτησαν να σκέφτονται τη μέτρηση του χρόνου με βάση τη ροή και στραφήκαν σε συστήματα με περιοδική ή επαναλαμβανομένη κίνηση. Αυτό που θα χρειαζόταν για τη μέτρηση του χρόνου, ήταν η μέτρηση του αριθμού των ταλαντώσεων ή κύκλων, οπότε καθιερώθηκε το μηχανικό ρολόι.

Η προέλευση ενός μηχανικού ρολογιού είναι άγνωστη. Πιθανολογείται ότι πρώτοι το χρησιμοποίησαν μοναχοί σε μοναστήρια. Τα πρώτα μηχανικά ρολόγια ήταν ογκώδεις συσκευές με μηχανισμό αντίβαρων. Τον 14^ο αιώνα, άρχισαν να τοποθετούνται δημοσιά ρολόγια σε πλατείες και καμπαναριά στις μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις. Φυσικά και τα πρώτα μηχανικά ρολόγια δεν ήταν αρκετά αξιόπιστα. Είχαν μεγάλη απόκλιση, ενώ οι δείκτες των λεπτών και των δευτερολέπτων προστέθηκαν πολύ αργότερα, μετά την ανακάλυψη και εφαρμογή της ταλάντωσης του εκκρεμούς στους ωρολογιακούς μηχανισμούς. Όσο για τα ελατήρια... Αυτά επινοήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν πολύ πιο μετά.

Τα πρώτα μηχανικά ρολόγια που κατασκευάστηκαν γύρω στα μέσα του 14^{ου} αιώνα, είχαν μόνο ωροδείκτη, γεγονός που σήμαινε ότι η απόκλιση μπορεί να έφτανε και την μια ώρα. Χώριζαν την ώρα σε μισά, σε τρίτα, σε τέταρτα, μερικές φορές ακόμη και σε 12 μέρη αλλά ποτέ σε 60, καθώς η ώρα δεν είχε συνδεθεί με τη χρονική διάρκεια των λεπτών, γεγονός που δεν ήταν και τόσο πρακτικό.

Προς το τέλος του 16^{ου} αιώνα, έκαναν την εμφάνισή τους τα πρώτα μηχανικά ρολόγια που εμφάνιζαν και λεπτά. Ακόμη και σήμερα πολλά ρολόγια (τοιχίου ή χειρός) δείχνουν μόνο τα λεπτά και όχι τα δευτερόλεπτα.

Το αρχαιότερο από τα μηχανικά ρολόγια, το οποίο λειτουργεί ακόμα και σήμερα, είναι του καθεδρικού ναού Σόλσμπερι στην Αγγλία. Το ρολόι αυτό κατασκευάστηκε το 1386 μ.Χ. και σημαίνει τις ώρες, ενώ ένα άλλο εξίσου παλιό που εγκαταστάθηκε στη Ρουεν της Γαλλίας το 1389 μ.Χ. σήμαινε τα τέταρτα της ώρας.



το παλαιότερο ρολόι του κόσμου που λειτουργεί-

Καθεδρικός ναός Σόλσμπερι- Αγγλία

Η λειτουργία του απλού εκκρεμούς

Το 1582 ο Γαλιλαίος παρατήρησε την χαρακτηριστική χρονομετρική ιδιότητα του εκκρεμούς, μετρώντας τον χρόνο που έκαναν οι πολυέλαιοι του καθεδρικού ναού της Πίζας όταν ταλαντεύονταν. Ανακάλυψε ότι οι ταλαντώσεις τους ήταν ισόχρονες και σκέφθηκε ότι μπορούσαν να χρησιμεύσουν για την μέτρηση του χρόνου.

Ο Γαλιλαίος μελετώντας λοιπόν την λειτουργία του εκκρεμούς, κατέληξε σε δύο αρχές, τις οποίες επαλήθευσε και θεμελίωσε:

- Ο χρόνος ταλάντωσης του εκκρεμούς δεν εξαρτάται από το μήκος τόξου ή την μάζα του βαριδίου.
- Ο χρόνος ή η διάρκεια ταλάντωσης εξαρτάται μόνο από το μήκος του νήματος του εκκρεμούς.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η περίοδος της ταλάντωσης του εκκρεμούς δίνεται από τον τύπο: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

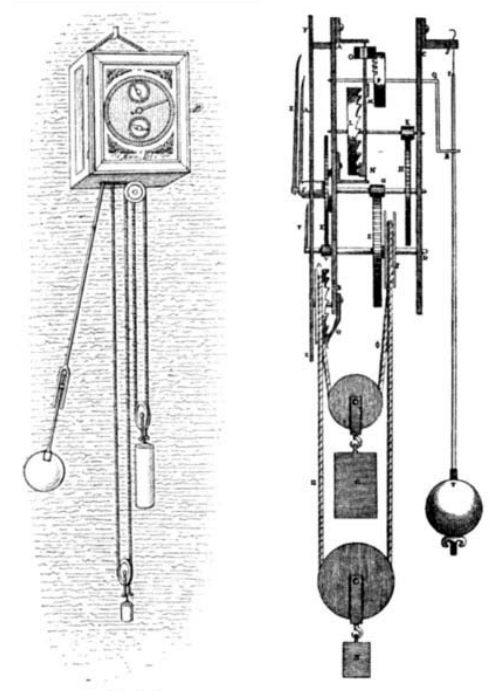
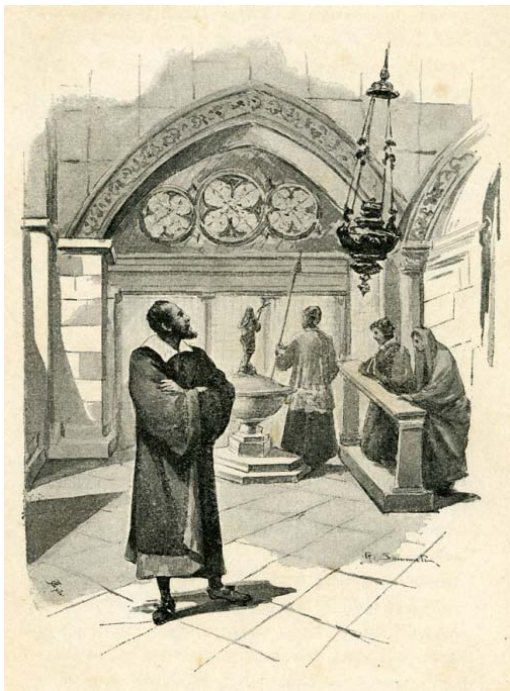
Η οποία όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο εξαρτάται μόνο από το μήκος του νήματος l .

Ο Γαλιλαίος είχε μελετήσει τις ιδιότητες του αιωρούμενου εκκρεμούς, αλλά δεν πρόλαβε να κατασκευάσει ένα αξιόπιστο ρολόι.

Τις παρατηρήσεις του όμως αξιοποίησε ο Ολλανδός Κρίστιαν Χόυχενς από το 1656 και μετά. Ο Χόυχενς επινόησε μια επιτυχημένη μέθοδο, που χρησιμοποιούσε ένα ταλαντευόμενο εκκρεμές για να κινεί τους δείκτες ενός ρολογιού με υψηλή ακρίβεια για εκείνη την εποχή.

Ο Γαλιλαίος παρακολουθώντας την ταλάντωση των πολυελαίων

(<https://1gelfysikh.blogspot.com/2013/?view=classic>)



Το ρολόι-εκκρεμές του
Christian Huygens

(<http://merkopanas.blogspot.com/2019/04/1629-christiaan-huygens.html>)

ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Μηχανικά ρολόγια είναι εκείνα, τα οποία αντλούν την ενέργειά τους από ένα ελατήριο, ενώ όλα τα υπόλοιπα μέρη της μηχανής είναι φτιαγμένα από μέταλλο. Μία σειρά από εξαρτήματα (πλατίνες, ρόδες, βίδες κλπ) συνθέτουν τη μηχανή ενός ρολογιού.

Τα μηχανικά ρολόγια χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες:

- τα κουρδιστά
- τα αυτόματα

Τα κουρδιστά απαιτούν καθημερινή φροντίδα από τον ιδιοκτήτη τους ώστε να λειτουργούν σωστά. Κάθε πρωί ή κάθε βράδυ πρέπει να κουρδίζονται ώστε το ελατήριο που κινεί τον μηχανισμό να «μαζεύεται» και να απελευθερώνει σιγά-σιγά την αποθηκευμένη ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντιθέτως, τα αυτόματα διαθέτουν επιπλέον πολύπλοκους μηχανισμούς, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την κίνηση του χεριού μας μέσα στην ημέρα ώστε να κουρδίζουν το ελατήριο που κινεί τους δείκτες και τις υπόλοιπες ενδείξεις του ρολογιού.

Φυσικά, τα πιο φημισμένα είναι τα ελβετικά, με τα γερμανικά και τα ιαπωνικά να ακολουθούν κατά πόδας. Πρόκειται για πολύπλοκους μηχανισμούς με δεκάδες γρανάζια, ημιπολύτιμους λίθους και ελατήρια, φτιαγμένα από ανθρώπους που έχουν αφιερώσει τη ζωή τους ολόκληρη σε αυτή την τέχνη.

Ένα μηχανικό ρολόι μετρά τον χρόνο βασιζόμενο στις ταλαντώσεις του σπονδύλου. Ο σπόνδυλος έχει ροπή αδράνειας I γύρω από τον άξονά του. Ένα σπειροειδές ελατήριο, το οποίο βρίσκεται κλεισμένο σε μια ειδική θήκη που ονομάζεται μπαριγιέ, ασκεί ροπή επαναφοράς τ_z ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης θ . Δηλαδή, το ελατήριο καθώς είναι μαζεμένο εκτονώνεται, δίνοντας ισόχρονη κίνηση μέσω συνδυασμού ροδών, άγκυρας και εξισορροπιστή.

Η λειτουργία ενός μηχανικού ρολογιού βασίζεται στη λειτουργία του στροφικού εκκρεμούς, το οποίο αποτελεί τη γωνιακή εκδοχή ενός απλού γραμμικού αρμονικού ταλαντωτή. Εδώ, το «ελατήριο», δηλαδή το στοιχείο της ελαστικότητας συνδέεται με την στρέψη του σύρματος ανάρτησης και όχι με την επιμήκυνση ή συσπίρωση ενός ελατηρίου. Η διάταξη ονομάζεται στροφικό εκκρεμές, διότι η μορφή της απομάκρυνσης από το σημείο ισορροπίας είναι στροφή.

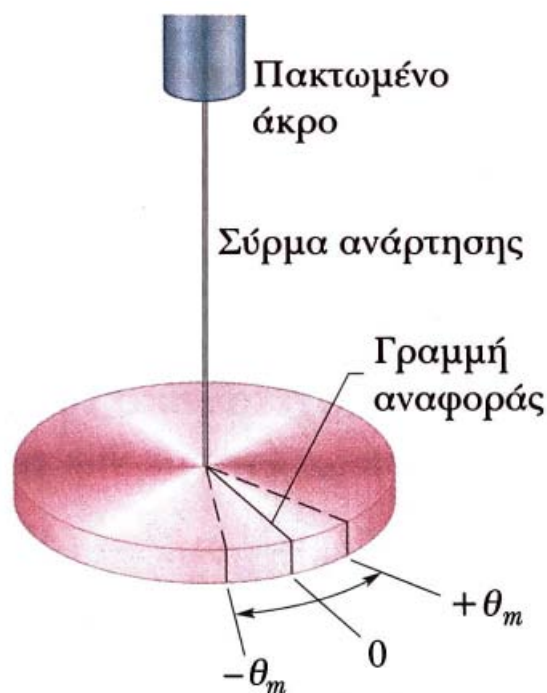
Αν στρέψουμε το δίσκο του σχήματος κατά γωνιακή μετατόπιση θ από τη θέση ηρεμίας του (όπου η γραμμή αναφοράς είναι $\theta = 0$) και τον αφήσουμε, θα ταλαντωθεί γύρω από αυτή τη θέση εκτελώντας γωνιακή απλή αρμονική κίνηση.

Η περιστροφή του δίσκου κατά γωνία θ προς οποιαδήποτε κατεύθυνση εισαγάγει τη ροπή επαναφοράς που δίνεται από την σχέση:

$$\tau_z = -\kappa\theta$$

κ είναι η σταθερά στρέψης, η οποία εξαρτάται από το μήκος, τη διάμετρο και το υλικό του σύρματος ανάρτησης.

Η παραπάνω εξίσωση είναι η γωνιακή μορφή του Νόμου του Hooke: $F = -kx$.



Χρησιμοποιώντας το περιστροφικό ανάλογο του 2^{ου} Νόμου του Νεύτωνα για στερεό σώμα έχουμε:

$$\left. \begin{aligned} \tau_z &= -\kappa\theta \\ \Sigma \tau_z &= I a_z = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\kappa\theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \Leftrightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{\kappa}{I}\theta$$

Η εξίσωση αυτή θυμίζει την εξίσωση για την απλή αρμονική ταλάντωση, με την μόνη διαφορά ότι:

- το x έχει αντικατασταθεί από το θ
- το $\frac{k}{m}$ έχει αντικατασταθεί από το $\frac{\kappa}{I}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\theta}{dt^2} &= -\frac{\kappa}{I}\theta \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= -\frac{k}{m}x \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} x \rightarrow \theta \\ \frac{k}{m} \rightarrow \frac{\kappa}{I} \end{cases}$$

Έχουμε λοιπόν να κάνουμε με μια μορφή γωνιακής απλής αρμονικής ταλάντωσης.

Αυτό μας κάνει να υποψιαστούμε ότι η εξίσωση που μας δίνει την περίοδο της γραμμικής απλής αρμονικής κίνησης, μπορεί να μετατραπεί σε εξίσωση της περιόδου για την γωνιακή απλή αρμονική κίνηση (ΑΑΚ).

Αντικαθιστούμε την σταθερά του ελατηρίου k , με την αντίστοιχή της κ και την μάζα m με τη ροπή αδράνειας I του περιστρεφόμενου δίσκου. Οι αντικαταστάσεις που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω:

Εξίσωση περιόδου για την γραμμική ΑΑΚ: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Εξίσωση περιόδου για την γωνιακή ΑΑΚ: $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{\kappa}}$

Η γωνιακή συχνότητα ω και η συχνότητα f δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις, αντιστοίχως, με την ίδια αντικατάσταση:

$$\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{I}}$$

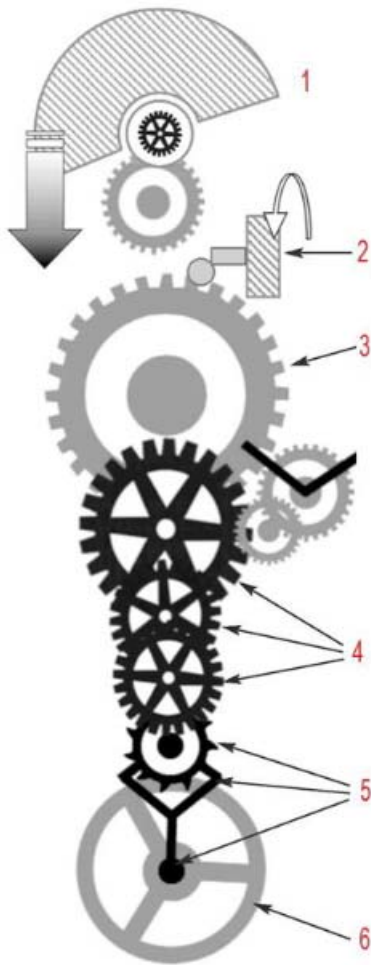
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa}{I}}$$

$$\theta = \Theta \cos(\omega t + \phi), \text{ όπου το } \Theta \text{ παίζει τον ρόλο του γωνιακού πλάτους.}$$

Είναι καλό που η κίνηση του σπονδύλου είναι απλή αρμονική. Σε αντίθετη περίπτωση, η συχνότητα θα μπορούσε να εξαρτάται από το πλάτος και το ρολόι είτε θα πήγαινε πολύ γρήγορα, είτε πολύ αργά, με αποτέλεσμα το σπειροειδές ελατήριο να ξεκουρδίζοταν.

Με την κίνηση του ρότορα, φορτίζεται αυτόματα το κύριο ελατήριο και σφίγγεται. Στη συνέχεια, ξετυλίγεται αργά και κινεί τα γρανάζια. Αυτά με τη σειρά τους αναγκάζουν τους δείκτες να κινηθούν. Σε ένα ψηφιακό ρολόι τη θέση του ελατηρίου παίρνει ένας μικρός κρύσταλλος χαλαζία.

Τα μέρη ενός σύγχρονου μηχανικού ρολογιού με ελατήριο:



1. Ρότορας (μόνο στα αυτόματα μηχανικά ρολόγια)

Αυτόματη φόρτιση: με αντίβαρο ταλάντωσης και γρανάτζι υποπολλαπλασιασμού. Έχει δυνατότητα περιστροφής 360° και μπορεί να περιστρέφεται και προς τις δύο κατευθύνσεις, αρκεί να υπάρχουν γρανάτζια αντιστροφής της κίνησης (reverser).

2. Κορώνα

Άξονας κουρδίσματος για την φόρτιση του ελατηρίου (και στα αυτόματα ρολόγια).

3. Ελατήριο/Βαρελάκι

Παρέχει την μηχανική ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία του ρολογιού. Διαθέτει αυτονομία από 42 έως και 220 ώρες χωρίς κούρδισμα.

4. Γρανάζωμα μετάδοσης κίνησης/Τροχοί

Μεταφέρουν την ελαστικότητα στο σύστημα διαφυγής και μεταδίδουν την μηχανική ενέργεια για την κίνηση των δεικτών.

5. Σύστημα διαφυγής(άγκυρα, φουρκέτα, ελλειψοειδές στοιχείο)

Εμποδίζει την ανεξέλεγκτη απελευθέρωση ενέργειας, καθώς αναστέλλει περιοδικά τη δύναμη που μεταδίδεται στο γρανάζωμα. Έτσι, η ενέργεια μεταφέρεται στο μπαλανσιέ, το οποίο στη συνέχεια αρχίζει την ταλάντωση.

6. Ρυθμιστικό όργανο

Ρυθμίζει τον τροχό διαφυγής. Πρόκειται για το μπαλανσιέ και την τρίχα. Η λειτουργία του είναι ανάλογη με εκείνη του εκκρεμούς στα ρολόγια τοίχου.

Ρότορας

Ο ρότορας αποτελεί το πρώτο εξάρτημα της μηχανής ενός αυτόματου ρολογιού. Πρόκειται για έναν ημικυκλικό δίσκο, ο οποίος περιστρέφεται ελεύθερα με κάθε κίνηση του χεριού, με αποτέλεσμα να φορτίζεται αυτόματα το πρωτεύον ελατήριο (mainspring). Έπειτα, λόγω του βάρους του επιστρέφει στην κατακόρυφη θέση του. Για την συνεχή φόρτιση του ελατηρίου, υπάρχει ένα ειδικό σύστημα πολλαπλασιασμού των περιστροφών του.

Ο Ελβετός ωρολογοποιός, Abraham-Louis Perrelet (1729-1826) ήταν ο πρώτος που δημιούργησε ρότορα και για αυτό θεωρείται ο «πατέρας» του αυτόματου ρολογιού. Η πρωτοποριακή αυτή ιδέα του βρήκε εφαρμογή στα ρολόγια χειρός, άσχετα αν ο ίδιος ζούσε στην εποχή των ρολογιών τσέπης. Σε αυτά, το σύστημα του ρότορα δεν μπορούσε να αποδοθεί ικανοποιητικά, αφού δεν επαρκούσε η κίνηση μέσα στην τσέπη ώστε να φορτίζεται το πρωτεύον ελατήριο.

Την ίδια περίοδο, ο Ελβετός ωρολογοποιός Abraham-Louis Breguet (1747-1823), βελτίωσε περεταίρω τα ρολόγια αυτόματης φόρτισης, δίνοντάς τους την ονομασία «perpetuelles» που στα γαλλικά σημαίνει αέναος. Η προέλευση αυτού του όρου, χρησιμοποιήθηκε από την ελβετική εταιρεία Rolex Oyster Perpetual.

Κατά τον 19^ο αιώνα, υπήρξαν πολλά ακόμη επιτεύγματα στο χώρο της ωρολογοποιίας με αποκορύφωμα αυτό της ελβετικής εταιρείας Rolex, η οποία τελειοποίησε το σύστημα του ρότορα το 1931 (την εποχή του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου). Έτσι, τα αυτόματα ρολόγια έγιναν πλέον δημοφιλή.



Ρότορας μηχανής ETA

(Το κίτρινο βελάκι δείχνει το γρανάτζι περιστροφής)



Pajlot 2627

Ελατήριο και βαρελάκι

Το ελατήριο (mainspring) είναι ένα μεταλλικό σπειροειδές έλασμα, το οποίο αποτελεί την «πηγή ισχύος» του μηχανικού ρολογιού, φροντίζοντας παράλληλα για την αυτονομία του.

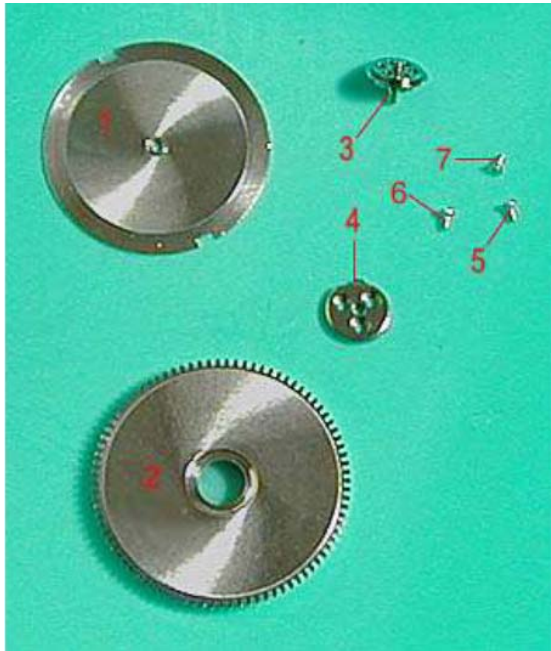
Βρίσκεται ενσωματωμένο μέσα στο βαρελάκι (ή μπαρλιγιέ), το οποίο κλείνει με καπάκι και περιμετρικά φέρει οδοντώσεις. Το βαρελάκι περιστρέφεται σε ένα άξονα. Το εσωτερικό άκρο του ελατηρίου είναι γαντζωμένο σε αυτό τον άξονα, ενώ το εξωτερικό του άκρο είναι στερεωμένο στο βαρελάκι. Η καστανία που υπάρχει στον άξονα είναι διαμορφωμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να εμποδίζει το ελατήριο να περιστρέψει αντίστροφα τον άξονα.

Η περιστροφή του άξονα που διέρχεται από το βαρελάκι, γίνεται με τη φόρτιση, είτε από τον ρότορα, είτε από την κορώνα. Έτσι, το ελατήριο τυλίγεται πιο σφιχτά γύρω από τον άξονα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση του. Μετά την φόρτιση, ο άξονας παραμένει σταθερός, ενώ η τάση του ελατηρίου αρχίζει να περιστρέφει το βαρελάκι. Η εμπλοκή του άξονα με τις εξωτερικές οδοντώσεις που φέρει το βαρελάκι απαρτίζουν το πρώτο πηνίο του συστήματος οδοντωτών τροχών του ρολογιού. Επομένως, το ελατήριο φορτίζει από τον άξονα, αλλά παρέχει κίνηση στο μηχανισμό του ρολογιού μέσω του βαρελιού. Χάρη σε αυτήν τη διάταξη, είναι εφικτή η διαρκής τροφοδοσία με ενέργεια τόσο του ρολογιού όσο και του κύριου ελατηρίου.



Κύριο ελατήριο και βαρελάκι

Μέρη βαρελιού/μπαρλιγιέ:

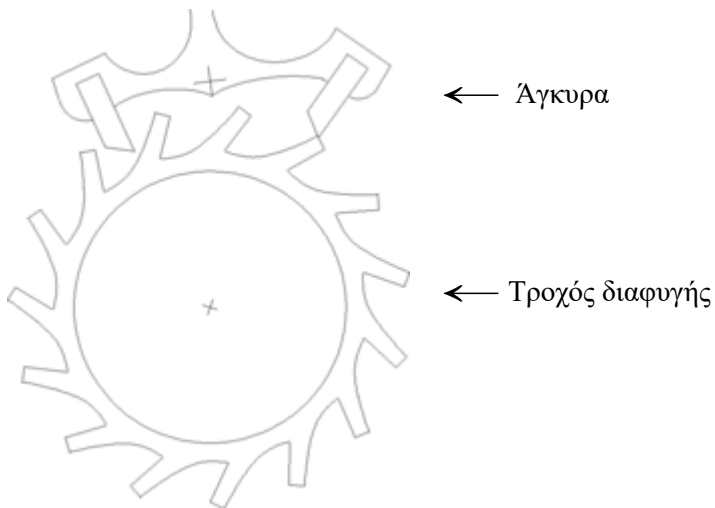


1. Βαρελάκι κύριου ελατηρίου
2. Καπάκι βαρελιού
3. Κάτω τμήμα άξονα βαρελιού
4. Άνω τμήμα άξονα βαρελιού
5. Βίδες άξονα βαρελιού
6. Βίδες άξονα βαρελιού
7. Βίδες άξονα βαρελιού

Rolex Daytona

Μπαλανσιέ (balance wheel)

Το μπαλανσιέ και η τρίχα απο τελούν τα ρυθμιστικά όργανα ενός μηχανικού ρολογιού. Η ακριβής και περιοδική ταλάντωση εμπρός-πίσω του μπαλανσιέ θέτει σε λειτουργία την άγκυρα, η οποία είναι ένα μεταλλικό εξάρτημα σε σχήμα "τ". Στο ένα άκρο της φέρει δυο ρουμπίνια που έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα και λέγονται λεβέ «leve». Στο κέντρο έχει άξονα από ατσάλι και στο άλλο άκρο της φέρει κατάληξη σχήματος τρίαυνας.



Η αποφόρτιση του κύριου ελατηρίου γίνεται μέσω του τροχού διαφυγής, του γραναζιού δευτερολέπτων, του μετακεντρικού γραναζιού, του κεντρικού γραναζιού, καθώς και του βαρελιού του κύριου ελατηρίου. Το μπαλανσιέ μαζί με το ελατήριο απαρτίζουν το λεγόμενο «περιστροφικό σύστημα ταλάντωσης».



Ο ταλαντωτής, που ελέγχεται από σπειροειδές ελατήριο, ταλαντεύεται γύρω από τον δικό του άξονα με περίοδο σταθερής ταλάντωσης, η οποία εξαρτάται από:

- τη ροπή αδράνειας του ταλαντωτή
- την ελαστικότητα
- το μήκος του ελατηρίου

Η επιτάχυνση της βαρύτητας επομένως δεν επηρεάζει την κίνηση του ρολογιού.

Το μπαλανσιέ πρέπει να είναι απόλυτα ζυγισμένο, το οποίο σημαίνει ότι κανένα μέρος του δεν πρέπει να βρίσκεται εκτός ισορροπίας σε σχέση με κάποιο άλλο. Μπορεί να είναι απλό ή αντισταθμιστικό, με ή άνευ ρυθμιστικών βιδών στην εξωτερική του στεφάνη (περίμετρο). Στα περισσότερα σύγχρονα ρολόγια χειρός, το μπαλανσιέ είναι κατασκευασμένο από Glucydur, με δύο ή τρεις βραχίονες και λεία περιμετρική στεφάνη (χωρίς βίδες στην εξωτερική του περίμετρο).

Στα σύγχρονα κράματα των ελατηρίων, οι βίδες είναι πλέον περιττές, διότι τα ίδια τα κράματα φροντίζουν για τη διόρθωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Επιπλέον, η απουσία βιδών παρέχει μεγαλύτερη αεροδυναμική απόδοση και λιγότερες πιθανότητες να συσσωρευτεί βρωμιά, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις στο χρονισμό.



Μπαλανσιέ από ρολόι Dufur με 10 ρυθμιστικές βίδες και δύο έκκεντρα αντίβαρα στους βραχίονές του για τη μικρορύθμιση

Τρίχα (hairspring)

Η τρίχα/σπειροειδές ελατήριο αποτελεί την καρδιά του ρολογιού, καθώς είναι απαραίτητο για την κίνηση του μπαλανσιέ. Όταν έχει μετακινηθεί στην τέρμα δεξιά θέση του, ο τροχός του μπαλανσιέ έχει κουρδίσει την τρίχα. Η δύναμη της τρίχας, καθώς ξεκουρδίζεται, αντιστρέφει τη φορά κίνησης του μπαλανσιέ και το ωθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλ. τέρμα αριστερά. Στη θέση αυτή, ο τροχός έχει αποφορτίσει εντελώς την τρίχα και η δύναμη της τρίχας καθώς αρχίζει να ξαναφορτίζει αντιστρέφει ξανά τη φορά κίνησης του μπαλανσιέ και το ωθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, κ.ο.κ



ΕΞΕΛΙΞΗ

Ηλεκτρικά ρολόγια (κρύσταλλοι χαλαζία)

Συνέχεια των μηχανικών ρολογιών ήταν τα ηλεκτρικά ρολόγια, πρόκειται για ρολόγια που αποτελούνται από ένα σύγχρονο κινητήρα και διάφορα γρανάζια υποπολλαπλασιασμού. Ο σύγχρονος αυτός κινητήρας έχει ταχύτητα περιστροφής που εξαρτάται αποκλειστικά από τη συχνότητα του ρεύματος (εναλλασσόμενου) που τον τροφοδοτεί. Αν λοιπόν η συχνότητα αυτή είναι σταθερή, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι επίσης σταθερή, πράγμα που επιτρέπει την μέτρηση του χρόνου με σχεδόν απόλυτη ακρίβεια.

- Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται ποιοτικά με την μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος.
- Ένα χαρακτηριστικό του χαλαζία (SiO_2) είναι ότι εμφανίζει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και κρυσταλλώνεται σε τριγωνικό σύστημα. Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, αν πιεστεί κατά μήκος του κύριου άξονα παράγει ηλεκτρική τάση.



Κρύσταλλοι χαλαζία

(<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%B1%CE%BB%CE%B1%CE%B6%CE%AF%CE%B1%CF%82>)

Βάση αυτής της αρχής δουλεύουν όλα τα ηλεκτρονικά ρολόγια χαλαζία (quartz), είτε αυτά είναι του χειριού είτε επιτραπέζια. Αυτά περιέχουν έναν κρύσταλλο χαλαζία, του οποίου το πάχος είναι πολύ καλά καθορισμένο. Το πάχος του κρυστάλλου καθορίζει τη συχνότητα με την οποία πάλλεται (λεπταίνει ή γίνεται παχύτερο) όταν δουλεύει το ρολόι. Ο κρύσταλλος συνήθως πάλλεται σε πολύ υψηλή συχνότητα, δηλαδή λεπταίνει και στη συνέχεια γίνεται παχύτερος 10.000 ή και 100.000 φορές το δευτερόλεπτο. Έτσι ο μηχανισμός στο ρολόι μετράει τις φορές που πάλλεται ο κρύσταλλος και επειδή η συχνότητα του κρυστάλλου είναι γνωστή μετράει π.χ 10.000 παλμούς για να προσθέσει 1 δευτερόλεπτο. Τα ρολόγια χαλαζία χρειάζονται αλλαγή μπαταρίας σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Κιουρί το 1880 (Pierre και Paul-Jacques Curie). Ο πρώτος κρύσταλλος χαλαζία εφαρμόστηκε στην ωρολογοποιία το 1929.

Έπειτα, κατασκευάστηκε πληθώρα ατομικών ρολογιών, τα οποία χρησιμοποιούσαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες άλλων στοιχείων και συγκεκριμένα την γνωστή ατομική συχνότητα συντονισμού ενός ατόμου.

Το πρώτο όμως πραγματικά ακριβές ατομικό ρολόι χτίστηκε το 1955 στο Εθνικό Εργαστήριο Φυσικής του Ηνωμένου Βασιλείου και βασίστηκε στο άτομο καισίου-133 το οποίο ταλαντώνεται ακριβώς 9.192.631.770 κάθε δευτερόλεπτο. Τα ατομικά ρολόγια είναι επίσης η βάση πολλών σύγχρονων εφαρμογών όπως π.χ. του GPS (Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης), μιας και κάθε δορυφόρος περιέχει ένα ατομικό ρολόι.

Η μεγάλη εξέλιξη των ρολογιών γίνεται ευδιάκριτη συγκρίνοντας τις πρακτικές διαφορές των ηλεκτρικών ρολογιών από τα μηχανικά.

- Τα ηλεκτρικά ρολόγια έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, γιατί ο ταλαντωτής χαλαζίας είναι πολύ πιο σταθερός από το balance wheel του μηχανικού.
- Τα ρολόγια χαλαζία χάνουν το πολύ 1 λεπτό τον χρόνο και μερικά καταγράφουν ακόμα και δέκατα του δευτερολέπτου. Δεν χρειάζονται κούρδισμα όπως τα μηχανικά.
- Οι διαστάσεις του χαλαζία είναι αρκετά μικρές σε αντίθεση με το μέγεθος του balance wheel, επιτρέποντας στην κάθε εταιρία να παράγει πιο κομψά ρολόγια.
- Δεν χρειάζονται συντήρηση παρά μόνο αλλαγή μπαταρίας. Τα μηχανικά χρειάζονται συχνά καθαρίσμα και λάδωμα.

Εξελίξεις με την βοήθεια κραμάτων

Σε έναν ταλαντωτή με ελατήριο, μια μεταβολή της θερμοκρασίας, προκαλεί μεταβολή του μήκους του ελατηρίου με αποτέλεσμα να αλλάζει η περίοδός του. Σήμερα, για την κατασκευή του ελατηρίου του ταλαντωτή χρησιμοποιούμε **Elinvar** (κράμα Fe, Ni, Cr) και **Invar** (κράμα Fe, Ni) αντί του ατσαλιού, καθώς τα δύο αυτά υλικά έχουν συντελεστή διαστολής σχεδόν μηδέν.

Η ανακάλυψη των κραμάτων invar και elinvar περί τα τέλη του 20ου αιώνα από τον Charles Edouard Guillaume άνοιξε το δρόμο για ένα νέο είδος ελατηρίων με σχεδόν μηδενικό συντελεστή θερμικής διαστολής, τα οποία ήταν αντιμαγνητικά (ανθεκτικός σε μαγνητικά πεδία μεγαλύτερα από 1,5 Tesla) και ανθεκτικά στην οξείδωση.

Η πρόοδος του Guillaume προς το ιδανικό ελατήριο τελειοποιήθηκε τη δεκαετία του '30 από τον Dr. Straumann με την έλευση του κράματος Nivarox. Ως εμπορική ονομασία, το **Nivarox** είναι ένα γερμανικό ακρωνύμιο για το "Nicht variabel oxydfest" ή το "Non-Variable Non-Oxidizing".

Εκτός από τα βασικά στοιχεία του Invar, στο Nivarox χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες κοβαλτίου μαζί με ελαφρώς περισσότερες ποσότητες χρωμίου, καθώς και νικέλιο, τιτάνιο και σίδηρος. Το αποτέλεσμα είναι ένα ελατήριο ανθεκτικό στην υγρασία, αντιμαγνητικό, ανθεκτικό στη διάβρωση και με σχεδόν μηδενικό συντελεστή θερμικής διαστολής. Σε συνδυασμό με τον τροχό του μπαλανσέ από Glucydur, αυτή η τρίχα κατέστησε την ανάγκη για μπαλανσέ αντιστάθμισης σχεδόν απαρχαιωμένη.

Οι σύγχρονες τρίχες, ωστόσο, διατίθενται σε διάφορα κράματα τα οποία έχουν αναπτυχθεί για να συμπληρώνουν τις φυσικές ιδιότητες του μπαλανσιέ. Ο συνδυασμός μπαλανσιέ-τρίχας αντισταθμίζει τα σφάλματα που προκαλούνται λόγω αλλαγών στη θερμοκρασία. Οι τρίχες πλέον κατασκευάζονται έτσι, ώστε να παρουσιάζουν τόσο χημική όσο και φυσική σταθερότητα, και να είναι ελαστικές και αντιμαγνητικές.

Οι νέες εξελίξεις στην τεχνολογία κατασκευής των ελατηρίων αυτών στα τέλη της δεύτερης χιλιετίας προσέφεραν μεγάλες δυνατότητες για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στα μηχανικά ρολόγια.

Οι έρευνες στην τεχνολογία βαθιάς χάραξης αντιδρώντων ιόντων συνεχίστηκαν, ώστε να προκύψουν τρίχες από πυρίτιο, η τρίχα Carbone του Gideon Levingston και άλλες τεχνολογικές εξελίξεις από τις εταιρείες Ulysse Nardin, την Patek Philippe, την A. Lange & Söhne και τη Rolex έχουν πλέον επαναπροσδιορίσει τους ορίζοντες της ακριβούς μηχανικής μέτρησης χρόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

- ο «ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΜΟΣ Α» – HALLIDAY, RESNICK, WALKER – ΕΚΔΟΣΕΙΣ GUTENBERG
- ο «ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ» – YOUNG, FREEDMAN - ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΖΗΣΗ
- ο «ΑΡΧΙΜΗΔΟΥΣ ΑΠΑΝΤΑ ΤΟΜΟΣ Γ» - ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΣΤΑΜΑΤΗ – ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
- ο ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ Γ. ΤΣΙΓΑΡΙΔΑ
- ο https://www.rologia-kaloustian.gr/MECHANICAL_AND_ELECTRONIC_WATCHES.pdf
- ο ΤΑ ΩΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΕΛΛΗΝΩΝ - KOTSANAS.COM
- ο ΕΓΚΥΚΛΟΠΑΙΔΕΙΑ ΔΟΜΗ - ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΟΛΟΓΙΑ